

道路橋モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労照査法に関する研究

山崎, 信宏 / YAMAZAKI, Nobuhiro

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

110

(発行年 / Year)

2018-03-24

(学位授与番号 / Degree Number)

32675甲第434号

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2018-03-24

(学位名 / Degree Name)

博士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014633>

法政大学審査学位論文

道路橋モジュラー型伸縮装置溶接部の
疲労照査法に関する研究

山崎 信宏

道路橋モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労照査法に関する研究

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 各国の耐久性評価基準	11
1.3 既往の研究	16
1.3.1 溶接部に作用する荷重に関する検討	16
1.3.2 疲労強度に関する検討	17
1.4 研究の目的と論文構成	19

第2章 伸縮装置の断面設計と疲労照査

2.1 はじめに	25
2.2 断面設計	27
2.3 現在の耐久性評価法の整理	29
2.4 疲労照査の考え方	32
2.4.1 疲労基本荷重とその頻度	33
2.4.2 疲労基本荷重の補正係数	37
2.4.3 応力計算法	48
2.5 まとめ	56

第3章 完全溶け込み溶接の疲労強度

3.1 はじめに	62
3.2 試験体	63
3.2.1 試験体の種類	63
3.2.2 試験体の製作方法	64
3.2.3 各試験体の溶接形状	66

3.3	疲労試験.....	67
3.3.1	静的载荷試験.....	67
3.3.2	疲労試験.....	70
3.4	試験体の応力解析.....	74
3.4.1	解析モデル.....	74
3.4.2	解析方法.....	75
3.4.3	解析結果.....	75
3.5	まとめ.....	77
第4章 部分溶け込み溶接によるルート疲労破壊の防止と疲労強度.....		
4.1	はじめに.....	79
4.2	試験体.....	80
4.2.1	試験体の種類.....	80
4.2.2	試験体の製作方法.....	81
4.2.3	各試験体の溶接形状.....	82
4.3	疲労試験.....	83
4.3.1	試験方法と試験条件.....	83
4.3.2	試験結果.....	85
4.4	有効切欠き応力概念を用いた試験体の疲労き裂発生起点の検討.....	88
4.4.1	解析モデル.....	89
4.4.2	解析方法.....	89
4.4.3	解析結果.....	90
4.5	ルート疲労破壊を防止する溶接詳細と疲労強度.....	91
4.5.1	解析モデルと解析方法.....	91
4.5.2	解析結果.....	92
4.5.3	ルート疲労破壊を防止する溶接詳細と疲労強度の検討.....	93
4.6	まとめ.....	95

第 5 章 疲労照査例	
5.1 はじめに.....	97
5.2 照査対象.....	97
5.3 応力計算法.....	99
5.3.1 照査位置.....	99
5.3.2 疲労荷重と載荷方法.....	99
5.4 応力計算結果.....	100
5.5 疲労照査（疲労耐用年数の試算）.....	102
5.6 今後の検討.....	103
5.7 まとめ.....	104
第 6 章 結論.....	106

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

道路橋は、車両や歩行者が通行する上部構造とそれを支持する下部構造で構成される。上部構造は、車両の輪荷重を直接支持する床版と床版からの荷重を受ける主桁や横桁、床組や対傾構、そして横構などからなる。下部構造は、上部構造を支える躯体とそれを支持する基礎からなり、上部構造の両端に位置する下部構造を橋台、中間に位置するものは橋脚と呼ぶ。伸縮装置や支承、舗装、高欄、そして落橋防止装置は、上部構造に含まれることが多い。

道路橋に用いられる伸縮装置は、図 1-1 に示すように、主桁と主桁あるいは主桁と橋台に生じる遊間を車両が円滑に走行できるように、主桁端部に設けられる。また、伸縮装置は、主桁の温度変化による伸縮、コンクリート桁の乾燥収縮やクリープ、車両等の活荷重による桁端の角変形や地震による桁の移動に対処する役割を有する[1,2]。さらに、車両等が支障なく通行できるように、路面平坦性の確保も要求される。



(a) 主桁と主桁の例



(b) 主桁と橋台の例

図 1-1 伸縮装置の設置場所

伸縮装置は、主に鋼材やゴム材で構成される。そして、その構造により、図 1-2 に示す荷重支持型と突合せ型、埋設型に大別される。床版遊間部で輪荷重を直接支持できる構造としたものが荷重支持型であり、支持しないものが突合せ型である。そして埋設型は、床版遊間部をシール材等で止水処理し、その上に設置する舗装材料を主材料とした高粘弾性材で伸縮を吸収・分散する構造である。埋設型は、舗装が連続するため、走行車両に対して理想的な伸縮装置であるが、伸縮量が大きい場合には適用が

難しい。これらのうち、どの種類の伸縮装置を用いるかは、道路の線形や勾配、橋の種類や規模、伸縮量や水密性、耐久性、補修性等を総合的に判断して選定される[3].



(a) 荷重支持型の例 (b) 突合せ型の例 (c) 埋設型の例

図 1-2 構造による伸縮装置の分類

荷重支持型の伸縮装置は、一般に静的な荷重に対して設計される。しかし、床版遊間部を通過する車両の輪荷重を繰返し直接支持することから、疲労耐久性に問題が生じることがある。図 1-3 は、1969 年に設置された古いタイプのフィンガー型伸縮装置で、鋼材（フェイスプレート）の一部が 2000 年に破断した事例[4]である。フェイスプレートには、輪荷重の作用により板曲げが生じる。これにより、ウェブプレートとの溶接部に疲労き裂が生じ、破断にいたったものと考えられている[5,6]。図 1-4 は、1984 年に設置されたモジュラー型伸縮装置（マウラージョイント）の鋼材（ミドルビーム）の一部が 2002 年に破断した事例[7,8]である。ミドルビームとそれを支持するサポートビームの接合に用いられていたすみ肉溶接が、ルートを起点として全周にわたり疲労破壊したためと考えられている。

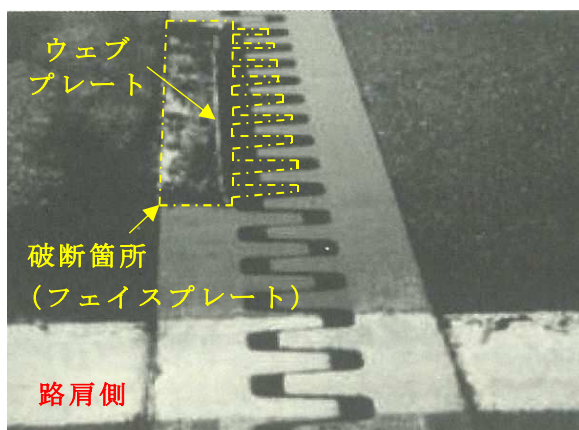


図 1-3 鋼材の破断事例[4]

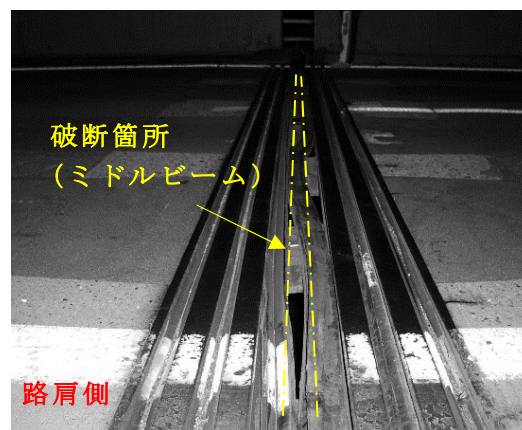


図 1-4 鋼材の破断事例[7]

これらの事例のように、路面に段差が生じた場合、走行車両の安全性に支障をきたす恐れがあるほか、路面上に破断した部材などが残されていた場合、その部品を走行車両が巻上げることになれば人的被害をもたらしかねない。また、伸縮装置の補修や補強を行う場合には、路面上からの作業が必要となることが多い。その場合には車線規制や通行止めを伴うこととなり、社会的な影響も大きなものとなる。これらのことから、伸縮装置には疲労耐久性が求められるとともに、その照査手法が必要と考えられる。

鋼道路橋の設計では、鋼床版ならびに軌道または鉄道を併用する場合などを除いて、一般に疲労の影響を考慮しなくてよいとされてきた。これは、主桁の設計応力に占める死荷重応力の割合が大きく、相対的に活荷重による応力変動が小さいとの考えに基づくものであった[9,10]。しかし、1970年代に入ると、阪神高速道路や首都高速道路、東名高速道路、そして幹線の国道などで疲労損傷が報告されるようになり、個別に疲労対策が行われてきた[11,12]。その後、高張力鋼の使用、荷重の重量化や交通量の増加、そして溶接構造の採用といった理由から、2002年に日本道路協会より発行された「道路橋示方書・同解説」[13]（以後、道示と記す）および「鋼道路橋の疲労設計指針」[14]では、疲労の影響を考慮することが規定された。しかし、伸縮装置については、作用する荷重の大きさを適切に設定し、その荷重の繰返しに対して十分な疲労耐久性を有するように設計しなければならないとされており、具体的な疲労設計法が示されていない。2012年には、東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）の3社（以後、NEXCO3社と記す）により伸縮装置の疲労を考慮した試験方法が示されたものの[15,16]、必ずしも十分な耐久性評価が行われているとは言えない。

荷重支持型に分類される伸縮装置のうち、図 1-5 に示すミドルビームとサポートビームの接合に溶接を用いるモジュラー型伸縮装置（マウラージョイント）は、1970年にドイツより技術導入された。これまでの設置数は 2,500 基程度である。なお、ミドルビームをセンタービームと称する場合もあるが、ここではミドルビームと記す。この伸縮装置は、主として橋軸直角方向に配置されるミドルビームとそのミドルビームを支持するサポートビーム、サポートビームを上下で支持するベアリング、そして橋軸方向の両端に配置されるエンドビームなどで構成されている。ミドルビームの本数を増やすことにより、大きな伸縮量に対応することができる。サポートビームは、ボックスと呼ばれる鋼製の箱の中に格納されている。一つのボックスの中に格納されているサポートビームの本数はミドルビームと同じである。ただし、一本のサポートビームは、一つのミドルビームのみに溶接接合されている。ミドルビームを支えるサポ

ートビームの間隔は 1,000～1,400mm 程度とされている。ミドルビームとミドルビーム間（遊間）にはシールゴムが嵌め込まれている。それにより，伸縮装置内への雨水等の浸入を防いでいる。シールゴムの伸縮可能範囲は，一箇所あたり 0～80mm である（0mm の場合，ミドルビームとミドルビームが接触する。シールゴムはミドルビームとミドルビーム間に収納される）。複数の遊間（ミドルビームとミドルビーム間）で間隔が等しくなるように，コントロールゴムが設置されている。サポートビームの上側および下側にはベアリングが設置されている。これにより，サポートビームの跳ね上がりや下側にはベアリングが設置されている。これにより，サポートビームの跳ね上がりや下側にはベアリングが設置されている。また，サポートビームがその間を滑ることで桁端の角変形や桁の移動に対応する。その摺動面のサポートビームにはステンレス板が，上下ベアリングには PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）あるいはエンジニアリングプラスチック材が設置されている。現在，ミドルビームとエンドビーム，コントロールゴムはドイツより輸入されているが，サポートビームやベアリング，シールゴムは日本で製作されており，ドイツとは多少異なる構造詳細となっている。

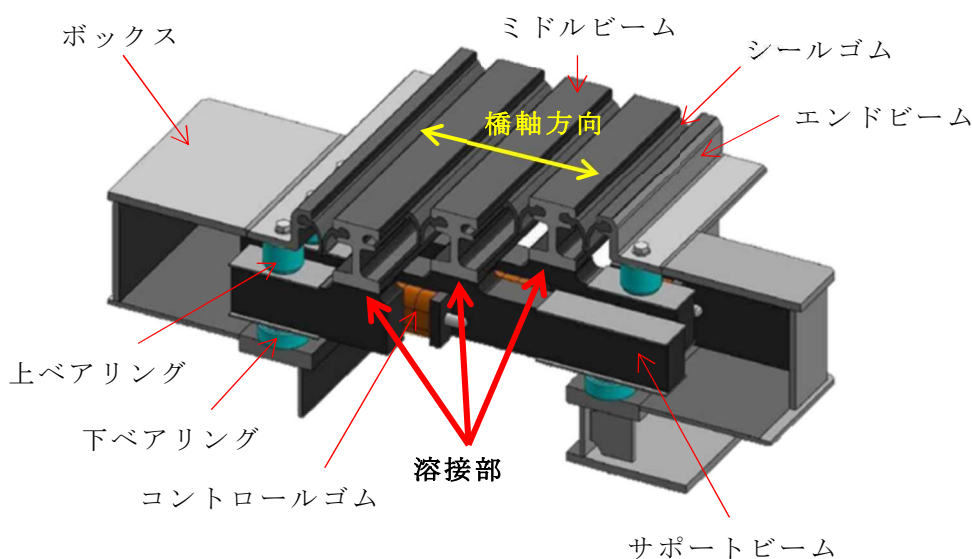
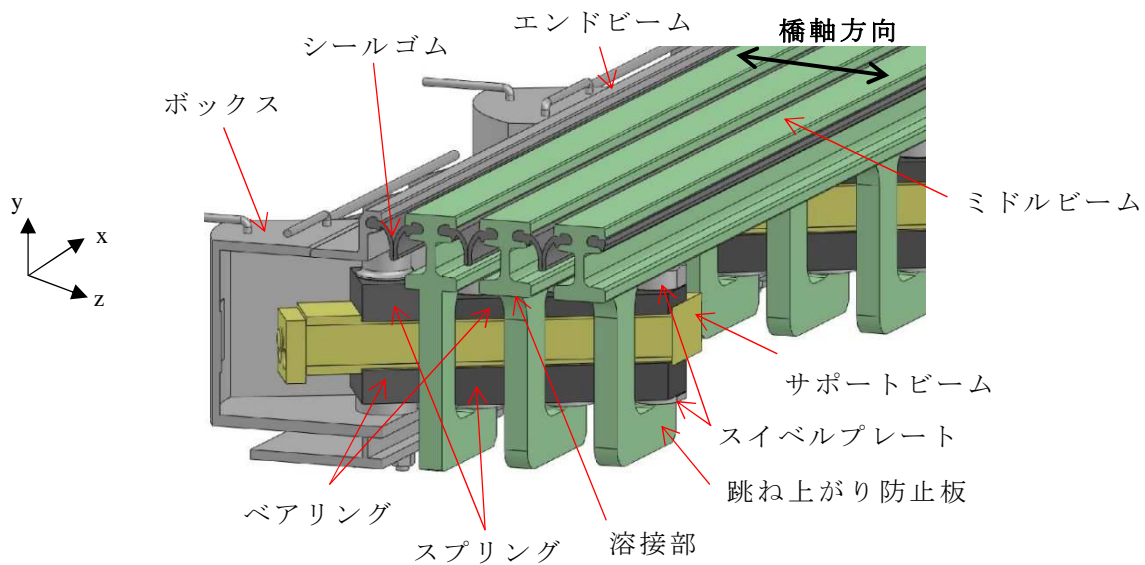
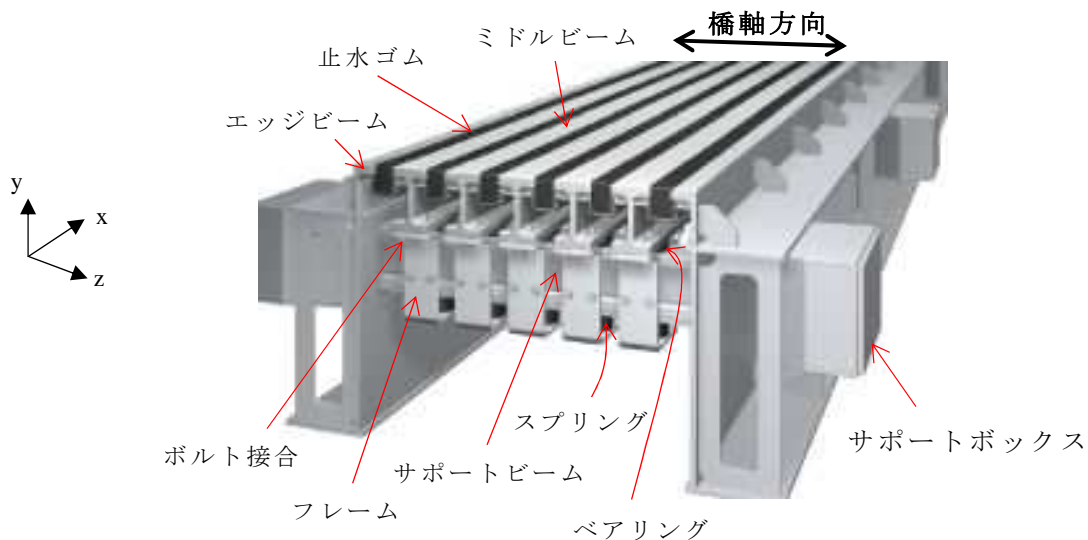


図 1-5 ミドルビームとサポートビームの接合に溶接を用いるモジュラー型伸縮装置
(マウラージョイントの例)

モジュラー型伸縮装置は，図 1-5 に示したマウラージョイント以外に，図 1-6 に示すマウラースイベル・ジョイントやマゲバジョイントなどがある。これらの伸縮装置は，一方向の伸縮に対応するマウラージョイントと異なり，橋軸あるいは橋軸直角方向の伸縮に対応することが可能とされている。マウラースイベル・ジョイントの場合，ミドルビームを支持するサポートビームの数は，ボックス内で 1 つである。そのサポ



(a) マウラースイベル・ジョイントの例



(b) マゲバジョイントの例[17]

図 1-6 マウラースイベル・ジョイントとマゲバジョイントの例

ートビームは、図 1-7 に示すように、ミドルビームに対して斜め方向に配置されている。これは、複数の遊間で間隔が等しくなるようにするためとされている。そのため、コントロールゴムは設置されていない。サポートビームの上下に設置されるベアリングとスプリングは、スイベルプレートと呼ばれる鋼製部材に設けられる円形の突起(φ50mm, 高さ 8.5mm)に挿し込まれている。これにより、y 軸周りの回転を可能としている。そのような機構を有するベアリングとスプリング間をサポートビームが滑ることで、桁の全方向移動に対応するとしている。その摺動面のサポートビームにはステンレス板が、上下ベアリングには PTFE (ポリテトラフルオロエチレン) が設置されて

いる。ミドルビームの跳ね上がりの防止とスプリングを支持する跳ね上がり防止板は、ミドルビームに溶接で接合されている。

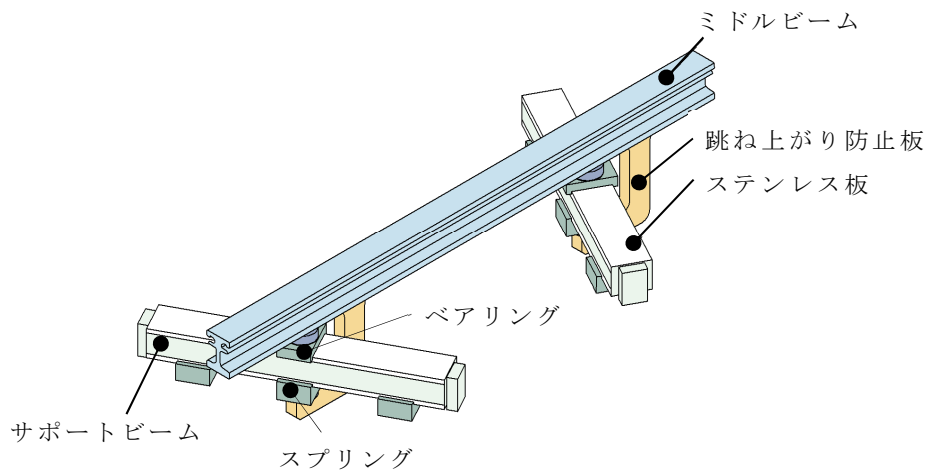


図 1-7 マウラースイベル・ジョイントのサポートビームの配置例

マゲバジョイントの伸縮機構は、マウラースイベル・ジョイントの考え方と同様であるが、ミドルビームやサポートビームなどの断面形状や構成部材は異なっている。特に、ミドルビームの跳ね上がり防止とスプリングを支持するフレームは、ミドルビームにボルトで接合されている。また、サポートビームは、基本的にミドルビームの直行方向に配置されている。そのため、図 1-8 に示すように、遊間（ミドルビームとミドルビーム間）量を調整するコントロールゴムが別途設置されている。



図 1-8 マゲバジョイントのコントロールゴムの設置例[18]

このように、モジュラー型伸縮装置にはいくつかのタイプがある。本研究では、マウラージョイントを対象とする（以降に記すモジュラー型伸縮装置とは、マウラージョイントを指す）。

モジュラー型伸縮装置の劣化の形態としては、溶接部の疲労き裂の他に、図 1-9 に示すようなシールゴムの割れ、図 1-10 に示すコントロールゴムの欠損や脱落、そして上下ベアリングの劣化、下ベアリングの場合には脱落などがある。



図 1-9 シールゴムの損傷例

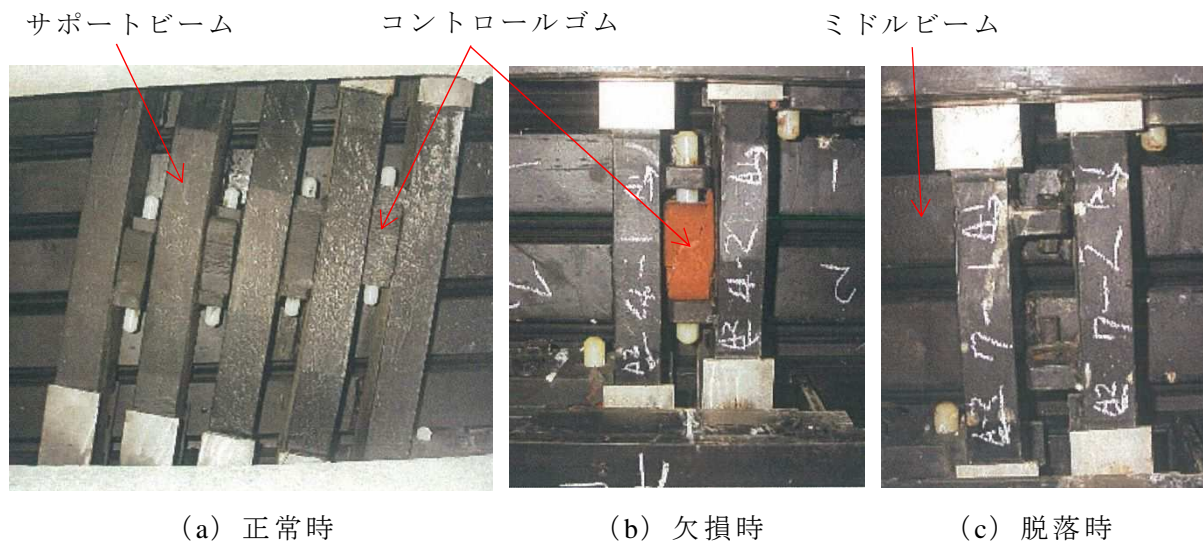






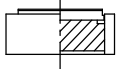
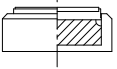


図 1-10 2005 年以前のコントロールゴムの劣化形態

これらの部材は基本的に交換が可能とされているが、シールゴムに損傷が生じた場合、雨水等の浸入によって他部材に劣化を生じさせる恐れがある。また、下ベアリングが脱落した場合、ミドルビームとサポートビーム溶接部には、設計で想定していない応力が作用する恐れもある。このようなことから、モジュラー型伸縮装置を構成する各部材の耐久性は重要であり、1970 年の技術導入以来、いくつかの改良が加えられている。表 1-1 に主要部材の代表的な改良変遷を示す。シールゴムは、止水性向上のため 1985 年にボックスタイプからバンドタイプへ変更された。この形状に対応する

ため、ミドルビームの形状も変更されている。導入当時の上下ベアリングにはウレタン樹脂が用いられていたが、1980年に合成ゴム（EPDM，エチレンプロピレンジエンゴム），80年代の後半には天然ゴムへと変更された。その後，過剰なせん断変形を防止するため，上ベアリングには鋼製カバーが追加されている。また，現在の下ベアリングの前面には，図 1-11 に示すように，脱落を防止するためのプレートが設置されている。コントロールゴムは，ウレタン樹脂の加水分解による劣化，脱落に対処するため，2005年頃よりドイツ製品が用いられている。

表 1-1 主要部材の代表的な改良変遷

部材名称	1980年頃	現在	
シールゴム	ボックスタイプ 	バンドタイプ 	※止水性を向上させるために形状を変更
ミドル ビーム	ボックスタイプ 	バンドタイプ 	※シールゴムの変更に伴い，形状を変更
上 ベアリング	合成ゴム 	天然ゴム 	※耐久性向上のために天然ゴムに変更 ※せん断変形防止の鋼製カバーを新たに追加
下 ベアリング	合成ゴム 	天然ゴム 	※耐久性向上のために天然ゴムに変更 ※脱落防止プレートを別途設置

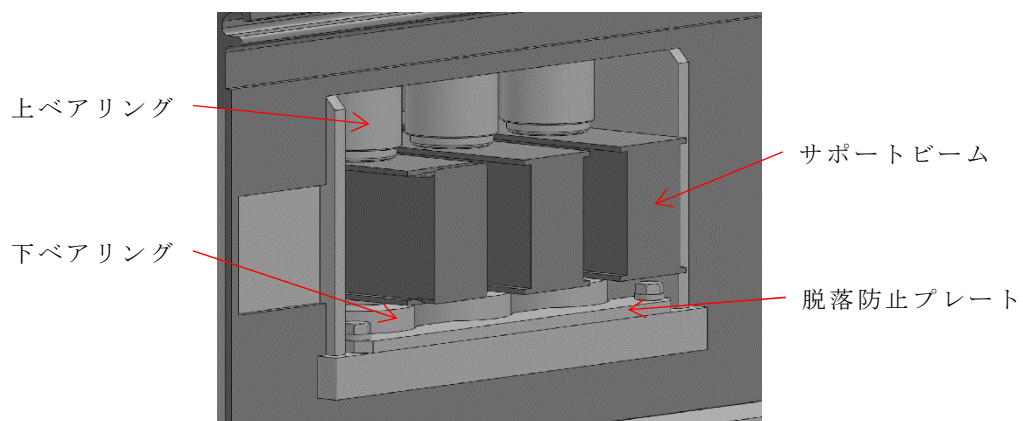


図 1-11 下ベアリングの脱落防止プレートの例

ミドルビームとサポートビームの接合は、図 1-12 に示すように、2002 年まですみ肉溶接で行われていた。サポートビームには突起（長さ 90mm、幅 60mm、高さ 18mm）を設けており、この突起部を利用してすみ肉溶接が行われていた。ここでは、ミドルビーム長さ方向の溶接を M 溶接部、サポートビームの長さ方向を S 溶接部と称する。S 溶接部は、ミドルビーム下フランジに設けた切欠き部で行われていた。切欠きを設ける理由は、ミドルビームとミドルビーム間の遊間 0mm に対応するためである。なお、溶接部は溶接のままでは仕上げは行われていなかった。2002 年以降は、図 1-13 に示す完全溶け込み溶接に変更されている。図 1-13 (a) に示す緑色の点線はミドルビームの下面位置、赤色の点線はサポートビームに設けられている突起形状を示している。また、完全溶け込み溶接であるため溶接部は一体であるものの、すみ肉溶接と同様に M 溶接部あるいは S 溶接部と呼ぶ。完全溶け込み溶接に変更した理由は、図 1-4 に示したように、2002 年 3 月、関越自動車道の永井川橋に設置されたモジュラー型伸縮装置のミドルビームの一部が外れたためである[7,8]。ミドルビームが外れた原因は、図

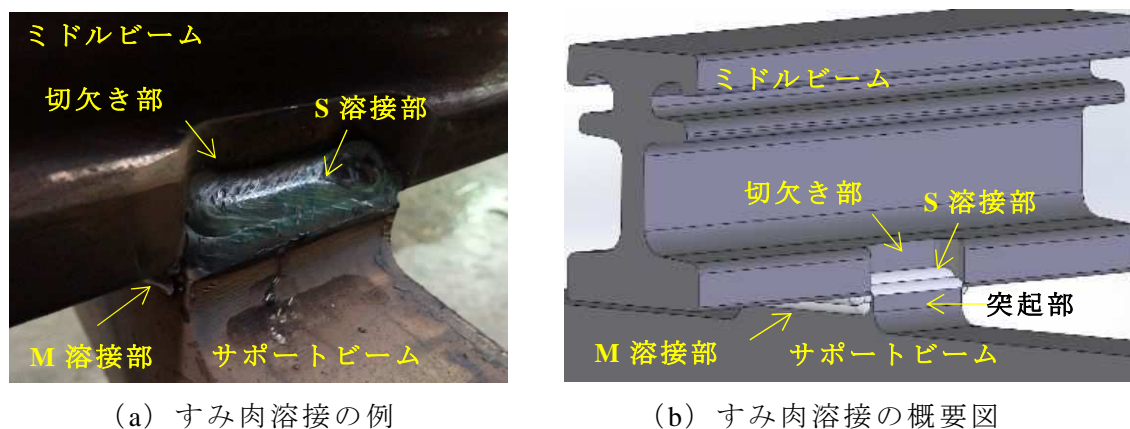


図 1-12 すみ肉溶接

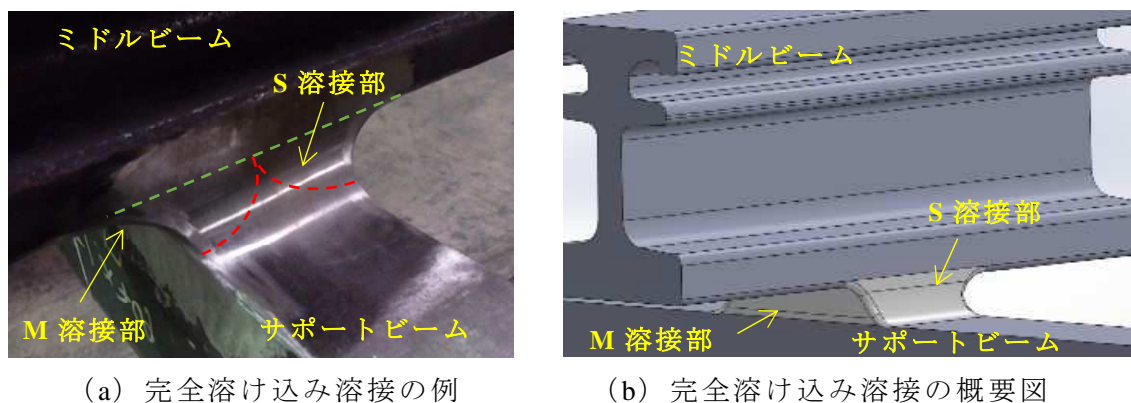


図 1-13 完全溶け込み溶接

1-14 に示すようなすみ肉溶接のルートを起点とした疲労損傷と考えられている。しかし、2012 年 5 月には、図 1-15 に示すように、重交通路線とされる伊勢湾岸自動車道において完全溶け込み溶接に疲労き裂が確認されている[19,20]。ミドルビームとサポートビーム溶接部の損傷事例数は、十分な集計がなされていないものの、これまでに 50 基程度とみられている。すみ肉溶接の損傷は、1970 年の技術導入当初に設置された伸縮装置で 1980 年に補修したとする記録が残されている。また、伊勢湾岸自動車道では 12 基で確認されている。完全溶け込み溶接の損傷は、伊勢湾岸自動車道の 6 基で確認されている。



図 1-14 すみ肉溶接の疲労き裂[8]

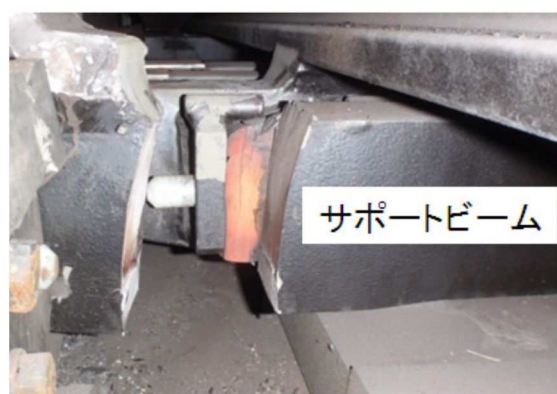
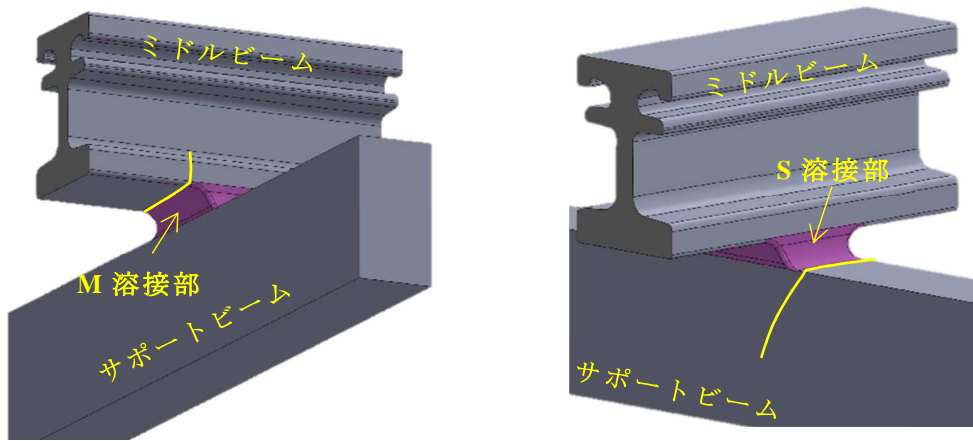


図 1-15 完全溶け込み溶接の疲労き裂[8]

本研究で対象とするモジュラー型伸縮装置は、ミドルビームの上面に輪荷重が直接作用するため、ミドルビームとサポートビームには、繰返し曲げ応力が生じる。そのため、ミドルビームとサポートビームの完全溶け込み溶接部には、疲労き裂の生じる可能性がある。すなわち、図 1-16 に示すように、M 溶接部の止端からミドルビームに進展するタイプ A き裂と、S 溶接部の止端からサポートビームに進展するき裂（タイプ E）などが生じる可能性がある。図 1-17 にそれらの損傷事例を示す。

このような疲労き裂に対して耐久性を確保するためには、疲労強度の改善や疲労照査を行う必要がある。疲労耐久性を評価する場合の溶接部の疲労強度は、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」[21]（以後、JSSC 指針と称する）や日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」[14]等 に示される継手の強度等級分類によるのが一般的である。しかし、モジュラー型伸縮装置の継手形状は、それらに示されるものに当てはめることが難しい。また、その疲労強度は、溶接部の寸法や形状に依存するが、それらの影響も明らかとされていない。さらに、疲労照査を行うためには、適切な疲労荷重を定める必要がある。そして、その疲労荷重により溶接部に生じる公

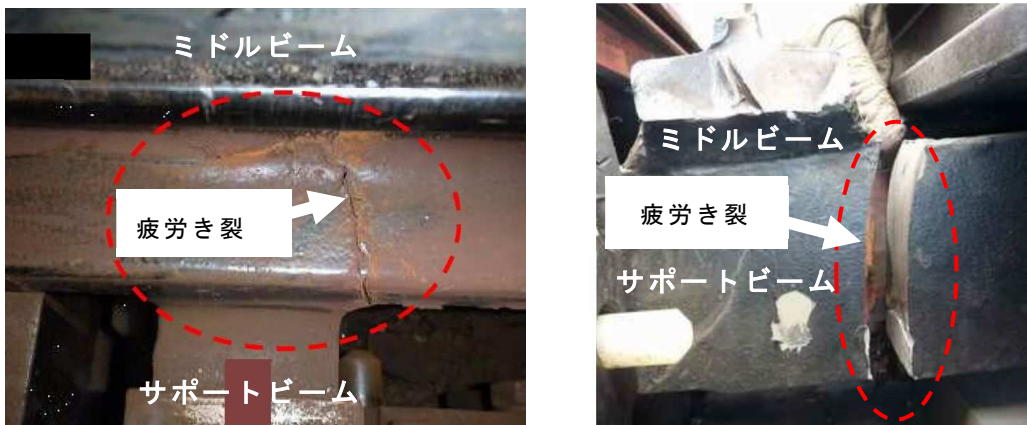
称応力の求め方も定める必要がある。しかし，本研究で対象としているモジュラー型伸縮装置溶接部に対する検討が必ずしも十分に行われているとは言えない。したがって，その疲労耐久性を評価する手法の確立は重要と考える。



(a) タイプ A き裂

(b) タイプ E き裂

図 1-16 完全溶け込み溶接部に発生する疲労き裂の進展性状



(a) タイプ A き裂

(b) タイプ E き裂

図 1-17 完全溶け込み溶接部に発生する疲労き裂の損傷事例

1.2 各国の耐久性評価基準

各国の基準類に示されているモジュラー型伸縮装置の疲労耐久性評価に必要な静的車輪荷重を表 1-2 に，静的車輪荷重から求められる疲労荷重（輪重）を表 1-3 に示す。疲労荷重（輪重）は，静的車輪荷重に衝撃係数やリバウンド係数，そして荷重分担などの補正係数を乗じることで求められている。表 1-3 には，それらの補正係数も示している。

表 1-2 各国の基準類に示されている静的車輪荷重

国名	ドイツ		アメリカ		日本
発行年	1992	2013	1997	2014	2012
基準名	TL/TP-FÜ92	ETAG032	Report402	AASHTO LRFD 7th	設計要領第二集
静的車軸荷重(鉛直)	200kN	300kN	107kN	142kN	200kN
静的車輪荷重(鉛直)	100kN	150kN	26.7kN	35.6kN	100kN
静的車輪荷重(水平)	65kN	150kN	鉛直疲労荷重(輪重)		—

表 1-3 各国の基準類に示されている疲労荷重の比較

国名	ドイツ		アメリカ		日本	
発行年	1992	2013	1997	2014	2012	
基準名	TL/TP-FÜ92	ETAG032	Report402	AASHTO LRFD 7th	設計要領第二集	
鉛直	疲労荷重(輪重)	65.5kN	85.2kN	22.8kN	60.7kN	200kN
	荷重係数	0.6	0.7	0.75	1.5	—
	衝撃係数(1+i)	i=0.4	i=0.3	i=0.75	i=0.75	i=1.0
	リバウンド係数(1+ α_{Rv})	$\alpha_{Rv}=0.3$	$\alpha_{Rv}=0.3$	(衝撃に含んでいる)		—
	荷重分担率(α_{Sv})	$\alpha_{Sv}=0.6$	$\alpha_{Sv}=0.48$	$\alpha_{Sv}=0.65$	$\alpha_{Sv}=0.65$	—
水平	疲労荷重(輪重)	9.8kN	13.9kN	4.6kN	12.1kN	—
	荷重係数	0.25	0.7			
	補正係数	0.6	0.2	0.2	0.2	—
	リバウンド係数(1+ α_{Rh})	$\alpha_{Rh}=1.0$	$\alpha_{Rh}=1.0$	—	—	—
	荷重分担率(α_{Sh})	$\alpha_{Sh}=0.5$	$\alpha_{Sh}=0.33$	—	—	—

疲労荷重としては、鉛直方向に加えて、車両の制動等により生じる水平方向も考慮されている。衝撃係数 (i) は、荷重が伸縮装置上を通過する際に、路面の平坦性等の影響により応力が増幅することを考慮している。また、リバウンド係数 (α_{Rv}) は、ミドルビームの鉛直正方向変位に対する負方向変位の比 (応力の比) である (ここでは、鉛直下向きの方を正とする)。ミドルビームに荷重が作用すると、ミドルビームには正方向の変位が生じる。その後、荷重が通過すると、変形したミドルビームは負方向に跳ね返ろうとする。これを考慮している。リバウンド係数 (α_{Rh}) は、水平荷重の作

用によって、車両の走行方向と反対方向の両側にミドルビームが変位することを考慮している。そして、荷重分担率 (α_{sv} , α_{sh}) は、隣り合うミドルビームが荷重 (輪重) を分担することを考慮している。溶接タイプのモジュラー型伸縮装置の場合、主として橋軸方向にミドルビームが複数本並んでいる。大型車のタイヤがミドルビーム上に載った際、ミドルビームおよびタイヤの変形により、荷重の一部が隣接するミドルビームで分担されることを考慮している。

ドイツでは、1992年に「TL/TP-FÜ92」(Technische Leitlinien/Technische Prüfungsbestimmungen Fahrbahn-Übergänge Ausgabe 1992, 道路橋と歩道橋の非排水型伸縮装置に関する引渡しと検査についての技術仕様) [22]が発刊された。基準とした車両は、「DIN 1072」(Deutsches Institut für Normung, ドイツ工業規格) [23]に示される橋格 60/30 の重車両 (SLW), 3軸車である (図 1-18 参照) [24]。車両総重量は 600kN (軸重 200kN, 輪重 100kN) である。この輪重に衝撃などの係数を乗じて鉛直あるいは水平疲労荷重 (輪重) を設定している。

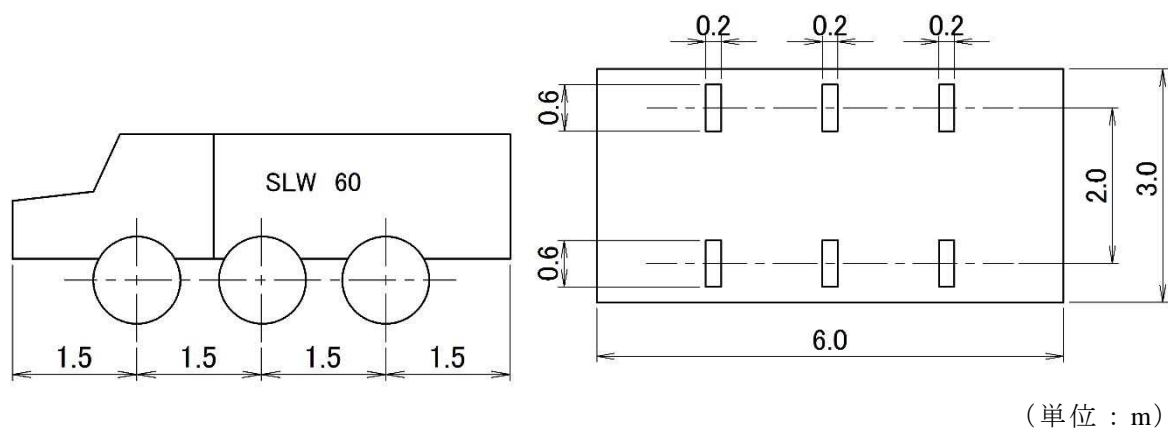
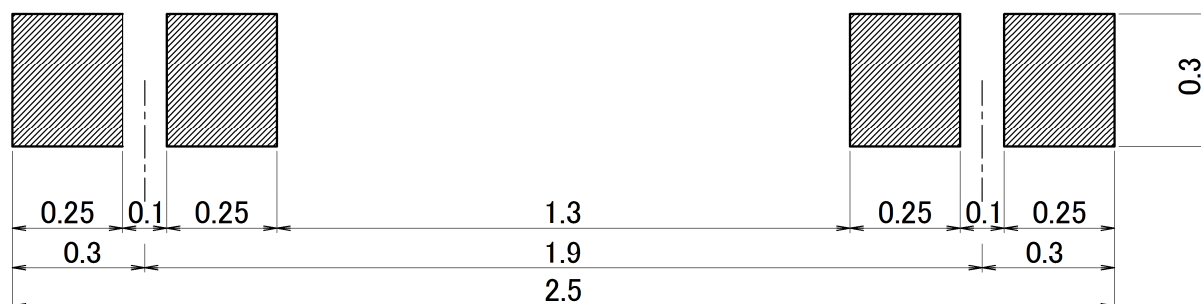


図 1-18 「DIN 1072」に示される橋格 60/30 の重車両の形状とタイヤの接地寸法[24]

疲労照査では、溶接部に生じる公称応力と溶接部の疲労強度との比が 1 以下であれば安全とみなしている。溶接部に生じる公称応力は、疲労荷重を用いて梁計算により算出されている。疲労荷重の載荷位置は、レーンマークではなく最大の応力が発生する箇所としている。そして、算出した応力範囲には安全率 1.25 を乗じるとしている。これは、追い越し車線と走行車線のうちで走行車線を走行する大型車交通量の割合や、車両の走行位置のばらつき、そして荷重繰返し数を考慮するためとしている。「TL/TP-FÜ92」では、疲労照査で考える荷重繰返し数を 2×10^7 としている。しかし、後述する疲労強度は 200 万回基本疲労強度としている。そのため、マイナー則の考えから荷重

側で割増しを行っている。なお，ドイツで用いられている疲労設計曲線の傾きを表すための係数（ m ）は，繰返し数 500 万回までを 3，それ以上で 5 としている[25]。溶接部の疲労強度は，適切な材料試験機関での実施を前提として，疲労試験により求めることができるとしている。そして，200 万回基本疲労強度は，3 体以上の試験結果の平均値を安全率 1.35 で除した値としている。

2012 年以降，ドイツでは「ETAG032」（European Technical Approvals Guidelines，欧州技術承認基準）[26,27]が適用され始めている。図 1-19 は，「ETAG032」に示されるタイヤの接地寸法である。「ETAG032」では，軸重と路面の相互干渉をより正確に考慮するため，「EN1991-2」（European Norm，欧州統一規格）[25]に記載のタイヤの接地寸法を修正するとともに，静的車軸荷重を 300kN としている。梁計算により算出する溶接部に生じる公称応力が 200 万回基本疲労強度より小さいことを確認する方法が採られているが，200 万回基本疲労強度の算定にあたっては，実施した試験体の数量に起因する係数や試験結果の標準偏差を考慮するなど「TL/TP-FÜ92」よりも安全側の評価を行っている。



(単位：m)

図 1-19 ETAG032 に示されるタイヤ接地面積[26]

アメリカでは，Dexter らが 1997 年に疲労設計法を示している[28]。基準とした車両は，AASHTO（American Association of State Highway and Transportation Officials，米国州道路交通運輸担当官協会）の「Standard Specification for Highway Bridges-LRFD.1st Ed」[29]や NCHRP（National Cooperative Highway Research Program，全米幹線道路共同研究プログラム）の「Report 299」[30]に示された 3 軸トラックとしている。図 1-20 に示すこの 3 軸トラックは，図 1-21 に示す 5 軸トラックのそれぞれのタンデム軸を 1 つの軸に置き換えたものである。そのため，静的車輪荷重（26.7kN）は静的車軸荷重（24kips = 106.8kN，1kips = 4.4482kN）の 1/4 としている。この値に考慮する衝撃は，

静的車軸荷重の 75%としている。ただし、この値には鉛直方向のリバウンド影響も含まれている。荷重分担率はミドルビーム上面幅の影響を考慮している。例えば、幅が 80mm の場合で 0.6、幅 100mm では 0.7 としている。これらの係数などを考慮して算出した輪重を鉛直疲労荷重としており、その 20%の輪重を水平疲労荷重としている。そして、これらの疲労荷重を用いて梁計算により求められる溶接部に生じる公称応力が打切り限界（一定振幅応力）の疲労強度の 1/2（カテゴリ C： $10\text{ksi} \div 2 = 34.5\text{N/mm}^2$ ， $1\text{ksi} = 6.89476\text{N/mm}^2$ ）以下であれば疲労耐久性を満足していると判断されている。なお、荷重の載荷位置は、最大応力の得られる箇所とされている。

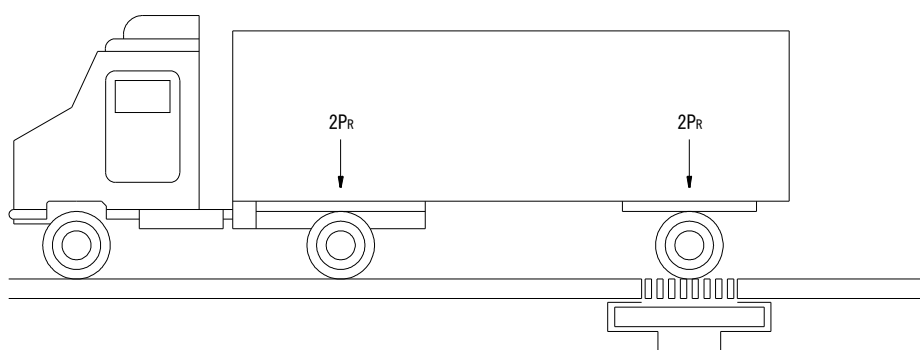


図 1-20 3 軸トラック [28]

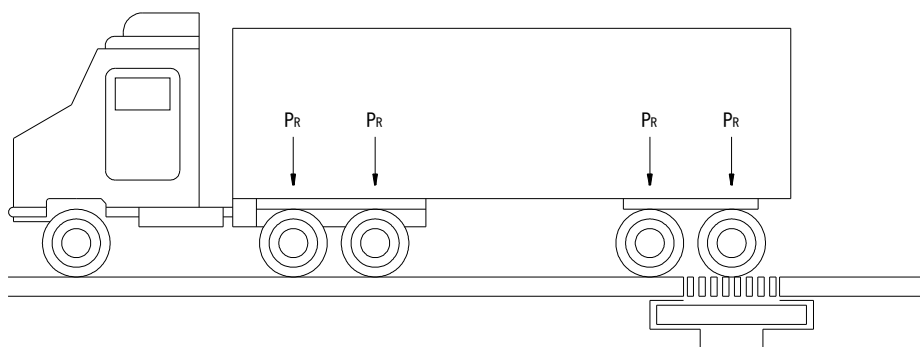


図 1-21 5 軸トラック [28]

2014 年の「AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition」[31]では、タンデム軸の重量は 32kips (142.3kN) と記されている。また、荷重係数は 1.5 としている。ただし、打切り限界（一定振幅応力）の疲労強度（カテゴリ C： $10\text{ksi} = 68.9\text{N/mm}^2$ ）に 1/2 を乗じる必要はないとしている。

日本では、2012 年に NEXCO3 社が製品ジョイントに対する疲労耐久性の評価方法

を示している[15,16]. そこで用いている静的車軸荷重は、道示に示される床版および床組を設計する場合の活荷重 (T 荷重) である. 静的車軸荷重には衝撃を考慮する. その大きさは静的車軸荷重の 100% (衝撃係数 $i=1.0$) としている. この荷重を用いた疲労試験で 360 万回の繰返し数に耐えることができれば, 製品ジョイントの耐用年数 30 年に対する疲労耐久性を満足していると判断している.

このように, 疲労照査の考え方は各国により異なっている. 疲労照査に用いる疲労荷重の大きさも, 各国の設計荷重の大きさや車両の構造特性の相違により異なっている. また, 日本の NEXCO3 社で規定する耐久性評価手法により, モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を求めることはできるものの, 走行する活荷重の実態や衝撃, モジュラー型伸縮装置特有のリバウンドや複数のミドルビームによる荷重分担の影響, そして溶接部の形状や寸法に依存する疲労強度などについては検討の余地はあるものと考えた.

1.3 既往の研究

モジュラー型伸縮装置の溶接部の疲労耐久性評価に関する研究は, モジュラー型が開発された欧州で 1980 年代後半から始められた. ここでは, 溶接部に作用する荷重に関する検討と疲労強度に関する既往の研究について示す.

1.3.1 溶接部に作用する荷重に関する検討

オーストリアの Tschemmernegg ら[32]は, 車両の輪荷重がモジュラー型伸縮装置上を走行した場合の衝撃やリバウンド, そして荷重分担の影響など, 疲労荷重を求めるための補正係数の考え方を示している.

米国の Dexter ら[28]は, Tschemmernegg らの研究を参考に, モジュラー型伸縮装置が設置された 4 つの橋梁で走行試験を行い, 走行車両の輪荷重に対する衝撃やリバウンド, 荷重分担などの検証を行っている. 走行試験で得られたリバウンドを含む鉛直方向のモーメントは, ビーム要素を用いた二次元骨組解析で求めた値の 1.63 倍であったこと, 水平方向のモーメントは鉛直方向で計測されたモーメントの 23% であり, 制動時には 50% に達したことを示している. また, 荷重分担率はミドルビームの幅により 50~80% になるとしている.

日本の八木ら[33]は, 車両制限令に基づいた軸重 100kN と BWIM (Bridge Weigh-in-Motion) [34]で計測した国道 23 号線の走行車線の軸重データにより求めた等価軸重 110kN の 2 つを基本軸重と考えている. 基本軸重を補正する衝撃やリバウンド, そし

て荷重分担などの係数は，ドイツの考えを踏襲している（衝撃係数 $i=0.4$ ，リバウンド係数 $\alpha_R=0.3$ ，荷重分担率 $\alpha_S=0.6$ ）。

山田[35]は，伸縮装置の疲労照査のための基本荷重とその繰返し数を提案している．伸縮装置の設計では，道示に示される T 荷重に衝撃の影響を考慮した荷重を載荷して，それにより梁計算で求められる応力が許容応力度以下となるように断面を決定している．これを踏まえ，可能な限り簡便に疲労照査が行えるように，疲労照査に用いる基本荷重を設計輪重の 1/2，すなわち 50kN の等価輪重と提案している．等価輪重で生じる溶接部の公称応力は梁計算で求めるとしている．また，その繰返し数は 1 日 2,000 回としている．繰返し数については，いくつかのデータや考察に基づき設定されている．等価輪重には衝撃を考慮するものとし，その値は等価輪重の 40%（衝撃係数 $i=0.4$ ）としている．なお，ここではリバウンドや荷重分担は考慮されていない．

1.3.2 疲労強度に関する検討

Tschemmernegg[36]は，橋梁構造物の部材の中で動的作用の大きい伸縮装置が静的設計のみ行われていることを問題視し，伸縮装置の溶接部の疲労強度を明らかにするための試験方法を示している．その方法を図 1-22 に示す．1つのサポートビームに，その直交方向に2つのミドルビームを溶接で接合している．そして，ミドルビームの上フランジに斜めから載荷して，溶接部に鉛直力と水平力を作用させている．その後，Tschemmernegg ら[32]は，図 1-23 に示す3つの疲労き裂を想定し，それぞれの疲労き裂が疲労試験で生じるように，図 1-24 に示すような支持条件や載荷条件を提案している．

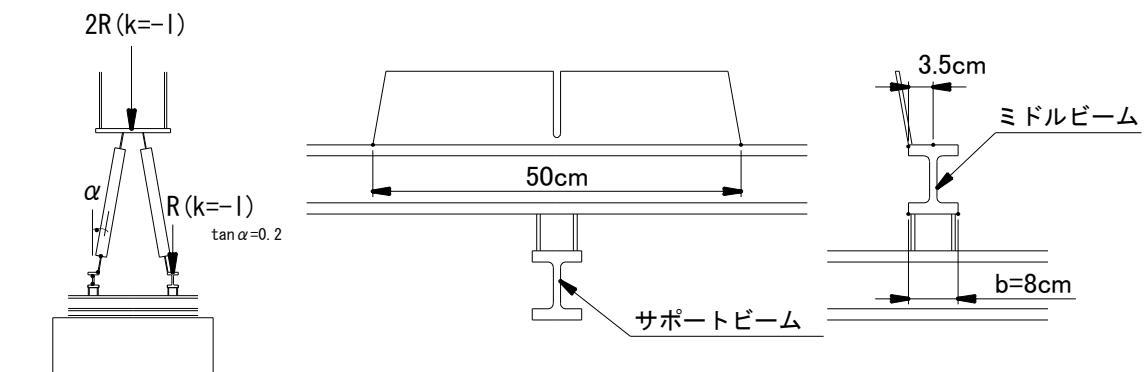


図 1-22 溶接部の疲労強度を明らかにするための試験方法[36]

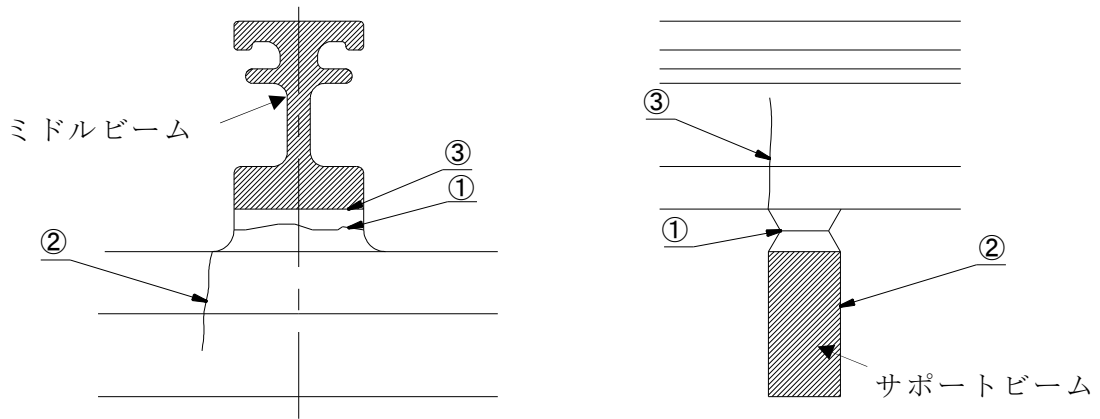


図 1-23 疲労き裂のタイプ[32]

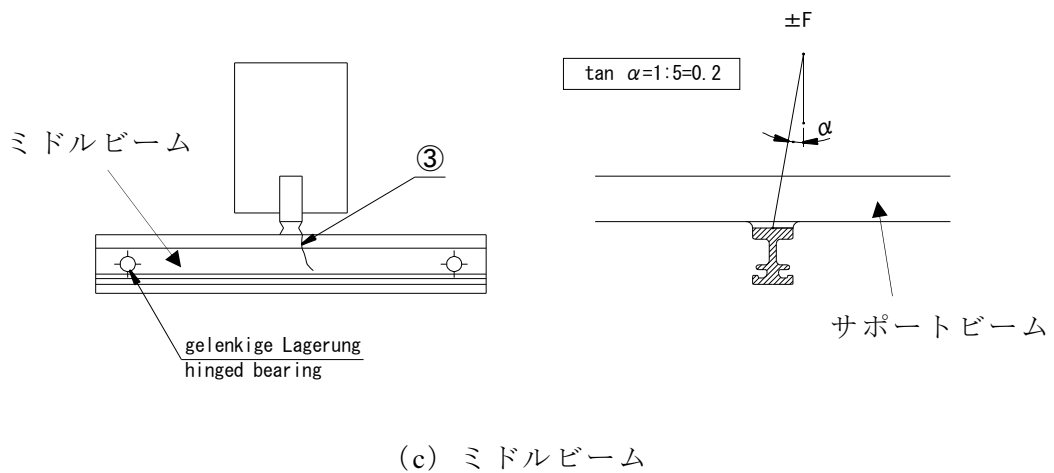
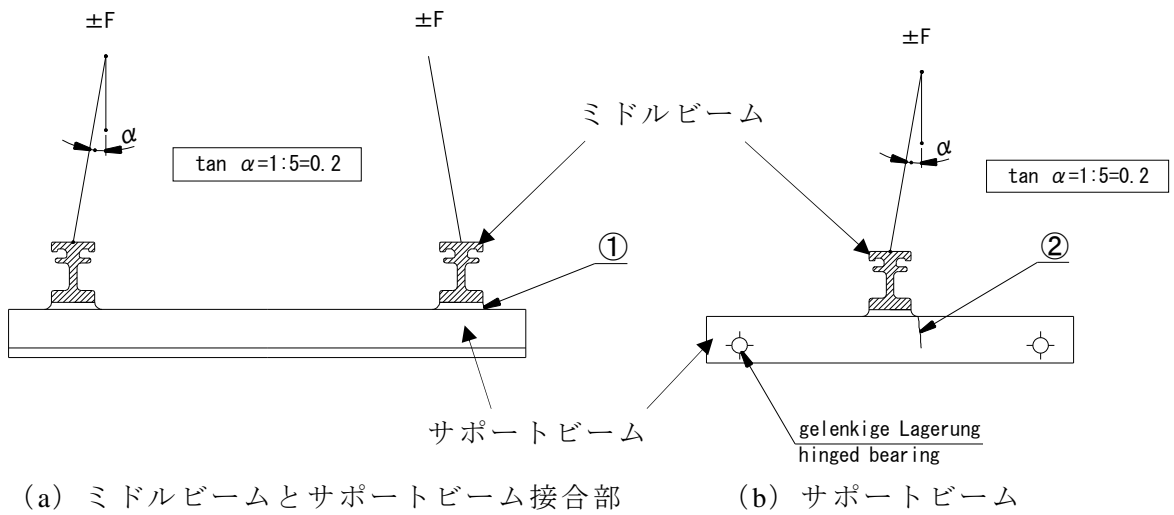


図 1-24 Tschemmernegg らが提案した疲労強度を確認するための試験方法[32]

米国の Dexter ら[28]は、すみ肉溶接あるいは完全溶け込み溶接試験体を用いた疲労試験を行っている。この試験では、圧縮応力に加えてリバウンドを考慮して引張応力も作用させている。そして完全溶け込み溶接とした場合の疲労強度は、AASHTO のカテゴリ C としている。

八木ら[33]は、疲労設計曲線を基準とした S-N 線図からスライドさせることで推定している。スライドには、有限要素応力解析（1mm 法）で得られた応力と公称応力の比を用いている。その S-N 線図の妥当性は、ドイツのマウラー社やアメリカのリーハイ大学、そして日本鑄造（株）で実施された疲労試験結果との比較により検証している。しかし、疲労強度に影響があるとされる溶接部の寸法や形状の影響は示されておらず、疲労強度に対するそれらの影響は明らかとされていない。また、サポートビーム側（S 溶接部）の溶接止端に生じる疲労き裂については検討の対象としていない。

伏屋ら[8]は、伊勢湾岸自動車道のモジュラー型伸縮装置で用いられた 3 種類の溶接継手（すみ肉溶接、完全溶け込み溶接、すみ肉溶接の現場補修）について疲労試験を行っている。この試験では、試験体の疲労き裂発生予想箇所に直径 0.04mm の被覆銅線を貼り付け、被覆銅線が切れた時点なき裂発生回数（疲労き裂発生寿命（Nc））としている。そして、疲労き裂が大きくなり、疲労試験を停止した時点をも疲労寿命（Nf）と定義している。その結果、すみ肉溶接試験体の Nc は JSSC 指針に示される F～H 等級、Nf は E～F 等級であり、完全溶け込み溶接では Nc で F 等級、Nf で E 等級と示されている。しかしながら、溶接部の寸法や形状は示されていない。形状と寸法が異なる M あるいは S 溶接部の疲労強度を明らかにすることは重要と考える。

1.4 研究の目的と論文構成

本研究では、ミドルビームとサポートビームの接合に溶接を用いるモジュラー型伸縮装置の疲労耐久性評価手法の考え方を整理する目的で、疲労荷重や応力計算法、疲労照査法の考え方について検討するとともに、疲労照査を行うために不可欠な溶接部の疲労強度を明らかにする。すなわち、疲労荷重や応力計算法、疲労照査法の考え方については、各国の耐久性評価基準や既往の研究を踏まえ、現在の活荷重実態から求めた等価輪重を疲労基本荷重と考え、疲労基本荷重を補正する衝撃やリバウンド、荷重分担の各係数、そしてドイツやアメリカで考慮されている水平力について、実物大試験体を用いた走行試験と静的載荷試験で検討を行った。疲労基本荷重にそれぞれの補正係数を乗じた疲労荷重により求める溶接部の公称応力は、モジュラー型伸縮装置の構造を可能な限り再現できるようにミドルビームとサポートビームの上下位置を考

慮した三次元骨組構造で求めることを考えた。疲労強度については、完全溶け込み溶接部に生じる疲労き裂を対象として、溶接部の寸法と形状の異なる試験体の疲労試験と応力解析を行うことにより検討した。そして、疲労荷重や応力計算法、疲労照査法の考え方と明らかにする疲労強度に基づき、3本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置を対象とした疲労耐久性の照査例を示した。

本論文は6章で構成されている。各章の概要は以下に示すとおりである。

第1章「序論」では、道路橋に用いられる伸縮装置の役割と構造による分類について述べるとともに、荷重支持型に分類される伸縮装置のうち、ミドルビームとサポートビームの接合に溶接を用いるモジュラー型伸縮装置の構造と疲労損傷事例を示した。また、モジュラー型伸縮装置の溶接部の疲労強度や疲労照査法の考え方に関する各国の基準や既往の研究を整理し、現状の課題をまとめるとともに、研究の目的と本論文の構成を示した。

第2章「伸縮装置の断面設計と疲労照査」では、モジュラー型伸縮装置の現行の断面設計法と溶接部に対する疲労照査法を示した。疲労照査法では、国内外の手法の整理を行うとともに、疲労照査に必要な疲労荷重、応力計算法、疲労強度、疲労照査法の考え方を示した。また、衝撃係数やリバウンド係数、荷重分担率、水平方向力を考慮する補正係数、そして走行位置荷重補正係数などの考え方を示した。

第3章「完全溶け込み溶接の疲労強度」では、モジュラー型伸縮装置溶接部のミドルビーム側（M溶接部）あるいはサポートビーム側（S溶接部）の溶接止端の疲労強度を明らかにする目的で、溶接部の寸法や形状の異なる試験体を対象とした疲労試験と有限要素応力解析を行った。そして、疲労耐久性評価に不可欠な疲労強度等級を明らかにし、JSSC指針に示される強度等級分類との関係について検討した。そして、JSSC指針に示される継手の強度等級に分類すると、溶接部を整形し、止端をそのままとした場合でE、R15の止端仕上げとした場合でCであることを示した。

第4章「部分溶け込み溶接によるルート疲労破壊の防止と疲労強度」では、モジュラー型伸縮装置の溶接部を現在の完全溶け込みから部分溶け込みに変更した場合に、M溶接部のルート疲労き裂を防止しうる溶接詳細と疲労強度を明らかにすることを目的とした。具体的には、ミドルビームとサポートビームの接合にすみ肉溶接を用いたモジュラー型伸縮装置のミドルビーム側溶接部（M溶接部）の疲労破壊の起点の特定に対する有効切欠き応力概念の適用性を明らかにするため、止端部形状の異なるすみ肉溶接試験体を用いた疲労試験と有効切欠き応力を求めるための試験体の応力解析を行った。また、溶接止端の曲率半径と溶接脚長、溶け込み深さをパラメータとしたモ

デルの応力解析を行い，部分溶け込み溶接で M 溶接部のルート疲労破壊を防止できる溶接詳細を検討した．さらに，第 3 章で示した完全溶け込み溶接の止端の疲労強度に基づき，部分溶け込み溶接を用いた場合の M 溶接部の疲労強度について検討した．そして，モジュラー型伸縮装置の M 溶接部に発生する疲労き裂の起点は，有効切欠き応力概念により概ね特定できることを示した．また，溶接脚長と溶け込み深さを大きくすることで，M 溶接部のルート疲労破壊を防止することができることを示した．そして，その場合の疲労強度は，JSSC 指針に定められる C 等級と考えられることを示した．

第 5 章「疲労照査例」では，第 2 章で示した疲労荷重と応力計算法，疲労照査法の考え方と第 3 章で示した疲労強度に基づき，モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労照査例を示すとともに，今後の検討課題を記した．

第 6 章「結論」では，本研究で得られた成果をまとめて示している．

【参考文献】

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，丸善，平成 24 年 3 月．
- [2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，丸善，平成 24 年 3 月．
- [3] 日本道路ジョイント協会：伸縮装置設計の手引き，2014 年 7 月．
- [4] 土木学会，鋼構造シリーズ 22 鋼橋の疲労対策技術，丸善，pp.82-84，平成 25 年 12 月．
- [5] 西浩嗣，荒本貴司，酒井修平，小野秀一：鋼製フィンガージョイントの疲労試験，土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.63，Ⅰ -073，pp.145-146，2008.9．
- [6] 酒井修平，小野秀一，舘石和雄：道路橋の鋼製フィンガージョイントの損傷メカニズム，鋼構造論文集，第 21 巻第 84 号，pp.9-21，2014 年 12 月．
- [7] 上毛新聞社：上毛新聞（ジョイント外れ路面に 10 台乗り上げパンク関越道が 7 時間通行止め昭和の永井川橋），2002 年 3 月 26 日．
- [8] 伏屋和樹，竹市雅人，山田健太郎：ビーム型伸縮装置の溶接部の疲労試験，構造工学論文集，Vol.60A，pp.642-650，2014 年 3 月．
- [9] 山田健太郎，舘石和雄：鋼橋の維持管理，コロナ社，2015 年 6 月．
- [10] 太田富夫，伊藤誠二：重量超過車両が橋梁に与える影響のモニタリング，平成 25 年度国土交通省国土技術研究会，2013 年 11 月．
- [11] 鋼構造委員会疲労変状調査委員会：鋼橋の疲労変状調査，土木学会論文集，第 368 号／Ⅰ -5，pp.1-12，1986 年 4 月．
- [12] 三木千壽：橋の臨床成人病学入門，建設図書，2017 年 9 月．
- [13] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，丸善，平成 14 年 3 月．
- [14] 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，平成 14 年 3 月．
- [15] 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：設計要領第二集橋梁建設編，pp.6-32～6-34，平成 24 年 7 月．
- [16] 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：構造物施工管理要領，pp.2-240～2-244，平成 24 年 7 月．
- [17] （株）川金コアテック：橋梁用製品，伸縮装置，モジュラータイプ mageba KM ジョイント，http://www.kawakinct.co.jp/bridges/b_j01.html（2017.3 参照）
- [18] mageba sa：mageba modular expansion joints the benchmark for large movements，TENZA®MODULAE Type LR and LR-LS，<http://www.mageba.ch/en/>（2017.11 参照）
- [19] 浦敦：NEXCO 中日本豊田保全 名港西大橋Ⅰ 基線の耐震補強に着手，道路構造物ジャーナル NET，<http://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/detail.php?id=>

- 1145&page=1, (2016.8 参照)
- [20]池田光次：中日本高速道路リレー連載②名古屋支社管内の高速道路における構造物の劣化と維持管理，道路構造物ジャーナル NET，<http://www.kozobutsu-hozen-journal.net/series/detail.php?id=27&page=1> (2016.12 参照)
- [21]日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 - 2012 年改訂版，技報堂出版，2012 年 6 月。
- [22]Federal/State Engineering Committee for Bridge Construction : Technical delivery and inspection specifications for watertight expansion joints of road and foot bridges (Technische Leitlinien/ Technische Prüfungsbestimmungen Fahrbahn-Übergänge Ausgabe 1992, TL/TP-FÜ 92), FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT (BMV), Road Construction Division, 1992.
- [23]Deutsches Institut für Normung : DIN 1072, Road and foot Bridges, Design loads, 1985.
- [24]日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，丸善，平成 2 年 2 月。
- [25]European Committee for Standardization (CEN): European Standard, Eurocode1- Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, EN1991-2, 2003.9.
- [26]European Organisation for Technical Approvals : GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of EXPANSION JOINTS FOR ROAD BRIDGES, Part one : GENERAL, ETAG N° 032, Edition of May 2013, 2013.3.
- [27]European Organisation for Technical Approvals : GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of EXPANSION JOINTS FOR ROAD BRIDGES, PART 8 : MODULAR EXPANSION JOINTS, ETAG N° 032, Edition of May 2013, 2013.3.
- [28]DEXTER, R.J., R.J.CONNOR, and M.R.KACZINSKI : Fatigue Design of Modular Bridge Expansion Joints, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 402, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1997.
- [29]American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specification for Highway Bridges-LRFD.1st Ed, Washington, DC, 1994.
- [30]Moses,F., Schilling,C.G., and K.S.Raju : Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 299, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1987.
- [31]American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO LRFD

Bridge Design Specifications, Seventh Edition, 2014.

- [32]Tschemmerneegg, F., A.Pattis, and H.Wahlberg, : Ermüdungsnachweis von Fahrbahnübergängen nach ENV-1993-1, STAHLBAU 64, pp.202-210, 1995.
- [33]八木貴之, 山田健太郎, 小塩達也 : 道路橋伸縮装置の疲労耐久性評価法の検討, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.3, pp.486-495, 2007年7月.
- [34]国土交通省国土技術政策総合研究所 : 道路橋の交通特性評価手法に関する研究－橋梁部材を用いた車両重量計測システム (Bridge Weigh-in-Motion System)－, 国土技術政策総合研究所資料第188号, 平成16年7月.
- [35]山田健太郎 : 伸縮装置や標識柱に対する簡易な疲労設計荷重の提案, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.400-407, 2015年3月.
- [36]Tschemmerneegg, F. : Zur Bemessung von Fahrbahnübergängen, Bauingenieur 63, pp.455-461, 1988.

第2章 伸縮装置の断面設計と疲労照査

2.1 はじめに

道路橋に用いられる伸縮装置は、第1章で述べたように、主桁と主桁あるいは主桁と橋台に生じる遊間を車両が安全で円滑に走行できるよう、主桁端部に設けられる装置である。伸縮装置には、平坦性の他に、耐久性、水密性、静音性、施工性、維持管理・補修性、そして耐震性などが求められる。

伸縮装置の設計は、一般に日本道路協会の「道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編Ⅱ鋼橋編」[1]や「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」[2]に従っている。表2-1に伸縮装置に関する道路橋示方書・同解説（以後、道示と記す）の変遷を示す[3]。昭和39年以前の道示に伸縮装置に関する基準は存在しておらず、昭和48年で共通編の一般事項に伸縮装置の項が設けられた。しかし、伸縮装置の概念が記されたのみであり、具体的な設計・施工については日本道路協会の「道路橋伸縮装置便覧」[4]を参考にするのがよいとされていた。その後の大幅な基準の変更は、29年後の平成14年道示[5]である。一般事項の充実や伸縮装置に作用する力などが規定された。

伸縮装置を設計するための参考資料には、先述の「道路橋伸縮装置便覧」[4]や日本道路ジョイント協会の「伸縮装置設計の手引き」[6]、日本橋梁建設協会の「鋼橋伸縮装置設計の手引き」[7]、そして道路保全技術センターの「既設橋梁のノージョイント化工法の設計施工手引き（案）」[8]などがある。その他にも、地方公共団体や各高速道路会社、各公社等で設計要領や設計マニュアル等がある場合には、それらを参照しながら設計が行われることになる[9～18]。

伸縮装置の耐久性評価法を示した国内の基準類は少ない。平成14年道示[5]で鋼道路橋の疲労設計が規定されたが、伸縮装置に対する具体的な方法は示されていない。唯一、東日本高速道路（株）、中日本高速道路（株）、西日本高速道路（株）の3社（以後NEXCO3社と記す）が疲労を考慮した試験方法を示している[16,17]が、伸縮装置の疲労耐久性評価が十分に行われているとは言い難い。一方、ドイツやアメリカでは、鉛直方向に加えて水平方向の疲労荷重が設定されている[19～23]。静的車軸荷重や疲労荷重を求めるために必要な補正係数が各国で異なるため、それぞれの値は異なるものの、鉛直方向と水平方向の疲労荷重によって溶接部に生じる公称応力と継手の形式ごとに定められる疲労強度との比較により疲労照査が行われている。

本章では、モジュラー型伸縮装置の断面設計と疲労照査法について示す。すなわち、断面設計については、伸縮装置に作用する力と断面力の算出方法、許容応力度を示す。

表 2-1 伸縮装置に関する道示基準の変遷[3]

道示 年度	昭和 39 年 以前	昭和 48 年	平成 14 年
一般 [共通編]	規定 なし	伸縮装置は、設置する道路の性格・橋の形式・必要伸縮量を基本として、全体的な耐久性・平坦性・排水性と水密性・施工性・補修性・経済性などを考慮して定める。 解説：設計・施工には「道路橋伸縮装置便覧(日本道路協会)」を参考にするのがよい。	伸縮装置は、以下の性能を満足するよう、適切な形式、構造及び材料を選定するものとする。 1. けたの温度変化、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、活荷重等による橋の変形が生じた場合にも、車両が支障なく通行できる路面の平坦性を確保するものとする。 2. 車両の通行に対して耐久性を有するものとする。 3. 雨水等の侵入に対して水密性を有するものとする。 4. 車両の通行による騒音、振動が極力発生しないよう配慮した構造とする。 5. 施工、維持管理及び補修の容易さに配慮した構造とする。 なお、伸縮装置の耐震設計は、耐震設計編の規定による。
伸縮 装置に 作用 する力	規定 なし	規定 なし	伸縮装置に作用する力は、作用荷重、伸縮装置の形式等を適切に考慮して設定するものとする。 解説：設計に用いる鉛直荷重は、T 荷重(200kN)を基本とし、ゴム、鋼材からなる形式では衝撃による応力は活荷重応力の 40%、表面に張出しを有する鋼製フィンガージョイントなどでは活荷重応力の 100% 考慮する。

耐久性の評価法については，現行の国内外の基準を整理するとともに，疲労照査に必要な疲労荷重と応力計算法，疲労強度，そして疲労照査法の考え方を示す．また，実物大試験体を用いた走行試験と静的載荷試験により，疲労荷重を求めるために必要な衝撃やリバウンド，荷重分担，そして水平方向力の検討を行う．さらに，三次元骨組構造を用いた応力計算法を示すとともに，大型車の走行位置の調査実態に基づく走行位置荷重補正係数の考え方を示す．

2.2 断面設計

伸縮装置の断面設計に用いる鉛直荷重は，道示に示される床版および床組を設計するための活荷重（T 荷重）としている．これは，昭和 45 年に日本道路協会より発行の「道路橋伸縮装置便覧」[4]で示された「鋼フィンガージョイント」の設計法に基づいている．T 荷重を図 2-1 に示す．これは，トラック 1 軸のタイヤ荷重を模擬したものである．1 軸 200kN（軸重），1 輪 100kN（輪重）である（1994 年以前は 1 軸 160kN，1 輪 80kN であった[24]）．T 荷重には衝撃を考慮する．衝撃による応力は，一般に鋼製フィンガージョイントでは活荷重応力の 100%（衝撃係数 $i=1.0$ ），ゴム材と鋼材からなる伸縮装置で活荷重応力の 40%（衝撃係数 $i=0.4$ ）としている．鋼製フィンガージョイントの衝撃係数（ $i=1.0$ ）は，「道路橋伸縮装置便覧」[4]で示された値が踏襲されている．この便覧の発行当時は，衝撃係数などのデータが少なく，コストにほとんど影響しないため，安全側の値を与えたとされている[25]．ゴム材と鋼材からなる伸縮装置の衝撃係数（ $i=0.4$ ）は，道路橋で支間長が最も短い場合の値が用いられている．

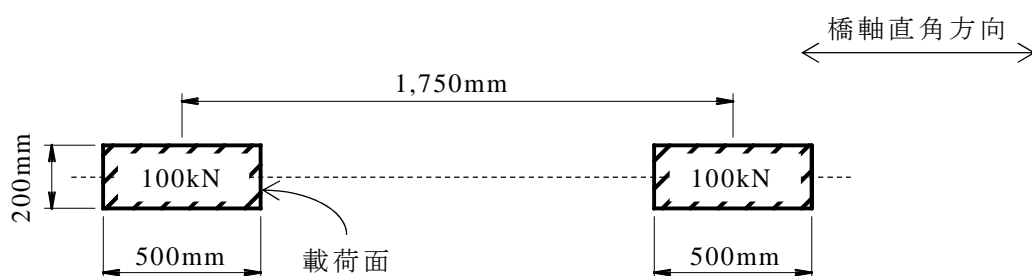


図 2-1 T 荷重

伸縮装置の断面設計では，衝撃を考慮した T 荷重に対して，伸縮装置本体および取り付け部材に生じる断面力から算出される応力度が，許容応力度以下であることを照査している．なお，平成 8 年に改訂された道示[26]では，レベル 1 地震動（震度法相当の地震力）において，伸縮装置が破損することは望ましくないとされている．そのた

め、レベル 1 地震動に対する設計荷重（死荷重×設計水平震度）で伸縮装置本体および取付け部材に生じる断面力から算出される応力度が、割増係数 1.5 を考慮した許容応力度以下であることも照査するとされている。

本研究で対象とする溶接タイプのモジュラー型伸縮装置は、輪荷重が直接作用するミドルビームとそれを支持するサポートビームの断面照査が行われる。衝撃は、ゴム材、鋼材からなる伸縮装置として活荷重応力の 40% を考慮する。ミドルビームに作用する断面力は、図 2-2 に示すように、サポートビームを支点とした 4 径間連続梁として、三連モーメント法で算出されている。衝撃を考慮した T 荷重が、ミドルビームの長さ方向に 1,750mm の間隔で分布荷重として作用する。1 つの輪荷重の載荷幅は、ミドルビームの長さ方向に 500mm である。載荷位置は、ミドルビームの端から 0.4L (L はサポートビームの間隔) に、衝撃を考慮した T 荷重の片輪の中心を配置する。これは、サポートビームの間隔を 1,300~1,600mm とした場合で、載荷位置を 10mm 程度ずつずらした場合に得られた曲げモーメントの影響線から、最大の曲げモーメントとなる位置が 0.4L 付近であったためとされている[27]。ミドルビームの設計は、それらの条件で求める断面力から算出する曲げ応力度とせん断応力度が許容応力度以下であることを確認することにより行われる。さらに、曲げモーメントとせん断力の組合せを考慮して、合成応力度に対して安全となるように照査する。なお、図 2-3 に示すように、橋軸直角方向に配置されるミドルビームには、2 つの T 荷重が載荷されることも考えられる。そこで、T 荷重を 1 つあるいは 2 つ載荷した場合でミドルビームに生じる曲げモーメントの比較が行われている（サポートビームの間隔は 1,300~1,600 mm）。そして、ミドルビームに生じる曲げモーメントは、2 つの T 荷重を載荷した場合よりも 1 つの方が大きい場合が多いという結果が示されている[27]。したがって、ここでは 1 つの T 荷重を対象とする。サポートビームの断面力は、ベアリングを支点とした単純梁として求められている。載荷する荷重は、先に示したミドルビームを連続梁として求めた際の支点反力に衝撃係数 (i) を考慮した値である。ただし、支点反力の最小値は 100kN としている。サポートビームの設計では、断面力から算出する曲げ応力度とせん断応力度、そして合成応力度に対して安全となるように行う。表 2-2 にミドルビームとサポートビームの許容応力度を示す。ミドルビームの材質は、EN10025 (European Norm, 欧州統一規格) 非合金構造用鋼材 S355J2+N (日本工業規格 (以後、JIS 規格と称する) の JISG3106 溶接構造用圧延鋼材 SM490YB 相当)、サポートビームの材質は、JIS 規格の鋼材 SM490C である。

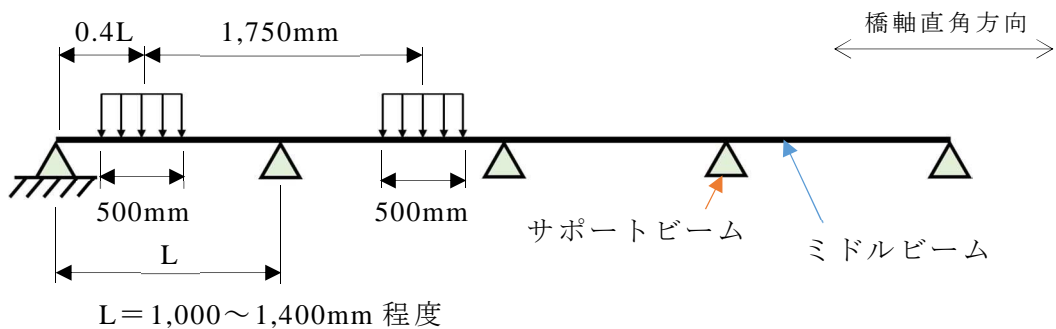


図 2-2 ミドルビームの断面設計時のモデル例

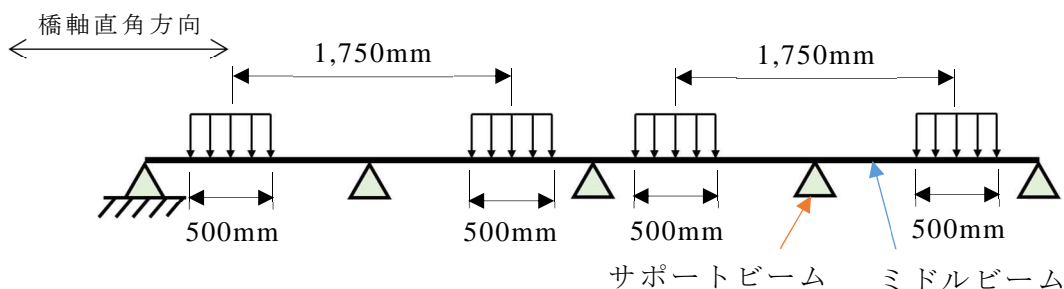


図 2-3 1つのミドルビームに2つのT荷重が載荷される場合のモデル例

表 2-2 ミドルビームとサポートビームの許容応力度

部材名称	材質	降伏点 (N/mm ²)	許容曲げ応力度 (N/mm ²)	許容せん断応力度 (N/mm ²)
ミドルビーム	EN-S355J2+N	355 以上	210	120
サポートビーム	SM490C	295 以上	175	100

2.3 現在の耐久性評価法の整理

鋼構造の疲労設計法は、一般に鋼構造物ごとに特有な疲労荷重を定めた上でそれによる照査部の公称応力範囲を求め、それと照査部の構造ごとに定められている疲労強度曲線と比較することにより行われる。その際、疲労荷重の頻度をどのように設定するかも重要な問題である。伸縮装置には床版遊間部を通過する車両の輪荷重が直接載荷されるため、道示では、この荷重に対する耐荷力およびその繰返し載荷に対する疲労耐久性を有するよう、設計にあたっては作用する力を適切に設定しなければならないとしている。しかし、その具体的な設計方法や試験方法は示されていない。唯一、NEXCO3社は、伸縮装置(ジョイント)の種別によって照査期間を定めている[16,17]。その照査期間は、埋設ジョイントで15年相当、製品ジョイントで30年相当、そして鋼製フィンガージョイントで50年相当としている。本研究で対象としているモジュ

ラー型伸縮装置は、製品ジョイントに分類されている。すなわち、ここでは 30 年相当の疲労照査を求めている。その照査では、疲労荷重を荷重範囲とした 360 万回の繰返し載荷試験で疲労損傷しないことを確認すればよいとしている。その際の疲労荷重は、設計荷重（T 荷重）の片輪に衝撃係数（ $i=1.0$ ）を考慮した 200kN としている。

ドイツやアメリカでは、モジュラー型伸縮装置の溶接部に生じる公称応力を求めるための疲労荷重（輪重）が定められている。疲労荷重は、それぞれの国で定められている静的車輪荷重に補正係数を乗じた値である。疲労荷重は、鉛直方向に加えて車両の制動等により生じる水平方向も考慮されている。疲労荷重を求めるための補正係数には、衝撃の他、モジュラー型伸縮装置特有のリバウンドや荷重分担を考慮したものがある。衝撃係数（ i ）は、図 2-4 に示すように、荷重が伸縮装置上を通過する際に、路面の平坦性等の影響により応力が増幅することを考慮している。また、リバウンド係数（ α_R ）は、ミドルビームの鉛直正方向変位に対する負方向変位の比（応力の比）である（ここでは、鉛直下向きの方を正とする）。ミドルビームに荷重が作用すると、ミドルビームには正方向の変位が生じる。その後、荷重が通過すると、変形したミドルビームは負方向に跳ね返ろうとする。これを考慮している。そして、荷重分担率（ α_s ）は、タイヤの走行方向の幅を考えた場合、複数のミドルビーム上にタイヤが載ることから、図 2.5 に示すように、隣り合うミドルビームが輪重を分担することを考慮している。本研究で対象とする溶接タイプのモジュラー型伸縮装置の場合、主として橋軸方向に、幅 d （アメリカでは 80~100mm，ドイツや日本の場合は 90mm）のミドルビームが複数並んでいる。大型車のタイヤがミドルビーム上に載った際、ミドルビームおよびタイヤの変形により、荷重の一部が隣接するミドルビームに分担されることを考慮している。

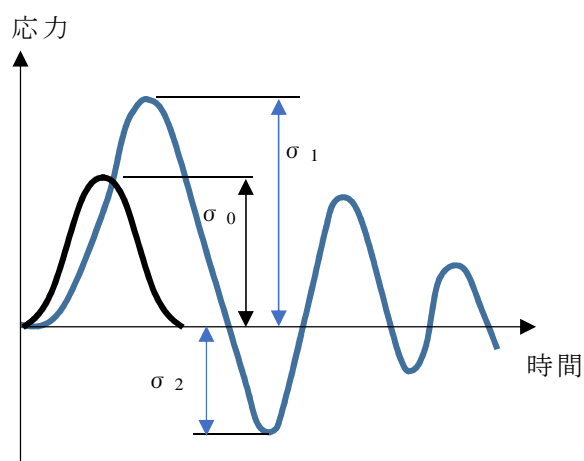


図 2-4 衝撃とリバウンドの概念図

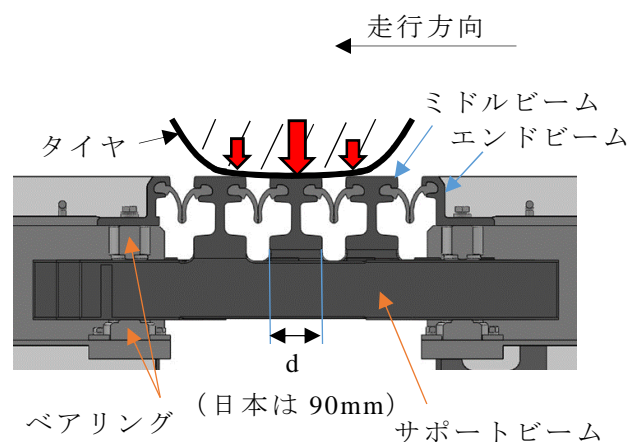


図 2-5 荷重分担の概念図

$$\text{衝撃係数 } i = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} - 1 \quad \dots (2.1)$$

ここで， σ_0 ：静的応力

σ_1 ：車両の走行で生じる応力（動的応力）

$$\text{リバウンド係数 } \alpha_R = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \dots (2.2)$$

ここで， σ_2 ：車両の走行で生じる負方向の応力

溶接部に生じる公称応力は、鉛直方向と水平方向の疲労荷重を考慮して求めている。ミドルビームは、サポートビームを支点とした連続梁でモデル化しており[22,28]、荷重の載荷位置は、最大応力の得られる箇所としている。アメリカでは疲労限設計が行われているため、疲労荷重に対応する頻度は示されていない。一方ドイツでは、製品寿命 50 年として、その頻度を求めている。なお、この製品寿命は「ETAG032」(European Technical Approvals Guidelines, 欧州技術承認基準) [20]に示される範囲から、製造者が独自に設定している。そして、溶接部の疲労照査は、溶接部に生じる公称応力と継手の形式ごとに定められる疲労強度を比較することにより行われている。アメリカの疲労強度は、「AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition」(米国全州道路交通運輸行政官協会による荷重抵抗係数設計法を用いた橋梁設計示方書) [23]に示されるカテゴリ C の疲労限 ($10\text{ksi} = 68.9\text{N/mm}^2$, $1\text{ksi} = 6.89476\text{N/mm}^2$) とされている。ドイツでは、少なくとも 3 体の疲労試験を行った結果から疲労強度を設定している。その値は、200 万回基本疲労強度で 125N/mm^2 としている[28]。なお、ドイツで用いられている疲労設計曲線の傾きを表すための係数 (m) は、繰返し数 500 万回までを 3、それ以上を 5 としている。また、一定振幅応力に対する打切り限界は 500 万回、変動振幅応力に対する打切り限界は 1 億回としている[29]。

このように、ドイツやアメリカでは疲労照査法が定められているものの、車両特性や交通事情、そして図 2-6 に示すように、モジュラー型伸縮装置溶接部の形状が異なるため、ここで示した疲労荷重や疲労荷重を求めるための補正係数（衝撃，リバウンド，荷重分担），そして疲労強度を日本のモジュラー型伸縮装置溶接部の耐久性評価にそのまま適用することは難しい。また、日本の NEXCO3 社で規定する耐久性評価手法により、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を求めることはできるものの、走行する活荷重の実態や衝撃やリバウンド，複数のミドルビームによる荷重分担の影響，

そして溶接部の形状や寸法に依存する疲労強度などについては検討の余地はあるもの
と考える。

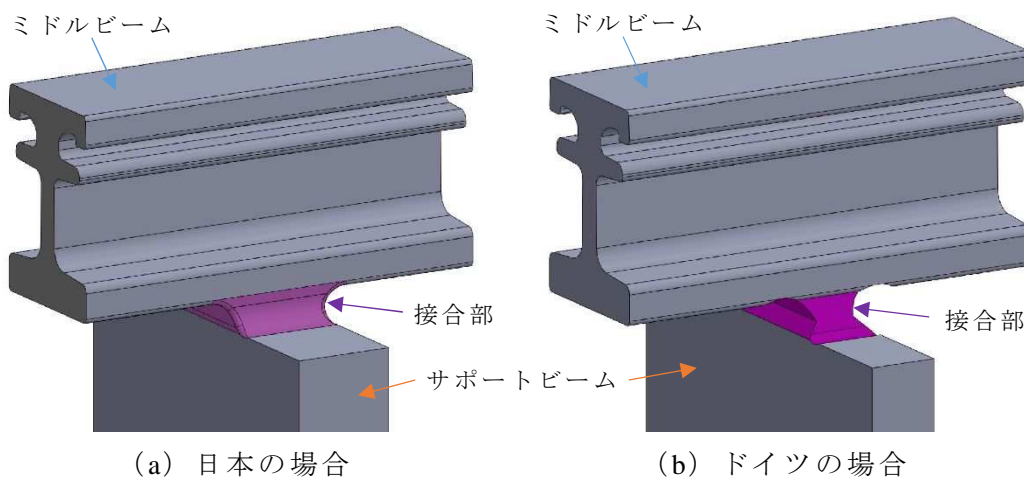


図 2-6 ミドルビームとサポートビームの溶接形状

2.4 疲労照査の考え方

先に示したように、本研究で対象としているモジュラー型伸縮装置の疲労荷重は示されていない。したがって、疲労照査を行うためには、適切な疲労荷重を設定するための考え方が必要となる。また、疲労荷重により溶接部に生じる公称応力の求め方も示す必要がある。そして、溶接部の形状や寸法により異なるとされる疲労強度を明らかにしなければならない。溶接部の疲労強度は、第 1 章で述べたように、一般に日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」[30]や日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」[31]等を示される継手の強度等級分類に従っている。しかし、それらに示される継手形式に当てはめることが難しい場合、溶接部を模擬した試験体による疲労試験や有限要素応力解析で明らかにする必要があると考える。

ここでは、疲労基本荷重に疲労基本荷重を補正する係数を乗じて疲労荷重を求めることを考えた。疲労基本荷重には等価輪重を適用する。また、この疲労基本荷重を補正するそれぞれの係数（衝撃，リバウンド，荷重分担）とドイツやアメリカで考えられている車両の制動等により生じる水平力について、過去に実施した車両走行試験と静的載荷試験の結果を再整理することで検討する。そして、疲労荷重から求められる溶接部に生じる公称応力について、三次元骨組構造を用いた応力計算の考え方を示す。

2.4.1 疲労基本荷重とその頻度

モジュラー型伸縮装置に対して適切な疲労基本荷重とその頻度を設定するためには、大型車交通量や車両重量等に関する実態を十分に把握する必要があると考えられる。そのため、道路交通情勢調査（道路交通センサス）や活荷重の実態調査などを踏まえて検討を行う。ここでは、国土交通省国土技術政策総合研究所（以下、国総研と記す）が発行した国土技術政策総合研究所資料[32]（以後、国総研資料と記す）の全国活荷重実態調査結果に示された荷重とその頻度を整理することで、疲労基本荷重とその頻度について検討する。

国総研では、橋梁部材をセンサーとして、路面の下から供用状態のままで橋梁上を通過する大型車の通行状態を計測するシステム（BWIM（Bridge Weigh-in Motion）と称している）[33]を開発するとともに、このシステムを用いて、多数の路線で交通荷重を計測している。国総研資料には、それらの計測データのうち、大型車交通量や混入率などの特徴に偏りが生じないように選定した全国 21 箇所の調査地点で得られたデータについて、交通特性等の分析を行った結果が示されている。その調査地点を図 2-7 と図 2-8 に示す。

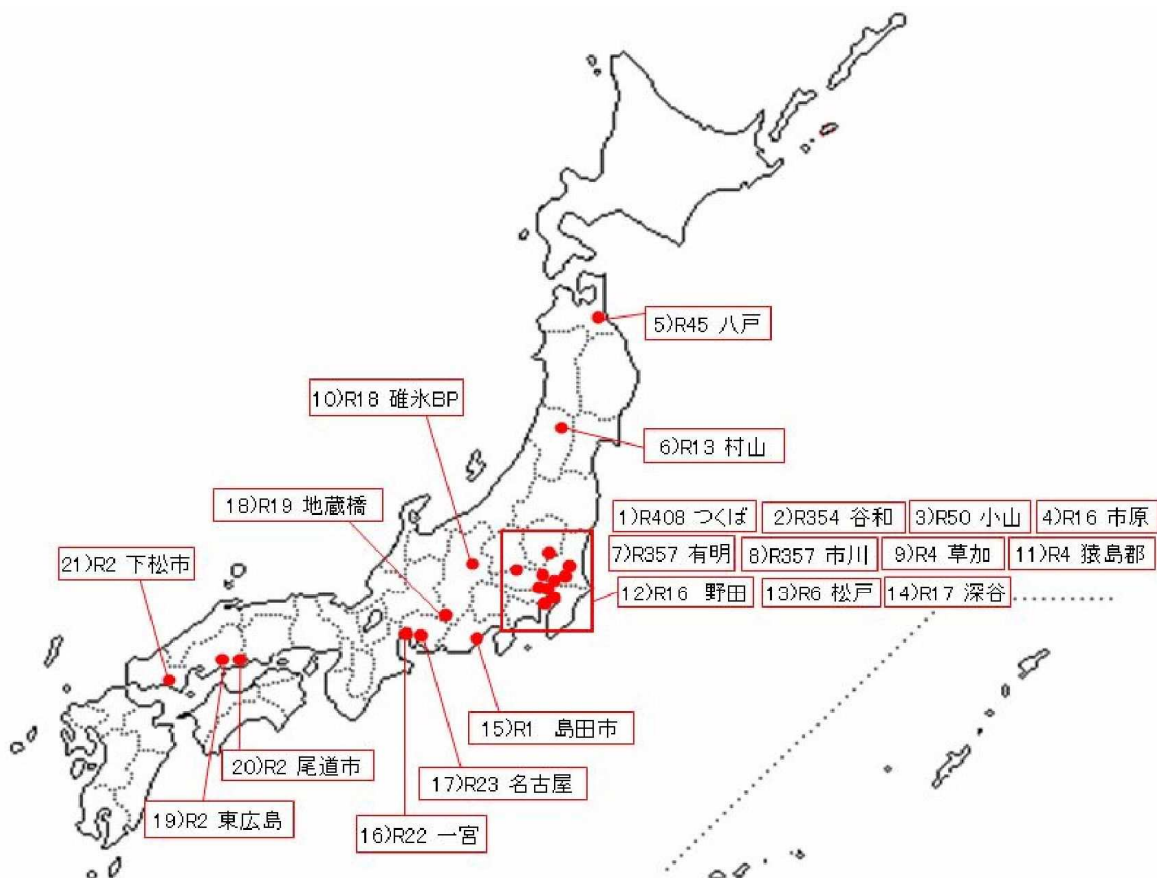


図 2-7 活荷重調査箇所一覧（全国）[32]

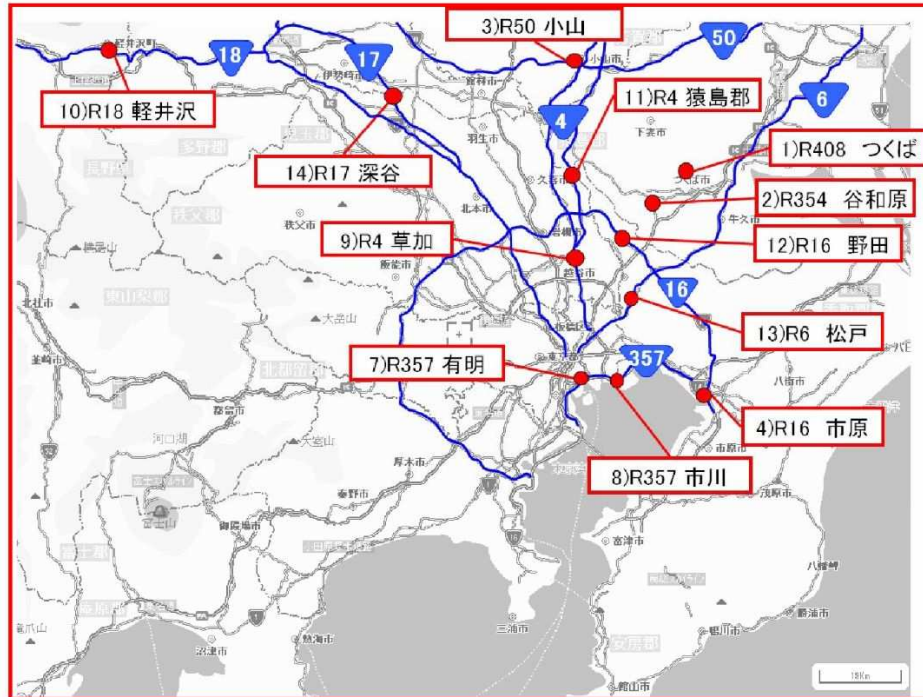


図 2-8 活荷重調査箇所一覧（関東）[32]

国総研資料での走行車両は、軸間距離から判別した表 2-3 に示す 21 分類とされている。これは、BWIM により各調査地点で得られる車種に関するデータが、軸数と軸間距離のみであるためとしている。モジュラー型伸縮装置に用いる疲労基本荷重の検討では、21 分類された車種のうち、最遠軸距 3.0m 以下の小型車類（乗用車）が含まれる型式 2-1 (No.1) を除いた 20 分類の車両のデータを対象とした。それらのデータから求めた等価輪重と頻度、荷重損傷度を表 2-4 に示す（調査地点は調査当時の地名である）。ここで示す頻度は、1 日かつ 1 車線あたりの軸数である。伸縮装置には走行車両の輪荷重が繰返し直接作用するため、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労照査に用いる頻度には軸数が適していると考えた。また、その頻度に対応する疲労基本荷重は、等価輪重を考慮することとした。等価輪重は式 (2.3) により求めた。ここで、 P_i は輪重、 n_i は頻度（軸数）、そして $P_i^3 \times n_i$ は荷重損傷度である。国総研資料の車種別データ（軸重）では、軸重 0～50tf (0～490kN) までの範囲を 1tf (9.8kN) 刻みで区分し、車種ごとに、その軸重に対応する頻度を示している。荷重損傷度は、輪重の三乗と車種分類ごとに示される頻度の積である。よって、一つの重量区分ごとに 20 車種分の荷重損傷度が求められる。そして、各区分で求めた荷重損傷度の総和と頻度の総和から等価輪重を求める。なお、輪重の値は重量（軸重）区分の中間値の半分とし、頻度は 72 時間の計測軸数を単純に除した。タイヤ形式や形状の違いは考慮していない。

$$\text{疲労基本荷重(等価輪重)} W = \sqrt[3]{\frac{\sum(P_i^3 \times n_i)}{\sum n_i}} \quad \dots (2.3)$$

ここで、 P_i ：輪重（重量（軸重）区分の中間値の半分）

n_i ：車種分類ごとに示される P_i に対応する頻度

$P_i^3 \times n_i$ ：荷重損傷度

（車種分類ごとに求まる P_i に対応する損傷度）

表 2-3 車種分類一覧（BWIM データを用いた分類）[32]

No.	軸数	型式	イメージ図	車種	軸間距離条件(m)				
					L1	L2	L3	L4	L5
1	2軸	2-1		乗用車類、ラフタークレーン	$0 < L1 \leq 3.0$				
2	2軸	2-2		単車、普通トラック、バス、トラクタ	$3.0 < L1 \leq \infty$				
3	3軸	3-1		単車、セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$1.6 \leq L2 < 10.5$			
4	3軸	3-2		単車、普通トラック、バス、トラクタ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$			
5	3軸	3-3		普通トラック	$0 < L1 < 1.6$	$1.6 \leq L2 < 10.5$			
7	4軸	4-1		単車、セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$1.6 \leq L2 < 10.5$	$0 < L3 < 1.6$		
8	4軸	4-2		セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$1.6 \leq L3 < 10.5$		
9	4軸	4-3		単車	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$0 < L3 < 1.6$		
10	4軸	4-4		単車、普通トラック	$0 < L1 < 1.6$	$1.6 \leq L2 < 10.5$	$0 < L3 < 1.6$		
11	4軸	4-5	その他4軸車	その他	-	-	-		
12	5軸	5-1		セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$1.6 \leq L2 < 10.5$	$0 < L3 < 1.6$	$0 < L4 < 1.6$	
13	5軸	5-2		フルトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$1.6 \leq L3 < 10.5$	$1.6 \leq L4 < 10.5$	
14	5軸	5-3		単車、セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$1.6 \leq L3 < 10.5$	$0 < L4 < 1.6$	
15	5軸	5-4		単車	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$0 < L3 < 1.6$	$0 < L4 < 1.6$	
16	5軸	5-5		フルトレーラ	$0 < L1 < 1.6$	$1.6 \leq L2 < 10.5$	$1.6 \leq L3 < 10.5$	$1.6 \leq L4 < 10.5$	
17	5軸	5-6	その他5軸車	その他	-	-	-	-	
18	6軸	6-1		セミトレーラ	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$1.6 \leq L3 < 10.5$	$0 < L4 < 1.6$	$0 < L5 < 1.6$
19	6軸	6-2		単車	$1.6 \leq L1 < 10.5$	$0 < L2 < 1.6$	$0 < L3 < 1.6$	$0 < L4 < 1.6$	$0 < L5 < 1.6$
20	6軸	6-3		単車	$0 < L1 < 1.6$	$1.6 \leq L2 < 10.5$	$0 < L3 < 1.6$	$0 < L4 < 1.6$	$0 < L5 < 1.6$
21	6軸	6-4	その他6軸車	その他	-	-	-	-	-

表 2-4 には、都市高速道路の走行車線で実施された活荷重実態調査[34]から、乗用車を除いて求められた等価輪重とその頻度も示している。等価輪重の頻度は、72時間の測定で検出した大型車交通量（17,294 台）を 3 で除し、さらに大型車の平均軸重 3.5 を乗じて求めている。

表 2-4 等価輪重とその頻度，荷重損傷度[32,34]（その 1）

路線名	調査地点	対象橋梁		車線 数	等価輪重 P_i (kN)	頻度 n_i (軸/日/車線)	荷重損傷度 ($P_i^3 \times n_i$)
国道 408号	茨城県 つくば市	蓮沼橋	上り線	2	30.4	1,051	29,401,197
			下り線	2	34.8	834	280,630,581
国道 304号	茨城県 谷和原村	福岡橋	上り線	2	35.6	2,060	93,183,138
			下り線	2	37.4	671	35,016,973
国道 50号	栃木県 小山市	小山 高架橋	上り線	2	39.3	4,099	248,517,285
			下り線	2	45.6	1,361	128,889,998
国道 16号	千葉県 市原市	甲子橋	上り線	2	50.0	4,733	590,113,300
			下り線	2	45.8	4,549	437,153,846
国道 45号	青森県 八戸市	河原木 跨道橋	上り線	2	33.6	617	23,438,906
			下り線	2	42.4	924	70,654,846
国道 13号	山形県 村山市	村山大橋	上り線	2	40.5	1,589	105,952,865
			下り線	2	42.8	1,355	106,121,014
国道 357号	東京都 江東区	曙橋	上り線	2	33.9	13,042	506,318,866
国道 357号	千葉県 市川市	美浜大橋	上り線	2	19.5	11,937	88,389,056
			下り線	2	15.7	9,154	35,136,031
国道 4号	埼玉県 草加市	草加 高架橋	上り線	2	33.0	3,845	138,343,131
			下り線	2	33.6	2,986	113,760,545
国道 18号	長野県 軽井沢町	さかい橋	上り線	1	35.4	17,822	790,420,949
			下り線	1	32.9	17,418	618,878,858
国道 4号	茨城 県境町	境跨道橋	上り線	1	42.0	13,699	1,017,346,569
			下り線	1	38.9	11,733	691,276,958
国道 16号	千葉県 野田市	中里 跨道橋	上り線	2	31.8	6,417	205,852,788
			下り線	2	34.8	7,401	311,193,892
国道 6号	千葉県 松戸市	小山 跨道橋	上り線	2	38.2	5,941	331,526,668
			下り線	2	29.6	4,548	118,048,338
国道 4号	埼玉県 深谷市	備前渠橋	上り線	1	30.7	26,854	776,684,169
			下り線	1	29.8	27,937	738,670,332

表 2-4 等価輪重とその頻度，荷重損傷度[32,34]（その 2）

路線名	調査地点	対象橋梁		車線数	等価輪重 (kN)	頻度 (軸/日/車線)	荷重損傷度 ($P_i^3 \times n_i$)
国道 1 号	静岡県 島田市	島田第一 高架橋	上り線	2	30.1	9,690	263,131,488
			下り線	2	36.0	9,639	450,051,585
国道 22 号	愛知県 一宮市	北方 高架橋	上り線	2	31.4	2,802	86,897,717
			下り線	2	32.1	5,598	185,629,553
国道 23 号	愛知県名古屋 屋市南区	港南第二 跨道橋	上り線	3	55.4	15,728	2,667,202,628
			下り線	3	39.4	30,356	1,861,982,941
国道 19 号	長野県 山口村	地藏橋	上り線	1	29.9	9,720	260,915,043
			下り線	1	32.3	9,783	330,442,490
国道 2 号	広島県 東広島市	八本松 高架橋	上り線	2	30.1	5,330	145,554,074
			下り線	2	30.9	5,315	157,116,517
国道 2 号	広島県 尾道市	西藤 高架橋	上り線	2	30.1	5,734	156,435,519
			下り線	2	31.8	3,829	123,205,028
国道 2 号	山口県 下松市	末武橋	上り線	2	35.1	7,117	308,490,160
			下り線	2	37.4	6,499	341,031,432
都市高速道路			走行車線		40.7	20,178	1,360,142,573

国総研資料に示されたデータから求めた荷重損傷度は、国道 23 号（愛知県名古屋市南区）で最も大きい。モジュラー型伸縮装置用の疲労基本荷重とその頻度は、等価輪重と軸数のデータに基づき、将来予測も含めて設定すべきと考える。

2.4.2 疲労基本荷重の補正係数

疲労基本荷重に用いる等価輪重には、モジュラー型伸縮装置の荷重伝達メカニズムを考慮し、衝撃，リバウンド，荷重分担などの補正係数を乗じる必要がある。ここでは、実物大試験体と試験車両を用いた走行試験により衝撃とリバウンド，そして水平方向力を，静的載荷試験により荷重分担の検討を行う。

実物大試験体は，図 2-9 と図 2-10 に示す日本鑄造（株）の構内に設置されたモジュラー型伸縮装置（マウラージョイント E-320 型，長さ 3,700mm）である。ミドルビームの数は 3 である。そのミドルビームを支えるサポートビームの間隔は 1,400mm であ

る。図 2-9 の斜線部は、ミドルビームとサポートビームが溶接で接合されている箇所を示している。試験車両は、図 2-11 に示す 3 軸のダンプトラックである。その寸法諸元を図 2-12 に示す。タイヤの規格は 11R22.5 14PR、空気圧は標準的な前輪 750kPa、後輪 800kPa とした。

試験車両を載荷あるいは走行させた際に実物大試験体のミドルビームに生じる応力度を測定するため、図 2-13 に示すように、ミドルビーム下面のスパン中央の位置にひずみゲージを 2 枚貼り付けた。また、試験車両の走行位置は図中に示す B 寸法で表す。図 2-14 に示すように、試験車両を走行させる前に、ミドルビームの表面にカラーズプレーを塗布している。試験車両の通過後にミドルビーム端部からの距離を測定することで走行位置を求める。

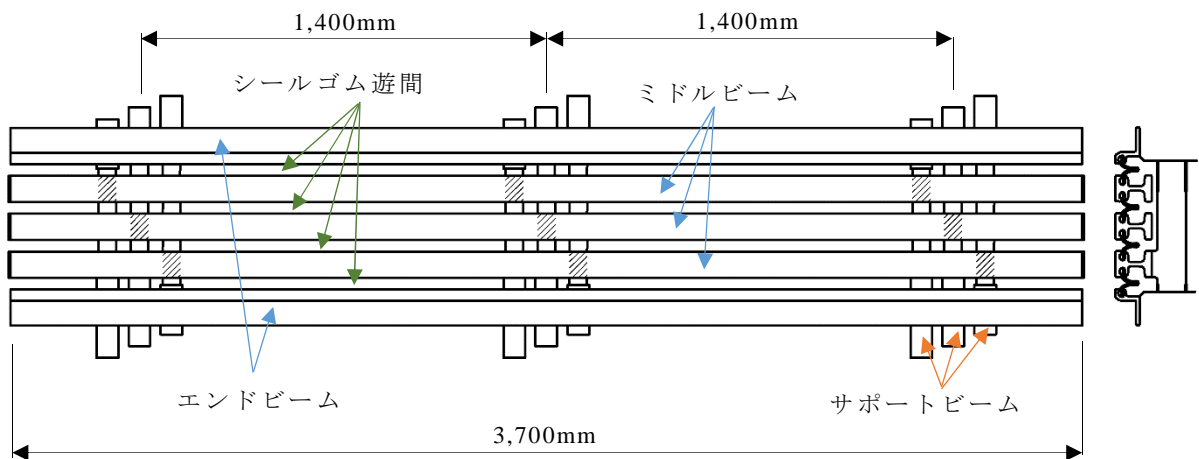


図 2-9 モジュラー型伸縮装置の実物大試験体

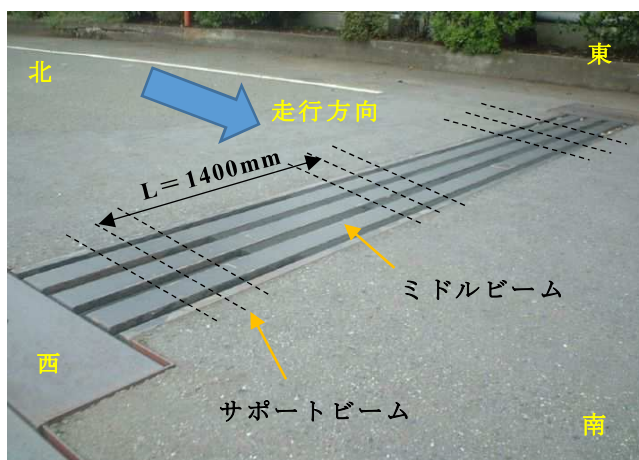


図 2-10 実物大試験体



図 2-11 試験車両(3軸ダンプトラック)

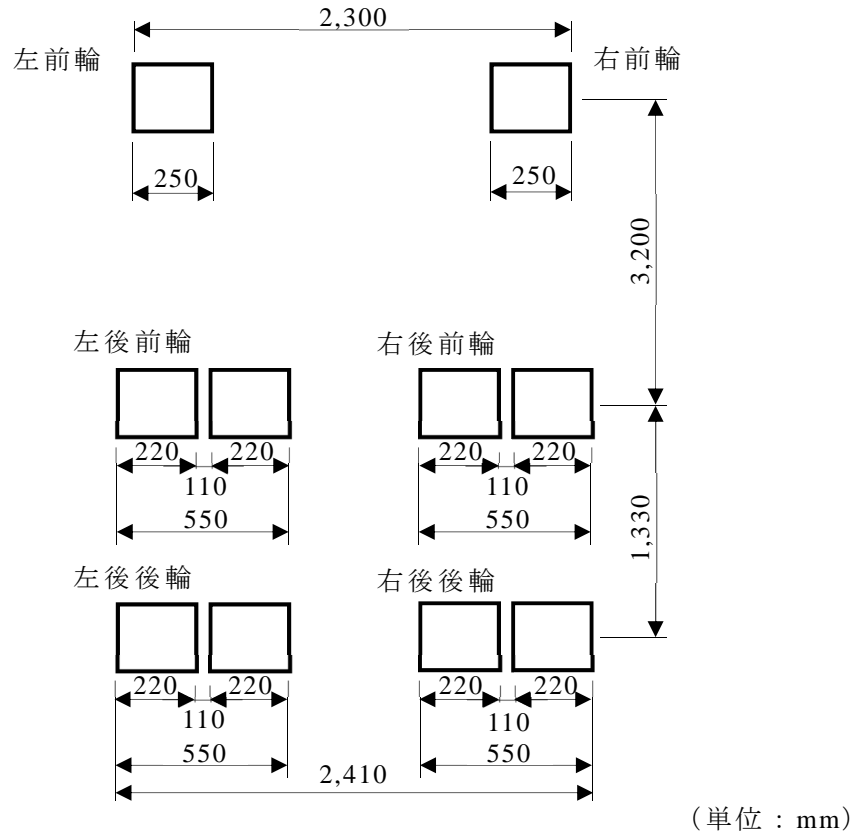


図 2-12 試験車両の寸法諸元

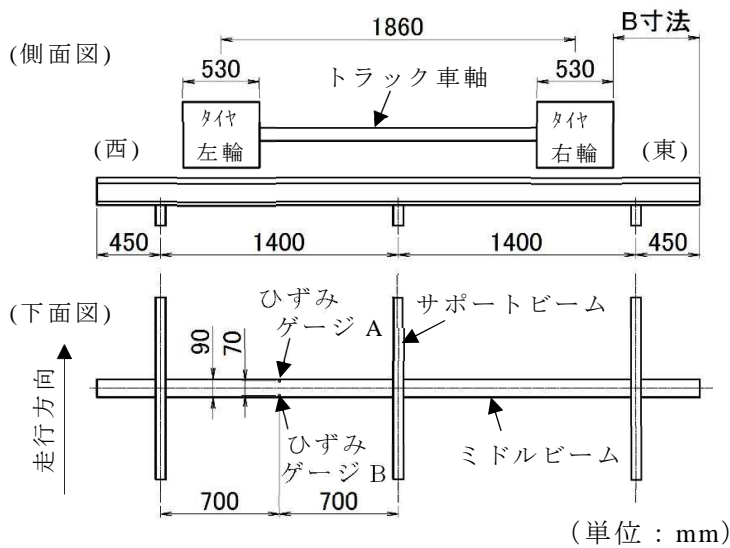


図 2-13 ひずみゲージの貼付位置



図 2-14 走行位置の確認方法

(1) 衝撃とリバウンド

衝撃の影響は、走行試験で測定したひずみから求めた応力度と三次元骨組構造で求める応力度を比較することで検討する。衝撃の影響は、一般に走行試験による実測値

を静的載荷試験の実測値で除して求める。しかし、今回用いた静的載荷試験結果では、遊間 60mm と 80mm のデータが不足していたため、ここでは三次元骨組構造と比較した。三次元骨組構造のモデルを図 2-15 に示す。図中の A,B,C は溶接接合部の名称、サポートビームの支点近傍に示す x,y,z は拘束条件である。接合部の剛性は、各ビームと同じである。なお、ここでは荷重の大きい後輪で検討を行った。解析に用いた荷重は、表 2-5 に示す試験車両の後輪の輪重である。荷重の載荷幅は、図 2-16 に示すタイヤの接地寸法を参考に 530mm とした。走行試験で測定したひずみの値は、ミドルビームの下面に貼り付けた 2 枚のひずみゲージの測定値を平均することとした。

走行試験のパラメータは、ミドルビームとミドルビーム間のシールゴム遊間 (40,60,80mm) と試験車両の走行速度 (5,25,50km/h) である。50km/h は構内安全上の最大速度である。使用した測定機器は、グラフテック (株) のリニアレコーダ (WR-9000) と (株) 共和電業の動ひずみ測定器 (MCC-16A) である。測定速度は 2kHz とした。

図 2-17～図 2-19 に、後輪 (後前輪と後後輪) 通過時に得られたひずみにより求めた応力度と走行位置 (B 寸法) の関係をシールゴム遊間ごとに示す。各図中に示す走行試験での応力度は、後前輪あるいは後後輪通過時に得られた最大のひずみ値を用いて求めたものである。また、各図中には三次元骨組構造で求めた応力度を示すとともに、

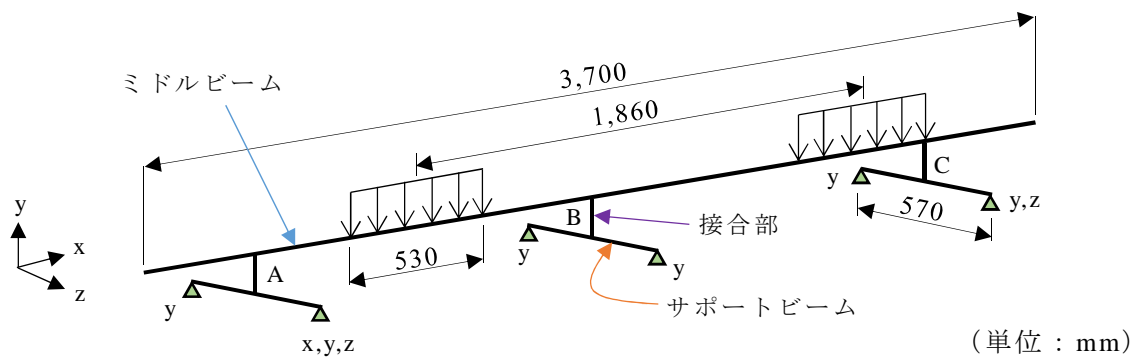


図 2-15 実物大試験体の三次元骨組構造モデル

表 2-5 試験車両の輪重 (衝撃・リバウンド用)

	輪重 (kN)
前輪	21.5
後前輪	18.9
後後輪	18.9

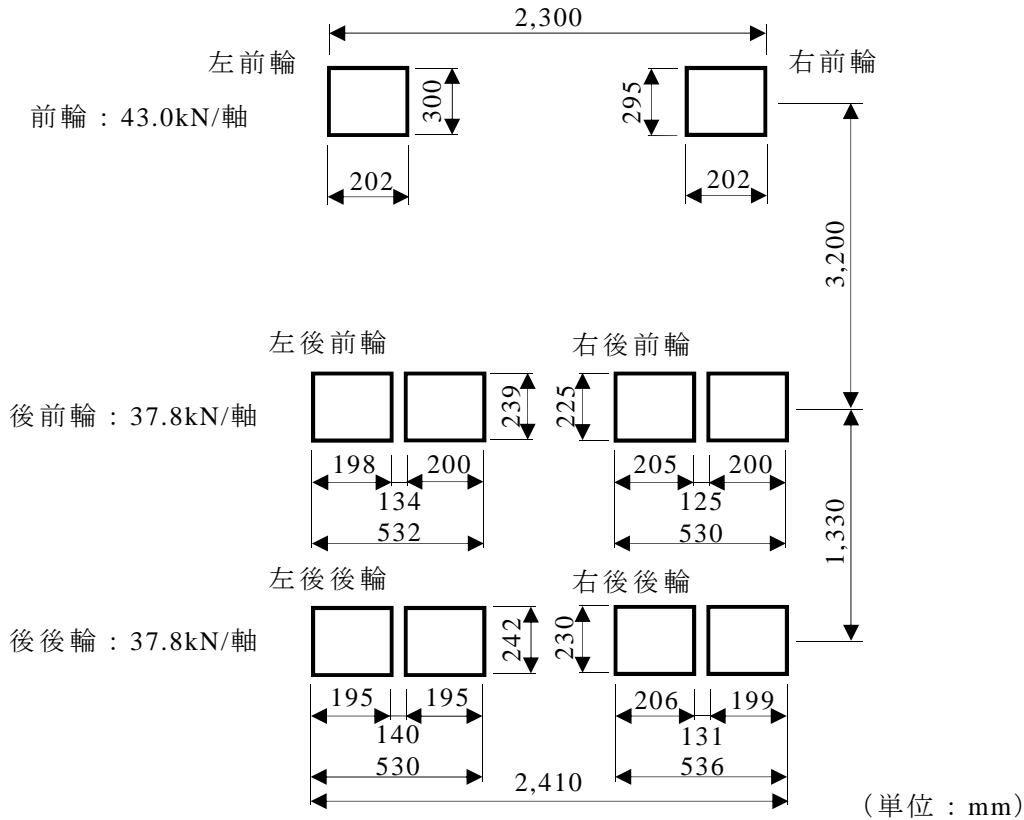


図 2-16 試験車両の接地寸法（衝撃・リバウンド用）

後述する荷重分担を考慮して、三次元骨組構造で求める応力度にシールゴム遊間に応じた補正係数（0.6～0.8）を乗じた値も示している．走行試験で得られたひずみから求めた応力度は，シールゴム遊間の影響を受けていない．また，三次元骨組構造で求めた応力度に対し，走行速度 5km/h でやや小さく，50km/h では多少大きくなる傾向を示している．なお，図 2-17 には，静的載荷試験で得られたひずみにより求めた応力度も示している．その値は，三次元骨組構造で求めた値よりも多少小さい箇所があるものの，ほぼ等しいものとする．また，荷重分担を考慮し，三次元骨組構造で求めた応力度に 0.6～0.8 の補正係数を乗じた値との比は 0.9～2.3 程度であり，応力度の大きい走行位置 400～600mm の範囲では 0.9～1.8 程度である．

衝撃係数 (i) は，先に述べたように，三次元骨組構造で求めた応力度と走行試験で得られたひずみから求める応力度を用いて算出する．その値の最大は，シールゴム遊間 40mm，車両の走行位置 790mm の場合で 1.38 程度であった．その条件で得られた応力度と時間の関係を図 2-20 に示す．図中には，三次元骨組構造により求めた値を赤の点線で示している．

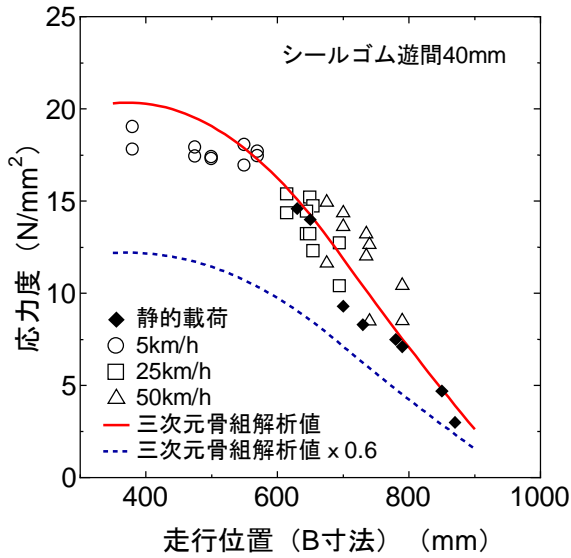


図 2-17 応力度と走行位置の関係
(遊間 40mm)

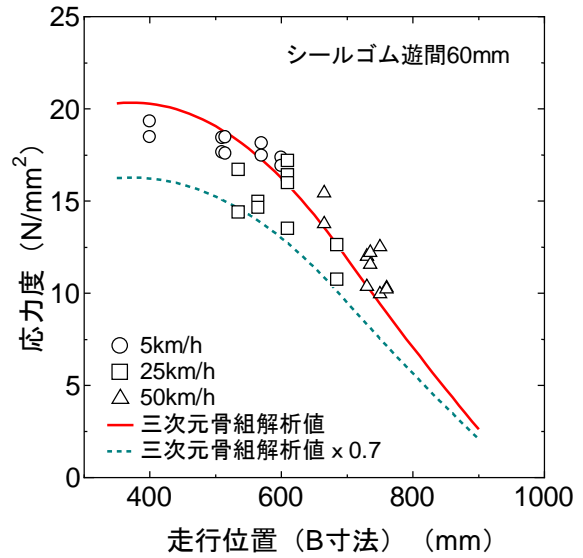


図 2-18 応力度と走行位置の関係
(遊間 60mm)

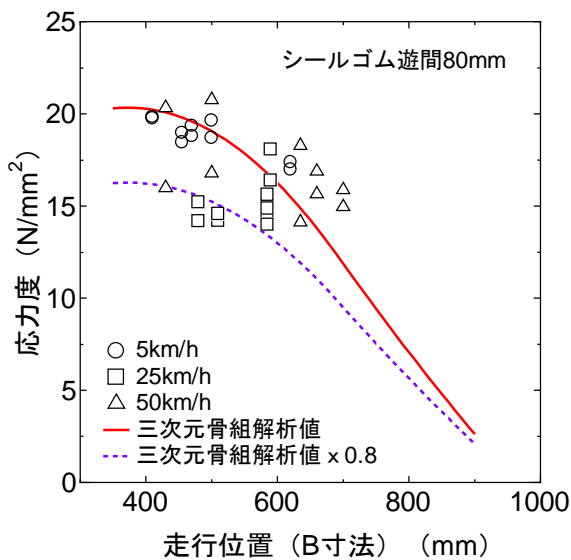


図 2-19 応力度と走行位置の関係
(遊間 80mm)

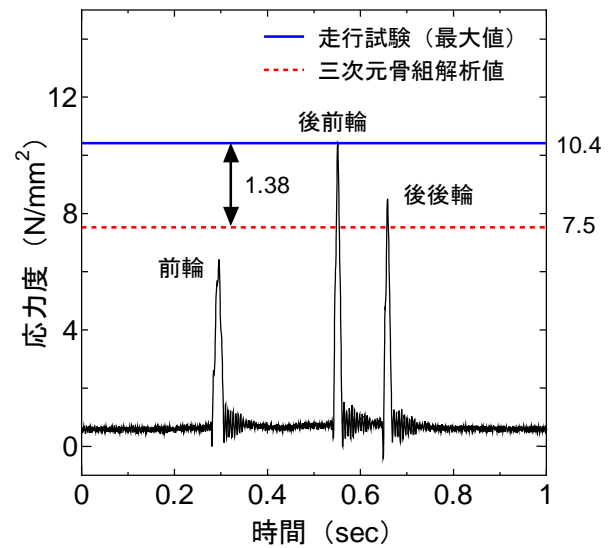


図 2-20 走行試験で得られた応力波形
(遊間 40mm, 走行位置 790mm)

走行速度 50km/h でのリバウンド係数とシールゴム遊間の関係を図 2-21 に示す。その最大は 0.07 であった。リバウンド係数は、図 2-5 で示したように、車両の走行によりミドルビームに生じる鉛直正方向（下向き）の応力に対する負方向の応力の比である。なお、走行速度 5km/h と 25km/h では、リバウンドは確認されなかった。

このことから、走行速度の影響を加味した検討が必要であるが、衝撃係数 (i) を 0.4、リバウンド係数 (α_R) を 0.1 と仮定した場合、車両の走行により生じる応力度は、三

次元骨組構造で求められる値の 1.54 倍となる $((1+i) \times (1+\alpha_R))$. なお, 各国の基準に示されている値は, アメリカで 1.75, ドイツで 1.69 ($i=0.3, \alpha_R=0.3$) である.

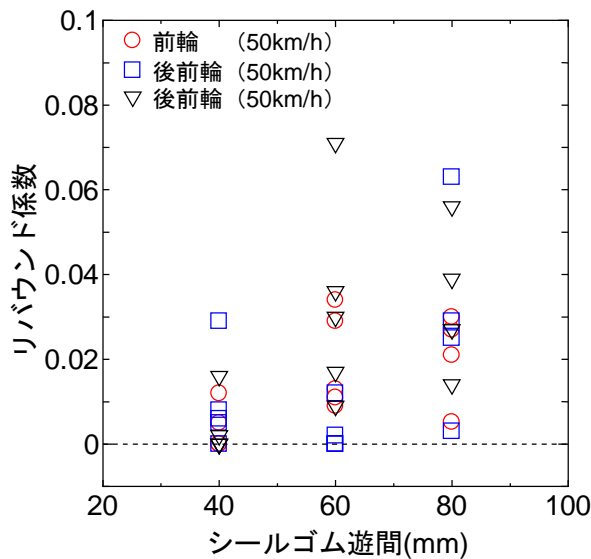


図 2-21 リバウンド係数とシールゴム遊間の関係

(2) 荷重分担

荷重分担は, 図 2-22 (a) に示すように, 中央のミドルビームのみに軸重を載荷した場合と図 2-22 (b) に示す中央のミドルビーム位置で試験車両を停車させた場合 (パラメータとするシールゴム遊間 (ミドルビームとミドルビーム間) は 40,60,80mm) で測定したひずみの値を比較することで検討した. それぞれの計測におけるひずみの値は, ここでもミドルビームの下面に貼り付けた 2 枚のひずみゲージから得られた値の平均とした. 測定に使用した機器は, (株) 東京測器研究所のデータロガー (TDS-303) である. 荷重分担の検討で用いた試験車両のタイヤの接地寸法を図 2-23~図 2-25 に, 試験車両の輪重を表 2-6 に示す.



(a) 中央のミドルビームに載荷

(b) 3 本のミドルビームに載荷

図 2-22 輪重のミドルビームへの載荷状況

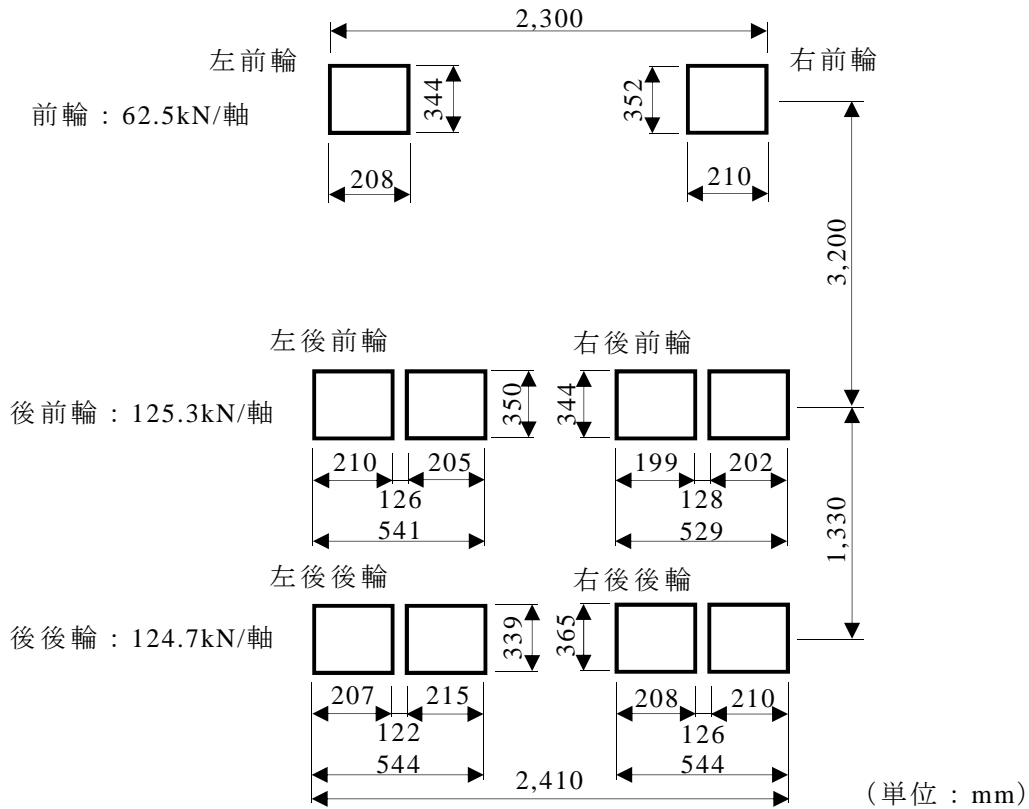


図 2-23 荷重分担計測時の試験車両のタイヤ接地寸法（ケース 1）

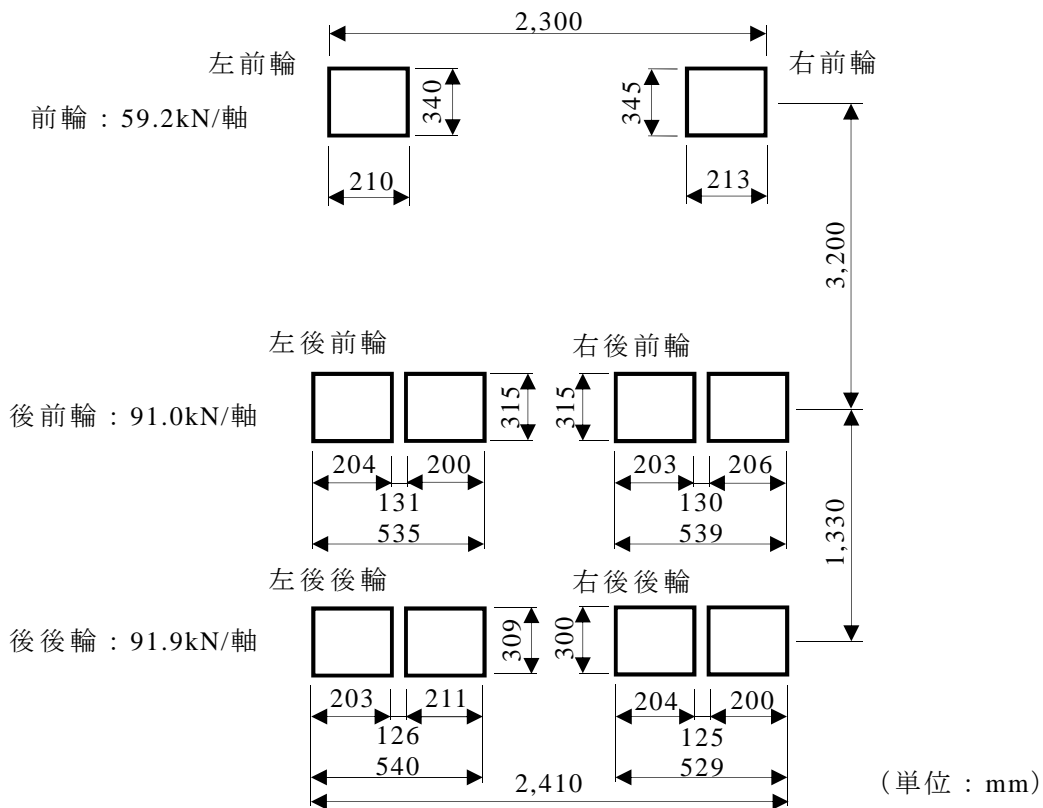


図 2-24 荷重分担計測時の試験車両のタイヤ接地寸法（ケース 2）

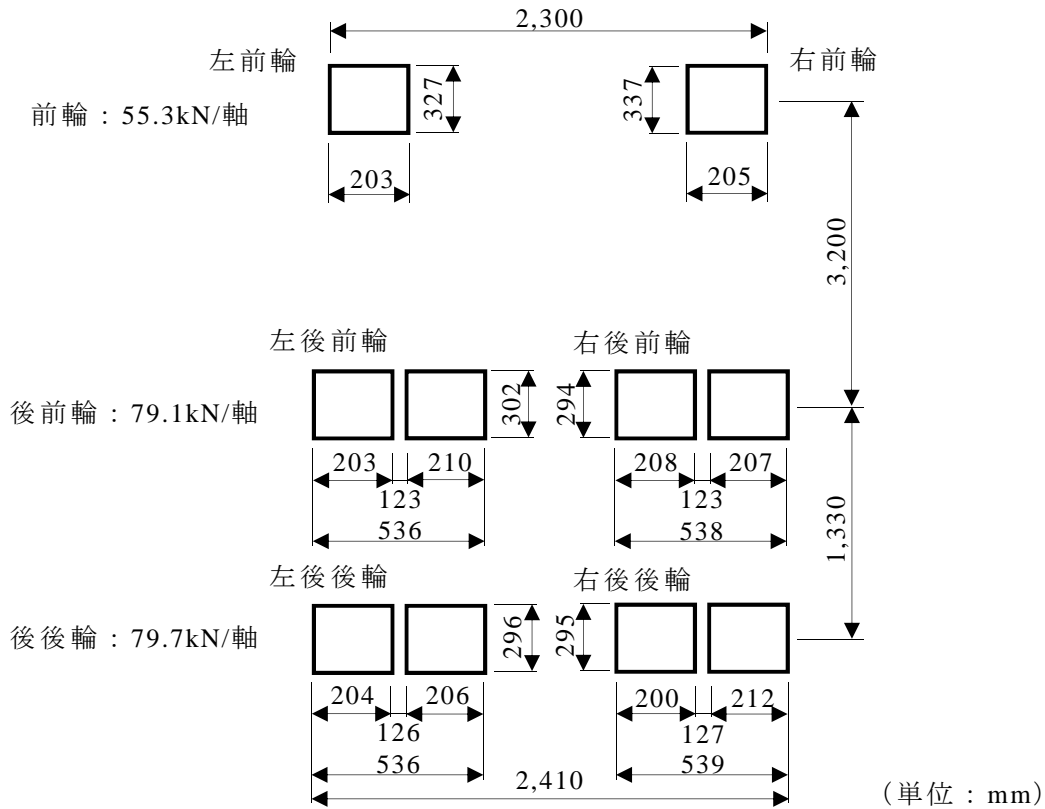


図 2-25 荷重分担計測時の試験車両のタイヤ接地寸法 (ケース 3)

表 2-6 試験車両の輪重 (荷重分担用)

	輪重 (kN)		
	ケース 1	ケース 2	ケース 3
前輪	31.3	29.6	27.7
後前輪	62.7	45.5	39.6
後後輪	62.4	46.0	39.9

図 2-26 に中央のミドルビームの荷重分担率と一輪の荷重の関係を示す。ここでは、輪重の大きい後輪の結果を示す。一輪の荷重が大きくなると一つのミドルビームで分担する荷重 (荷重分担率) は小さくなっている。また、シールゴム遊間を大きくすると荷重分担率は大きくなっている。シールゴム遊間ごとの荷重分担率は、輪重を 65kN 程度とした場合に、40mm で 60% 程度、60mm で 65% 程度、そして 80mm で 70% 程度であった。なお、例えば最も軸重が大きいケース 1 において、後輪タイヤの接地長さは 350mm 程度である。ミドルビームの幅は 90mm であるから、シールゴム遊間が 40mm の場合には、3 本のミドルビームにタイヤが載ることになる。すなわち、タイヤの接

地長さから求められる荷重分担率は 0.33 となるが，静的載荷試験では 0.55 程度となっている．このように，シールゴム遊間とタイヤの接地長さから単純に荷重分担率を求めた場合，必ずしも安全側とならない可能性があることに注意が必要と考える．

各国の基準に示されている荷重分担率は，ドイツで 50～60%程度，アメリカで 65%程度としている．タイヤのサイズや軸重などが異なるものの，シールゴム遊間 40mmの結果の分担率と同程度となっている．なお，ここでの分担率は，輪重が静的に作用した場合である．動的荷重下については検討する必要があると考えている．

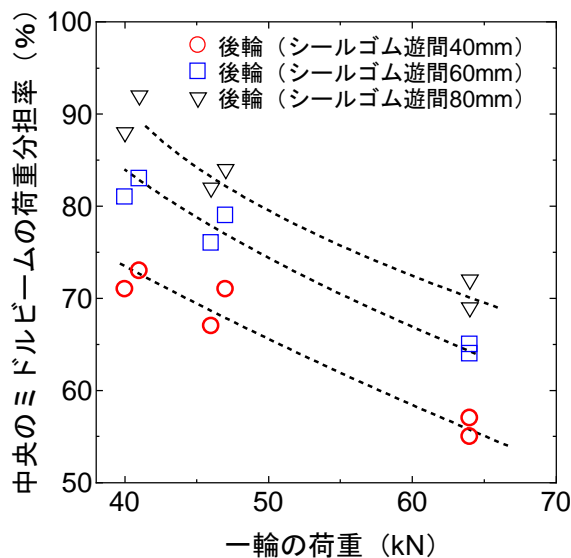


図 2-26 中央のミドルビームの荷重分担率と一輪の荷重の関係

(3) 水平方向力

ドイツやアメリカでは，疲労荷重として，鉛直方向力に加えて，車両の制動等により生じる水平方向力も考慮されている．ここでは，走行試験で得られたひずみ測定結果を利用して水平方向力の検討を行った．実物大試験体のミドルビーム下面のスパン中央位置には，図 2-13 に示したように，ひずみゲージを 2 枚貼付している．そこで，式 (2.4) により鉛直方向力に対する水平方向力の割合を求めた．分母に示す鉛直方向力は，輪重通過時のひずみ値 (A と B の平均) の最大とした．また，分子に示す水平方向力は，2 枚のひずみゲージで測定した値の差分である．A'は軸重通過時にひずみ (A) で測定した値の最大であり，その時刻のひずみ (B) の測定値を B'とした．すなわち，鉛直方向力と水平方向力の測定時刻は異なっているものの，ここでは安全側をみて，このように整理した水平方向力の割合を鉛直方向力に補正係数として与えることを考えた (水平方向力を考慮した補正係数： α_h)．

鉛直方向力に対する水平方向力の割合と走行位置の関係をシールゴム遊間ごとに図 2-27～図 2-29 に示す。走行速度 50km/h の結果には、ノイズの影響と思われる大きなばらつきが見られたため示していない。今後、走行速度の影響をさらに検討する必要があるものの、鉛直方向力に対する水平方向力の割合（水平方向力を考慮した補正係数： α_h ）は 0.1～0.2 程度であった。

$$\text{鉛直方向力に対する水平方向力の割合} = \frac{\frac{(A' - B')}{2}}{\frac{(A + B)}{2}} \quad \dots (2.4)$$

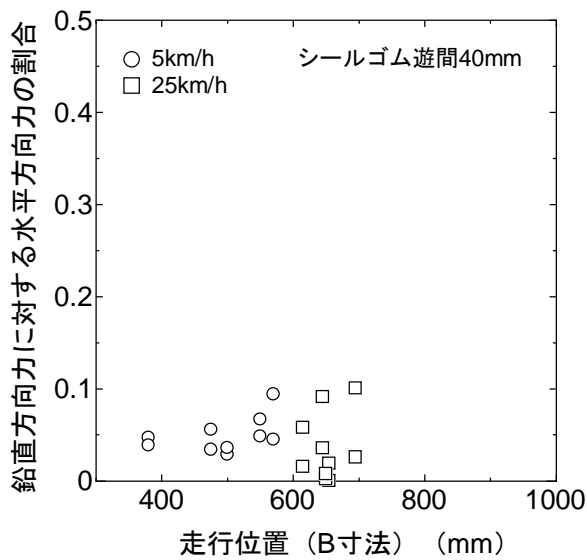


図 2-27 水平割合と走行位置の関係
(遊間 40mm)

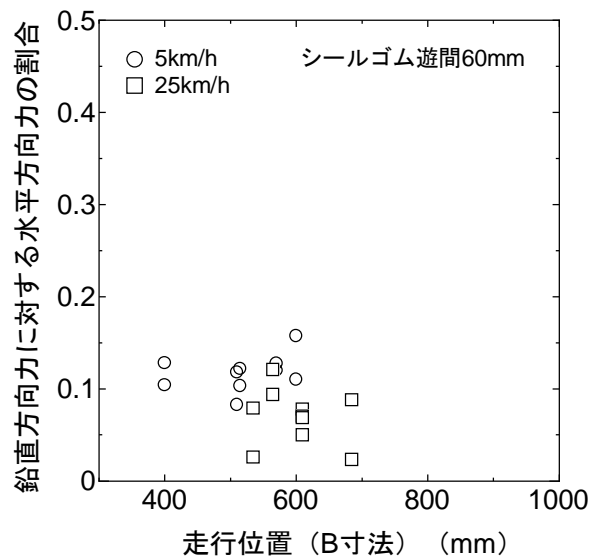


図 2-28 水平割合と走行位置の関係
(遊間 60mm)

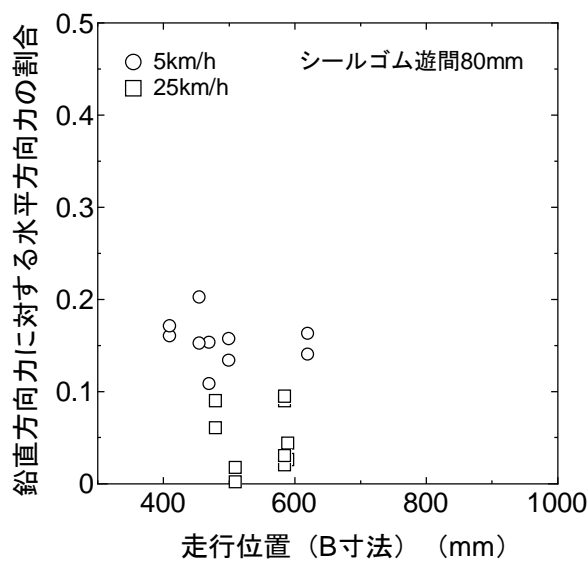


図 2-29 水平割合と走行位置の関係 (遊間 80mm)

2.4.3 応力計算法

疲労基本荷重に疲労基本荷重を補正する係数を乗じた疲労荷重により溶接部に生じる公称応力は，サポートビームを支点とした連続梁として求められるのが通常である．しかし，実際はベアリングで支えられるサポートビームの上にその直角方向にミドルビームが溶接されている．ここでは，このような構造を可能な限り再現できるように，図 2-30 に示すような，ミドルビームとサポートビームの上下位置を考慮した三次元骨組構造を用いて，サポートビームとミドルビームの断面力を求め，公称応力を計算する．図中の A～E は溶接接合部（以下，接合部と記す）の名称，サポートビームの支点近傍に示す x,y,z は拘束条件である．なお，接合部の剛性は，各ビームと同じである．

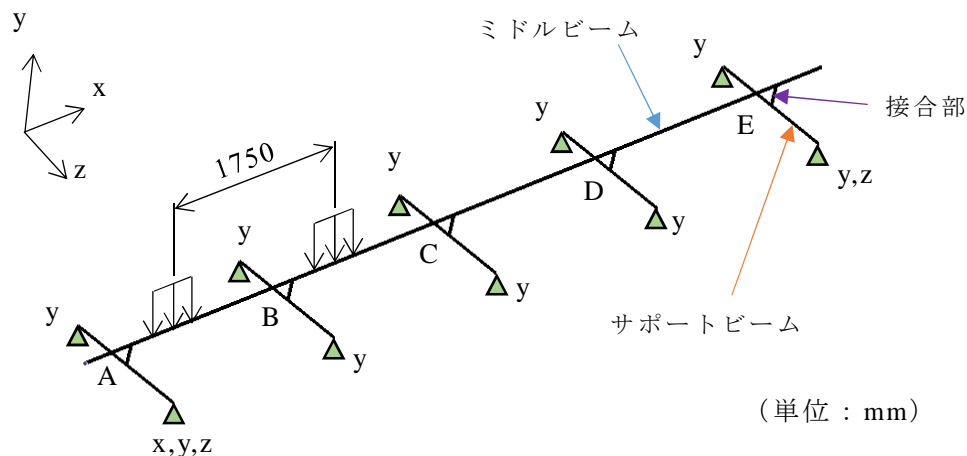


図 2-30 三次元骨組構造の例

(1) 計算方法が公称応力に与える影響

2.2 節で述べたように，モジュラー型伸縮装置の断面設計では三連モーメント式で断面力を算出している．そこで，三連モーメント式と三次元骨組構造で求める曲げモーメントの比較検討を行った．対象モデルは，三連モーメント式で図 2-2，三次元骨組構造では図 2-30 である．図 2-1 に示した T 荷重を図 2-2 に示す位置に載荷した．すなわち，T 荷重の片輪の載荷幅の中心位置がミドルビームの端部から $0.4L$ 離れた箇所となるように載荷した（図 2-30 に示す三次元骨組構造のモデルでは，接合部 A から $0.4L$ 離れた箇所）．サポートビームのピッチ (L) は $1,400\text{mm}$ である．三次元骨組構造の解析モデルにはバー要素を用い，要素寸法は 50mm とした．解析モデルの作成には，有限要素解析用プリ・ポストソフトウェア Femap11.2.1 を用いた．解析は汎用解析プログラム NX Nastran を用いて行った．鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比は

0.3とした。得られた両者の曲げモーメントを表 2-7 に示す。ここでは、最大の曲げモーメントが生じる接合部 B (図 2-30 参照) の値を示す。三次元骨組構造で求めた値が三連モーメント式で算出した値よりもミドルビームで 4%，サポートビームで 1%小さい程度であり、大きな差はない。しかし、三次元骨組構造による値がより正確であることや計算が容易に行えることを踏まえて、モジュラー型伸縮装置溶接部の公称応力の算出には、三次元骨組構造を用いるのがよいと考える。なお、ここではミドルビームの断面設計と同様に 4 径間モデルとする。

表 2-7 三連モーメント式と三次元骨組構造で求めた曲げモーメント

	三連モーメント式 (A) (kN・m)	三次元骨組構造 (B) (kN・m)	(B) ÷ (A)
ミドルビーム	-19.6	-18.8	0.959
サポートビーム	-17.8	-17.7	0.994

(2) 作用させる疲労荷重の載荷幅が公称応力に与える影響

ミドルビームやサポートビームに生じる断面力は、疲労荷重の載荷幅により変化すると考えられる。道示に示される T 荷重の 1 輪あたりの橋軸直角方向の載荷幅は、図 2-1 に示したとおり 500mm であるが、実際のタイヤの接地寸法は異なる。そこで、載荷幅をパラメータとして、輪重 100kN とした場合に接合部に生じる曲げモーメントの影響線を三次元骨組構造により求めた。パラメータとした載荷幅を図 2-31 に示す。ダブルタイヤの載荷幅は、一輪 200mm のシングルタイヤを 2 つ組合せ、タイヤとタイヤの隙間は 100mm とした。解析では、図 2-32 と図 2-33 に示すように、それぞれ片輪のみをミドルビームに作用させた。サポートビームの間隔は 1,400mm である。解析モデルの寸法を図 2-34 に示す。解析モデルの作成方法や材料特性、そして解析に用いたソフトなどは (1) で示した三次元骨組構造の解析モデルと同じである。

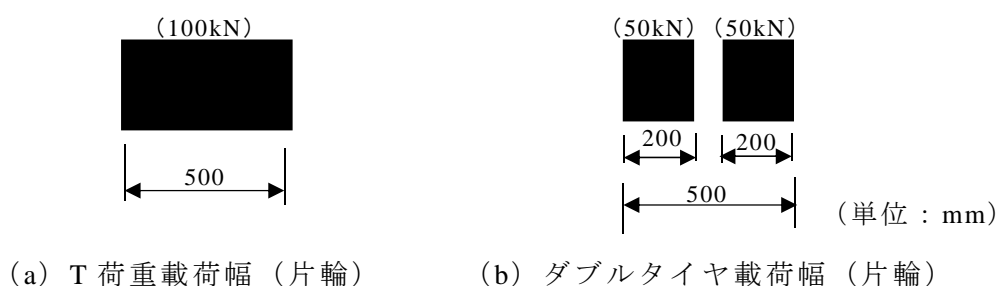


図 2-31 載荷幅のパラメータ

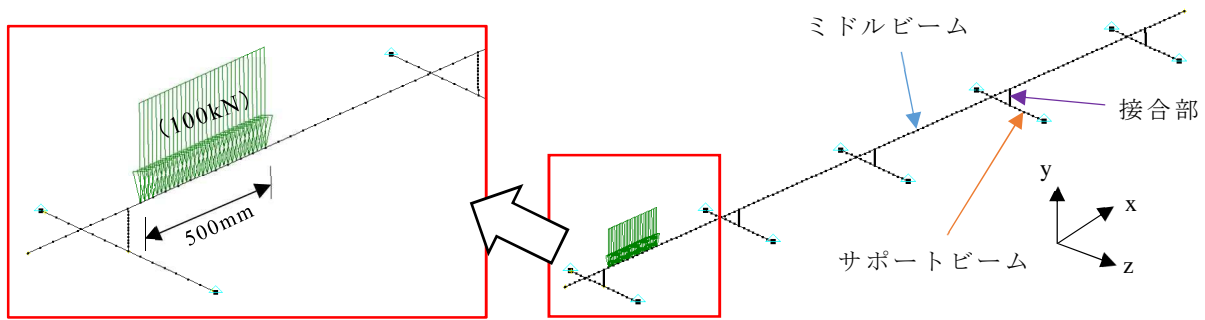


図 2-32 解析モデル (T 荷重の片輪)

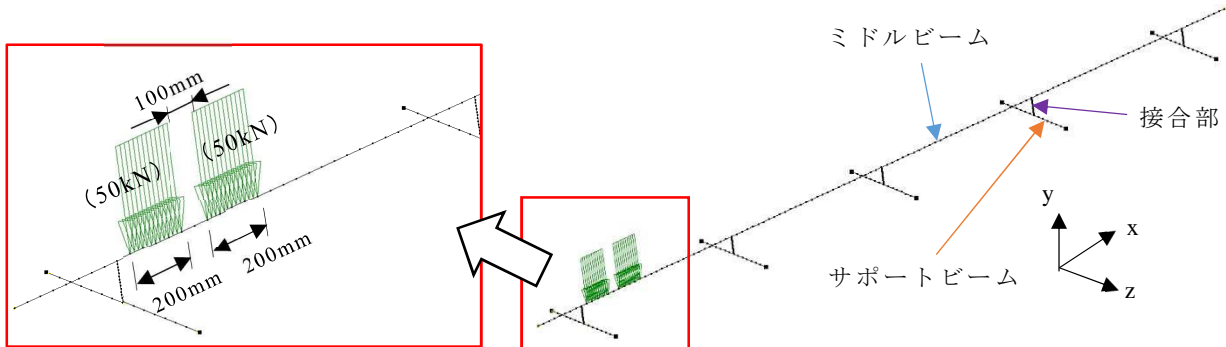
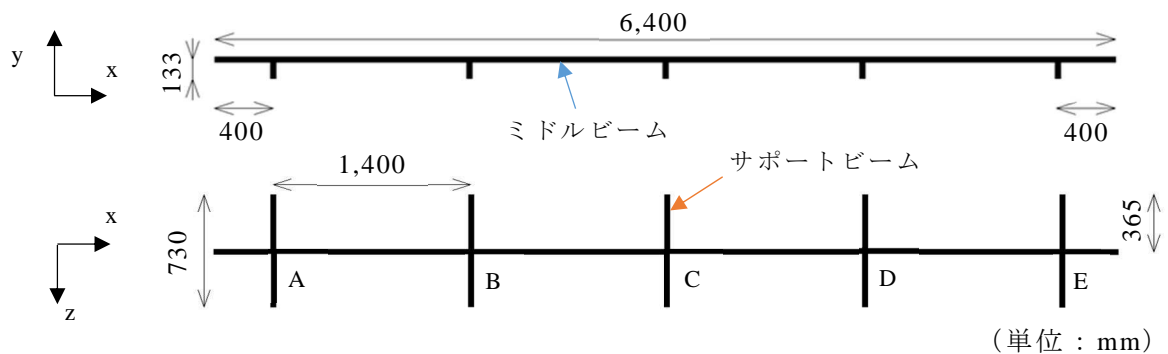


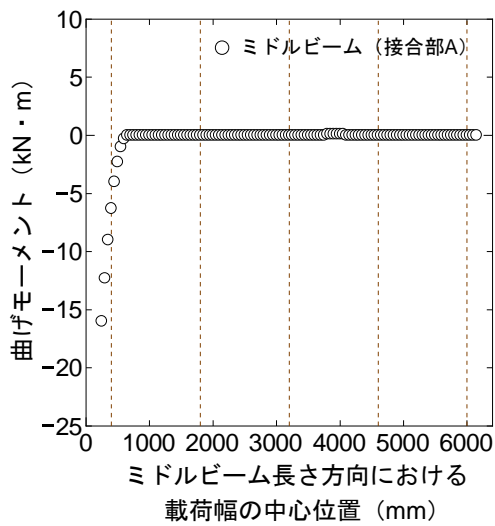
図 2-33 解析モデル (ダブルタイヤの片輪)



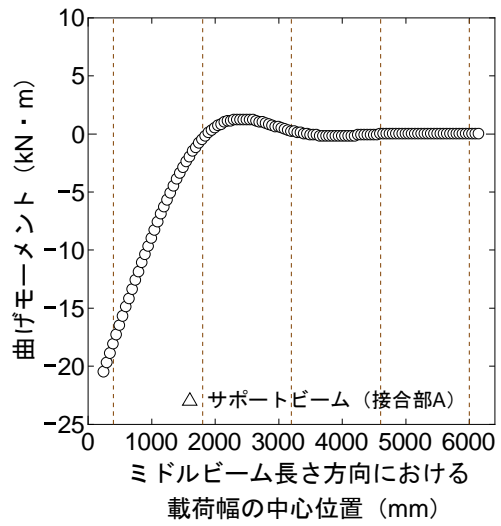
(単位：mm)

図 2-34 解析モデルの寸法

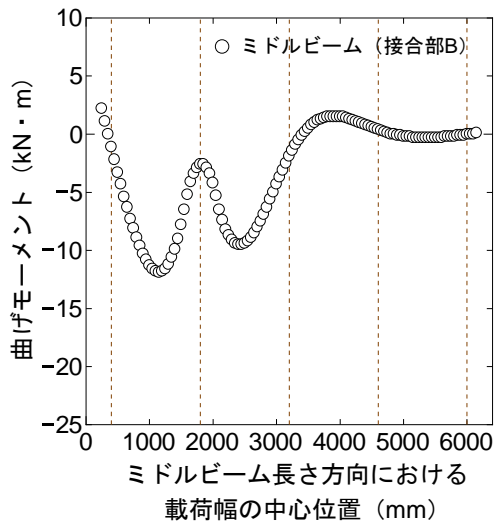
解析により得られたミドルビームとサポートビーム接合部に生じる曲げモーメントの影響線を図 2-35 に示す。図 2-35 は T 荷重の片輪を載荷した場合の結果である。これらの値は、ミドルビームで z 軸周り、サポートビームで x 軸周りである。引張力を生じさせる曲げモーメントが正である。また、ここで示した接合部は、解析の対称性を考慮して A, B, C とした。図の横軸は、T 荷重の片輪の載荷幅の中心位置である。これらの影響線から得られる最大の曲げモーメントを表 2-8 に示す。表の値は、図 2-36 に示す接合部近傍の左右の要素のうち、各ビームとも大きな方である。各ビームの曲げモーメントにタイヤの形状による大きな違いはみられない。このことから、等価輪重の載荷幅は T 荷重の 500mm を用いてもよいと考える。



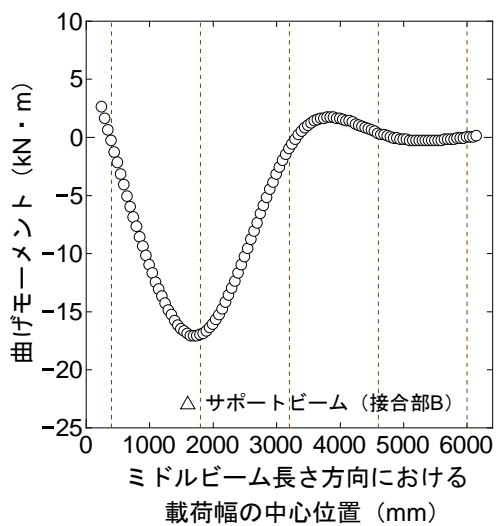
(a) 接合部 A (ミドルビーム)



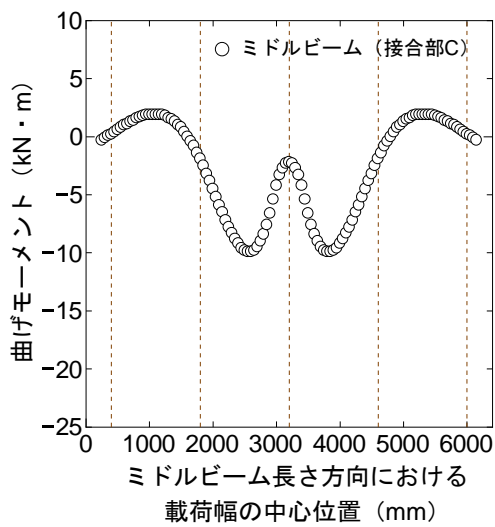
(b) 接合部 A (サポートビーム)



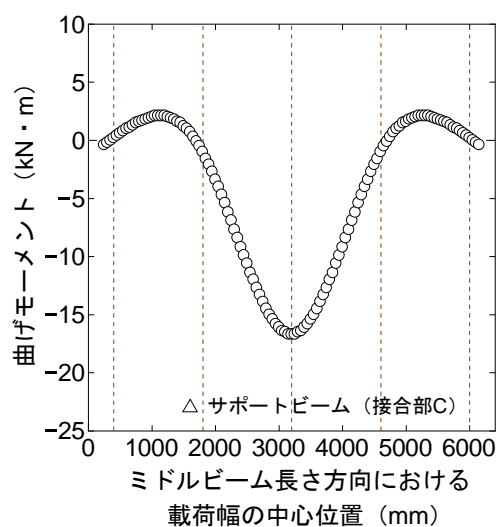
(c) 接合部 B (ミドルビーム)



(d) 接合部 B (サポートビーム)



(e) 接合部 C (ミドルビーム)



(f) 接合部 C (サポートビーム)

図 2-35 接合部の曲げモーメントの影響線 (T 荷重の片輪を載荷)

表 2-8 載荷幅と曲げモーメントの関係

接合部記号	ミドルビームの曲げモーメント M_z (kN・m)		サポートビームの曲げモーメント M_x (kN・m)	
	T 荷重	ダブルタイヤ	T 荷重	ダブルタイヤ
接合部 A	-16.0	-16.3	-20.5	-20.5
接合部 B	-11.9	-11.7	-17.1	-17.1
接合部 C	-9.9	-9.8	-16.7	-16.6
接合部 D	-11.9	-11.7	-17.1	-17.1
接合部 E	-16.0	-16.3	-20.5	-20.5

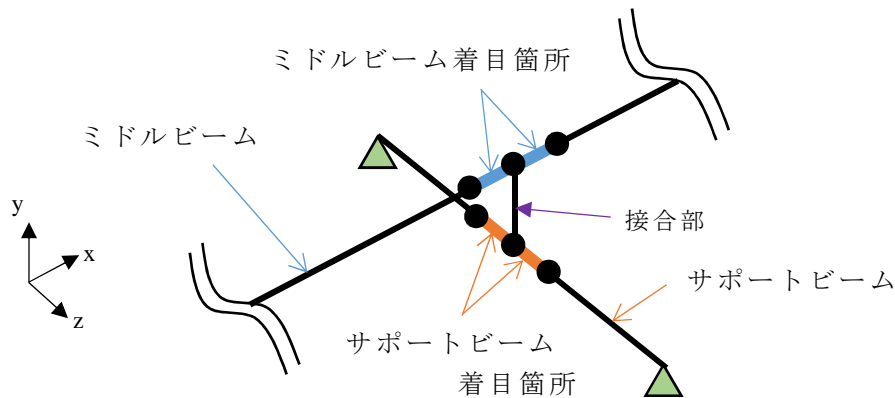
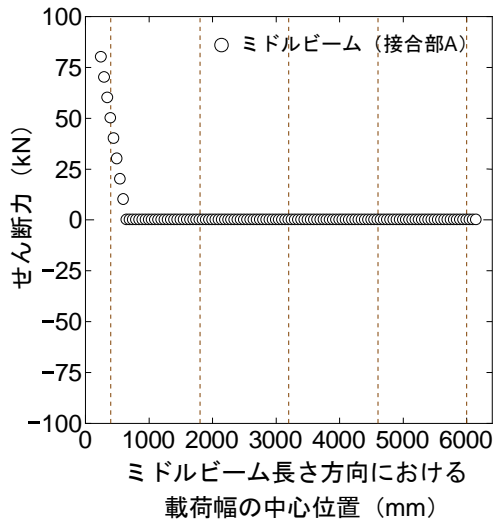


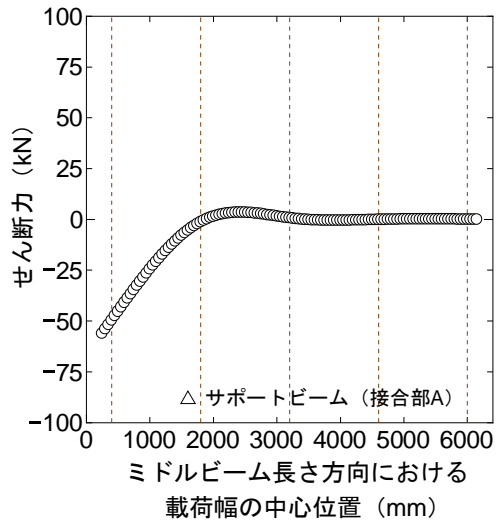
図 2-36 接合部近傍のミドルビームとサポートビームの着目箇所

(3) せん断力と軸力の影響

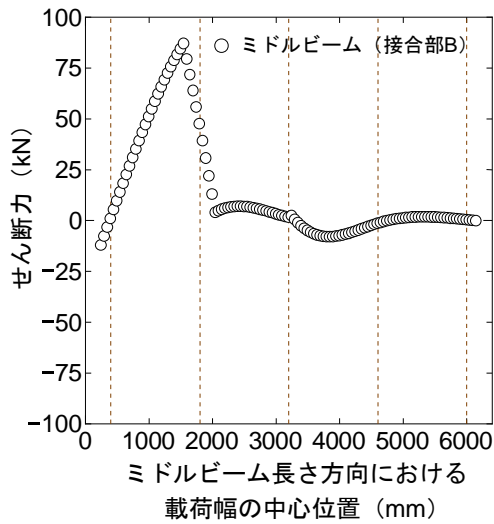
モジュラー型伸縮装置に作用する断面力は、曲げモーメントの他に、せん断力や軸力などが考えられる。そこで、図 2-32 に示したモデルの解析で得られたミドルビームとサポートビーム接合部に生じるせん断力の影響線を図 2-37 に、軸力の影響線を図 2-38 に示す。図中に示す縦軸は、それぞれの断面力の値、横軸はミドルビーム長さ方向で荷重載荷幅の中心位置である。荷重は、T 荷重の片輪 (100kN) を載荷させた。図 2-37 に示すせん断力は、ミドルビームで 80kN 程度、サポートビームで 50kN 程度であるものの、疲労き裂が生じると考えられる溶接止端は鋼材表面である。鋼材表面のせん断力は 0 であることから、疲労強度に与える影響は小さいと考えられる。また、図 2-38 に示す軸力は、曲げモーメントに比べて極めて小さい。そのため、疲労強度に与える影響はないと考えられる。



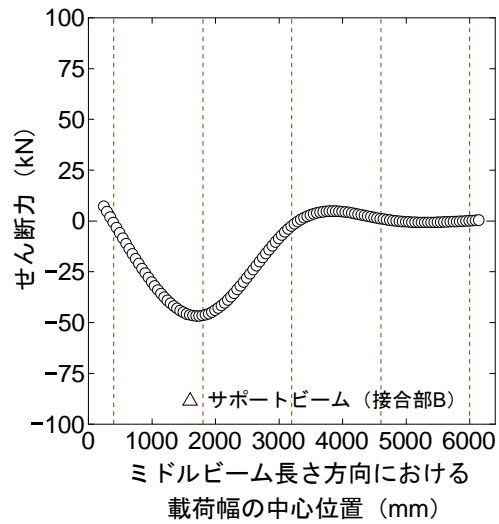
(a) 接合部 A (ミドルビーム)



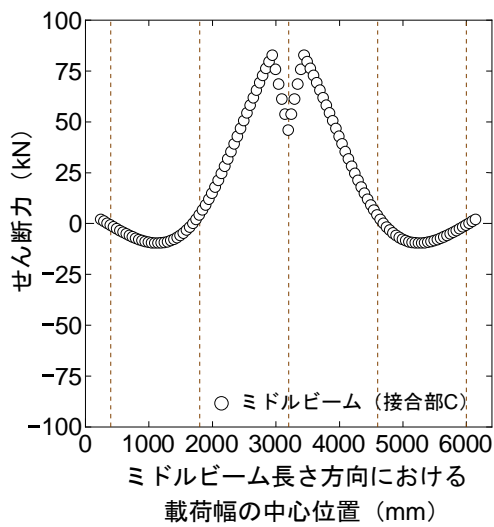
(b) 接合部 A (サポートビーム)



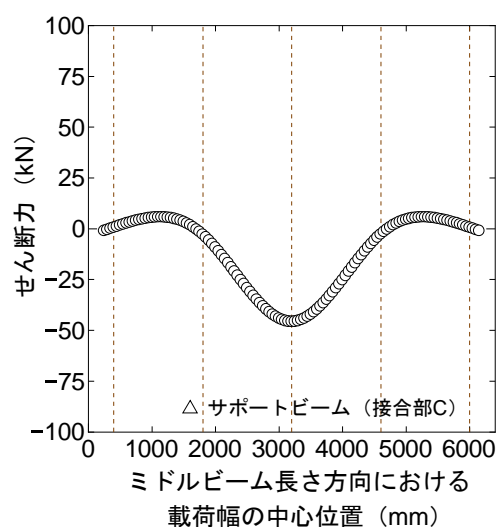
(c) 接合部 B (ミドルビーム)



(d) 接合部 B (サポートビーム)

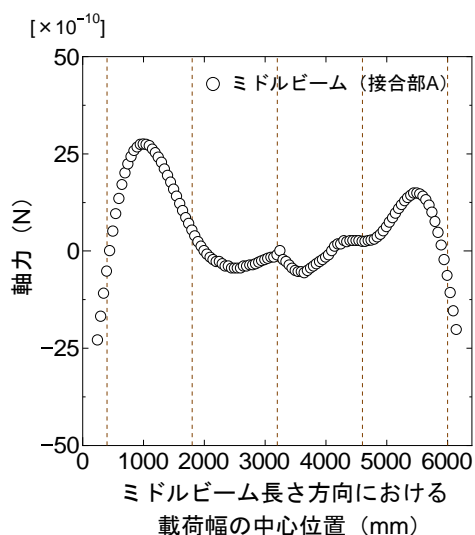


(e) 接合部 C (ミドルビーム)

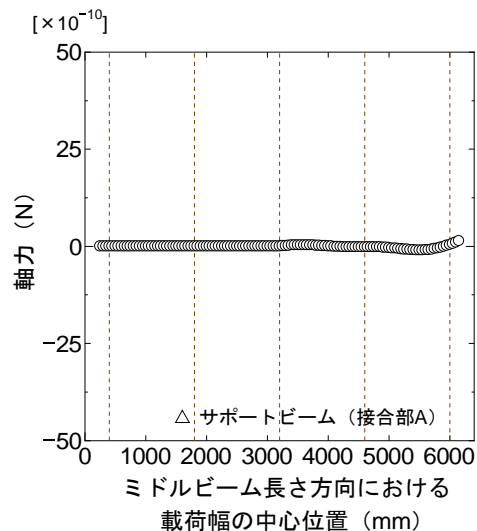


(f) 接合部 C (サポートビーム)

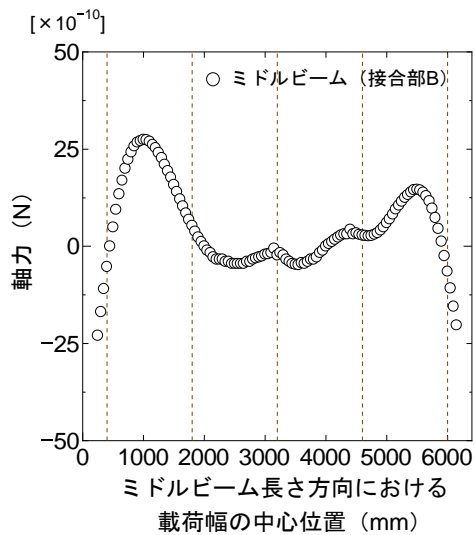
図 2-37 接合部のせん断力の影響線 (T 荷重の片輪を載荷)



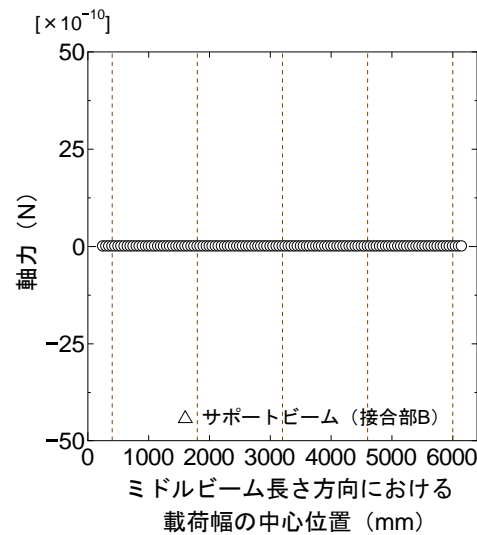
(a) 接合部 A (ミドルビーム)



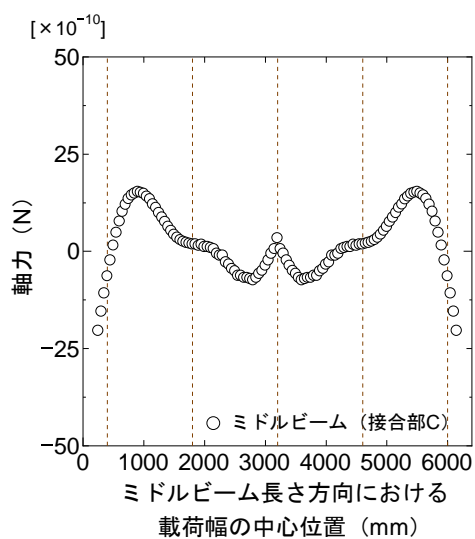
(b) 接合部 A (サポートビーム)



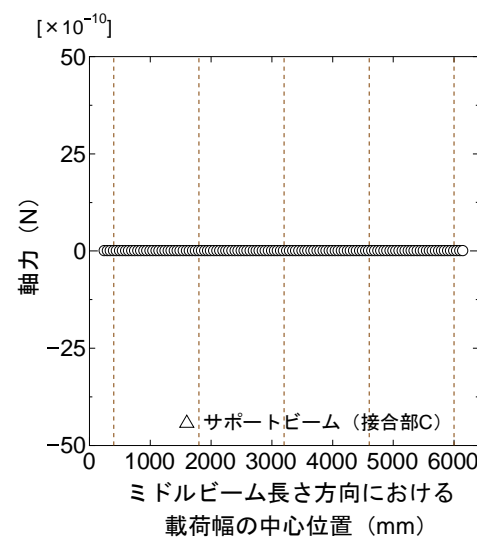
(c) 接合部 B (ミドルビーム)



(d) 接合部 B (サポートビーム)



(e) 接合部 C (ミドルビーム)



(f) 接合部 C (サポートビーム)

図 2-38 接合部の軸力の影響線 (T 荷重の片輪を載荷)

(4) 車両の走行位置が公称応力に与える影響

表 2-8 に示した曲げモーメントは、接合部に生じる公称応力が最大となる位置に荷重を載荷して求められている。しかし、車両の走行位置は、ある程度のばらつきを有するものと考えられる。鋼構造物の疲労設計指針・同解説[35]に示される、都市高速道路で行われた大型車の橋軸直角方向走行位置の調査では、97%の車両が±400mm ($\sigma = 200\text{mm}$) の範囲を走行したとされている。また、都市高速道路で行われた調査結果[34,36]では、幅員により数値が異なるものの、3.25m の場合で $\sigma = 179\text{mm}$ 、3.5m の場合で $\sigma = 266\text{mm}$ となっている。これらの数値はいずれもトラック類の場合である。トレーラー類では、幅員 3.25m で $\sigma = 165\text{mm}$ 、3.5m で $\sigma = 254\text{mm}$ である。車幅が大きくなるため、ばらつきが小さくなったものと考えられる。ただし、トラックとトレーラーのいずれの場合においても、幅員が広くなることによって、走行位置のばらつきは大きくなっている。ここでは、大型車が $\sigma = 200\text{mm}$ で走行すると考え、図 2-32 に示した解析モデルを例として、断面力の分布（走行位置荷重補正係数）の検討を行う。

図 2-39 は、T 荷重を作用させた場合の接合部 B のミドルビームの曲げモーメントの影響線である。この図は、図 2-35 (c) に示した T 荷重の片輪 (100kN) を載荷した場合の曲げモーメントの影響線に基づき、T 荷重の場合で 1,750mm 離れた位置にある隣の車輪を考慮して、その位置の曲げモーメントを足し合わせたものである。図の横軸は、ミドルビームに作用させる T 荷重の片輪 (左輪) の載荷幅の中心位置である。接合部 B に最大曲げモーメントが生じる荷重の載荷位置は、左輪の載荷幅の中心が 950mm である。この位置を中心として±400mm (2σ) の範囲を対象と考えた。各位置の曲げモーメントを最大曲げモーメントで無次元化した断面力比 (λ_i) と左輪の走行位置の関係を図 2-40 に示す。図中には、左輪の走行範囲を 100mm ごととした場合で正規分布に従った走行割合 (n_i) も示している。断面力比 (λ_i) と走行割合 (n_i) から式 (2.5) を用いて求められる走行位置荷重補正係数 (α_{hl}) は 0.92 となる。走行位置荷重補正係数は、このような考えに基づき、トレッド幅なども考慮して設定するべきと考える。

$$\text{走行位置荷重補正係数 } \alpha_{hl} = \sqrt[3]{\frac{\sum(\lambda_i^3 \times n_i)}{\sum n_i}} = 0.92 \quad \dots (2.5)$$

ここで、 λ_i : 断面力比

n_i : 走行割合

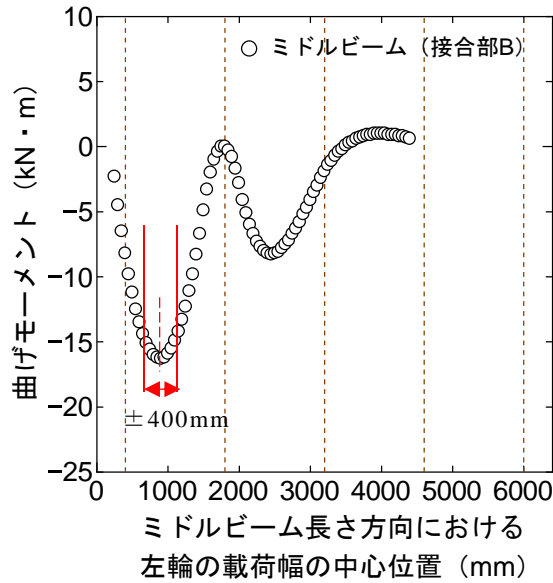


図 2-39 接合部 B の曲げモーメントの影響線 (T 荷重を載荷)

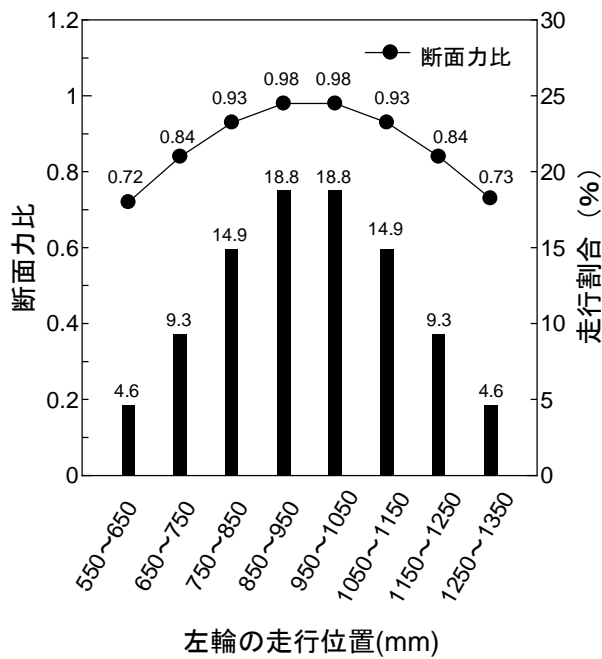


図 2-40 断面力比，走行割合と左輪の走行位置

2.5 まとめ

本章では，モジュラー型伸縮装置の現行の断面設計法と溶接部に対する疲労照査法を示した．疲労照査法では，国内外の手法の整理を行うとともに，疲労照査に必要なとなる疲労荷重，応力計算法，疲労強度，そして疲労照査法の考え方を示した．ここで示した主な内容は以下のとおりである．

- (1) モジュラー型伸縮装置の断面設計で用いる力は、道路橋示方書に示される床版および床組を設計する場合の活荷重（T 荷重）に衝撃係数（ $i=0.4$ ）を考慮した値である。その際に用いるミドルビームの断面力は、サポートビームを支点とした 4 径間連続梁により三連モーメント法で算出されている。また、サポートビームの断面力は、ベアリングを支点とした単純梁として求められている。
- (2) 伸縮装置に対する具体的な耐久性評価法は、現在の道路橋示方書には示されていない。また、日本の NEXCO3 社で規定する耐久性評価手法により、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を求めることはできるものの、走行する活荷重の実態や衝撃やリバウンド、複数のミドルビームによる荷重分担の影響、そして溶接部の形状や寸法に依存する疲労強度などの検討を行う余地はある。ドイツやアメリカでは、モジュラー型伸縮装置に対する疲労照査法が定められている。しかし、車両特性や交通事情、溶接部の形状が各国で異なるため、日本のモジュラー型伸縮装置溶接部の耐久性評価に適用する疲労基本荷重と疲労荷重を求めるために必要となる補正係数、そして疲労強度の考え方を示した。
- (3) 疲労基本荷重には、等価輪重を用いることを考え、国土交通省国土技術政策総合研究所などで行われた活荷重の実態調査結果に基づき、等価輪重とその頻度の考え方を示した。疲労基本荷重とその頻度は、等価輪重と軸数のデータに基づき、将来予測も含めて設定すべきと考える。
- (4) 疲労基本荷重を補正する際に考慮すべき衝撃とリバウンド、荷重分担について、実物大試験体を用いた静的載荷試験と走行試験の結果を用いて検討した。その結果、走行速度の影響をさらに検討する必要があるものの、衝撃係数（ i ）を 0.4、リバウンド係数（ α_R ）を 0.1 と仮定した場合、車両の走行により生じる応力度は、三次元骨組構造で求めた応力度の 1.54 倍となる。各国の基準に示されている値は、アメリカで 1.75、ドイツで 1.69（ $i=0.3$ 、 $\alpha_R=0.3$ ）である。シールゴム遊間ごとの荷重分担率（ α_s ）は、輪重を 65kN 程度とした場合に、40mm で 60%程度、60mm で 65%程度、そして 80mm で 70%程度であった。荷重分担率については、動的荷重下での検討が必要と考える。
- (5) 鉛直方向力に対する水平方向力の割合（水平方向力を考慮した補正係数）は、走行速度の影響をさらに検討する必要があるものの 0.1~0.2 程度であった。
- (6) 疲労荷重の作用によって溶接部に生じる公称応力は、三次元骨組構造を用いて求めることを提案した。
- (7) 車両の走行位置のばらつきを考慮する走行位置荷重補正係数（ α_{hl} ）の考え方につ

いて示した．軸重の載荷範囲を±400mm とした場合の走行位置荷重補正係数は0.92 となった．

以上より，疲労荷重は，等価軸重の半分の等価輪重（ W ）を疲労基本荷重とし，その値に衝撃係数（ i ），リバウンド係数（ α_R ），荷重分担率（ α_S ），水平方向力を考慮した補正係数（ α_h ），そして走行位置荷重補正係数（ α_{hl} ）を乗じて式（2.6）により求めることとした．

$$\text{疲労荷重} = \text{疲労基本荷重}(W) \times (1+i) \times (1+\alpha_R) \times \alpha_S \times \alpha_h \times \alpha_{hl} \quad \dots (2.6)$$

ここで， W ：疲労基本荷重（等価輪重）

i ：衝撃係数

α_R ：リバウンド係数

α_S ：荷重分担率

α_h ：水平方向力を考慮した補正係数

α_{hl} ：走行位置荷重補正係数

【参考文献】

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，丸善，平成 24 年 3 月。
- [2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，丸善，平成 24 年 3 月。
- [3] 関口幹夫，大石雅登：道路橋伸縮装置の補修に関する技術資料，平成 24 年度東京都土木技術支援・人材育成センター年報，pp.105-116，2012。
- [4] 日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧，昭和 45 年 4 月。
- [5] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，丸善，平成 14 年 3 月。
- [6] 日本道路ジョイント協会：伸縮装置設計の手引き，2014 年 7 月。
- [7] 日本橋梁建設協会：鋼橋伸縮装置設計の手引き，2009 年 9 月。
- [8] 道路保全技術センター：既設橋梁のノージョイント化工法の設計施工手引き（案），平成 7 年 1 月。
- [9] 北海道開発局：北海道開発局道路設計要領，平成 29 年 4 月。
- [10] 東北地方整備局：設計施工マニュアル（案）〔道路橋編〕，平成 28 年 3 月。
- [11] 北陸地方整備局：設計要領〔道路編〕，平成 29 年 4 月。
- [12] 国土交通省中部地方整備局道路部：道路設計要領－設計編－，2014 年 3 月。
- [13] 四国地方整備局：設計便覧（道路編）第 3 編道路編，平成 26 年 4 月。
- [14] 九州地方整備局：土木工事設計要領 第Ⅲ編道路編，平成 28 年 4 月。
- [15] 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針，2012 年 1 月。
- [16] 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：構造物施工管理要領，平成 29 年 7 月。
- [17] 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：設計要領第二集 橋梁建設編，平成 28 年 8 月。
- [18] 首都高速道路厚生会：伸縮装置設計・施工要領，平成 12 年 4 月。
- [19] Federal/State Engineering Committee for Bridge Construction : Technical delivery and inspection specifications for watertight expansion joints of road and foot bridges, (Technische Leitlinien/ Technische Prüfungsbestimmungen Fahrbahn-Übergänge Ausgabe 1992, TL/TP-FÜ 92), FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT (BMV), Road Construction Division, 1992.
- [20] European Organisation for Technical Approvals : GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of EXPANSION JOINTS FOR ROAD BRIDGES, Part one : GENERAL, ETAG N° 032, Edition of May 2013, 2013.3.

- [21]European Organisation for Technical Approvals : GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of EXPANSION JOINTS FOR ROAD BRIDGES, PART 8 : MODULAR EXPANSION JOINTS, ETAG N° 032, Edition of May 2013, 2013.3.
- [22]DEXTER, R.J., R.J.CONNOR, and M.R.KACZINSKI : Fatigue Design of Modular Bridge Expansion Joints, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 402, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1997.
- [23]American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition, 2014.
- [24]日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 平成 6 年 2 月.
- [25]八木貴之, 山田健太郎, 小塩達也 : 道路橋伸縮装置の疲労耐久性評価法の検討, 土木学会論文集 A, Vol.63 No.3, pp.486-495, 2007 年 7 月.
- [26]日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 丸善, 平成 8 年 12 月.
- [27]日本支承協会エクспанションジョイント分科会 : モジュラージョイント設計要領 (案), 平成 17 年 8 月.
- [28]Tschemmernegg, F., A.Pattis, and H.Wahlberg : Ermüdungsnachweis von Fahrbahnübergängen nach ENV-1993-1, STAHLBAU 64, pp.202-210, 1995.
- [29]European Committee for Standardization (CEN) : European Standard, Eurocode1- Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, EN1991-2, 2003.9.
- [30]日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 - 2012 年改訂版, 技報堂出版, 2012 年 6 月.
- [31]日本道路協会 : 鋼道路橋の疲労設計指針, 丸善, 平成 14 年 3 月.
- [32]国土交通省国土技術政策総合研究所 : 道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書 - 全国活荷重実態調査 -, 国土技術政策総合研究所資料第 295 号, 平成 18 年 1 月.
- [33]国土交通省国土技術政策総合研究所 : 道路橋の交通特性評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料第 188 号, 平成 16 年 7 月.
- [34]高田佳彦, 木代穰, 中島隆, 薄井王尚 : BWIM を応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響検討, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1456-1467, 2009 年 3 月.
- [35]日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, p.136, 1993 年 4 月.

[36] 閑上直浩，杉山裕樹，薄井王尚，仲田慶正：阪神高速道路における活荷重実態調査，土木学会年次学術講演会概要集 Vol.66，I -113，pp.225-226，2011.9.

第3章 完全溶け込み溶接の疲労強度

3.1 はじめに

ミドルビームとサポートビームの接合は、完全溶け込み溶接で行われている。これは、2002年3月、関越自動車道の永井川橋に設置されたモジュラー型伸縮装置のミドルビームの一部が外れたためである[1,2]。その原因は、ミドルビームとサポートビームの接合に用いられていたすみ肉溶接が、ルートを起点として疲労破壊したことにあるとされている。しかし、2012年5月には、重交通路線とされる伊勢湾岸自動車道において、完全溶け込み溶接部に疲労き裂が確認されている[3,4]。そのため、その疲労耐久性を評価する手法の確立が課題となっている。

疲労耐久性を評価する場合の溶接部の疲労強度は、先に述べたように、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」[5]（以後、JSSC指針と称する）や日本道路協会の「鋼道路橋の疲労設計指針」[6]等に示される継手の強度等級分類によるのが一般的である。しかし、モジュラー型伸縮装置の継手形式は、それらに示されるものに当てはめることが難しい。また、その疲労強度は、溶接部の寸法や形状に依存するが、それらの影響も明らかとはされていない。

本章では、図3-1に示すモジュラー型伸縮装置溶接部のミドルビーム側（以後、M溶接部と記す）の溶接止端とサポートビーム側（以後、S溶接部と記す）の溶接止端に生じる疲労き裂を対象とし、溶接部の寸法や形状の異なる試験体を対象とした疲労試験と有限要素応力解析を行う。そして、疲労耐久性評価に不可欠な疲労強度を明らかにし、JSSC指針に示される強度等級分類との対応を示す。

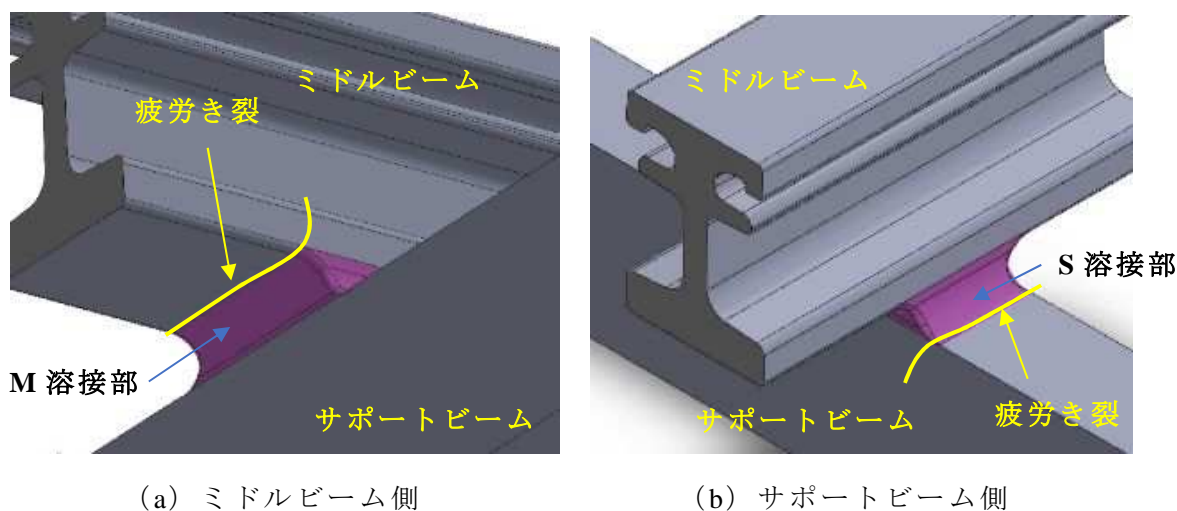


図3-1 完全溶け込み溶接に生じる疲労き裂

3.2 試験体

3.2.1 試験体の種類

試験体は、M 溶接部の溶接止端部に疲労き裂が生じることを想定した MB 試験体と S 溶接部の溶接止端部を想定した SB 試験体の 2 種類である。いずれの試験体もミドルビームとサポートビームを完全溶け込みで溶接している。試験体と溶接部の形状を図 3-2 に示す。溶接形状は、溶接部のみを整形し、止端部はそのままとした WF と溶接止端を含めて円弧状に仕上げた RF の 2 ケースである。試験体数は各 5 である。

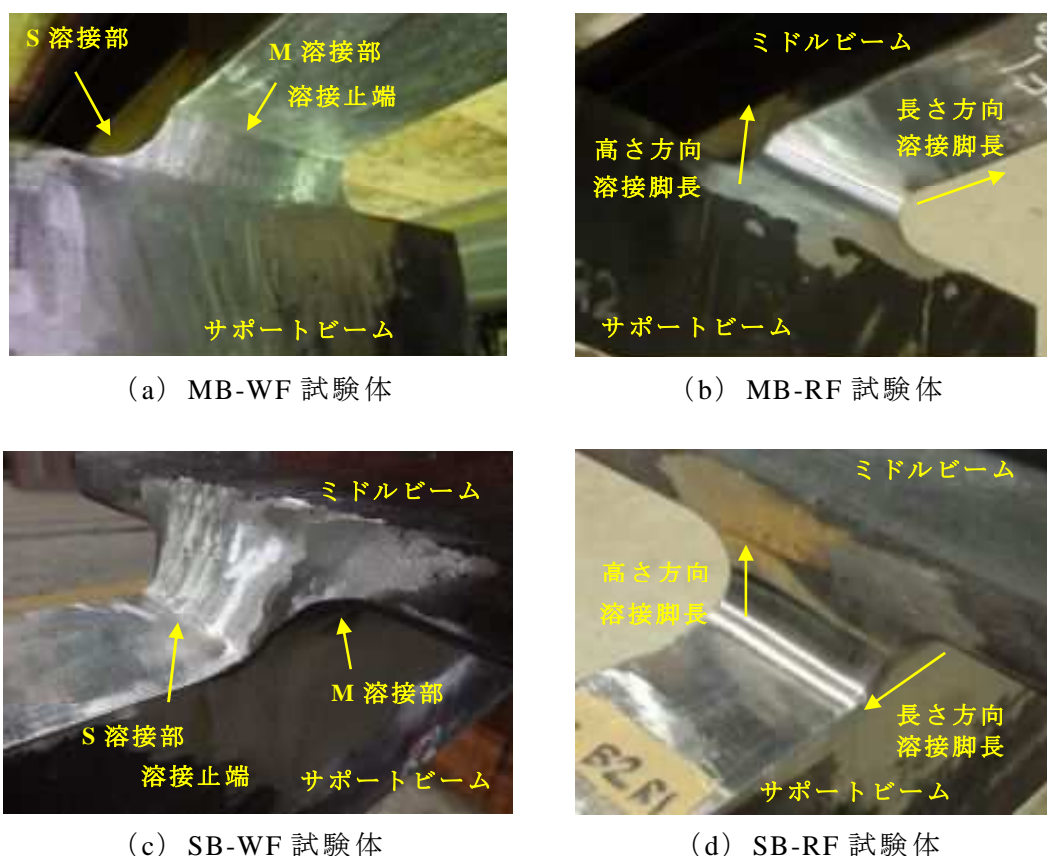


図 3-2 試験体と溶接部の形状

供試鋼材は、ミドルビームで欧州統一規格（European Norm）の EN10025 非合金構造用鋼材 S355J2+N（日本工業規格（以後、JIS 規格と称する）の JISG3106 溶接構造用圧延鋼材 SM490YB 相当）、サポートビームで JIS 規格の鋼材 SM490C である。これらの鋼材のミルシートに記載された降伏点と引張強さを表 3-1 に示す。

各試験体の寸法と形状を図 3-3 と図 3-4 に示す。図 3-3 に示す MB 試験体のミドルビームは、幅 90mm、高さ 125mm、長さ 1,000mm である。ミドルビームの長さ方向中央部に長さ 290mm のサポートビームを完全溶け込み溶接で接合している。サポート

ビームの断面寸法は、幅 60mm、高さ 110mm である。図 3-4 に示す SB 試験体のサポートビームの断面寸法は、MB 試験体と同じであるが、長さは 800mm である。サポートビームの長さ方向中央部に長さ 260mm のミドルビームを溶接で接合している。

表 3-1 試験体鋼材のミルシートに記載された降伏点と引張強さ

試験体 名称	ミドルビーム		サポートビーム	
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
MB 試験体	407	516	334	503
SB 試験体	407	517	334	508

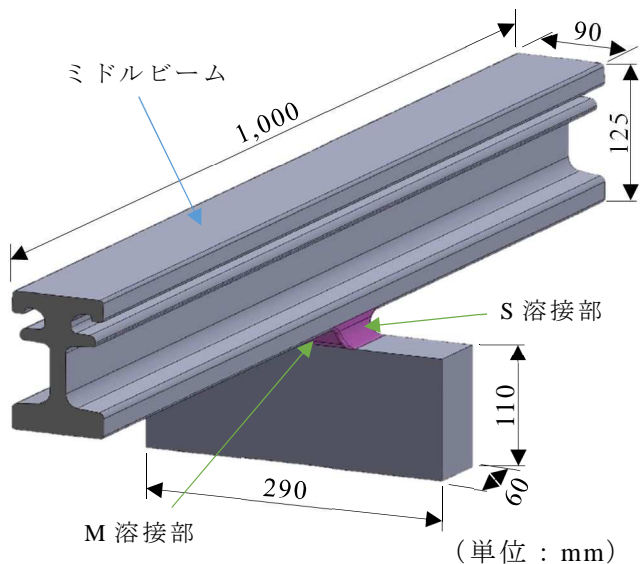


図 3-3 MB 試験体の寸法と形状

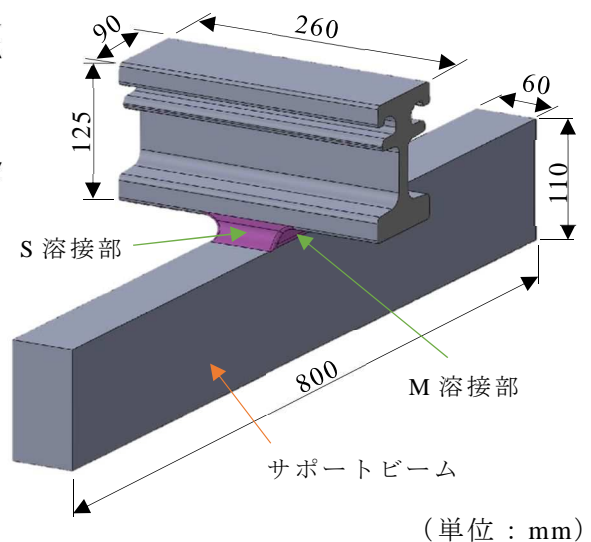


図 3-4 SB 試験体の寸法と形状

3.2.2 試験体の製作方法

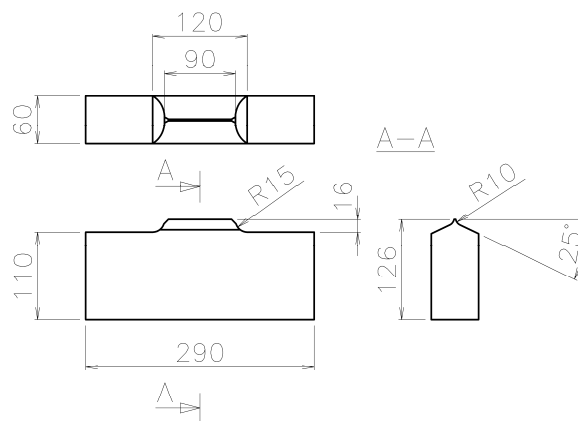
ミドルビームは型鋼であり、定尺 11m から切断した。その長さは、MB 試験体で図 3-5 に示す 1,000mm、SB 試験体で 260mm である。サポートビームは、板厚 60mm の鋼材 SM490C をガス溶断により切り出している。その長さは、MB 試験体で図 3-6 に示す 290mm、SB 試験体で 800mm とした。サポートビームの長さ方向の中央には、図 3-6 に示すように、ミドルビームと溶接するため、高さ 16mm の突起を設けており、溶断後、機械加工により突起部に J 形開先を設けている。ミドルビームとサポートビームの溶接は、以下の手順で行った。ミドルビームの長さ方向 (M 溶接部) は、図 3-7 に示すように、J 形開先の片側を 3 パス程度溶接した後、反対側から裏はつりを行

った。そして、左右交互に3~5層ずつ積層し、すみ肉部が等脚になるまで積層した。サポートビームの長さ方向（S溶接部）は、図3-8に示すように、片側3層程度を積層した後、余盛りを行った。反対側も同様に行った。溶接は、半自動炭酸ガスアーク法により下向き姿勢で行った。電流は300A、電圧は35V、溶接速度は36cm/minである。



(単位：mm)

図 3-5 ミドルビームの寸法と形状 (MB 試験体での例)



(単位：mm)

図 3-6 サポートビームの寸法と形状 (MB 試験体での例)

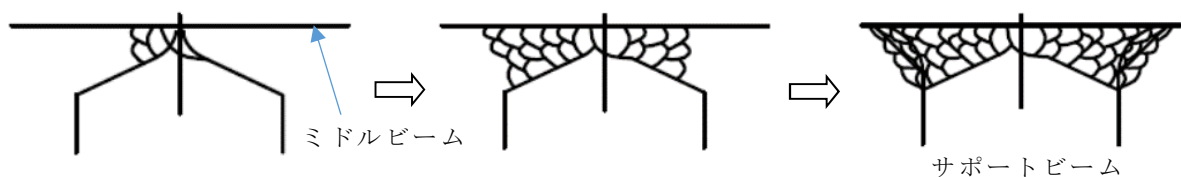


図 3-7 M 溶接部の溶接手順

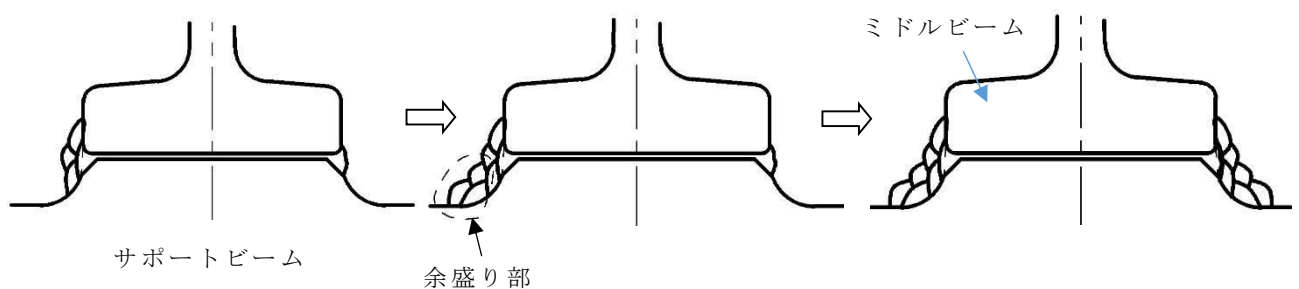


図 3-8 S 溶接部の溶接手順

MB-WF 試験体の M 溶接部の整形は、これまでに記した手順で溶接された試験体の溶接部表面を番手 30 の砥石を用いた高周波グラインダで荒削りする。次に、番手 60 の砥石を用いたディスクグラインダにより溶接部を整形する。S 接部の整形は、M 溶接部の整形と同じ手順で行うが、同様に整形した後、番手 36 の砥石を用いたバークラインダにより溶接部をさらに整形する。最後に、番手 120 の研磨ベルトを用いたベルトグラインダで溶接部を仕上げる。

MB-RF 試験体は、M 溶接部の表面を R 仕上げする。整形作業は、MB-WF 試験体の M 溶接部と同じであるが、止端を含めて、溶接部の曲率半径が 15mm 程度となるよう番手 36 の砥石を用いたバークラインダにより溶接部をさらに整形する。最後に、番手 120 の研磨ベルトを用いたベルトグラインダにより溶接部を仕上げる。S 溶接部の整形も同様である。

SB-WF 試験体の S 溶接部の整形は、MB-WF 試験体の M 溶接部と同様である。M 溶接部の整形は、MB-WF 試験体の S 溶接部と同様である。

SB-RF 試験体の S 溶接部の整形は、MB-RF 試験体の M 溶接部と同様、溶接部の曲率半径が 15mm 程度となるようにする。また、SB-RF1 と SB-RF2 は、番手 120 の研磨ベルトを用いた後、番手 400 の研磨ベルトを用いたベルトグラインダにより溶接部を仕上げる。M 溶接部の整形も同様であるが、番手 400 の研磨ベルトは使用していない。

3.2.3 各試験体の溶接形状

M 溶接部と S 溶接部の止端部曲率半径と溶接脚長，フランク角を測定した。それぞれの定義を試験体ごとに図 3-9 に示す。測定には、型取り用 RTV シリコーンゴム（以下、印象材と称する）を使用した。印象材により採取した溶接部の型を厚さ約 1mm に、

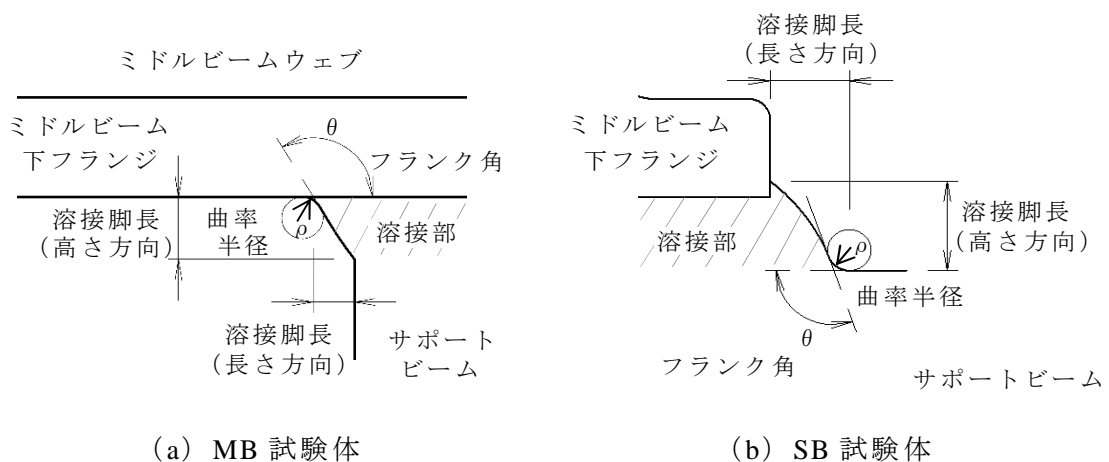


図 3-9 溶接脚長と曲率半径，フランク角の定義

幅方向 15mm (MB 試験体) あるいは 10mm (SB 試験体) 間隔でスライスし、10 倍の拡大投影機を用いて測定した。ただし、WF の止端部曲率半径は、20 倍の拡大投影機を用いた。このように、投影機の倍率を変更しているのは、WF の止端部曲率半径が小さいためである。試験体の溶接部の寸法測定結果を表 3-2 に示す。

表 3-2 試験体の寸法測定結果

試験体 名称	M 溶接部			試験体 名称	S 溶接部		
	止端部の 曲率半径 (mm)	長さ方向 溶接脚長 (mm)	高さ方向 溶接脚長 (mm)		止端部の 曲率半径 (mm)	長さ方向 溶接脚長 (mm)	高さ方向 溶接脚長 (mm)
MB-WF1	1.8	11.5	19.0	SB-WF1	2.0	12.0	17.8
MB-WF2	2.3	11.4	20.0	SB-WF2	2.1	11.5	18.3
MB-WF3	2.4	12.0	18.8	SB-WF3	1.1	10.3	19.0
MB-WF4	1.8	11.6	19.1	SB-WF4	1.8	12.5	17.5
MB-WF5	2.2	11.5	20.3	SB-WF5	1.2	12.3	19.3
平均	2.1	11.6	19.4	平均	1.6	11.7	18.4
MB-RF1	17.3	18.1	18.8	SB-RF1	17.7	19.5	18.5
MB-RF2	16.9	18.0	18.3	SB-RF2	16.9	17.5	18.3
MB-RF3	16.5	17.7	17.8	SB-RF3	18.8	18.8	19.5
MB-RF4	17.0	17.5	17.5	SB-RF4	18.5	19.0	19.5
MB-RF5	17.0	18.9	18.3	SB-RF5	17.6	17.8	17.8
平均	16.9	18.0	18.1	平均	17.9	18.5	18.7

3.3 疲労試験

3.3.1 静的載荷試験

(1) 試験方法

疲労試験の前に、試験体に生じる応力とひずみの関係を確認するため、静的載荷試験を行った。静的載荷試験は、図 3-10 に示すように、動的能力 300kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて三点曲げで実施した。ひずみゲージの貼付位置と支点間隔、載荷位置を図 3-11 に示す。ひずみゲージは、MB 試験体で 12 箇所、SB 試験体で 28 箇所に貼付した。支点間隔は、MB 試験体で 900mm、SB 試験体で 700mm である。支点

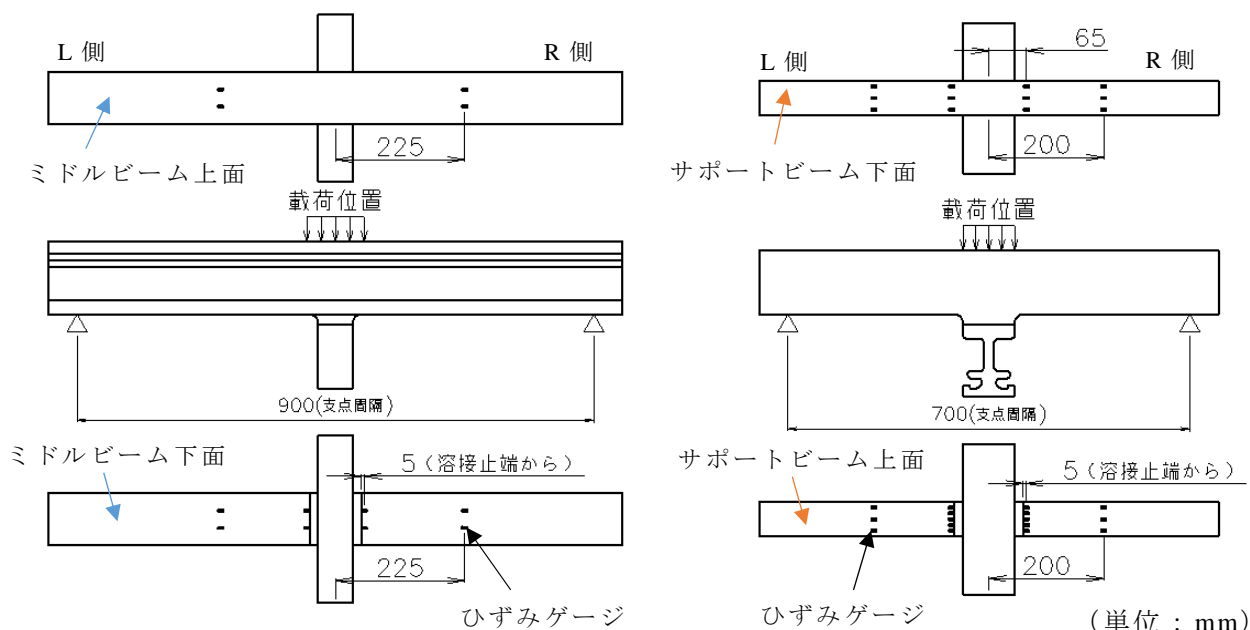
には、モジュラー型伸縮装置に使われる下ベアリングを用いた。このベアリングは、日本製であり、図 3-12 (a) に示すように、鋼材とゴム材にすべり材を組合せている。鋼材ポット部に挿入したゴム材の上にすべり材を接着した鋼材を設置している。なお、ドイツでは、図 3-12 (b) に示す弾性ベアリングを用いている。荷重位置は、溶接部直上とした。荷重範囲は、MB 試験体で 100mm (ミドルビーム長さ方向) × 90mm (ミドルビーム幅方向)、SB 試験体で 90mm (サポートビーム長さ方向) × 60mm (サポートビーム幅方向) である。荷重荷重は、MB 試験体で 162kN、SB 試験体で 155kN とした。使用した測定機器は、(株) 東京測器研究所のデータロガー (TDS-303) である。



(a) MB 試験体

(b) SB 試験体

図 3-10 静的荷重試験状況



(a) MB 試験体

(b) SB 試験体

図 3-11 ひずみゲージの貼付位置と支点間隔，荷重位置

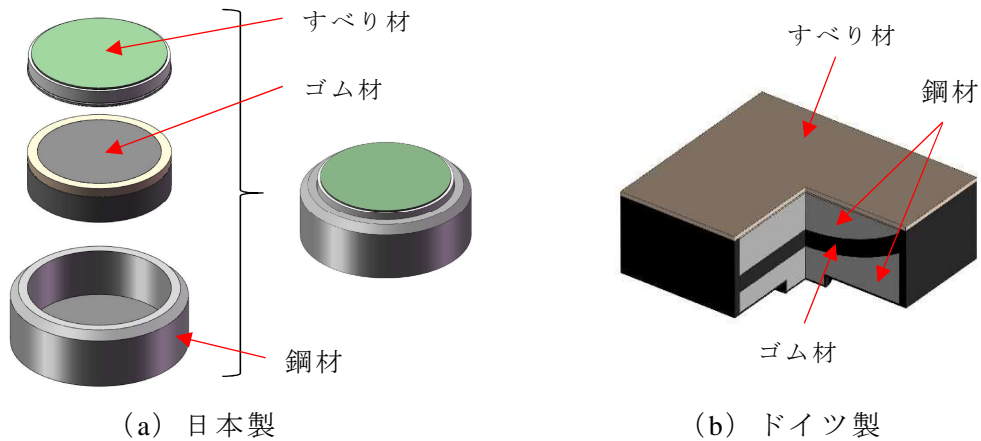


図 3-12 下ベアリング

(2) 試験結果

静的荷重試験の結果を図 3-13 に示す。縦軸の曲げ応力度は、測定ひずみにヤング率 ($2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) を乗じて求めている。図中には、梁計算から求めた曲げ応力度と載荷荷重の関係も示している。いずれの試験体も溶接止端から 5mm 離れた位置のひずみ測定値より求めた曲げ応力度は、梁計算から求めた値よりも、形状変化による応力集中のため大きいものの、応力集中が生じない位置での曲げ応力度は、梁計算から求めた値と一致している。また、SB 試験体のサポートビーム下面、中心から 65mm の位置での曲げ応力度は、サポートビーム上面（ミドルビーム溶接側）の形状変化の影響を受け、梁計算から求めた値よりも小さい。

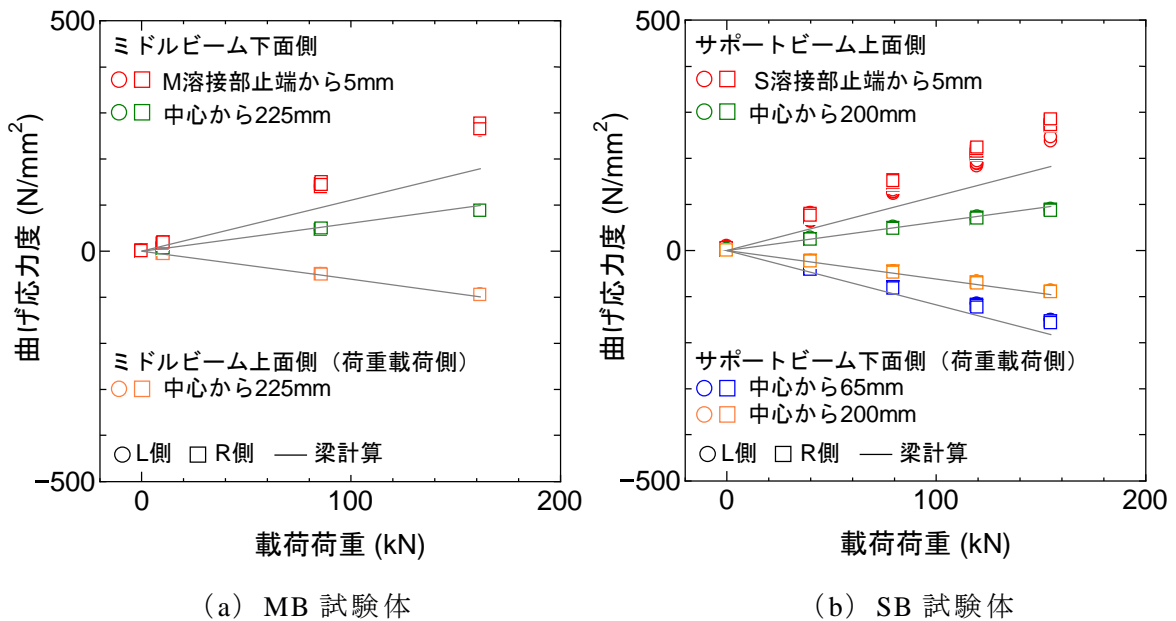


図 3-13 静的荷重試験の結果

3.3.2 疲労試験

(1) 試験方法と試験条件

疲労試験は、静的載荷試験と同様に三点曲げで行った。載荷位置を溶接部直上としたのは、M 溶接部あるいは S 溶接部の止端に引張応力を生じさせるためである。通常、ミドルビームに走行車両の輪荷重が作用すると、溶接部には圧縮応力が生じる。しかし、溶接部に生じる引張残留応力の影響を考慮し、また安全側の疲労強度が得られるように、今回の試験では溶接部に引張応力を作用させている。

試験体には、疲労き裂の発生を確認するため、溶接止端から 5mm 離れた位置にひずみゲージを貼付した。疲労試験中のひずみ測定は、(株) 共和電業の PCD-300A と PCD320A を用いた。測定間隔は、MB 試験体で繰返し荷重 2,000 回あるいは 3,000 回ごと、SB 試験体で 10,000 回ごととした。サンプリング速度は 500Hz である。

繰返し荷重の上限を表 3-3 に示す。下限は 10kN とした。繰返し荷重の速度は 5Hz を基本としたが、上限荷重の大きい MB-RF4 (200kN) は 3Hz、MB-RF5 (245kN) は 1.5Hz とした。また、上限荷重の小さい SB-WF2 (93kN) の繰返し荷重速度は 6Hz とした。疲労試験の終了は、試験体の変位が初期値に対し 2mm 以上となった場合あるいは荷重繰返し数が 500 万回を超えた場合とした。2mm 以上の変位が生じた場合の疲労き裂は、MB 試験体でミドルビーム下フランジ幅方向に、SB 試験体ではサポートビーム幅方向に貫通し、高さ方向も 50mm 程度以上となっており、いずれも破断とみなすことができる。

表 3-3 疲労試験の上限荷重

試験体名称	WF	RF
	(kN)	(kN)
MB 試験体	117, 135, 162	165, 200, 245
SB 試験体	93, 108, 126	126, 155, 185

(2) 試験結果

疲労試験により得られた公称応力範囲と疲労寿命の関係を表 3-4 と図 3-14 に示す。表 3-4 には上限および下限荷重、そしてき裂発生回数も示している。き裂発生回数は、溶接止端から 5mm 離れた位置に貼付したひずみゲージにより測定したひずみの変動幅が初期値に比べて 5% 減少した時点とした。き裂発生から試験終了までの回数は、WF で多く RF で少ない傾向を示した。図 3-14 の縦軸は、梁計算で算出した疲労き裂

発生位置での応力範囲 $\Delta\sigma$ であり、横軸は、試験終了までの荷重繰返し数（疲労寿命） N である。図中には、JSSC 指針に規定されている各疲労強度等級に対する疲労強度曲線（S-N 線図）も示している。

WF の疲労強度は E 等級と判断できる。MB-WF2 と SB-WF2 の疲労強度は高くなっている。これは、溶接止端部の曲率半径が大きかったためと考えられる。RF の疲労強度は C 等級と判断できる。ここで、RF の疲労強度は、MB-RF3 を除いて判断した。MB-RF3 の疲労強度が低くなった原因は、き裂の発生位置が溶接止端部から 6mm 程度

表 3-4 疲労試験結果

試験体名称		上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	公称応力範囲 (N/mm ²)	き裂発生回数 ($\times 10^4$ 回)	試験回数 ($\times 10^4$ 回)
MB 試験体	WF1	135	10	139.0	50.2	69.2
	WF2	117		119.7	—	> 598.2
	WF3	162		168.3	16.2	27.2
	WF4	135		139.0	34.2	52.7
	WF5	162		168.8	20.2	29.2
	RF1	165		171.3	110.2	112.7
	RF2	165		168.7	—	> 517.2
	RF3	200		207.4	29.2	30.2
	RF4	245		258.7	342.7	343.0
	RF5	245		259.4	41.0	42.5
SB 試験体	WF1	126	10	140.0	52.0	72.6
	WF2	93		99.5	—	> 521.9
	WF3	108		119.1	53.0	85.7
	WF4	126		140.4	47.0	72.3
	WF5	108		118.2	20.0	74.4
	RF1	155		175.0	48.0	63.4
	RF2	126		139.0	—	> 605.6
	RF3	155		174.0	—	> 555.6
	RF4	185		209.7	190.0	210.7
	RF5	185		210.4	53.0	58.4

離れたミドルビーム下フランジであったためと考える。この位置の表面は、ほかの試験体に比べて粗くなっていたことを粗さ測定試験により確かめている。SB-RF3 と SB-RF4 の疲労強度が特に高くなっているが、これらの試験体の溶接止端部の曲率半径は 18mm 以上となっていた。

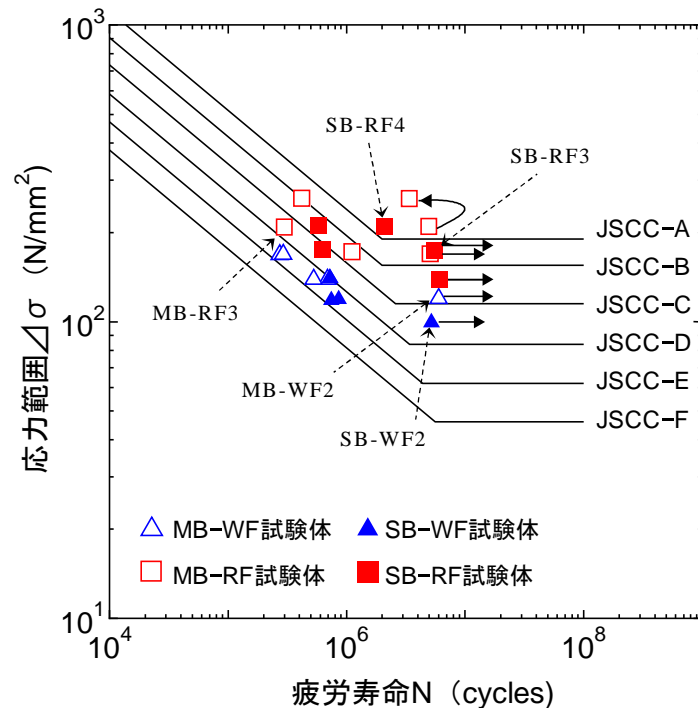


図 3-14 応力範囲と疲労寿命の関係

疲労き裂は、MB-RF3 を除き、溶接止端から生じた。MB 試験体は、いずれもミドルビーム下フランジを貫通しウェブへ進展した。き裂長さは 50mm 程度であった。SB 試験体は、サポートビームの高さ方向へいずれも 50mm 程度進展した。磁粉探傷試験の結果を図 3-15 に示す。

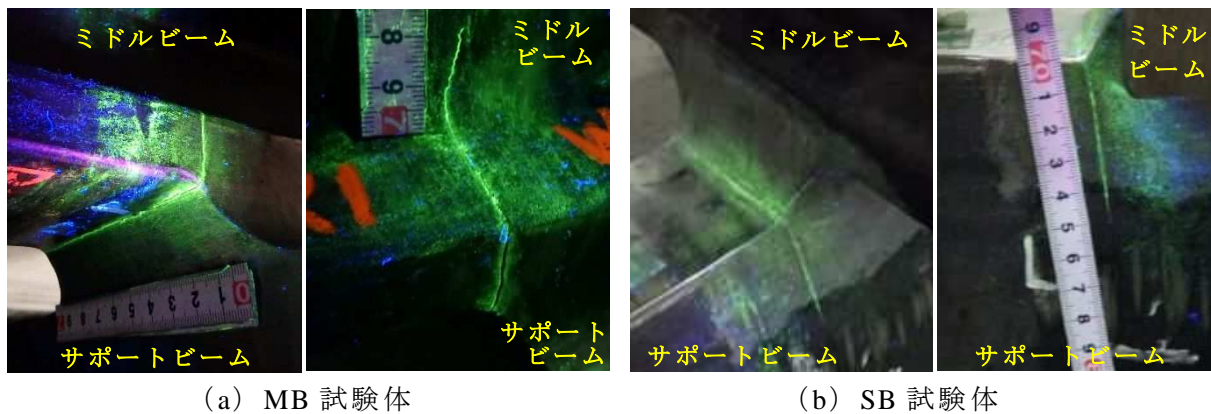


図 3-15 磁粉探傷試験結果の例

それぞれの試験体の疲労き裂の暴露面の例を図 3-16 に示す。疲労破面は、溶接止端部から 100mm 程度離れた位置で試験体を切断した後、液体窒素で冷却し、ハンマーを用いて打撃することにより暴露させた。いずれの試験体も、溶接止端の近傍には、複数の筋模様が見られる。このことは、疲労き裂が溶接止端内の 1 か所だけではなく、多数の位置で生じたことを意味している。

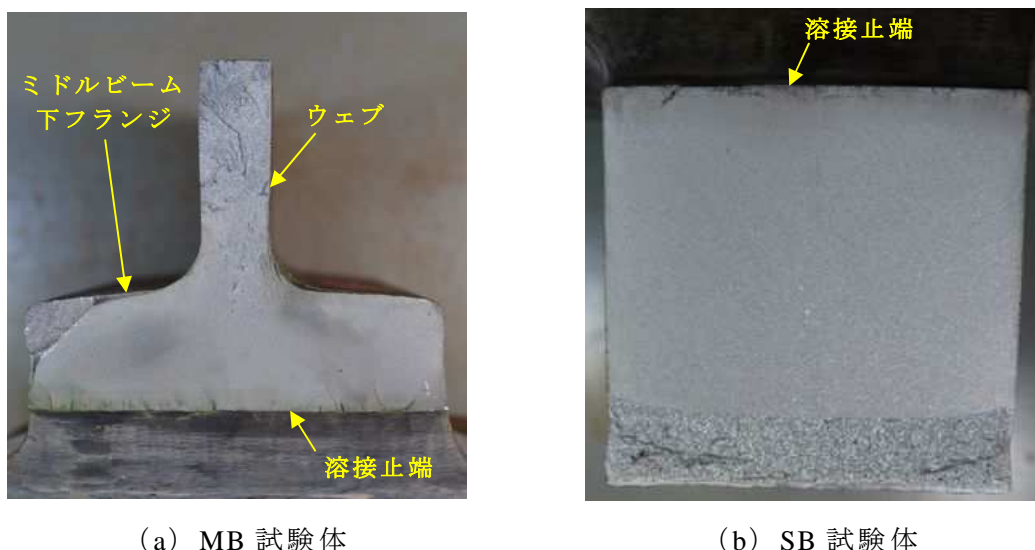


図 3-16 疲労き裂の暴露面の例

疲労強度曲線の傾きを 3 として、疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線から求めた各試験体の 200 万回疲労強度を表 3-5 に示す。ここで示す疲労強度は、表 3-4 に示した疲労試験結果のうち、未破断データを除いた試験体の種類ごとの平均値である。MB 試験体、SB 試験体ともに RF の疲労強度は WF より高い。WF に対する RF の疲労強度比 (RF の疲労強度 ÷ WF の疲労強度) は、MB 試験体で 1.98、SB 試験体で 1.68 となった。このように、疲労強度には、溶接止端の曲率半径の大きさと仕上げ方法が大きく影響している。

表 3-5 200 万回疲労強度

試験体名称	WF (N/mm ²)	RF (N/mm ²)	RF/WF
MB 試験体	90.5	179.1	1.98
SB 試験体	93.7	157.4	1.68

3.4 試験体の応力解析

3.4.1 解析モデル

解析対象は、疲労試験を行った MB-WF、MB-RF、SB-WF と SB-RF 試験体の 4 種類である。試験体は、長さ方向、幅方向において対称であることから、解析は 1/4 モデルで行った。MB 試験体モデルの寸法は、ミドルビームで長さ 500mm、高さ 125mm、幅 45mm であり、サポートビームで長さ 145mm、高さ 110mm、幅 30mm である。SB 試験体モデルの寸法は、サポートビームで長さ 400mm、高さ 110mm、幅 30mm であり、ミドルビームで長さ 130mm、高さ 125mm、幅 45mm である。溶接部の寸法と形状の定義は、図 3-9 に示したとおりである。表 3-2 に示した各試験体の測定結果の平均値を参考に設定した解析モデルの溶接部寸法を表 3-6 に示す。MB 試験体、WF モデルの M 溶接部の脚長は、長さ方向側で 12mm、高さ方向側で 19mm とし、止端部の曲率半径は 1,2,3mm とした。RF モデルの M 溶接部の脚長は、長さ方向側と高さ方向側で 18mm とし、曲率半径は 17mm とした。S 溶接部の脚長は、長さ方向側と高さ方向側で 17mm とした。また、SB 試験体、WF モデルの S 溶接部の脚長は、長さ方向側で 12mm、高さ方向側で 18mm とし、曲率半径は 1,2mm とした。RF モデルの S 溶接部の脚長は、長さ方向側と高さ方向側で 19mm とし、曲率半径を 18mm とした。M 溶接部の脚長は、長さ方向側、高さ方向側とも 18mm とした。

MB 試験体と SB 試験体の RF モデルの要素分割図を図 3-17 に示す。溶接部のモデル化には、三次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks Premium 2013 と有限要素解析用プリ・ポストプロセッサ Femap11.2.1 を用いて行った。用いた要素は 8 節点ソリッド要素、ミドルビームあるいはサポートビームの溶接止端部付近の最小要素寸法は約 0.2mm とした。

表 3-6 解析モデルの溶接部寸法

モデル 名称	MB 試験体 (M 溶接部)			SB 試験体 (S 溶接部)		
	止端部の 曲率半径 (mm)	長さ方向 溶接脚長 (mm)	高さ方向 溶接脚長 (mm)	止端部の 曲率半径 (mm)	長さ方向 溶接脚長 (mm)	高さ方向 溶接脚長 (mm)
WF モデル	1, 2, 3	12	19	1, 2	12	18
RF モデル	17	18	18	18	19	19

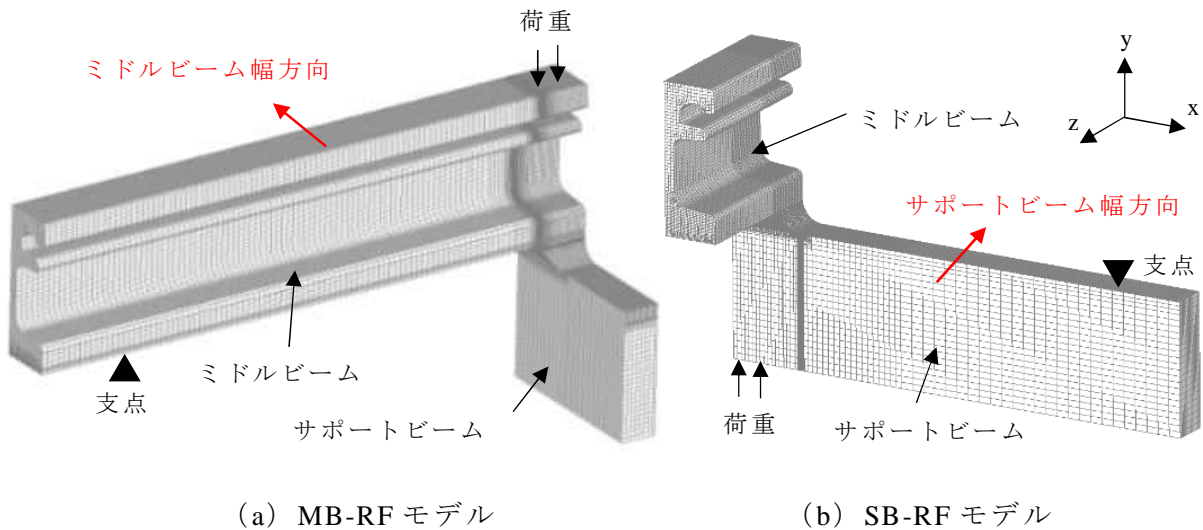


図 3-17 RF モデルの要素分割図

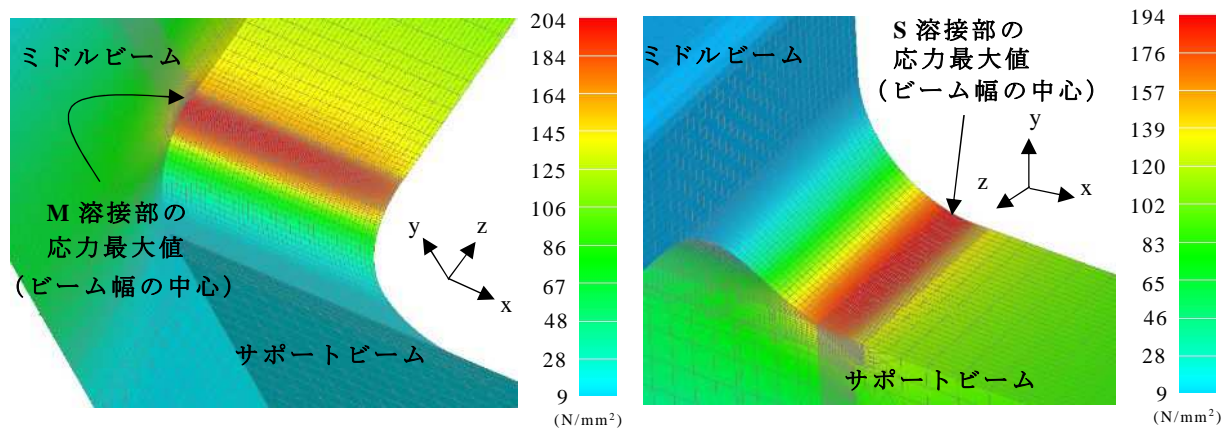
3.4.2 解析方法

三次元弾性有限要素解析は、汎用構造解析ソフトウェア Nx Nastran を用いて行った。鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とした。荷重は、図 3-17 に示したように、ミドルビームあるいはサポートビームに直接載荷した。載荷範囲は、MB 試験体モデルでミドルビームの長さ方向に 50mm、幅方向に 41mm である。SB 試験体モデルでは、サポートビームの長さ方向に 45mm、幅方向に 30mm である。M 溶接部あるいは S 溶接部の止端の公称応力が 100N/mm^2 となるように等分布荷重を設定した。その値は、MB 試験体の WF モデルで 11.1N/mm^2 、RF モデルで 11.2N/mm^2 である。そして SB 試験体の WF モデルで 15.3N/mm^2 、RF モデルで 15.7N/mm^2 である。

3.4.3 解析結果

解析により得られたミドルビームあるいはサポートビーム試験体モデルのコンターを図 3-18 に示す。いずれも RF モデルである。ミドルビーム試験体モデルは z 方向の応力、サポートビーム試験体モデルは x 方向の応力を示している。M あるいは S 溶接止端部の応力は、ビーム幅の中心に近づくほど高くなっていった。この結果は、いずれの試験体モデルにおいても同じであった。

解析により得られた M あるいは S 溶接止端部の応力集中係数 (α) と止端部曲率半径の関係を図 3-19 に示す。なお、応力集中係数は、図 3-18 に示す M あるいは S 溶接部の応力の最大値を止端位置の公称応力で無次元化した値である。応力集中係数は、MB 試験体の場合に 1.90~4.38、SB 試験体の場合に 1.94~4.71 となっている。いずれ



(a) MB モデルの M 溶接部 (σ_z) (b) SB モデルの S 溶接部 (σ_x)

図 3-18 RF モデルのコンター図

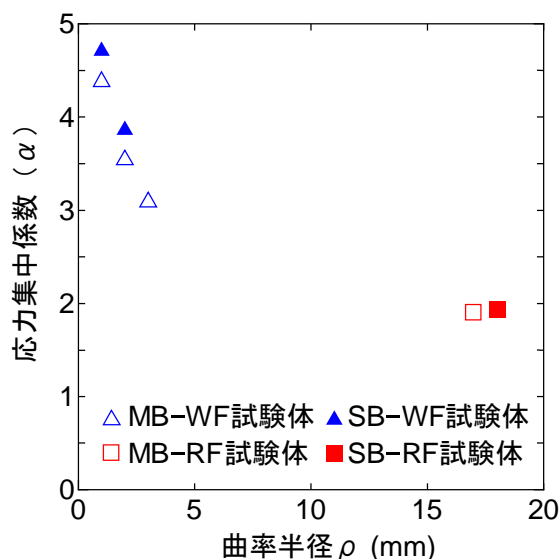


図 3-19 応力集中係数と曲率半径の関係

の試験体モデルとも RF モデルの応力集中係数が低く、曲率半径 1mm の WF モデルの応力集中係数が最も高い。その値は、ミドルビームとサポートビームでほぼ同じとなっている。そのため、ミドルビーム、サポートビームとも同じ疲労強度等級になったものと考えられる。

WF モデル（止端曲率半径 2.0mm）に対する RF モデルの応力集中係数比（RF モデルの応力集中係数 (α_{RF}) ÷ WF モデルの応力集中係数 (α_{WF2})) は、MB 試験体モデルで 0.54, SB 試験体モデルで 0.50 となる。疲労試験では、曲率半径の大きい RF の疲労強度等級が高く、曲率半径の小さい WF の疲労強度が低い。WF に対する RF の疲労強度比は、MB 試験体で 1.98, SB 試験体で 1.68 である。すなわち、ここで行った解析

モデルの応力集中係数は、疲労強度と反比例の関係にある。

WFモデルのうち、曲率半径の大きい3mmの応力集中係数 ($\alpha_{WF3}=3.09$) を基準とした場合、RFモデルの疲労強度改善度 (α_{WF3}/α_{RF}) は1.6程度となる。したがって、RFの疲労強度等級は、WFより2等級は向上すると考えられる。疲労試験で得られた疲労強度は、RFでC等級、WFでE等級である。このことから、この解析結果は、疲労試験結果と対応する。

3.5 まとめ

本章では、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を明らかにする目的で、溶接部の寸法や形状の異なる試験体の疲労試験と有限要素応力解析を行った。疲労試験は、実構造の応力発生状況と異なるが、安全側の疲労強度が得られるように、溶接部に引張応力を作用させるように行った。ここで得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) WFは溶接部を整形したもの、RFは止端を含めて円弧状に仕上げたものである。

ミドルビーム (MB) 試験体、サポートビーム (SB) 試験体ともに、RFの疲労強度がWFより高い。

(2) JSSC指針に示される継手の強度等級に分類すると、溶接部を整形し、止端をそのままとした場合でE、R15の止端仕上げとした場合でCである。

【参考文献】

- [1] 上毛新聞社：上毛新聞（ジョイント外れ路面に10台乗り上げパンク関越道が7時間通行止め昭和の永井川橋），2002年3月26日．
- [2] 伏屋和樹，竹市雅人，山田健太郎：ビーム型伸縮装置の溶接部の疲労試験，構造工学論文集，Vol.60A，pp.642-650，2014年3月．
- [3] 浦敦：NEXCO 中日本豊田保全 名港西大橋 I 基線の耐震補強に着手，道路構造物ジャーナル NET，<http://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/detail.php?id=1145&page=1>，（2016.8 参照）
- [4] 池田光次：中日本高速道路リレー連載②名古屋支社管内の高速道路における構造物の劣化と維持管理，道路構造物ジャーナル NET，<http://www.kozobutsu-hozen-journal.net/series/detail.php?id=27&page=1>（2016.12 参照）
- [5] 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 - 2012年改訂版，技報堂出版，2012年6月．
- [6] 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，平成14年3月．

第4章 部分溶け込み溶接によるルート疲労破壊の防止と疲労強度

4.1 はじめに

ミドルビームとサポートビームの接合は、2002年まで図4-1に示すすみ肉溶接で行われていた。サポートビームには、長さ90mm、幅60mm、高さ18mmの突起を設けている。この突起部を利用してミドルビームとのすみ肉溶接が行われていた。ここでは、ミドルビーム長さ方向の溶接をM溶接部、サポートビームの長さ方向をS溶接部と称する。S溶接部は、ミドルビーム下フランジに設けた切欠き部で行われていた。切欠きを設ける理由は、ミドルビームとミドルビーム間の遊間0mmに対応するためである。なお、溶接部は溶接のままで仕上げは行われていなかった。

1985年10月に関越自動車道の永井川橋に設置されたモジュラー型伸縮装置のミドルビームの一部が外れて路面上に横たわり、車両10台が乗り上げ、パンクする事故が2002年3月に生じた[1,2]。ミドルビームが外れた原因は、ミドルビームとサポートビームの接合に用いられていたすみ肉溶接が、ルートを起点として全周にわたり疲労破壊したことにありとされている。ミドルビームとサポートビームの当時の断面設計で算出された曲げ応力度は、それぞれの材料の許容応力度（ミドルビームで $2,100\text{kgf/cm}^2$ 、サポートビームで $1,900\text{kgf/cm}^2$ ）に近い値であった。2002年以降は、ルート疲労破壊を防止する目的で、ミドルビームとサポートビームの接合は、図4-2に示す完全溶け込み溶接に変更されている。

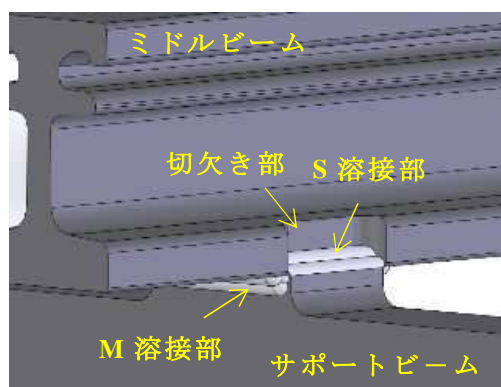


図 4-1 すみ肉溶接

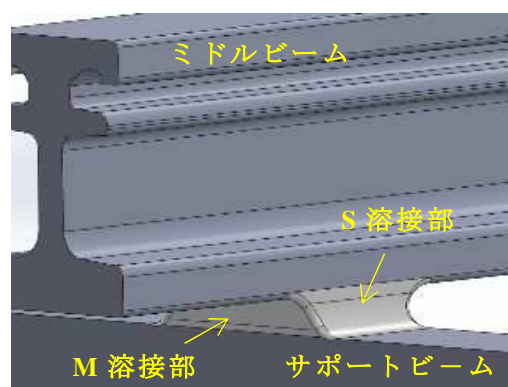


図 4-2 完全溶け込み溶接

現在のモジュラー型伸縮装置の溶接部は、完全溶け込み溶接とすることで、ルートを起点とした疲労破壊を防止している。しかし、完全溶け込み溶接は溶接量が多くなることから、製作およびその管理に多くの手間を要する。また、溶接欠陥が生じる可

能性も高くなると考えられる。そのため、溶接作業を省力化し、かつルート疲労破壊を防止することのできる部分溶け込み溶接の適用を考えた。これにより溶接量が少なくなり、施工も比較的容易になると考えられる。

本章では、ミドルビームに曲げが作用する場合を対象として、部分溶け込み溶接でルート疲労破壊を防止できる溶接詳細について検討する。そのため、止端部形状の異なるすみ肉溶接試験体を用いた疲労試験と有効切欠き応力を求めるための試験体の応力解析を行い、モジュラー型伸縮装置の M 溶接部の疲労破壊の起点の特定に対する有効切欠き応力概念の適用性について検討する。そして、溶接脚長と溶け込み深さ、止端の曲率半径をパラメータとした応力解析を行い、止端とルートの有効切欠き応力を比較することにより、ルート疲労破壊を防止できる溶接詳細を示す。さらに、前章で示した完全溶け込み溶接部の疲労強度に基づき、部分溶け込み溶接を用いた場合の M 溶接部の疲労強度について検討する。

4.2 試験体

4.2.1 試験体の種類

試験体は、ミドルビームとサポートビームをすみ肉溶接で接合した AW 試験体と FW 試験体の 2 種類である。AW 試験体は、ミドルビームにサポートビームを溶接したままの試験体である。FW 試験体は、AW 試験体の溶接部を整形したものであり、溶接部全体あるいは止端のみを仕上げている。試験体の数は、AW 試験体で 2、FW 試験体は 3 である。試験体の形状と寸法を図 4-3 に示す。図中には、溶接部の呼称とひずみゲージの貼付位置も示している。ミドルビームは、図 4-4 に示す断面形状・寸法の形鋼であり、その長さは 1,000mm である。サポートビームは、図 4-5 に示すように、幅 60mm、高さ 110mm の鋼材であり、その長さは 290mm である。サポートビームの長さ方向中央部には、ミドルビームを接合するため、高さ 18mm の突起を設けている。その突起部に、長さ 1,000mm のミドルビームをすみ肉溶接で接合している。

ミドルビームに用いた鋼材は EN 規格 (European Norm, 欧州統一規格) の S355J2+N (日本工業規格 JIS SM490YB 相当)、サポートビームに用いた鋼材は SM490C である。これらの鋼材のミルシートに記載された降伏応力と引張強さは、ミドルビームで 420N/mm² と 542 N/mm²、サポートビームで 322 N/mm² と 498 N/mm² である。

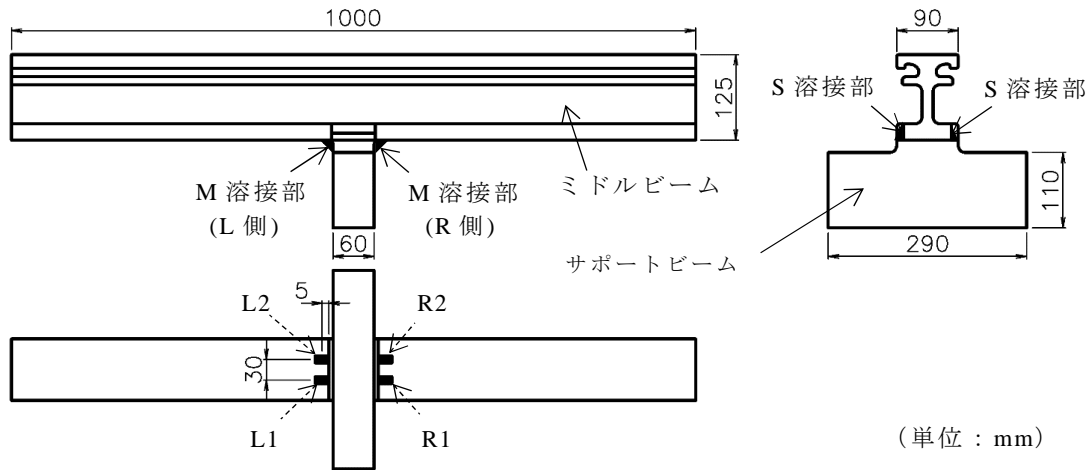


図 4-3 試験体の形状と寸法，溶接部の呼称とひずみゲージの貼付位置

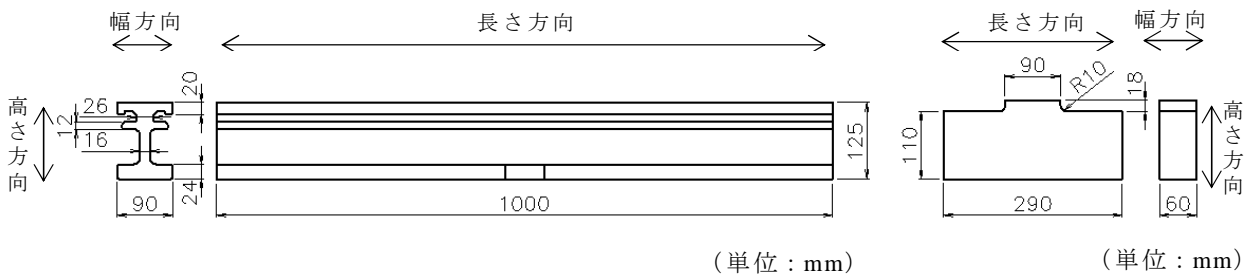


図 4-4 ミドルビームの形状と寸法

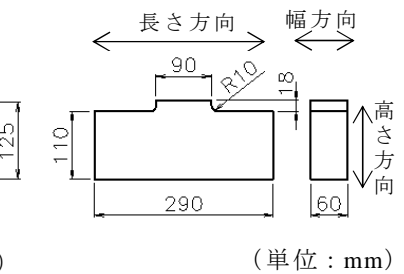
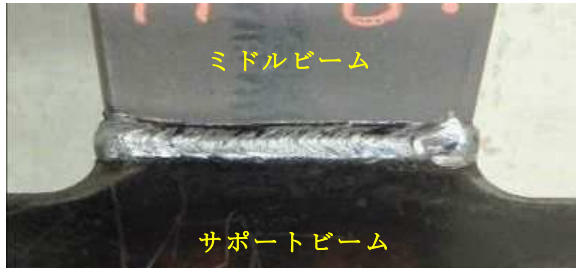


図 4-5 サポートビームの形状と寸法

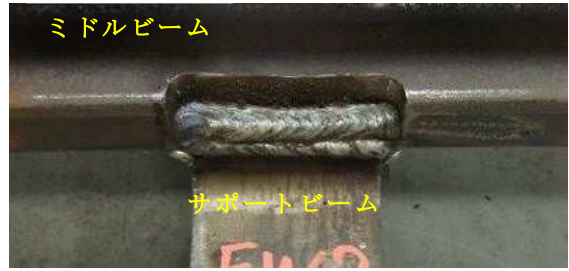
4.2.2 試験体の製作方法

ミドルビームとサポートビームの溶接は，まず S 溶接部で行った後，M 溶接部を行っている．S 溶接部は，サポートビームの突起部とミドルビーム下フランジ切欠き部に 3 層行っている．M 溶接部は，サポートビームの側面とミドルビーム下フランジ部に 1 層行っている．これは，2002 年以前に用いられていたすみ肉溶接のうち，溶接サイズが最も小さい場合を想定している．溶接は，半自動炭酸ガスアーク法により，水平姿勢で行った．溶接材料は直径 1.2mm のソリッドワイヤ YGW11 である．電流は 226A，電圧は 21V，溶接速度は 28cm/min 程度とした．AW 試験体の溶接部の状況を図 4-6 に示す．

AW1 と AW2 試験体は，先に述べた手順で接合した溶接のままの試験体である．FW1 と FW2，FW3 試験体は，M 溶接部の止端の曲率半径が，それぞれ 3,5,8mm となるように仕上げたものである．FW 試験体の M 溶接部を図 4-7 に示す．



(a) M 溶接部

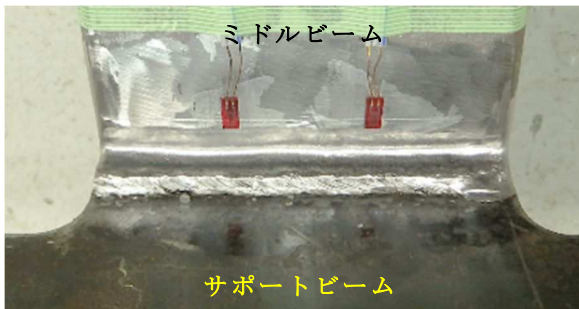


(b) S 溶接部

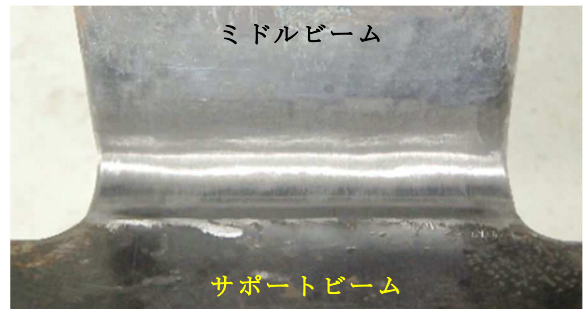
図 4-6 AW 試験体の溶接部



(a) FW1 試験体



(b) FW2 試験体



(c) FW3 試験体

図 4-7 FW 試験体の M 溶接部

4.2.3 各試験体の溶接形状

M 溶接部の脚長，止端の曲率半径とフランク角を測定した．測定に必要な型取りには RTV シリコーンゴムを使用した．採取した溶接部の型は，15 mm 間隔で厚さ 1mm にスライスした．スライスした数は，1 溶接部で 5 枚である．溶接脚長は 10 倍，止端の曲率半径とフランク角は 20 倍の拡大投影機を用いて測定した．なお，溶接脚長と止端の曲率半径，そしてフランク角とのど厚は，図 4-8 に示すように定義した．測定結果を表 4-1 に示す．

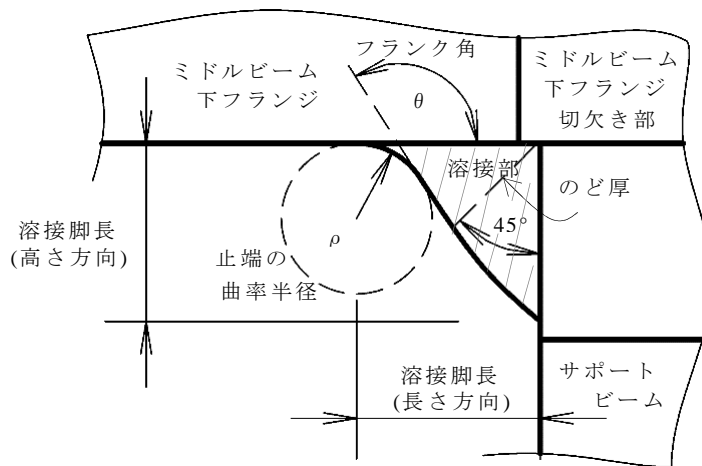


図 4-8 溶接脚長と止端の曲率半径，フランク角とのど厚の定義

表 4-1 溶接部の形状測定結果（測定 10 箇所での平均値）

試験体 名称		止端の 曲率半径 (mm)	溶接脚長 (長さ方向) (mm)	溶接脚長 (高さ方向) (mm)	のど厚 (mm)	止端部の フランク角 (度)
AW	AW1	0.9	6.4	5.4	4.2	114
	AW2	0.6	6.3	6.0	4.4	112
FW	FW1	3.0	6.1	6.3	4.4	152
	FW2	4.3	6.4	6.2	4.4	155
	FW3	8.5	6.3	6.2	3.5	—

4.3 疲労試験

4.3.1 試験方法と試験条件

疲労試験は、動的能力 300kN の電気油圧サーボ式材料試験機を用いて三点曲げで実施した。試験体は、図 4-9 に示すように、M 溶接部に引張あるいは圧縮応力が作用するように試験装置に設置した。ミドルビームに輪荷重が作用した場合、溶接部に生じる応力は圧縮となるのが通常である。しかし、溶接部に生じる引張残留応力の影響を考慮し、また安全側の疲労強度が得られるように、引張応力を作用させる試験も行っている。第 1 章で述べたように、ミドルビームとサポートビームは十字梁となっている。したがって、ここで行うようなミドルビームのみに曲げを与える試験では応力性状を十分に再現できていない可能性もある。ただし、疲労破壊の起点や疲労強度について検討するという意味では有用と考えている。なお、サポートビームについては別途検討が必要と考えている。



(a) 正曲げ試験



(b) 負曲げ試験

図 4-9 試験体の設置状況

ここでは、溶接部に引張応力を作用させる試験を正曲げ試験、圧縮応力を作用させる試験を負曲げ試験と呼ぶ。正曲げ試験は AW1, FW1, FW2 試験体、負曲げ試験は AW2 と FW3 試験体に対して行った。いずれの試験も、ミドルビームの支点間隔は 900mm である。支点には実際の伸縮装置に使用されている日本製の下ベアリング（図 4-10 参照）を用いた。正曲げ試験は、ミドルビーム上面の中央に載荷した。載荷した範囲は、100mm（ミドルビーム長さ方向）× 90mm（ミドルビーム幅方向）である。負曲げ試験は、サポートビーム下面の中央に載荷した。載荷した範囲は、60mm（サポートビーム幅方向）× 100mm（サポートビーム長さ方向）である。繰返し荷重の下限は、すべての試験で 10kN とした。上限荷重は、サポートビームの側面からミドルビームの長さ方向へ 6mm 離れた溶接止端部の公称応力範囲が 141N/mm^2 となるように設定した。その値はいずれの試験も 135kN である。図 4-9 に示したように、正曲げ試験と負曲げ試験で試験体の天地を反転させて試験装置に設置している。荷重繰返し速度は 5Hz とした。試験の終了は、正曲げ試験で試験体の変位が初期値に対し 2mm 以上となった場合とした。その際の疲労き裂は、ミドルビーム下フランジ幅方向に貫通し、高さ方向も 50mm 以上となっており、破断とみなすことができる。負曲げ試験では、疲労き裂を目視で確認した後、図 4-3 に示したように、溶接止端から 5mm の位置に貼付したひずみゲージの出力に変化が見られないと判断した時点で試験を終了とした。その判断例として、AW2 試験体（負曲げ）で測定したひずみ範囲と荷重繰返し数の関係を図 4-11 に示す。なお、疲労試験中のひずみ測定は、（株）共和電業の PCD-300A と PCD320A を用いた。測定間隔は、繰返し荷重 5,000 回あるいは 10,000 回ごととし、サンプリング速度は 500Hz とした。

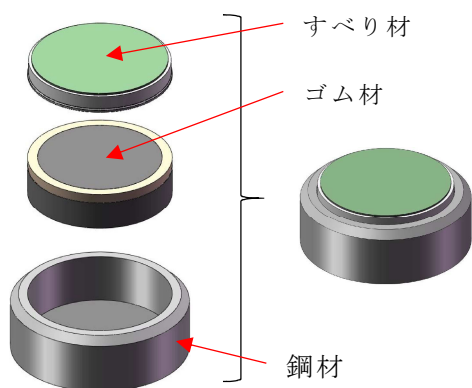


図 4-10 下ベアリング

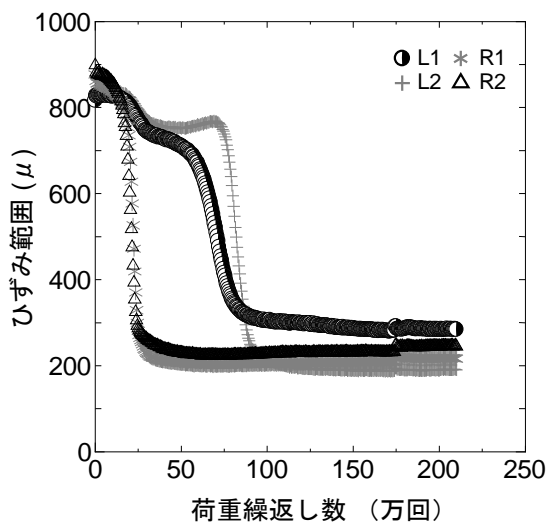
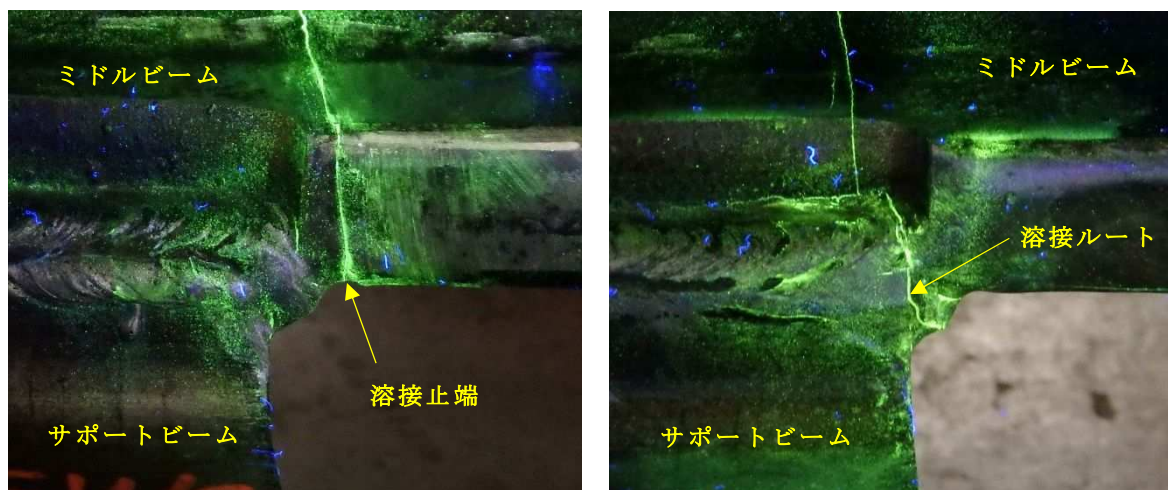


図 4-11 ひずみ範囲と荷重繰返し数の関係

4.3.2 試験結果

溶接のままである AW1 と AW2 試験体,そして止端の曲率半径が 3mm であった FW1 試験体の疲労き裂は溶接止端から生じた. 止端の曲率半径が 4.5mm の FW2 試験体と 8.5mm の FW3 試験体ではルートから疲労き裂が生じた. すなわち,すみ肉溶接の疲労き裂は,止端の曲率半径が小さい場合に止端から,大きくなるとルートから発生した. なお,ルートから疲労き裂が生じた FW3 試験体ののど厚は,他の試験体と比較して小さい.すみ肉溶接のルート部の応力は,のど厚が小さいほど大きくなる[3,4]ことから,この影響も含まれていると考えられる. 磁粉探傷試験の結果を図 4-12 に示す.



(a) 止端き裂 (FW1 試験体)

(b) ルートき裂の例 (FW2 試験体)

図 4-12 磁粉探傷試験結果の例

表 4-2 疲労試験結果

試験体名称		公称応力範囲 (N/mm ²)	き裂発生回数 (×10 ⁴ 回)	試験回数 (×10 ⁴ 回)	破壊起点
AW1	正曲げ	140.6	7.0	22.2	止端
AW2	負曲げ		10.0	210.6	止端
FW1	正曲げ		95.5	114.9	止端
FW2	正曲げ		—	179.6	ルート
FW3	負曲げ		—	86.5	ルート

疲労試験の結果を表 4-2 に示す。表中に示すき裂発生回数は、ルートで疲労き裂を生じた FW2, FW3 試験体を除き、溶接止端から 5mm 離れた位置に貼付したひずみゲージにより測定したひずみの変動幅が初期値に比べて 5%減少した時点とした。疲労き裂の発生回数は、溶接のままとした AW1 と AW2 試験体で少ない。

疲労試験により得られた疲労寿命を図 4-13 に示す。図の縦軸は、試験終了までの荷重繰返し数（疲労寿命）N を示している。横軸には、試験体名称と試験条件（正曲げあるいは負曲げ）、そして破壊起点を示している。図中には、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」[3]（以後、JSSC 指針と記す）に定められている疲労強度等級に対応する疲労寿命（応力範囲 141N/mm²）も示している。正曲げ試験は、FW2 試験体で C 等級、FW1 試験体で D 等級、AW1 試験体で F 等級程度の疲労強度となっている。このように、止端の曲率半径を大きくすることで疲労強度は高くなっている。

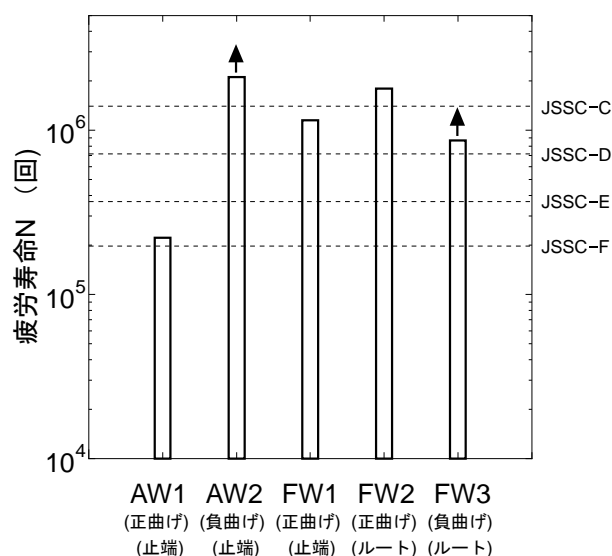


図 4-13 各試験体の疲労寿命

負曲げ試験は、ひずみ範囲の変化が見られなくなったと判断できた時点で試験を終了としているため、破断を基準とした場合の疲労強度は不明であるが、少なくとも D 等級以上の疲労強度となっている。

AW1 と AW2, そして FW2 と FW3 試験体の疲労き裂の暴露面を図 4-14 に示す。疲労き裂面は、M 溶接部の止端から 100mm 程度離れた位置で試験体を切断した後、液体窒素で冷却し、ハンマーで打撃することにより暴露した。AW1 試験体の疲労破面には、溶接止端の近傍に複数の筋が生じている（代表的な筋模様を図中に矢印で示している）。このことは、疲労き裂の起点が、溶接止端内の 1 箇所だけではなく、複数の箇所で生じたことを意味している。止端き裂を生じた AW1 と FW1 試験体（正曲げ）は、いずれもミドルビーム下フランジを貫通しウェブへ進展した。き裂長さは 40~50mm であった。負曲げ試験で止端き裂を生じた AW2 試験体のき裂長さは 20mm 程度であった。負曲げの場合、き裂は停留する可能性がある。また、図 4-14 (b) に示す疲労破面には、さびが見られる。これは、圧縮応力の繰返しにより、き裂が開口と閉口を繰返し、き裂面が擦られたためである。ルート破壊が生じた FW2 試験体（正曲げ）での疲労き裂は、図 4-15 に示すように、ミドルビーム下フランジから比較的直下の方向へ、FW3（負曲げ）では 45 度方向に進展し、いずれも溶接部をほぼ貫通している。そして、き裂がすみ肉溶接端部からミドルビームへと進展している。

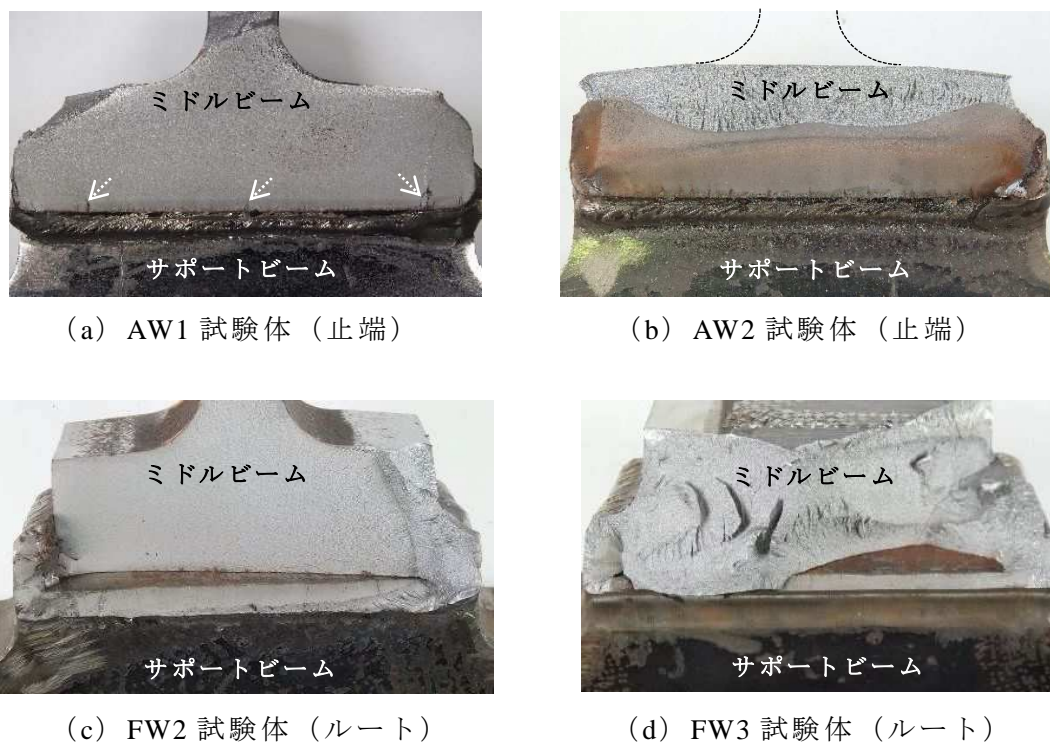


図 4-14 疲労き裂の暴露面の例



(a) FW2 試験体（正曲げ）

(b) FW3 試験体（負曲げ）

図 4-15 ルートから生じた疲労き裂の進展方向の比較

支点に用いた下ベアリングの試験前後の状況を図 4-16 に示す。すべり板の相手面は、サポートビームに設置したステンレス板（SUS-316L）である。疲労試験では、試験体に曲げが生じる。そのため、ベアリング部には回転が生じる。そして、すべり材とステンレス板間には摺動が生じる。試験後のすべり材には、摺動痕が見られるものの、顕著な劣化は認められなかった。



(a) 試験前



(b) 試験後

図 4-16 下ベアリング

4.4 有効切欠き応力概念を用いた試験体の疲労き裂発生起点の検討

溶接部の疲労耐久性を評価する場合、公称応力範囲を用いるのが一般的である。しかし、JSSC 指針では、継手の形状が複雑で公称応力が明確にできない場合や継手等級分類に示されていない継手については、ホットスポット応力を用いた疲労照査を行ってもよいとされている。また、国際溶接学会（IIW）の疲労設計指針では、公称応力とホットスポット応力に加え、有効切欠き応力を用いた疲労強度評価法が示されている [5]。有効切欠き応力は、疲労き裂の発生点（溶接止端あるいはルート）に円形の切欠きの存在を仮定して求められる最大の応力である。その際、円孔はその周がき裂発生点に一致するように設置するとされている。円の半径は、溶接のままの止端およびル

一部で 1.0mm とされている。溶接止端を仕上げた場合には、そのままの形状に対して求められる最大の応力が有効切欠き応力となる[6,7]。

ここでは、試験体に生じた疲労き裂の発生点（溶接止端あるいはルート）が、有効切欠き応力により評価できるかを検証する目的で、応力解析を行う。具体的には、各試験体を模擬したモデルの解析から得られる溶接止端とルートの有効切欠き応力を求め、それを用いて算出した応力集中係数（有効切欠き応力／公称応力、以後 α と記す）を求める。そして、疲労試験結果と比較する。

4.4.1 解析モデル

解析対象は、疲労試験を行ったすべての試験体である。溶接部の形状は、試験体の測定結果を参考に設定した。M 溶接部の止端の曲率半径（以後 ρ と記す）は、AW1 と AW2 モデルで 1mm、FW1 モデルでは 3mm、FW2 モデルで 4.5mm、そして FW3 モデルで 8.5mm である。溶接は 6mm の等脚とした。S 溶接部も 2 等辺三角形でモデル化し、溶接脚長は 10mm とした。解析モデルは、図 4-17 に示すように、試験体の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。解析モデルの作成は、三次元 CAD 設計ソフトウェア SolidWorks Premium 2013 と有限要素解析用プリ・ポストソフトウェア Femap11.2.1 を用いて行った。用いた要素は 8 節点ソリッド要素、各モデルの要素寸法は、着目部（溶接止端・ルート先端）近傍で 0.1mm 程度である。

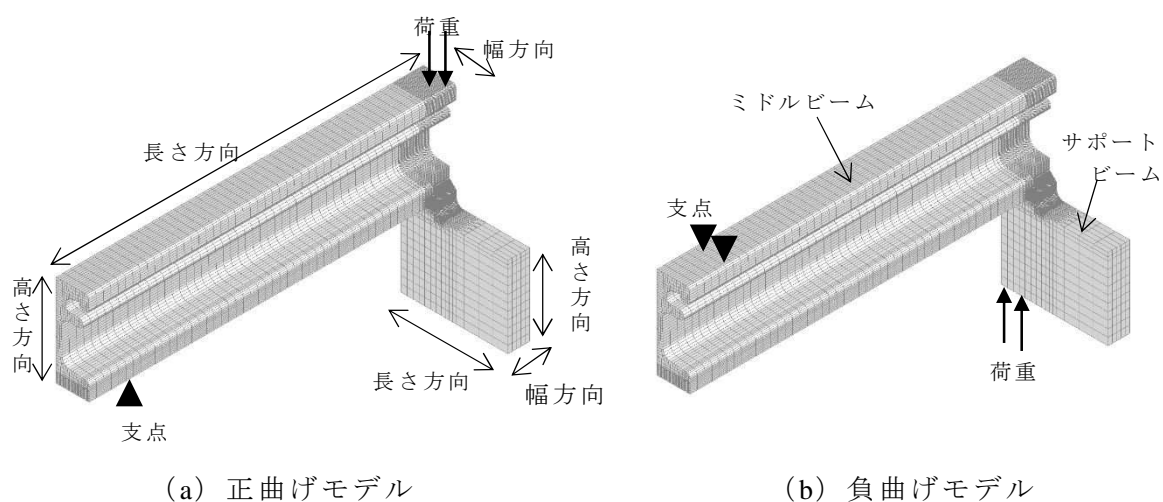


図 4-17 解析モデル

4.4.2 解析方法

応力解析は、汎用解析プログラム NX Nastran を用いて行った。鋼材のヤング率は 2.0

$\times 10^5 \text{N/mm}^2$, ポアソン比は 0.3 とした. 正曲げモデル (AW1, FW1, FW2 試験体) は, ミドルビーム上面に 11.1 N/mm^2 の等分布荷重を作用させて解析した. 負曲げモデル (AW2, FW3 試験体) は, サポートビーム下面に 14.8 N/mm^2 の等分布荷重を作用させて解析した (図 4-17 参照). このような荷重に対して梁計算により算出した M 溶接部の公称応力は, 止端で 102.8 N/mm^2 , ルートで 103.8 N/mm^2 とほぼ同じである.

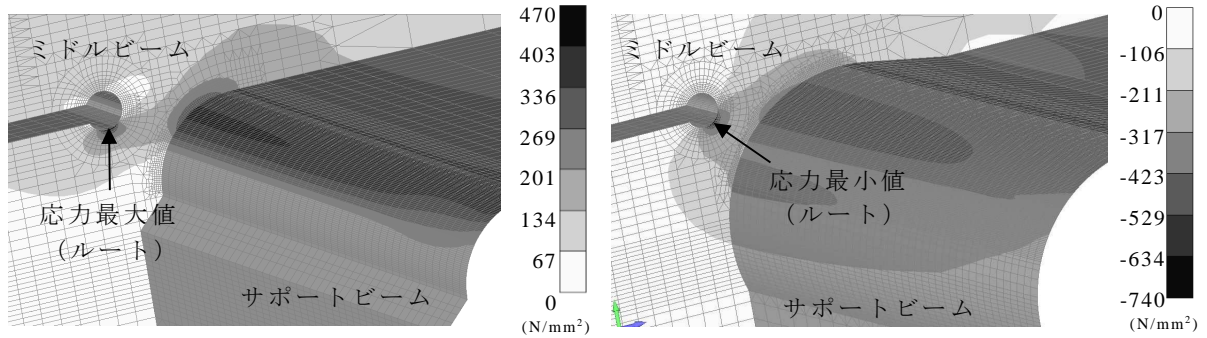
4.4.3 解析結果

応力解析により得られた, 各試験体モデルの溶接止端とルートの有効切欠き応力を公称応力で除すことにより求めた α を表 4-3 に示す. α は, $\rho = 1 \text{ mm}$ の場合に止端で高く, $\rho = 4.5, 8.5 \text{ mm}$ の場合にルートで高い. すなわち, ρ が 1 mm の AW1, AW2 試験体では止端き裂, $\rho = 4.5, 8.5 \text{ mm}$ の FW2, FW3 試験体ではルートき裂が生じたことと対応している. ρ を 3 mm とし, 止端破壊した FW1 の溶接止端の α はルートよりも小さいものの, FW2, FW3 での差よりも小さい. このように, M 溶接部の疲労き裂の起点は, 有効切欠き応力概念によって概ね特定できると言える.

表 4-3 各試験体モデルの M 溶接部の α

試験体モデル	ρ (mm)	止端の α	ルート の α	破壊起点	
正曲げ	AW1	1.0	5.20	3.82	止端
	FW1	3.0	3.64	4.15	止端
	FW2	4.5	3.35	4.46	ルート
負曲げ	AW2	1.0	6.16	5.63	止端
	FW3	8.5	3.51	7.09	ルート

ρ を 1 mm とした AW2 (負曲げ) の止端とルートの α は, AW1 (正曲げ, $\rho = 1 \text{ mm}$) よりも高い. 負曲げモデルは, サポートビーム面に等分布荷重を載荷している. そのため, 鉛直方向の応力成分が大きくなり, 正曲げモデルとの差が生じたと考えられる. 図 4-18 に FW2 モデル (正曲げ) と FW3 モデル (負曲げ) の有効切欠き応力のピークが得られた位置を示す. 最も高い応力集中が生じている位置は, 両者で異なっている. すなわち, 正曲げでは円孔の下部, 負曲げでは右斜め 45 度の位置に有効切欠き応力のピークが生じている. そのため, 図 4-15 に示したように, 疲労き裂の進展角度が異なったものと考えられる



(a) FW2 モデル（正曲げ， $\rho = 4.5\text{mm}$ ） (b) FW3 モデル（負曲げ， $\rho = 8.5\text{mm}$ ）

図 4-18 有効切欠き応力のピーク位置

4.5 ルート疲労破壊を防止する溶接詳細と疲労強度

ここでは，M 溶接部の止端の曲率半径，溶接脚長と溶け込み深さをパラメータとした解析モデルを対象として，止端とルートの有効切欠き応力を求め，それぞれの位置での応力集中係数を比較することにより，ルート破壊を防止するための溶接詳細について検討する．以後，止端の曲率半径を ρ ，溶接脚長を S ，溶け込み深さを P_w ，そして応力集中係数を α と記す．解析モデルの ρ と S ， P_w の関係を図 4-19 に示す．ここでは， ρ は S 以下とした．

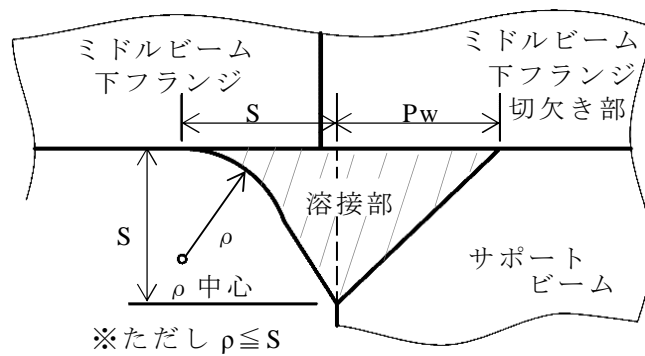


図 4-19 解析モデルの ρ と S ， P_w の関係（M 溶接部）

4.5.1 解析モデルと解析方法

解析モデルは，4.4.1 節で示した試験体の解析モデルと基本的には同じである． ρ は 1,3,5,10,15mm の 5 種類， S は 6,10,15mm の 3 種類， P_w は 0,5,10,15,20mm の 5 種類，そして正曲げと負曲げの 2 種類を組合せた 120 のモデルの解析を行った．なお， P_w が 0 の場合はすみ肉溶接である．有効切欠き応力を求める着目位置近傍の要素寸法は 0.1mm 程度である．解析方法は 4.4.2 節で述べた方法と同じである．

4.5.2 解析結果

正曲げの解析により得られた止端の α とPwの関係，ルートの α とPwの関係を図4-20に示す．ここでは， $S=10\text{mm}$ での結果を示しており，図中のマークは ρ により変えている．止端の α は， ρ が大きくなるにしたがって小さくなっているものの，Pwの影響はいずれの ρ においてもほとんど見られない．ルートの α は，Pwが深くなるにしたがって小さくなっている．また，ルートの α は，Pwが浅い場合に， ρ により異なっているものの，Pwがある程度深くなると ρ による変化は小さくなっている．

図4-21は，正曲げでの止端の α とSの関係，ルートの α とSの関係を示している．

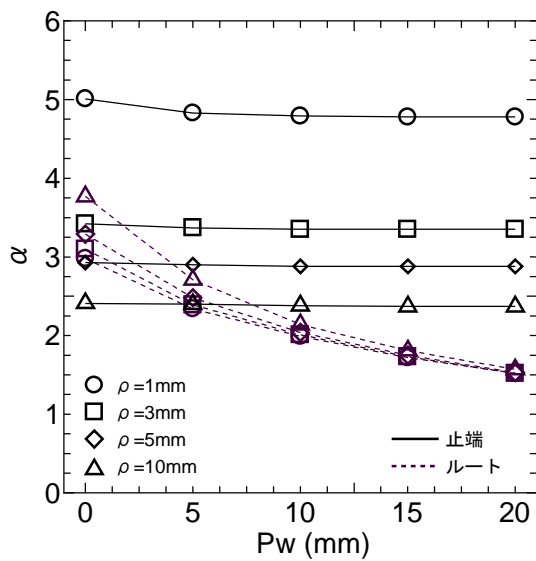


図 4-20 α と Pw の関係 ($S=10\text{mm}$)

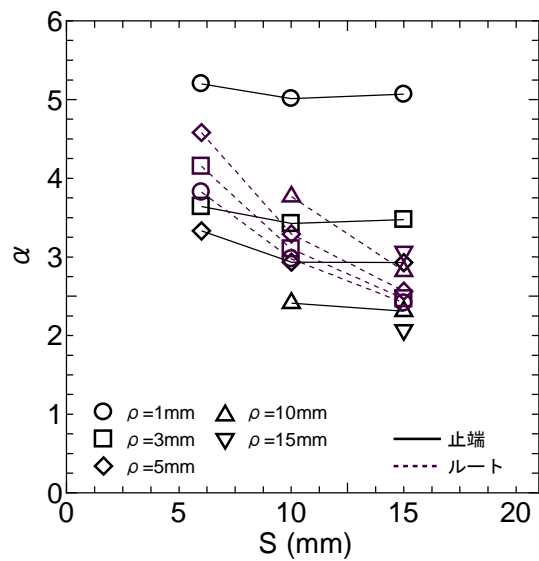


図 4-21 α と S の関係 ($Pw=0$)

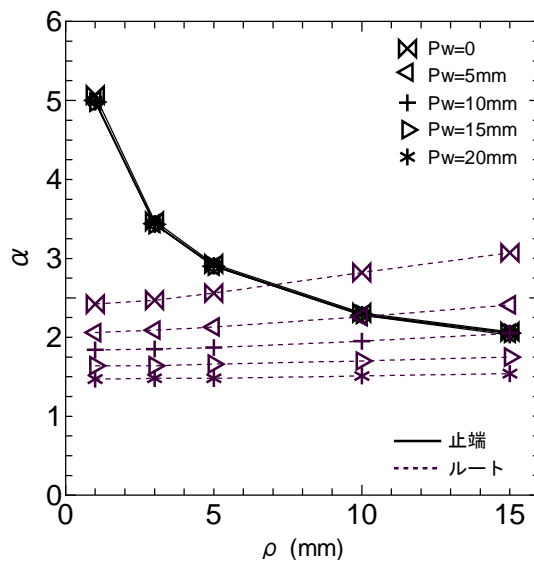


図 4-22 α と ρ の関係 ($S=15\text{mm}$)

ここでは、 $P_w=0$ の結果を示している。止端の α は、 ρ により異なるものの、 S による変化はほとんどない。ルート上の α は、 S が大きくなることにより小さくなっている。

正曲げでの止端あるいはルート上の α と ρ の関係を図 4-22 に示す。この図は、 $S=15\text{mm}$ での結果であり、図中のマークは P_w によって変えている。止端の α は、 ρ が大きくなるにしたがって小さくなっており、それに対する P_w の影響は認められない。ルート上の α については、 ρ の影響は小さい。

4.5.3 ルート疲労破壊を防止する溶接詳細と疲労強度の検討

疲労き裂の発生起点は、一般に応力集中部であるため、ルート上の α が溶接止端の α に対して十分に低ければ、 M 溶接部のルート疲労破壊を防止できると考えられる。前項では、疲労き裂の発生点の有効切欠き応力に影響を及ぼすと考えた 3 つのパラメータ (ρ , S , P_w) を取上げたが、それらを組合せて判断することは煩雑である。そこで、ルート上の α は S と P_w が大きくなるにしたがって低くなること、また止端の α に対する S と P_w の影響が小さいことを考慮し、 $S+P_w$ で止端とルート上の α を整理した。

正曲げでのルート上の α と $S+P_w$ の関係を図 4-23 に示す。図中には、すべてのデータを対象として、最小二乗法によって求めた $S+P_w$ に対する α の回帰曲線も示している。多少のばらつきはあるものの、 ρ の大きさによらず、 α と $S+P_w$ はほぼ一つの関係で与えられる。図 4-24 は、正曲げでの止端の α と $S+P_w$ の関係を示している。図中の直線群は ρ ごとに求めた α の平均線である。 ρ が大きいほど α は小さいものの、 $S+P_w$ が止端の α に及ぼす影響はほとんどない。

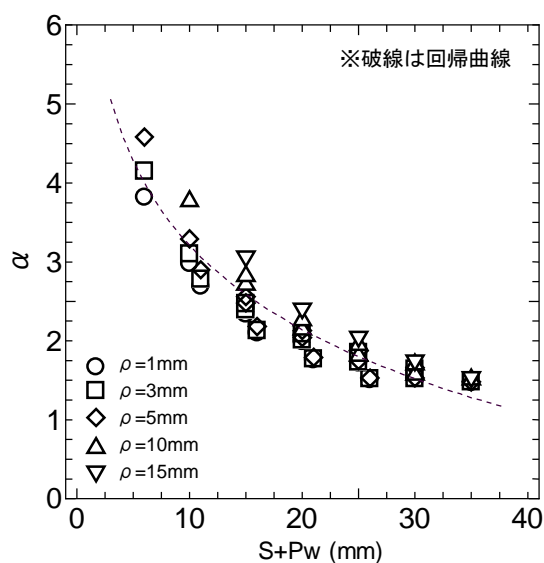


図 4-23 α と $S+P_w$ の関係 (ルート)

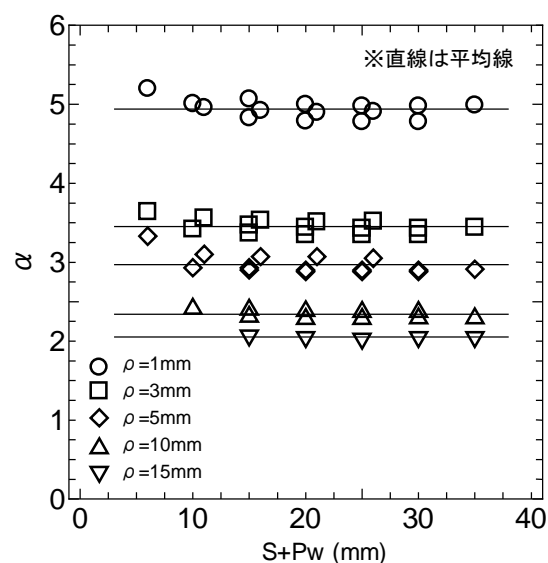


図 4-24 α と $S+P_w$ の関係 (止端)

図 4-25 は、図 4-23 に示した $S+Pw$ に対するルートの α の回帰曲線と、図 4-24 に示した ρ ごとの止端の α の平均線を示している。ただし、ここでは確実にルート破壊が防止できるように、止端の α の平均値を仮に 70%とした線を示している。各 ρ での溶接止端の α と $S+Pw$ の関係とルートの α と $S+Pw$ の関係の交点よりも $S+Pw$ を大きくすれば、各 ρ でルート破壊を防止できると考えられる。このようにして求めた各 ρ に対応する $S+Pw$ の値を表 4-4 に示す。 ρ を 10mm とした場合の $S+Pw$ は 27.8mm、 ρ が 15mm の場合で 31.7mm となる。すなわち、現在の完全溶け込み溶接に対応する $\rho = S = 15\text{mm}$ とした場合の Pw は 16.7mm となる。なお、負曲げの α は、図 4-26 に示すように、正曲げの場合と比較して止端で 10%程度、ルートで 20%程度高い。このことから、正曲げで検討した結果は負曲げでも使用できると考えられる。

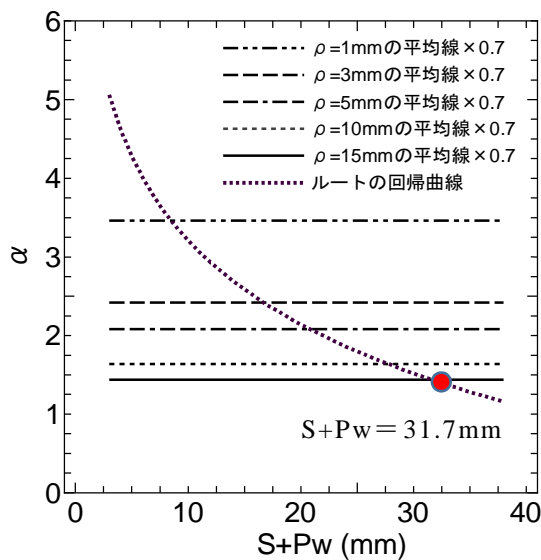


図 4-25 α と $S+Pw$ の関係（正曲げ）

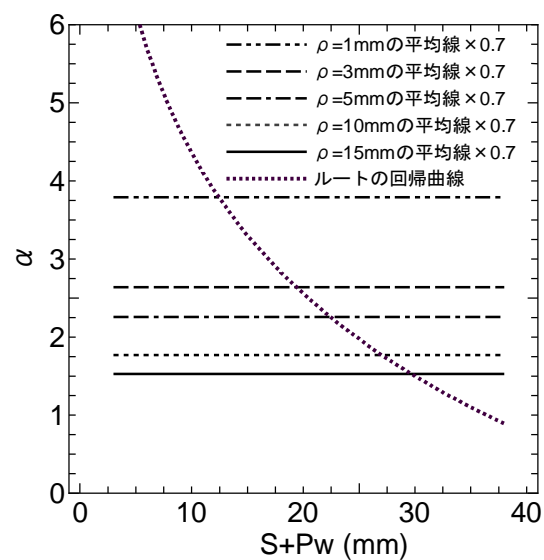


図 4-26 α と $S+Pw$ の関係（負曲げ）

表 4-4 ルート疲労破壊を防止できる ρ に対応する $S+Pw$ の関係（正曲げ）

ρ (mm)	$S + Pw$ (mm)
1	8.5
3	16.7
5	20.8
10	27.8
15	31.7

ルート疲労き裂を防止することで、M 溶接部の疲労耐久性評価は、溶接止端に対して行えばよいことになる。完全溶け込み溶接で ρ を 15mm とした場合、疲労強度等級は JSSC 指針に定められる C 等級であることを前章で示した。図 4-20 や図 4-21 に示したように、溶接止端の α は Pw や S の影響を受けない。疲労強度が α に反比例することを考慮すれば、 $\rho = 15\text{mm}$ とした部分溶け込み溶接の疲労強度等級も C になるものと考えられる。

4.6 まとめ

本章では、ミドルビーム (M) とサポートビームの接合にすみ肉溶接を用いたモジュラー型伸縮装置の M 溶接部に発生する疲労き裂の起点が有効切欠き応力により評価できることを明らかにする目的で、溶接形状の異なる試験体を用いた疲労試験ならびに応力解析を行った。また、モジュラー型伸縮装置の溶接部を完全溶け込みから部分溶け込みに変更した場合に、M 溶接部のルート疲労き裂を防止しうる溶接詳細を明らかにする目的で、溶接止端の曲率半径と溶接脚長、溶け込み深さをパラメータとしたモデルの応力解析を行った。ここで得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) モジュラー型伸縮装置の M 溶接部に発生する疲労き裂の起点は、有効切欠き応力概念により概ね特定できる。
- (2) 溶接脚長と溶け込み深さを大きくすることにより、M 溶接部のルート疲労破壊を防止することができる。その評価は、溶接脚長 + 溶け込み深さをういればよい。
- (3) M 溶接部のルート疲労破壊を防止するための溶接詳細として、止端の曲率半径を 10mm に仕上げた場合に溶接脚長 + 溶け込み深さを 28 mm 以上、止端の曲率半径を 15mm に仕上げた場合には溶接脚長 + 溶け込み深さを 32 mm 以上とすることが考えられる。
- (4) 溶接止端の応力集中係数は、溶接脚長や溶け込み深さに影響しないことから、M 溶接部の止端の曲率半径を 15mm、溶接脚長 + 溶け込み深さを 32mm 以上とした場合の疲労強度は、JSSC 指針に定められる C 等級と考えられる。

【参考文献】

- [1] 上毛新聞社：上毛新聞（ジョイント外れ路面に10台乗り上げパンク関越道が7時間通行止め昭和の永井川橋），2002年3月26日．
- [2] 伏屋和樹，竹市雅人，山田健太郎：ビーム型伸縮装置の溶接部の疲労試験，構造工学論文集，Vol.60A，pp.642-650，2014年3月．
- [3] 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 - 2012年改訂版，技報堂出版，2012年6月．
- [4] 森猛，明見正雄：十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性，土木学会論文集 A，Vol.65No.1，pp.188-195，2009.2.
- [5] Hobbacher, A. : IIW Recommendations for Fatigue Design for Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.
- [6] 森猛，鈴木俊光，大前暢，村上貴紀，射越潤一：有効切欠き応力概念を用いた止端仕上げ面外ガセット溶接継手のルート疲労破壊防止法の検討，鋼構造論文集，第21巻第83号，pp.43-52，2014年9月．
- [7] 溶接学会溶接疲労強度研究委員会：溶接構造の疲労，産報出版，2015年12月．

第5章 疲労照査例

5.1 はじめに

第2章では、疲労照査で必要となる疲労基本荷重に等価輪重の適用を考え、国土交通省国土技術政策総合研究所などで行われた活荷重の実態調査結果[1,2]からその値を整理して示した。また、疲労基本荷重を補正する係数として、衝撃係数 (i) とリバウンド係数 (α_R)、荷重分担率 (α_S)、そして水平方向力を考慮した補正係数 (α_h) の考え方を示した。また、溶接部に生じる公称応力の計算方法として三次元骨組構造を推奨するとともに、それにより得られた断面力の補正係数として、車両の走行位置のばらつきを考慮するための走行位置荷重補正係数 (α_{hl}) の考え方を示した。第3章では、ミドルビームとサポートビームの接合を完全溶け込み溶接としたモジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を示した。

疲労基本荷重やその荷重を補正する係数については、今後さらに検討する必要があるが、ここでは、第2章に示した考え方から仮定した値と第3章で示した疲労強度を用いて、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐久性の照査例を示す。

5.2 照査対象

照査対象は、図5-1に示す3本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置である。

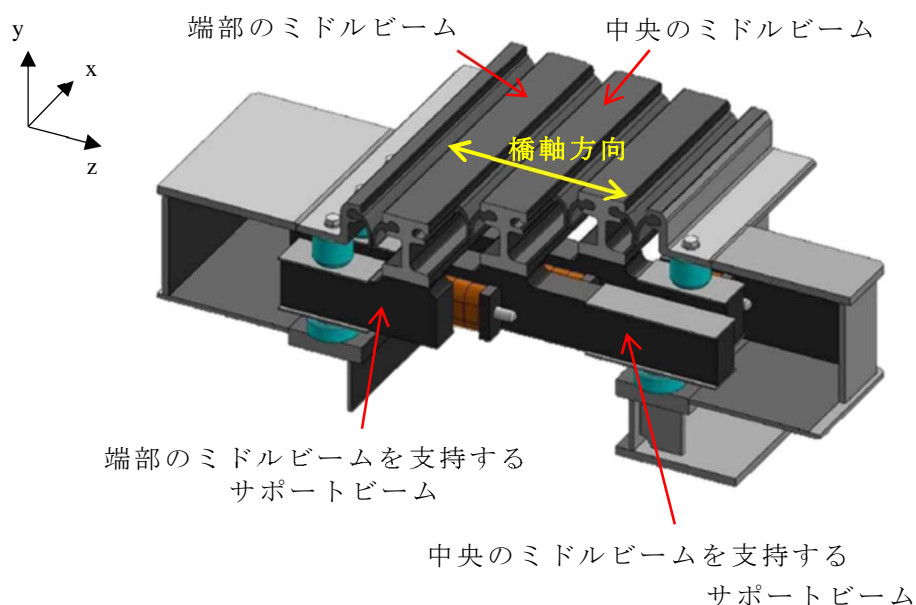


図 5-1 3本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置

照査モデルの形状と寸法を図 5-2 と図 5-3 に示す。図 5-2 は 3 本のミドルビームのうち中央のミドルビームとミドルビームを支持するサポートビームを、図 5-3 は端部のミドルビームとそれを支持するサポートビームを三次元骨組構造としてバー要素によりモデル化した。要素寸法は 50mm である。図中には、支点位置（拘束条件）と接合部の呼称（A～E）も示している。ミドルビームの長さは 6,400mm である。サポートビームの長さはベアリング間寸法の 730mm である。サポートビームは、ミドルビームの長さ方向に 1,400mm の間隔で 5 本配置した。照査モデルの作成には、有限要素解析用プリ・ポストソフトウェア Femap11.2.1 を用いた。

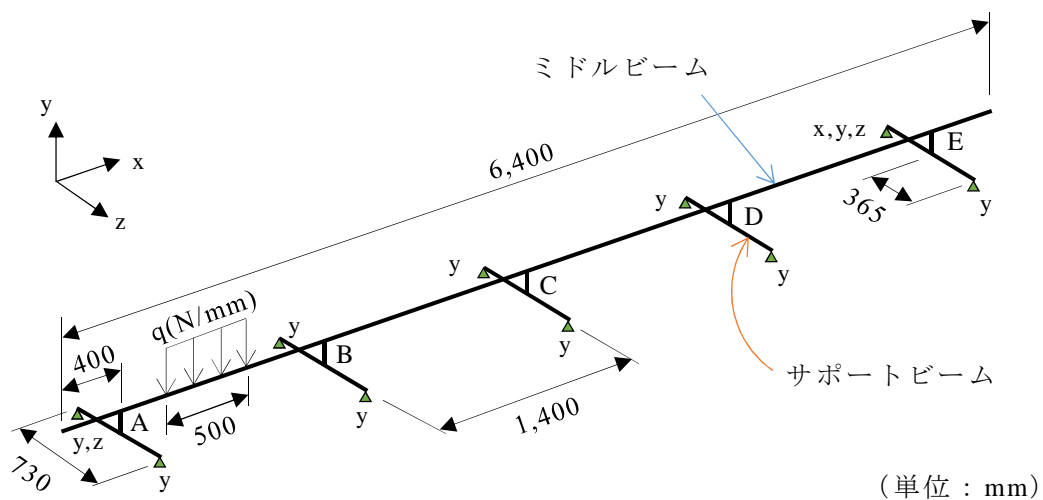


図 5-2 照査モデルの形状と寸法（3 本のミドルビームのうち中央）

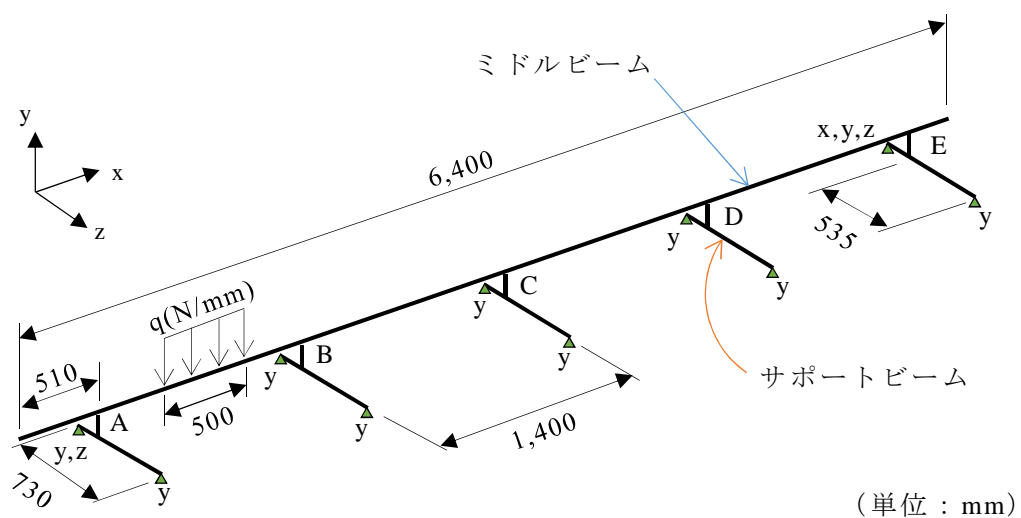


図 5-3 照査モデルの形状と寸法（3 本のミドルビームのうち端部）

5.3 応力計算法

ミドルビームとサポートビームに生じる断面力（曲げモーメント）の照査位置と応力計算における荷重の載荷方法を以下に示す．応力計算は，汎用解析プログラム NX Nastran を用いて行った．鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比は 0.3 である．

5.3.1 照査位置

照査位置は，ミドルビームあるいはサポートビームの各接合部近傍とした．1つの接合部の着目箇所は，図 5-4 に示すように，ミドルビームで 2箇所，サポートビームで 2箇所の計 4箇所である．接合部 A と接合部 E は，ミドルビームの長さ方向で見たとき，ほぼ道路の端部にあたる．そのため，これらの接合部は照査の対象外とする．すなわち，着目箇所は 3つの接合部（B,C,D）で計 12箇所となる．これらのうち，ミドルビームあるいはサポートビームに生じる断面力の大きい着目箇所を照査位置とした．

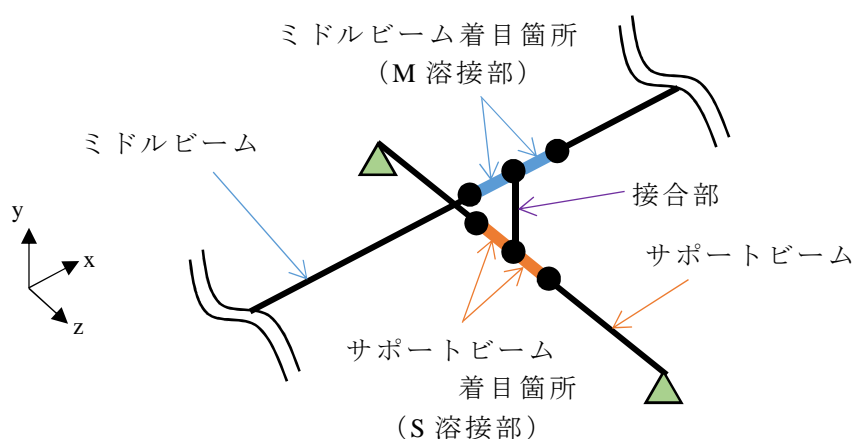


図 5-4 接合部近傍のミドルビームとサポートビームの着目箇所

5.3.2 疲労荷重と載荷方法

疲労荷重は，第 2 章で示した求め方に基づき，等価軸重の半分の等価輪重 (W) を疲労基本荷重とし，その荷重を補正する，衝撃係数 (i)，リバウンド係数 (α_R)，荷重分担率 (α_s)，水平方向力を考慮した補正係数 (α_h)，そして走行位置荷重補正係数 (α_{h1}) を乗じて式 (5.1) から求める．疲労基本荷重は，国土交通省国土技術政策総合研究所が発行した国土技術政策総合研究所資料[1]（以後，国総研資料と記す）で示されたデータから求めた等価輪重を引用することとした．その値は国道 23 号（上り線）の 55.4kN とした．この値に，衝撃係数 ($i=0.4$)，リバウンド係数 ($\alpha_R=0.1$)，

荷重分担率 ($\alpha_s=0.6$), 水平方向力を考慮した補正係数 ($\alpha_h=0.2$), そして走行位置荷重補正係数 ($\alpha_{hl}=0.92$) をそれぞれ仮定することで求められる疲労荷重は 56.5kN となる.

$$\text{疲労荷重} = \text{疲労基本荷重}(W) \times (1+i) \times (1+\alpha_R) \times \alpha_s \times \alpha_h \times \alpha_{hl} \quad \dots (5.1)$$

ここで, W : 疲労基本荷重 (等価輪重)

i : 衝撃係数

α_R : リバウンド係数

α_s : 荷重分担率

α_h : 水平方向力を考慮した補正係数

α_{hl} : 走行位置荷重補正係数

疲労荷重の載荷位置は, 図 5-2 と図 5-3 に示した照査モデルのミドルビーム上を 50mm 間隔で変化させている. また, 載荷位置は, 照査モデルの対称性を考慮して, 接合部 A から接合部 C までとしている. 載荷ケースは, それぞれの照査モデルで計 57 である. 疲労荷重の載荷幅や隣にある車輪の位置は, 図 5-5 に示す T 荷重を仮定した. 支点は, サポートビームを支持するベアリングの位置に設けた. 支点の拘束条件は, 図 5-2 と図 5-3 に示したとおりである.

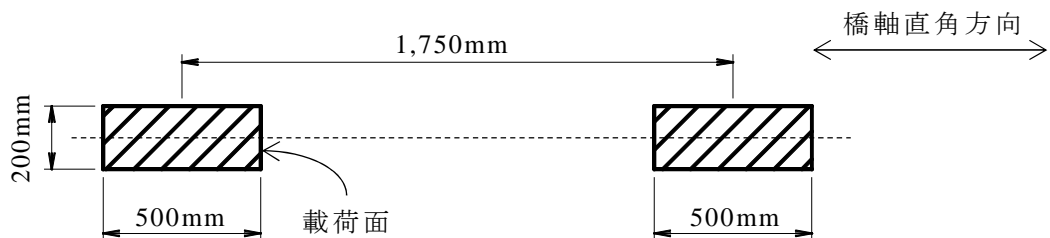


図 5-5 T 荷重の寸法

5.4 応力計算結果

各接合部の最大曲げモーメントを表 5-1 に示す. これらの値は, 前述の応力計算法で求めた各接合部の曲げモーメントの影響線に基づき, 1,750mm 離れた位置にある隣の車輪を考慮して, その位置の曲げモーメントを足し合わせている. 曲げモーメントの方向は, ミドルビームで z 軸, サポートビームで x 軸である. 引張力を生じさせる曲げモーメントが正である. ミドルビームとサポートビームの接合部には圧縮力が作用している. 表 5-2 は, 表 5-1 に示した各接合部の最大曲げモーメントから求めた曲

げ応力度を示している。曲げ応力度の算出は、表中に示す断面係数を用いた。図 5-6 にミドルビームの断面を示す。サポートビームの断面は幅 60mm，高さは中央のミドルビームを支持するサポートビームで 117mm，端部のミドルビームを支持するサポートビームで 98mm である。

ここで対象とした照査モデルでは，ミドルビームに比べてサポートビームの曲げ応力度が大きい。疲労強度等級は第 3 章で述べたとおりどちらも同じある。このことから，S 溶接部の溶接止端の疲労寿命が短いと判断できる。

表 5-1 各接合部の最大曲げモーメント

	中央のミドルビームに着目		端部のミドルビームに着目	
	ミドルビーム M_z (kN・m)	サポートビーム M_x (kN・m)	ミドルビーム M_z (kN・m)	サポートビーム M_x (kN・m)
接合部 B	-10.6	-10.0	-10.8	-7.9
接合部 C	-9.7	-9.1	-9.8	-7.1
接合部 D	-10.6	-10.0	-10.8	-7.9

表 5-2 接合部の最大曲げモーメントと曲げ応力度

	中央のミドルビームに着目		端部のミドルビームに着目	
	ミドルビーム	サポートビーム	ミドルビーム	サポートビーム
曲げモーメント M (kN・m)	$M_z=-10.6$	$M_x=-10.0$	$M_z=-10.8$	$M_x=-7.9$
断面係数 Z (mm ³)	$Z_z=183,100$	$Z_x=136,890$	$Z_z=183,100$	$Z_x=96,040$
曲げ応力度 σ (N/mm ²)	$\sigma_z=-58.0$	$\sigma_x=-73.1$	$\sigma_z=-59.0$	$\sigma_x=-81.8$

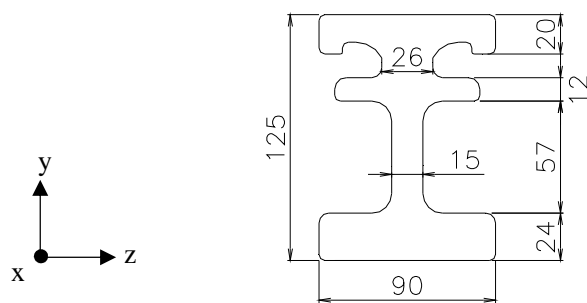


図 5-6 ミドルビームの断面形状

5.5 疲労照査（疲労耐用年数の試算）

これまでに示した照査モデルを対象として，溶接タイプモジュラー型伸縮装置の疲労耐用年数を試算する．疲労荷重から求める応力範囲と疲労寿命の関係は式（5.2）で与えられる．溶接部の疲労強度等級は，溶接部を整形し，止端をそのままとした場合で，日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」[3]（以後，JSSC 指針と称する）に示される E，R15 の止端仕上げとした場合で C とする．それぞれの等級の 200 万回基本疲労強度は，C で 125 N/mm²，E で 80 N/mm² である．

$$\Delta\sigma^3 \cdot N = C_0 \quad \dots (5.2)$$

ここで， $\Delta\sigma$ ：疲労荷重から求められる応力範囲

N ：疲労寿命に至る車両の通過軸数

C_0 ：継手の等級ごとに与えられる定数（ $=2 \times 10^6 \times \Delta\sigma_f^3$ ）

$\Delta\sigma_f$ ：疲労強度等級 C の場合で 125N/mm²

疲労強度等級 E の場合で 80N/mm²

仮定した疲労荷重に対応する頻度は，国総研資料に示された国道 23 号（上り線）のデータから求めた 1 日 1 車線あたりの通過軸数 15,728 とした．疲労強度等級は JSSC 指針に示される C あるいは E とした．それぞれの場合について疲労耐用年数を試算した結果を表 5-3 と表 5-4 に示す．表 5-3 は疲労強度等級を C とした場合，表 5-4 は E とした場合である．疲労耐用年数を求める場合の年間日数は 315 とした[4]．これは，大型車の交通実態から，一週間のうち土曜日と日曜日を合わせて 1 日として考えたものである．

表 5-3 溶接部の疲労強度等級を C とした場合の疲労耐用年数

200 万回基本疲労強度 125 N/mm ²		照査応力 (N/mm ²)	疲労耐用年数 (年)
中央のミドル ビームに着目	M 溶接部の止端	-58.0	4.0
	S 溶接部の止端	-73.1	2.0
端部のミドル ビームに着目	M 溶接部の止端	-59.0	3.8
	S 溶接部の止端	-81.8	1.4

表 5-4 溶接部の疲労強度等級を E とした場合の疲労耐用年数

200 万回基本疲労強度 80N/mm ²		照査応力 (N/mm ²)	疲労耐用年数 (年)
中央のミドル ビームに着目	M 溶接部の止端	-58.0	1.1
	S 溶接部の止端	-73.1	0.5
端部のミドル ビームに着目	M 溶接部の止端	-59.0	1.0
	S 溶接部の止端	-81.8	0.4

照査のために仮に定めた数値で求めたモジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐用年数は短く計算された。第 3 章で示したように、溶接部の疲労強度等級は各ビームとも同じである。そのため、ここで示した照査モデルの場合、照査応力の大きい S 溶接部で疲労耐用年数は小さくなる。

5.6 今後の検討

疲労荷重の大きさとその頻度，そして疲労基本荷重を補正する係数により，モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐用年数は増減する。

疲労基本荷重とその頻度については，第 2 章に示した考え方に基づいて，道路管理者が設定することが望ましいと考える。それらの設定では，必ずしも画一的ではなく，路線の重要度や交通実態などを踏まえ，いくつかに分類とするといった選択も考えられる。その判断材料となり得る車両重量や軸数などのデータをさらに蓄積・分析することが重要と考える。

今回の照査で用いた疲労基本荷重（等価輪重）を補正するための衝撃係数やリバウンド係数，そして水平方向力を考慮した補正係数は，過去に実施した走行試験から求めた安全側の値である。これらの係数が常に作用すると仮定して求めた疲労荷重が，断面力の最大となる位置に載荷されると仮定しているため，疲労寿命が短く計算されたとも考えられる。ただし，荷重分担率は静的載荷試験結果に基づいており，動的荷重下では分かっていない。疲労照査の精度を高くするには，これらの補正係数について，計測等によりさらに検討する必要があると考えている。

5.7 まとめ

本章では、第2章で示した疲労基本荷重とその荷重を補正する係数、そして応力計算法の考え方と、第3章で示した疲労強度に基づき、3本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置を対象とし、中央あるいは端部に配置するミドルビームとミドルビームを支持するサポートビームの溶接接合部について、疲労耐久性の照査例を示した。ここで示した主な内容は以下のとおりである。

- (1) 疲労基本荷重に用いる等価輪重を国道23号上り線の55.4kNと仮定した場合、衝撃係数 ($i=0.4$)、リバウンド係数 ($\alpha_R=0.1$)、荷重分担率 ($\alpha_S=0.6$)、水平方向力を考慮した補正係数 ($\alpha_h=0.2$)、そして走行位置荷重補正係数 ($\alpha_{hl}=0.92$) をそれぞれ仮定して求められる疲労荷重は56.5kNとなる。
- (2) 疲労荷重 (56.5kN) とその疲労荷重に対応する車両の通過軸数を1日1車線あたり15,728と仮定して、それぞれの場合について疲労耐用年数を試算すると、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐用年数は短く計算された。
- (3) 疲労基本荷重とその頻度については、第2章に示した考え方に基づいて、道路管理者により設定されることが望ましいと考える。それらの設定では、必ずしも画一的ではなく、路線の重要度や交通実態などを踏まえ、いくつかに分類とするといった選択も考えられる。その判断材料となる車両重量や軸数などに関するデータをさらに蓄積・分析することが重要と考える。
- (4) 今回の照査で用いた疲労基本荷重 (等価輪重) を補正するための衝撃係数やリバウンド係数、そして水平方向力を考慮した補正係数は、過去に実施した走行試験から求めた安全側の値である。これらの係数が常に作用すると仮定して求めた疲労荷重が、断面力の最大となる位置に載荷されると仮定しているため、疲労寿命が短く計算されたとも考えられる。ただし、荷重分担率は静的載荷試験結果に基づいており、動的荷重下では分かっていない。疲労照査の精度を高くするには、これらの補正係数について、計測等によりさらに検討する必要があると考える。

【参考文献】

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書 - 全国活荷重実態調査 - ，国土技術政策総合研究所資料第 295 号，平成 18 年 1 月．
- [2] 高田佳彦，木代穰，中島隆，薄井王尚：BWIM を応用した実働荷重と走行位置が鋼床版の疲労損傷に与える影響検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1456-1467，2009 年 3 月．
- [3] 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 - 付・設計例 - 2012 年改訂版，技報堂出版，2012 年 6 月．
- [4] 八木貴之，山田健太郎，小塩達也：道路橋伸縮装置の疲労耐久性評価法の検討，土木学会論文集 A，Vol.63 No.3，pp.486-495，2007 年 7 月．

第 6 章 結論

本研究では，ミドルビームとサポートビームの接合に溶接を用いるモジュラー型伸縮装置の疲労耐久性評価手法の考え方を整理する目的で，疲労荷重や応力計算法，疲労照査法の考え方について検討するとともに，疲労照査を行うために不可欠な溶接部の疲労強度を明らかにした．すなわち，疲労荷重や応力計算法，疲労照査法の考え方については，各国の耐久性評価基準や既往の研究を踏まえ，現在の活荷重実態から求めた等価輪重を疲労基本荷重と考え，疲労基本荷重を補正する衝撃やリバウンド，荷重分担の各係数，そしてドイツやアメリカで考慮されている水平力について，実物大試験体を用いた走行試験と静的載荷試験で検討を行った．疲労基本荷重にそれぞれの補正係数を乗じた疲労荷重により求める溶接部の公称応力は，モジュラー型伸縮装置の構造を可能な限り再現できるようにミドルビームとサポートビームの上下位置を考慮した三次元骨組構造で求めることを考えた．疲労強度については，完全溶け込み溶接部に生じる疲労き裂を対象として，溶接部の寸法と形状の異なる試験体の疲労試験と応力解析を行うことにより検討した．そして，疲労荷重や応力計算法，疲労照査法の考え方と明らかにした疲労強度に基づき，3本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置を対象とした疲労耐久性の照査例を示した．

各章で得られた結果は以下のとおりである．

第 2 章 伸縮装置の断面設計と疲労照査

第 2 章では，モジュラー型伸縮装置の現行の断面設計法と溶接部に対する疲労照査法を示した．疲労照査法では，国内外の手法の整理を行うとともに，疲労照査に必要なとなる疲労荷重，応力計算法，疲労強度，そして疲労照査法の考え方を示した．ここで示した主な内容は以下のとおりである．

- (1) モジュラー型伸縮装置の断面設計で用いる力は，道路橋示方書に示される床版および床組を設計する場合の活荷重（T 荷重）に衝撃係数（ $i=0.4$ ）を考慮した値である．その際に用いるミドルビームの断面力は，サポートビームを支点とした 4 径間連続梁により三連モーメント法で算出されている．また，サポートビームの断面力は，ベアリングを支点とした単純梁として求められている．
- (2) 伸縮装置に対する具体的な耐久性評価法は，現在の道路橋示方書には示されていない．また，日本の NEXCO3 社で規定する耐久性評価手法により，モジュラー型

伸縮装置溶接部の疲労強度を求めることはできるものの、走行する活荷重の実態や衝撃やリバウンド、複数のミドルビームによる荷重分担の影響、そして溶接部の形状や寸法に依存する疲労強度などの検討を行う余地はある。ドイツやアメリカでは、モジュラー型伸縮装置に対する疲労照査法が定められている。しかし、車両特性や交通事情、溶接部の形状が各国で異なるため、日本のモジュラー型伸縮装置溶接部の耐久性評価に適用する疲労基本荷重と疲労荷重を求めるために必要となる補正係数、そして疲労強度の考え方を示した。

- (3) 疲労基本荷重には、等価輪重を用いることを考え、国土交通省国土技術政策総合研究所などで行われた活荷重の実態調査結果に基づき、等価輪重とその頻度の考え方を示した。疲労基本荷重とその頻度は、等価輪重と軸数のデータに基づき、将来予測も含めて設定すべきと考える。
- (4) 疲労基本荷重を補正する際に考慮すべき衝撃とリバウンド、荷重分担について、実物大試験体を用いた静的載荷試験と走行試験の結果を用いて検討した。その結果、走行速度の影響をさらに検討する必要があるものの、衝撃係数 (i) を 0.4、リバウンド係数 (α_R) を 0.1 と仮定した場合、車両の走行により生じる応力度は、三次元骨組構造で求めた応力度の 1.54 倍となる。各国の基準に示されている値は、アメリカで 1.75、ドイツで 1.69 ($i=0.3$, $\alpha_R=0.3$) である。シールゴム遊間ごとの荷重分担率 (α_S) は、輪重を 65kN 程度とした場合に、40mm で 60%程度、60mm で 65%程度、そして 80mm で 70%程度であった。荷重分担率については、動的荷重下での検討が必要と考える。
- (5) 鉛直方向力に対する水平方向力の割合（水平方向力を考慮した補正係数）は、走行速度の影響をさらに検討する必要があるものの 0.1~0.2 程度であった。
- (6) 疲労荷重の作用によって溶接部に生じる公称応力は、三次元骨組構造を用いて求めることを提案した。
- (7) 車両の走行位置のばらつきを考慮する走行位置荷重補正係数 (α_{hl}) の考え方について示した。軸重の載荷範囲を $\pm 400\text{mm}$ とした場合の走行位置荷重補正係数は 0.92 となった。

以上より、疲労荷重は、等価軸重の半分の等価輪重 (W) を疲労基本荷重とし、その値に衝撃係数 (i)、リバウンド係数 (α_R)、荷重分担率 (α_S)、水平方向力を考慮した補正係数 (α_h)、そして走行位置荷重補正係数 (α_{hl}) を乗じて求めることとした。

$$\text{疲労荷重} = \text{疲労基本荷重}(W) \times (1+i) \times (1+\alpha_R) \times \alpha_S \times \alpha_h \times \alpha_{hl}$$

ここで、 W : 疲労基本荷重 (等価輪重)

i : 衝撃係数

α_R : リバウンド係数

α_S : 荷重分担率

α_h : 水平方向力を考慮した補正係数

α_{hl} : 走行位置荷重補正係数

第3章 完全溶け込み溶接の疲労強度

第3章では、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労強度を明らかにする目的で、溶接部の寸法や形状の異なる試験体の疲労試験と有限要素応力解析を行った。疲労試験は、実構造の応力発生状況と異なるが、安全側の疲労強度が得られるように、溶接部に引張応力を作用させるように行った。ここで得られた結果は以下のとおりである。

(1) WF は溶接部を整形したもの、RF は止端を含めて円弧状に仕上げたものである。

ミドルビーム (MB) 試験体、サポートビーム (SB) 試験体ともに、RF の疲労強度が WF より高い。

(2) JSSC 指針に示される継手の強度等級に分類すると、溶接部を整形し、止端をそのままとした場合で E、R15 の止端仕上げとした場合で C である。

第4章 部分溶け込み溶接によるルート疲労破壊の防止と疲労強度

第4章では、ミドルビーム (M) とサポートビームの接合にすみ肉溶接を用いたモジュラー型伸縮装置の M 溶接部に発生する疲労き裂の起点が有効切欠き応力により評価できることを明らかにする目的で、溶接形状の異なる試験体を用いた疲労試験ならびに応力解析を行った。また、モジュラー型伸縮装置の溶接部を完全溶け込みから部分溶け込みに変更した場合に、M 溶接部のルート疲労き裂を防止しうる溶接詳細を明らかにする目的で、溶接止端の曲率半径と溶接脚長、溶け込み深さをパラメータとしたモデルの応力解析を行った。ここで得られた結果は以下のとおりである。

(1) モジュラー型伸縮装置の M 溶接部に発生する疲労き裂の起点は、有効切欠き応力概念により概ね特定できる。

(2) 溶接脚長と溶け込み深さを大きくすることにより、M 溶接部のルート疲労破壊を

防止することができる。その評価は、溶接脚長＋溶け込み深さをういればよい。

- (3) M 溶接部のルート疲労破壊を防止するための溶接詳細として、止端の曲率半径を 10mm に仕上げた場合に溶接脚長＋溶け込み深さを 28mm 以上、止端の曲率半径を 15mm に仕上げた場合には溶接脚長＋溶け込み深さを 32 mm 以上とすることが考えられる。
- (4) 溶接止端の応力集中係数は、溶接脚長や溶け込み深さに影響しないことから、M 溶接部の止端の曲率半径を 15mm、溶接脚長＋溶け込み深さを 32mm 以上とした場合の疲労強度は、JSSC 指針に定められる C 等級と考えられる。

第 5 章 疲労照査例

第 5 章では、第 2 章で示した疲労基本荷重とその荷重を補正する係数、そして応力計算法の考え方と、第 3 章で示した疲労強度に基づき、3 本のミドルビームを有する溶接タイプのモジュラー型伸縮装置を対象とし、中央あるいは端部に配置するミドルビームとミドルビームを支持するサポートビームの溶接接合部について、疲労耐久性の照査例を示した。ここで示した主な内容は以下のとおりである。

- (1) 疲労基本荷重に用いる等価輪重を国道 23 号上り線の 55.4kN と仮定した場合、衝撃係数 ($i=0.4$)、リバウンド係数 ($\alpha_R=0.1$)、荷重分担率 ($\alpha_S=0.6$)、水平方向力を考慮した補正係数 ($\alpha_h=0.2$)、そして走行位置荷重補正係数 ($\alpha_{hl}=0.92$) をそれぞれ仮定して求められる疲労荷重は 56.5kN となる。
- (2) 疲労荷重 (56.5kN) とその疲労荷重に対応する車両の通過軸数を 1 日 1 車線あたり 15,728 と仮定して、それぞれの場合について疲労耐用年数を試算すると、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐用年数は短く計算された。
- (3) 疲労基本荷重とその頻度については、第 2 章に示した考え方に基づくなどして、道路管理者により設定されることが望ましいと考える。それらの設定では、必ずしも画一的ではなく、路線の重要度や交通実態などを踏まえ、いくつかに分類とするといった選択も考えられる。その判断材料となる車両重量や軸数などに関するデータをさらに蓄積・分析することが重要と考える。
- (4) 今回の照査で用いた疲労基本荷重 (等価輪重) を補正するための衝撃係数やリバウンド係数、そして水平方向力を考慮した補正係数は、過去に実施した走行試験から求めた安全側の値である。これらの係数が常に作用すると仮定して求めた疲労荷重が、断面力の最大となる位置に載荷されると仮定しているため、疲労寿命

が短く計算されたとも考えられる。ただし、荷重分担率は静的載荷試験結果に基づいており、動的荷重下では分かっていない。疲労照査の精度を高くするには、これらの補正係数について、計測等によりさらに検討する必要があると考える。

以上のように、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労照査に必要となる疲労荷重や応力計算法、疲労強度、そして疲労照査法の考え方を整理して示すとともに、疲労試験と応力解析により溶接部の疲労強度を明らかにした。そして、仮定した疲労基本荷重と補正係数を用いて、溶接部に生じる公称応力を三次元骨組解析で求め、その頻度を設定し、モジュラー型伸縮装置溶接部の疲労耐用年数を試算した。

今回の試算で、疲労耐用年数に影響を与える疲労基本荷重やその補正係数、そして頻度は少々大胆に仮定している。それぞれの値については、ここで示したような考え方により、今後さらに検討を行う必要があると考えている。

謝辞

指導教員である法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の森猛教授には懇切丁寧なご指導を賜りました。心から感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。森猛教授との出会いは、入学した間もない応用力学の授業でした。工学部土木工学科（現：デザイン工学部都市環境デザイン工学科）の1年生が、まだ多摩キャンパスに通っていた1997年のことです。大変分かりやすい丁寧な授業がとても印象に残り、卒業論文では鋼構造研究室を希望しました。常に熱いご指導に衝撃を受けたこともありましたが、そのご指導とともにいただいた多くの優しさによって、修士課程まで修めることができました。社会人として再入学するにあたって、大変快く、また親身話を聞いてくださったこと、とても有難く思っております。そして、学部から修士課程の3年間、また社会人として再入学した研究生から博士後期課程の4年間、計7年間に渡り、研究活動に対する取組み方やそれに向かう姿勢のみならず、言葉の大切さや社会人としての振舞い方など、大変多くのことを学ばせていただきました。改めて厚く御礼申し上げますとともに、これまでに学んだ多くのことを肝に銘じ、森猛教授の法政大学での最後の教え子として、これからも精進していきます。

副査をお引き受けいただきました法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の溝渕利明教授、藤山知加子教授、名古屋大学の山田健太郎名誉教授には、的確なご意見とご指摘を頂戴しました。深く御礼申し上げます。いただきましたことは、今後も様々な場面で生かしたいと思えます。

本研究の一部は、法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の卒業論文として行われてきたものです。第3章で示した疲労強度のうち、サポートビームは中平泰樹氏（現：(株)復建エンジニアリング）、ミドルビームは菊地広祐氏（現：(独)都市再生機構）に大変なご助力をいただきました。また第4章は、長島和俊氏（現：横浜市）に多くのご協力をいただきました。共に研究活動などを行った日々はとても新鮮であり、多くの経験を得ることができました。改めて感謝申し上げます。

法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科の研究指導員であった小林祐規博士、教育技術嘱託の松岡正浩氏（現：(株)ジェイアール総研エンジニアリング）、田中義久氏には実験作業で大変なご助力をいただきました。深く御礼申し上げます。

法政大学鋼構造研究室卒業生の内田大介博士（現：三井造船鉄構エンジニアリング(株)）には、国土技術政策総合研究所資料第295号のデータ整理にあたり大変なご協力をいただくとともに、様々な場面で多くの激励をいただきました。また、同研究室卒

業生の平山繁幸博士（現：(一財)首都高速道路技術センター）、松井喜昭氏（現：日本ファブテック㈱）、そして木村直登氏（現：川田工業㈱）には、応力解析を行うにあたり、多くのご助言をいただきました。改めて深く御礼申し上げます。

同時期に社会人として通学していた一宮充博士（現：㈱ワイ・シー・イー）、谷口哲憲博士（現：ジオスター㈱）、大住圭太博士（現：(一財)首都高速道路技術センター）、網谷岳夫氏（現：東日本旅客鉄道㈱）には多くのご助言や励ましの言葉をいただくとともに、お力添えをいただきました。改めて感謝申し上げます。大住博士は同郷であり、帰りに幾度とお付き合いをいただきました。また、網谷氏と訪れた中国上海は、生涯忘れることのない思い出となりました。さらに、ここには書き記すことができませんでしたが、鋼構造研究室の卒業生の皆様、同時期に在学していた学生諸氏に心から御礼申し上げます。

社会人として、研究生および博士後期課程に取り組むにあたり、所属する日本鑄造㈱には多大なるご支援とご配慮をいただきました。入学に際しては、家村剛取締役、原田孝志理事に大変なご支援とご協力をいただきました。在学中は、鷲尾勝代表取締役社長に多くのご配慮をいただきました。また、エンジニアリング事業部をはじめとする多くの皆様にお力添えと激励の言葉をいただきました。特に、石山昌幸次長には、様々なご配慮、多くのご助言をいただくとともに、支えていただきました。伸縮装置の設計については、三瓶太一次長、プラドテオカシミロ次長、稲田大輝次長に多大なるご協力とご助言をいただきました。昼夜休日を問わず、皆様に快く対応をしていただきましたこと、この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。これからは、会社の発展に少しでも貢献できるよう、尽力させていただきます。

最後に、これまで支えていただいた家族、友人、そして公聴会にご参加いただいた皆様、温かい言葉をかけていただいた皆様、お気にかけていただいた皆様に心から感謝申し上げます。

2018年3月

法政大学大学院

デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻 博士後期課程

鋼構造研究室 山崎 信宏