

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-09-03

## 膨張コンクリートのクリープ挙動に関する研究

古谷, 学 / FURUYA, Manabu

---

(発行年 / Year)

2005-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2005-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2004 年度 修士論文

# 膨張コンクリートのクリープ挙動 に関する研究

Study on Creep Behavior of Expansive Concrete

2005 年 2 月 21 日

法政大学大学院工学研究科 建設工学専攻修士課程(土木系)

土木材料実験室 (指導教員: 溝渕利明教授)

03R5115 古谷 学

## 概要

コンクリート構造物において、近年高機能化及び高耐久化が要求されつつある。このため設計の段階から、構造物に対する事前解析を行う必要があり、コンクリート構造物の事前解析においては、コンクリートのクリープ及び自己乾燥収縮が占める部分が多い。クリープの解析においては若材齢クリープの把握が解析結果の精度を大きく左右する。

また近年、施工において膨張材を混和した膨張コンクリートの適用が増加しつつある。膨張材を混和することで、膨張材の化学反応に伴う空隙の増加によりコンクリートの体積が増加し、自己収縮及び乾燥収縮に起因するひび割れを低減する効果が得られる。

膨張コンクリートのクリープ試験においては、水結合材比 45%程度まではクリープ則が成り立つことが確認されている。そこで本研究では水結合材比を 50、55、65%と変化させ、同時に各配合において鉄筋比を変化させていき膨張コンクリートのクリープ特性について検討を行った。

実験により膨張コンクリートの鉄筋拘束によるクリープ特性を把握し、クリープ係数の同定を行った。解析は既存式をもちいて Step by Step 法により行った。解析により、応力変動下におけるクリープ挙動をある程度評価する事ができた。

## **ABSTRSCT**

High performance concrete and high durability concrete are required for concrete structures. Then, it is necessary to predict life cycle of concrete structures in the step of designing. In prior analysis about creep and autogeneous of concrete should be considered to evaluate life cycle of concrete structures. Analysis of creep behavior is effect of properties of characteristic of creep in early age.

Recently, applications of expansive concrete are increasing in many concrete structures. It is effective in reducing crack caused by autogenous shrinkage and dry shrinkage that the volume of concrete increase by chemical reaction with mixing.

It has been confirmed that creep law is established on the expansive concrete within water-binder ratio 45% or less. Experiments were carried out to explore effect of varying water-binder ratio and reinforcement ratio for characteristics of creep in expansive concrete. The water-binder ratio was changed from 55% to 65% and reinforcement ratio was changed from 0.1% to 8.0%. From results of the creep experiments, it was made clear that characteristics of creep in the expansive concrete were affected by the restraint of reinforcing bar.

Using results of the creep experiments, the identification analysis of the creep coefficient was carried out. The identification analysis was carried out using the empirical equations evaluated in past studies with Step-by-Step method. From the analytical results, it was seemed to be possible to evaluate creep behaviors under the condition changed stress.

# 膨張コンクリートのクリープ挙動に関する研究

## 目次

第1章	序論	
1.1	背景	1
1.2	研究目的及び研究概要	2
第2章	既往の研究	
2.1	概説	3
2.2	膨張コンクリートに関する既往の研究	3
2.3	クリープ予測式に関する既往の研究	9
2.4	膨張コンクリートの膨張拘束に関する研究	13
2.5	重ねあわせを用いたひずみ解析に関する研究	15
第3章	強度特性試験	
3.1	概説	18
3.2	使用材料及びコンクリート配合	18
3.3	練混ぜ	18
3.4	フレッシュ試験及び凝結試験	18
3.5	強度試験	22
3.6	強度試験結果	23
第4章	クリープ試験	
4.1	概説	30
4.2	使用材料及びコンクリート配合	30
4.3	クリープ試験	30
4.4	クリープ試験結果	31
第5章	クリープ解析	
5.1	概説	61
5.2	実ひずみ近似	61
5.3	自由ひずみ近似	64
5.4	クリープ逆解析	65
5.5	クリープ解析	70

## 第6章 結論

6.1 膨張コンクリートクリープ特性	-----115
6.2 膨張コンクリートのクリープ解析	-----115
6.3 今後の課題	-----116

# 第1章 序論

## 1.1 背景

## 1.2 研究目的及び研究概要

## 1.1 背景

コンクリート構造物の設計～施工～管理において、近年これまでの仕様照査型から性能照査型へと移行しつつある。経験や実績に基づきその品質が確かめられた仕様を示す形式から、要求される性能を明示し、これを定量的に照査する形式に改めるものであり、これまで以上に性能評価技術の精度を上げ、その適用範囲を拡大し、コンクリート構造物に関する設計・計画・施工・管理の自由度を高めようとするものである。そのため、新材料や新工法等これまで採用することができなかったものを採用することができるようになる一方で、これまで以上に製造者、設計者、施工者はそれぞれ性能を保証する責任を持つことになる。そこで性能照査型への移行に伴い、構造物に対し事前解析を行い、構造物の耐久性を事前に把握し適切な対策を講じる必要がある。またコンクリート構造物の事前解析においては、コンクリートのクリープ、自己収縮及び乾燥収縮に関する事項が大部分を占めることから、クリープ及び自己(乾燥)収縮を的確に評価することが必要なこととなってくる。

一方、近年コンクリート構造物の施工において膨張コンクリートの適用例が増加しつつある。膨張コンクリートとは膨張材を混和したコンクリートのことであり、膨張材の化学反応によりコンクリート体積を増加させることで、体積変化に伴う収縮によるひび割れに対して優れた抵抗性を示す効果がある。膨張材には複数の種類があり大別するとカルシウムサルホアルミネート系(エトリンサイト系)と石灰系があり、前者では主成分であるエトリンサイトの生成に伴う空隙の増加によりコンクリート体積が増加するといわれている。膨張コンクリートの施工例はすでに数多くあり、その優れたひび割れ抵抗性については多くの実績があり、また収縮低減剤と併用するとひび割れ抵抗性がさらに向上するという報告もある。しかし、膨張材の膨張効果は温度及び湿度などの環境条件や使用セメント等に敏感に影響されることから、養生方法や使用材料によっては期待する膨張量を得られないばかりか遅れ膨張などマイナスの効果さえ生じてしまう。つまり、膨張コンクリートを使用する場合は膨張コンクリートに関する知識や、それに基づく的確な技術及び判断が要求される。膨張材を混和した場合のコンクリートの膨張量の事前把握については様々な研究及び議論がなされているが、現在のところ定量的に評価する有用な手法は提案されておらず、膨張コンクリートの普及において大きな課題となっている。

現在、膨張コンクリートの諸特性に関する的確かつ定量的な把握を可能とする技術が待望されており、そのうちの一つに膨張コンクリートのクリープ挙動についての把握がある。膨張コンクリートは、膨張作用の影響で膨張材無混和のコンクリート(普通コンクリート)と比べ異なった内部構造あるいは反応生成物を有していることから、そのクリープ挙動については普通コンクリートとは大きな違いがあるといわれている。膨張コンクリートのクリープに関する研究は過去にも行われているが、データ数が少ないことから未だにクリープを定量的に評価するには至っていないのが現状である。膨張コンクリートのクリープについて正確な理解が必要となってくる。

## 1.2 研究目的及び研究概要

昨年度までの研究により、膨張コンクリートのクリープ試験において、水結合材比( W/B )45%程度までクリープ則が成り立つことが確認されている。そこで本研究では水結合材比を 50~65%まで変化させ、同時に各配合において鉄筋比を変化させ行った膨張コンクリートのクリープ特性について検討を行った。実験により膨張コンクリートの鉄筋拘束によるクリープ挙動を把握し、クリープ係数の同定を行った。解析は、既存の MC90 式に膨張コンクリートのクリープ挙動を表せるよう修正を加えた式を用いて、Step by Step 法により行った。

## 第 2 章 既往の研究

- 2.1 概説
- 2.2 膨張コンクリートに関する既往の研究
- 2.3 クリープ予測式に関する既往の研究
- 2.4 膨張コンクリートの膨張拘束に関する既往の研究
- 2.5 重ねあわせを用いたひずみ解析に関する既往の研究

## 2.1 概説

本研究を行うにあたり関連する既往の研究を調査した。本章では膨張コンクリートに関する研究、クリープ予測式に関する研究、膨張コンクリートの膨張拘束に関する研究、重ね合わせを用いたひずみ解析に関する研究、の4点についてまとめた。

## 2.2 膨張コンクリートに関する既往の研究<sup>[1]</sup>

### 2.2.1 膨張材

膨張材とは、コンクリートの硬化過程でその化学反応により、コンクリートの体積を増加させる混和材料である。コンクリート用膨張材は、化学反応及び反応生成物の違いにより、カルシウムサルホアルミネート系（エトリンガイト系）と石灰系とに大別される。両者ともに化学量論的には体積収縮を起こす反応であるが、カルシウムサルホアルミネート系は生成するエトリンガイト針状結晶が、石灰系では六角板状の水酸化カルシウムの結晶が、それぞれ空隙を作りながら成長することにより、見かけの体積が増加するといわれている。近年、この他に、従来の単位量を少なくしても同様な膨張性能を発揮する低添加型膨張材や、早強性を付与した早強型膨張材、温度応力低減のため水和熱を抑制する水和熱抑制型膨張材も開発されている。この他に酸化マグネシウムの水和や鉄粉の酸化による膨張材もあるが、これらは膨張のコントロールが難しいといわれている。

### 2.2.2 膨張機構

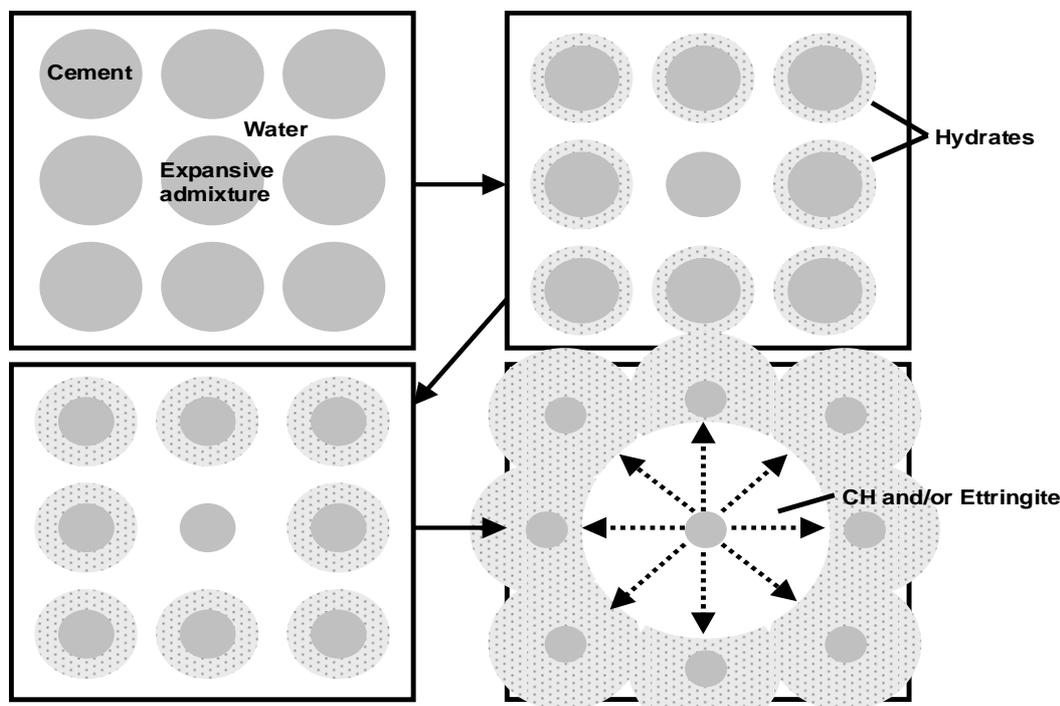


図-2.1 膨張材を混和したセメントペーストの凝結硬化のモデル

コンクリート用の膨張材の膨張機構を考える上で、静的破砕剤の膨張圧発生機構と照らし合わせて考えることは非常に重要であるといわれている。そして静的破砕剤の膨張圧発生機構を基にした、膨張材の凝結硬化モデルが図-2.1である。

膨張材を混和したセメントペーストにおいて、セメントや膨張材が水和してある時点で水和物同士が接触する。この点を臨界水和率といい、セメントペーストにおける凝結の始発と考えることができる。つまり組織形成が始まった時点である。そして膨張材はセメントマトリクスを介在して押し合う、または膨張力をセメントマトリクスに預ける。そしてその結果コンクリート体積が増加すると考えられる。このことからセメントマトリクスは膨張を伝達するための場であると考えることができる。また、膨張力を伝達することのできない臨界水和率よりも以前(凝結以前)では膨張は生じない。言い換えれば、凝結以前に反応した膨張材はコンクリートの膨張には寄与しないロス分と考えることもできる。

膨張材の膨張機構については様々な説があり、機構解明のために多数の研究が行われておりその中に結晶成長説、膨潤説、粉化説などがある。しかしいずれの研究報告も、水和反応は必ず化学収縮を伴うにも関わらず膨張現象を引き起こすという矛盾を説明できるものではなかった。

この矛盾を説明できる説としては空隙説がある。空隙説とは硬化体の微細構造へ着目した理論である。盛岡らの研究<sup>[2]</sup>によると、膨張材混和ペーストは無混和と比較して結合水量や化学収縮はむしろ大きい値になるにも関わらず、自己膨張を呈して硬化体の空隙率は大きくなる。この際、毛細管空隙の増加を伴うため、膨張性水和物がこの大きさの毛細管空隙を作り出しながら膨張現象をもたらすものと推察している。

### 2.2.3 膨張性状に与える各種要因

本項では膨張材を混和したコンクリートの膨張性状に与える要因を挙げる。

#### 練混ぜ方法の影響

収縮補償を目的に膨張材を使用する場合、単位膨張材量は  $20 \sim 40\text{kg/m}^3$  が一般的であるが、その量は  $1\text{m}^3$  のコンクリートを製造する場合、使用材料の総量に対して 2% にも満たない。その様な場合、コンクリート中の膨張材が均一に練り混ぜられているかが問題となる。練混ぜが不十分であると、所定の膨張特性が得られないばかりか、膨張材が偏在している箇所があれば、局所的に過大な膨張が生じ、構造物に欠陥を与えることになる。このため膨張材メーカーは、マニュアルに膨張材使用時には練混ぜ時間を延長するべきであると示している。

#### 養生の影響

膨張材は、一般のコンクリート養生条件下において、1 週間で水和反応が終了するような設計となっている。膨張材をこのような反応特性とした理由は次の通りである。膨張材はセメントマトリクスを介在して膨張力を発揮する。そのため膨張材の水和反応が早い場合、膨張コンクリートは塑性変形して膨張ひずみや拘束された応力を導入することはできない。また、反応

が遅い場合はコンクリートが十分な強度を有しているために膨張を有効に伝達できないことや、後の膨張により強度が低下することが考えられるためである。

図-2.2 に養生日数と一軸拘束膨張率試験結果を示す<sup>[3]</sup>。材齢3日以降の膨張ひずみの絶対値に関しては、養生日数による影響は小さいが、その後の収縮ひずみに関しては養生日数が減少するとともに大きくなっている。初期養生を長く行うことでセメント自体の水和も促進し、セメントマトリックスの強度発現も早くなることから、膨張力を効果的に導入できる。このことから、土木学会コンクリート標準示方書では5日間十分な湿潤養生をすることを定めている。また、初期湿潤養生を7日実施した後に乾燥を受けた場合でも、高湿度や降雨により膨張量が回復するという報告もあり、膨張コンクリートにとって初期養生は絶対的な必要条件であるといえる。

また、打込み後の温度上昇量が大きくなると膨張コンクリートの膨張量が大きくなる傾向にあり、打込み温度にも影響を受けることが分かっている(図-2.3)。

#### セメント種類の影響

膨張コンクリートの膨張速度や膨張率は使用するセメントによって異なる。それは膨張発現速度とコンクリートの強度発現速度の兼ね合いによるもので、強度発現が遅い場合には膨張が生じやすい。

一般的なポルトランドセメントの範疇では同一単位膨張材量とした場合、セメントの種類が膨張性状に与える影響は少ないとされているが、低熱ポルトランドセメントのように初期の強度発現が遅いセメントは膨張が大きくなる傾向がある。高炉セメントのように高炉スラグ微粉末を含む場合には、スラグの反応に石膏が消費されてしまうことによって膨張が小さくなると指摘されている<sup>[4]</sup>。しかし、この傾向はカルシウムサルホアルミネート系の膨張材を使用した場合に限った現象であり、石灰系の膨張材では普通ポルトランドセメントに同種膨張材を混和

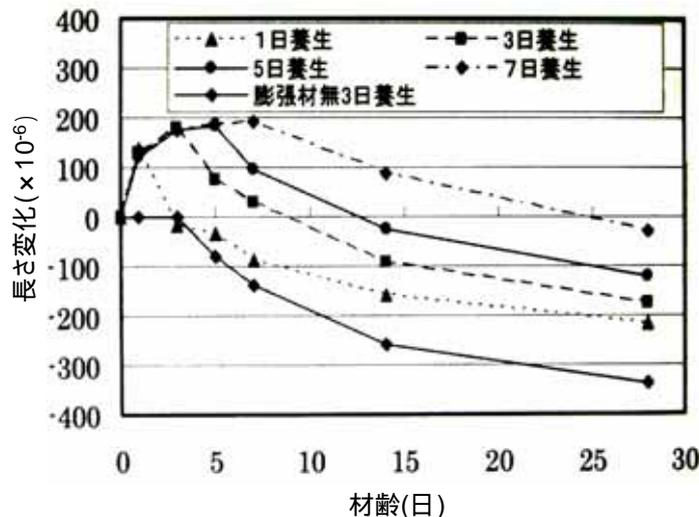


図-2.2 養生日数と長さ変化の関係

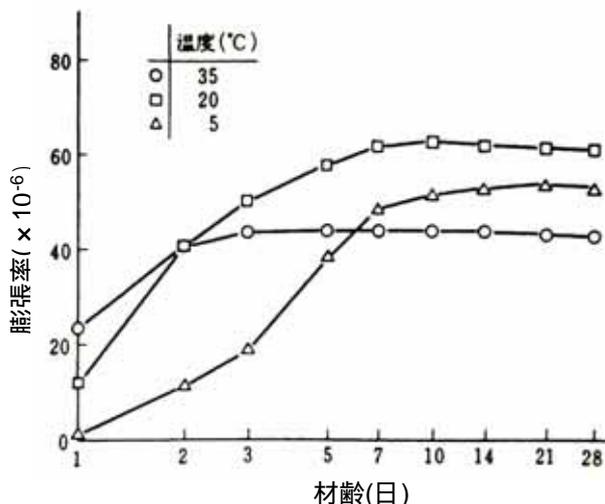


図-2.3 打込み時からの養生温度が膨張率と材齢に及ぼす影響

した場合と同等の膨張性状が得られることが報告されている<sup>[5]</sup>。

#### 混和剤の影響

混和剤の選定にあたっては、基本的には使用目的にあったものの中から、品質の均一性や使用実績等を十分に検討して選択すると共に、正しい使用方法で用いることが重要である。マスコンクリート等に適した水和熱抑制タイプの膨張材を使用した場合は、通常のコンクリートよりも凝結時間が遅延する傾向があるので、水和熱抑制タイプの膨張材と遅延形の混和剤と併用すると、凝結時間が著しく遅延する場合があります、両者の併用は基本的に避けることが推奨されている。また、急結剤と併用すると十分な膨張が得られない場合がある。

膨張材による膨張反応は、セメントの水和反応と競う関係にあることから、混和剤を使用する上で留意しなければならないことは、セメントの水和反応速度に対する影響である。使用する混和剤が標準形のようにセメントの水和反応速度に大きな影響が無い場合は、一般にその影響は小さいとされている。しかし、凝結時間を遅延あるいは促進する混和剤を使用する場合は、膨張性状に影響する場合があります、特に水和熱抑制タイプの膨張材を使用する場合は注意する必要がある。

#### 拘束条件の影響

六車は<sup>[6]</sup>において、無拘束の場合のいわゆる自由膨張ひずみが、鋼材による拘束のもとでの膨張ひずみから外挿される鉄筋比0における膨張ひずみとは著しく異なることから、有効自由膨張ひずみという概念を提示している。

図-2.4は拘束鉄筋比と膨張ひずみの関係の一例を示したもので、12×12×70cmの膨張コンクリート柱体の軸方向自由膨張および鉄筋拘束のもとでの膨張を実測した結果である。水セメント比は35%で、CSA系膨張材をセメント質量に対して10、13、15%混入している。拘束鉄筋比は0.46、0.93、1.61%である。六車は図-2.33で注目する点として、無拘束の場合の自由膨張ひずみと鉄筋比0.46%の拘束のもとでの膨張ひずみとが著しく相違する点を指摘して、鉄筋比と膨張ひずみの関係曲線を鉄筋比0の位置まで外挿して得られる膨張量が有効自由膨張ひずみであり、無拘束の場合の自由ひずみと有効膨張ひずみとの差はわずかな拘束によって消失してしまう、いわゆる無効膨張ひずみとしている。

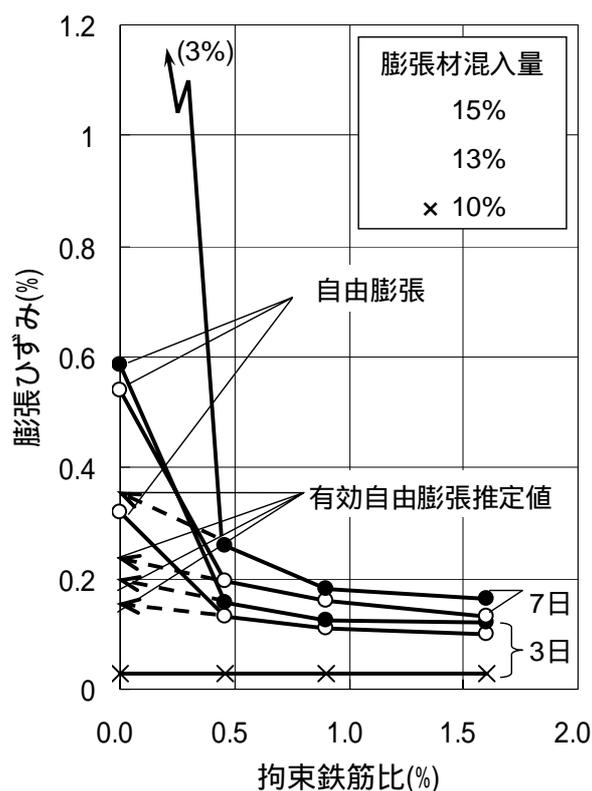


図-2.4 拘束鉄筋比と有効自由膨張

そして無効膨張ひずみは膨張材の混入量が多くなるほど大きくなるので、拘束なしに膨張させると膨張による内部組織の破壊を伴う恐れがあることや、膨張モルタル、膨張コンクリートの諸性質の研究にあたって無拘束の自由膨張体による結果から論ずることは、あまり意味がないばかりか、場合によっては誤った判断を下す危険性があることに注意を促している。

#### 2.2.4 膨張材混和が与えるコンクリートの長期的性状への影響

##### 強度

強度及び弾性係数ともに無添加品と同等以上であるといわれている。膨張材の反応生成物であるエトリンガイト相は、多量の結晶水を保有しているため長期的(材齢6ヶ月以降)には膨張コンクリートの方が高い値を示すという報告<sup>[7]</sup>もある。また実構造物からコア抜きした膨張コンクリートサンプルの組織観察を行った結果、35年間経過後もエトリンガイトの針状結晶が残存しており、遅れ膨張破壊も生じていないことが確認されている<sup>[8]</sup>。

##### 中性化に対する抵抗性

長期的にも概ね無添加品と同等、もしくは中性化が遅い傾向になる<sup>[8]</sup>。

##### 水密性と塩化物イオンの侵入に対する抵抗性

水密性については、組織の緻密化により普通コンクリートと比較して透水係数は同等以下である<sup>[9]</sup>。

##### 耐酸性と対硫酸塩性

普通コンクリートとほぼ同等であることが確認されている<sup>[10]</sup>。

##### 凍結融解抵抗性

膨張コンクリートの凍結融解抵抗性は、拘束養生と空気量の増加や気泡間隔係数を小さくすることで増大するといわれている<sup>[11]</sup>。

##### ひび割れ抵抗性

膨張材による反応生成物は長期にわたって安定してコンクリート中に存在するため、ひび割れ耐力が増加された状態が長く維持される。また、ひび割れ発生状況に関する施工後3~7年程度の構造物の事例では、ひび割れ密度及びひび割れ幅のいずれもが膨張コンクリートの方が小さい値を示すことが確認されている<sup>[12]</sup>。

#### 2.2.5 膨張材と収縮低減剤の併用

谷村ら<sup>[13]</sup>と小田部ら<sup>[14]</sup>は、膨張材と収縮低減剤を併用することで、それぞれを単独で使用する場合よりさらに大きな収縮補償効果を得ることができると実験より明らかにした。

表-2.1に示す実験条件での一軸拘束膨張率測定結果を図-2.5に示す。図より、膨張材を単独で使った場合に比べ、収縮低減剤を結合材重量に対して1.0%添加することで膨張率が1.4~1.6倍に大きくなっている。ただし、収縮低減剤の混和率が0.25~0.75%では膨張材単独使用に比べ膨張率は大きくなるが、その添加率の範囲では膨張率はいずれも同等となっている。しかし、膨張材を併用するような場合には、所定の膨張率を得るための単位膨張材量が変化する

ると考えられるとしている。また、低熱ポルトランドセメントと膨張材や収縮低減剤とを適正に組み合わせることで圧縮強度  $100\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートに対しても、自己収縮ひずみを極めて小さくできる可能性があるとして述べている。

表-2.1 実験条件

水結合材比 (%)	単位水量 ( $\text{kg/m}^3$ )	使用セメント 使用膨張材	膨張材量 ( $\text{kg/m}^3$ )	収縮低減剤 ( $B \times \%$ )	記号
50	150	低熱セメント	20	0	
			15	0	
		エトリンナイト -石灰複合系	20	1	
			15	1	
			15	0.75	
			15	0.5	
			15	0.25	

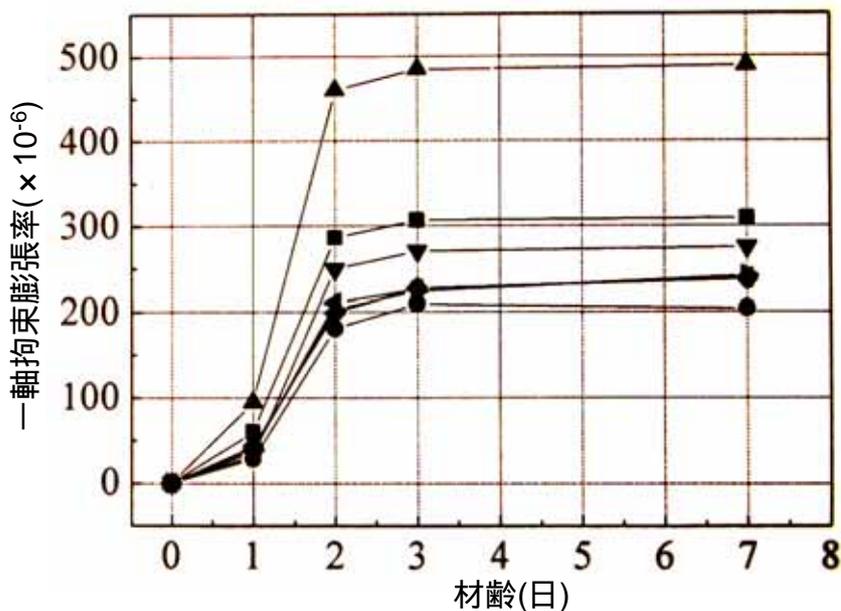


図-2.5 膨張材と収縮低減剤併用下の膨張率

## 2.3 クリープ予測式に関する既往の研究

### 2.3.1 MC90 式(CEB-FIP model code 90)

CEB-FIP model code 90<sup>[15]</sup>にはクリープの大きさ、クリープの進行速度、環境の影響等を考慮した様々な項が設けられた次式が提案されている。このMC90 式は、コンクリートのクリープ挙動をよく表現できるとして広く使用されている。著者らの過去の研究<sup>[16]</sup>においても、MC90 式は実験結果と良い一致を示した。

$$\left. \begin{aligned}
 c(t, t_0) &= (t, t_0) \times \frac{c}{E_{28}} \\
 (t, t_0) &= c_0 \times c(t - t_0) \\
 c_0 &= RH \times (f_{cm}) \times (t_0) \\
 RH &= 1 + \frac{1 - RH}{0.46 \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \\
 (t_0) &= \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{0.2}} \\
 H &= 150 \times \left[1 + \left(1.2 \times \frac{RH}{RH_0}\right)^{18}\right] \times \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \\
 (f_{cm}) &= \frac{5.3}{\left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)^{0.5}} \\
 c(t - t_0) &= \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{H + (t - t_0)/t_1}\right]^{0.3} \\
 h &= \frac{2A_c}{u}
 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

$(t, t_0)$  : 有効材齢  $t_0$  (日) で載荷された有効材齢  $t$  (日) でのクリープ係数

$c_0$  : 理論 (終局) クリープ係数

$c(t - t_0)$  : 時間に依存するクリープの進行を表わす項

RH : 相対湿度 (%)       $RH_0$  : 100%

$f_{cm}$  : 材齢 28 日圧縮強度 ( $N/mm^2$ )       $f_{cm0}$  :  $10N/mm^2$

$h$  : 仮想部材厚 (mm)       $h_0$  : 100 mm

$A_c$  : 部材断面積       $u$  : 部材断面の外気に接する部分の長さ (mm)

$t_1$  : 1 日

### 2.3.2 宮澤らによる超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ推定式

宮澤らは<sup>[17]</sup>において、若材齢における超高強度コンクリートの圧縮クリープ試験を行い、得られたデータを基に実用的なクリープ係数の予測式について検討している。クリープ係数予測式として一般的なCEB - FIP Model Code(1990)を修正し、圧縮強度 80Mpa以上の超高強度コンクリートへの適用を可能とする修正式を提案している。CEB - FIP Model Code(1990)は次式で示される。

しかし、CEB - FIP Model Code(1990)は圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup>以上のコンクリートは適用範囲外であるとされており、超高強度コンクリートのクリープ係数の実用的な予測式を得るために、実験値と予測式の比較を行い式を修正している。

CEB - FIP Model Code(1990)では、荷重時材齢が1日以前の場合、 $\phi_0$ を過小評価する傾向がみられるため、荷重時材齢の影響を次式のように評価した。

$$\phi_0 = \phi_1 \times [(a-1)/(a-t_0^b)] \quad (2.2)$$

$\phi_1, a, b$ : 実験定数

またCEB - FIP Model Code(1990)では、クリープの進行速度を表す項  $\beta_H$ を荷重時材齢 $t_0$ によらず一定値としているが、荷重時材齢が1日以前の場合の荷重直後にクリープ係数が急増するという傾向と一致しないとして、 $\beta_H$ を次式のように修正している。

$$\beta_H = c \times t_0 - d \quad (2.3)$$

$c, d$ : 実験定数

計算値と実験値の比較を図-2.6及び図-2.7に示す。両者はよく一致しているのが分かる。

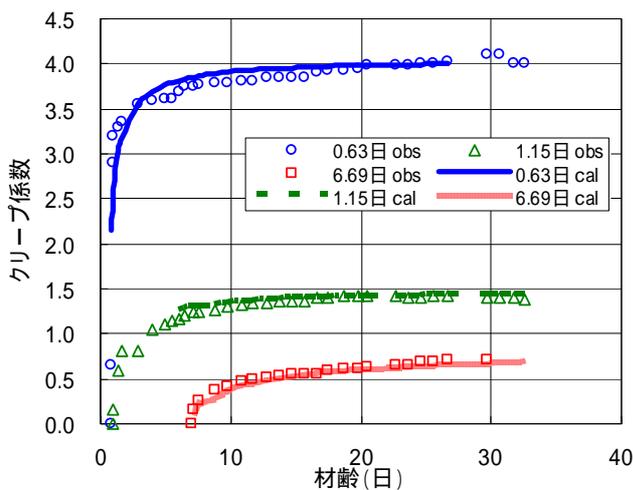


図-2.6 計算値と実測値の比較(早強セメント)

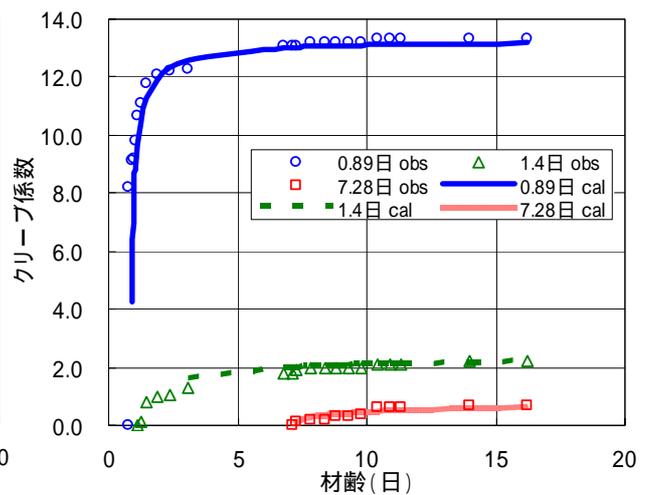


図-2.7 計算値と実測値の比較(ピーライト系)

### 2.3.3 入矢らの若材齢クリープ推定提案式

入矢らは<sup>[18]</sup>、荷重載荷材齢が1～5日の若材齢クリープに着目し、圧縮クリープに影響する要因を明らかにした上で、その影響について実験的に研究している。実験結果を定量的に評価し、その影響を総合的に考慮し、基本クリープ関数にVoigt関数を用いた5要素レオロジーモデルを適用した次式を提案している。

$$c_r(t_e, S/S, W/C, P, e) = F_{S/S}(S/S) \cdot F_{W/C}(W/C) \cdot F_P(P) \cdot F_L(e) \cdot \{28.50(1 - e^{-206.1t_e}) + 47.44(1 - e^{-1.747t_e}) + 2.0t_e\} \quad (2.4)$$

$c_r$ : 圧縮クリープひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $t_e$ : 載荷期間 (有効材齢: 日)

S/S: 応力強度比(%), W/C: 水セメント比(%)

P: 単位体積あたりのペースト量 ( $\text{cm}^3 / \text{m}^3$ )

$e$ : 載荷時の有効材齢 (日)

F: 各々の関数

#### (1) 全応力法

過去の載荷履歴を考慮せずに応力変化時の応力強度比のみでクリープひずみを評価する手法であるために、クリープひずみを過小評価する可能性がある。図-2.8に解析値と実験値の比較を示す。弾性係数が増加するために弾性ひずみが減少することもあり、第3ステップのように応力変化が小さい場合にはひずみを過小評価している。

#### (2) 重ね合わせ法

重ね合わせ時に増分応力に対しての応力強度比のみ考慮する手法であり、応力強度比の影響を過小評価する可能性がある。図-2.9より、第2ステップで若干過小評価しているが全体としてはよい一致を示している。第3ステップの応力変化量が小さいこともあるが、増分応力の応力強度比でクリープひずみを算出しても大きな誤差は生じてない。

#### (3) 応力重ね合わせ法

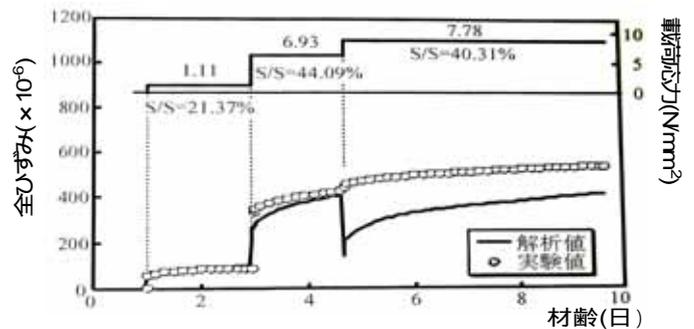


図-2.8 全応力法による解析値と実験値

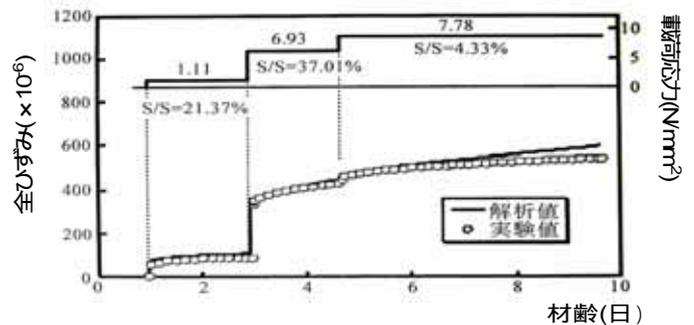


図-2.9 重ね合わせ法による解析値と実験値[15]

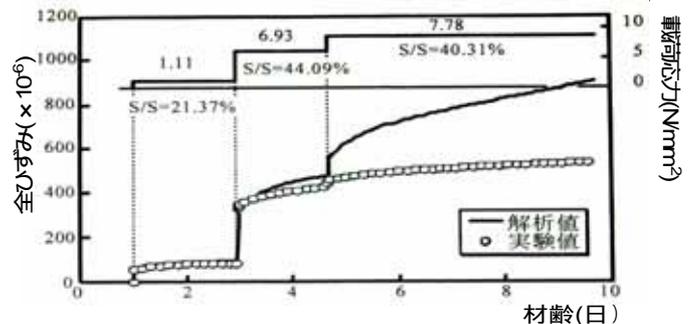


図-2.10 応力重ね合わせ法による解析値と実験値

応力変化時の全応力の応力強度比で算出したクリープひずみを重ね合わせの法則に基づいて各応力ステップで重ね合わせる手法であり、クリープひずみを過大評価する可能性がある。図-2.10より、第3ステップで大きなクリープひずみが発生して過大評価する結果となった。

以上の結果から、温度応力のような実構造物の応力を対象とした検討に適用するクリープ解析手法としては、理論的に完全ではないが、重ね合わせ法が最も実験値とよく一致する結果になったとしている。

### 2.3.4 変動応力下におけるクリープ評価

小澤らは<sup>[19]</sup>において、一定荷重載荷のクリープ実験より得られた実測値をもとに土木学会式を参考にして、次式のようなクリープ関数を提案した。

$$\epsilon(t) = \epsilon_{\infty} \cdot \phi(t) = \epsilon_{\infty} \cdot \{1 - \exp(-bt^c)\} \quad (2.5)$$

$\epsilon(t)$  : 単位クリープ ( $\times 10^{-6}/\text{N}/\text{mm}^2$ )  
 $\epsilon_{\infty}$  : 載荷時材齢を考慮した最終クリープひずみ ( $\times 10^{-6}/\text{N}/\text{mm}^2$ )  
 $\phi(t)$  : クリープ進行関数、 $t$  : 材齢(日)、 $t_0$  : 載荷時材齢(日)、 $b, c$  : 実験定数

式(2.5)のクリープ関数を用いて履歴理論とひずみ硬化則及び時間硬化則により応力変動下でのクリープ推定を行った。なお、ひずみ硬化則及び時間硬化則においては圧縮から引張に応力が反転した場合に蓄積されたひずみは影響を与えないものとした。図-2.11～2.14に履歴理論と時間硬化則およびひずみ硬化則それぞれの理論を適用し求めたクリープ推定値と実験値を示す。履歴理論による推定値は、応力反転後において実験値よりやや大きな値となるが、全般的には推定値は良好である。時間硬化則とひずみ硬化則による推定値は全般的に実験値よりも小さくなる傾向となる。この実験での載荷応力パターンにおいては、時間硬化則、ひずみ硬化則のクリープ推定値に大きな差異は認められない。

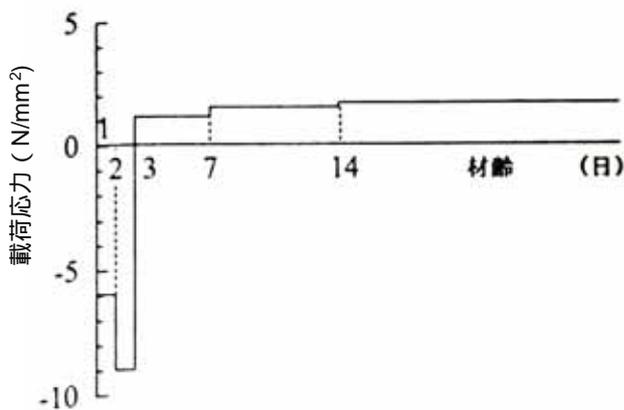


図-2.11 載荷応力パターン

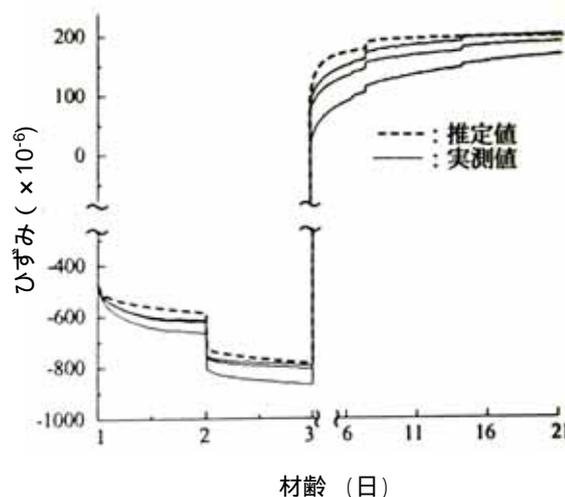


図-2.12 推定値と実験値との比較(履歴理論)

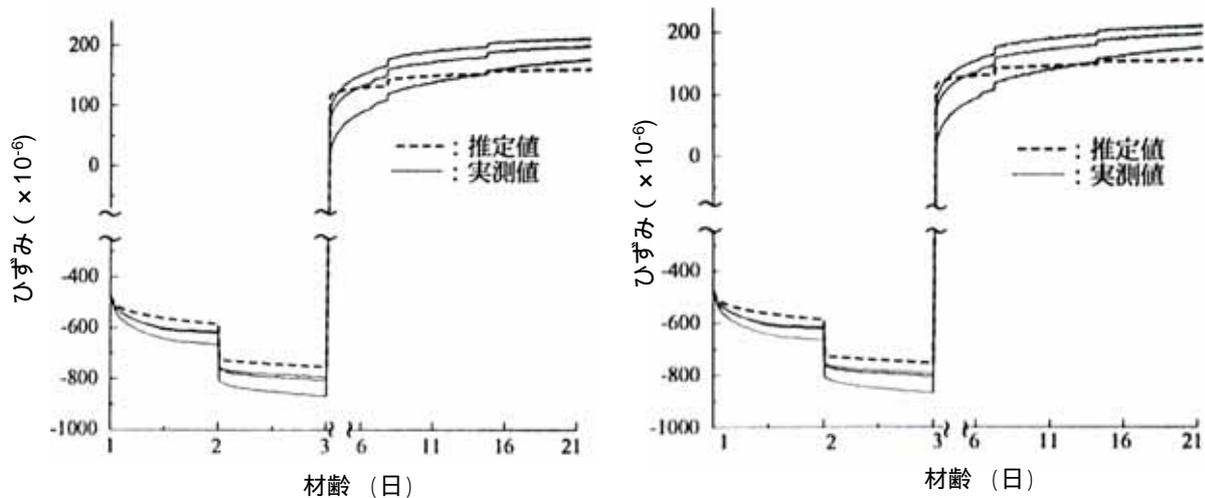


図-2.13 推定値と実験値との比較(ひずみ硬化則) 図-2.14 推定値と実験値との比較(時間硬化則)

## 2.4 膨張コンクリートの膨張拘束に関する既往の研究

### 2.4.1 戸川・中本らの研究

戸川・中本らは<sup>[20]</sup>膨張コンクリートの拘束膨張、収縮特性はコンクリートの配合条件、使用セメント種類、混和剤種類、骨材種類、膨張材種類とその使用量、拘束条件、養生条件など多数の要因によって影響されるとし、これらの関係を明らかにする研究を行った。その結果として以上の点を挙げている。

単位セメント量を一定にして単位水量を変化させた場合、膨張率は  $E = 60\text{kg/m}^3$  と  $E = 40\text{kg/m}^3$  とともに、単位水量が多くなるに従って低減した。

単位水量を一定として、単位セメント量を変化させた場合、単位セメント量が増加すると膨張率も増加することが示された。

膨張材量は一定でも膨張率は相違し、膨張率は一義的に膨張材量によって定まるとはいえないとした。

水結合材比が小さいほど膨張率は大きくなった。

### 2.4.2 辻らの研究

辻らは<sup>[21]</sup>、膨張により生じたケミカルプレストレスによって発生するクリープ及び弾性変形のひずみの損失分を考慮した仕事量について検討している。

図-2.15 は単位膨張材料量が  $60\text{kg/m}^3$  の場合における各種鋼材比の膨張率の経時変化を示したものである。材齢が 1 日～5 日の間で活発な膨張作用が生じ、その後はほぼ等しい膨張率を示している。また、拘束鋼材比が増加するにしたがって、実測される膨張率は小さく

なっている。

図-2.16 に水結合材比を変化させた場合の仕事量と拘束鋼材比の関係を示す。水結合材比が増加すると導入される仕事量は小さい値になっていることがわかる。

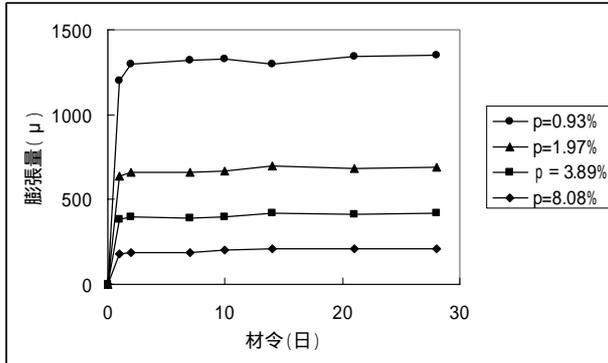


図-2.15 各種鋼材比の膨張率の経時変化

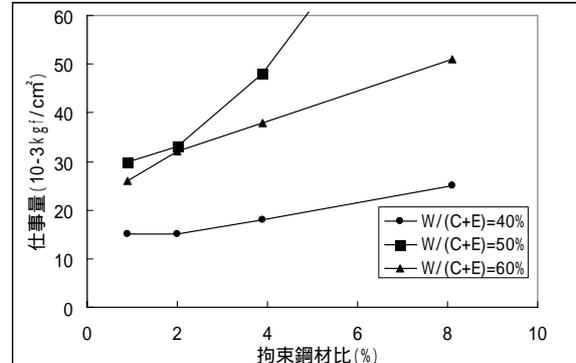


図-2.16 仕事量と拘束鋼材比

### 2.4.3 丸山らの研究

丸山らは<sup>[22]</sup>一軸拘束状態について拘束方向の膨張ひずみの他に横方向の膨張ひずみを測定し、この両方向の膨張ひずみが強度性状に及ぼす影響を検討している。

拘束供試体の膨張ひずみと自由膨張供試体の膨張ひずみの一例を図-2.17 に示す。横膨張ひずみは一軸拘束の影響を受け、自由膨張ひずみよりも小さくなることが認められる。

拘束鋼材比の影響を検討すると拘束鋼材比が大きくなると、拘束方向に比べて横方向膨張ひずみが大きくなっていくという傾向が見られた。このことから、拘束鋼材比が大きい場合には、特に横方向膨張ひずみに注意する必要があると思われる。

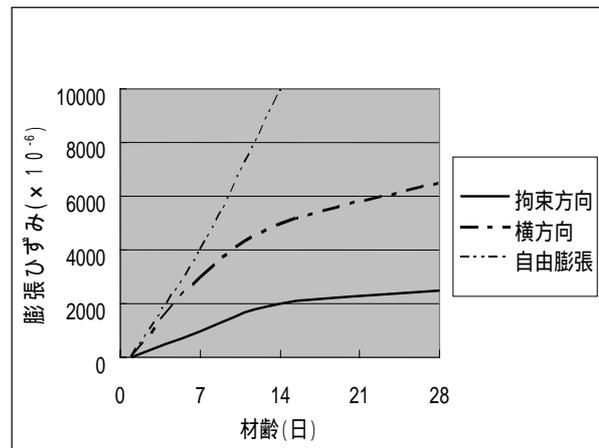


図-2.17 測定方向と膨張ひずみの関係

圧縮強度は拘束方向膨張ひずみだけでなく、横方向膨張ひずみにも大きく影響される。すなわち、同一拘束膨張ひずみを生じていても、配合や拘束鋼材比等が異なることにより横方向膨張ひずみが変わっていけばそれに応じて圧縮強度比も変化して行く。また、拘束鋼材比が大きければ同じ拘束方向ひずみを生じていても強度は幾分低下すると考えられる。

丸山らは結論として一軸拘束供試体について拘束方向膨張ひずみとともに横方向膨張ひずみを測定し、相互のひずみの関係を求めるとともに圧縮強度・曲げ強度試験を行い膨張量と強度との関係を検討した結果、次の事を確認している。

(1) 一軸拘束状態における膨張コンクリートの横方向膨張ひずみは拘束の影響を受け、

拘束の程度が大きい程小さくなる。また、拘束方向と横方向の膨張ひずみの関係は膨張混和材の置き換え率に関わらず一定の関係を示した。

(2) 拘束状態にある膨張コンクリートの強度性状については、拘束方向の膨張ひずみだけでなく、それと直角方向の膨張ひずみにも十分考慮を払わなければならない。

## 2.5 重ね合わせを用いたひずみ解析に関する既往の研究

### 2.5.1 佐藤らの研究

佐藤らは<sup>[23]</sup>既往のCEB-MC 1990、JCI式を修正した推定式を、若材齢においても適用できるように、終局クリープ係数と進行速度を表す係数を修正した物性値を用いて重ね合わせの原理に基づくFEMで拘束応力を解析している。

クリープ係数は以下のように修正している。

$$\text{終局クリープ係数} \quad \epsilon_0 = \epsilon_1 \times [(a-1)/(a-t_0^b)] \quad (2.6)$$

$$\text{クリープの進行速度を決める係数} \quad H = c \times t_0^{-d} \quad (2.7)$$

$\epsilon_1, a, b, c, d$  定数

JCI 式では若材齢時の温度上昇を考慮できず、有効材齢が小さくなるため、弾性係数の計算値は小さく、クリープ係数の計算値は大きくなる。その結果比較的若い材齢の範囲では、拘束応力を過小評価する結果となった。しかし経過日数の増大とともに解析値は実験値に近づいていく。これは長期になるに従い、温度の安定期間が卓越し、有効材齢の影響が小さくなるため、弾性係数及び、クリープ係数の計算値と実験値の差は小さくなるとしている。

MC90 式では若材齢では実験値とよく一致する結果となっている。しかし、長期的には解析値は実測値より大きくなる。解析に用いたクリープ係数が実測の見かけのクリープ係数より小さいことを理由のひとつあげている。

クリープ係数の推定精度をあげるとことを課題にあげたうえで重ねあわせによる予測方法の有用性を説いている。

### 2.5.2 辻らの研究

辻らは<sup>[24]</sup>一軸方向に拘束を受ける膨張コンクリートについて、まず、膨張により生じたケミカルプレストレスによって発生するクリープ及び弾性変形によるひずみの損失分を考慮した仕事量の算定方法を提示している。

#### ・解析方法

ケミカルプレストレスは材齢の経過とともに増加していくため、応力一定のクリープ予

測式をそのまま適用することができない。そこで測定材齢ごとのケミカルプレストレスの増分をとり、重ね合わせの原理が膨張コンクリートにも成り立つと仮定し、クリープひずみを計算した。

$$\epsilon_{cr}(k, j) = \frac{\sigma_c(k) \times \epsilon_{cr}(k, j)}{E_c(j)} \quad (2.8)$$

$\epsilon_{cr}(k, j)$ : (k)によって生じるクリープひずみ  
 $\sigma_c(k)$ : ケミカルプレストレスの増分,  $\epsilon_{cr}(k, j)$ : クリープ係数,  $E_c(j)$ : ヤング係数

ケミカルプレストレスの増分とクリープひずみにより生じた仕事量の損失  $U_{cr}$  は

$$U_{cr}(k) = \sigma_c(k) \times \epsilon_{cr}(k, j) \quad (2.9)$$

となる。クリープ係数の予測式は Bazant による方法を用い、普通コンクリートと同等であるとした。

導入されたケミカルプレストレスによって、膨張コンクリートも弾性変形をする。このため膨張作用により生じた膨張ひずみの全てが拘束体の鋼棒に導入されず、弾性変形による分だけ実際に生じた膨張ひずみは小さく測定される。従ってケミカルプレストレスの増分と弾性変形  $\epsilon_{el}(k)$  により生じた仕事量の損失分  $U_{el}(k)$  は次式により求まる。

$$U_{el}(j) = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c(k)^2}{E_c(k) + E_c(k-1)/2} \quad (2.10)$$

以上よりクリープ及び弾性変形を考慮した仕事量は、

$$U_c(j) = \frac{1}{2} p \cdot E_s \cdot \epsilon_s(j)^2 + U_{cr}(k) + U_{el}(j) \quad (2.11)$$

$\epsilon_s(j)$ : 膨張ひずみ,  $p$ : 拘束鋼材比,  $E_s$ : 拘束鋼材比のヤング率

#### ・解析結果

クリープ及び弾性変形を考慮した仕事量は、考慮しない場合に比べてすべて大きな値となり、拘束鋼材比が増加することにもなう仕事量の減少率は小さくできた。また、使用セメントや配合により、拘束鋼材比にかかわらず仕事量が一定とみなせる場合、逆に仕事量が拘束鋼材比とともに増加する結果が得られた。仮定した膨張コンクリートのクリープ係数及びヤング係数については検討の余地があるが、仕事量の概念に基づけば、ケミカルプレストレス等の推定が、これまで以上に精度よく、また適用範囲を拡大して行うことができるものとしている。

### 2,5,3 三谷らの研究

三谷らは<sup>[25]</sup>20～60 の養生温度下における拘束膨張ひずみの実験結果に基づき、膨張ひずみ、及び膨張過程におけるクリープの影響を含んだヤング係数の温度依存性について検討した。さらにマスコンクリートの様な温度履歴をうける場合の膨張応力の評価方法について検討を加えている。

$$s(t_i) = c_{fa}(t_i) / \{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)\} \quad (2.12)$$

$$c_c(t_i) = E_s \cdot p \sum_{i=1}^n c_{fa}(t_i) / \{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)\} \quad (2.13)$$

$c(t_i)$  : ステップ $t_i$ での膨張応力

$s(t_i)$  : ステップ $t_i$ での拘束膨張ひずみの増分量

$c_{fa}(t_i)$  : ステップ $t_i$ での見かけの膨張ひずみの増分量

$E_{ca}(t_i)$  : ステップ $t_i$ での見かけのヤング係数

$E_s$  : 鋼材のヤング係数

$p$  : 拘束鋼材比

結果として、一定養生温度 20～60 下で得られた拘束膨張ひずみに、ひずみ曲線の重ね合わせ法を適用することで断熱温度上昇履歴下における拘束膨張ひずみの発現性状を概ね評価できたとしている。

## 第3章 強度特性試験

- 3.1 概説
- 3.2 使用材料及びコンクリート配合
- 3.3 練混ぜ
- 3.4 フレッシュ試験及び凝結試験
- 3.5 強度試験
- 3.6 強度試験結果

### 3.1 概説

膨張材を添加したコンクリート 2 タイプにおいて、それぞれ W/B 50、55、65% の計 6 パターンで強度試験を行った。以後、低熱セメント+膨張材を使用したものを LE、普通セメント+膨張材+収縮低減剤を使用したものを NES とし、各配合における水結合剤比 50、55、65 を添えて表記する事とする。

### 3.2 使用材料及びコンクリート配合

表-3.1 に使用材料、表-3.2 にコンクリート配合を示す。配合においては全検討ケースにおいて単位水量 170kg/m<sup>3</sup>、スランプ 18cm、空気量 4.5% とした。

#### (1) 使用セメント

セメントは LE において低熱ポルトランドセメント、NES において普通ポルトランドセメントを用いた。両セメントとも太平洋セメント株式会社製を用いた。セメントの試験成績表を表-3.3 に示す。

#### (2) 細骨材

試験に使用した細骨材は、使用するにあたり、細目と粗目を質量比 1.5 : 8.5 でブレンドした。使用時は表面乾燥飽和状態にし、密閉容器に入れた後、20±2 の恒温室に保管し、練り混ぜ直前に表面水率の補正を行った。

[ JIS A 1102 骨材のふるいわけ試験 ] [ JIS A 1104 骨材の単位体積重量および実績率試験方法 ] による細骨材の試験結果を表-3.4 に示す。

#### (3) 粗骨材

試験に使用した粗骨材は、使用するにあたり、粗目と細目を重量比 1 : 1 でブレンドした。使用時には表面乾燥飽和状態にし、密閉容器に入れた後、20±2 の恒温室に保管した。

[ JIS A 1100 粗骨材の密度および給水率試験方法 ] [ JIS A 1104 骨材の単位体積重量および実績率試験方法 ] による粗骨材の試験結果を表-3.5 に、ふるいわけ試験結果を図-3.1 に示す。

#### (4) 混和剤

##### 1) AE 剤

エムエヌビー社製の 775S を使用した。

##### 2) 高性能 AE 減水剤

エムエヌビー社製の SP8N を使用した。

#### (5) 膨張材

膨張材は、カルシウムサルホアルミネート系(CSA)を使用とした。膨張材を使用する際、収

縮補償を目的とする場合は、膨張材を 20～40kg/m<sup>3</sup>程度混和することが一般的とされ、ケミカルプレストレスを期待する場合はこれより多く混和する。膨張材は電気化学工業株式会社製の「デンカパワー-CSA タイプS」を使用した。膨張材の試験成績表を表-3.6 に示す。

(6)収縮低減剤

膨張材と収縮低減剤の併用によりひび割れて低減効果がそれぞれ単独で用いた場合よりも向上するといわれている。そのため近年、膨張材及び収縮低減剤の併用が多く用いられている。本実験ではNESにおいて収縮低減剤 6kg/m<sup>3</sup>添加した。

表-3.1 使用材料

項目	種類等	メーカー・産地	密度
セメント	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	3.16
	低熱ポルトランドセメント	太平洋セメント	3.22
細骨材	細骨材(細目)	奥多摩産硬質砂岩	2.65
	細骨材(粗目)	奥多摩産硬質砂岩	2.65
	ブレンド(細目:粗目=1.5:8.5)	-	2.65
粗骨材	粗骨材(細目)	静岡産	2.62
	粗骨材(粗目)	千葉・沼津産	2.73
	ブレンド(細目:粗目=5:5)	-	2.64
AE剤	775S	エムエヌビー	1.00
高性能AE減水剤	SP8N	エムエヌビー	1.00
膨張材	パワーCSA	電気化学工業	3.20
収縮低減剤	KJ-3	旭電化工業	1.00

表-3.2 コンクリート配合

記号	W/B	細骨材率 %	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								単位量 g/m <sup>3</sup>	
				水	セメント	細骨材		粗骨材		膨張剤	収縮低減剤	AE剤	AE減水剤
						大	小	大	小				
LE50	50	43.4	170	170	320	663	117	513	513	20	0	19.200	960.0
LE55	55	44.4	170	170	289	687	121	511	511	20	0	14.455	867.3
LE65	65	46.4	170	170	242	734	129	504	504	20	0	9.662	724.6
NES50	50	43.4	170	170	320	663	117	513	513	20	6	12.800	960.0
NES55	55	44.4	170	170	289	687	121	511	511	20	6	11.564	867.3
NES65	65	46.4	170	170	242	734	129	504	504	20	6	7.246	724.6

表-3.3 セメント試験成績表

品質		種類	普通ポルトランドセメント	低熱ポルトランドセメント
密度	g/cm <sup>3</sup>		3.16	3.22
比表面積	cm <sup>2</sup> /g		3280	3420
凝結	水量	%	27.5	26.3
	始発	h-min	2-20	3-20
	終結	h-min	3-29	4-55
安定性			良	良
圧縮強さ	3d		28.9	-
	7d		44.8	23.3
	28d		62	50.9
	91d		-	79.0
水和熱	7d		328	221
	28d		372	281
酸化マグネシウム	%		1.3	0.83
三酸化硫黄	%		2.06	2.25
強熱減量	%		1.96	0.800
全アルカリ	%		0.56	0.34
塩化物イオン	%		0.01	0.004
けい酸二カルシウム	%		-	52
アルミン酸三カルシウム	%		-	3

表-3.4 細骨材試験結果

密度 (g/m <sup>3</sup> )	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率 (FM)
2.64	1743	2.36	68.3	2.65

表-3.5 粗骨材試験結果

密度 (g/m <sup>3</sup> )	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	実績率 (%)	粗粒率 (FM)
2.65	1644	0.69	66.1	6.62

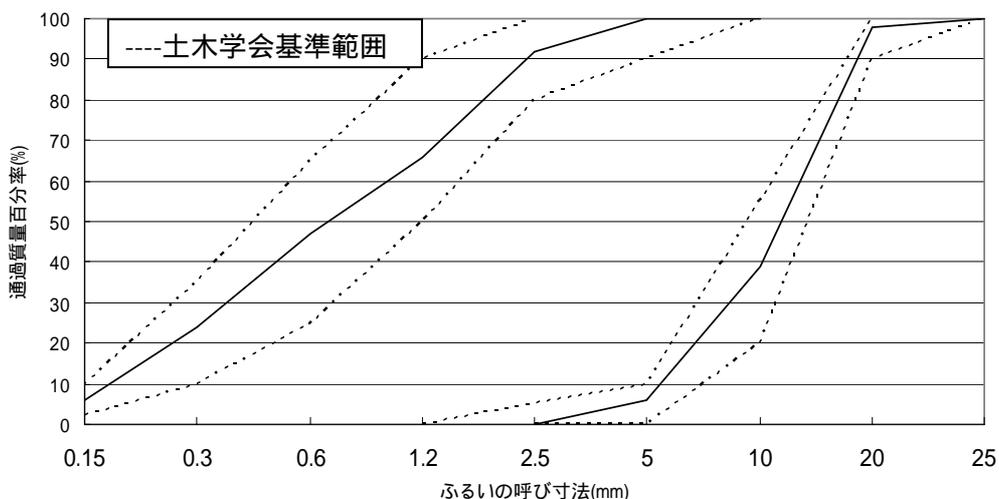


図-3.1 粒度分布曲線

表-3.6 膨張材試験成績表

項目		JIS A 6202による規定値	試験値	
化学成分	酸化マグネシウム %	5.0以下	0.9	
	強熱減量 %	3.0以下	1.9	
	全アルカリ %	0.75以下	0.06	
	塩化物イオン %	005以下	0.01	
物理的性質	密度 <sup>(1)</sup> g/cm <sup>3</sup>	2.95 ~ 3.15	3.05	
	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	2000以上	3070	
	1.2mmふるい残分 <sup>(2)</sup> %	0.5以下	0	
	凝結	始発 min	60以後	105
		終結 h	10以内	3
	膨張性 % (長さ変化率)	材齢 7日	0.025以上	0.157
		材齢28日	-0.015以上	0.132
	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	材齢 3日	12.5以上	29.1
材齢 7日		22.5以上	41	
材齢28日		42.5以上	55.9	

注(1) 密度はJIS R 5201による。規定値は電気化学工業株式会社社内規格。

注(2) 1.2mmふるい、JIS Z 8801に規定する呼び寸法1.18mmの網ふるいである。

材齢28日は前月度の値。

### 3.3 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、太平洋金属株式会社製の容積 100 の強制攪拌ミキサーを用いて行った。

練混ぜは、モルタルを用いて捨て練りを行った後、セメント、膨張材、細骨材を投入し 40 秒間空練り、混和剤を混入した練混ぜ水を投入し 70 秒間練混ぜ、かき落としを行った後、粗骨材を投入して 70 秒間練混ぜた。

### 3.4 フレッシュ試験及び凝結試験

#### 3.4.1 フレッシュ試験

フレッシュ試験として、スランプ値測定(JIS A 1101)、空気量測定(JIS A 1101)、単位容積重量計測、温度計測を行った。フレッシュ試験結果を表-3.7 に示す。

#### 3.4.2 凝結試験

練上がったコンクリートを 5mm ふるいで振るって粗骨材を除去し、残存したモルタルを用いてプロクター貫入抵抗試験(JIS A 6204)を行った。凝結試験結果を表-3.8 に示す。本実験では凝結開始時間を測定開始材齢とした。

表-3.7 フレッシュ試験結果

	スランプ	空気量	単位容積重量	練上がり温度
	cm	%	kg/m <sup>3</sup>	
LE50	19.0	5.3	2.31	24
LE55	20.0	4.4	2.30	18
LE65	20.5	4.0	2.30	20
NE S 50	21.0	5.2	2.27	22.5
NE S 55	21.0	4.9	2.27	22
NE S 65	20.5	5.9	2.25	22.5

表-3.8 凝結試験結果

	凝結始発(h)	凝結完了(h)
LE50	8.25	13.16
LE55	8.93	13.06
LE65	10.15	16.00
NES50	6.20	8.39
NES55	6.50	9.34
NES65	7.37	10.63

### 3.5 強度試験

強度試験は、圧縮強度試験及び弾性係数試験、割裂試験を行った。

#### 3.5.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は(JIS A 1108)に準拠して行った。試験体寸法は 100×h200mmとし、鋼製型枠にて作製し、20 封緘養生とした。凝結始発と同時にキャッピングを行い、材齢 0.5 日ですべて脱型した。凝結始発から 0.5、1、2、7、14、28、91 日において試験を行った。圧縮強度は以下の式により求めた。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.1)$$

ここでd：供試体の直径(mm)      d<sub>1</sub>、d<sub>2</sub>：2方向の直径

$$f_c = \frac{P}{\pi(d/2)^2} \quad (3.2)$$

ここでf<sub>c</sub>：圧縮強度(N/mm)      P：破壊荷重(N)

#### 3.5.2 弾性係数試験

弾性係数試験は(JIS A 1149)に準拠して行った。材齢 2 日までは供試体の硬化が進んでいないため試験機載荷版のストローク変位を変位系により測定し、材齢 3 日以降はコンプレッソメータを用いて測定した。

#### 3.5.3 割裂試験

割裂試験は(JIS A 1113)に準拠して行った。試験体寸法は 150×h150mm とし、鋼製型枠にて作製し、20 封緘養生とした。材齢 0.5 日ですべて脱型した。凝結始発から 0.5、1、2、7、14、28、91 日において試験を行った。

引張強度は以下の式により求めた。

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.3)$$

ここで d : 供試体の直径 (mm)      d<sub>1</sub>、d<sub>2</sub> : 2 方向の直径

$$f_c = \frac{2P}{\pi dl} \quad (3.4)$$

ここで f<sub>c</sub> : 圧縮強度 (N/mm)      P : 破壊荷重 (N)      l : 供試体の長さ (mm)

### 3.6 強度試験結果

#### 3.6.1 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-3.2～図-3.4 に示す。各試験結果は式 (3.5) <sup>[26]</sup> を用いて数式化し近似した。

$$f_c(t) = a \cdot f_c \cdot \exp \left[ s_f \left\{ 1 - \left( \frac{28 - t_{fs} / t_1}{(t - t_{fs}) / t_1} \right)^{0.5} \right\} \right] \quad (3.5)$$

f<sub>c</sub>(t) : 材齢 (t) 日における圧縮強度

a : 圧縮強度の低減率

f<sub>c</sub> : 材齢 28 日における圧縮強度

s<sub>f</sub> : 圧縮強度の発現の速さを表す係数

t : 材齢

t<sub>fs</sub> : 凝結の終結時間

t<sub>1</sub> : 1 日

図-3.2 に示すように全配合における圧縮強度を比較すると NES が LE に比べて全体的に高い強度を示している事がわかる。同水結合材比において LE、NES 比較しても、NES の強度は各結合材比において LE を上回っている。また図から材齢 28 日において LE50 と NES55、材齢 91 日において LE55 と NES65 が同程度の強度を示す結果となった。強度発現速度を比べると LE に比べ NES の発現速度が速いことがわかる。

低熱ポルトランドセメントの性能から長期強度の増加が予測されたが実験結果からはその影響が見られなかった。昨年度までの研究において膨張材、収縮低減剤の有無による強度低下は若干見られるがさほど影響しないことを確認している。ミクロ的な検討は行っていないので定かではないが、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、セメントの強度に起因する組織が形成される前に膨張材による組織の影響を受け、十分な組織形成がなされなかった可能性があると思われる。

また図-3.3、図-3.4からは水結合剤比があがるにつれて圧縮強度が下がる傾向となったことがわかる。膨張コンクリートにおいても、一般のコンクリート同様、水結合材比の増加により骨材とセメントペーストの付着強度が落ちていることが推測される。

### 3.6.2 弾性係数試験結果

弾性係数試験結果を図-3.5～図-3.7に示す。圧縮強度試験結果と同様に数式化のため式(3.6)<sup>[26]</sup>を用いて近似した。

$$E(t) = E_c \cdot \exp \left[ s_E \left\{ 1 - \left( \frac{28 - t_{fs} / t_1}{(t - t_{fs}) / t_1} \right)^{0.5} \right\} \right] \quad (3.6)$$

$E(t)$ : 材齢(t)日における弾性係数

$E_c$ : 材齢 28 日における弾性係数

$s_E$ : 弾性係数の発現の速さを表す係数

$t$ : 材齢

$t_{fs}$ : 凝結終結時間

$t_1$ : 1 日

図-3.5に示すように弾性係数においても圧縮強度と同様に、LEに比べNESが高い値を示す結果となった。全水結合材比においてNESがLEを上回る値となった。

また図-3.6、図-3.7からは水結合材比があがるにつれて弾性係数が下がる傾向となったことがわかる。またNESでは材齢7日までの弾性係数発現に大きな差が見られない事がわかる。

### 3.6.3 引張強度試験結果

引張強度試験結果を図-3.8～図-3.10に示す。同様に各試験結果は式(3.7)<sup>[26]</sup>を用いて数式化し近似した。

$$f_t(t) = b \times f_c(t)^{0.5} \quad (3.7)$$

$f_t(t)$ : 材齢(t)日における引張強度

$b$ : 引張強度の低減率

$f_c(t)$ : 材齢(t)日における圧縮強度

図-3.8に示すように圧縮強度と同様、全配合における引張強度を比較するとNESがLEに比

べて全体的に高い強度を示している事がわかる。同水結合剤比において LE、NES 比較しても、NES の強度は各結合剤比において LE を上回っている。また図-3.9、図-3.10 からは水結合剤比が上がるにつれて引張強度が下がる傾向となったことがわかる。

圧縮強度と引張強度を比較してみると特に初期における材齢においてばらつきが生じたが、LE、NES において引張強度は圧縮強度の約  $1/10$  の値となった。一般にコンクリートの引張強度は、その圧縮強度の  $1/10 \sim 1/13$  とされており、本実験では、この範囲にあり、一般的な強度特性を示していることが確認された。

#### 3.6.4 強度発現係数の比較

図-3.11～図-3.14 に数式化によって得られた圧縮強度、弾性係数の発現の速さを表す係数を示す。圧縮強度発現係数は水結合材比が上がるにつれて係数が大きくなる傾向が見られる。弾性係数においても同様のことが言える。

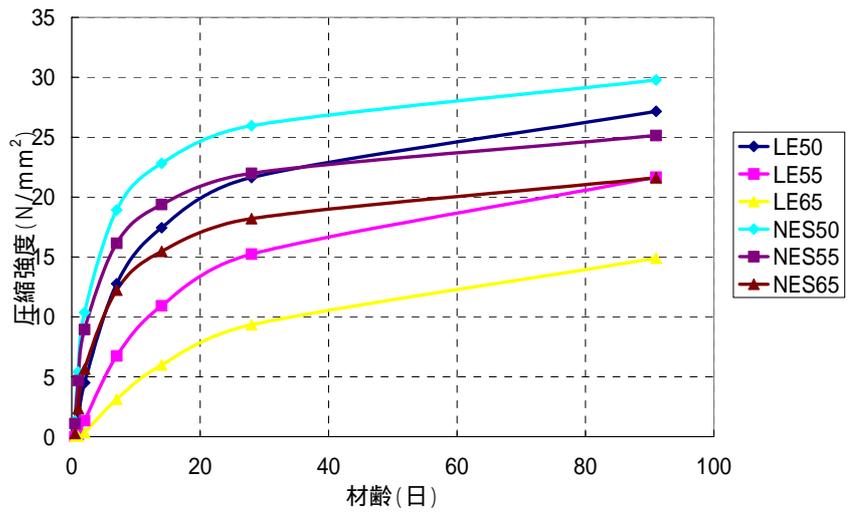


圖-3.2 壓縮強度試驗結果

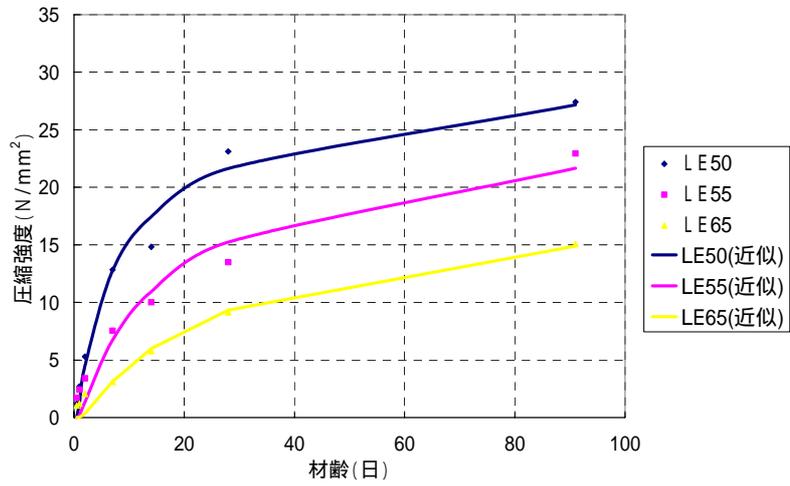


圖-3.3 壓縮強度試驗結果(LE)

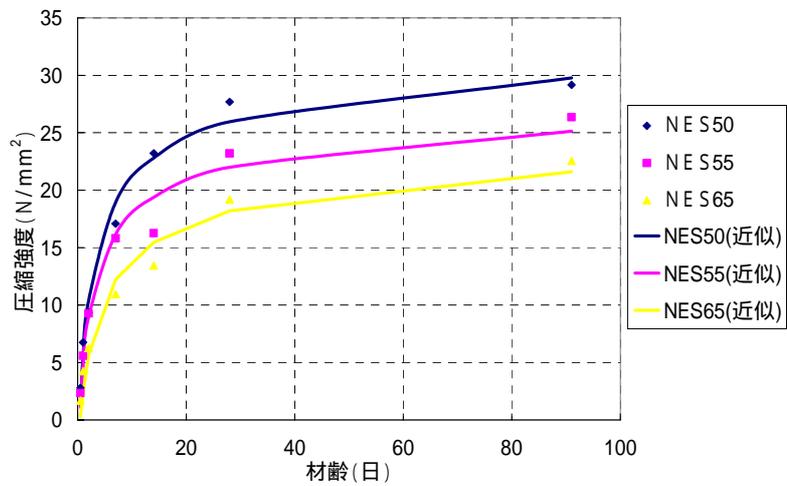


圖-3.4 壓縮強度試驗結果(NES)

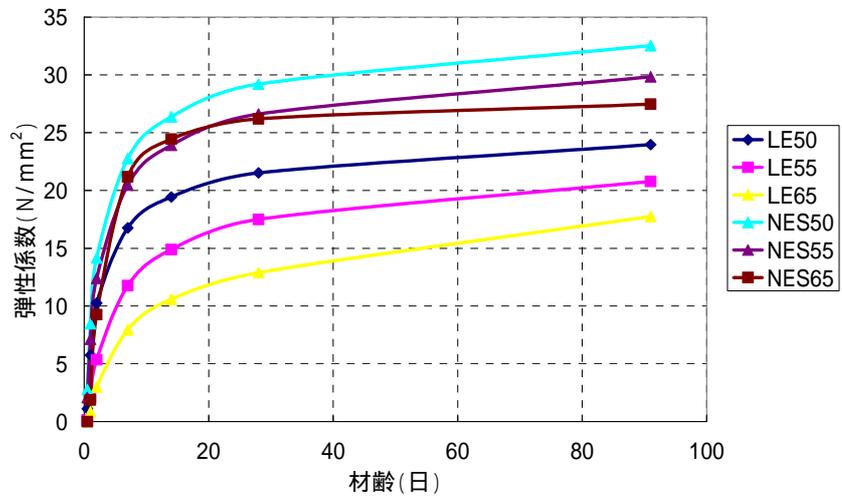


図-3.5 弾性係数試験結果

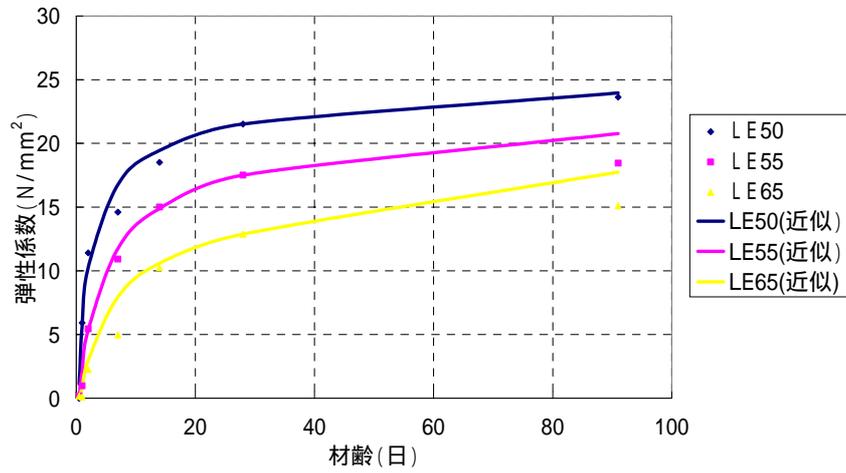


図-3.6 弾性係数試験結果(LE)

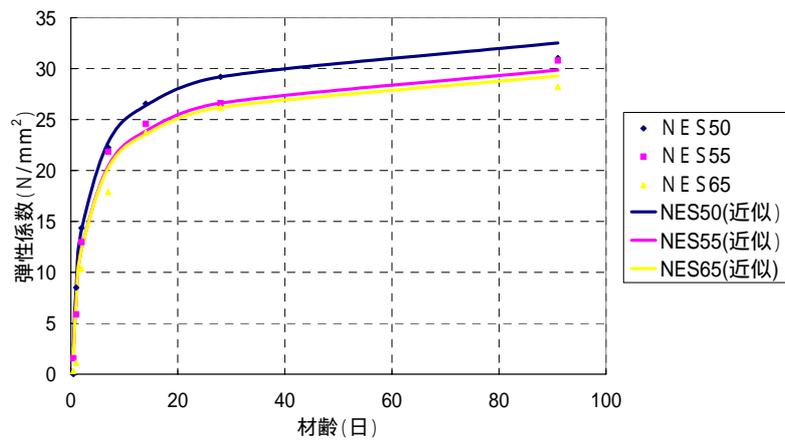


図-3.7 弾性係数試験結果(NES)

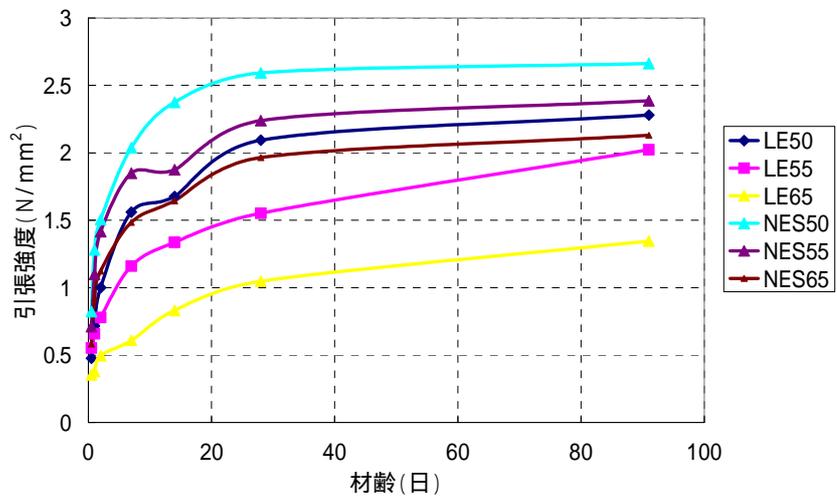


圖-3.8 引張強度試驗結果

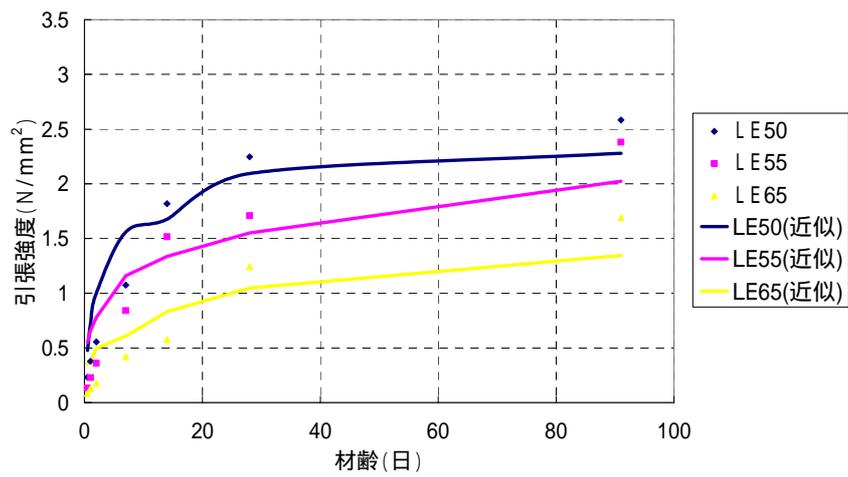


圖-3.9 引張強度試驗結果(LE)

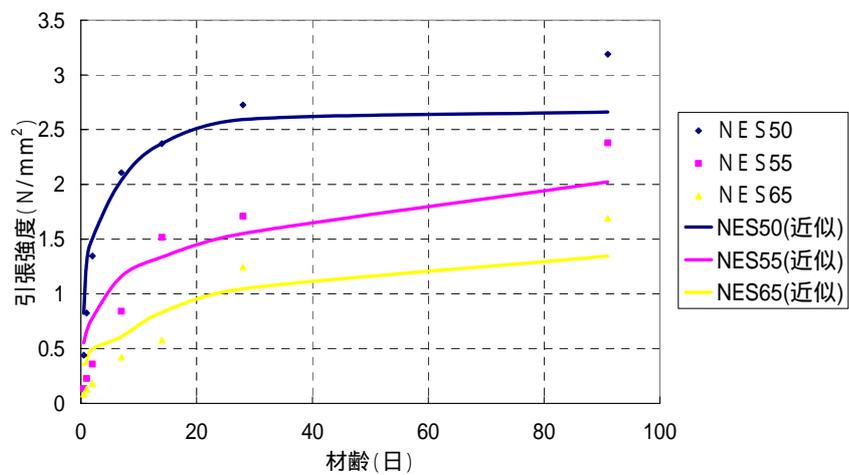


圖-3.10 引張強度試驗結果(NES)

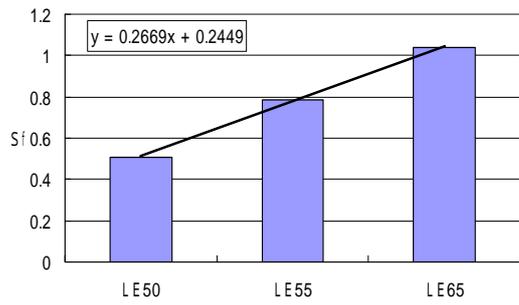


図-3.11 圧縮強度発現係数(LE)

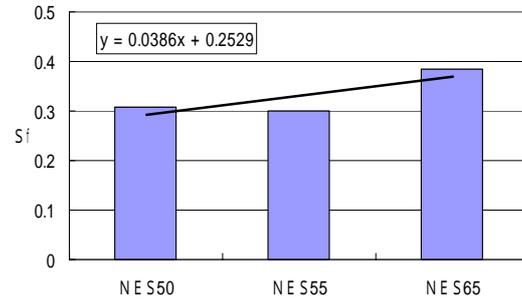


図-3.12 圧縮強度発現係数(NES)

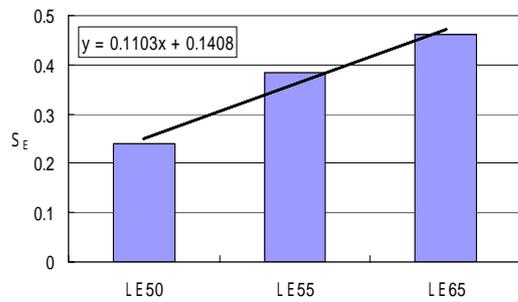


図-3.13 弾性係数発現係数(LE)

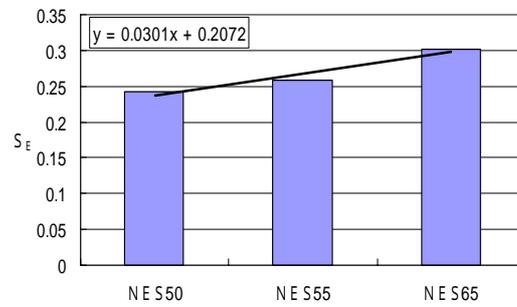


図-3.14 弾性係数発現係数(NES)

## 第4章 クリープ試験

- 4.1 概説
- 4.2 使用材料及びコンクリート配合
- 4.3 クリープ試験
- 4.4 クリープ試験結果

#### 4.1 概説

強度試験同様、LE、NESのコンクリート2タイプにおいて、それぞれW/B 50、55、65%の計6パターンでクリープ試験を行った。さらに各配合において鉄筋比を変化させ、鉄筋による一軸拘束を与えた状態でのクリープの算出を試みた。

#### 4.2 使用材料及びコンクリート配合

使用材料及びコンクリート配合は強度試験に示す表-3.1、表-3.2と同様である。

#### 4.3 クリープ試験

##### 4.3.1 検討ケース

表-4.1にクリープ試験の検討ケースを、表-4.2に用いた鉄筋の詳細を示す。各配合において鉄筋比0.1,0.4,1.0,4.0,8.0%の拘束を与えた。

表-4.1 検討ケース

NO.	コンクリートの種類	記号	W/B	鉄筋比	供試体数
1	低熱セメント + 膨張材	L-E-50-0.1	50	0.1	2
2		L-E-50-0.4	50	0.4	2
3		L-E-50-1.0	50	1.0	2
4		L-E-50-4.0	50	4.0	2
5		L-E-50-8.0	50	8.0	2
6		L-E-55-0.1	55	0.1	2
7		L-E-55-0.4	55	0.4	2
8		L-E-55-1.0	55	1.0	2
9		L-E-55-4.0	55	4.0	2
10		L-E-55-8.0	55	8.0	2
11		L-E-65-0.1	65	0.1	2
12		L-E-65-0.4	65	0.4	2
13		L-E-65-1.0	65	1.0	2
14		L-E-65-4.0	65	4.0	2
15		L-E-65-8.0	65	8.0	2
16	普通セメント + 膨張材 + 収縮低減剤	N-E-S-50-0.1	50	0.1	2
17		N-E-S-50-0.4	50	0.4	2
18		N-E-S-50-1.0	50	1.0	2
19		N-E-S-50-4.0	50	4.0	2
20		N-E-S-50-8.0	50	8.0	2
21		N-E-S-55-0.1	55	0.1	2
22		N-E-S-55-0.4	55	0.4	2
23		N-E-S-55-1.0	55	1.0	2
24		N-E-S-55-4.0	55	4.0	2
25		N-E-S-55-8.0	55	8.0	2
26		N-E-S-65-0.1	65	0.1	2
27		N-E-S-65-0.4	65	0.4	2
28		N-E-S-65-1.0	65	1.0	2
29		N-E-S-65-4.0	65	4.0	2
30		N-E-S-65-8.0	65	8.0	2

表-4.2 鉄筋詳細

鉄筋比(%)	0.1	0.4	1	4	8
鉄筋名	M4	M8	M12	M24	M33
最外径(mm)	4	8	12	24	33
有効直径(mm)	3.545	7.188	10.863	22.051	30.727
断面積(mm <sup>2</sup> )	9.870116	40.57943	92.68071	381.8971	741.5324
真鉄筋比	0.098701	0.405794	0.926807	3.818971	7.415324

#### 4.3.2 試験体概要

図-4.1、図-4.2 に試験体概要図を示す。図-4.2 はひずみゲージのみによる測定を行ったものである。図-4.2 は鉄筋比 0.1%のケースで使用したものである。鉄筋径が小さいためひずみゲージの付着が十分ではなく、ゲージが剥離する恐れがあるため埋込み型ひずみ計を併用する事とした。試験体は各配合において2体作成した。ひずみの測定は30分間隔とし、強度試験と同様に材齢0.5日ですべて脱型しその後はビニールシートにより20日封緘養生とする。また、材齢28日からは封緘するビニールシートを外し、気中にさらすことで乾燥収縮させた。

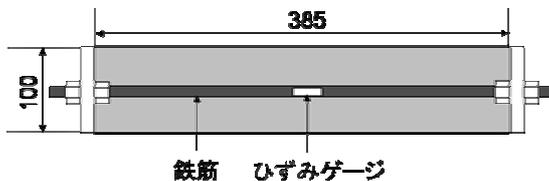


図-4.1 試験体概要図(ひずみゲージ)

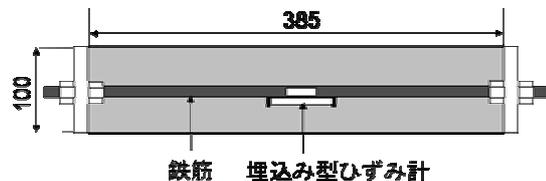


図-4.2 試験体概要図(埋込み型ひずみ計)

### 4.4 クリープ試験結果

#### 4.4.1 有効材齢

本実験では、温度による反応速度を考慮する有効材齢を取り入れるため、今回は既存の式の中から、養生条件が異なるコンクリートの強度を統計的に表現する CEB-FIP model code 90 のマチュリティーを基本とした。用いた式を以下に示す。

$$t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (4.1)$$

ここに  $t_n$ : 有効材齢  $T_0$ : 1  $t_i$ :  $T( )$  の日数

#### 4.4.2 実ひずみ

鉄筋比0.4~8.0%において凝結始発時のひずみを0として実際に計測された値を本実験では実ひずみと表記する。材齢による実ひずみの経時変化結果を示す。尚本実験では測定ひずみの値はすべて膨張を正として算出した。

#### (1) 配合比較

図-4.3~図-4.5に配合LEの実ひずみ結果を、図-4.6~図-4.8に配合NESの実ひずみ結果を示す。

材齢28日までの封緘状態において、各配合における鉄筋比ごとの実ひずみは、LEの場合は、拘束鉄筋比が大きくなるのに伴い、実ひずみが小さくなる傾向が見られた。これは鉄筋比が大きくなるに従ってコンクリートが膨張する力に反発する応力（圧縮）が大きく作用するためである。また、いずれの水結合材比においても、拘束鉄筋比が4.0%と8.0%の実ひずみの差がほとんど見られなかった。既往の研究によると一軸方向膨張拘束試験において膨張ひずみの大きさに違いが見られるのは鉄筋比約5.0%までであり、それより鉄筋径が大きくなるとほとんど違いは見られなくなってくるとしている。また鉄筋比0.1%と同様に材齢28日までに膨張ひずみが若干減少し鉄筋比が小さくなるとその傾向が見られたが、これはコンクリートが自己収縮の影響を受けたこと、封緘養生が適切に行われていなかったことによる乾燥収縮などが要因とされる。しかし、鉄筋比が大きくなるにしたがってひずみの減少は見られず、鉄筋比が小さくなるほど膨張作用が顕著に現れることから自己収縮による原因である可能性が大きいと思われる。

材齢28日以降の乾燥状態では、拘束鉄筋比が大きくなるにつれて収縮量が減少する傾向が見られた。これも鉄筋による応力が大きく作用するためと推定される。また、いずれの拘束鉄筋比においても材齢91日までにひび割れは生じることはなかった。

#### (2) 鉄筋比比較

拘束鉄筋比0.4%

拘束鉄筋比0.4%における実ひずみの結果を図-4.9~図-4.11に示す。

材齢28日までの封緘状態においてLEとNESを比較した場合、いずれの水結合材比においても、LEはNESの約2倍~3倍程度の実ひずみを示す結果となった。また、LE、NESともに水結合材比が増加するに伴い実ひずみが小さくなる結果となった。既往の研究においても水結合材比が大きくなるに従って膨張ひずみが小さくなることを確認している。ただし、NES55とNES65の実ひずみは同等の実ひずみを示す結果となった。

次に、材齢28日以降の乾燥状態においては、材齢91日までにいずれの水結合材比においても同じような割合でひずみが減少していく結果となった。また、LEとNESで比較してみるといずれの水結合材比においても、LEのほうがNESよりも収縮の割合が大きく約100 $\mu$ の差が見られた。

#### 拘束鉄筋比 1.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 1.0%における実ひずみの結果を図-4.12～図-4.14 に示す。

材齢 28 日までの封緘状態において LE と NES を比較した場合、拘束鉄筋比 0.4%の場合のようにいずれの水結合材比においても、LE は NES の約 2 倍程度の実ひずみを示した。また、LE、NES とも水結合材比が増加するのに伴い実ひずみが小さくなる結果となった。ただし、拘束鉄筋比 1.0%においては NES65 における実ひずみが NES55 よりも大きな値を示す結果となった。

次に材齢 28 日以降の乾燥状態においては、LE で材齢 91 日までいずれの水結合材比においても同じような割合でひずみが減少した。NES においては、材齢 91 日において NES55 が NES50 よりも大きな実ひずみを示す結果となった。また、LE と NES で比較してみると、いずれの水結合材比においても、LE のほうが NES よりも収縮の割合が大きく約 100 $\mu$  の差が見られた。

#### 拘束鉄筋比 4.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 4.0%における実ひずみの結果を図-4.15～図-4.17 に示す。

材齢 28 日までの封緘状態において LE と NES を比較した場合、いずれの水結合材比においても、LE と NES は同等の実ひずみを示した。また、LE、NES とも水結合材比が増加するのに伴い実ひずみが小さくなる結果となった。このことから、LE は鉄筋比 0.4%、NES は鉄筋比 4.0%において水結合材比が大きくなると膨張ひずみが小さくなる現象が見られた。これは水結合材比 65%のようにセメント量が小さな場合において、異常な膨張を引き起こす原因の一つとして鉄筋の拘束力の不足があるとしている。その対策としてセメントの種類に適した拘束力の選定があり、今回の結果で一つの目安となる可能性があり今後さらに検討していく予定である。

次に材齢 28 日以降の乾燥状態においては、LE で水結合材比 65%での収縮の割合が 50、55% に比べ小さくなる結果となった。NES においては同等の割合で収縮していることがわかる。また、LE と NES で比較した場合、いずれの水結合材比においても、LE のほうが NES よりも収縮の割合が大きく約 50 $\mu$  の差が見られた。

#### 拘束鉄筋比 8.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 8.0%における実ひずみの結果を図-4.18～図-4.20 に示す。

材齢 28 日までの封緘状態において LE と NES を比較した場合、いずれの水結合材比においても、LE と NES は同等の実ひずみを示した。これは鉄筋による応力が非常に大きいため膨張材による膨張作用が現れていないためであると思われる。LE では水結合材比による影響もほとんど見られなかった。

材齢 28 日以降の乾燥状態においては、材齢 91 日で LE65 が最も大きくなり、以下 LE55、LE50 となった。NES においては、NES50、NES55、NES65 が同等のひずみを示した。また、LE と NES を比較した場合、LE は水結合材比の違いが現れたが NES においては水結合材比の影響を受け

ず、同様の挙動を示した。

#### 4.4.3 自由ひずみ

膨張コンクリートは無拘束(鉄筋比0%)の場合、膨張ひずみが非常に大きくなり、値が大きくばらつく場合があり、またその結果強度が低下するともいわれている。そこで本実験では膨張材を混和した配合であるLE及びNESについては、鉄筋M4を用い拘束鉄筋比0.1%の拘束を導入した微拘束試験体を作製した。また、過去の研究において自由ひずみは拘束鋼材比0.1%の微拘束膨張ひずみを有効膨張ひずみに適用することが可能であると報告されているため、本実験では、鉄筋比0.1%の実ひずみを自由ひずみとした。図-4.21～に図-4.23にひずみゲージによってえられた自由ひずみの結果を、図-4.24～図-4.26に埋込み型ひずみ計によって得られた自由ひずみの結果を示す。また両計測値の比較として図-4.27、図-4.28にLE、NESにおけるひずみゲージと埋込み型ひずみ計による自由ひずみの値を示す。

材齢28日までの封緘状態において、LEのほうがNESよりも自由ひずみは大きくなることが明らかとなった。また、既往の研究においても、材齢28日までは低熱ポルトランドセメントを使用した方が普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも自由ひずみは大きくなる傾向があると報告されていて今回の実験においてもその傾向が現れる結果となった。材齢28日以降の乾燥状態においてはLE、NESとも収縮の割合に大きな差は見られなかった。

次に、拘束鉄筋に取付けられたひずみゲージによる自由ひずみと埋め込み式ひずみ計による自由ひずみを比較すると、ひずみゲージの自由ひずみが埋め込みひずみ計の自由ひずみより10%から20%ほど大きな値となったが両者に極端な違いは現れなかった。また、材齢28日までに膨張ひずみが若干減少する傾向が見られたがこれはコンクリートが自己収縮の影響を受けたこと、封緘養生が適切に行われていなかったことによる乾燥収縮などが要因とされる。

またLE、NESともに水結合材比が65%の自由ひずみが50%、55%よりも大きくなった。既往の研究によると拘束鉄筋比は多少異なるが水結合材比が大きくなるに従って膨張によるひずみが小さくなる傾向があると報告されている。これは、膨張反力支持要因としてのペーストの強度特性が関係していると考えられるとされている。しかし今回の実験においては水結合材比65、50、55%の順に膨張ひずみが小さくなった。この結果は強度特性試験により得られた強度特性と異なる結果となったためその原因について考慮すると

膨張材やセメントが水和反応してできる体積増加の原因とされるエトリンガイド針状結晶が水結合材比65%のように大きな場合については多量の水により多く生成されたため。

水結合材比65%のようにセメント量が小さな場合においては鉄筋の拘束力が足りず、異常な膨張を引き起こしてしまった。

水結合材比55%と65%の間において膨張コンクリートが膨張する現象と収縮する現象の変局

点のようなものが存在しその点を越えた 65%において膨張現象が見られたこと。  
練混ぜ、打ち込みなどの施工に起因する異常膨張。

以上のことが考えられるが

においては膨張機構において化学的かつミクロな視点からの検討が必要である。

においては水結合材比が 65%のように大きな場合においては、膨張コンクリートの有効自由膨張ひずみの概念について今回の実験で拘束鉄筋比 0.1%を自由ひずみとすることについての検討が必要である。

においては現段階においては過程の段階であり今後の研究として検討を行う予定である。

においては既往の研究によると練混ぜ時間において 1m<sup>3</sup>のコンクリートを製造する場合、使用材料の総量に対して 2%にも満たない。その様な場合、コンクリート中の膨張材が均一に練り混ぜられているかが問題となる。練混ぜが不十分であると、所定の膨張特性が得られな  
いばかりか、膨張材が偏在している箇所があれば局所的に過大な膨張が生じ、構造物に欠陥  
を与えることになるとしている。また、打ち込み温度において本実験では 20 度を目標としたが  
気温が高く、練混ぜ水に氷を用いるなど細部に渡り配慮したが結果として 2~3 度高くなって  
しまった。その要因も考えられる。

なお今回の実験では、鉄筋比 0.1%においてはひずみゲージと埋込み型ひずみ計両方を用い  
たが、試験結果、及びクリープひずみの算出には埋込み型ひずみ計によって得られた値を用  
いる事とした。

#### 4.4.4 応力計算

実験では鉄筋にひずみゲージを貼り付けひずみの測定を行っているが、鉄筋コンクリートの  
定義から、コンクリートと鉄筋の付着は十分と考え鉄筋の実ひずみとコンクリートの実ひずみ  
は等しいと考える。鉄筋の弾性係数はあらかじめわかっているため、フックの法則からコンク  
リートに作用する応力の算出を行った。

計算結果は圧縮をプラスとした。圧縮方向の応力は膨張材の効果によるケミカルプレストレ  
スと考えることができる。

##### 4.4.4.1 応力算出方法

鉄筋とコンクリートは完全に付着しているので、両者のひずみは等しいため、

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \quad (4.2)$$

$\varepsilon_c$ : コンクリートの実ひずみ

$\varepsilon_s$  : 鉄筋の実ひずみ

一方、鉄筋について、フックの法則から、

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4.3)$$

$\sigma_s$  : 鉄筋の応力真値 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_s$  : 鉄筋の弾性係数 (= 2.078 × 10<sup>6</sup>) (N/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_s = \frac{P}{A_s} \quad (4.4)$$

$P$  : 軸方向圧縮力 (N)

$A_s$  : 鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

よって、
$$P = E_s \times \varepsilon_s \times A_s \quad (4.5)$$

以上より 
$$\varepsilon_c = \frac{P}{A_c} \quad (4.6)$$

$A_c$  : コンクリートの断面積

#### 4.4.4.2 応力算出結果

##### (1) 配合比較

図-4.29～図-4.31 に配合 LE の応力算出結果を、図-4.32～図-4.34 に配合 NES の応力算出結果を示す。

LE、NES における応力は、材齢 28 日までは圧縮方向に応力が生じ、それ以降において応力は圧縮方向から引張方向に転じ材齢の経過とともに増大していることがわかる。

また、材齢の経過と共に圧縮、引張方向で拘束鉄筋比 8.0% が最も大きく、以下 4.0%、1.0%、0.4% となり拘束鉄筋比が大きくなるのに伴い応力が大きい結果となった。また、鉄筋比が大きくなるにつれて材齢 28 日までに若干応力が減少する傾向が見られたが、これはコンクリートの自己収縮や、鉄筋に剛性、付着の問題等が考えられるが特定の理由を推定するには至らなかった。

##### (2) 鉄筋比比較

拘束鉄筋比 0.4%

拘束鉄筋比 0.4% における応力算出結果を図-4.35～図-4.37 に示す。

材齢 28 日までににおいて各水結合材比で、LE が NES よりも大きな応力を示す結果となり、水

結合材比が大きくなるのに伴い応力が大きくなった。また、材齢 28 日までにおいて、応力が若干減少する傾向が見られたが、これはコンクリートが自己収縮の影響などを受けたためと思われる。材齢 28 日以降の乾燥状態において、NES が LE よりも引張方向の応力が大きいことが分かった。

#### 拘束鉄筋比 1.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 1.0%における応力算出結果を図-4.38～図-4.40 に示す。

材齢 28 日までにおいて各水結合材比で LE が NES よりも大きな応力を示す結果となった。しかし水結合材比の関係では 55%と 65%の関係が逆転する結果となった。これは実ひずみの測定結果の影響を受けたためと思われる。材齢 28 日以降の乾燥状態において、材令の経過と共に LE が NES よりも引張方向の応力が大きくなることが分かった。また算出結果より LE においては水結合材比において異なる応力を示しているが、NES においては水結合材比が変化しても応力の違いはあまり見られなかった。

#### 拘束鉄筋比 4.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 4.0%における応力算出結果を図-4.41～図-4.43 に示す。

材齢 28 日までにおいて、水結合材比 55,65%では LE、NES の応力がほぼ同等の値となった。また NES においては水結合材比による変化がほとんど見られなかった。これは拘束鉄筋比が大きいいため、実ひずみの水結合材比による変化が少ないという結果が応力にも影響したものと思われる。また、材令の経過と共に LE のほうが NES よりも引張応力が大きくなる結果となった。

#### 拘束鉄筋比 8.0%鉄筋比

拘束鉄筋比 8.0%における応力算出結果を図-4.44～図-4.46 に示す。

材齢 28 日までにおいて応力は LE、NES とともに水結合材比の増加にともない応力は小さな値をとる結果となった。NES については水結合材比の影響をあまり受けない結果となった。材齢 28 日以降の乾燥状態では、LE において水結合材比の違いが顕著に現れる結果となった。

### 4.4.5 弾性ひずみ

4.4.4 でもとめた応力を用いて弾性ひずみの算出を行った。弾性係数は 3.6.2 でもとめた近似式を使用した。

$$e = \frac{c}{E_c} \quad (4.7)$$

### 4.4.6 クリープひずみ

#### 4.4.6.1 クリープ算出方法

クリープひずみの算出は以下の式を用いて行った。

$$c_{ce}(t) = c_c(t) - c_{ce}(t) - c_{cf}(t) \quad (4.8)$$

ここに  $c_{ce}(t)$  : コンクリートのクリープひずみ  
 $c_c(t)$  : コンクリートの実ひずみ  
 $c_{ce}(t)$  : コンクリートの弾性ひずみ  
 $c_{cf}(t)$  : コンクリートの自由ひずみ

#### 4.4.6.2 クリープ算出結果

##### (1) 配合比較

図-4.47～図-4.49 に配合 LE のクリープ算出結果を、図-4.50～図-4.52 に配合 NES のクリープ算出結果を示す。

LE におけるクリープひずみは、材齢 28 日までは材令の経過と共に圧縮方向に生じる。これはコンクリートが膨張し鉄筋拘束による応力が圧縮方向に生じているためである。またいずれの水結合材比においても拘束鉄筋比が大きくなるのに伴いクリープひずみが大きくなった。これは水結合材比が大きくなるにつれて自由ひずみと実ひずみに大きな差が生じるためである。材齢 28 日以降の乾燥状態では拘束鉄筋比が増加するのに伴いクリープひずみが引張方向へ転じる結果となった。また、水結合材比 55%と 65%における引張方向のクリープひずみの大小が逆転する現象が見られたがこれは鉄筋による応力の違いが結果に影響されたと思われる。

NES においてもクリープひずみは、材齢 28 日までは材令の経過と共に圧縮方向に生じこれはコンクリートが膨張し鉄筋による応力が圧縮方向に生じているためである。またいずれの水結合材比においても拘束鉄筋比が大きくなるのに伴いクリープひずみが大きくなった。材齢 28 日以降の乾燥収縮の期間に着目した場合においては拘束鉄筋比が増加するのに伴いクリープひずみが引張方向へ転じる結果となった。

##### (2) 鉄筋比比較

拘束鉄筋比 0.4%

拘束鉄筋比 0.4%におけるクリープ算出結果を図-4.53～図-4.55 に示す。

材齢 28 日までにおいて、LE では水結合材比が 65%以下 50%、55%の順に大きい値を示した。これは LE の水結合材比 65%における自由ひずみの増大が原因であると思われる。NES においては水結合材比が増加するに従ってクリープひずみが増加した。また、セメントの種類によるクリープひずみを比較した場合いずれの水結合材比においても LE のほうが NES よりも大きな値を示した。これは LE のほうが強度発現が遅いため鉄筋拘束による影響を受けやすいためと思われる。

材齢 28 日以降は LE、NES とともに引張方向にクリープひずみが生じ材令の経過と共に約 50

μひずみが回復する結果となった。

#### 拘束鉄筋比 1.0%

拘束鉄筋比 1.0%におけるクリープ算出結果を図-4.56～図-4.58 に示す。

材齢 28 日までにおいて、LE は水結合材比 65%以下 50%、55%の順に大きい値を示した。NES においては水結合材比が増加するのに伴いクリープひずみが増加する結果が得られた。また、セメントの種類によるクリープひずみを比較した場合、鉄筋比 0.4%同様にいずれの水結合材比においても LE のほうが NES よりも大きな値を示した。

材齢 28 日以降は LE、NES とともに引張方向にクリープひずみが生じ材令の経過と共に約 50～100 μひずみが回復する結果となった。

#### 拘束鉄筋比 4.0%

拘束鉄筋比 4.0%におけるクリープ算出結果を図-4.59～図-4.61 に示す。

材齢 28 日までにおいて、LE、NES 共に水結合材比が 65%以下 50%、55%の順に大きい値を示した。また、セメントの種類によるクリープひずみを比較した場合いずれの水結合材比においても LE のほうが NES よりも大きな値を示した。

材齢 28 日以降は LE、NES とともに引張方向にクリープひずみが生じ材令の経過と共に約 200～300 μのひずみが回復する結果となった。

#### 拘束鉄筋比 8.0%

拘束鉄筋比 8.0%におけるクリープ算出結果を図-4.62～図-4.64 に示す。

材齢 28 日において、LE は水結合材比 65%以下 50%、55%の順に大きい値を示した。NES においては水結合材比が増加するのに伴いクリープひずみが増加する結果が得られた。また、セメントの種類によるクリープひずみを比較した場合いずれの水結合材比においても LE のほうが NES よりも大きな値を示した。

材齢 28 日以降は LE、NES とともに引張方向にクリープひずみが生じ材令の経過と共に約 200～400 μひずみが回復する結果となった。

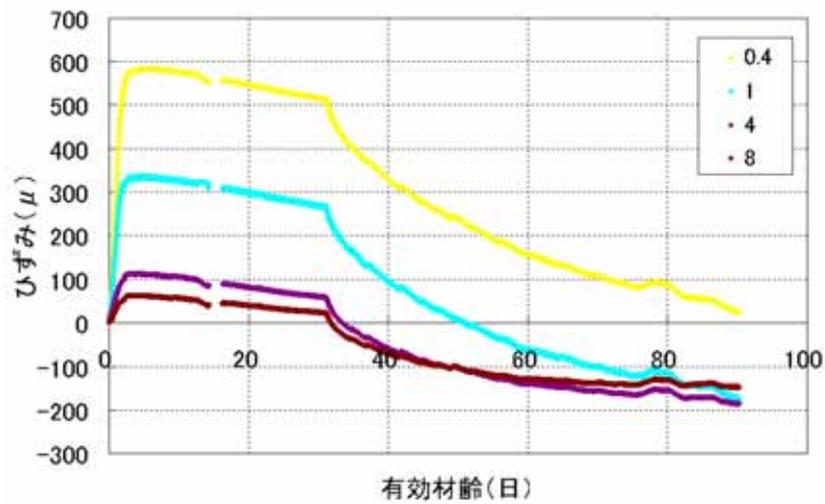


図-4.3 実ひずみ(LE50)

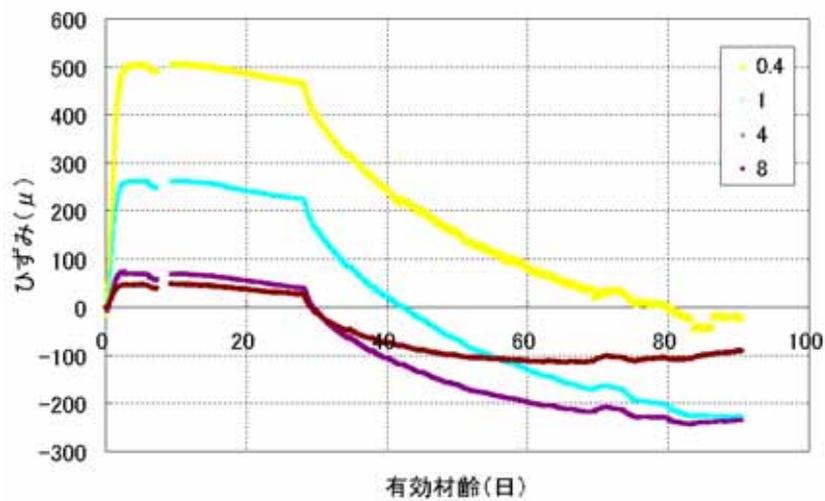


図-4.4 実ひずみ(LE55)

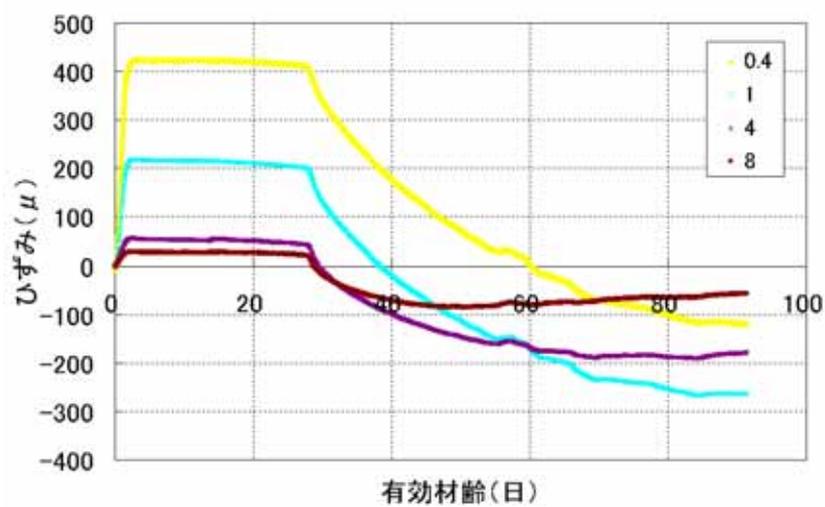


図-4.5 実ひずみ(LE65)

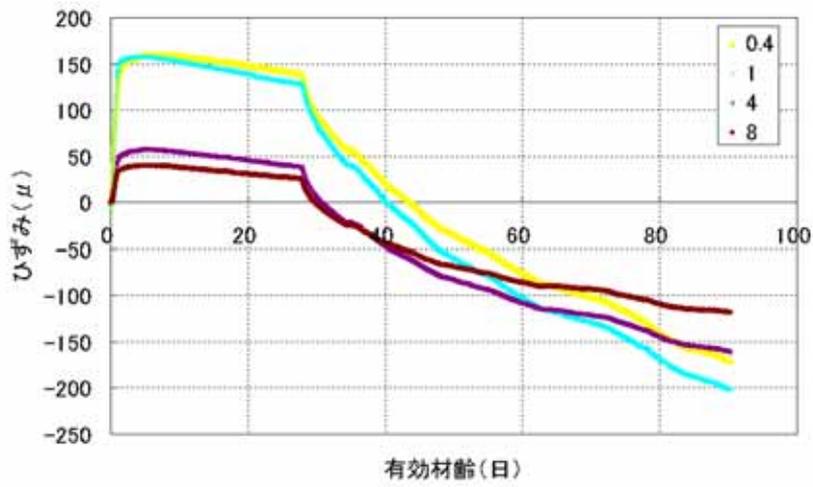


図-4.6 実ひずみ(NES50)

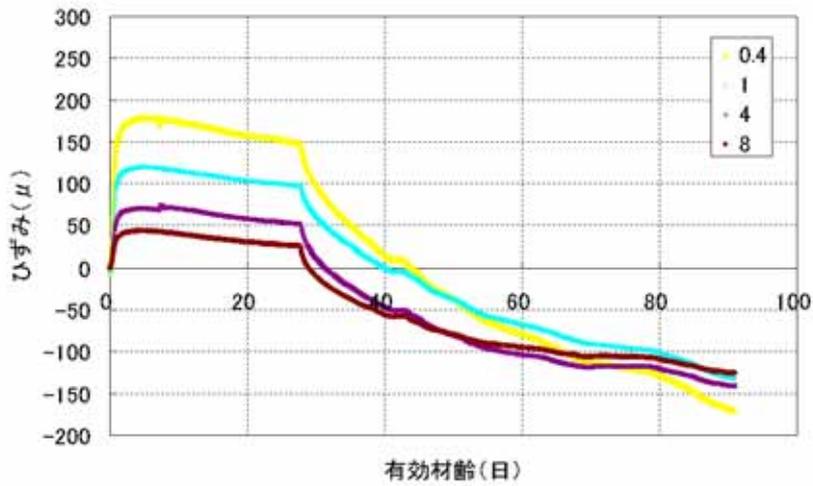


図-4.7 実ひずみ(NES55)

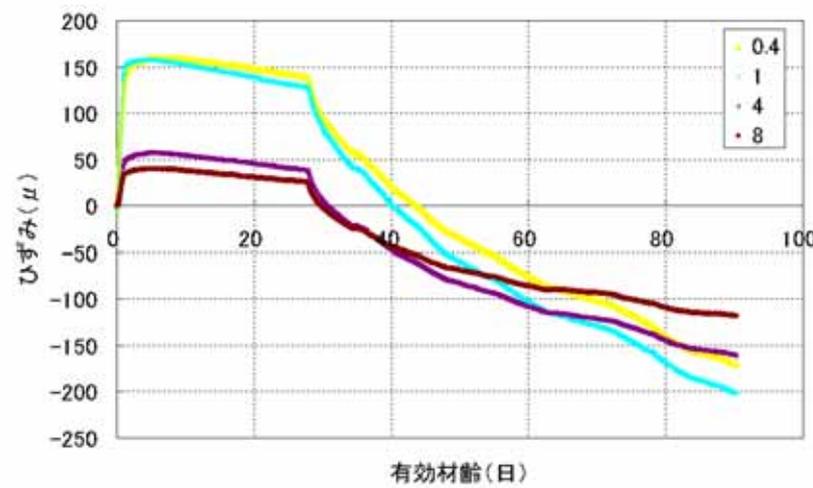


図-4.8 実ひずみ(NES65)

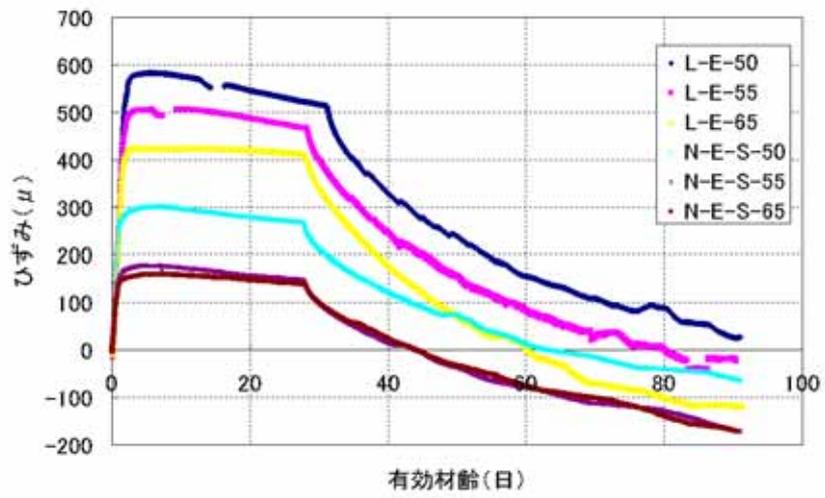


図-4.9 実ひずみ(鉄筋比 0.4%)

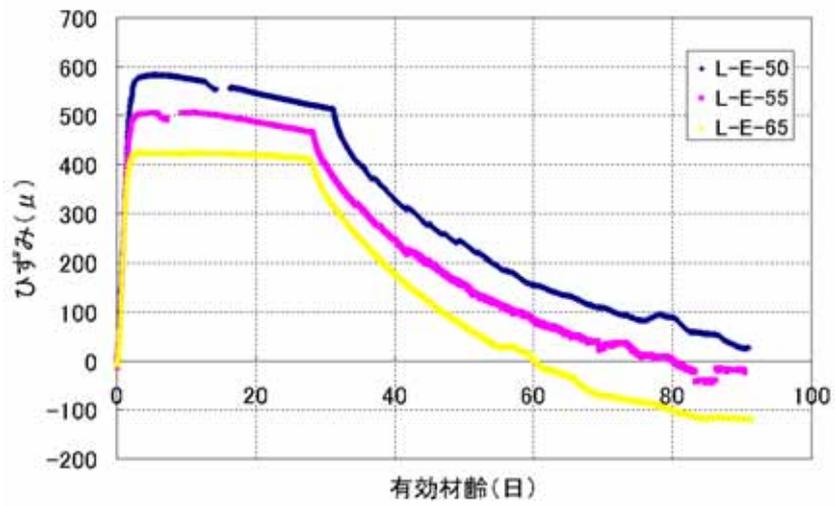


図-4.10 実ひずみ(LE-鉄筋比 0.4%)

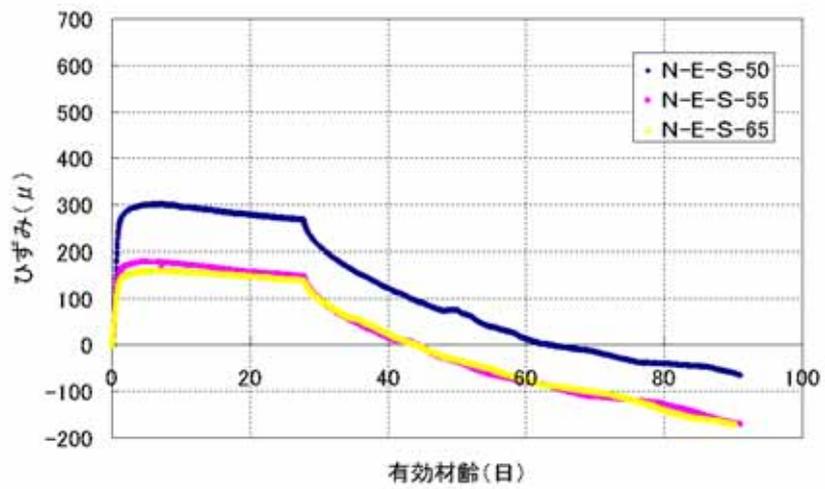


図-4.11 実ひずみ(NES-鉄筋比 0.4%)

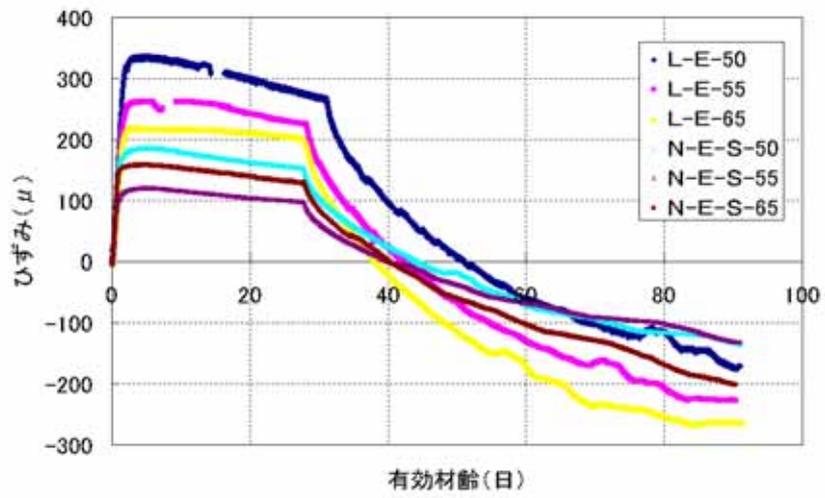


図-4.12 実ひずみ(鉄筋比 1.0%)

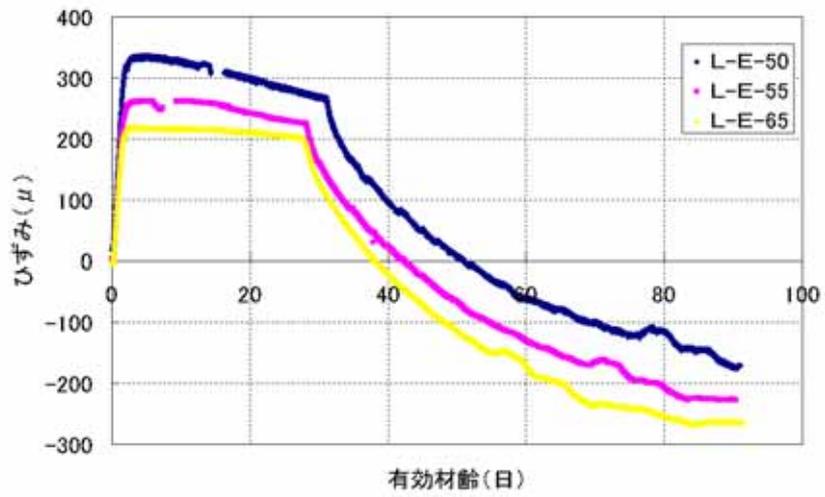


図-4.13 実ひずみ(LE-鉄筋比 1.0%)

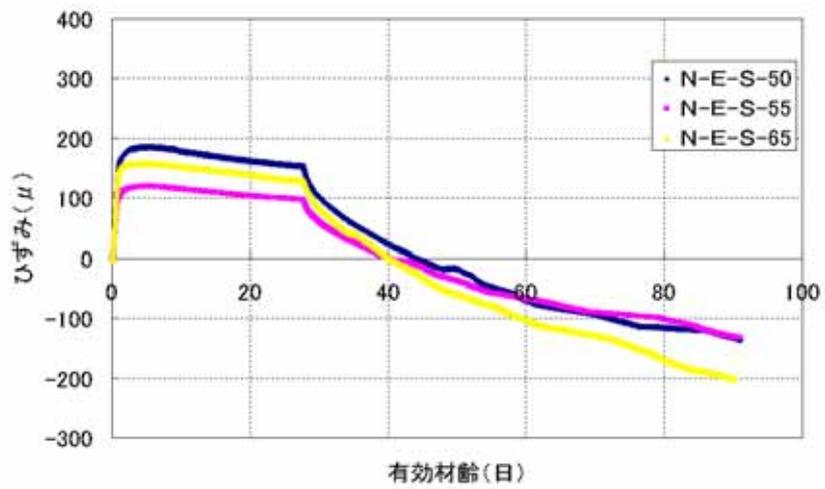


図-4.14 実ひずみ(NES-鉄筋比 1.0%)

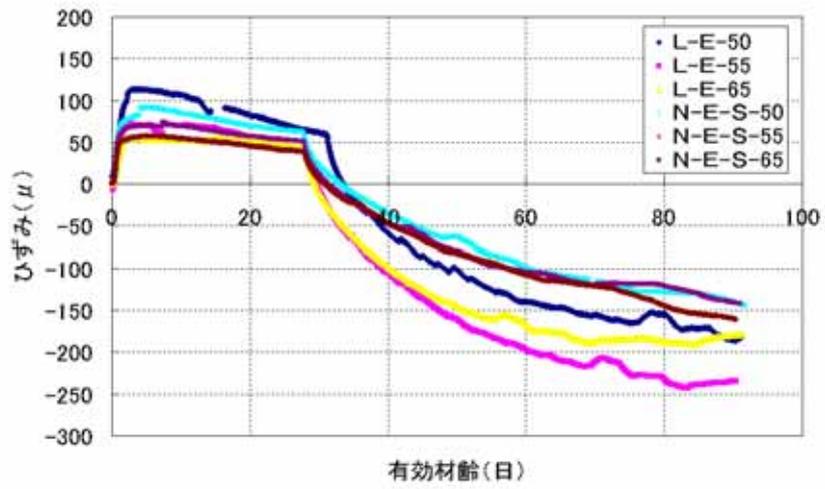


図-4.15 実ひずみ(鉄筋比 4.0%)

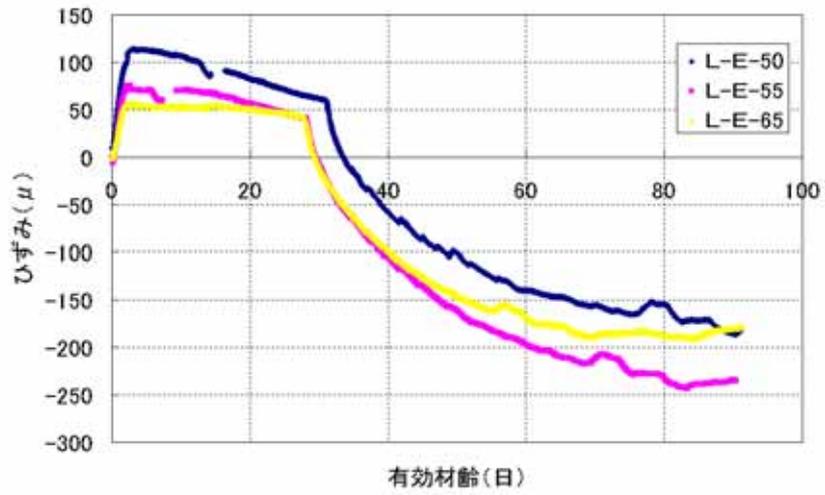


図-4.16 実ひずみ(LE-鉄筋比 4.0%)

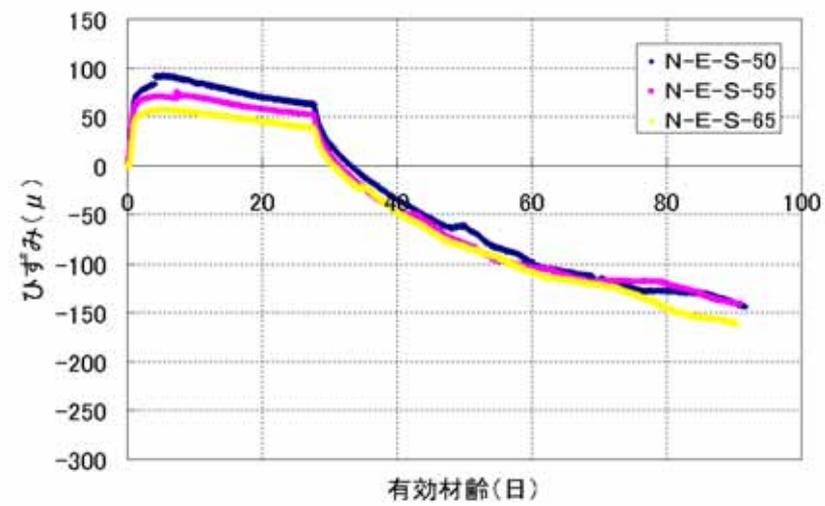


図-4.17 実ひずみ(NES-鉄筋比 4.0%)

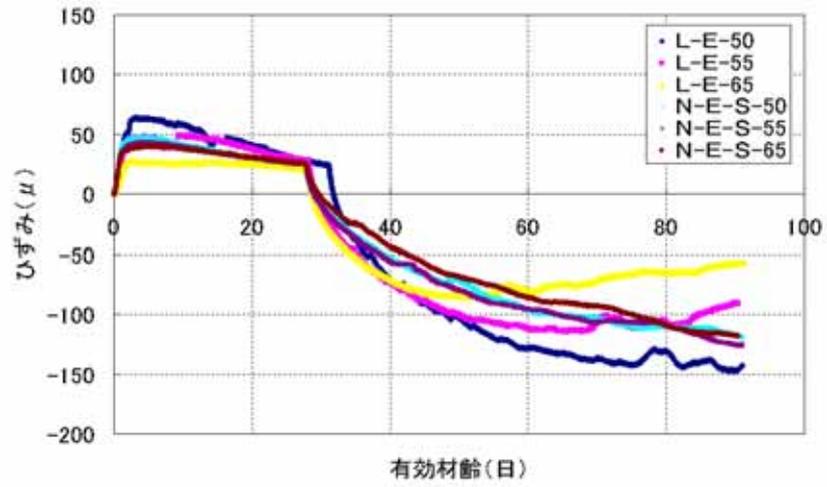


図-4.18 実ひずみ(鉄筋比 8.0%)

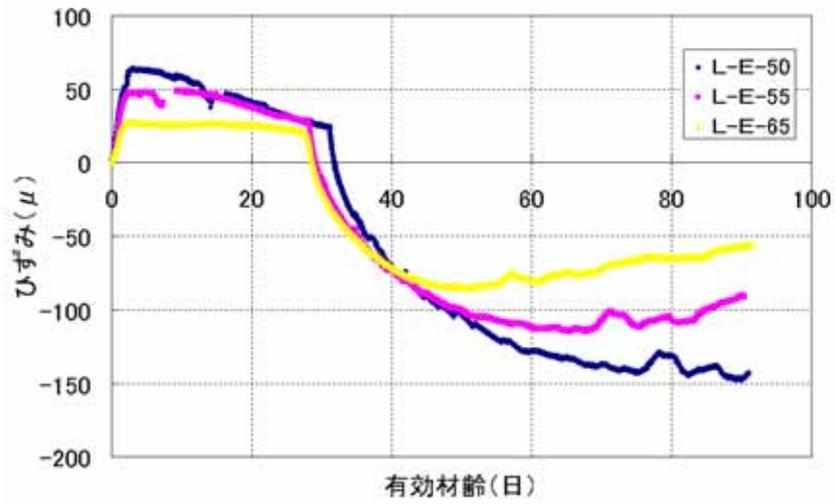


図-4.19 実ひずみ(LE-鉄筋比 8.0%)

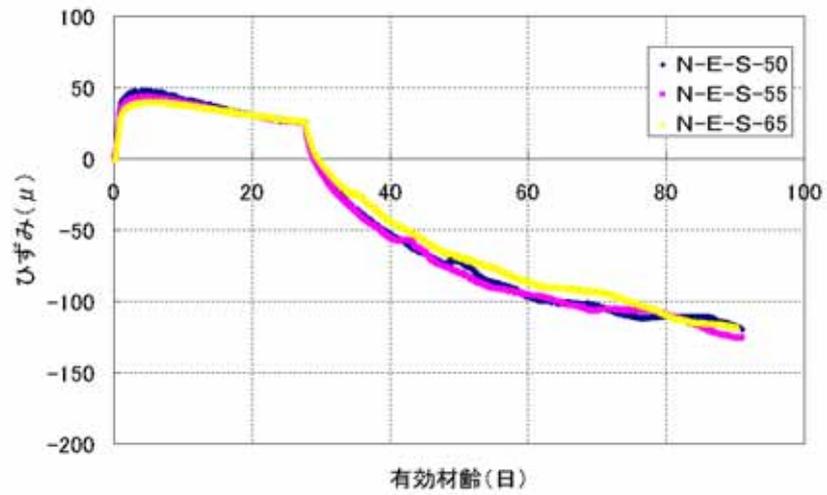


図-4.20 実ひずみ(NES-鉄筋比 8.0%)

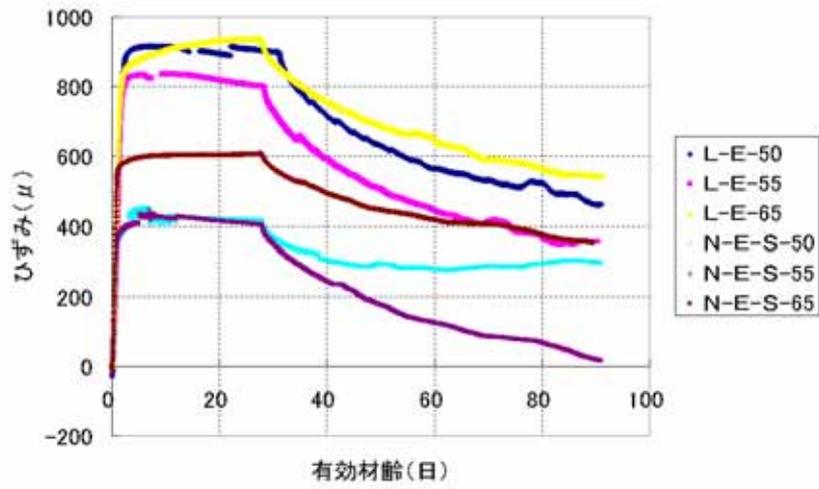


図-4.21 自由ひずみ(ひずみゲージ)

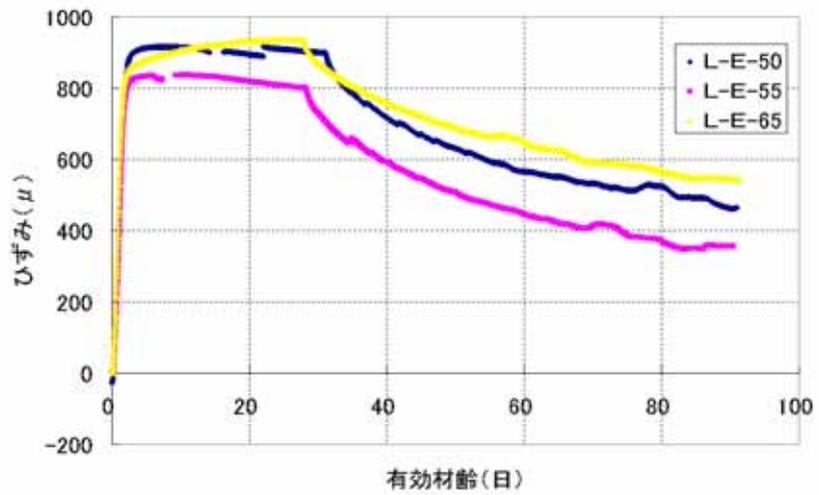


図-4.22 自由ひずみ(LE-ひずみゲージ)

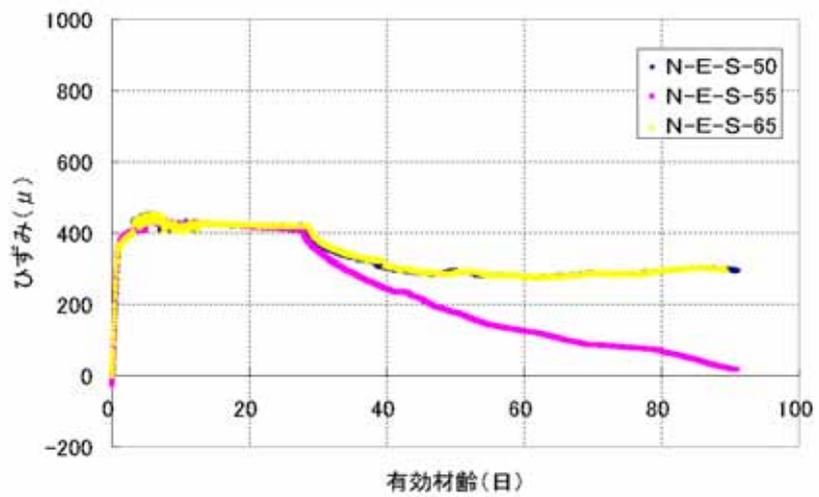


図-4.23 自由ひずみ(NES-ひずみゲージ)

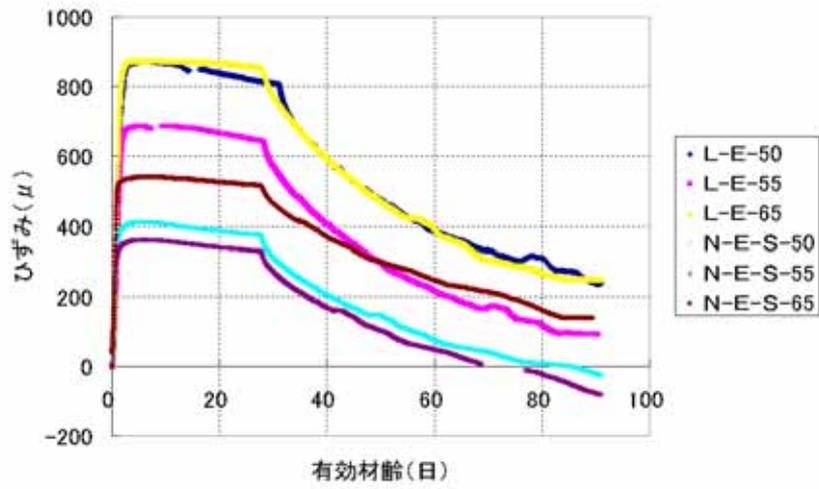


図-4.24 自由ひずみ(埋込み型ひずみ計)

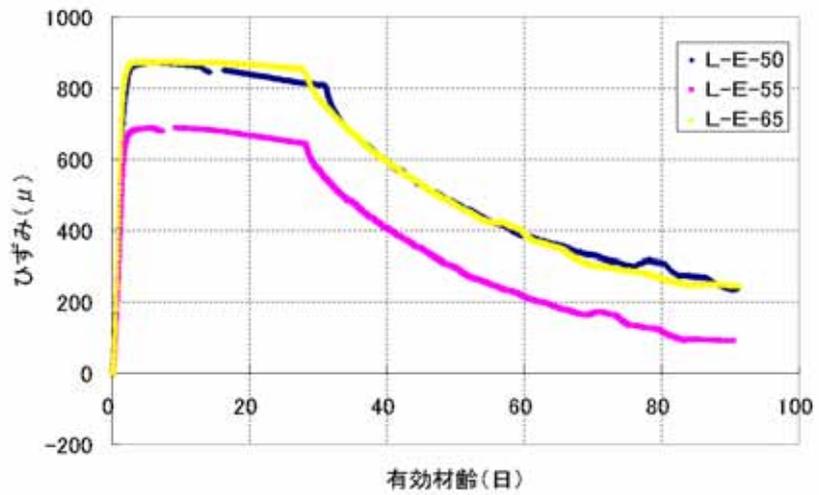


図-4.25 自由ひずみ(LE-埋込み型ひずみ計)

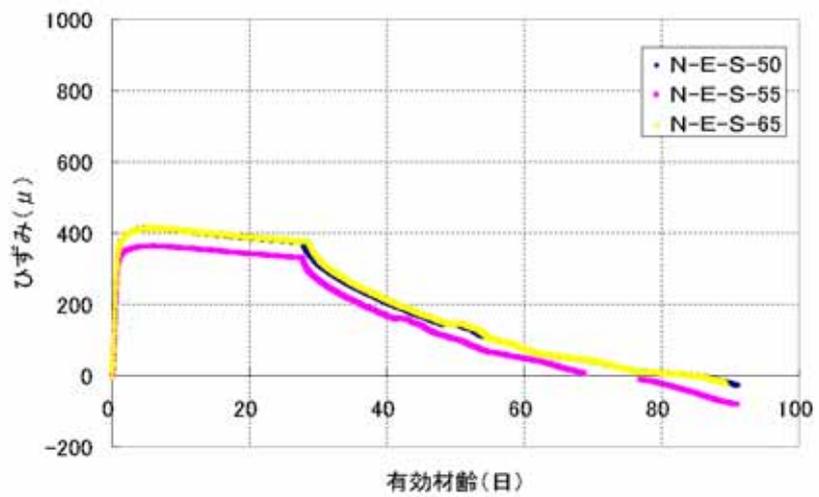


図-4.26 自由ひずみ(NES-埋込み型ひずみ計)

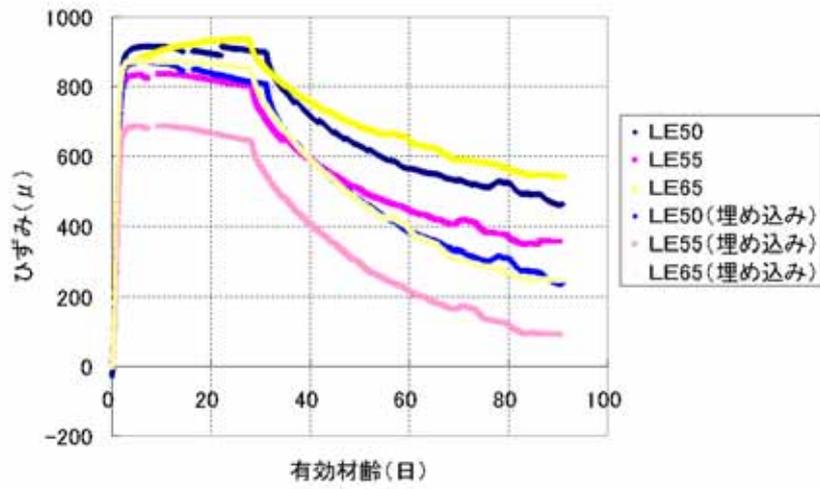


図-4.27 自由ひずみ(LE-ひずみゲージ・埋込み型ひずみ計比較)

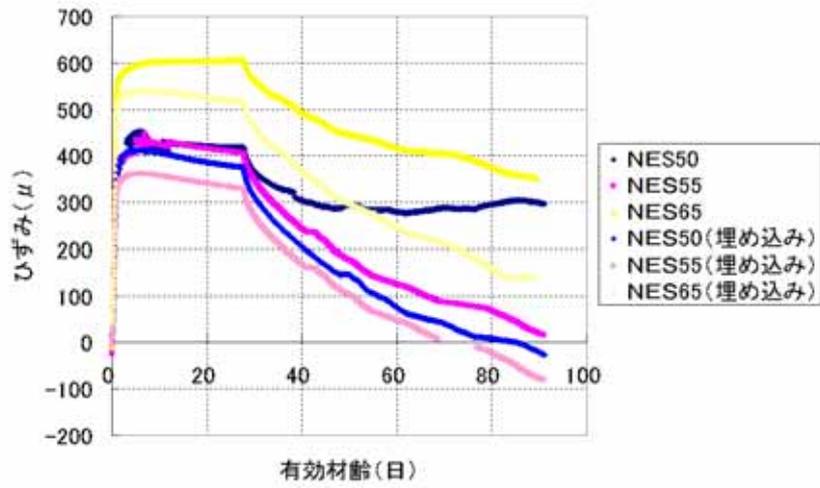


図-4.28 自由ひずみ(NES-ひずみゲージ・埋込みひずみ計比較)

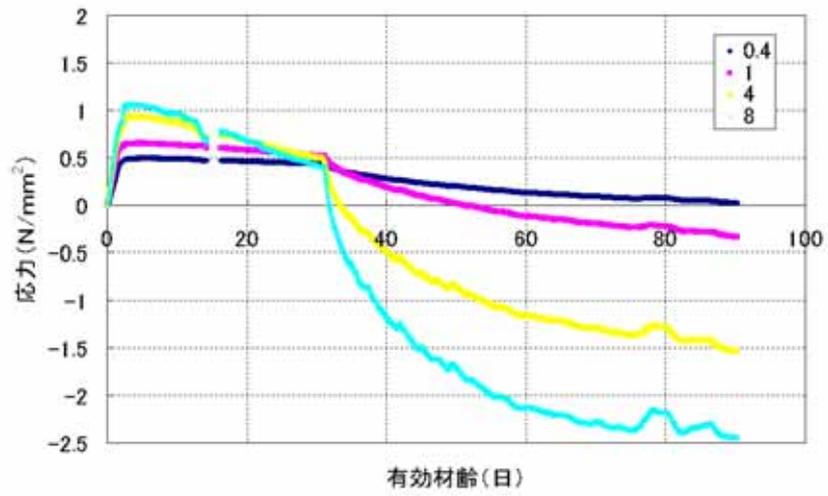


图-4.29 应力(LE50)

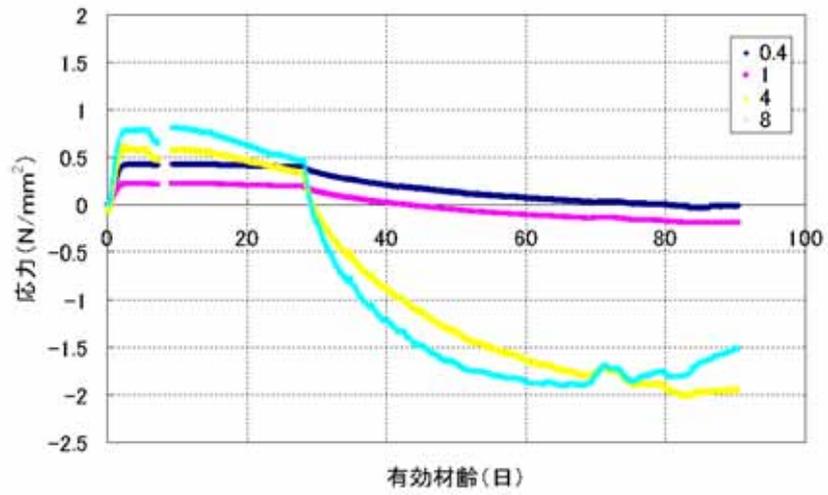


图-4.30 应力(LE55)

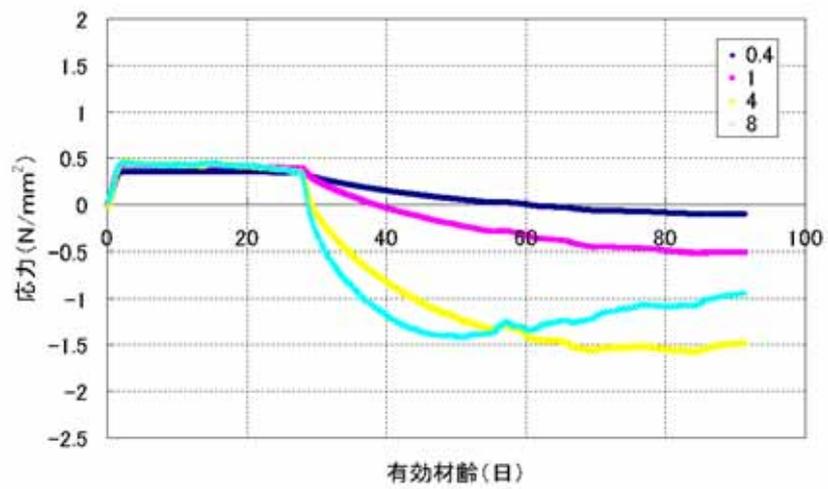


图-4.31 应力(LE65)

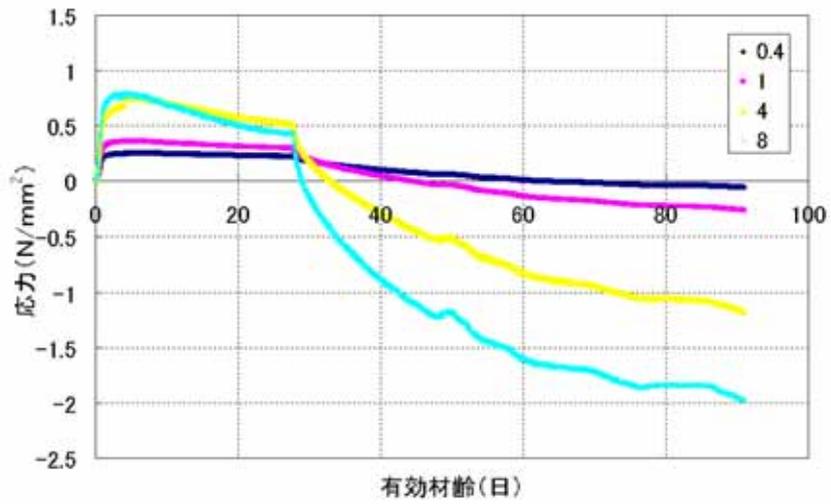


图-4.32 应力(NES50)

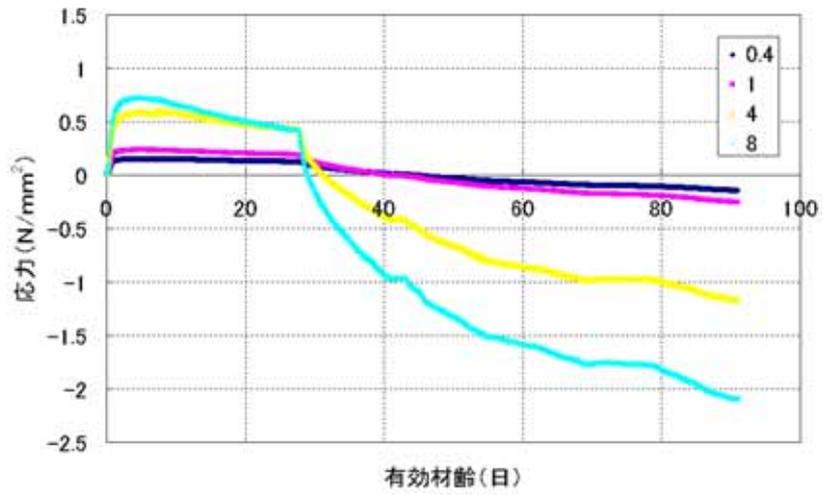


图-4.33 应力(NES55)

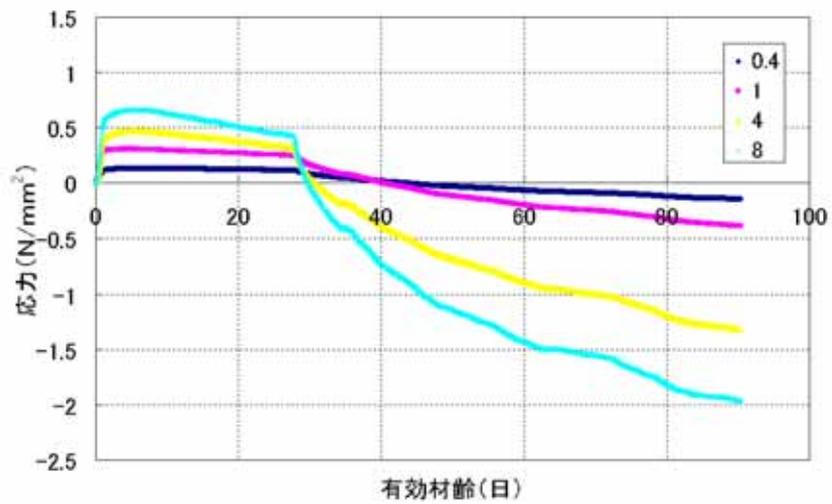


图-4.34 应力(NES65)

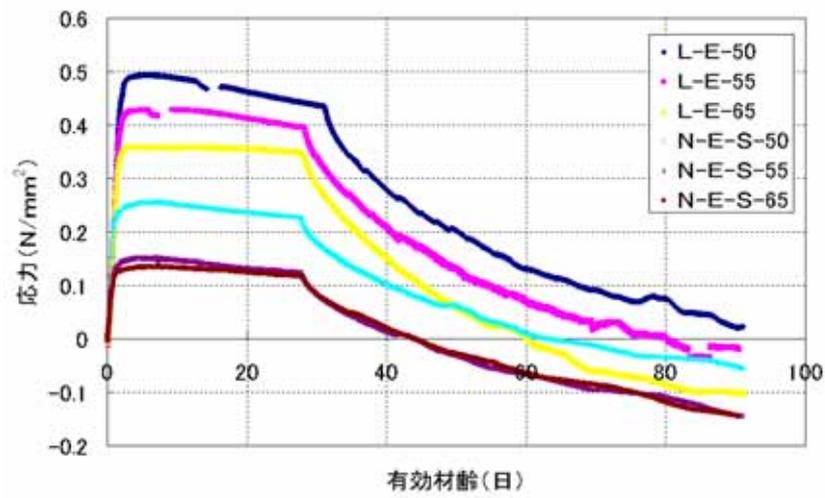


図-4.35 応力(鉄筋比 0.4%)

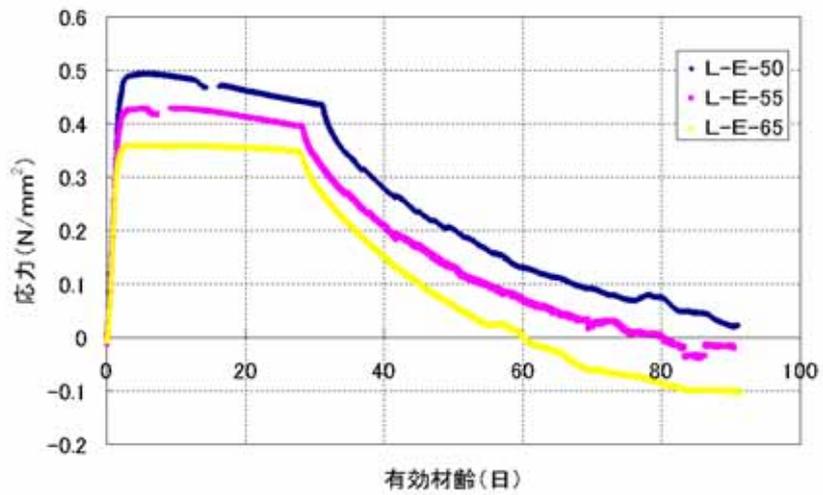


図-4.36 応力(LE-鉄筋比 0.4%)

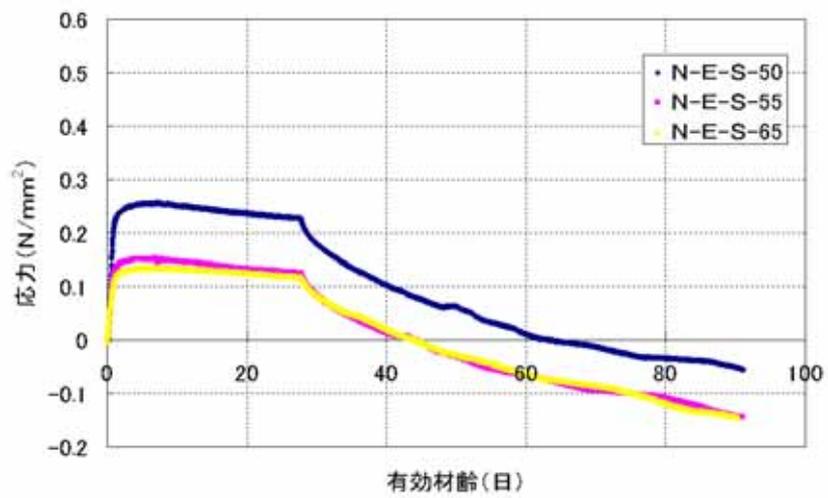


図-4.37 応力(NES-鉄筋比 0.4%)

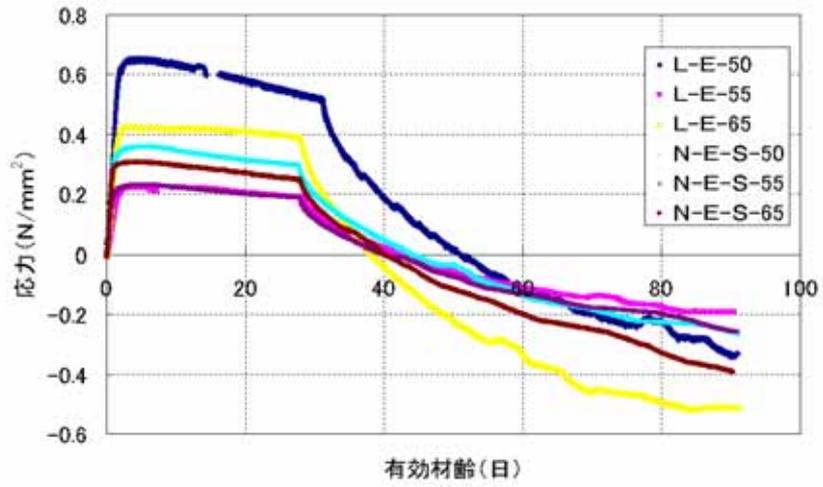


図-4.38 応力(鉄筋比 1.0%)

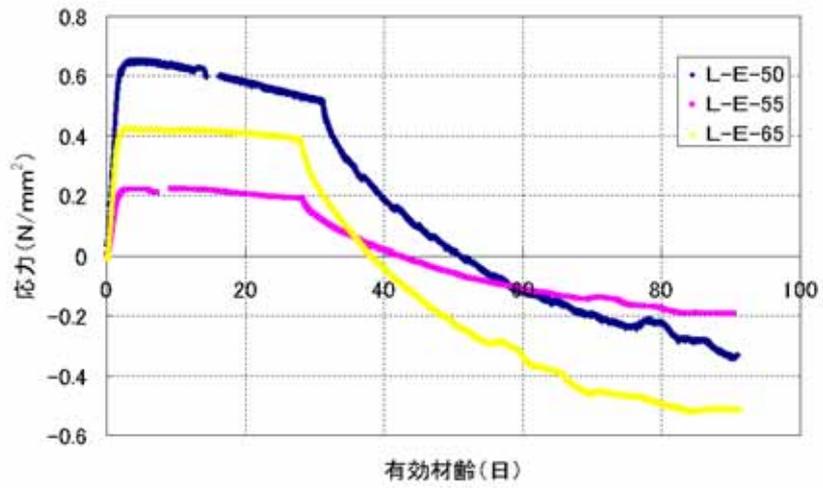


図-4.39 応力(LE-鉄筋比 1.0%)

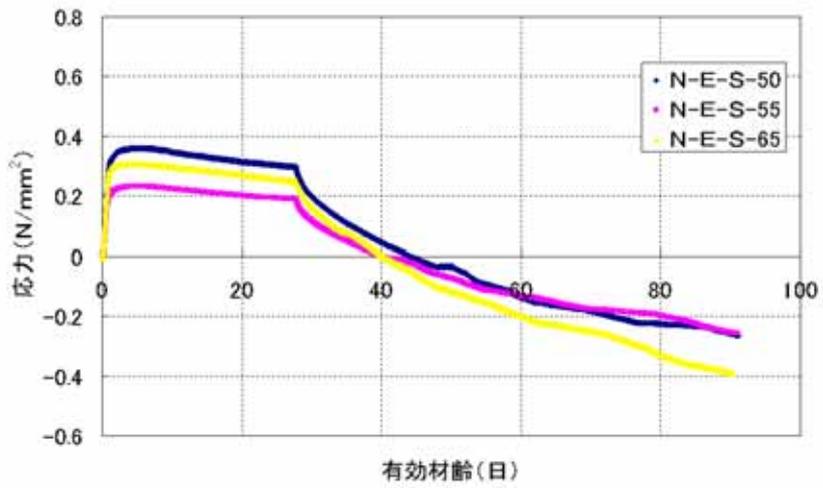


図-4.40 応力(NES-鉄筋比 1.0%)

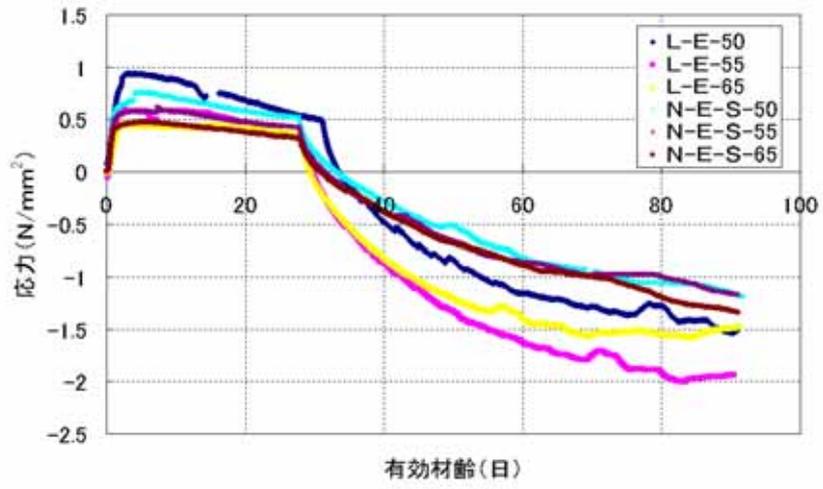


図-4.41 応力(鉄筋比 4.0%)

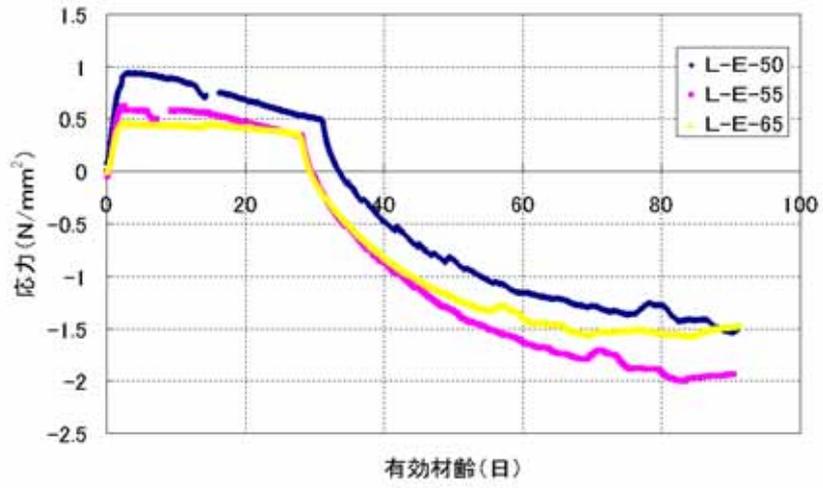


図-4.42 応力(LE-鉄筋比 4.0%)

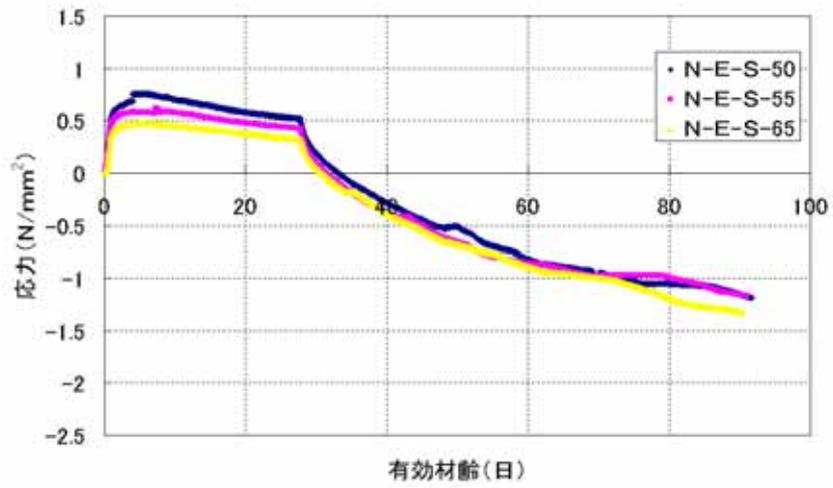


図-4.43 応力(NES-鉄筋比 4.0%)

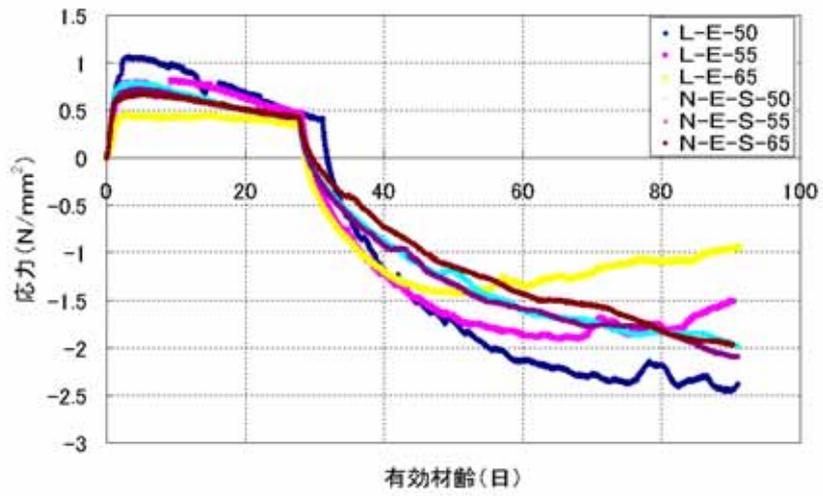


図-4.44 応力(鉄筋比 8.0%)

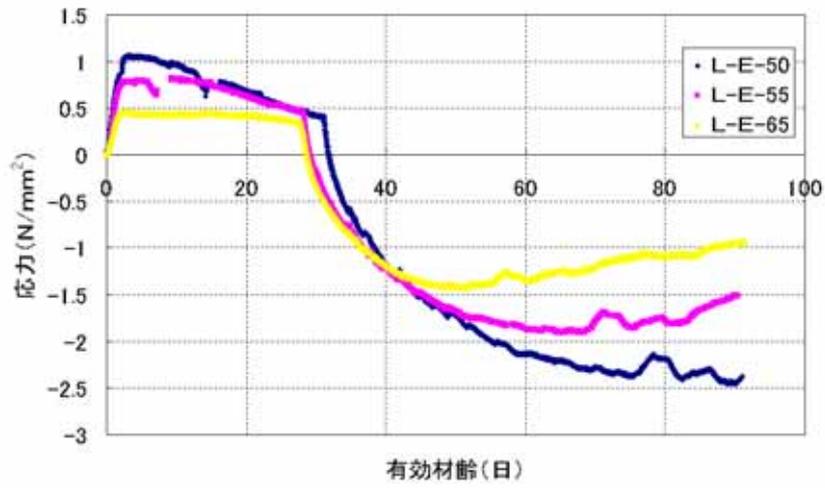


図-4.45 応力(LE-鉄筋比 8.0%)

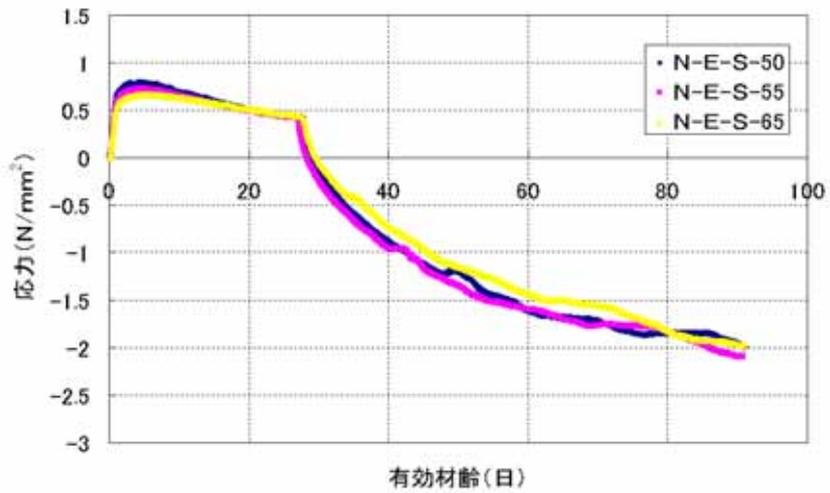


図-4.46 応力(NES-鉄筋比 8.0%)

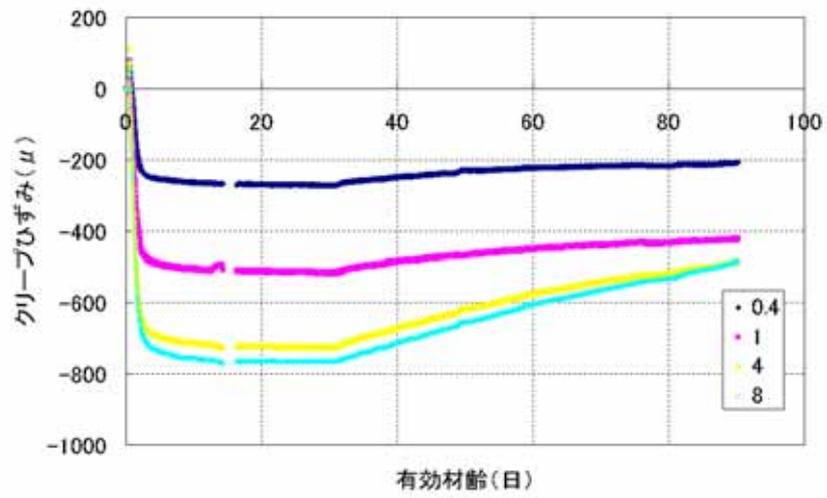


図-4.47 クリープひずみ(LE50)

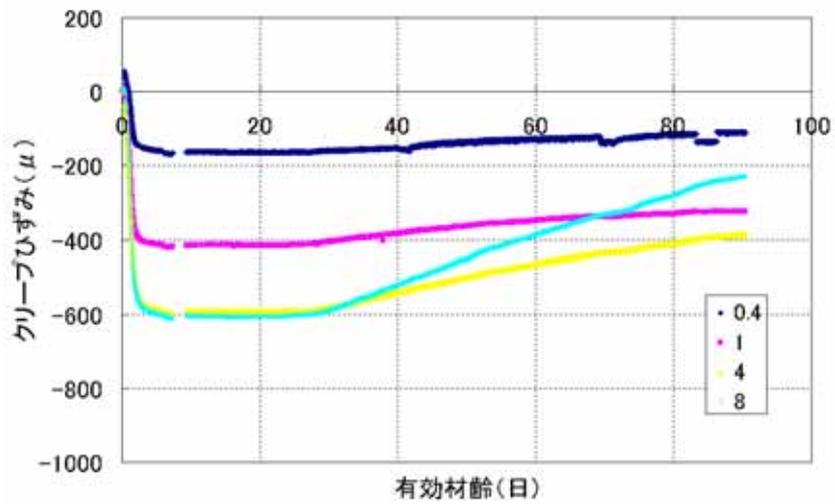


図-4.48 クリープひずみ(LE55)

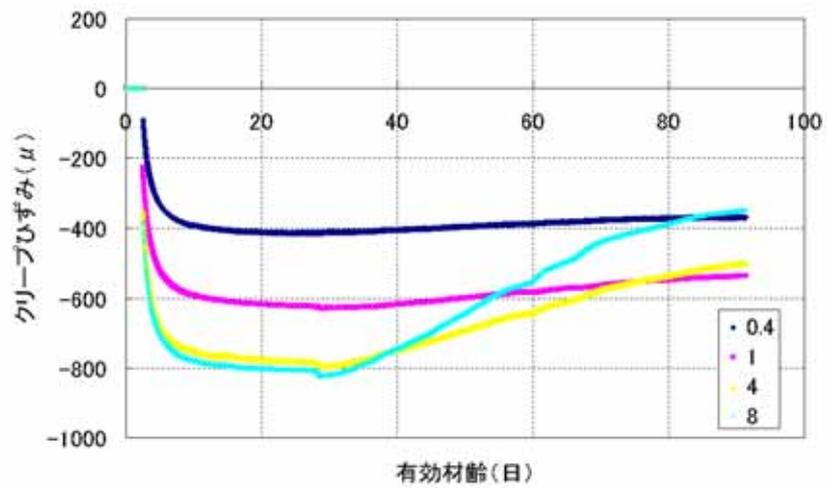


図-4.49 クリープひずみ(LE65)

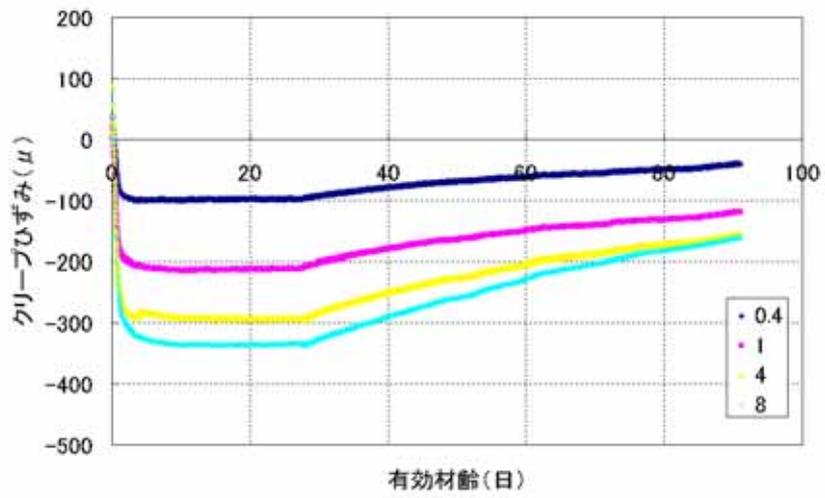


図-4.50 クリープひずみ(NES50)

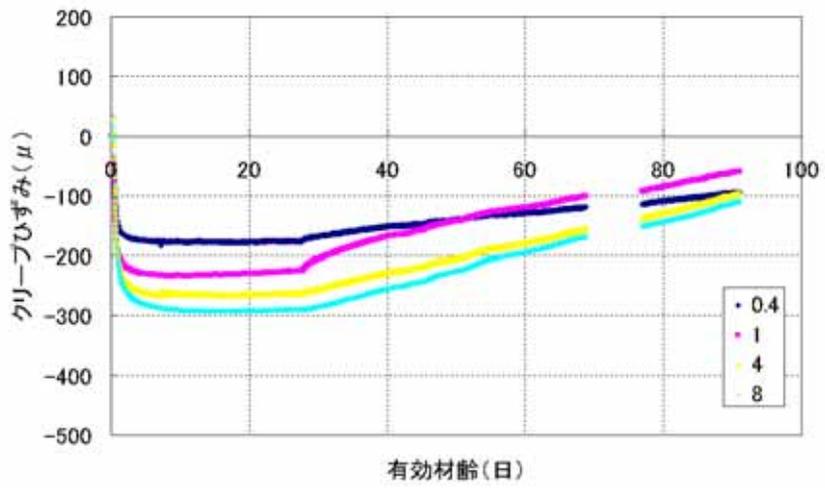


図-4.51 クリープひずみ(NES55)

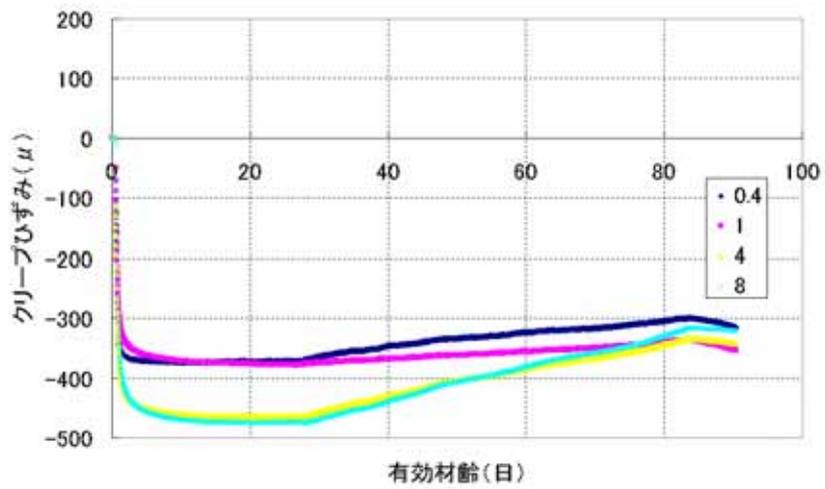


図-4.52 クリープひずみ(NES65)

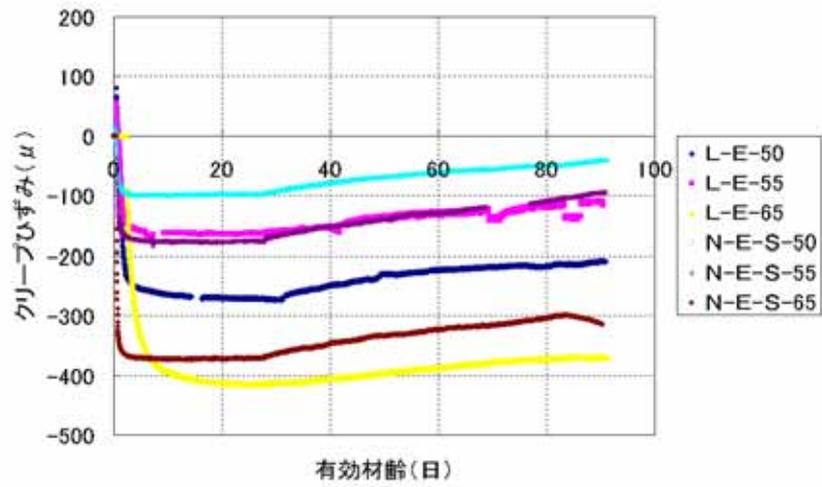


図-4.53 クリープひずみ(鉄筋比 0.4%)

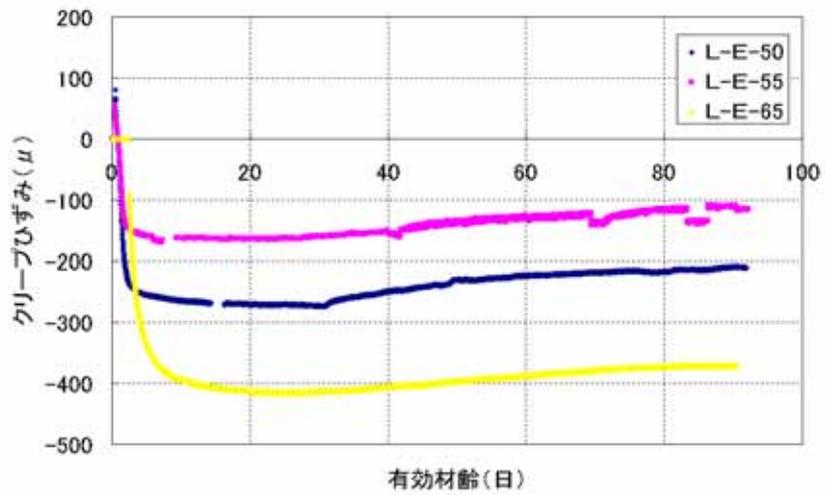


図-4.54 クリープひずみ(LE-鉄筋比 0.4%)

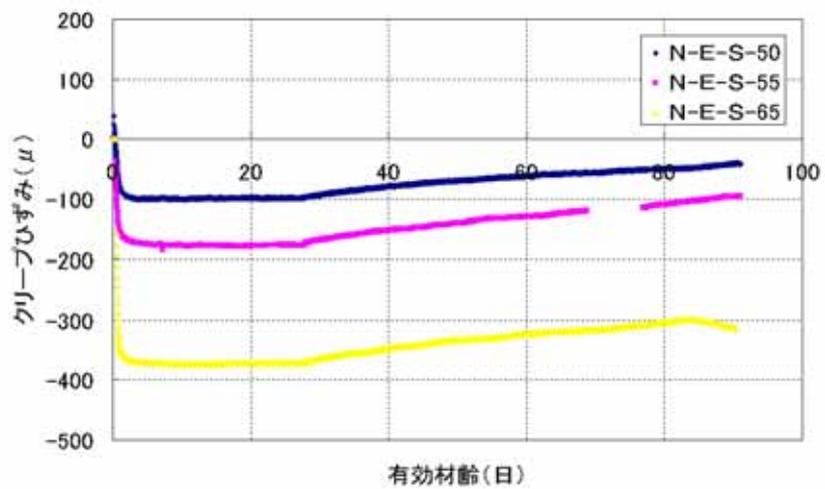


図-4.55 クリープひずみ(NES-鉄筋比 0.4%)

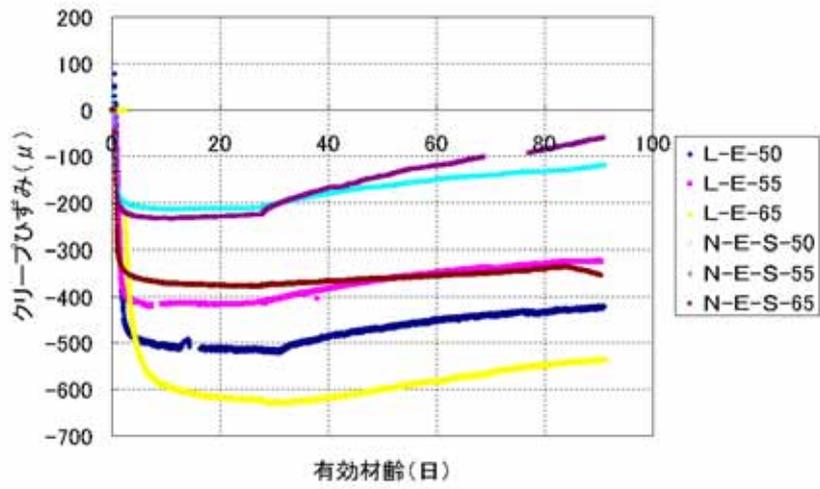


図-4.56 クリープひずみ(鉄筋比 1.0%)

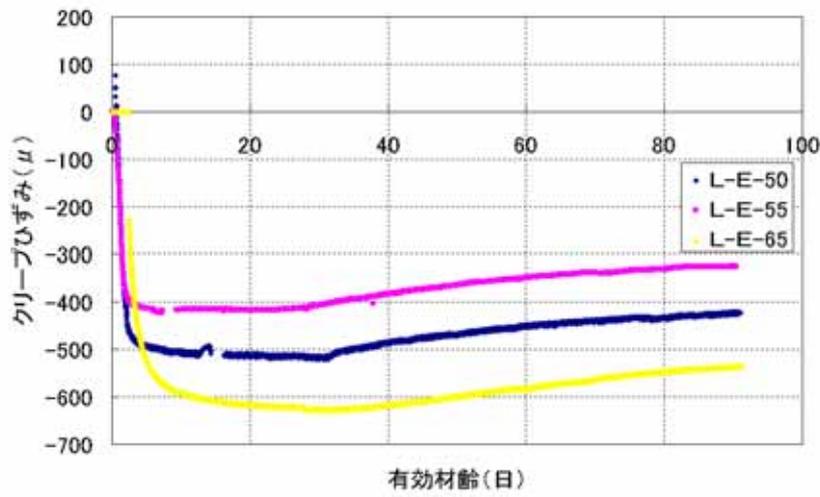


図-4.57 クリープひずみ(LE-鉄筋比 1.0%)

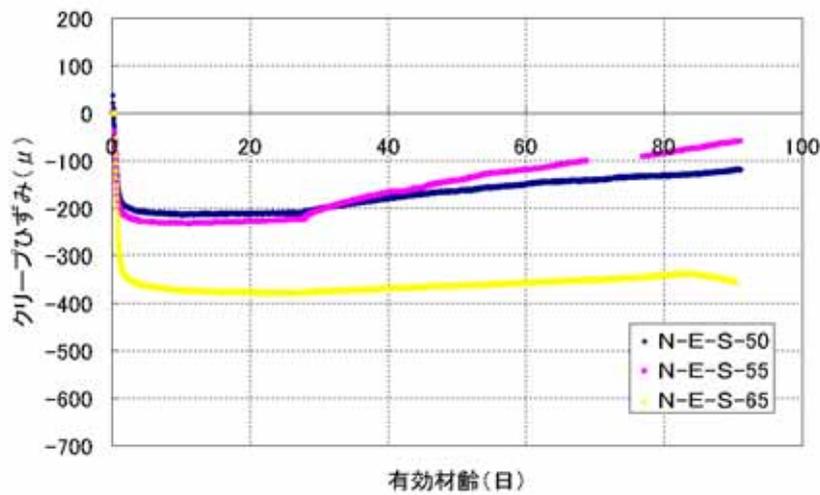


図-4.58 クリープひずみ(NES-鉄筋比 1.0%)

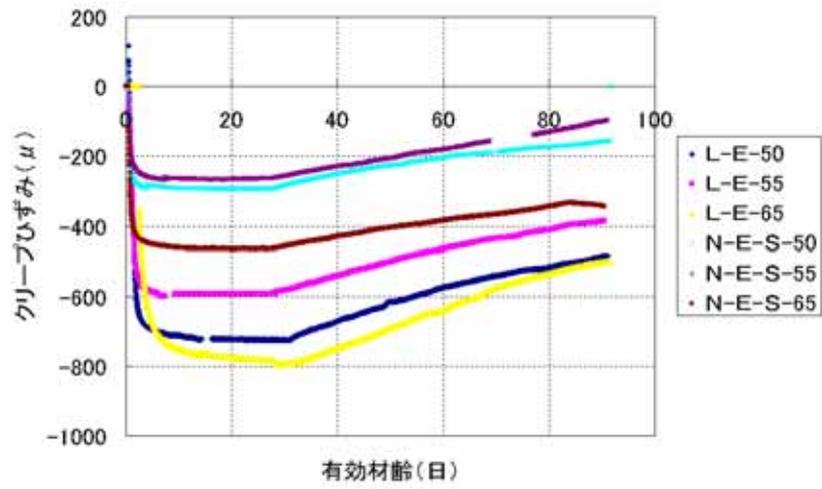


図-4.59 クリープひずみ(鉄筋比 4.0%)

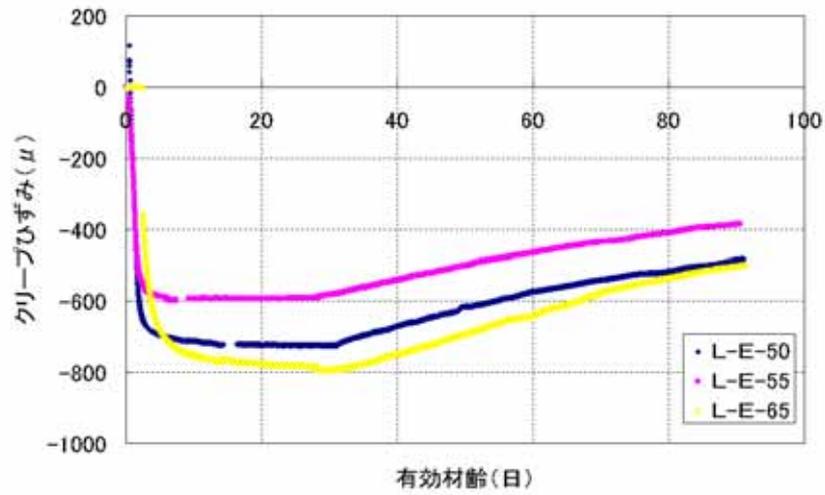


図-4.60 クリープひずみ(LE-鉄筋比 4.0%)

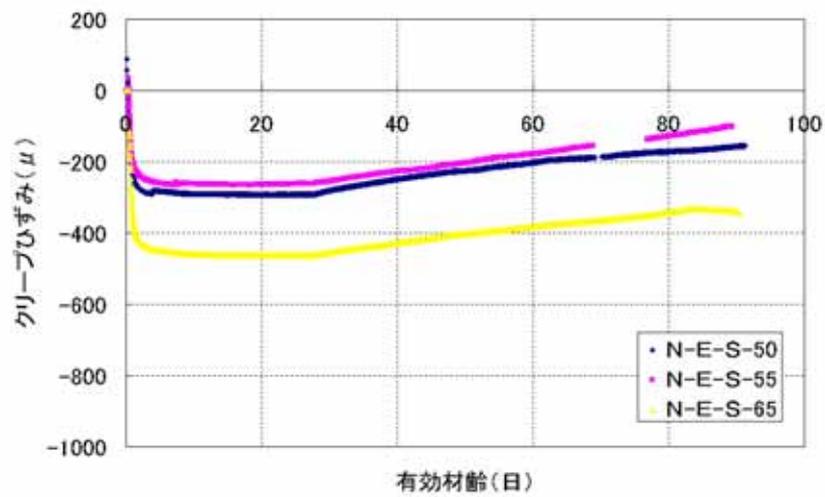


図-4.61 クリープひずみ(NES-鉄筋比 4.0%)

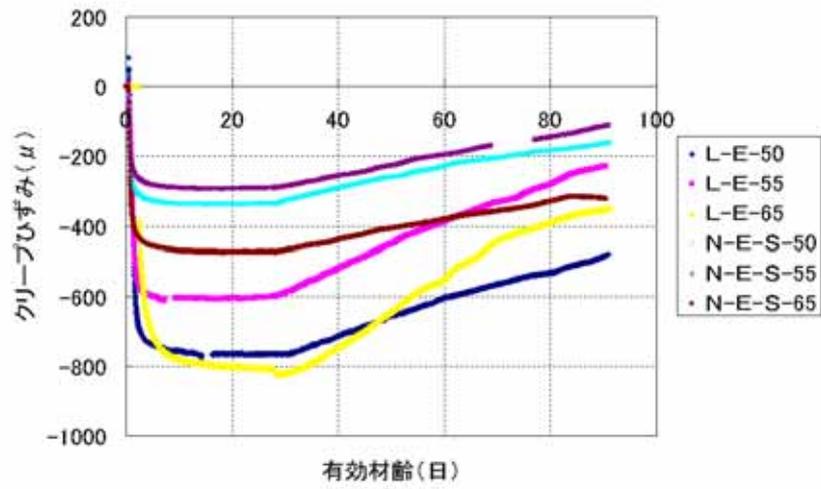


図-4.62 クリープずみ(鉄筋比 8.0%)

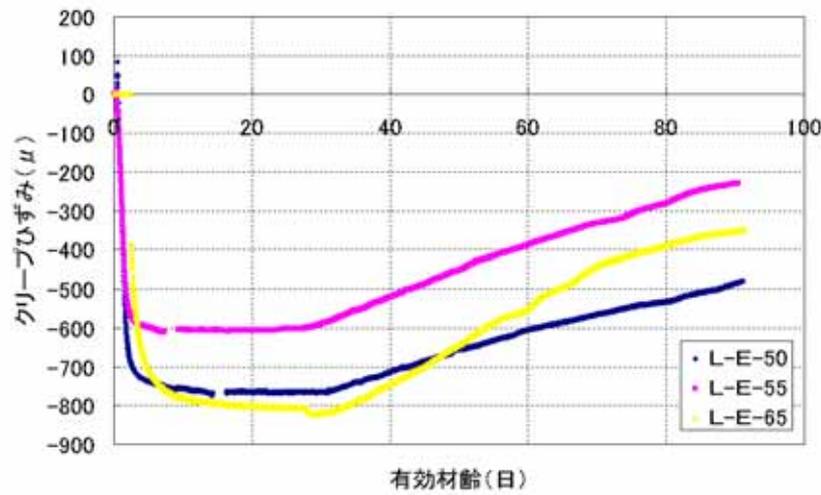


図-4.63 クリープひずみ(LE-鉄筋比 8.0%)

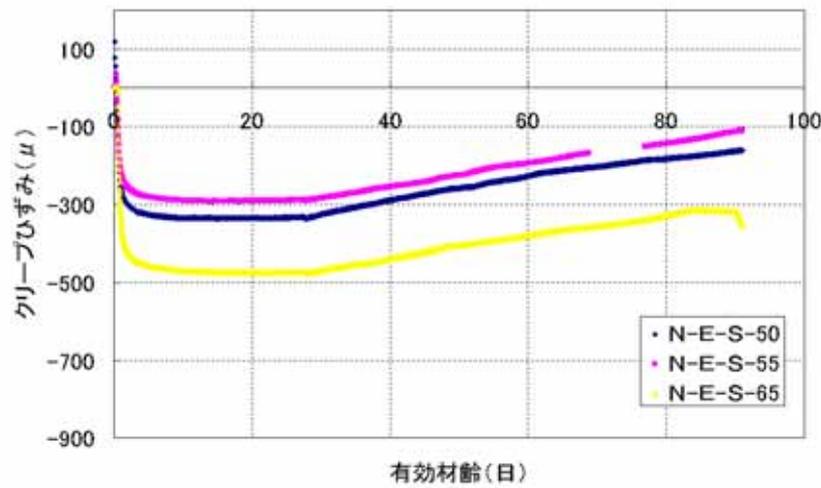


図-4.64 クリープひずみ(NES-鉄筋比 8.0%)

## 第5章 クリープ解析

- 5.1 概説
- 5.2 実ひずみ近似
- 5.3 自由ひずみ近似
- 5.4 クリープ逆解析
- 5.5 クリープ解析

## 5.1 概説

鉄筋コンクリート構造物のひび割れ幅予測技術を確立するためには、部材に作用する内部応力・作用応力の時間的変動を考慮しなければならない。その解析方法として、今回は Step by Step 法による解析を試みた。Step by Step 法は、クリープ進行曲線を用いて任意の時刻分割に従い、時間間隔毎の変化応力による変化ひずみを求積していく解析法である。

Step by Step 法による応力解析を行うには、コンクリートの乾燥収縮、自己収縮、温度応力、クリープ及び対象部材の鉄筋との剛性を評価する必要がある。本研究では、恒温恒湿状態での実験を行ったため、温度変化による影響はないものとした。

## 5.2 実ひずみ近似

実ひずみの実験値を後の解析に用いるために近似式を求めた。4章で述べた実験結果から実ひずみの経時変化を増加時、収縮時、乾燥時の3つに分類した。解析上も同様に3つに分類する事でより正確な挙動を評価できるようにした。図-5.1に分類の模式図を示す。

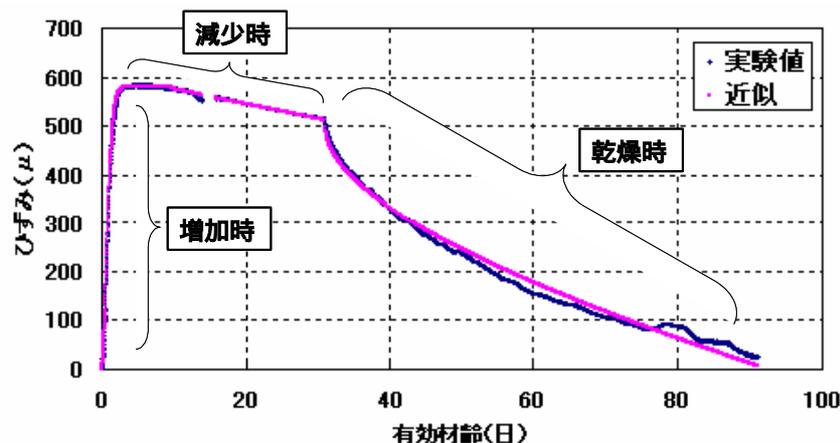


図-5.1 分類模式図

### 5.2.1 増加時

増加時の実ひずみを以下の式を用いて近似した。

$$c = c_{\max} \cdot [1 - \text{EXP} \{ a \cdot (t)^b \}] \quad (5.1)$$

$c$  : 実ひずみ(増加時)

$c_{\max}$  : 実ひずみの最大値

$t$  : 有効材齢

$a, b$  : 実験定数

### 5.2.2 減少時

実ひずみは、最大値を迎えてから乾燥開始する材齢 28 日までの間でやや減少する傾向が見

られた。実験結果から、減少の傾向は線形補間できるとし以下の式で近似した。

$$c = c_{\max} + c(t-t_1) \quad (5.2)$$

$c$  : 実ひずみ(減少時)  
 $c_{\max}$  : 実ひずみの最大値  
 $c$  : 実ひずみ減少率  
 $t$  : 有効材齢  
 $t_1$  : 減少開始材齢

### 5.2.3 乾燥時

乾燥時の実ひずみは増加時に用いた場合と同形の式で近似した。以下に式を示す。

$$c = c_{sh} \cdot c [1 - \text{EXP} \{ c \cdot (t - t_{sh})^d \}] \quad (5.3)$$

$c$  : 実ひずみ(乾燥時)  
 $c_{sh}$  : 乾燥開始時の実ひずみ  
 $c$  : 乾燥の大きさを決める係数  
 $t$  : 有効材齢  
 $t_{sh}$  : 乾燥開始材齢  
 $c, d$  : 実験定数

### 5.2.4 実ひずみ近似結果

式(5.1)～式(5.3)を用いて実ひずみを近似した。近似結果を図 5.2～図 5.25 に示す。全ての配合において概ね近似することができた。ただし材齢 80 日を越えて乾燥による変化が小さくなる部分については精度良く近似する事 ¥ ことができなかった。

### 5.2.5 実ひずみ係数

近似によって得られた各ひずみ成分の係数から配合による関係、鉄筋比による関係を検討した。検討した係数は  $c_{\max}$ 、 $c$ 、 $c$  の 3 つである。

#### (1) $c_{\max}$

近似によって得られた  $c_{\max}$ の結果を図-5.26～図-5.36 に示す。 $c_{\max}$ は実ひずみの最大値を示す。図-5.26～図-5.30 からLE,NES共に鉄筋比が大きくなるに伴い  $c_{\max}$ が小さくなる傾向が見られた。これは 4 章でも述べたとおり、鉄筋の拘束の影響と、コンクリートと鉄筋との付着強度の違いによるものであると思われる。

同水結合材比においてLEとNESを比較した場合LEの値が大きいことがわかる。既往の研

究より<sup>[1]</sup>低熱セメントや中庸熱セメントのような水和熱を抑え強度発現を緩やかにしたセメントほど膨張が大きくなる傾向にあると報告している。本研究においても同様の傾向であった。

図-5.31～図-5.36 は水結合材比による影響を示したものである。一般には膨張コンクリートの配合による影響は水結合材比よりも単位膨張材量による影響が大きいとされている。本研究では、単位膨張材量は一定としていることからその影響の程度ははっきりしないものの、実験結果から判断して水結合材比による影響が大きいと思われ、水結合材比が大きくなるのに伴い  $\epsilon_{max}$  は小さくなる傾向にあることがわかる。その要因としては膨張機構による影響があると思われる。既往の研究によると<sup>[1]</sup>、膨張材はセメントマトリクスを介して押し合い、膨張力を伝達するとされている。本研究では、単位水量、単位膨張材量は一定で行っているため、水結合材比が大きくなるに伴い単位セメント量は小さくなる。つまり単位セメント量が小さくなるのに伴い、セメントマトリクスの形成量が少なくなると推測される。そのため、水結合材比が大きくなるのに伴い膨張量は少なくなる傾向にあると考えられる。

(2)  $\epsilon_c$

近似によって得られた  $\epsilon_c$  を図-5.37～図-5.47 に示す。 $\epsilon_c$  は、材齢 28 日以前での膨張作用が小さくなった後のひずみの減少率を表したものである。ひずみの減少の要因としては、コンクリートの自己乾燥収縮、または鉄筋の弾性変化が考えられる。実験は材齢 28 日まで封緘状態で行っているため、乾燥収縮による影響はないものと思われる。ただし、ビニールシートによる封緘が完全でなかった可能性も考えられる。鉄筋の弾性変化による影響としては、膨張コンクリートは材齢 3 日程度で膨張ひずみの最大値を迎えその後は拘束や養生状態の変化がない限り、ある程度一定の値を保つ。鉄筋は膨張過程でコンクリートの膨張に伴い引張力を受けるが、ひずみが安定してくると、鉄筋に生じる応力は弾性域なので元に戻ろうとする力が作用する。そのためにコンクリートも収縮の方向にひずみが生じたものと考えられる。

図-5.37～図-5.41 は  $\epsilon_c$  と鉄筋比との関係を示したものである。LEでは鉄筋比が大きくなるのに伴い  $\epsilon_c$  が小さくなっていく傾向にあることがわかる。これは膨張量が大きいほど膨張作用終了後の反動が大きく収縮量が増加すると推測される。NESでは鉄筋比による影響が顕著には現れない結果となった。

図-5.42～図-5.47 は水結合材比による影響を示したものである。LEでは水結合材比が大きくなるのに伴い  $\epsilon_c$  が小さくなる傾向が見られる。やはり水結合材比の増加に伴う膨張量の減少による影響が現れていると思われる。一方NESでは水結合材比による影響はあまり見られなかった。

(3)  $c_c$

近似によって得られた  $c_c$  の結果を図-5.48～図-5.58 に示す。 $c_c$  は乾燥収縮量を表す係数である。

図-5.48～図-5.52 は  $c_c$  と鉄筋比との関係を示したものである。鉄筋比が大きくなるのに伴い、収縮量は小さくなる傾向にある。また LE と NES を比較すると NES に比べ LE の値が大きい事がわかる。

図-5.53～図-5.58 は  $c_c$  と水結合材比の関係を示したものである。水結合材比による影響は特に見られなかった。水結合材比が大きくなるのに伴い収縮量は増加することが予測されたが実験結果にはその傾向が見られなかった。その要因としては、乾燥開始材齢があげられる。乾燥収縮の影響を把握する場合には、若材齢時において乾燥を開始させるのが一般的である。しかし本研究では乾燥開始材齢 28 日と比較的遅い時期で開始したため影響が顕著に現れなかったものと思われる。

### 5.3 自由ひずみ

実験によって得た自由ひずみ結果を後の解析に用いるために数式化し近似した。実験により実ひずみ同様、自由ひずみの経時変化も増加時、収縮時、乾燥時の 3 つに分類できる事がわかった。解析上も同様に 3 つに分類する事でより正確な値を再現できるようにした。

#### 5.3.1 自由ひずみ近似

自由ひずみ近似に用いた式は式(5.1)～式(5.3)の実ひずみに用いた式と同様である。自由ひずみの近似結果を図-5.59～図-5.64 に示す。実ひずみ同様に増加時、減少時、乾燥時の 3 つに場合わけすることで実験値とほぼ一致させることができた。

#### 5.3.2 自由ひずみ係数

実ひずみ同様、近似によって得た係数から配合による関係、鉄筋比による関係を検討した。検討した係数は  $c_{max}$ 、 $c_c$ 、 $c_c$  の 3 つである。

(1)  $c_{max}$

近似によって得られた  $c_{max}$  の結果を図-5.65、図-5.66 に示す。実ひずみにおいては水結合材比が大きくなるのに伴い  $c_{max}$  が小さくなる傾向にあったが自由ひずみにおいては LE65、NES65 の方が大きい値を示した。これは、実験結果でも述べたとおり、水結合材比が大きくなることによる異常膨張が考えられる。

(2)  $c_c$

近似によって得られた  $c_c$  の結果を図-5.67、図-5.68 に示す。LEにおいて、水結合材比が大きくなるのに伴い、 $c_c$  が小さくなる結果は実ひずみと同様の傾向である。また、NESにおいても同様の傾向が見られた。

(3)  $\epsilon_c$

近似によって得られた  $\epsilon_c$  の結果を図-5.69、図-5.70 に示す。LE、NESともに水結合材比による影響はあまり見られない結果となった。

## 5.4 クリープ逆解析

昨年度までの研究において既存の MC90 式に膨張に関する項を加える事で、クリープ曲線のある程度定式化できることがわかっている。本研究では、引き続き MC90 式の妥当性を検討することとした。

### 5.4.1 MC90 式

MC90 式を式(5.4)に示す。

$$\begin{aligned}
 \epsilon_c(t, t_0) &= \epsilon_0(t, t_0) \times \frac{c}{E_{28}} \\
 \epsilon_0(t, t_0) &= \epsilon_{c0} \times c_c(t - t_0) \\
 \epsilon_{c0} &= RH \times (f_{cm}) \times (t_0) \\
 RH &= 1 + \frac{1 - RH_0}{0.46 \times \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{1}{3}}} & (f_{cm}) &= \frac{5.3}{\left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)^{0.5}} \\
 (t_0) &= \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{0.2}} & c_c(t - t_0) &= \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \\
 H &= 150 \times \left[ 1 + \left( 1.2 \times \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \times \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 & h &= \frac{2A_c}{u}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$\epsilon_c(t, t_0)$  : 有効材齢  $t_0$  (日) で載荷された有効材齢  $t$  (日) でのクリープ係数

$\epsilon_{c0}$  : 理論 (終局) クリープ係数

$c_c(t - t_0)$  : 時間に依存するクリープの進行を表わす項

RH : 相対湿度 (%)       $RH_0$  : 100%

$f_{cm}$  : 材齢 28 日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)       $f_{cm0}$  : 10N/mm<sup>2</sup>

$h$  : 仮想部材厚 (mm)       $h_0$  : 100 mm

$A_c$  : 部材断面積       $u$  : 部材断面の外気に接する部分の長さ (mm)  
 $t_1$  : 1日

#### 5.4.2 MC90 修正式

膨張コンクリートのクリープを予測するに当たり、既存の MC90 式では特性を十分に表現できないことを昨年度までの研究で明らかにしている。そこで膨張コンクリート特有の係数を与える事で式を修正した。MC90 修正式の概要を以下に示す。

修正は、膨張コンクリートのクリープが普通コンクリートより大きい事を考慮するために式(5.6)で膨張項  $EX$  を乗じ、また膨張コンクリート特有のクリープ挙動を表現するため、クリープ進行を表す  $c'(t-t_0)$  に新たな係数  $n$  を加えている。

##### 【修正前】

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times c(t - t_0) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} (5.5)$$

$$c(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3}$$

$(t, t_0)$  : 有効材齢  $t_0$  (日) で載荷された有効材齢  $t$  (日) でのクリープ係数

$\phi_0$  : 理論 (終局) クリープ係数

(5.5)  $c(t - t_0)$  : 時間に依存するクリープの進行を表わす項

$H$  : 環境の影響を表わす項

$t_1$  : 1日

##### 【修正後】

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times EX \times c'(t - t_0) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} (5.6)$$

$$c'(t - t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3 \times n}$$

$EX$  : 膨張項

$c'(t - t_0)$  : 膨張コンクリートのクリープの進行を表わす項

$n$  : 定数

#### 5.4.3 百瀬式

共同研究を行っている鹿島建設(株)技術研究所の百瀬氏の提案した膨張コンクリートのクリープ予測式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} c(t, t_0) &= c_{(CEB)} \times c_{(CEB)}(t, t_0) + c_{(EX)} \times c_{(EX)}(t, t_0) \\ c_{(CEB)} &= \frac{1}{1 + RH \times (f_{cm}) \times (t_0)} \\ c_{(EX)} &= m_1 \times \exp(m_2 \times t_0^{m_3}) \\ c_{(EX)}(t, t_0) &= (c_{(EX)}(t) - c_{(EX)}(t_0)) / (1 - c_{(EX)}(t_0)) \\ c_{(EX)}(t) &= (1 - \exp(m_2 \times t_0^{m_3})) \end{aligned} \right\} (5.7)$$

$c(t, t_0)$  : 材齢 $t_0$  で載荷された材齢  $t$  でのクリープ係数

$c_{(CEB)}$  : CEB-FIPの終局クリープ係数

$c_{(CEB)}$  : CEB-FIPの速度の項

$c_{(EX)}$  : 膨張クリープの終局クリープ係数

$c_{(EX)}$  : 膨張クリープの速度の項

$1, m_1$  : 膨張クリープの大きさを決める定数

$m_2, m_3$  : 実ひずみの勾配から得られる定数

#### 5.4.4 Step by Step 法

昨年度までの研究では、載荷式クリープ試験を行なっているため載荷応力は一定となっていた。本研究では、一軸拘束を与えた状態でのクリープの把握を目的としているため、応力値は一定値ではない。そこで、内部応力の時間的変動を考慮に入れるため、Step by Step 法による解析を試みた。Step by Step 法を以下に示す。

$$c(t_{i+1/2}) = 1/E(t_i) \cdot \{ c(t_{i+1/2}) - c_e(t_{i-1/2}) - c_f(t_{i+1/2}) \} \quad (5.8)$$

$$c(t_i) = c(t_{i+1/2}) - c(t_{i-1/2}) \quad (5.9)$$

$$J(t_{i+1/2}, t_i) = 1/E(t_i) + (t_{i+1/2}, t_i)/E_{28} \quad (5.10)$$

$$c_e(t_{i-1/2}) = \sum_{j=1}^{i-1} c(t_j) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j) - 1/E(t_i) \cdot c(t_{i-1/2}) \quad (5.11)$$

$c(t_{i+1/2})$  : ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリート応力

$E(t_i)$  : ステップ $t_i$ での弾性係数

$c(t_{i+1/2})$  : ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリートの実ひずみ

$c_e(t_{i-1/2})$  : ステップ $t_{i-1/2}$ でのクリープひずみ

$c_f(t_{i+1/2})$  : ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリートの自由ひずみ

$J(t_{i+1/2}, t_i)$  : クリープ関数

$(t_{i+1/2}, t_i)$  : ステップ $t_i$ で載荷されたステップ $t_{i+1/2}$ でのクリープ係数

$E_{28}$  : 材齢 28 日の弾性係数

(1) Step by Step 法におけるひずみと応力の関係

式(5.8)は Step by Step 法におけるひずみと応力の関係を表している。あるステップでの応力に寄与するひずみ(鉄筋拘束によるひずみ)は、鉄筋等で拘束されていない状態でのひずみから、鉄筋等で拘束されている状態での実ひずみとの差で求められる。したがって、そのステップに生じるコンクリートの自由ひずみに過去の応力増分によるクリープひずみを足し合わせたものと、コンクリートの実ひずみとの差が応力に寄与するひずみとなる。

(2) Step by Step 法におけるステップ間の関係

式(5.9)は Step by Step 法におけるステップ間の関係を表している。Step by Step 法では時間間隔の間に  $t_{i+1/2}$  のステップを設けることにより、クリープの応力緩和による時間的变化を考慮した応力を求めることができる。

(3) Step by Step 法における各ステップのクリープひずみ。

式(5.11)は Step by Step 法における各ステップのクリープひずみを表している。式(5.11)の概念図を図-5.71 に示す。式(5.11)の第一項において、過去の応力増分と  $j(t_{i+1/2}, t_j)$  の積を足し合わせるにより、過去の応力増分によるクリープひずみ及び弾性ひずみを求めている。第二項では直前のステップにおける応力と  $j(t_{i+1/2}, t_j)$  の積からその時点における弾性ひずみを求めている。弾性係数の変化による弾性ひずみの差もクリープひずみとみなすので、第一項と第二項との差から、クリープひずみを求めている。

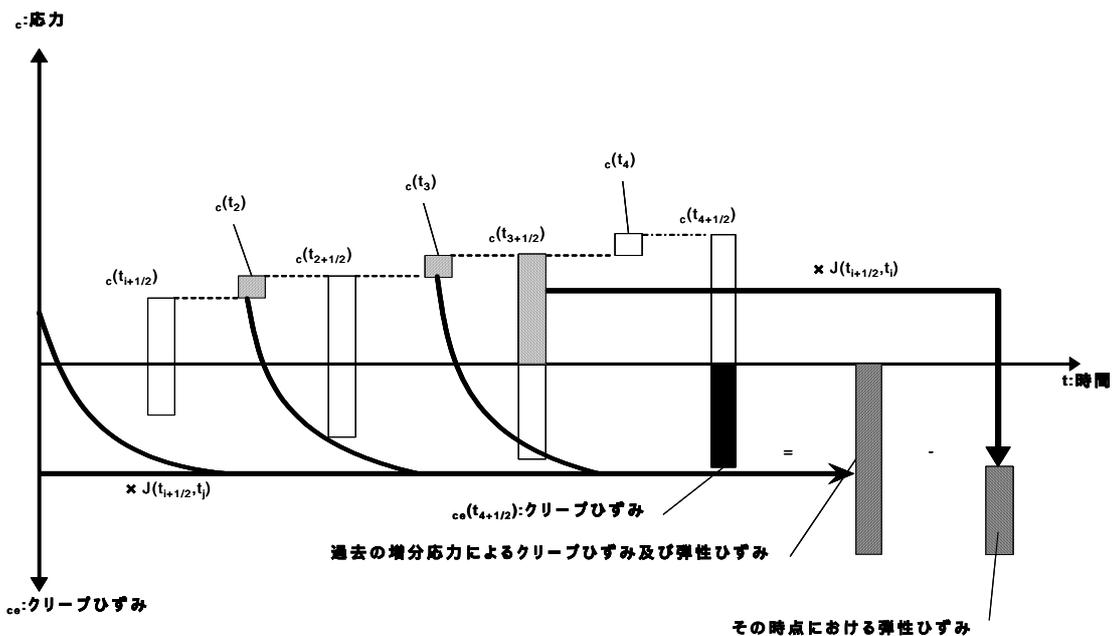


図-5.71 Step by Step 法による応力とクリープひずみの関係

#### 5.4.5 クリープ逆解析

##### (1)解析方法

クリープ逆解析として4章で算出した実験値による応力の値を用いて、Step by Step 法によるクリープひずみの求積を試みた。実ひずみ、自由ひずみ、弾性係数は5.2、5.3、3.6において近似したものをを用いた。実験値からの逆解析をすることでクリープ係数に用いる項の同定を行った。クリープ係数5.4.2で説明したMC90修正式と5.4.3で説明した百瀬式の2式を使用した。解析の対象は材齢28日までとし、材齢28日、若材齢の2つの観点から考察する。

##### (2)逆解析結果

###### クリープ逆解析結果(材齢28日)

Step by Step 法によるクリープ逆解析結果を図-5.72～図-5.95に示す。応力変動が大きく、膨張材による影響が顕著に現れる若材齢時では、若干の誤差が生じているものの、材齢が進むにつれて解析値と実験値をほぼ一致する結果となった。

###### クリープ逆解析結果(若材齢)

応力変動が大きく、膨張材による影響が顕著に現れる若材齢時に着目した結果を図-5.77～図-5.100に示す。若材齢時に着目すると、クリープひずみは材齢初期において引張方向に生じることが分かる。また解析結果と比較すると若材齢時における引張クリープを十分に評価できていない。その理由はクリープ係数と応力の関係にあり、逆解析に用いている応力値が実験で得られた実ひずみの値から算出していることから、クリープひずみは計算上引張クリープから圧縮クリープへの転換が考えられるが、実ひずみではその現象が現れないためと思われる。つまり応力値の転換が行われていないために引張側のクリープひずみを評価できない結果になったと思われる。

##### (3)逆解析係数

MC90修正式で同定した係数  $E_{EX}$  と  $n$ 、百瀬式で同定した  $\alpha_1$  と  $m_1$  の配合及び鉄筋比による比較を行った。

###### $E_{EX}$ 、 $n$ (MC90修正式)

図-5.120～図-5.147にMC90修正式での同定によって得られた係数  $E_{EX}$ 、 $n$  の鉄筋比と水結合材比との関係を示す。 $E_{EX}$  と鉄筋比との関係では、LE50,55,65及びNES50においては鉄筋比が大きくなるのに伴い  $E_{EX}$  が大きくなる結果となった。一方、NES55, NES65においては鉄筋比が大きくなるのに伴い、 $E_{EX}$  が小さくなる結果となった。 $E_{EX}$  は、膨張項となっており膨張コンクリートのクリープ全体の大きさを決定する係数である。実験結果から鉄筋比が大きくなるのともないクリープひずみが大きくなる傾向があった。つまり、 $E_{EX}$  も鉄筋

比が大きくなるのに伴い増加すると予測された。しかしながらNES55,NES65 において予測と反対の結果となった。  $\epsilon_{ex}$ と水結合材比との関係では、LEにおいて水結合材比が大きくなるのに伴い  $\epsilon_{ex}$ は小さくなる傾向が見られたが、NESでは傾向が現れなかった。実験では水結合材比 65%のクリープが大きくなる結果となったが、その傾向は若干しか見られない。

次に  $n$  について考察する。  $n$  は主にクリープ曲線の曲率を示す係数である。鉄筋比との関係において鉄筋比が大きくなるのに伴い  $n$  は大きくなる結果となった。水結合材比との関係では傾向が現れない結果となった。

#### $m_1$ と $m_1$ (百瀬式)

図-5.148～図-5.175 に百瀬式での同定によって得られた係数  $m_1$ 、 $m_1$ の鉄筋比と水結合材比との関係を示す。  $m_1$ 、 $m_1$ ともに傾向は明らかにはならなかった。百瀬式ではCEBの項とEX(膨張項)との関係を線形結合としているため  $m_1$ 、 $m_1$ は互いを補正する関係にある。MC90 修正式は材齢に大きく依存する式であるのに比べ、百瀬式ではさらに膨張による影響を独立させ、材齢と膨張機構に依存する式になっている。そのため  $m_1$ 、 $m_1$ との関係は、ときに相反する関係になる場合がある。そのため傾向が現れにくい結果となった。

#### (4)MC90 修正式と百瀬式との比較

MC90 修正式と百瀬式を比較した場合、材齢 2 日程度までの極めて若材齢時に若干ではあるが百瀬式のほうが実験値を精度良く表現できている。その理由は、百瀬式に用いられている係数 $m_2$ 、 $m_3$ の影響が考えられる。 $m_2$ 、 $m_3$ は実ひずみで同定した係数でありひずみ勾配を表すものである。これにより膨張過程をより良く評価できるようになっている。

## 5.5 クリープ解析

### (1)解析方法

逆解析同様 Step by Step 法による解析を行った。解析では式(5.8)を用いて応力値を算出した。クリープ係数は逆解析で同定したものを使用した。実ひずみ、自由ひずみ、弾性係数は逆解析と同値である。解析期間は逆解析同様、乾燥開始前の材齢 28 日までとした。

### (2)クリープ解析結果

MC90 修正式での解析を行う際に、応力解析値が一時的に減少するとその後徐々に値が発散してしまうことがわかった。その要因として MC90 修正式は材齢に依存した式であり、掛け算となっているため、クリープ係数は単純増加、または減少の挙動しか示せないことがあげられる。そのため MC90 修正式では応力値が減少した場合 1 ステップ前の応力値を使用することとした。

また両方式において、Step by Step 法の中で算出する弾性係数変化によるひずみを過大評価してしまう傾向があった。そのため弾性係数の値を 1000N/mm<sup>2</sup>以上になるように設定した。

#### クリーブ解析結果(材齢 28 日)

クリーブ解析結果を図-5.176～図-5.199 に示す。逆解析同様、応力変動が大きく、膨張材による影響が顕著に現れる若材齢時では、若干の誤差が生じているが、材齢が進むにつれて解析値と実験値はほぼ一致する結果となった。

#### クリーブ解析結果(若材齢)

若材齢クリーブ解析結果を図-5.200～図-5.223 に示す。解析でのクリーブ係数は逆解析によって同定したものをを用いている。そのため逆解析で表現できなかった極若材齢の引張クリーブを、解析においても評価できなかった。また若材齢の評価が十分に行えなかった理由のひとつとして、弾性係数の過小評価が上げられる。本研究では弾性係数試験を材齢 0.5 日から行っているが、やはり従来の試験方法では若材齢時での正確な測定は困難である。そのため本解析では弾性係数を  $1000\text{N/mm}^2$ 以上になるように設定している。若材齢での弾性係数評価について検討が必要であると思われる。

#### (3) MC90 修正式と百瀬式との比較

やはり材齢 2 日までの極めて若材齢時において百瀬式を用いた結果が良好となった。逆解析で述べた理由が解析上も現れていると思われる。

#### (3) 応力解析結果

図-5.224～図 5-247 に応力解析結果を示す。

鉄筋比 0.4、1.0%のように、応力が最大値を向かえ、その後値が安定する傾向にある場合、MC90 修正式は解析値と実験値がほぼ一致する結果となった。しかし応力値が減少する鉄筋比 4.0、8.0%では、その減少の傾向を評価できていない。MC90 修正式では応力の減少によりクリーブひずみが発散してしまう結果となったため、応力値が減少した場合、前ステップでの応力値を用いるように設定している。そのため応力の減少を評価することはできなく、応力が単調増加する時点までしか評価できない。しかし応力の最大値を把握する上では MC90 修正式で十分評価できることがわかった。

次に百瀬式を用いた場合では、やはり MC90 修正式同様、鉄筋比が大きくなるにつれて解析値と実験値の差が生じる結果となった。また材齢初期において、応力値が大きく減少する傾向が見られるが、これはクリーブひずみの影響を受けていると思われる。

MC90 修正式と、百瀬式を比べてみると、極めて若材齢時においては百瀬式の結果が良好ではあるが、材齢 28 日全体で見ると MC90 修正式のほうがより評価できている。また応力の最大値の評価も MC90 修正式のほうが良好である。しかし MC90 修正式では応力の減少を評価できないため、今後改良を加え、最大値のみならず、ひずみ、応力の終局値を表現できるようにしていく必要がある。

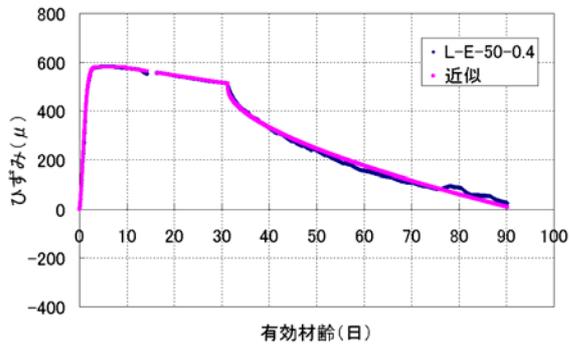


図-5.2 実ひずみ近似(LE50-0.4)

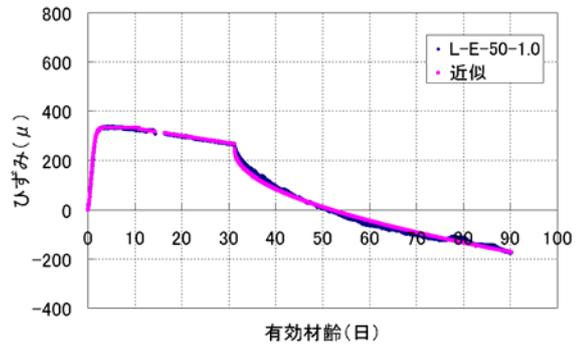


図-5.3 実ひずみ近似(LE50-1.0)

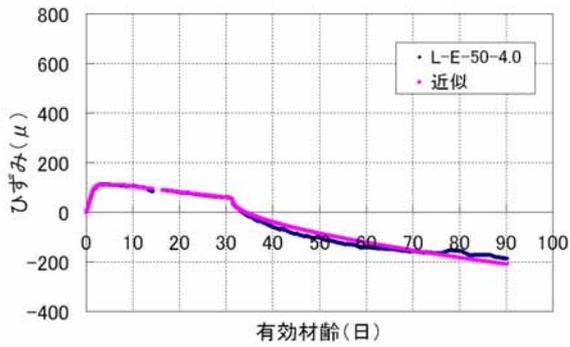


図-5.4 実ひずみ近似(LE50-4.0)

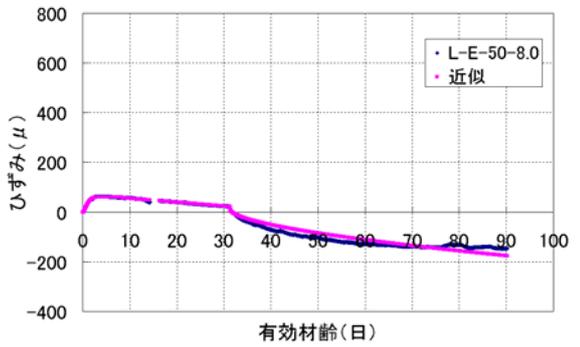


図-5.5 実ひずみ近似(LE50-8.0)

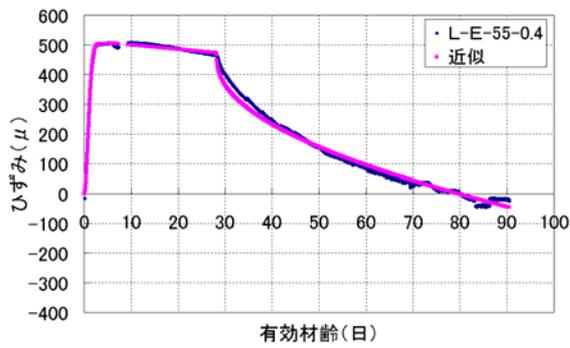


図-5.6 実ひずみ近似(LE55-0.4)

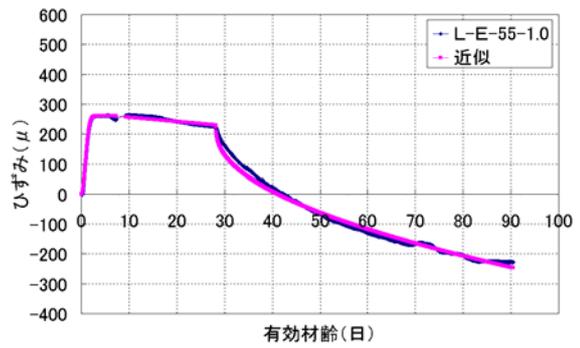


図-5.7 実ひずみ近似(LE55-1.0)

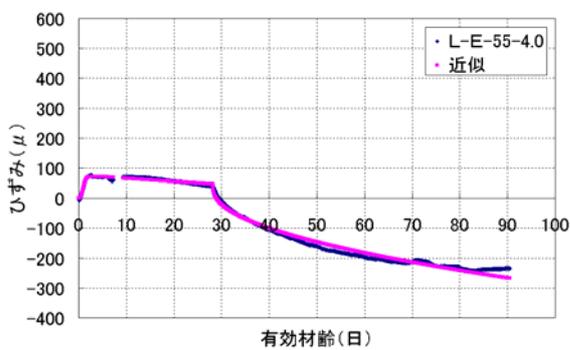


図-5.8 実ひずみ近似(LE55-4.0)

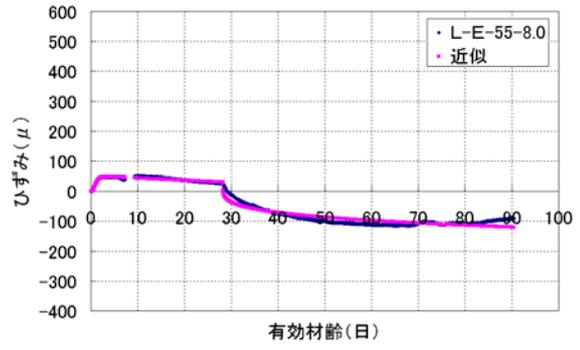


図-5.9 実ひずみ近似(LE55-8.0)

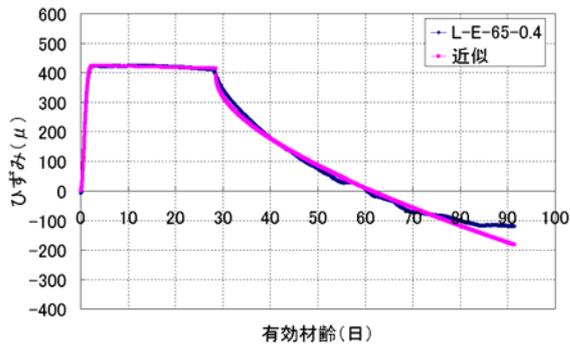


図-5.10 実ひずみ近似(L-E65-0.4)

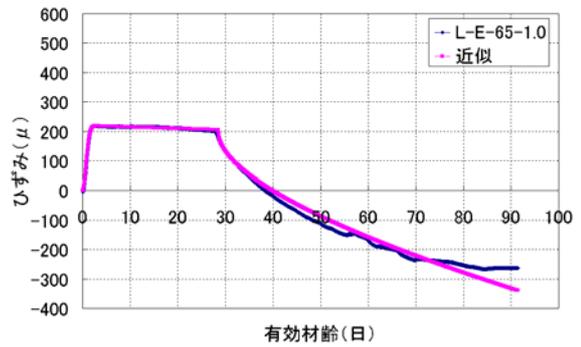


図-5.11 実ひずみ近似(L-E65-1.0)

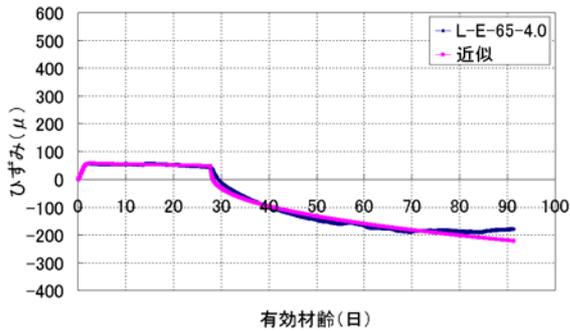


図-5.12 実ひずみ近似(L-E65-0.4)

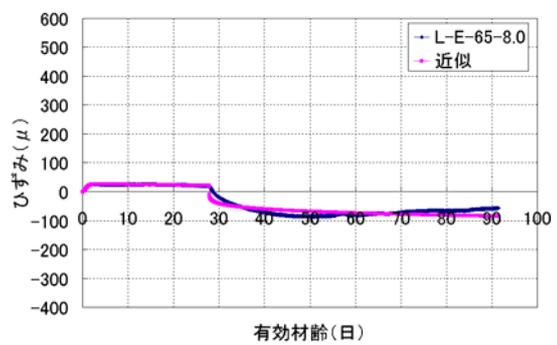


図-5.13 実ひずみ近似(L-E65-8.0)

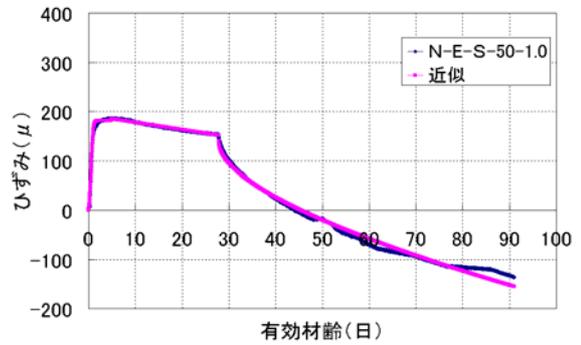
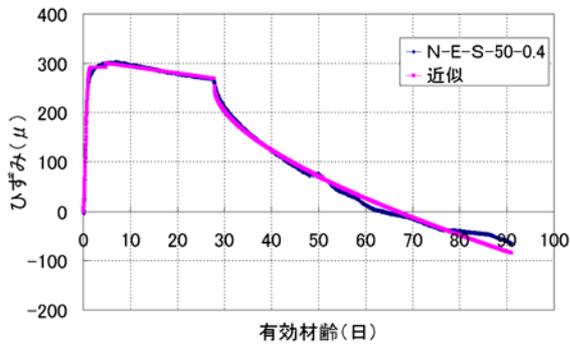


図-5.14 実ひずみ近似(NES50-0.4)

図-5.15 実ひずみ近似(NES50-1.0)

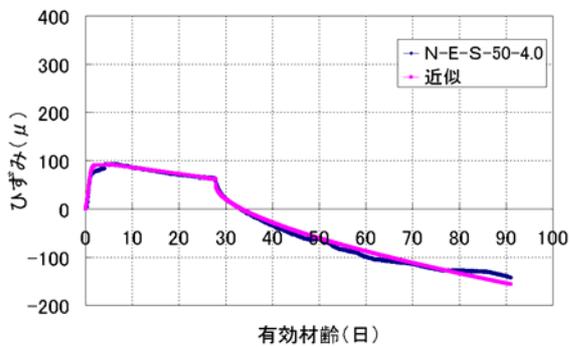


図-5.16 実ひずみ近似(NES50-4.0)

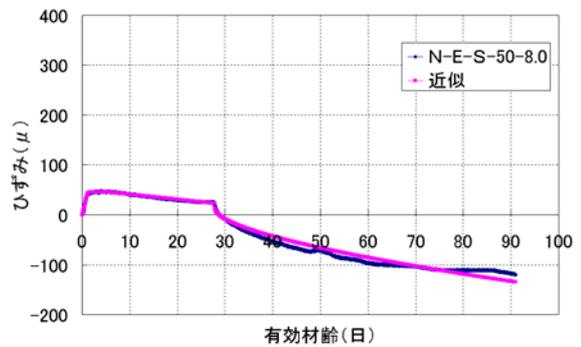


図-5.17 実ひずみ近似(NES50-8.0)

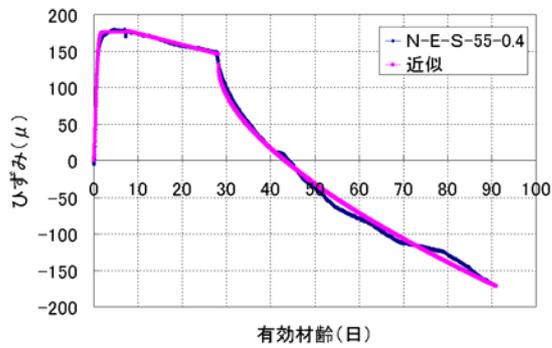


図-5.18 実ひずみ近似(NES55-0.4)

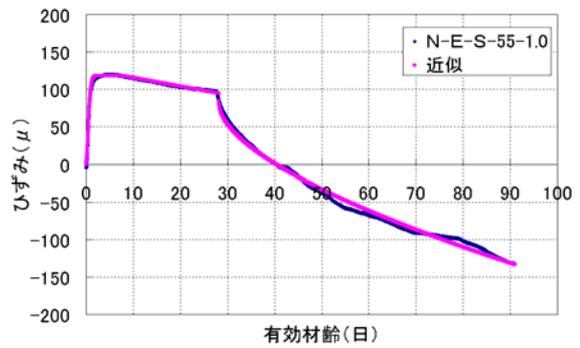


図-5.19 実ひずみ近似(NES55-1.0)

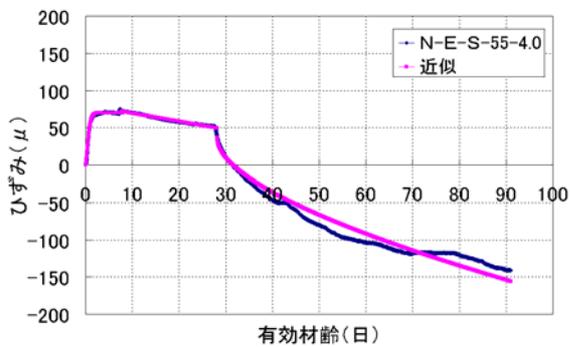


図-5.20 実ひずみ近似(NES55-4.0)

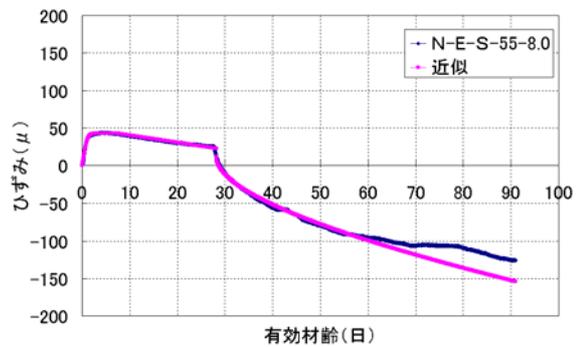


図-5.21 実ひずみ近似(NES55-8.0)

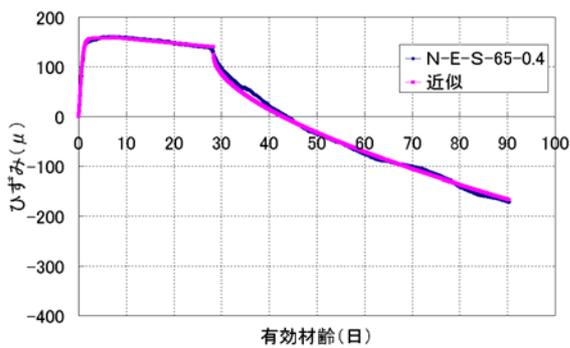


図-5.23 実ひずみ近似(NES65-1.0)

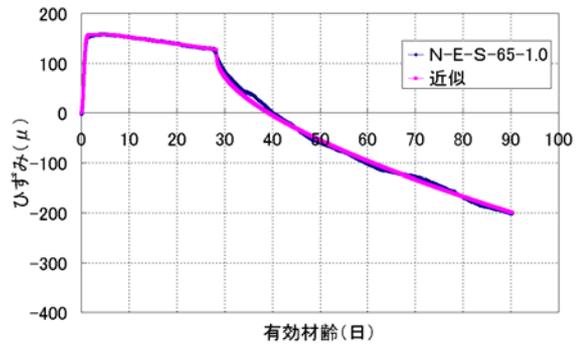


図-5.22 実ひずみ近似(ES65-0.4)

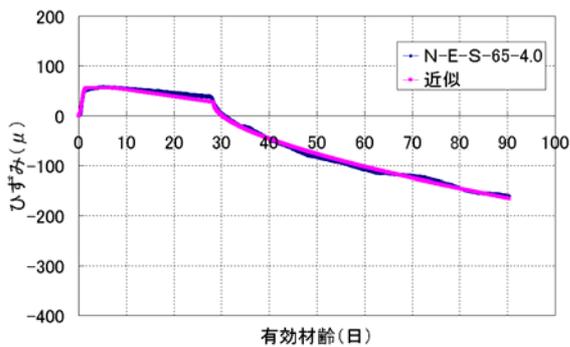


図-5.24 実ひずみ近似(NES-65-4.0)

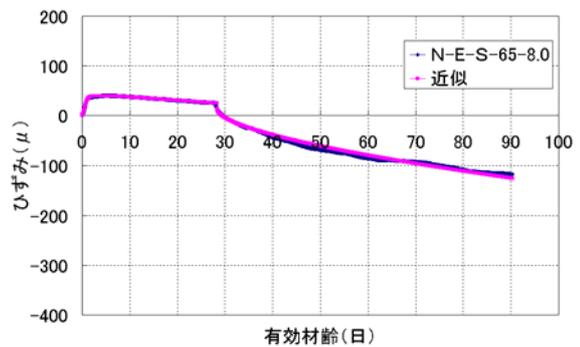


図-5.25 実ひずみ近似(NES65-8.0)

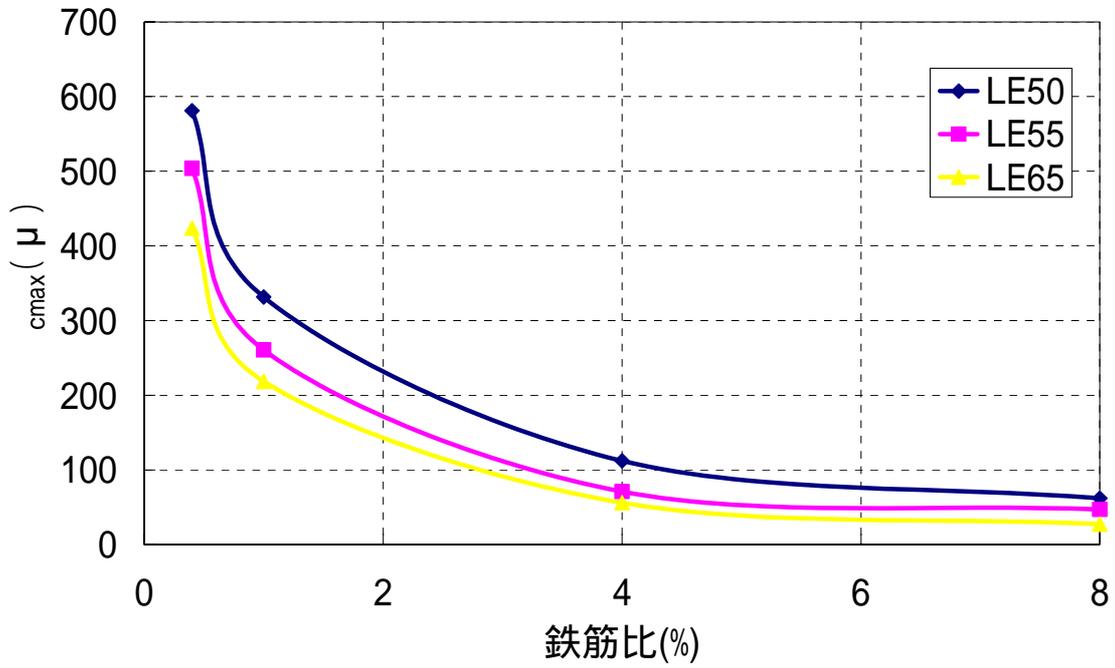


図-5.26  $c_{max}$ と鉄筋比の関係(LE)

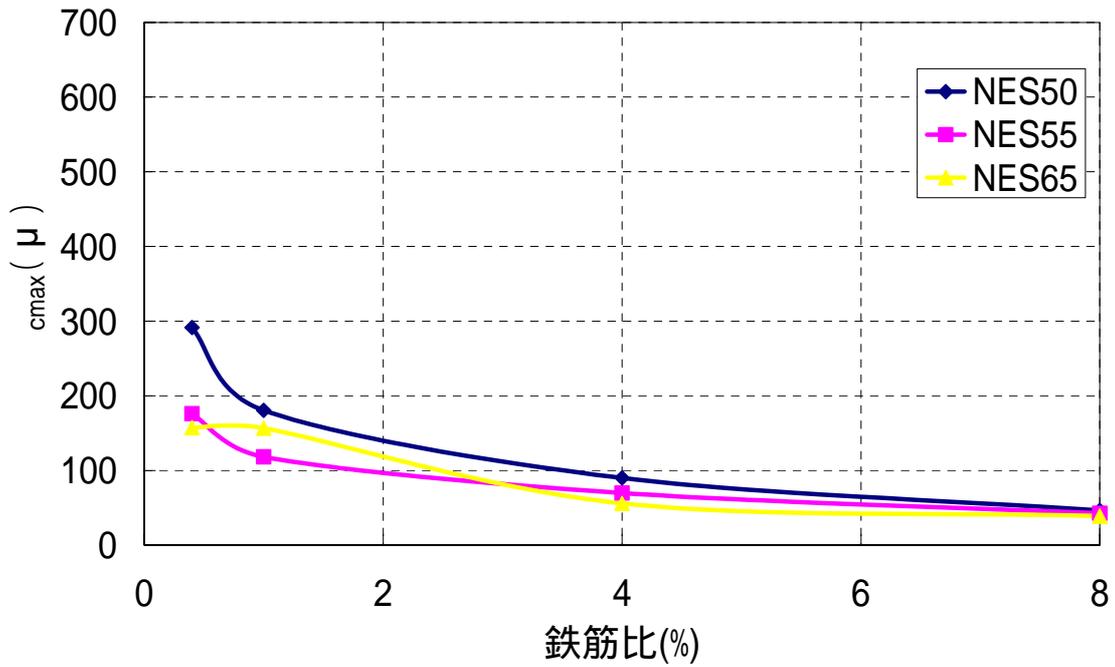


図-5.27  $c_{max}$ と鉄筋比の関係(NES)

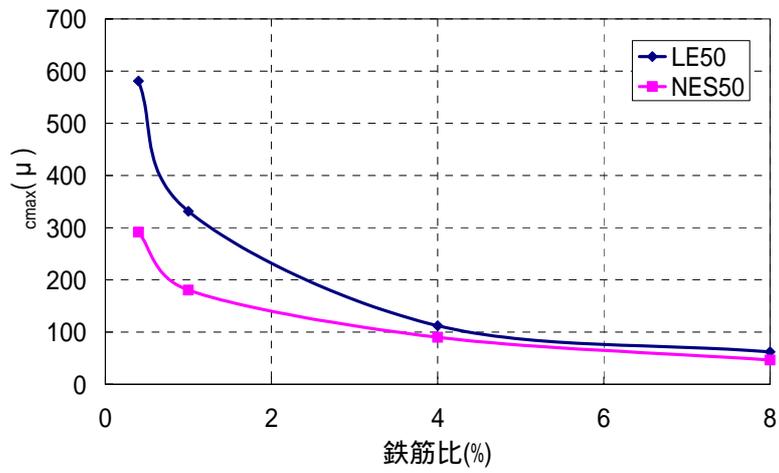


図-5.28  $c_{max}$ と鉄筋比の関係(水結合材比 50%)

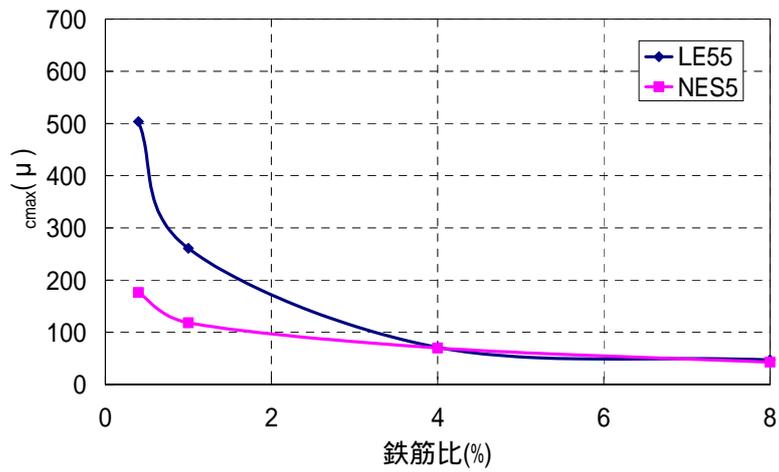


図-5.29  $c_{max}$ と鉄筋比の関係(水結合材比 55%)

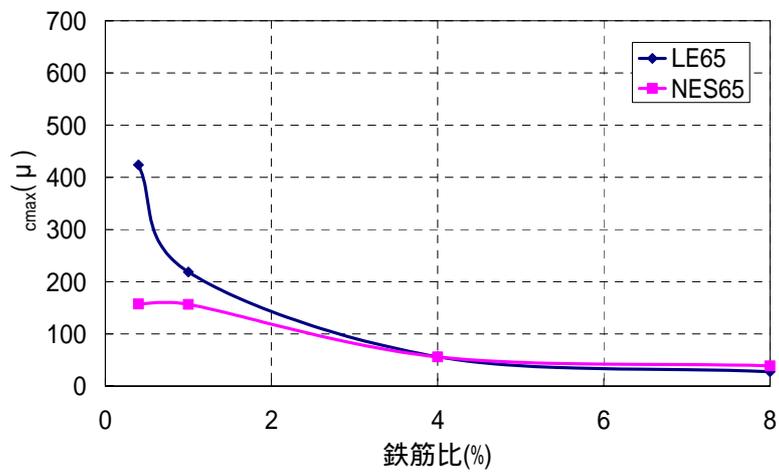


図-5.30  $c_{max}$ と鉄筋比の関係(水結合材比 65%)

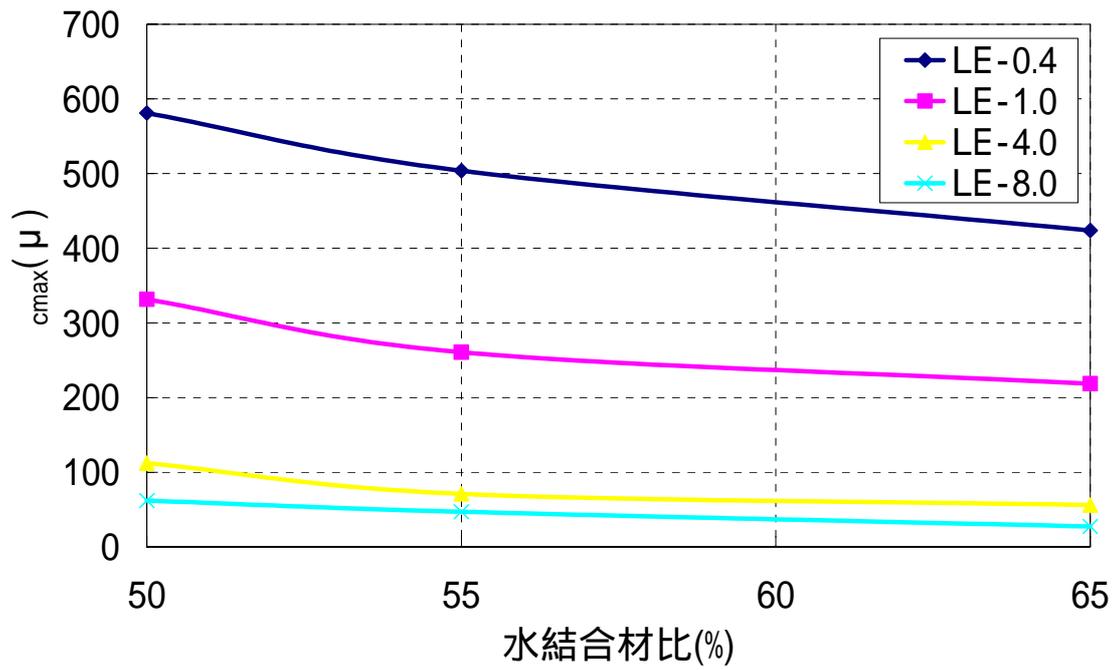


図-5.31  $c_{max}$ と水結合材比の関係(LE)

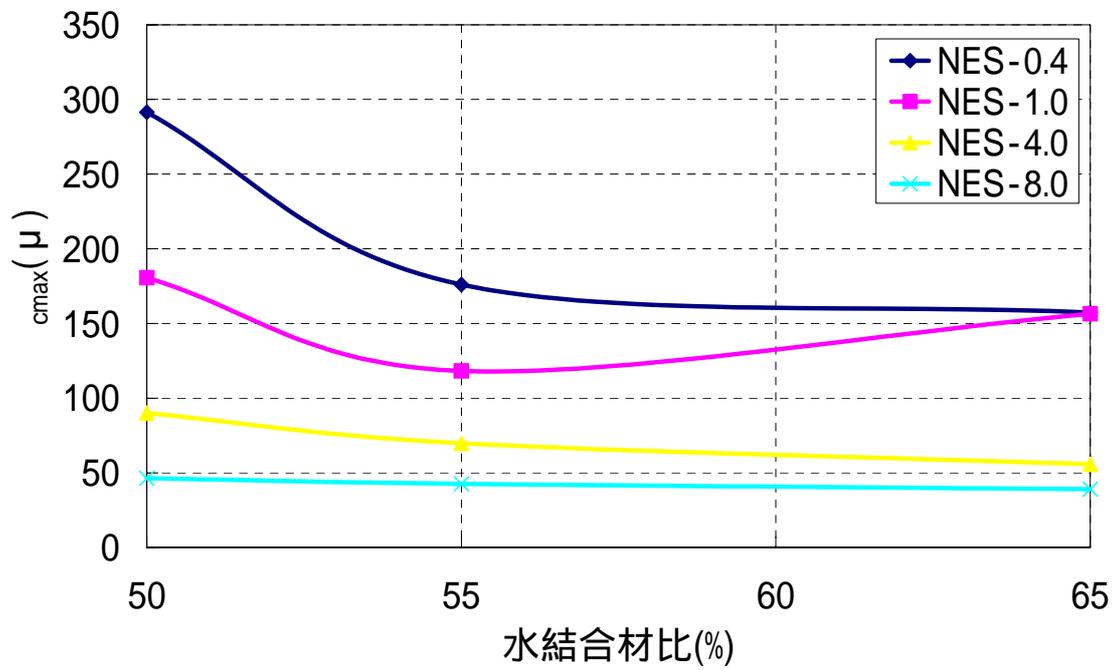


図-5.32  $c_{max}$ と水結合材比の関係(NES)

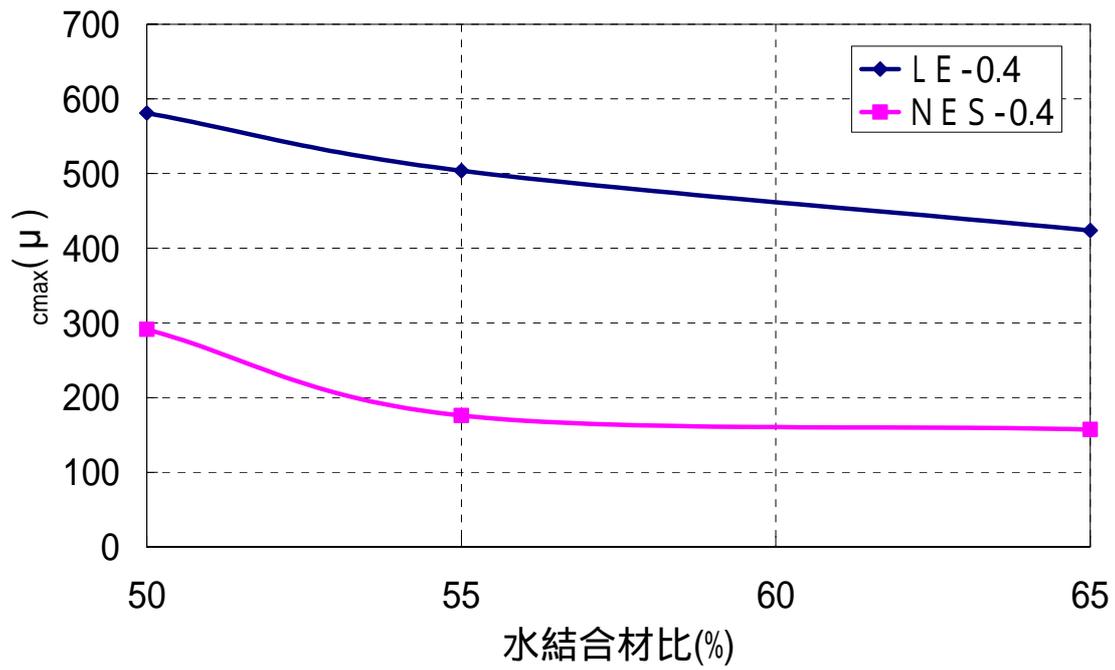


図-5.33  $c_{max}$ と水結合材比の関係(鉄筋比 0.4%)

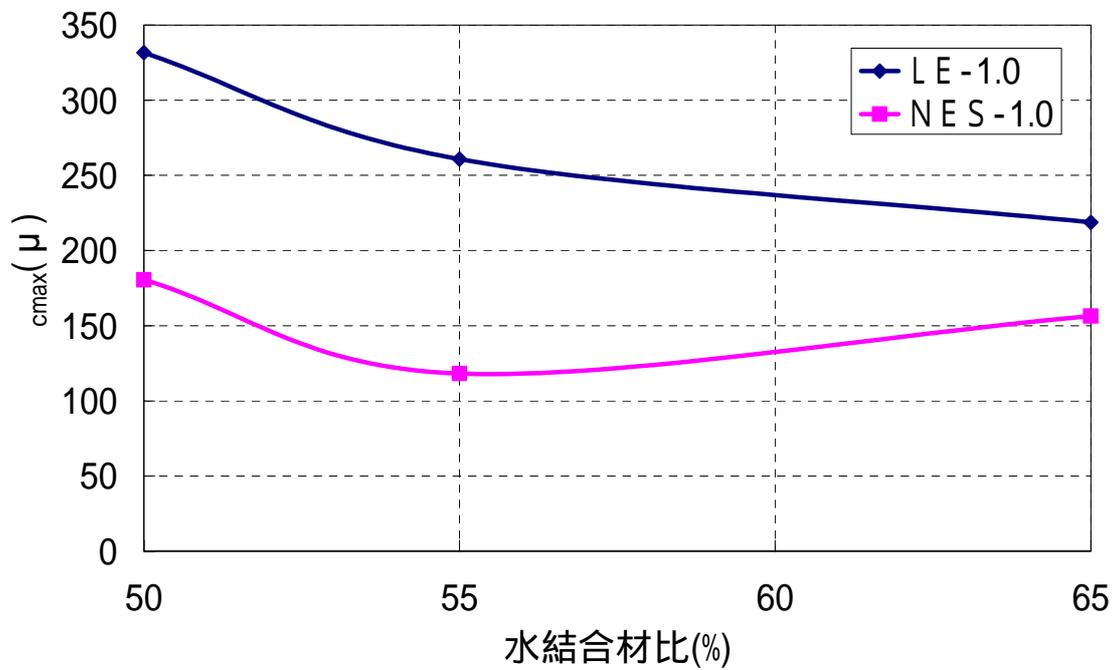


図-5.34  $c_{max}$ と水結合材比の関係(鉄筋比 1.0%)

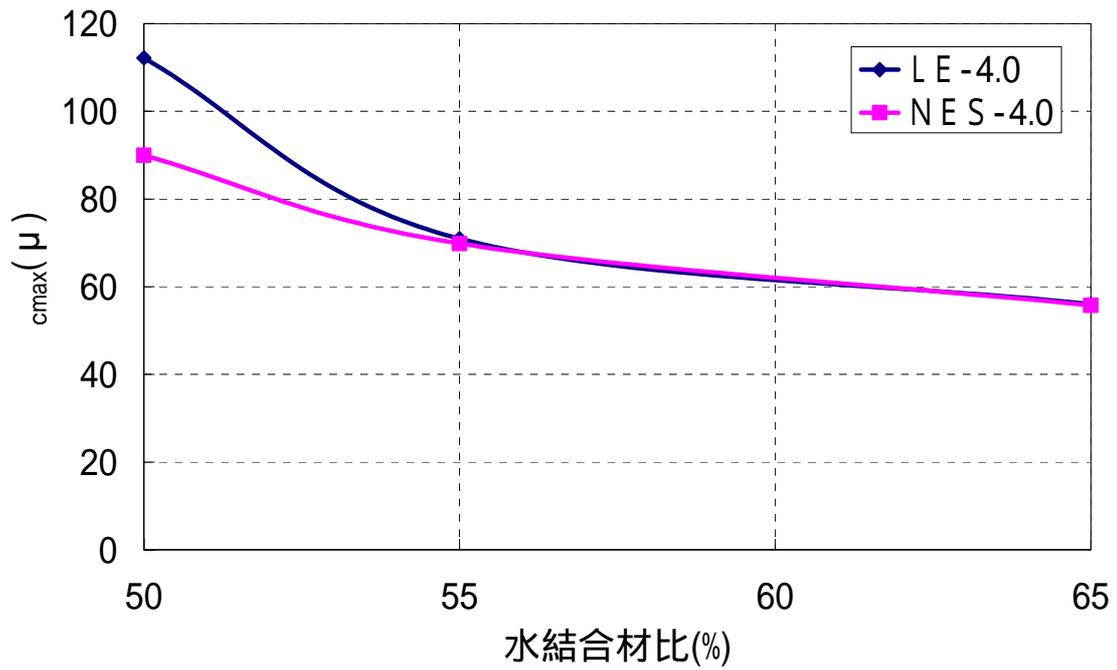


図-5.35  $c_{max}$ と水結合材比の関係(鉄筋比 4.0%)

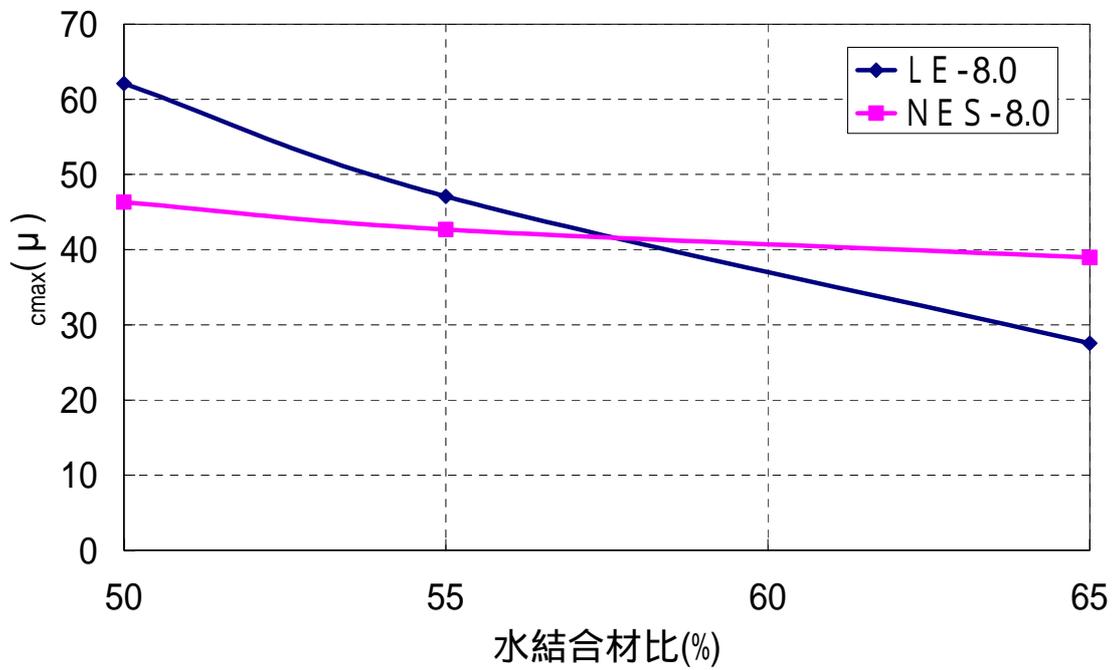


図-5.36  $c_{max}$ と水結合材比の関係(鉄筋比 8.0%)

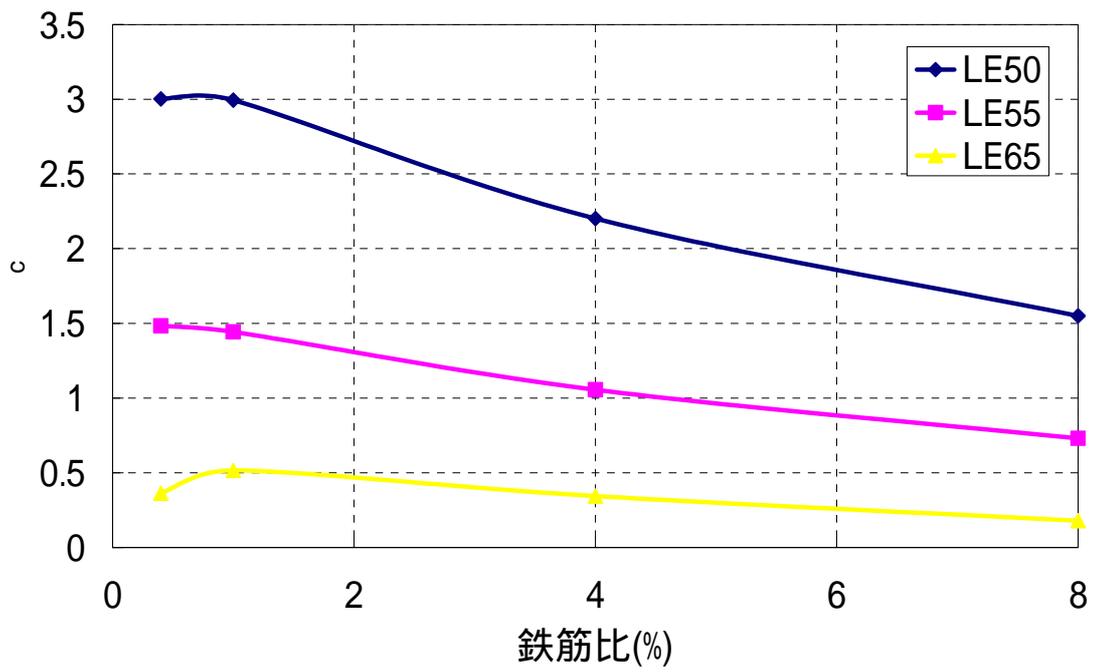


図-5.37  $c$ と鉄筋比の関係(LE)

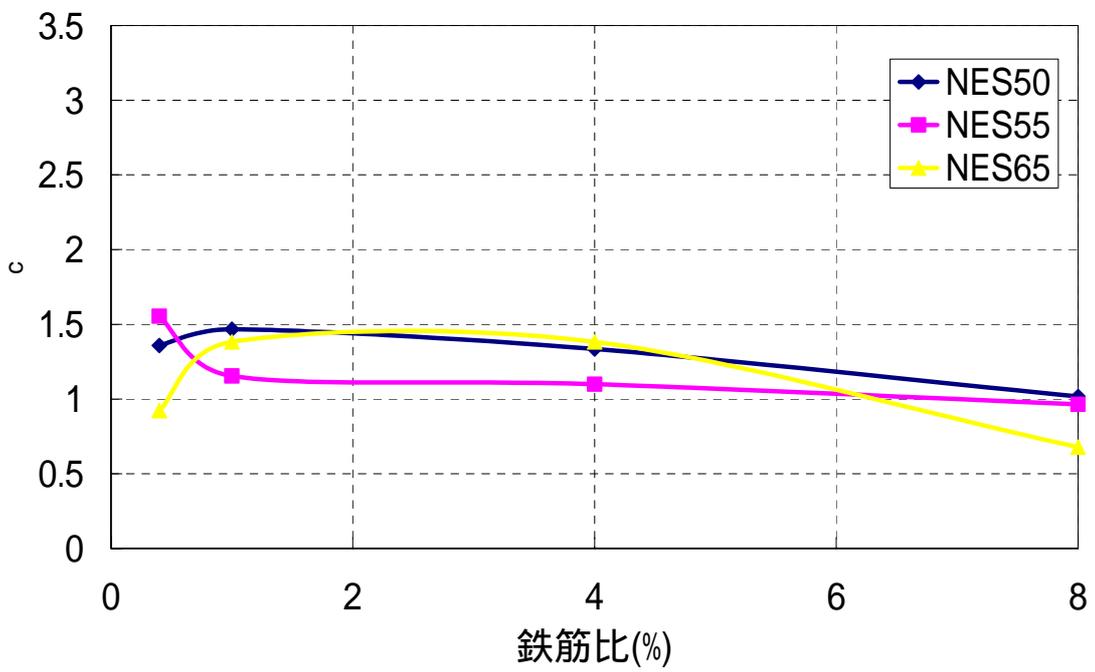


図-5.38  $c$ と鉄筋比の関係(NES)

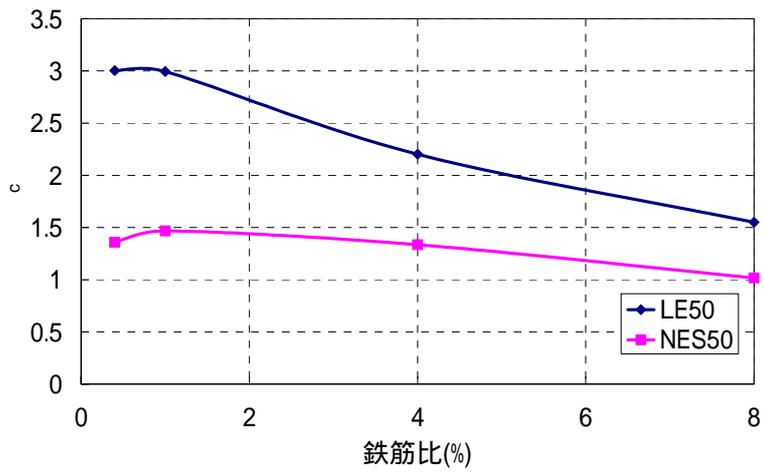


図-5.39  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 50%)

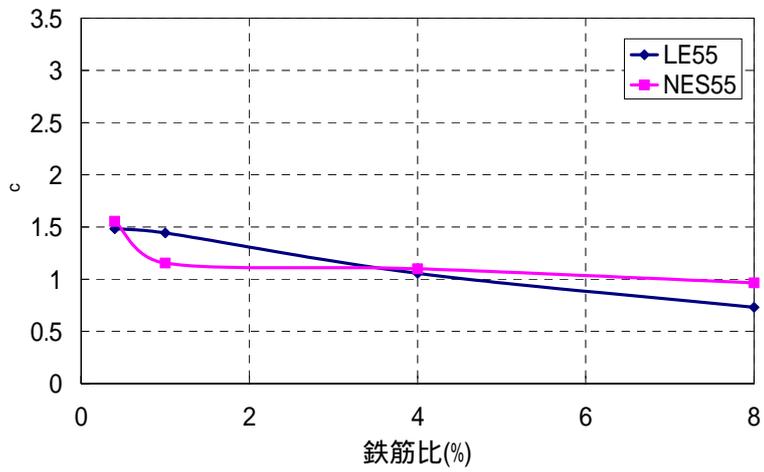


図-5.40  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 55%)

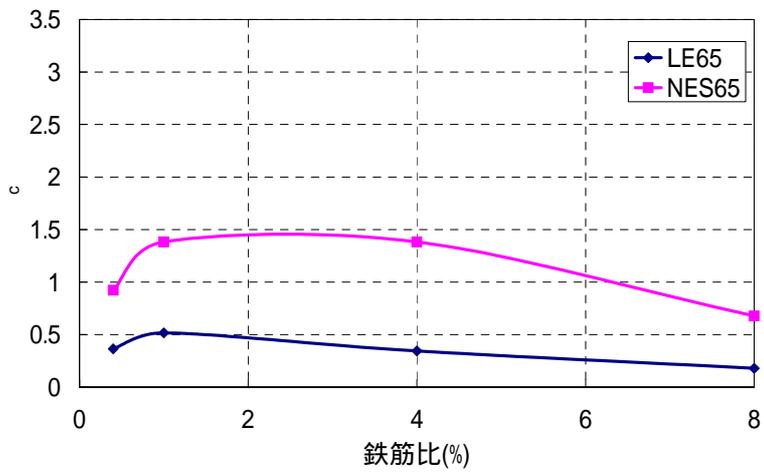


図-5.41  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 65%)

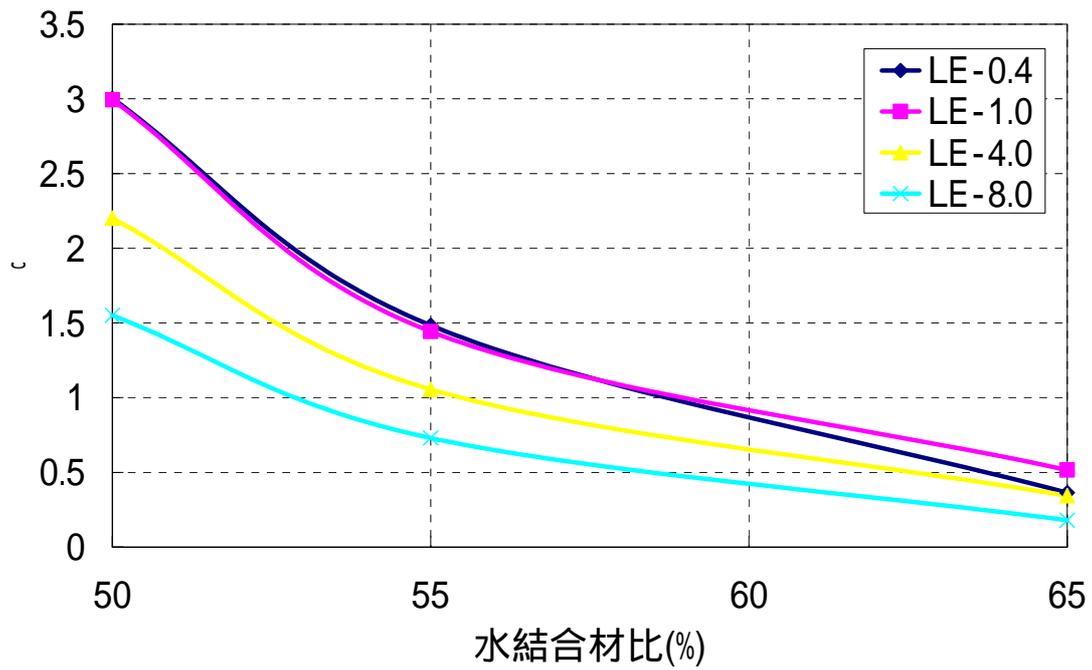


図-5.42 cと水結合材比の関係(LE)

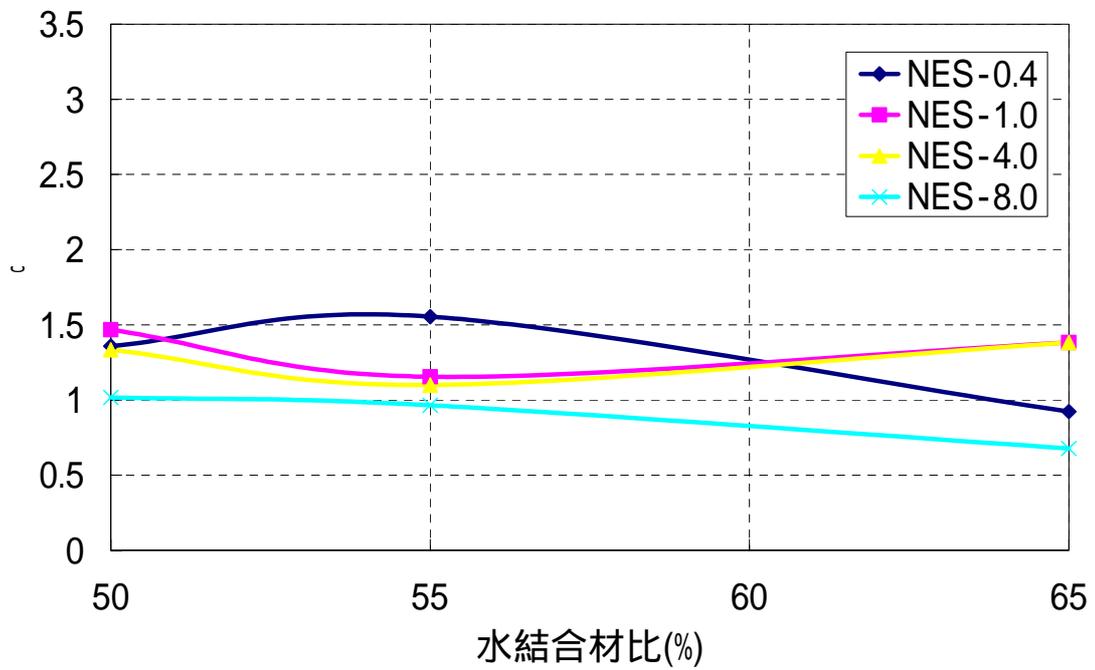


図-5.43 cと水結合材比の関係(NES)

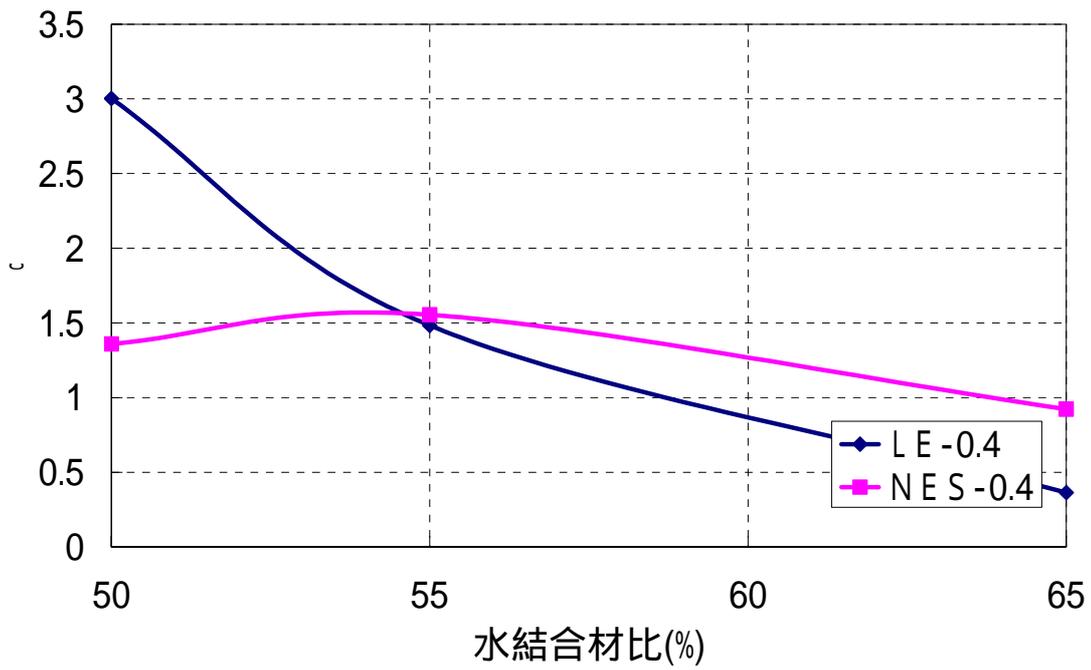


図-5.44 σと水結合材比の関係(鉄筋比 0.4%)

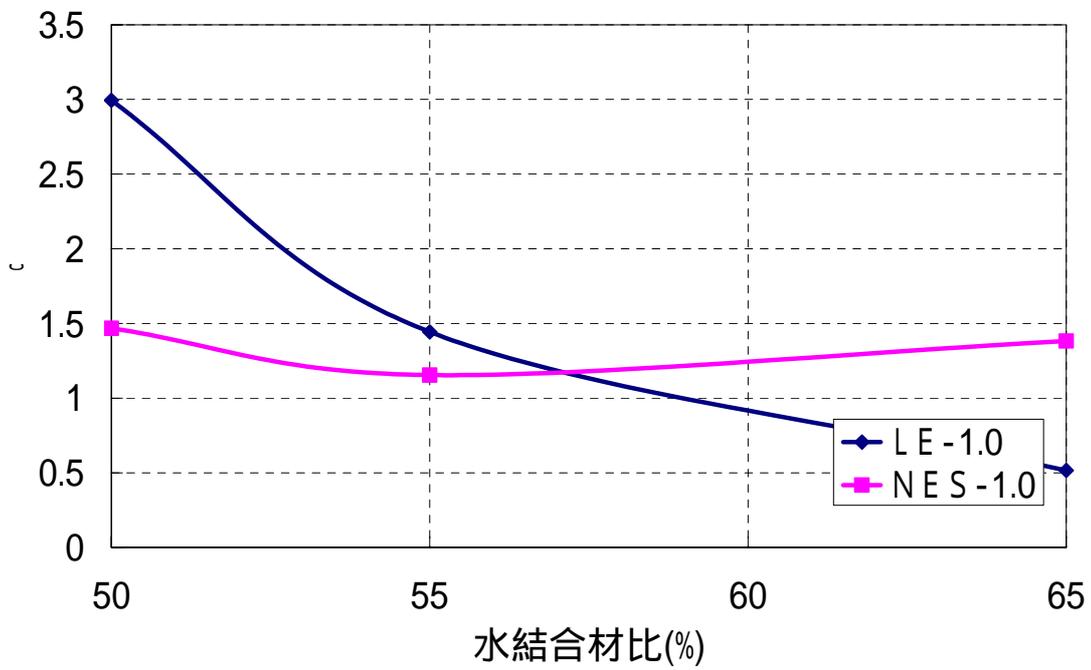


図-5.45 σと水結合材比の関係(鉄筋比 1.0%)

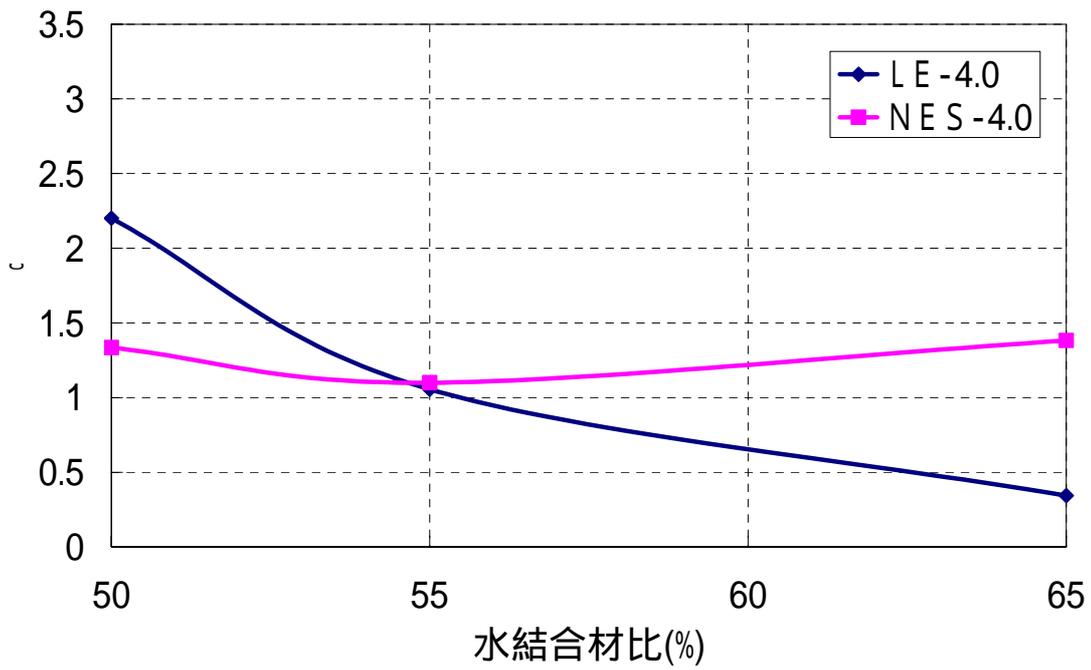


図-5.46 cと水結合材比の関係(鉄筋比 4.0%)

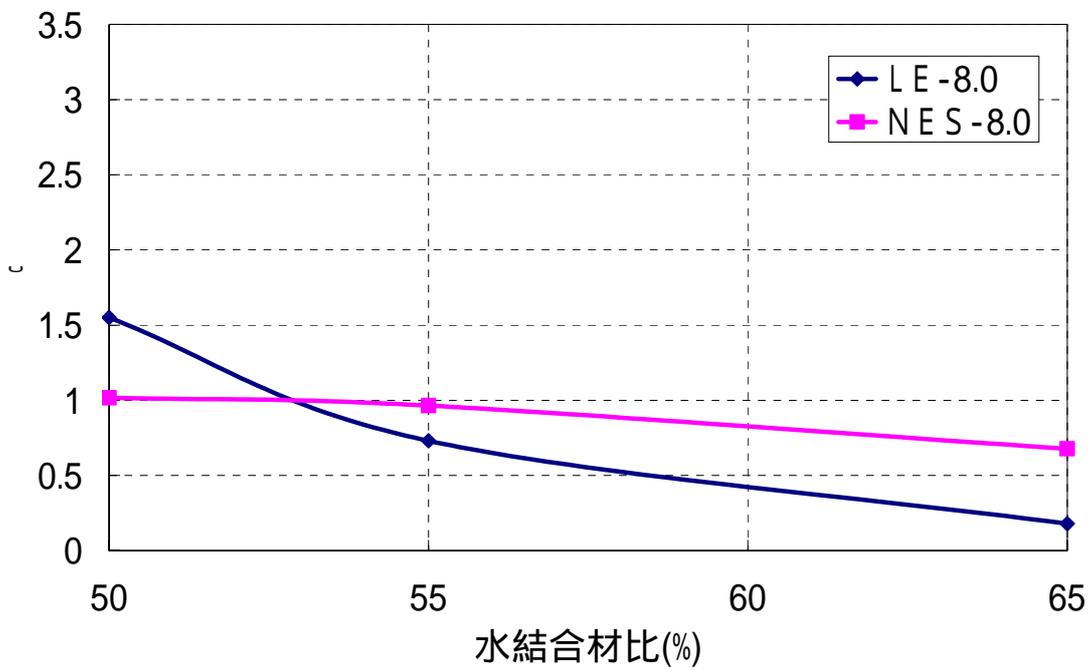


図-5.47 cと水結合材比の関係(鉄筋比 8.0%)

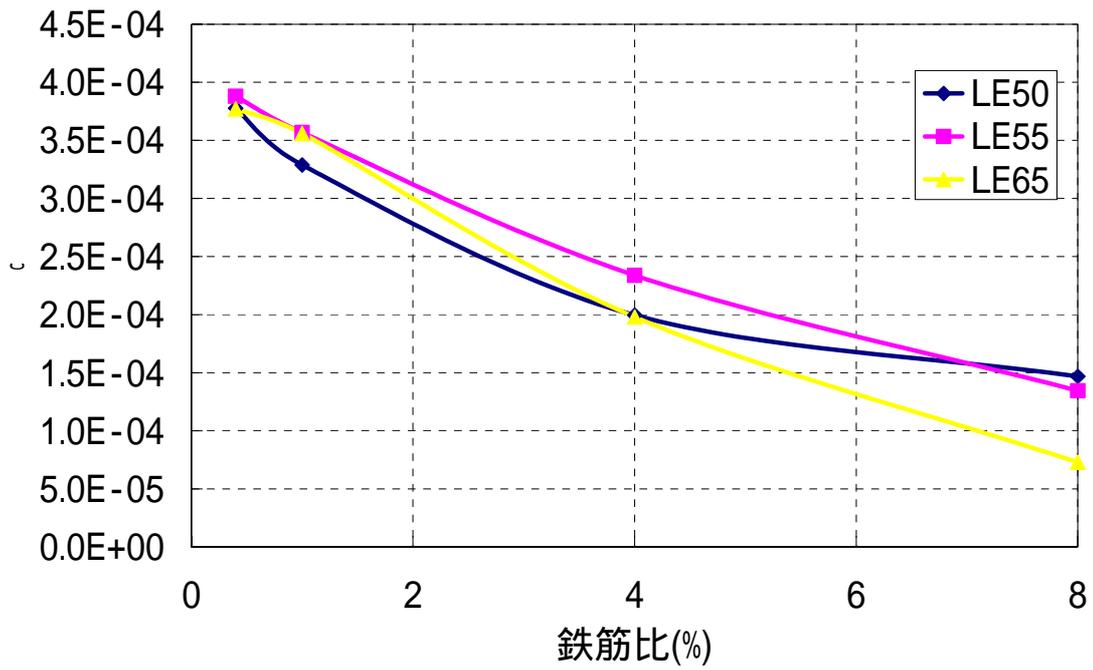


図-5.48  $c$ と鉄筋比の関係(LE)

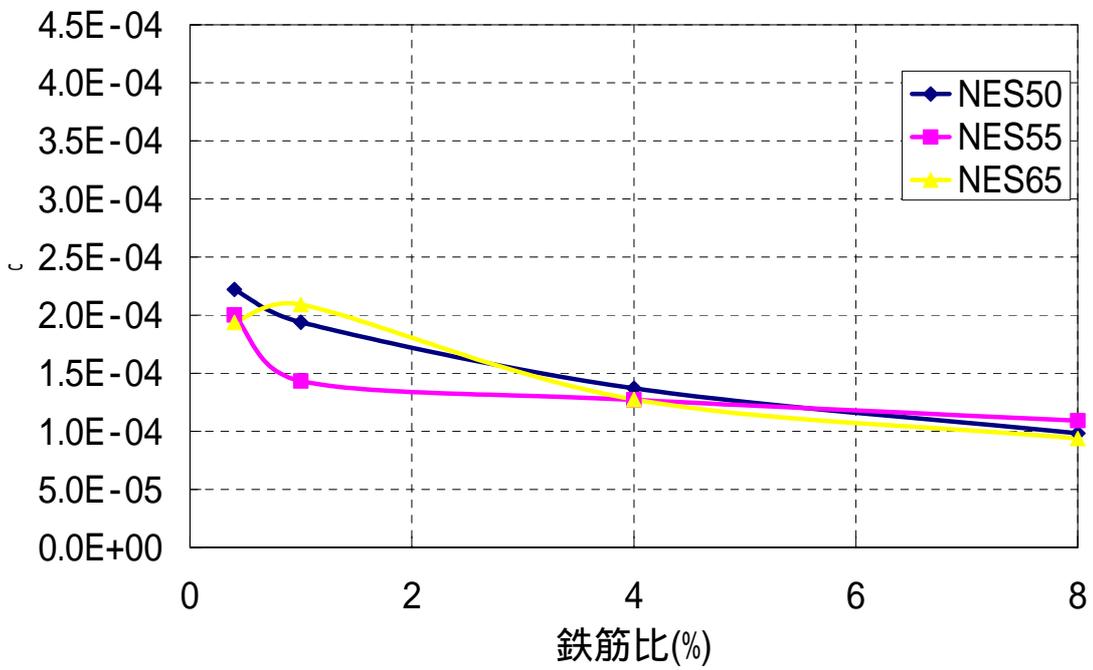


図-5.49  $c$ と鉄筋比の関係'(NES)

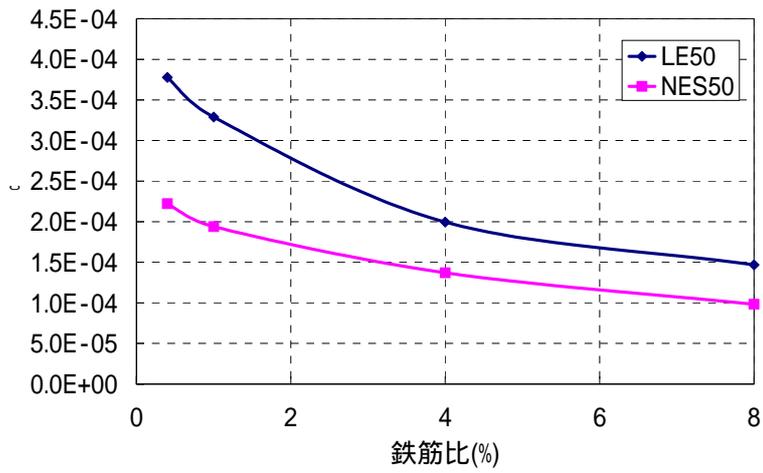


図-5.50  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 50%)

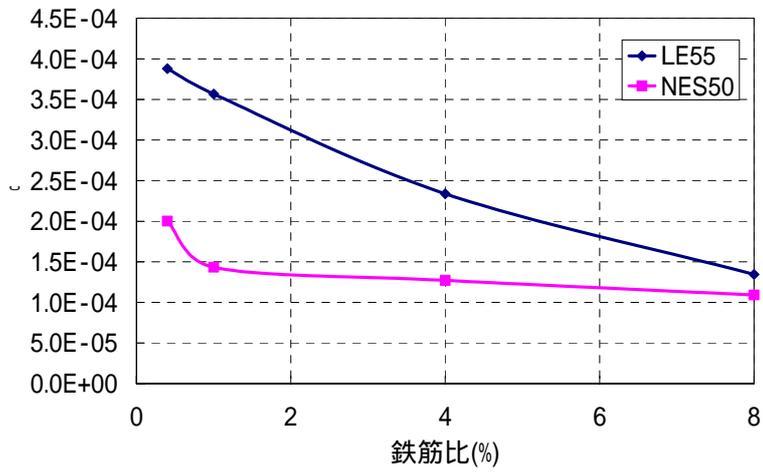


図-5.51  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 55%)

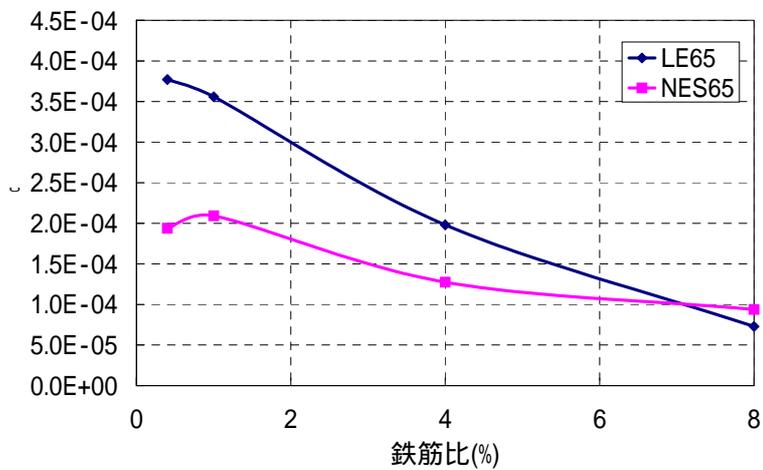


図-5.52  $c$ と鉄筋比の関係(水結合材比 65%)

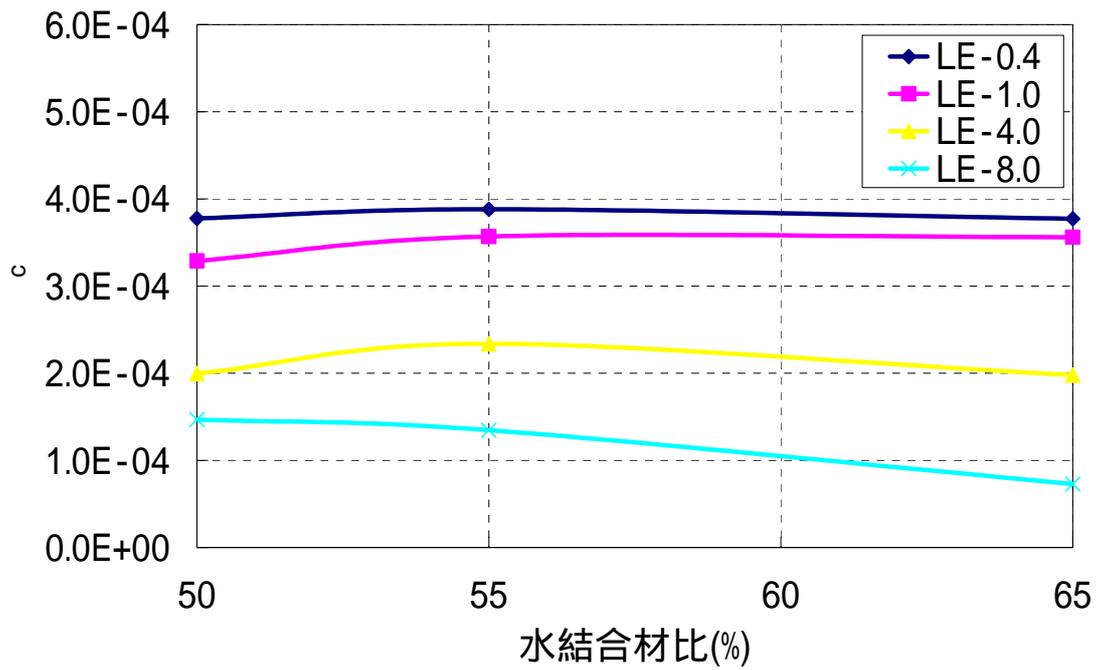


図-5.53  $c$ と水結合材比の関係(LE)

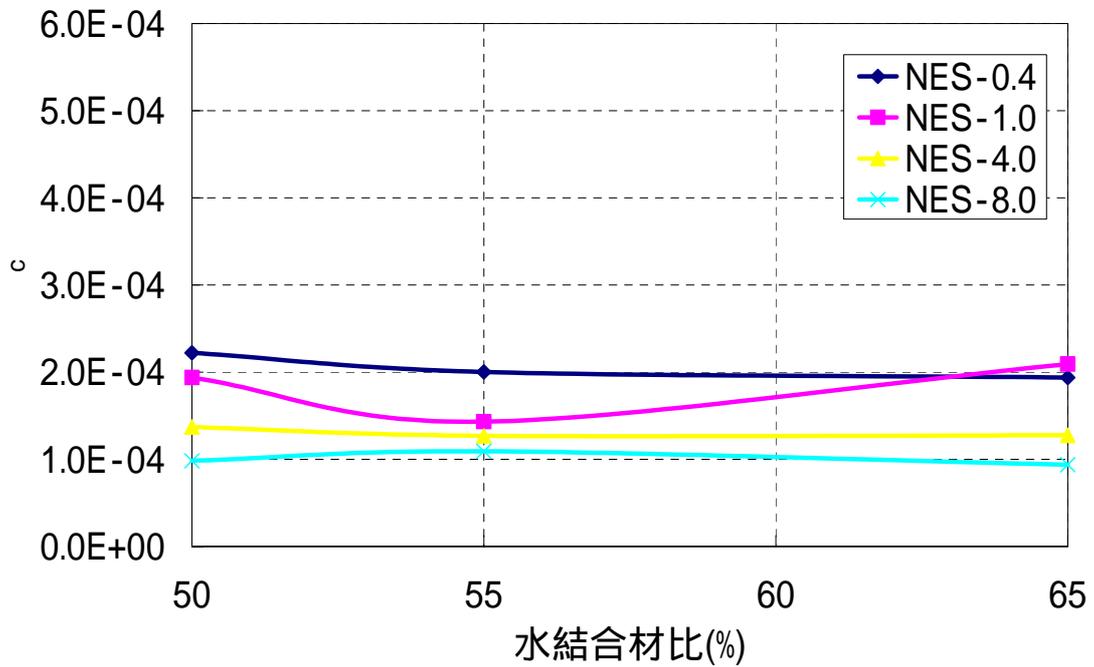


図-5.54  $c$ と水結合材比の関係(NES)

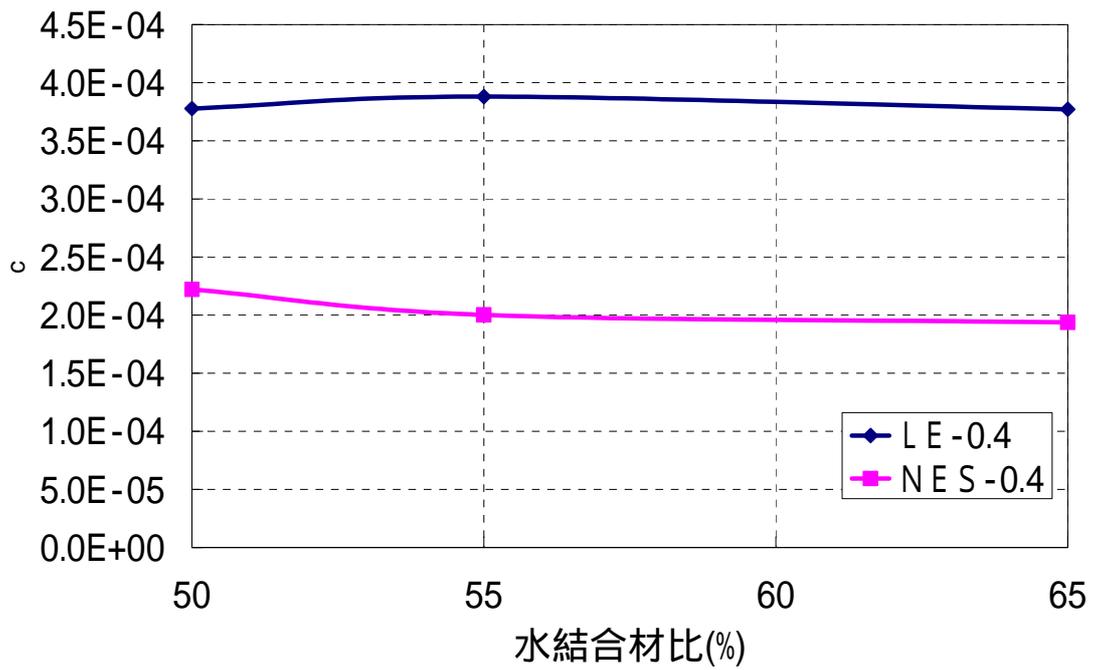


図-5.55  $c$ と水結合材比の関係(鉄筋比 0.4%)

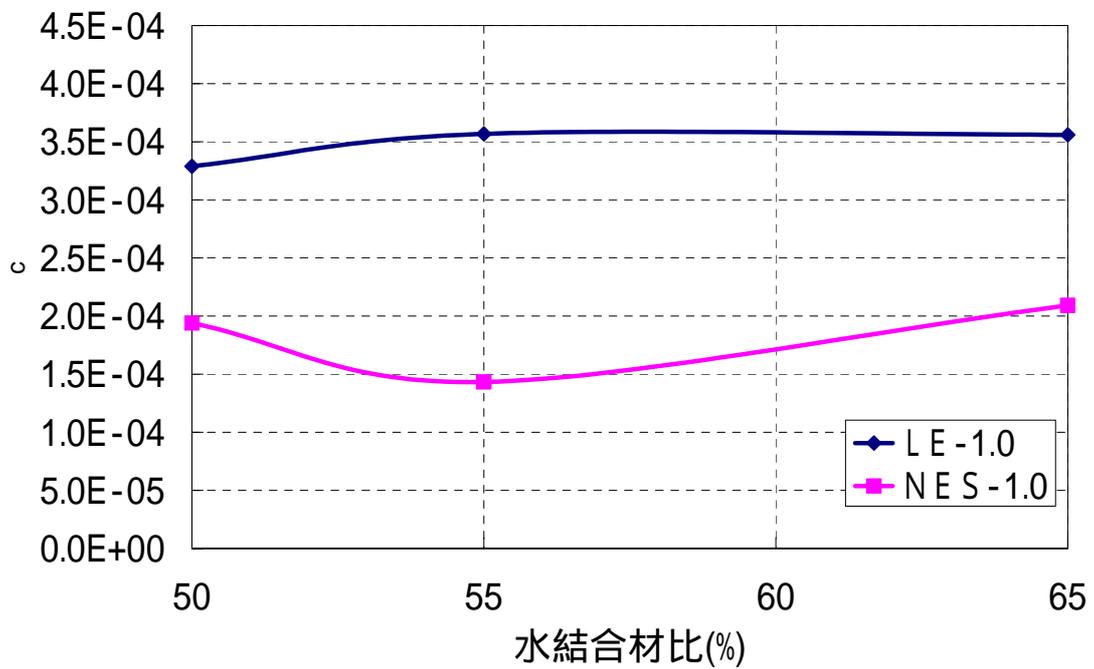


図-5.56  $c$ と水結合材比の関係(鉄筋比 1.0%)

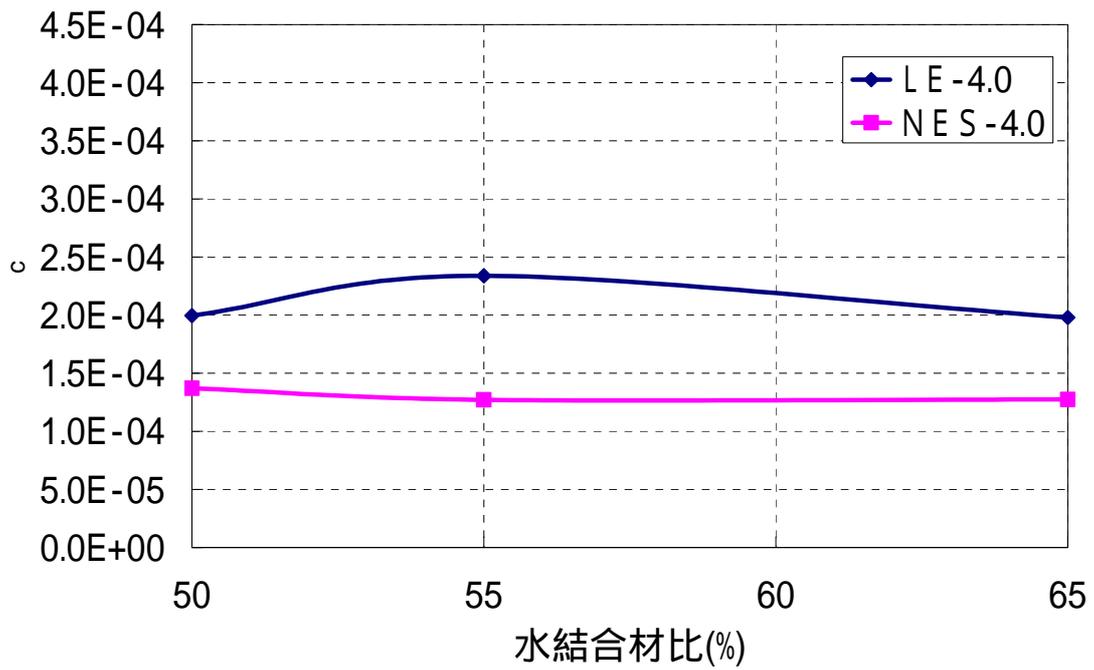


図-5.57  $\sigma_c$ と水結合材比の関係(鉄筋比 4.0%)

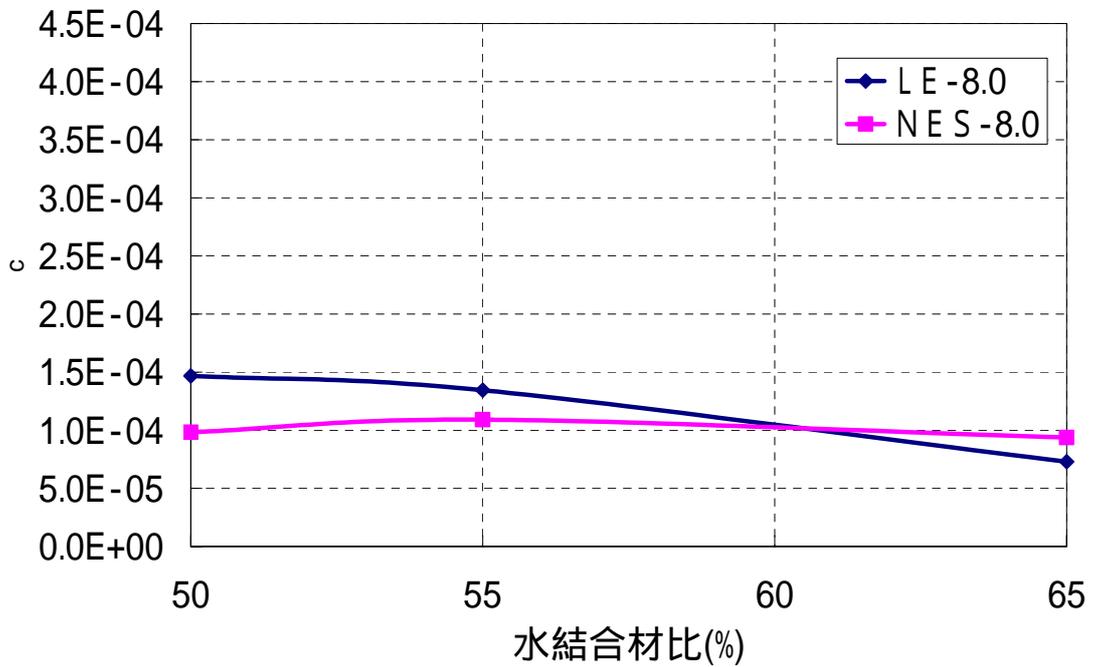


図-5.58  $\sigma_c$ と水結合材比の関係(鉄筋比 8.0%)

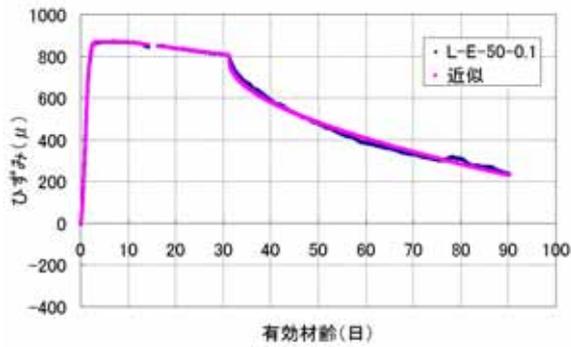


図-5.59 自由ひずみ近似(LE50-0.1)

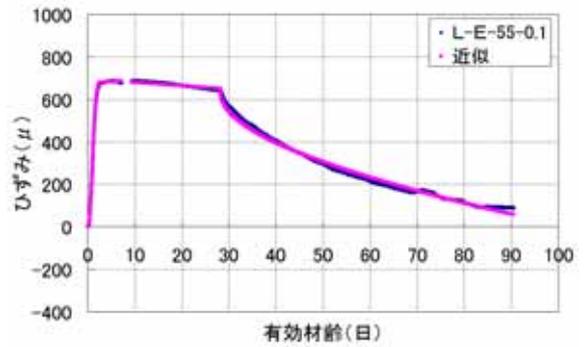


図-5.60 自由ひずみ近似(LE55-0.1)

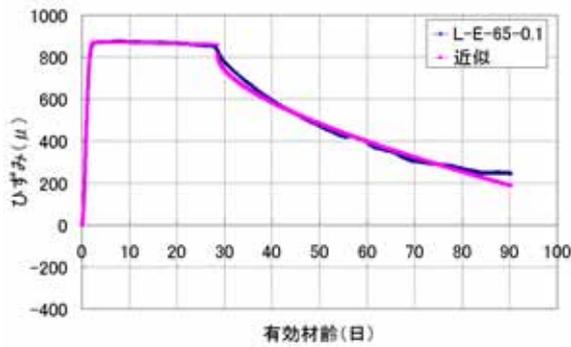


図-5.61 自由ひずみ近似(LE65-0.1)

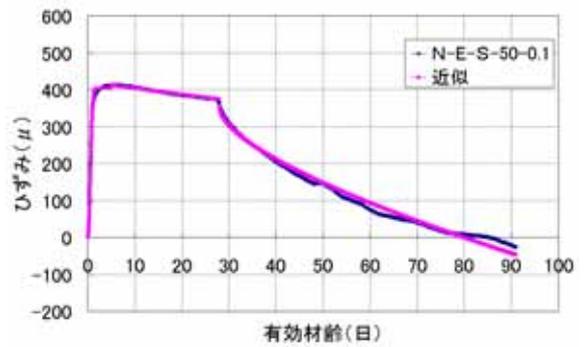


図-5.62 自由ひずみ近似(NES50-0.1)

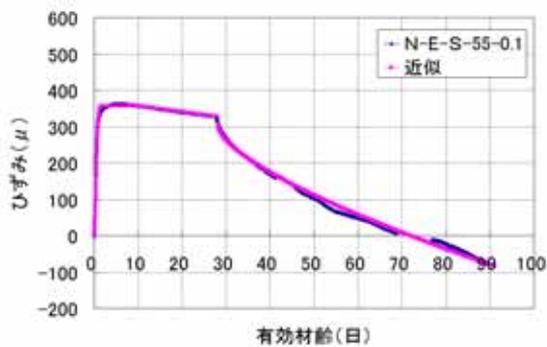


図-5.63 自由ひずみ近似(NES55-0.1)

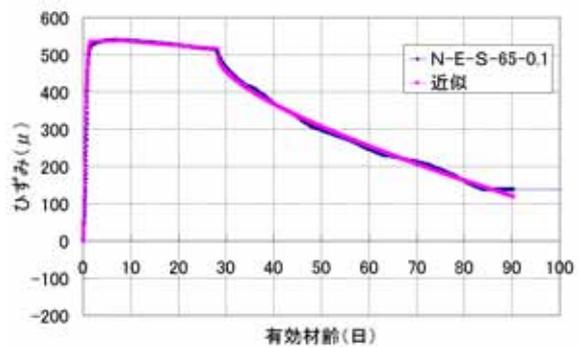


図-5.64 自由ひずみ近似(NES65-0.1)

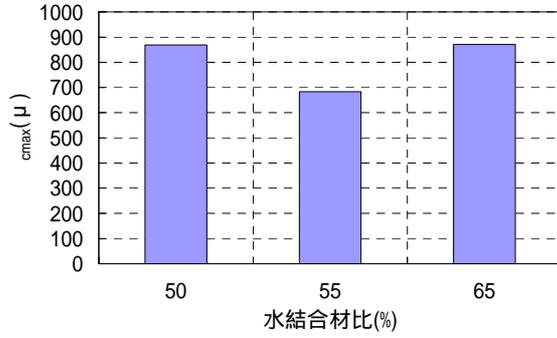


図-5.65  $c_{max}$ と水結合材比の関係(LE-0.1)

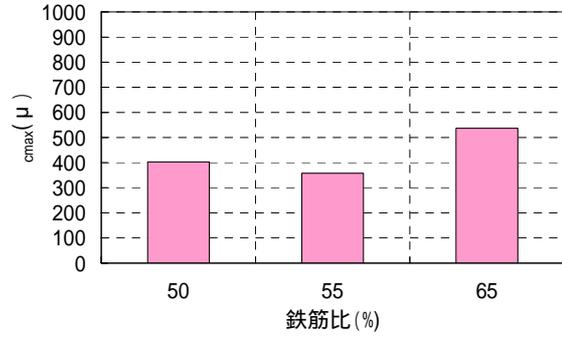


図-5.66  $c_{max}$ と水結合材比の関係(NES-0.1)

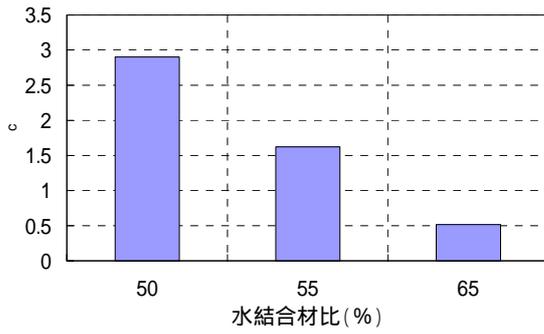


図-5.67  $c$ と水結合材比の関係(LE-0.1)

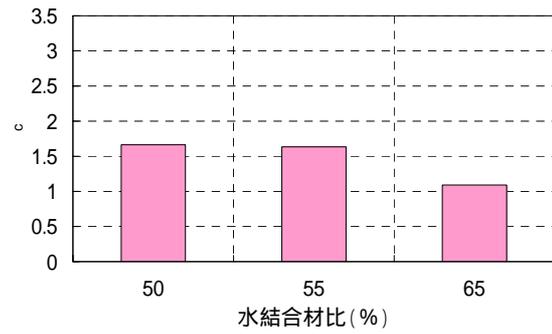


図-5.68  $c$ と水結合材比の関係(NES-0.1)

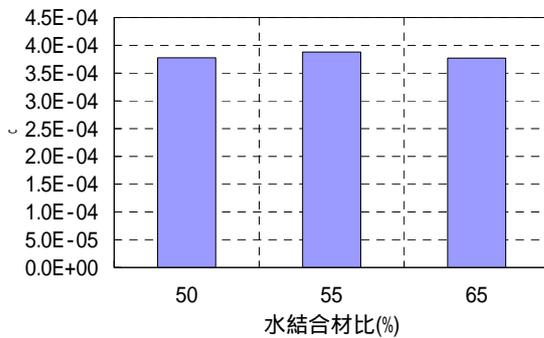


図-5.69  $c$ と水結合材比の関係(LE-0.1)

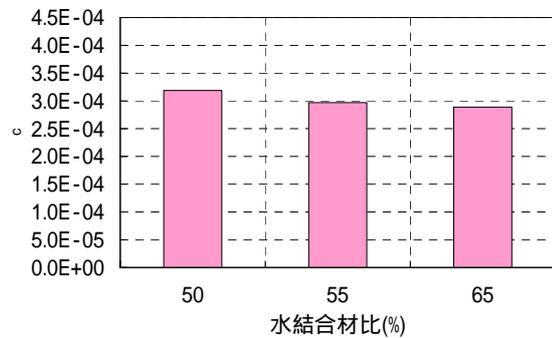


図-5.70  $c$ と水結合材比の関係(NES-0.1)

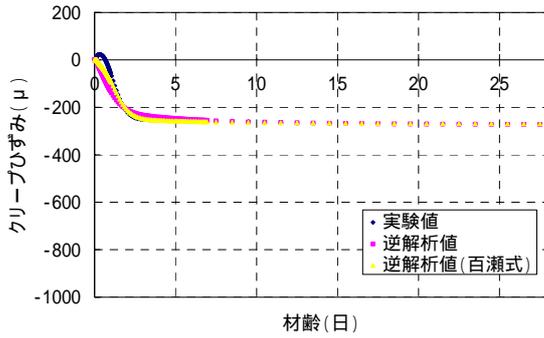


図-5.72 クリープ逆解析結果(LE50-0.4)

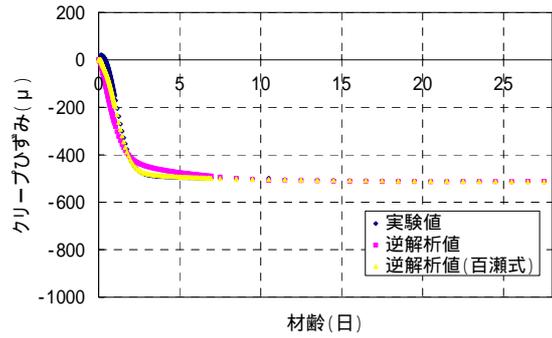


図-5.73 クリープ逆解析結果(LE50-1.0)

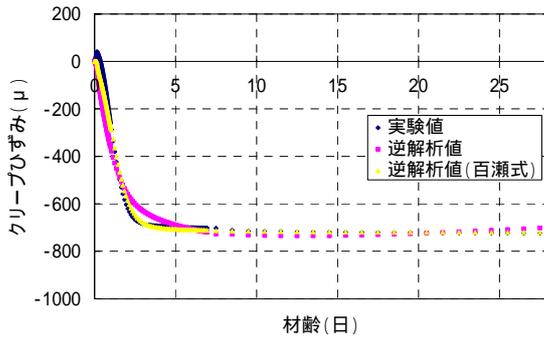


図-5.74 クリープ逆解析結果(LE50-4.0)

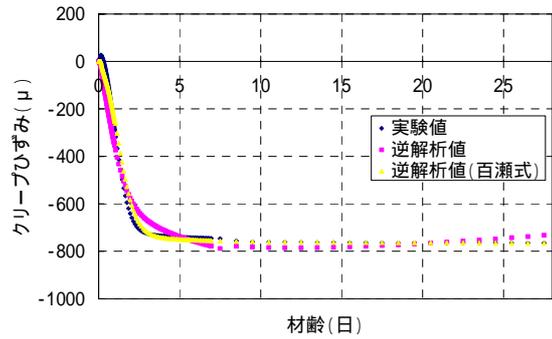


図-5.75 クリープ逆解析結果(LE50-8.0)

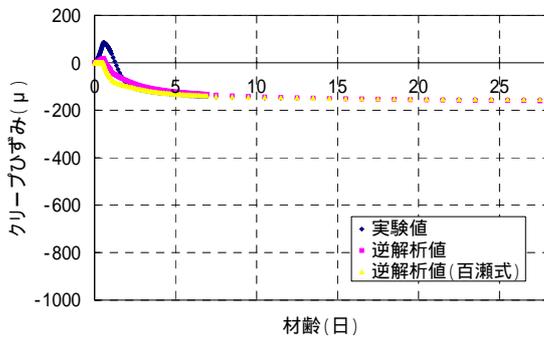


図-5.76 クリープ逆解析結果(LE55-0.4)

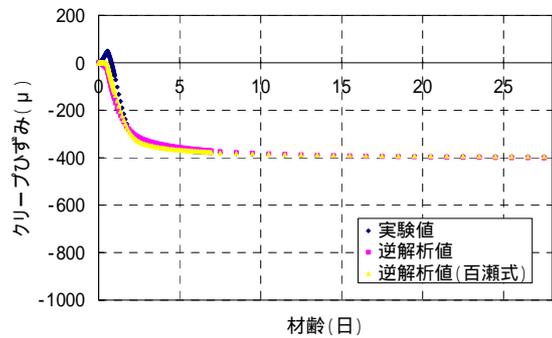


図-5.77 クリープ逆解析結果(LE55-1.0)

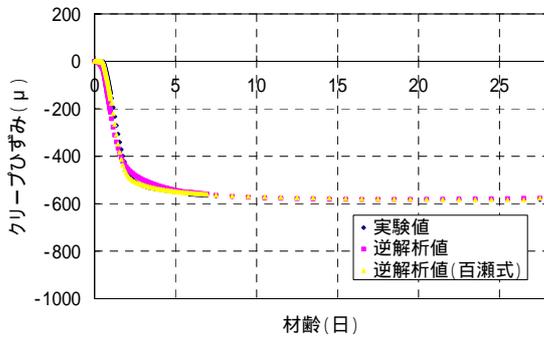


図-5.78 クリープ逆解析結果(LE55-4.0)

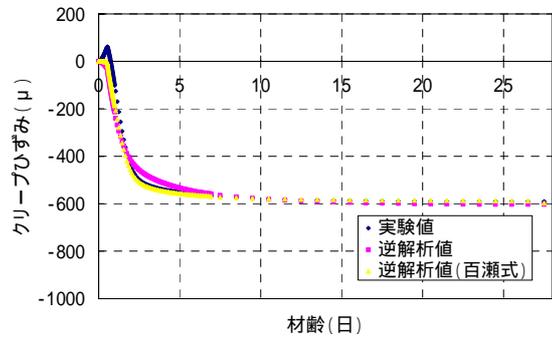


図-5.79 クリープ逆解析結果(LE55-8.0)

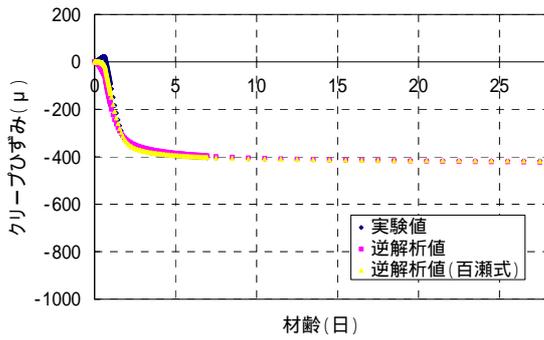


図-5.80 クリープ逆解析結果(LE65-0.4)

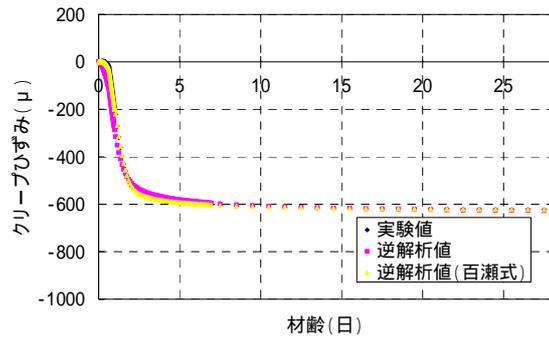


図-5.81 クリープ逆解析結果(LE65-1.0)

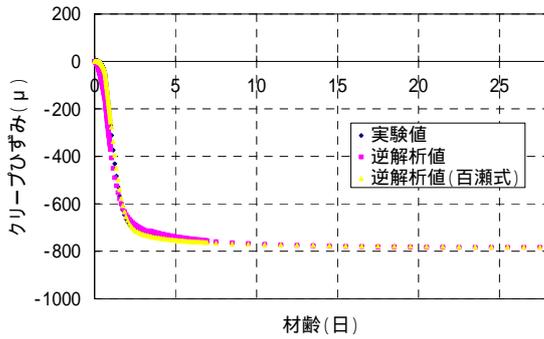


図-5.82 クリープ逆解析結果(LE65-4.0)

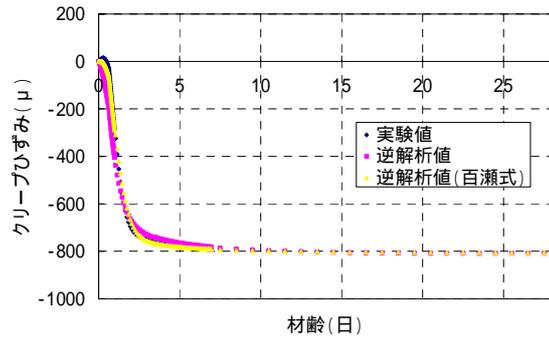


図-5.83 クリープ逆解析結果(LE65-8.0)

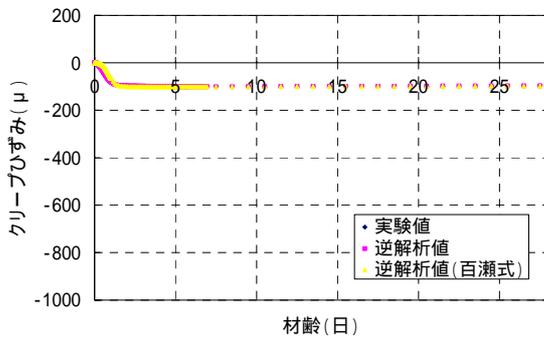


図-5.84 クリープ逆解析結果(NES50-0.4)

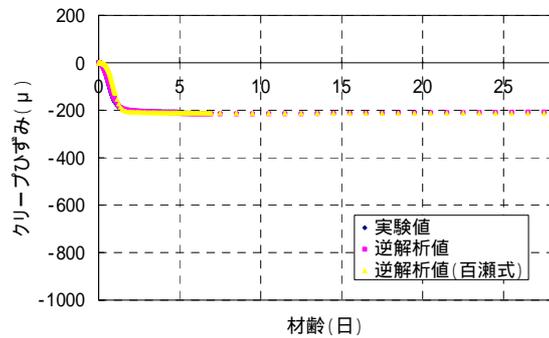


図-5.85 クリープ逆解析結果(NES50-1.0)

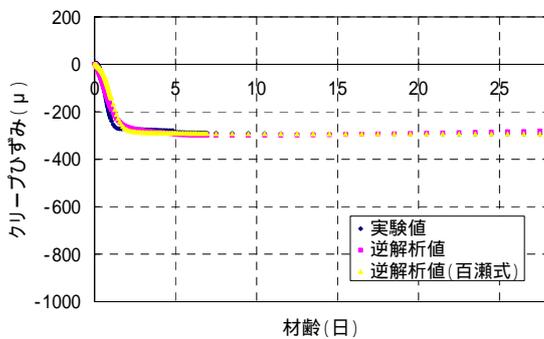


図-5.86 クリープ逆解析結果(NES50-4.0)

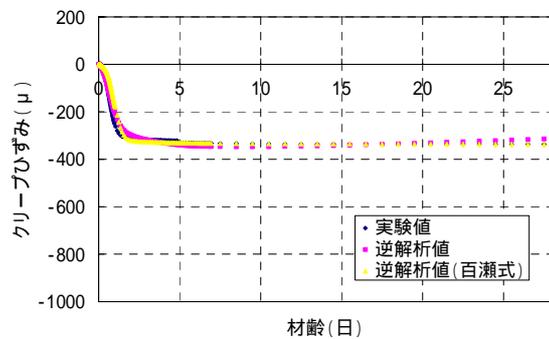


図-5.87 クリープ逆解析結果(NES50-8.0)

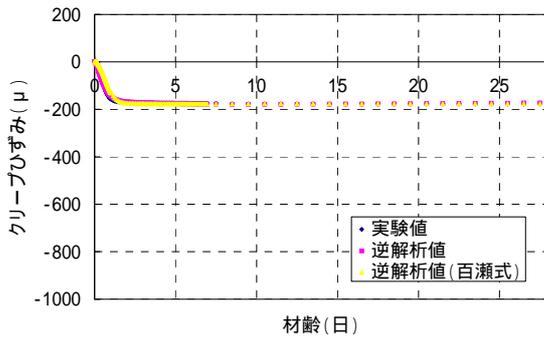


図-5.88 クリープ逆解析結果(NES55-0.4)

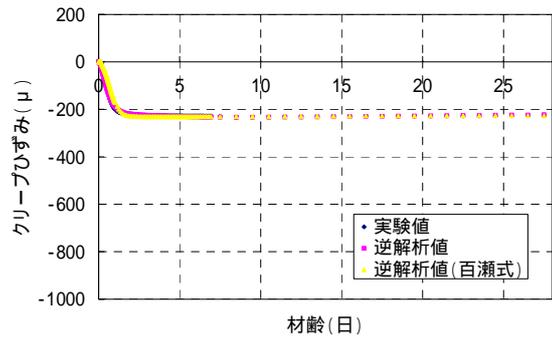


図-5.89 クリープ逆解析結果(NES55-1.0)

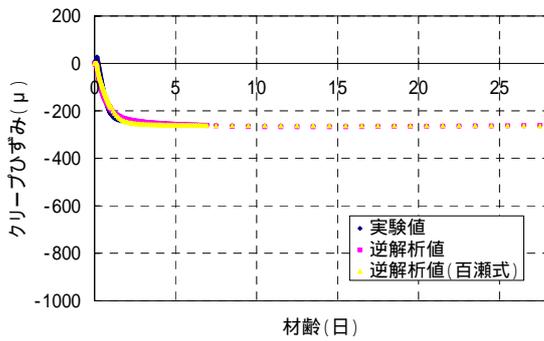


図-5.90 クリープ逆解析結果(NES55-4.0)

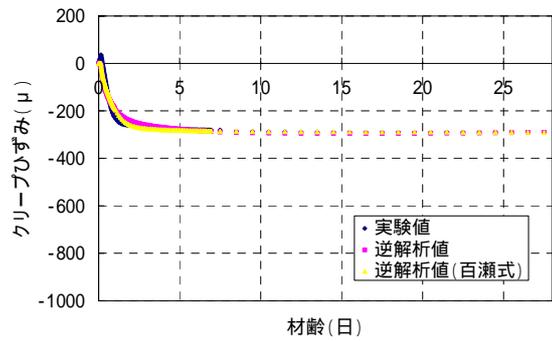


図-5.91 クリープ逆解析結果(NES55-8.0)

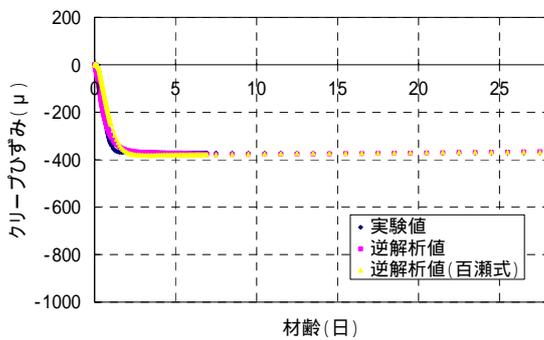


図-5.92 クリープ逆解析結果(NES65-0.4)

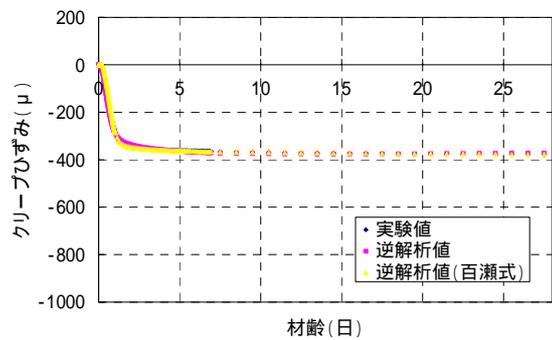


図-5.93 クリープ逆解析結果(NES65-1.0)

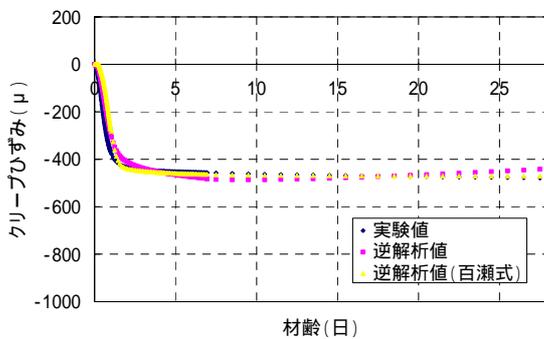


図-5.94 クリープ逆解析結果(NES65-4.0)

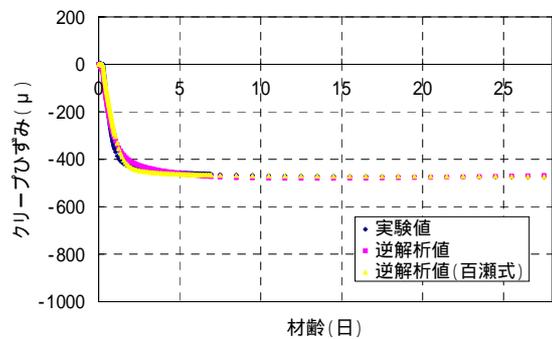


図-5.95 クリープ逆解析結果(NES65-8.0)

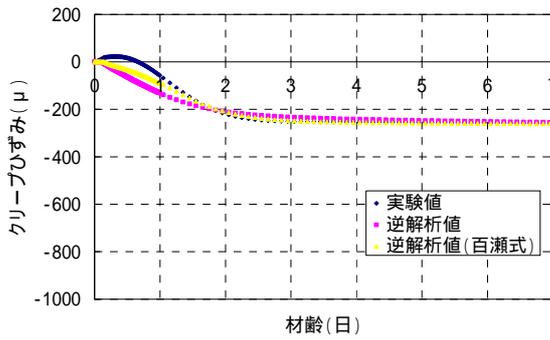


図-5.96 若材齢解析結果(LE50-0.4)

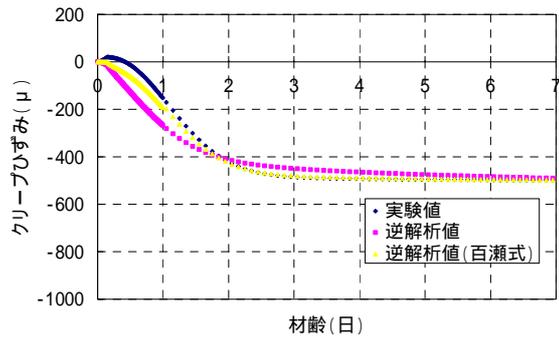


図-5.97 若材齢解析結果(LE50-1.0)

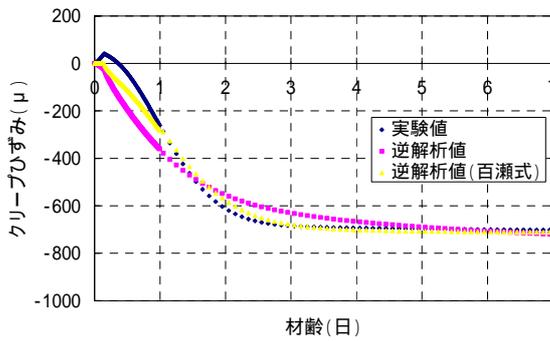


図-5.98 若材齢解析結果(LE50-4.0)

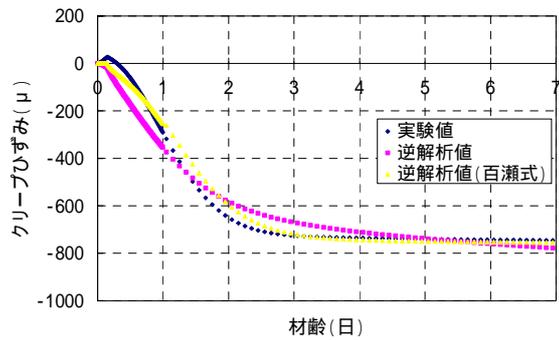


図-5.99 若材齢解析結果(LE50-8.0)

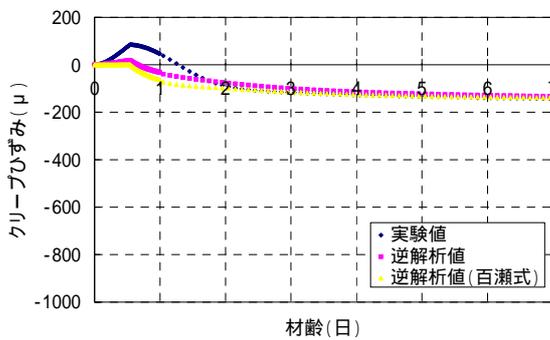


図-5.100 若材齢解析結果(LE55-0.4)

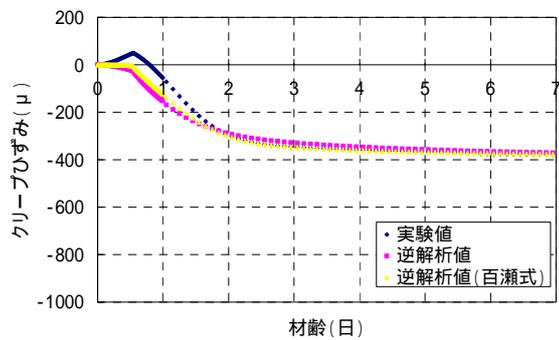


図-5.101 若材齢解析結果(LE55-1.0)

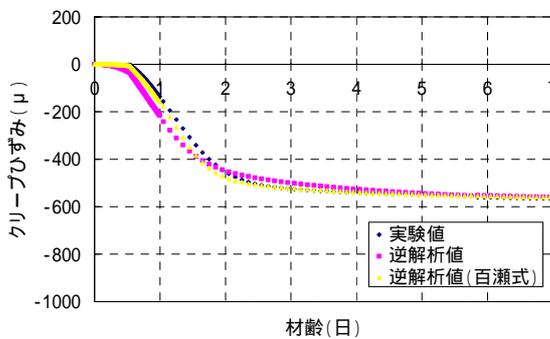


図-5.102 若材齢解析結果(LE55-4.0)

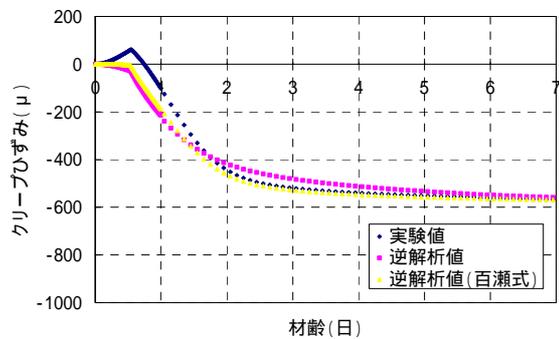


図-5.103 若材齢解析結果(LE55-8.0)

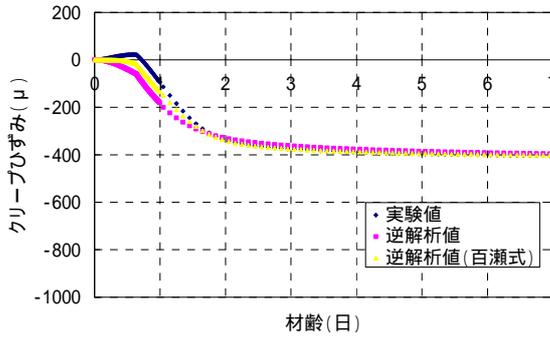


図-5.104 若材齢解析結果(LE65-0.4)

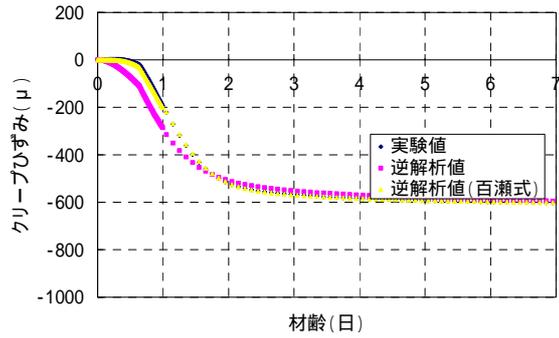


図-5.105 若材齢解析結果(LE65-1.0)

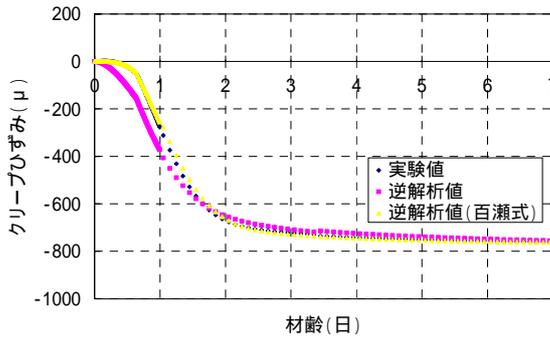


図-5.106 若材齢解析結果(LE65-4.0)

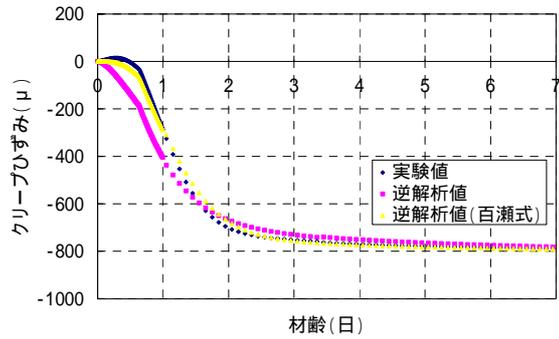


図-5.107 若材齢解析結果(LE65-8.0)

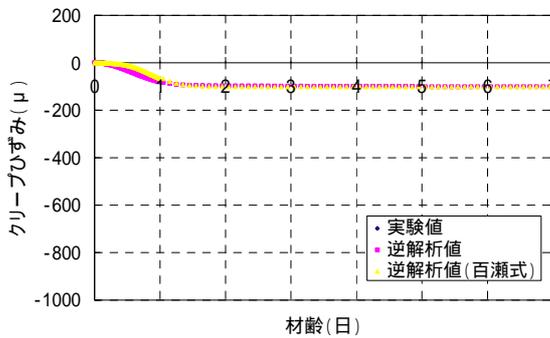


図-5.108 若材齢解析結果(NES50-0.4)

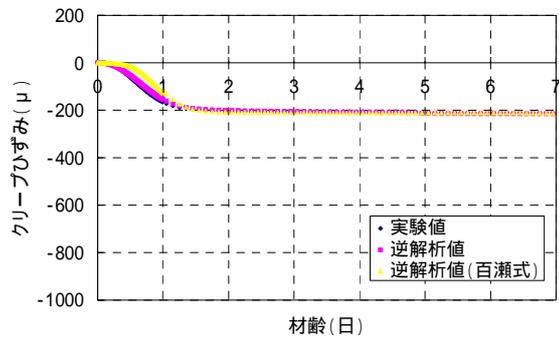


図-5.109 若材齢解析結果(NES50-1.0)

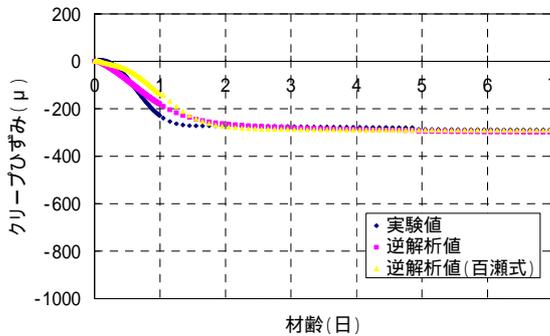


図-5.110 若材齢解析結果(NES50-4.0)

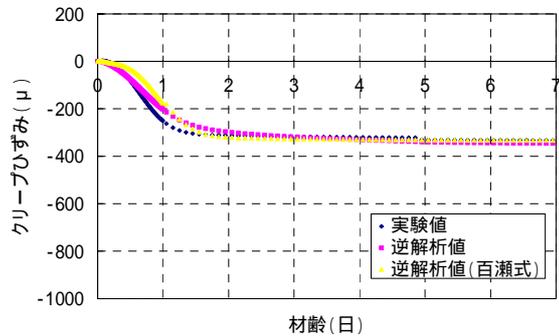


図-5.111 若材齢解析結果(NES50-8.0)

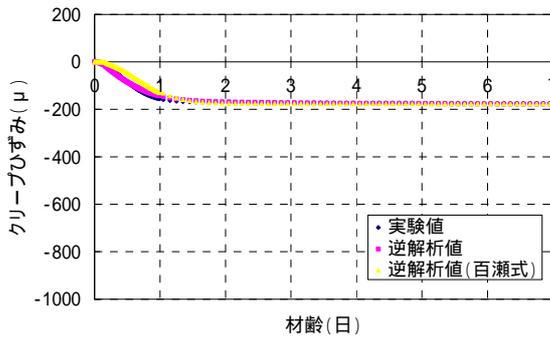


図-5.112 若材齢解析結果(NES55-0.4)

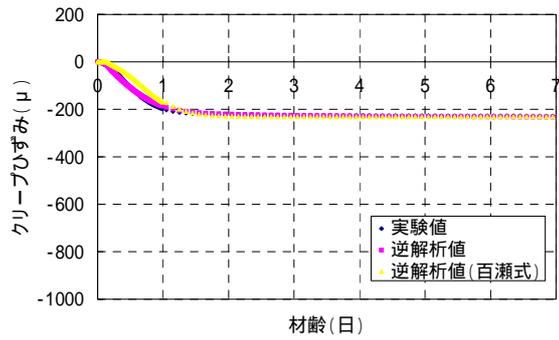


図-5.113 若材齢解析結果(NES55-1.0)

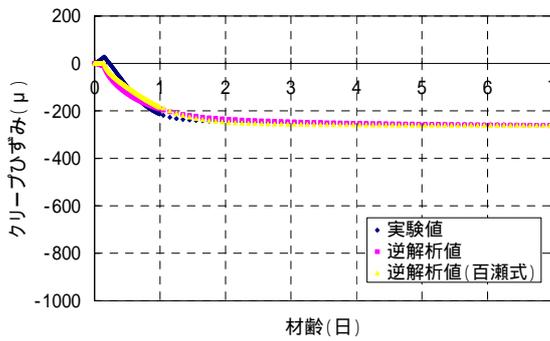


図-5.114 若材齢解析結果(NES55-4.0)

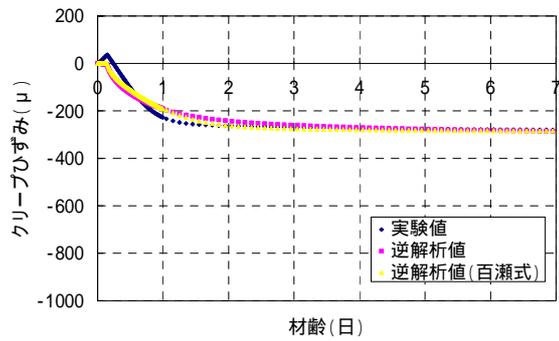


図-5.115 若材齢解析結果(NES55-8.0)

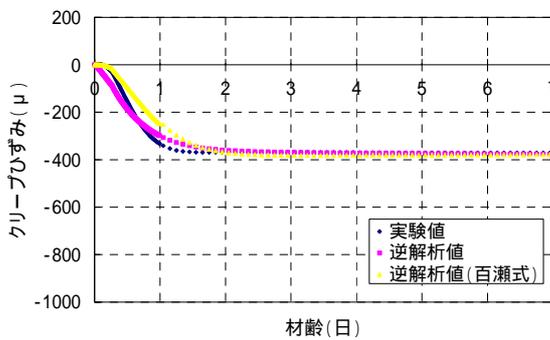


図-5.116 若材齢解析結果(NES65-0.4)

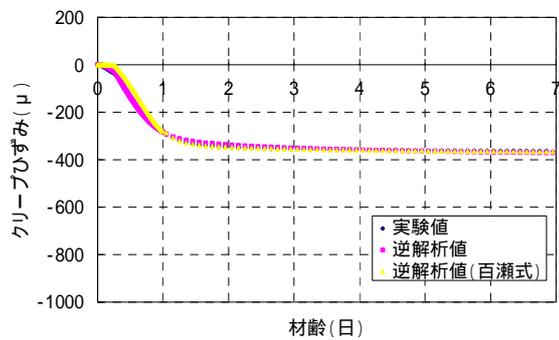


図-5.117 若材齢解析結果(NES65-1.0)

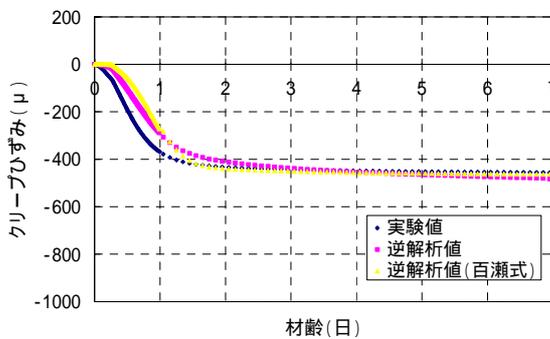


図-5.118 若材齢解析結果(NES65-4.0)

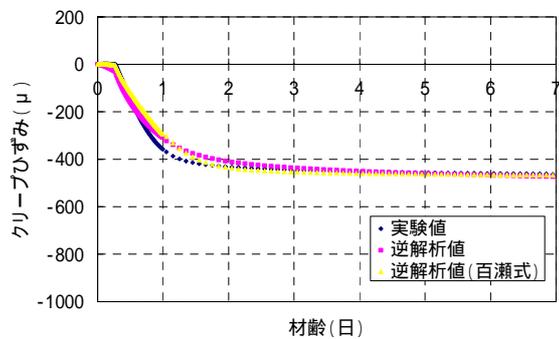


図-5.119 若材齢解析結果(NES65-8.0)

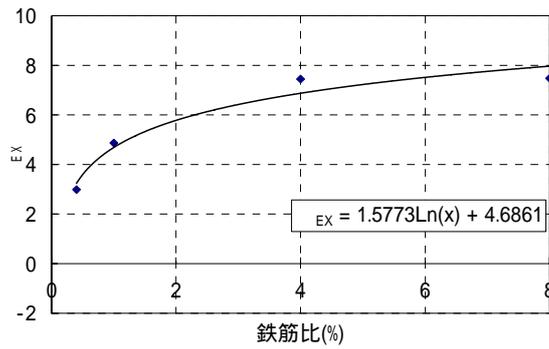


図-5.120 EXと鉄筋比の関係(LE50)

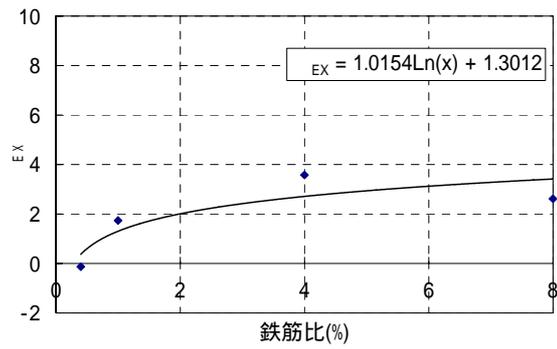


図-5.121 EXと鉄筋比の関係(LE55)

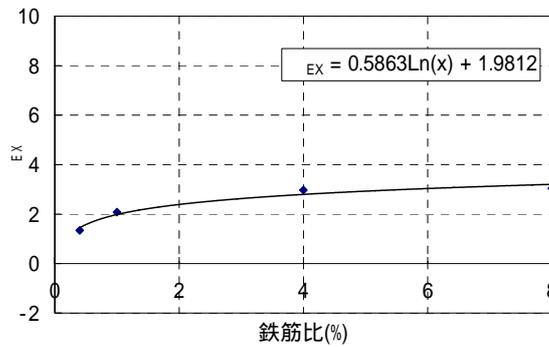


図-5.122 EXと鉄筋比の関係(LE65)

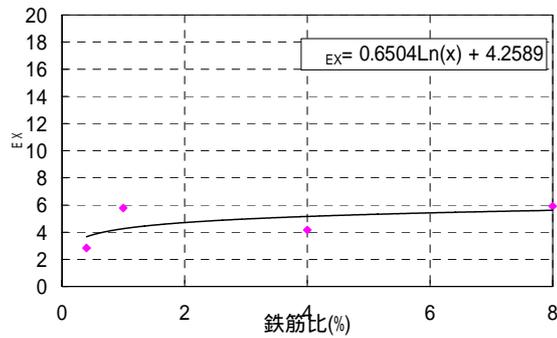


図-5.123 EXと鉄筋比の関係(NES50)

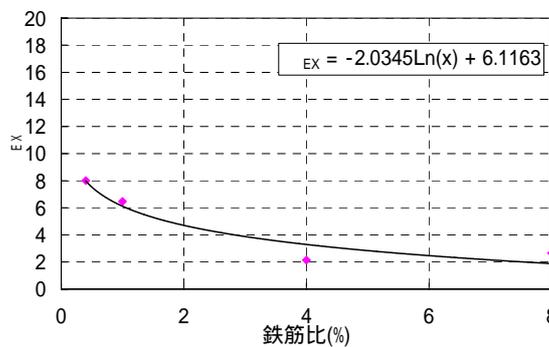


図-5.124 EXと鉄筋比の関係(NES55)

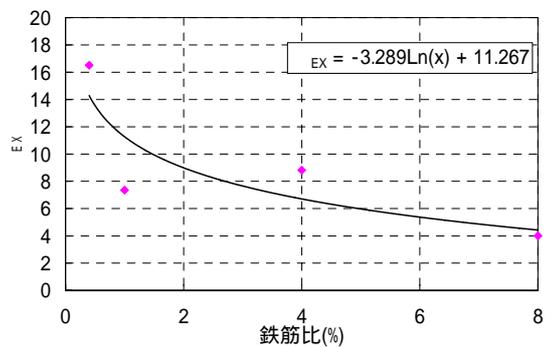


図-5.125 EXと鉄筋比の関係(NES65)

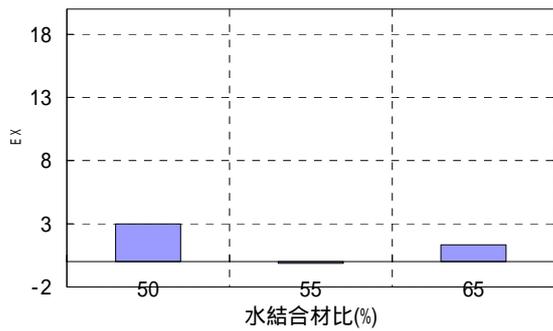


図-5.126 EXと水結合材比の関係(LE-0.4)

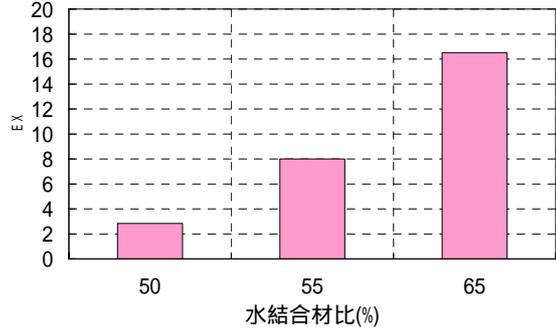


図-5.127 EXと水結合材比の関係(NES-0.4)

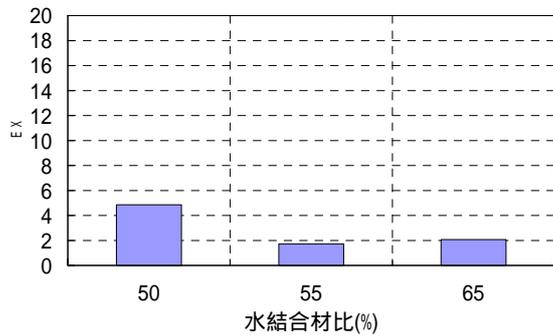


図-5.128 EXと水結合材比の関係(LE-1.0)

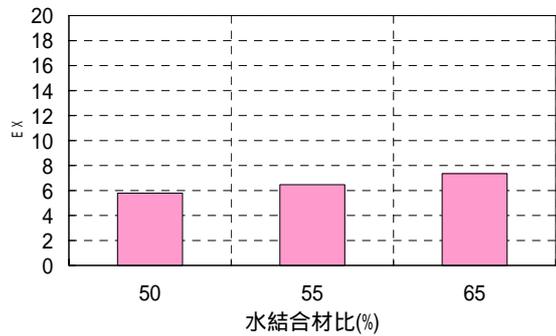


図-5.129 EXと水結合材比の関係(NES-1.0)

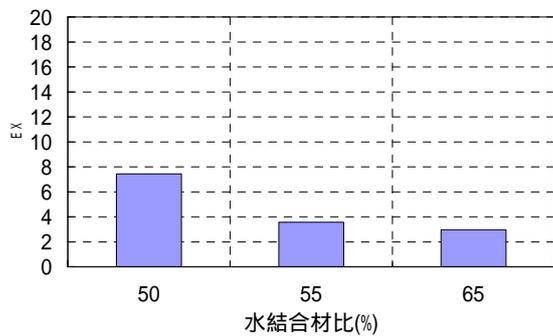


図-5.130 EXと水結合材比の関係(LE-4.0)

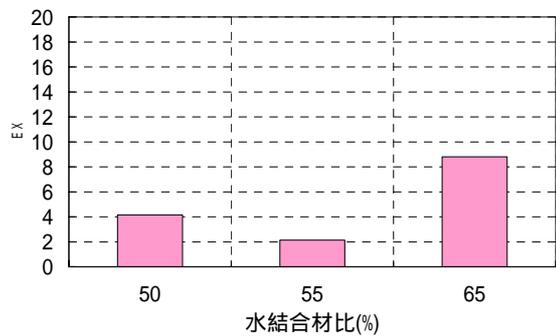


図-5.131 EXと水結合材比の関係(NES-4.0)

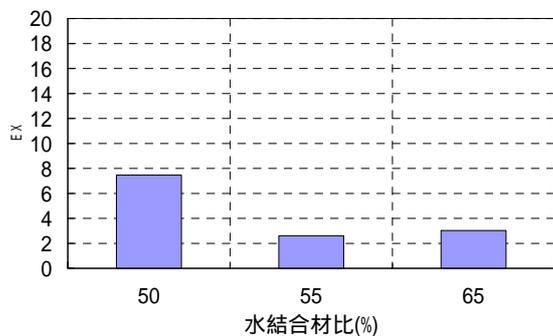


図-5.132 EXと水結合材比の関係(LE-8.0)

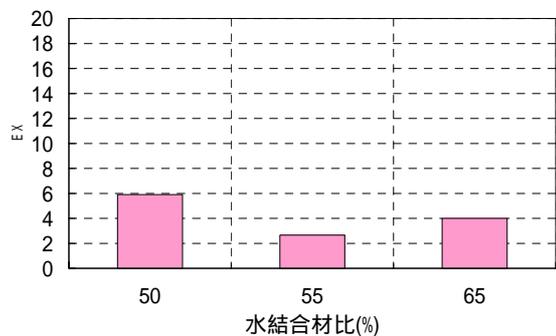


図-5.133 EXと水結合材比の関係(NES-8.0)

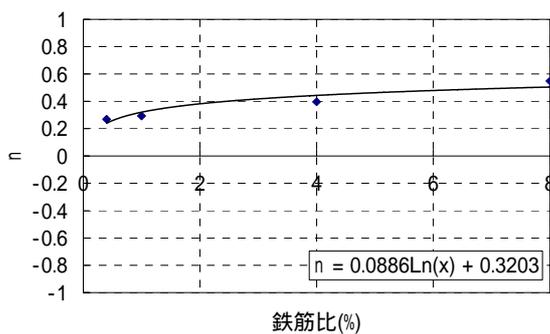


図-5.134  $n$ と鉄筋比の関係(LE50)

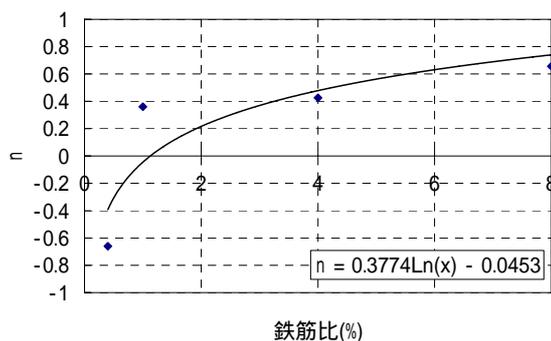


図-5.135  $n$ と鉄筋比の関係(LE55)

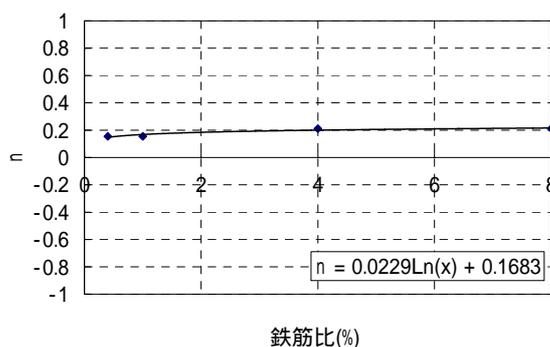


図-5.136  $n$ と鉄筋比の関係(LE65)

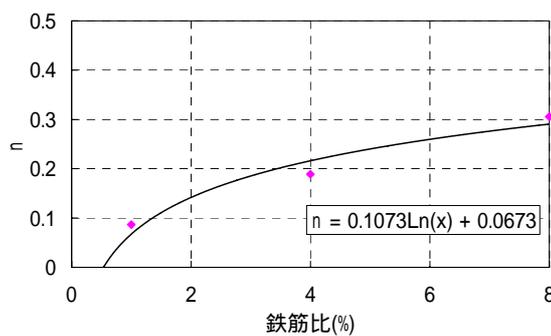


図-5.137  $n$ と鉄筋比の関係(NES50)

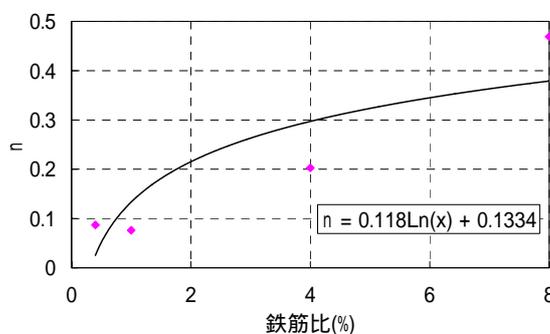


図-5.138  $n$ と鉄筋比の関係(NES55)

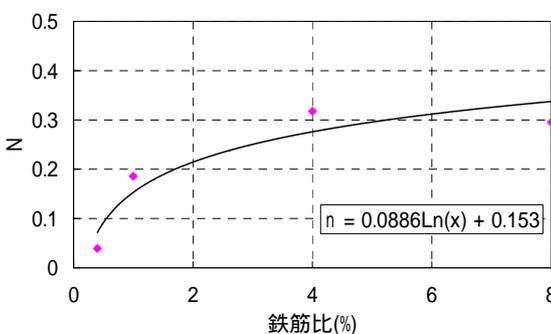


図-5.139  $n$ と鉄筋比の関係(NES65)

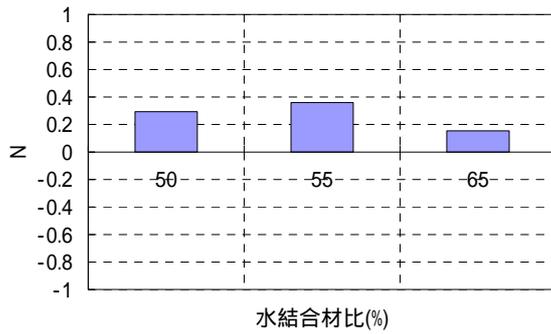


図-5.140 nと水結合材比の関係(LE-0.4)

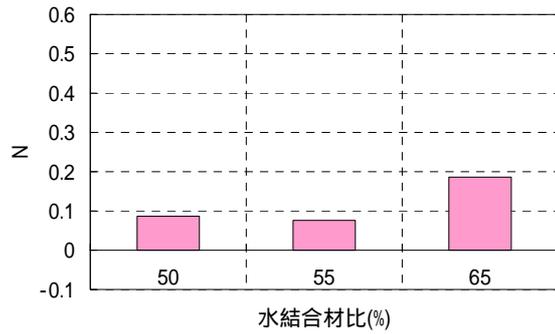


図-5.141 nと水結合材比の関係(NES-0.4)

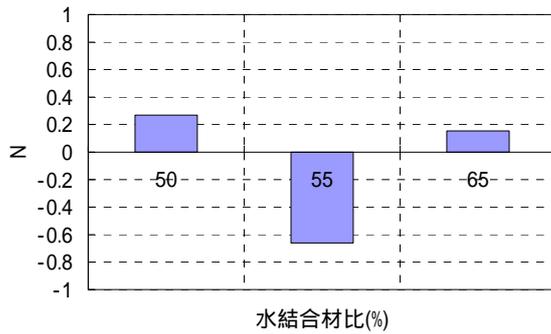


図-5.142 nと水結合材比の関係(LE-1.0)

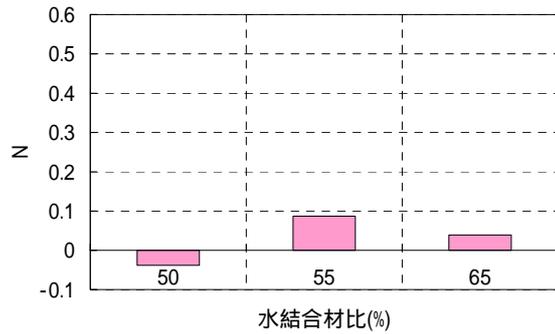


図-5.143 nと水結合材比の関係(NES-1.0)

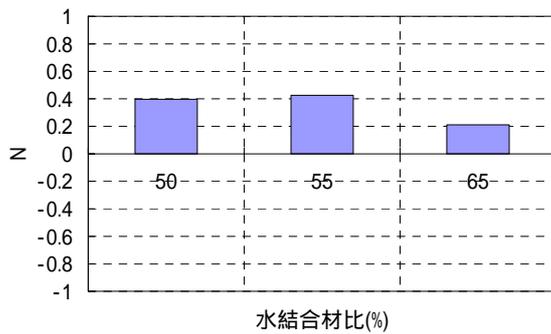


図-5.144 nと水結合材比の関係(LE-4.0)

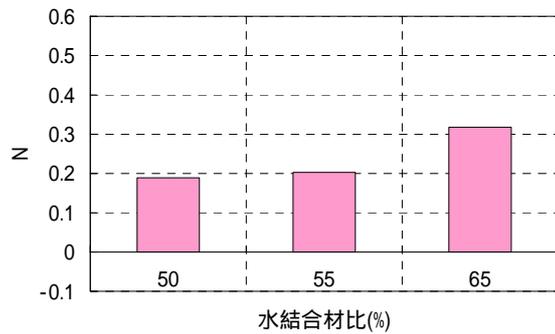


図-5.145 nと水結合材比の関係(NES-4.0)

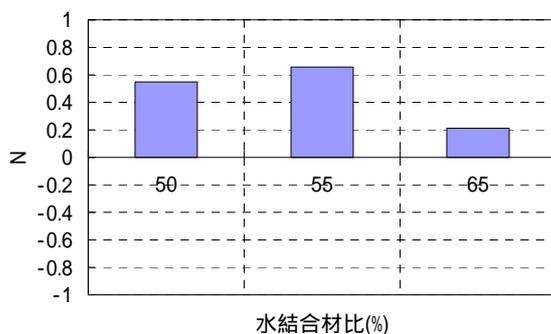


図-5.146 nと水結合材比の関係(LE-8.0)

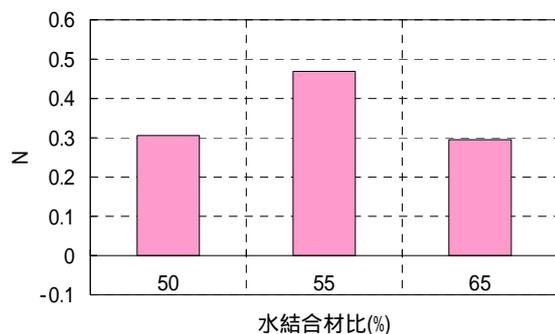


図-5.147 nと水結合材比の関係(NES-8.0)

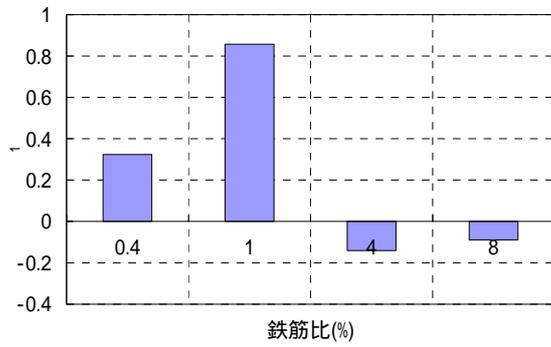


図-5.148  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(LE50)

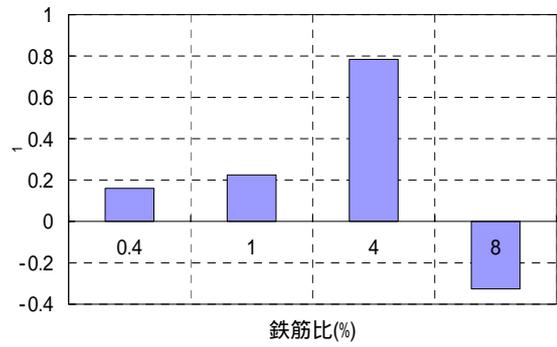


図-5.149  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(LE55)

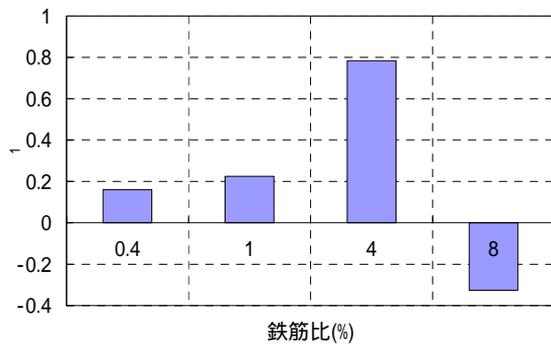


図-5.150  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(LE65)

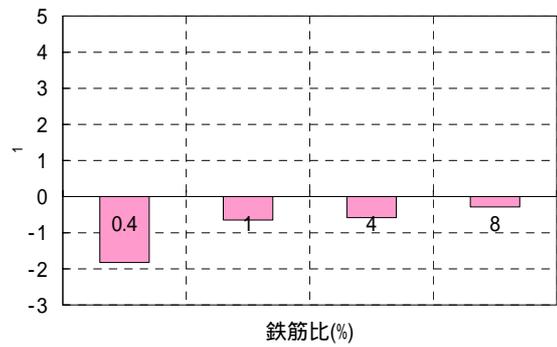


図-5.151  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(NES50)

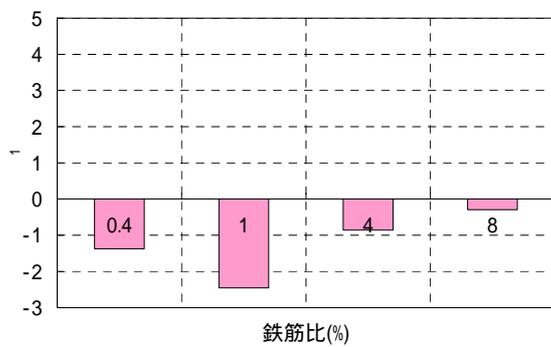


図-5.152  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(NES55)

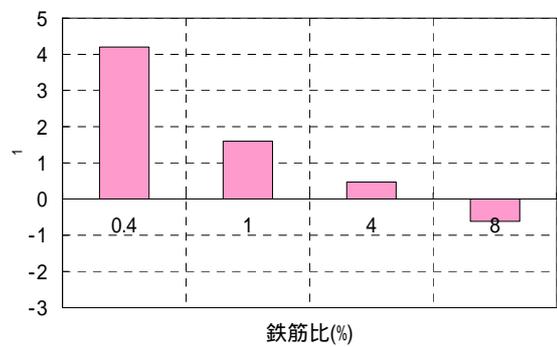


図-5.153  $\rho_1$ と鉄筋比の関係(NES65)

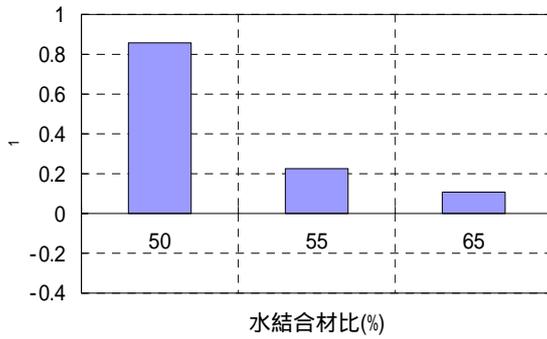


図-5.154  $\rho_1$ と水結合材比の関係(LE-0.4)

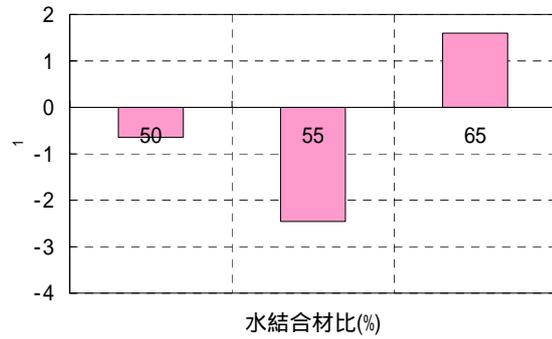


図-5.155  $\rho_1$ と水結合材比の関係(NES-0.4)

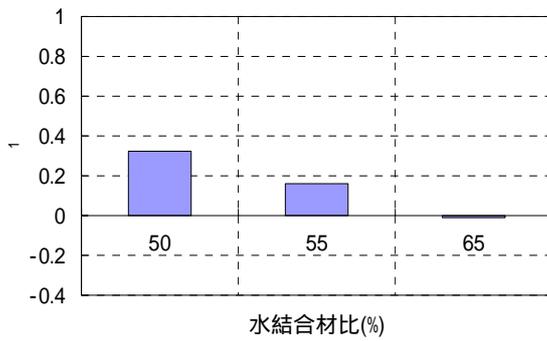


図-5.156  $\rho_1$ と水結合材比の関係(LE-1.0)

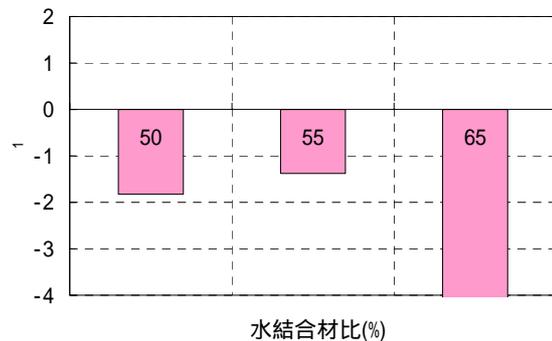


図-5.157  $\rho_1$ と水結合材比の関係(NES-1.0)

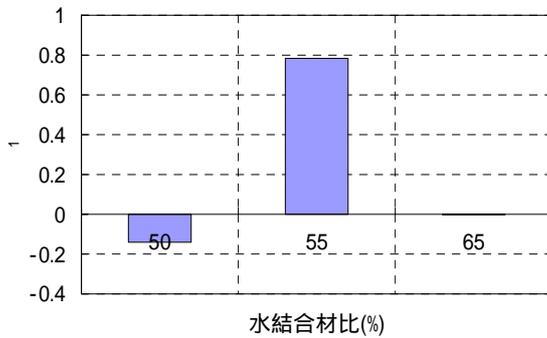


図-5.158  $\rho_1$ と水結合材比の関係(LE-4.0)

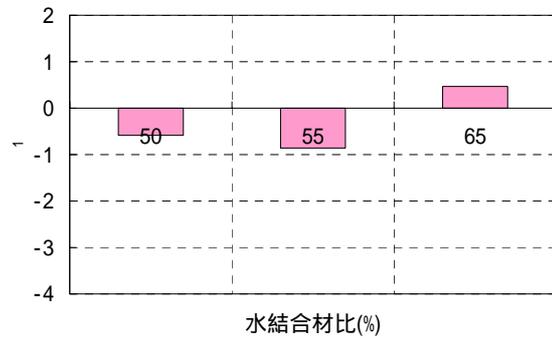


図-5.159  $\rho_1$ と水結合材比の関係(NES-4.0)

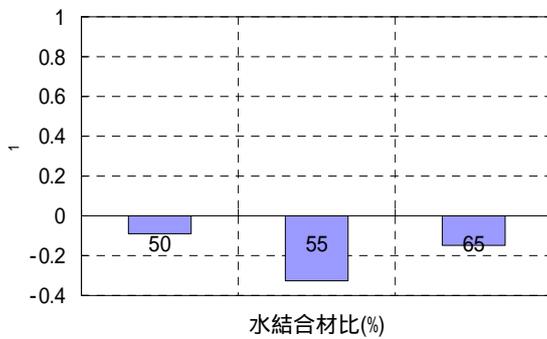


図-5.160  $\rho_1$ と水結合材比の関係(LE-8.0)

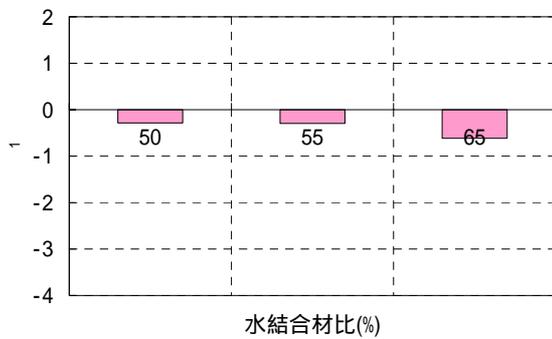


図-5.161  $\rho_1$ と水結合材比の関係(NES-8.0)

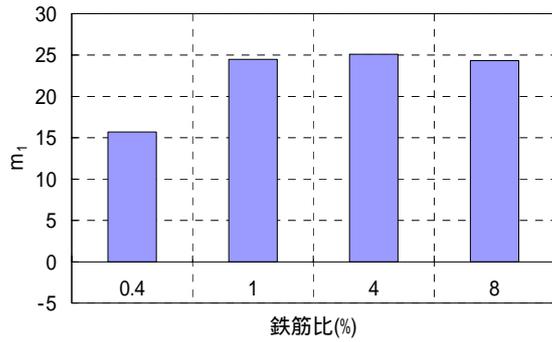


図-5.162  $m_1$ と鉄筋比の関係(LE50)

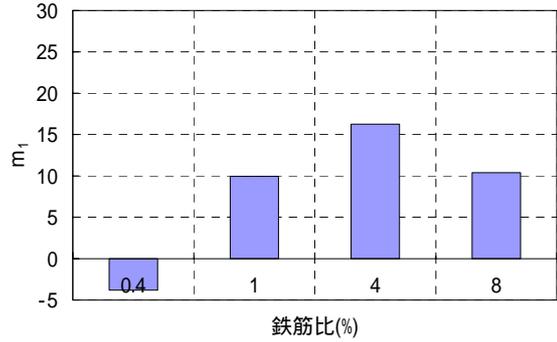


図-5.163  $m_1$ と鉄筋比の関係(LE55)

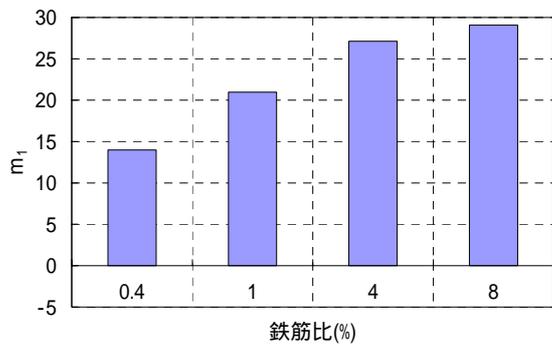


図-5.164  $m_1$ と鉄筋比の関係(LE65)

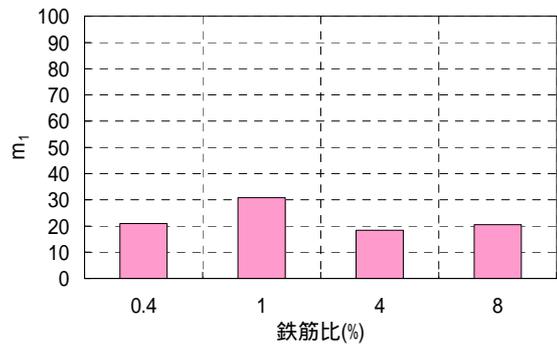


図-5.165  $m_1$ と鉄筋比の関係(NES50)

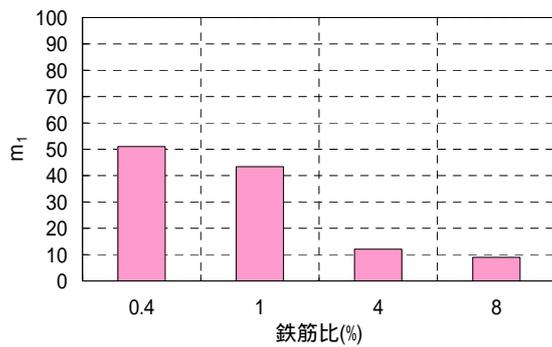


図-5.166  $m_1$ と鉄筋比の関係(NES55)

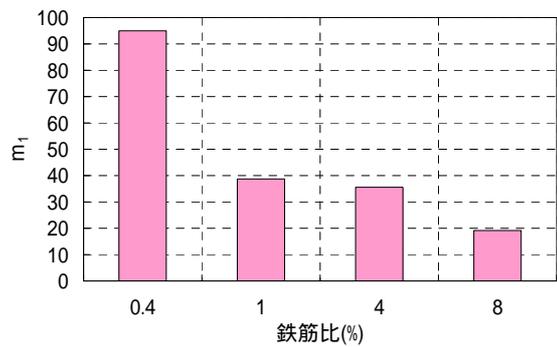


図-5.167  $m_1$ と鉄筋比の関係(NES65)

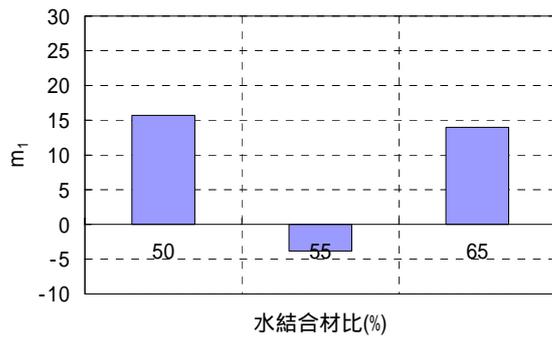


図-5.168  $m_1$ と水結合材比の関係(LE-0.4)

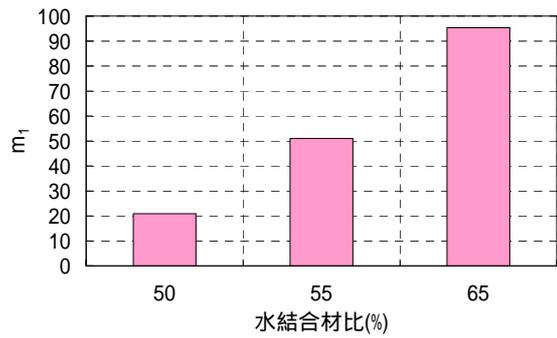


図-5.169  $m_1$ と水結合材比の関係(NES-0.4)

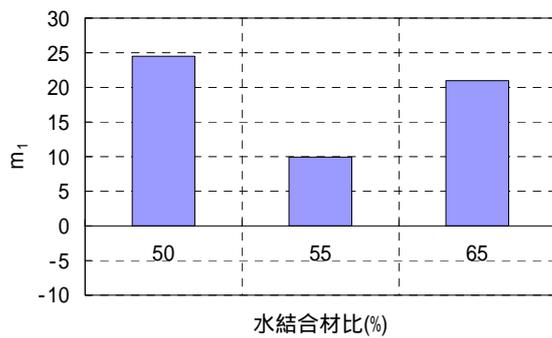


図-5.170  $m_1$ と水結合材比の関係(LE-1.0)

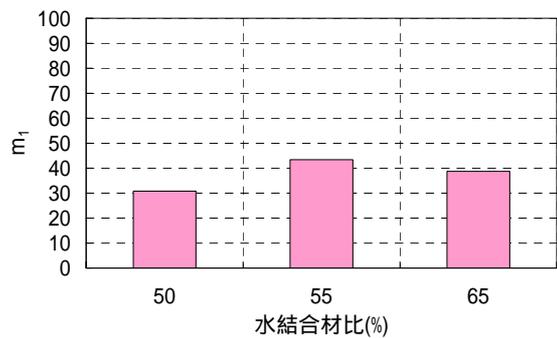


図-5.171  $m_1$ と水結合材比の関係(NES-1.0)

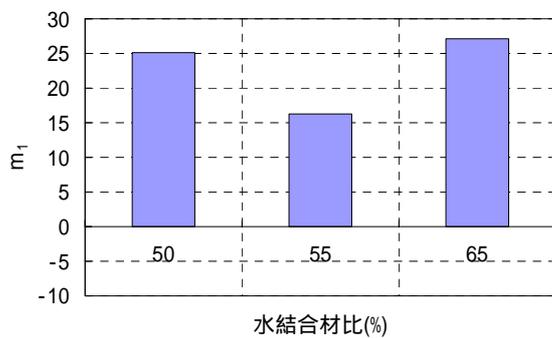


図-5.172  $m_1$ と水結合材比の関係(LE-4.0)

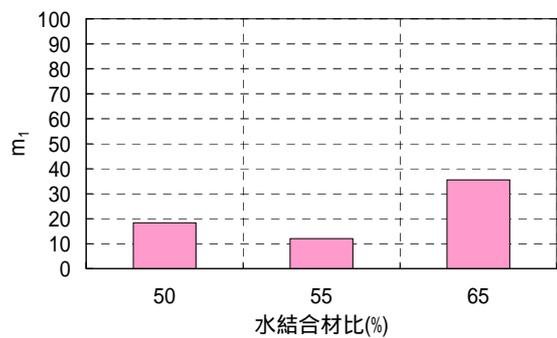


図-5.173  $m_1$ と水結合材比の関係(NES-4.0)

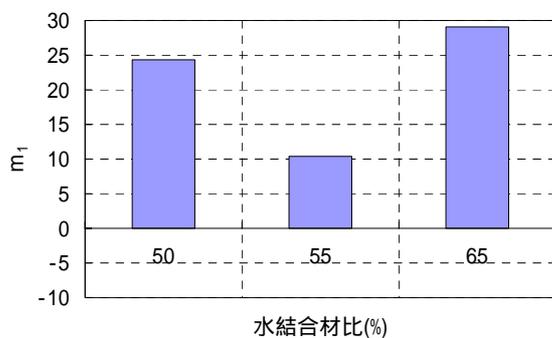


図-5.174  $m_1$ と水結合材比の関係(LE-8.0)

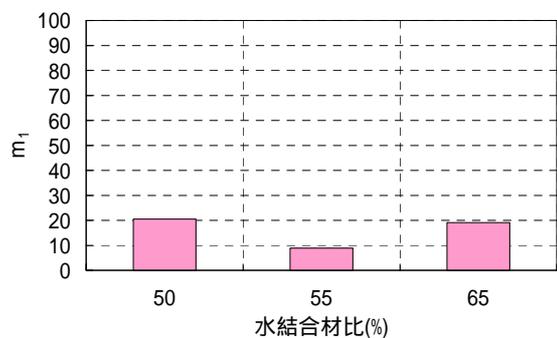


図-5.175  $m_1$ と水結合材比の関係(NES-8.0)

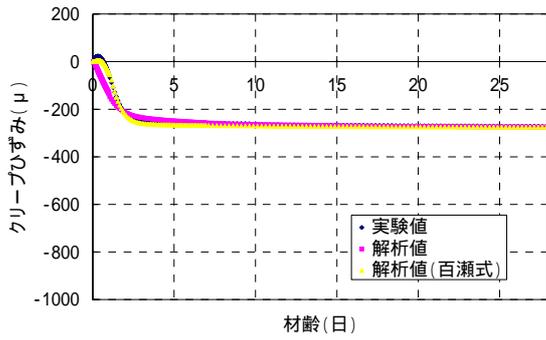


図-5.176 クリープ解析結果(LE50-0.4)

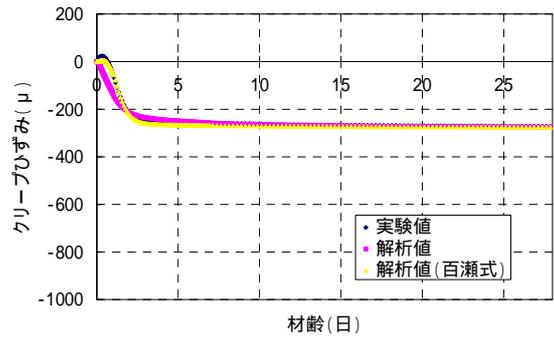


図-5.177 クリープ解析結果(LE50-1.0)

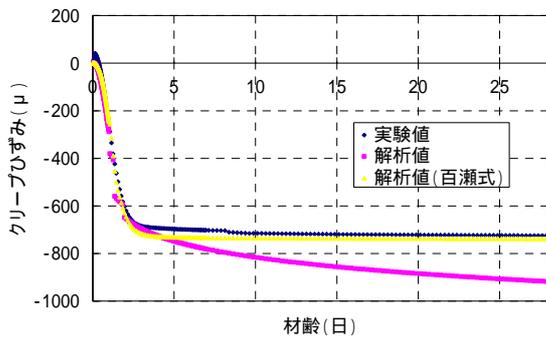


図-5.178 クリープ解析結果(LE50-4.0)

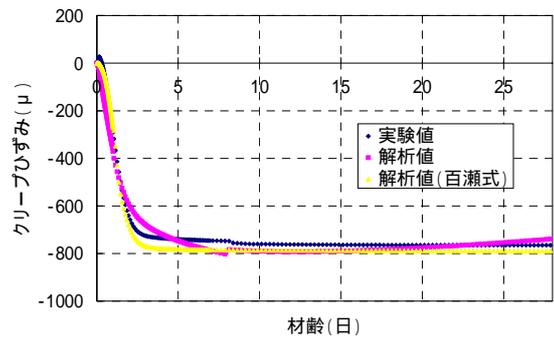


図-5.179 クリープ解析結果(LE50-8.0)

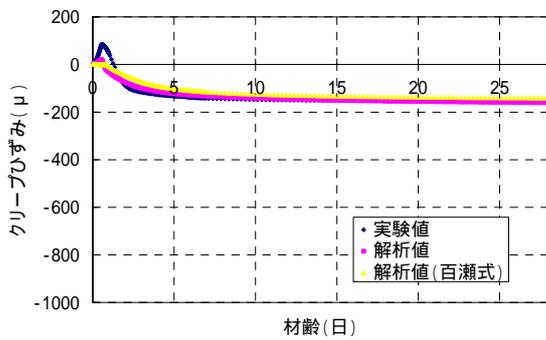


図-5.180 クリープ解析結果(LE55-0.4)

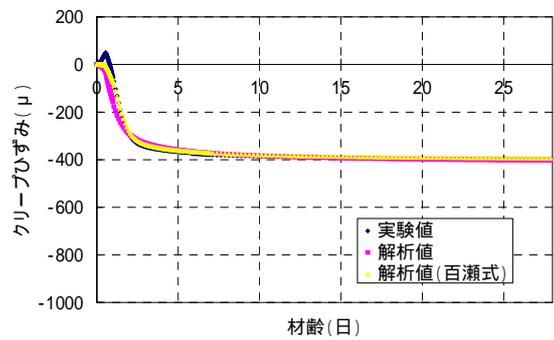


図-5.181 クリープ解析結果(LE55-1.0)

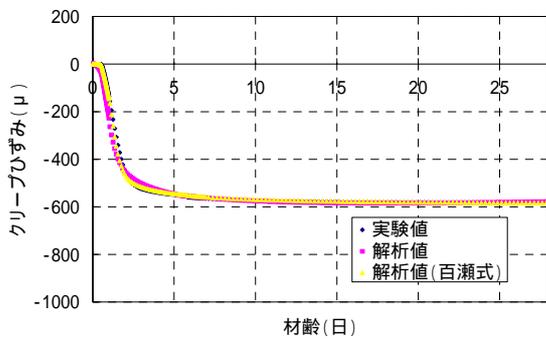


図-5.182 クリープ解析結果(LE55-4.0)

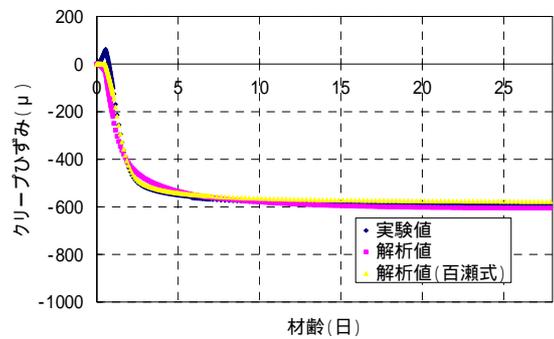


図-5.183 クリープ解析結果(LE55-8.0)

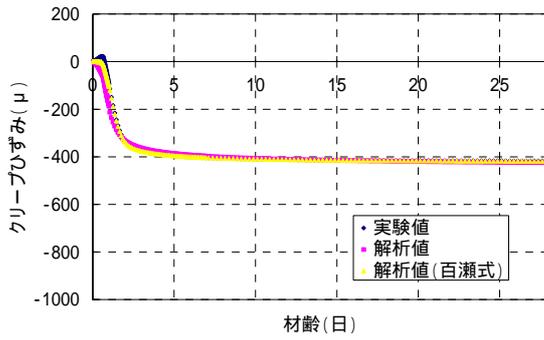


図-5.184 クリープ解析結果(LE55-0.4)

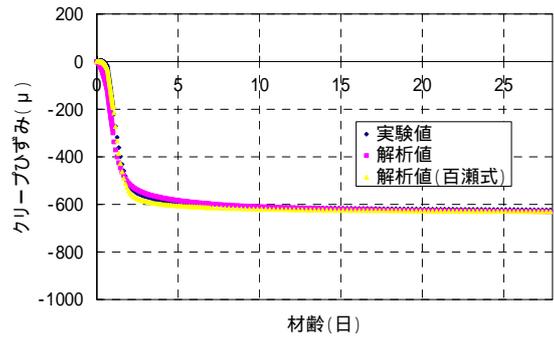


図-5.185 クリープ解析結果(LE55-1.0)

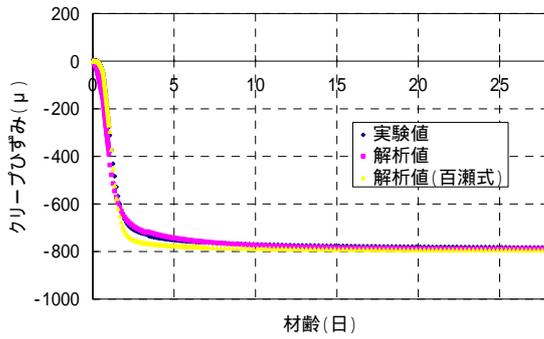


図-5.186 クリープ解析結果(LE55-4.0)

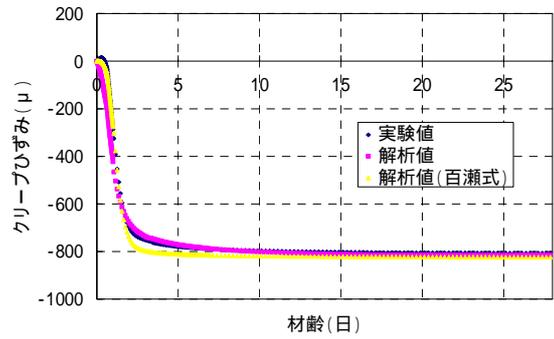


図-5.187 クリープ解析結果(LE55-8.0)

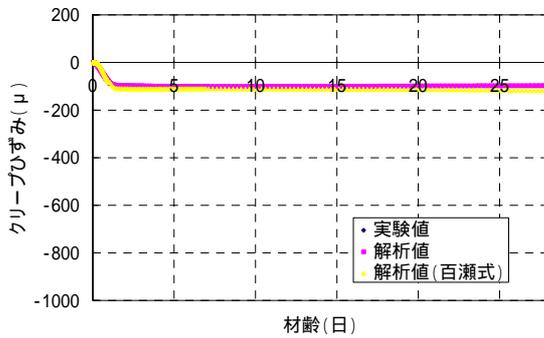


図-5.188 クリープ解析結果(NES50-0.4)

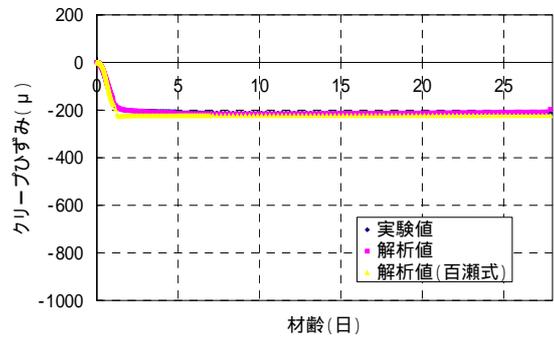


図-5.189 クリープ解析結果(NES50-1.0)

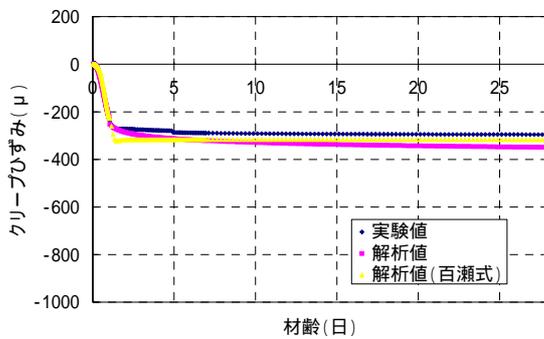


図-5.190 クリープ解析結果(NES50-4.0)

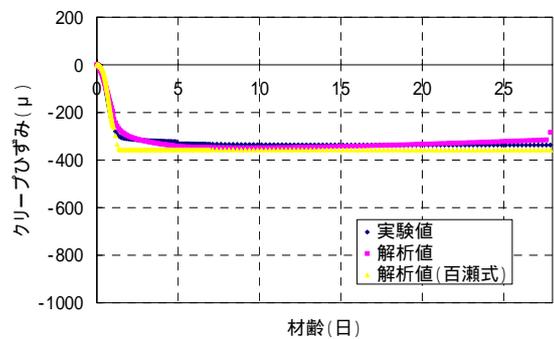


図-5.191 クリープ解析結果(NES50-8.0)

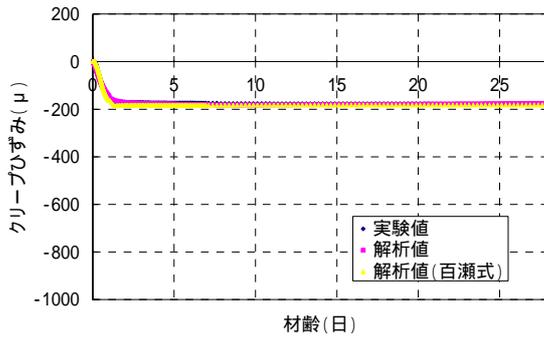


図-5.192 クリープ解析結果(NES55-0.4)

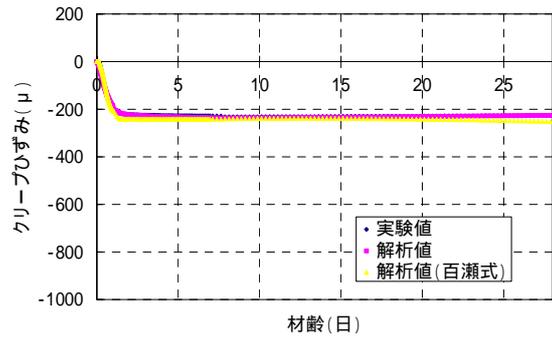


図-5.193 クリープ解析結果(NES55-1.0)

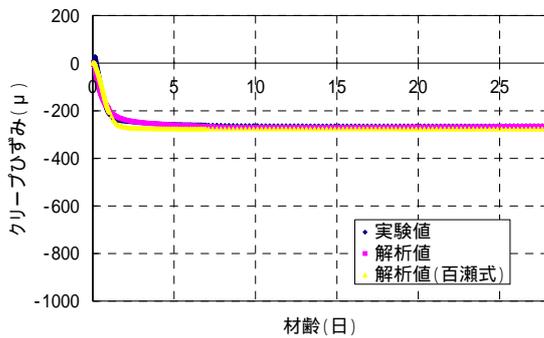


図-5.194 クリープ解析結果(NES55-4.0)

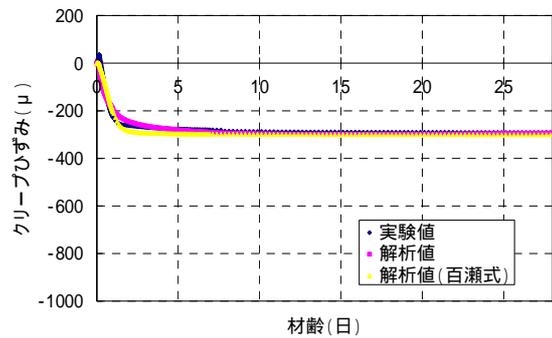


図-5.195 クリープ解析結果(NES55-8.0)

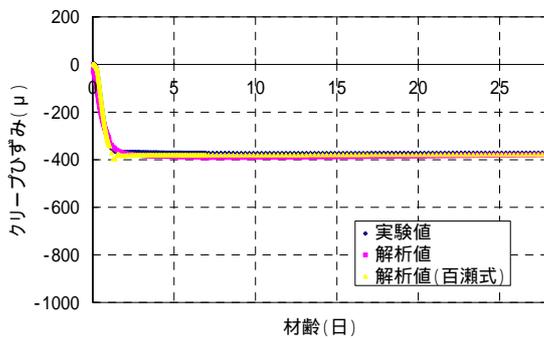


図-5.196 クリープ解析結果(NES55-0.4)

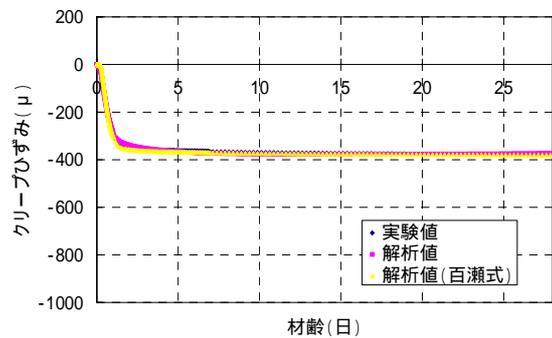


図-5.197 クリープ解析結果(NES55-1.0)

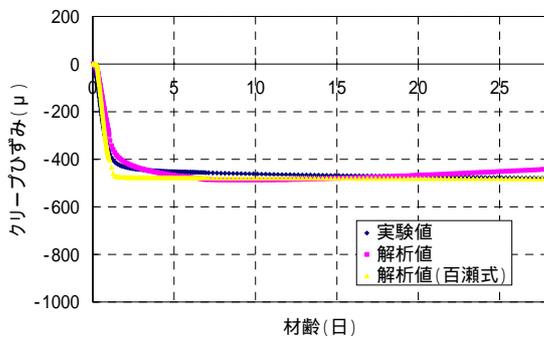


図-5.198 クリープ解析結果(NES55-4.0)

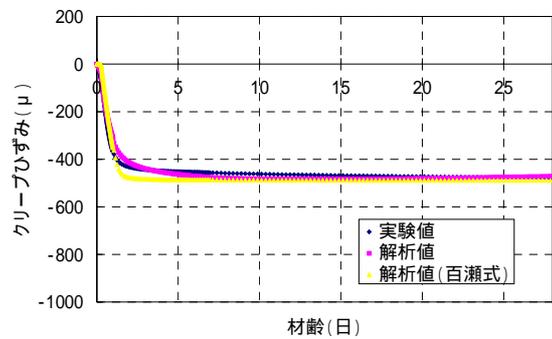


図-5.199 クリープ解析結果(NES55-8.0)

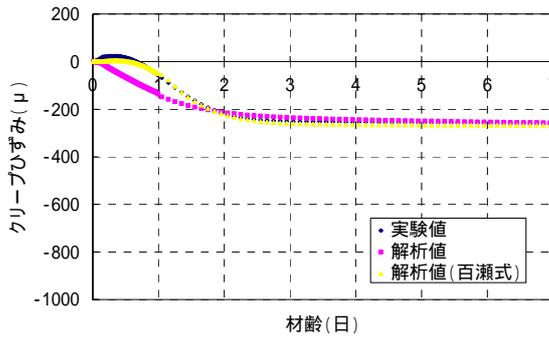


図-5.200 若材齢解析結果(LE50-0.4)

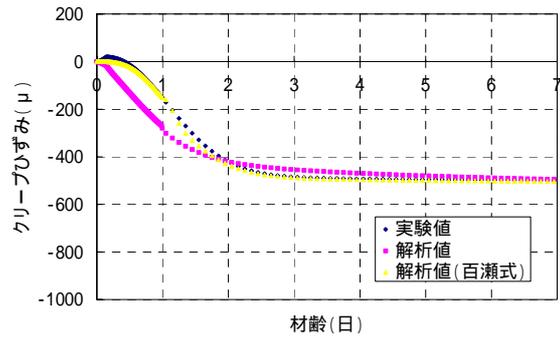


図-5.201 若材齢解析結果(LE50-1.0)

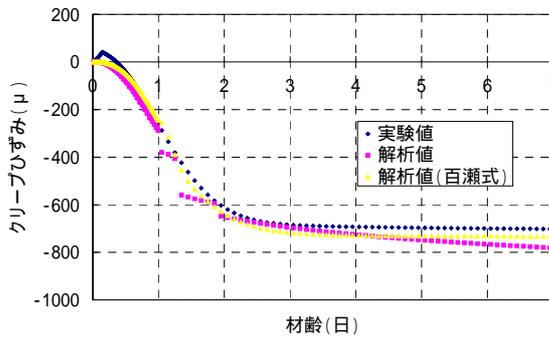


図-5.202 若材齢解析結果(LE50-4.0)

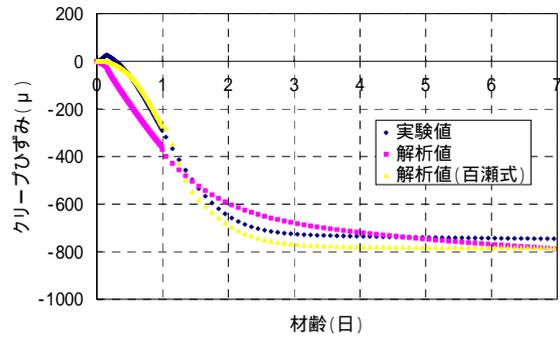


図-5.203 若材齢解析結果(LE50-8.0)

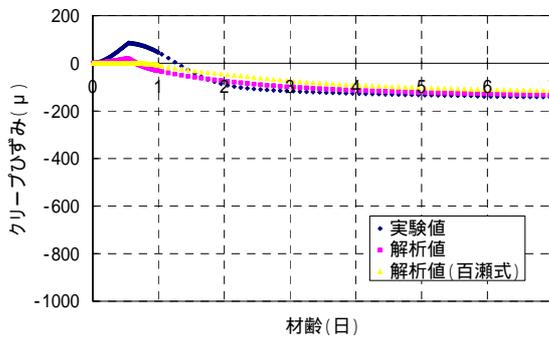


図-5.204 若材齢解析結果(LE55-0.4)

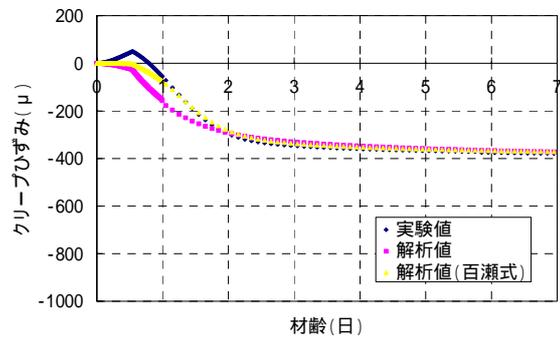


図-5.205 若材齢解析結果(LE55-1.0)

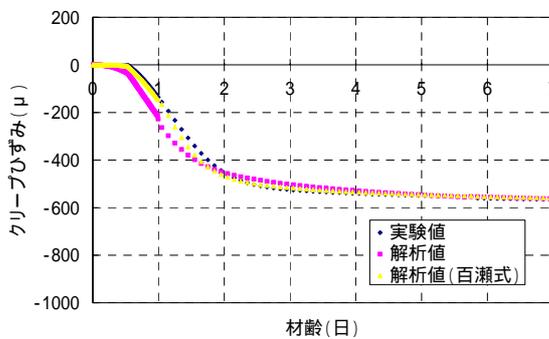


図-5.206 若材齢解析結果(LE55-4.0)

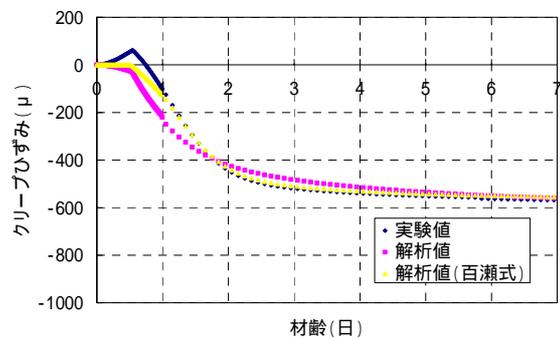


図 5.207 若材齢解析結果(LE55-8.0)

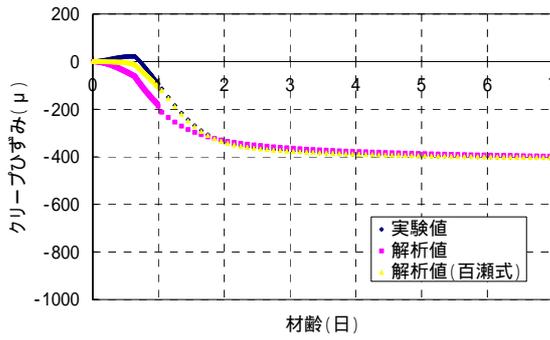


図-5.208 若材齢解析結果(LE55-0.4)

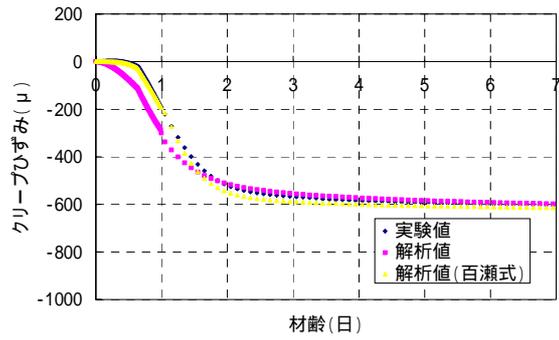


図-5.209 若材齢解析結果(LE55-1.0)

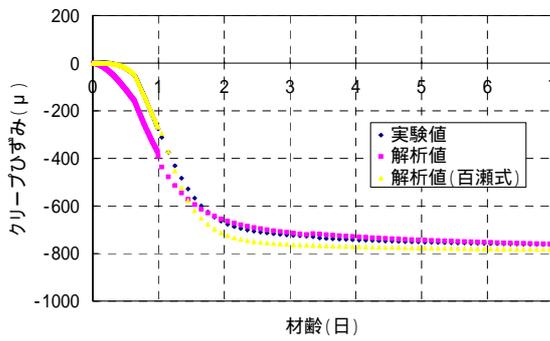


図-5.210 若材齢解析結果(LE55-4.0)

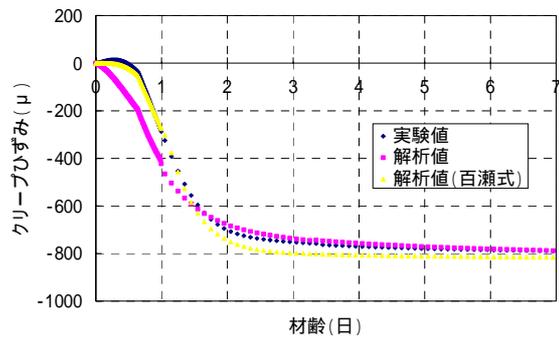


図-5.211 若材齢解析結果(LE55-8.0)

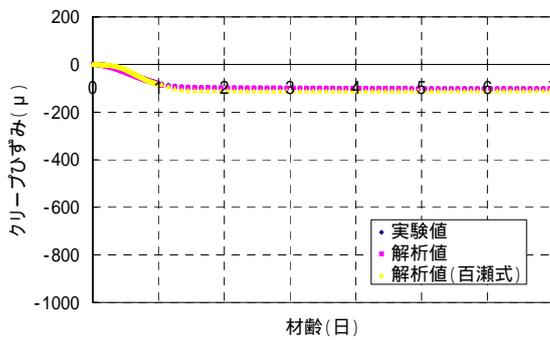


図-5.212 若材齢解析結果(NES50-0.4)

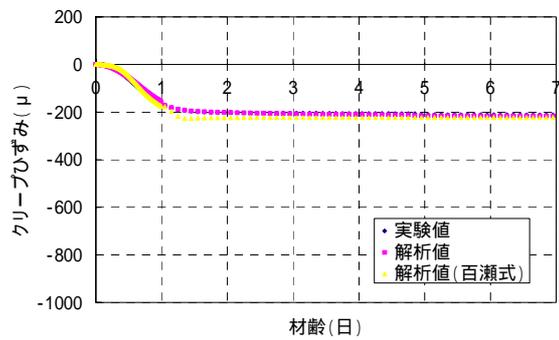


図-5.213 若材齢解析結果(NES50-1.0)

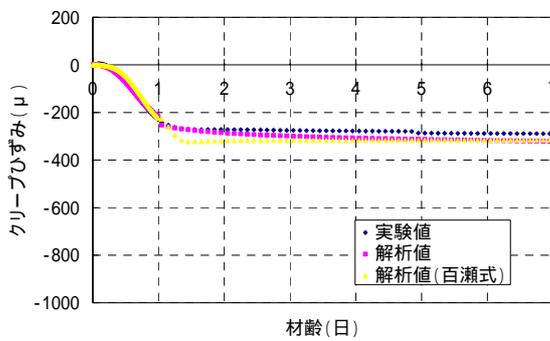


図-5.214 若材齢解析結果(NES50-4.0)

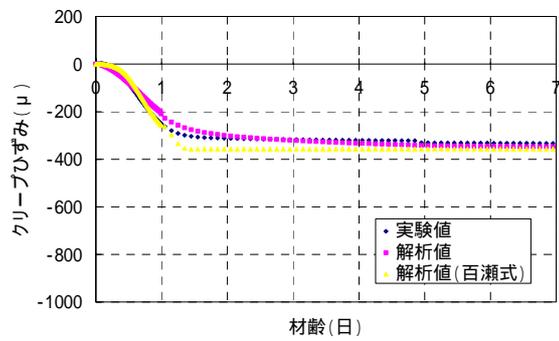


図-5.215 若材齢解析結果(NES50-8.0)

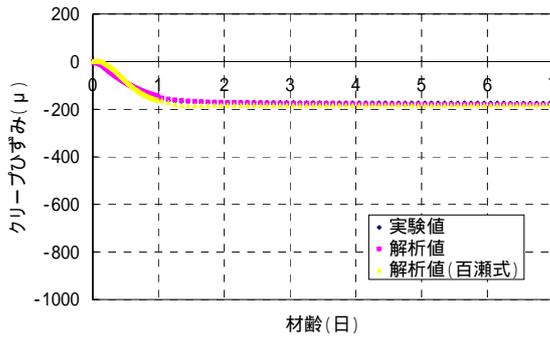


図-5.216 若材齢解析結果(NES55-0.4)

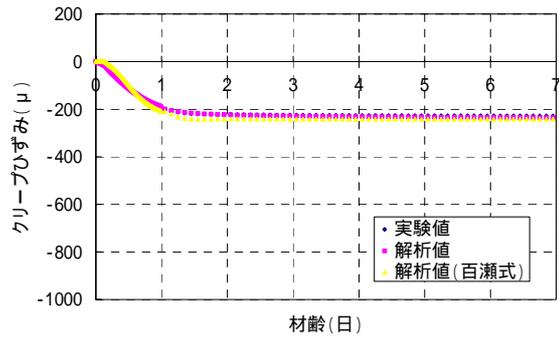


図-5.217 若材齢解析結果(NES55-1.0)

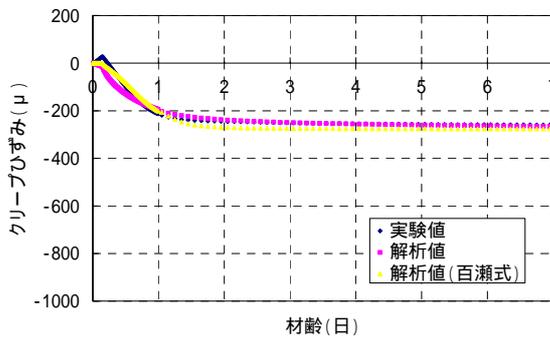


図-5.218 若材齢解析結果(NES55-4.0)

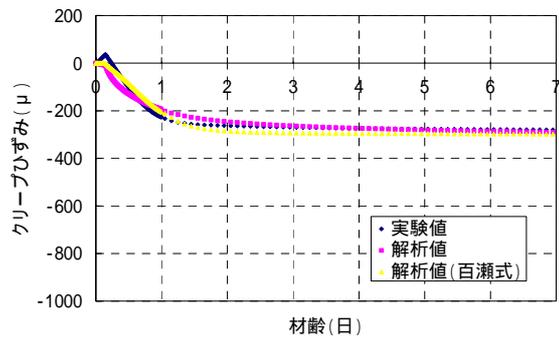


図-5.219 若材齢解析結果(NES55-8.0)

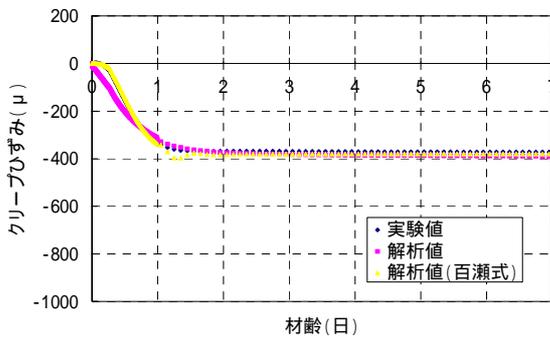


図-5.220 若材齢解析結果(NES55-0.4)

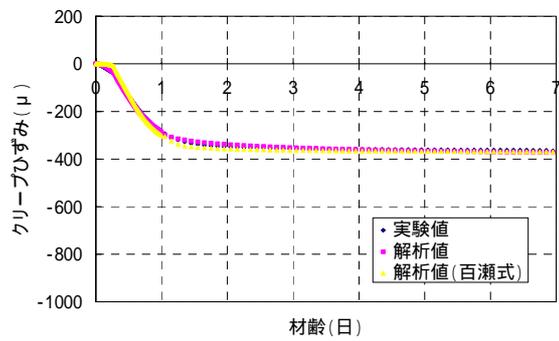


図-5.221 若材齢解析結果(NES55-1.0)

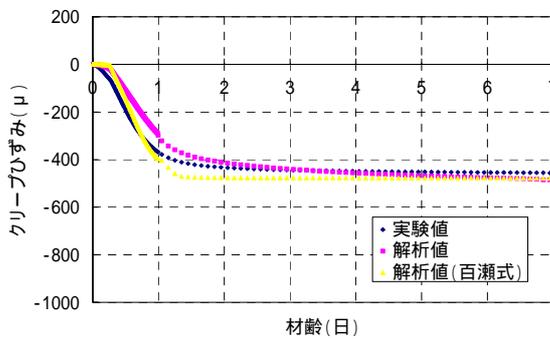


図-5.222 若材齢解析結果(NES55-4.0)

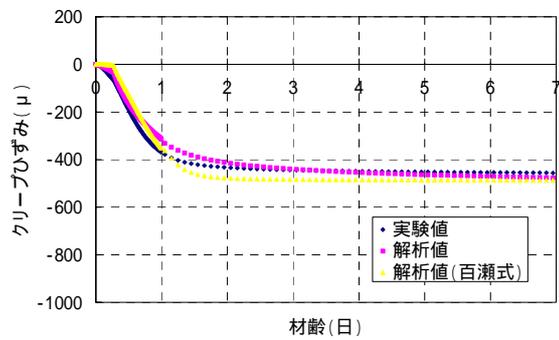


図-5.223 若材齢解析結果(NES55-8.0)

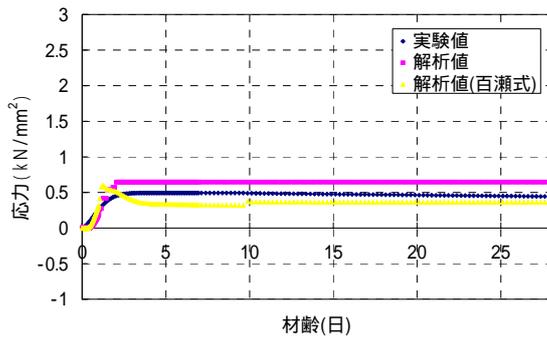


図-5.224 応力解析結果(LE50-0.4)

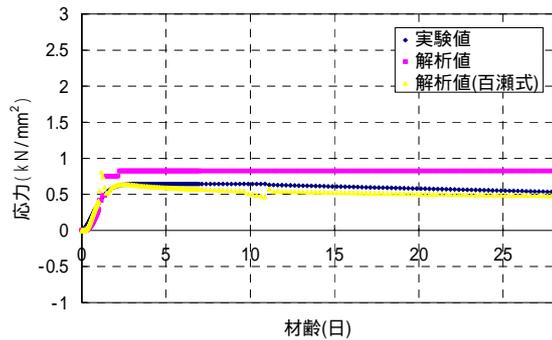


図-5.225 応力解析結果(LE50-1.0)

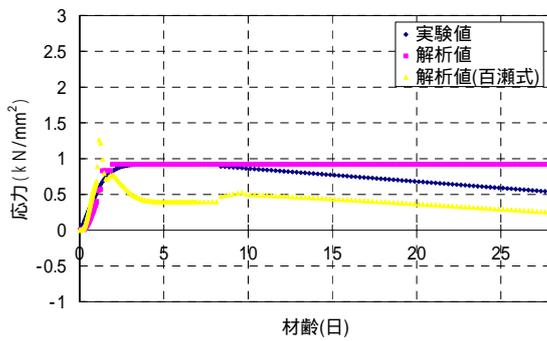


図-5.226 応力解析結果(LE50-4.0)

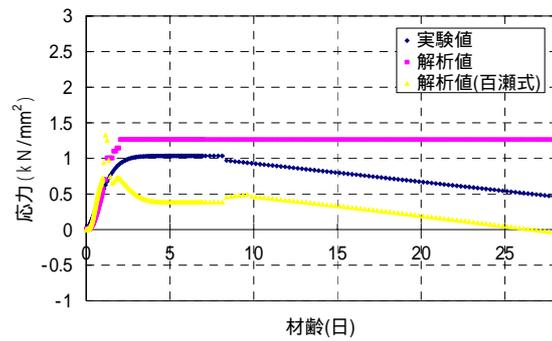


図-5.227 応力解析結果(LE50-8.0)

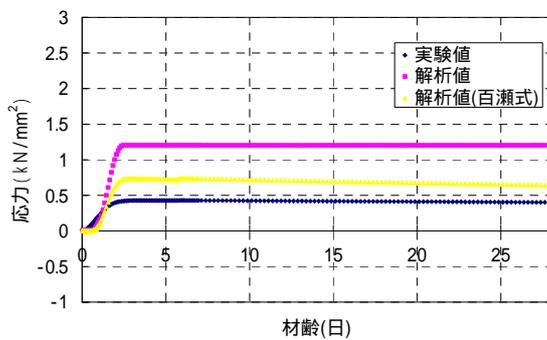


図-5.228 応力解析結果(LE55-0.4)

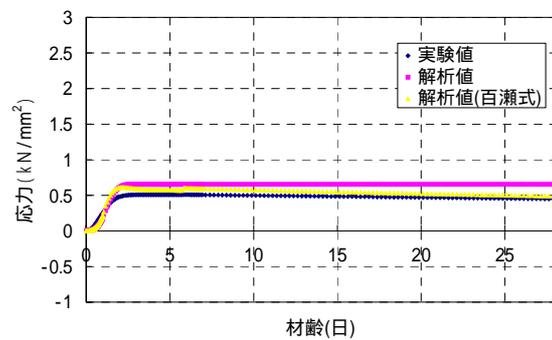


図-5.229 応力解析結果(LE55-1.0)

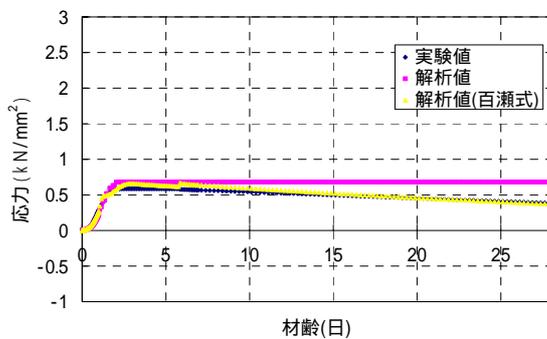


図-5.230 応力解析結果(LE55-4.0)

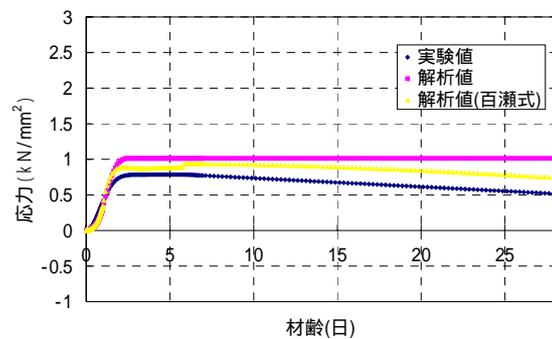


図 5.231 応力解析結果(LE55-8.0)

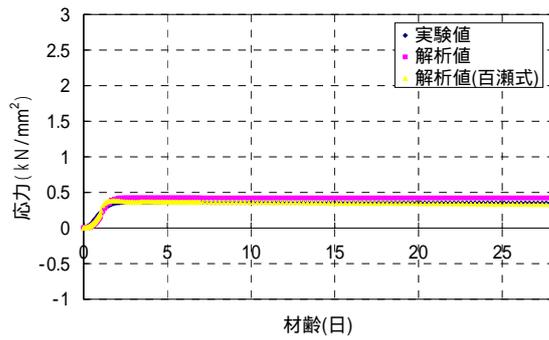


図-5.232 応力解析結果(LE55-0.4)

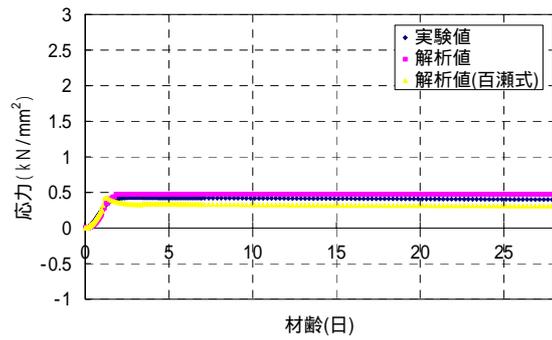


図-5.233 応力解析結果(LE55-1.0)

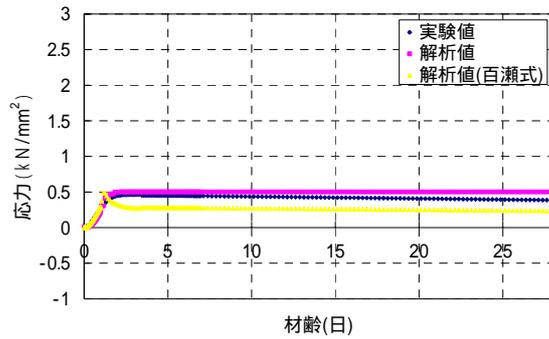


図-5.234 応力解析結果(LE55-4.0)

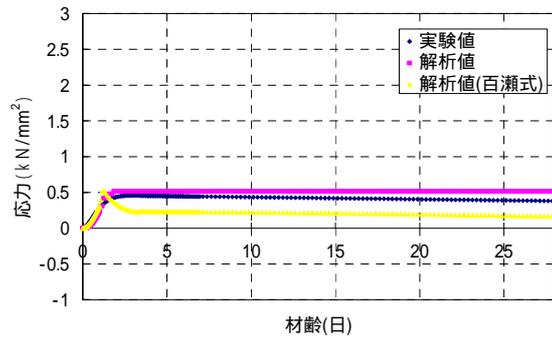


図-5.235 応力解析結果(LE55-8.0)

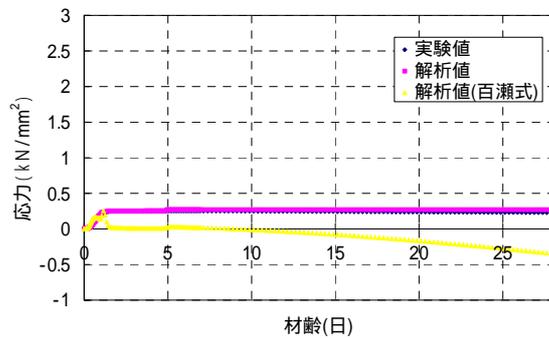


図-5.236 応力解析結果(NES50-0.4)

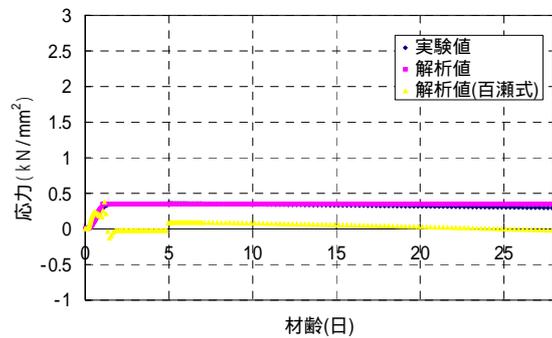


図-5.237 応力解析結果(NES50-1.0)

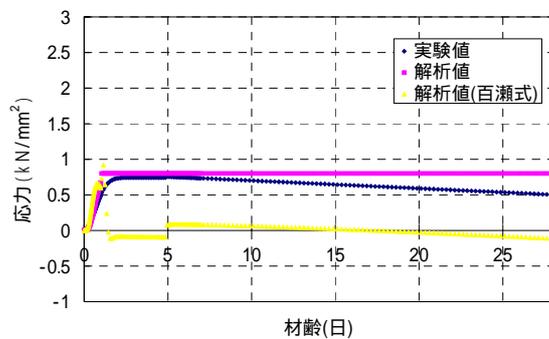


図-5.238 応力解析結果(NES50-4.0)

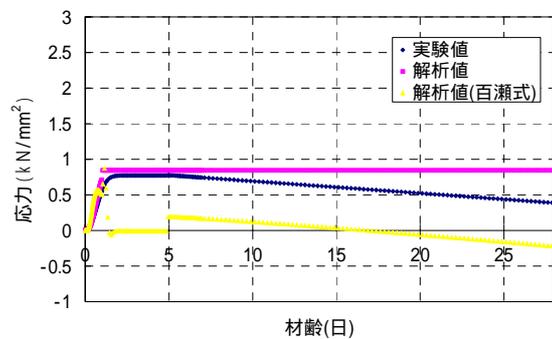


図-5.239 応力解析結果(NES50-8.0)

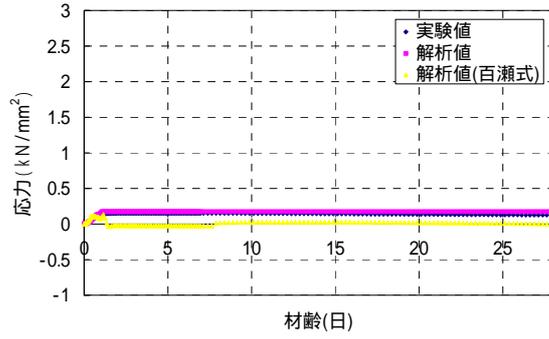


図-5.240 応力解析結果(NES55-0.4)

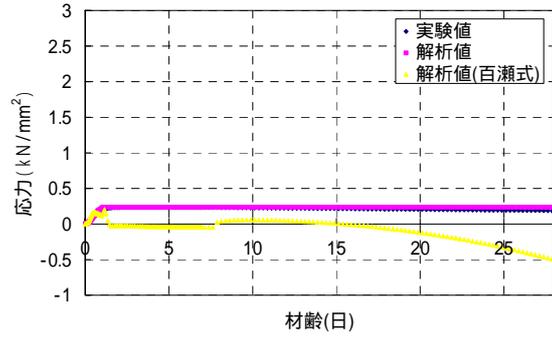


図-5.241 応力解析結果(NES55-1.0)

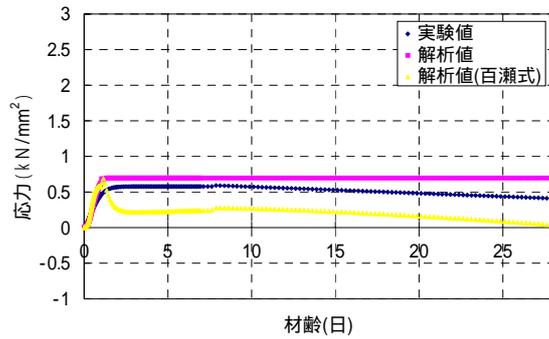


図-5.242 応力解析結果(NES55-4.0)

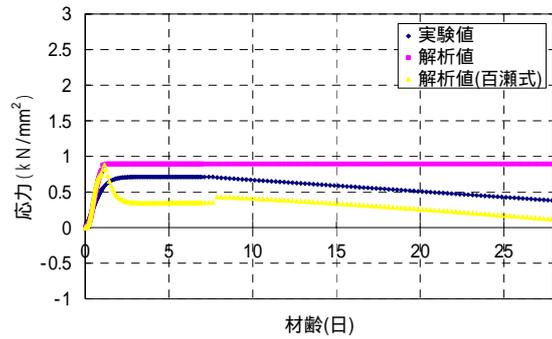


図-5.243 応力解析結果(NES55-8.0)

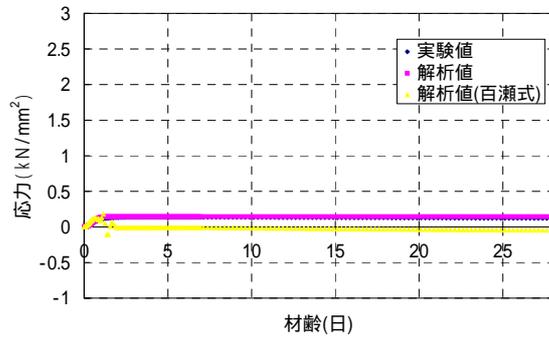


図-5.244 応力解析結果(NES55-0.4)

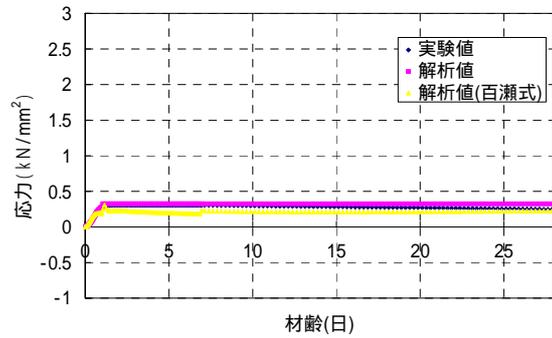


図-5.245 応力解析結果(NES55-1.0)

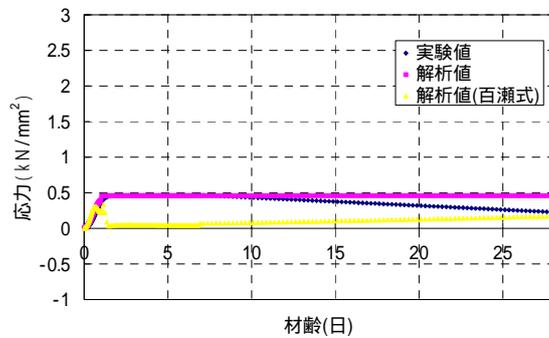


図-5.246 応力解析結果(NES55-4.0)

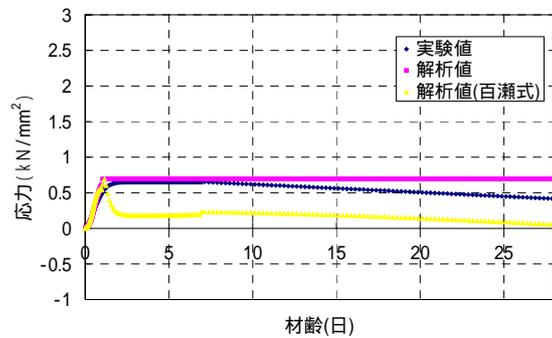


図-5.247 応力解析結果(NES55-8.0)

## 第6章 結論

- 6.1 膨張コンクリートのクリープ特性
- 6.2 膨張コンクリートのクリープ解析
- 6.3 今後の課題

## 6.1 膨張コンクリートのクリープ特性

膨張コンクリートのクリープ特性として以下の事項を確認した。

実ひずみにおいて、鉄筋比、水結合材比が大きくなるのに伴い実ひずみは小さくなる傾向にある。また NES に比べ LE の実ひずみが大きくなる結果となった。

自由ひずみにおいては水結合材比が大きくなるのに伴いひずみが小さくなる傾向が見られず、水結合材比 65%での自由ひずみが大きな値を示した。実ひずみ同様 NES に比べ LE の自由ひずみが大きくなる結果であった。

応力値は、鉄筋比が大きく、水結合材比が小さくなるのに伴い、大きくなる傾向にある。また NES に比べ LE の応力が大きくなった。

クリープひずみは、鉄筋比が大きくなるのに伴い大きくなる。水結合材比 65%でのクリープひずみが他に比べて大きくなる結果であった。また NES に比べ LE のクリープひずみが大きくなった。

実験においては、ある程度予測の範囲で結果を得ることができた。しかしながら水結合材比 65%での膨張ひずみが大きな値になったことが予想に反した結果であった。特に水結合材比 65%の自由ひずみはクリープひずみに大きく影響したことから有効膨張ひずみの観点からも再検討が必要であると思われる。

## 6.2 膨張コンクリートのクリープ解析

膨張コンクリートのクリープ解析として以下の事項を確認した。

実ひずみ、自由ひずみにおいて、増加時、減少時、乾燥時の 3 つに分類することで実験値を精度よく評価できた。

クリープ逆解析において、膨張コンクリート特有のクリープ係数を算出する係数を同定した。また同定した係数には鉄筋比、水結合材比と関係があることを確認した。

クリープ解析において、逆解析で同定した係数を用いることでクリープ挙動をある程度表すことができた。

解析に用いたクリープ係数は、極めて若材齢では百瀬式での値が良好ではあったが、ひずみの最大値を把握する上では、MC90 修正式を用いた結果が良好である。

解析においてはクリープ係数の同定は精度よく行えたが、弾性係数の評価が不十分なため解析値と実験値との差が生じてしまった。若材齢時での弾性係数の測定において、検討が必要である。提案している MC90 修正式には応力の減少に対応できていないという点においてもまだまだ改良が必要ではあるが、本研究の範囲内では、ある程度、式の有効性を実証できた。

### 6.3 今後の課題

本研究において水結合材比 50～65%でのクリープ挙動をある程度評価できた。しかし水結合材比 65%のような水結合材比での膨張ひずみ、特に有効膨張ひずみについて再検討を行う。

実験では材齢 28 日以降供試体を乾燥状態としたが、全ての供試体を乾燥状態としたため、乾燥収縮の影響を独立させることができなかった。膨張ひずみの乾燥による影響は把握できたが、クリープひずみを求める際の乾燥収縮ひずみの把握が必要である。今回は、解析の対象を封緘状態での材齢 28 日までしか評価できなかったが、乾燥による影響を把握することも膨張コンクリートの性質上重要な課題である。

本研究で提案している MC90 修正式の有効性を実証するには、さらに多くの実験を行う必要がある。種々の配合、養生条件、拘束条件での実験を行い、係数の関連性を明らかにしていけば、膨張コンクリートの事前解析としてのクリープひずみを把握できる可能性はある。

## 参考文献：

- [1] 日本コンクリート工学協会：委員会報告集，膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム委員会報告集・論文集，2003.9
- [2] 盛岡実他：膨張材を混和したセメントペーストの化学収縮と自己体積変化，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.21，No.2，pp.157-162，1999
- [3] 保利影宏他：養生温度および養生方法が膨張ひずみに与える影響に関する実験的検討，膨張コンクリートによる構造物の高性能化/高耐久化に関するシンポジウム論文集，pp.109-114，2003.9
- [4] 小田部裕一他：膨張コンクリートの蒸気養生製品への適用性，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.20，No.2，pp.145-150，1998
- [5] 郡司大輔他：高炉スラグを混入したセメントペースト中における膨張材混和に水和発熱特性，木学会年次学術講演会講演概要集，pp.66-67，1995
- [6] 六車熙：自由膨張と有効自由膨張，コンクリート工学ハンドブック，pp.666-667，1981.11
- [7] 日本セメント協会：膨張コンクリートの耐久性，セメント工業，No.197，pp.13-20，1986
- [8] 笹川幸男：35年間暴露した膨張コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.24，No.1，pp.1287-1292，2002
- [9] 五味秀明：膨張材，ファインケミカル，Vol.24，No.8，pp.13-20，1986
- [10] 坂井悦郎：セメント系水和物と硫酸との反応および膨張コンクリートの耐酸性，石膏と石灰，No.249，pp.23-29，1994
- [11] 国府勝郎：膨張コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.334，1983.6
- [12] 増田隆：鋼橋における膨張コンクリート床版の特性，JH 試験研究所報告，Vol.27，pp.45-59，1990
- [13] 谷村充他：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
- [14] 小田部裕一他：初期欠陥のない高性能コンクリートの開発，セメント・コンクリート，No.658，pp.36-44，2001
- [15] CEB:CEB-FIP Model Code 1990，Comite Euro-International Du Beton，27-38，1990
- [16] 古谷学他：膨張コンクリートの若材齢時でのクリープに関する実験的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.865-866，2003
- [17] 宮澤慎吾他：超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ特性，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.578-579，1996
- [18] 入矢桂史郎：若材齢コンクリートのクリープに関する研究，名古屋工業大学大学院博
- [19] 小澤満津雄他：若材齢高強度コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究，コン

クリート工学年次講演会講演論文集, Vol.22, No.2, pp.631-636, 2000

- [20] 戸川一夫・仲本順次：膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす使用材料の影響，1982
- [21] 辻幸和：一軸拘束状態における膨張コンクリートがなす仕事量一定則の適用について，土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.504-505，1996
- [22] 丸山久一，木田務：膨張混和材を用いたコンクリートの拘束膨張特性に関する研究，セメント技術年報，pp425～429，1975
- [23] 佐藤良一他：高強度コンクリートの自己収縮応力の予測，コンクリート工学年次論文報告集,pp757～762，1997
- [24] 辻幸和他：膨張コンクリートの弾塑性を考慮した仕事量の概念について，コンクリート工学年次論文集，pp373～378，1999.11.1
- [25] 三谷裕二他：マス養生温度下における膨張コンクリートの膨張応力評価方法について，コンクリート工学年次論文集，pp225～230，2004
- [26] 橋田浩他：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析，コンクリート工学論文集,pp.51-63,1999.1

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、終始丁寧なるご指導を頂きました法政大学溝淵利明教授、満木泰郎教授に厚く御礼を申し上げます。

鹿島建設(株)技術研究所の関田徹志氏、百瀬晴基氏には研究に関する貴重な助言を頂き大変助かりました。ここに厚く御礼を申し上げます。

法政大学小田島雄輔氏、関口雅也氏、名工建設株式会社の神谷武智氏、東日本旅客鉄道株式会社の畑恵子氏、海野直人氏、法政大学卒業生北村俊介氏、2003年度及び2004年度の法政大学土木材料実験室の皆様には実験を手伝っていただき大変感謝いたしております。

また実験を行うに際し藤木興業(有)社長、鈴木氏、山添氏、藤木興業(有)の皆様にも多大なるご協力及び助言を頂きまして大変感謝致しております。

本論文をまとめるにあたり、多くの方々からのご指導、ご鞭撻、ご協力を頂きまして深く感謝申し上げます。

2005年2月21日

法政大学大学院  
工学研究科建設工学専攻  
03R5115 古谷 学