

# 鋼製橋脚横梁支点直下ダイアフラムの疲労損傷に対する補修・補強検討

Examination of retrofitting methods for fatigue damages in diaphragm details inside steel pier beam under bridge girder support

穴見健吾\*, 溝江慶久\*\*, 八木貴之\*\*, 梶原 仁\*\*\*

Kengo ANAMI, Yoshihisa MIZOE, Takayuki YAGI, Masashi KAJIHARA

\* 工博 高知工科大学講師 社会システム工学科 (〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町)

\*\* 工修 川田工業株式会社 橋梁事業部保全技術課 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

\*\*\* 首都高速道路株式会社 保全・交通部鋼構造物疲労対策グループ (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

Recently, several types of fatigue cracks were found in diaphragm details inside steel pier beam just under bridge girder support details. Most of those fatigue cracks initiate from the diaphragm-beam flange weld, especially at the coped slit for the longitudinal ribs passing through the diaphragm and below the ends of welded cover plates (shoe plates). This study investigates the mechanism of the fatigue cracking through the stress evaluation by loading test with a real size specimen and FEM analyses, and examines several retrofit methods.

**Key Words :** bridge pier beam, diaphragm, fatigue damages, retrofitting methods  
 キーワード: 橋脚横梁, ダイアフラム, 疲労損傷, 補修・補強法

## 1. はじめに

鋼製橋脚横梁の支点部直下において、近年多くの疲労損傷が報告されている。旧首都高速道路公団で実施した平成7年～15年度までの構造物定期点検結果によると、点検実施橋脚数1020基中94基の橋脚の当該部位において疲労き裂の発生が報告されている。この部位では、多くの溶接継手ディテールが存在し、そのき裂の発生箇所は図-1に示すように多岐に渡る。調査結果によれば、発生頻度が最も高いのは、横梁上フランジ補剛縦リブを連続させるために設けられたダイアフラムスリットのまわし溶接部からのき裂（以下、タイプ1き裂）であり、次いで、沓座ベース端直下の上フランジとダイアフラムの溶接部からのき裂（以下、タイプ8き裂）である。上フランジとダイアフラムの溶接部に発生したこれらの疲労き裂が大きく進展すると、支承陥没の危険性があるため、当該部位の疲労損傷発生原因を究明するとともに、補修・補強対策を早急に講じることが必要である。

事前に行われた疲労き裂に関する分析結果<sup>1), 2)</sup>によれば以下の点が報告されている。き裂が発生している横梁の多くは上部構造の架け違い部（横梁断面に2つの支承部が存在）である。また、き裂は沓座ベース端で多く発生し、沓座直下でのき裂発生は少ない。さらに、上フランジの補剛縦リブ本数によって、沓座ベース端とダイアフラム-縦リブ交差部の位置関係が変わるため、発生するき裂タイプが異なる。また、図-2に示すように、上フランジ厚が19mm以上になるとタイプ8き裂の発生例は

無いが、縦リブ交差部で発生するタイプ1き裂やタイプ2き裂は板厚に関係なく発生している。

以上を踏まえ、本検討では、首都高速道路から撤去された橋脚の一部を試験体として用い、静的载荷試験ならびに疲労試験、FEM解析を実施して、当該ディテール、

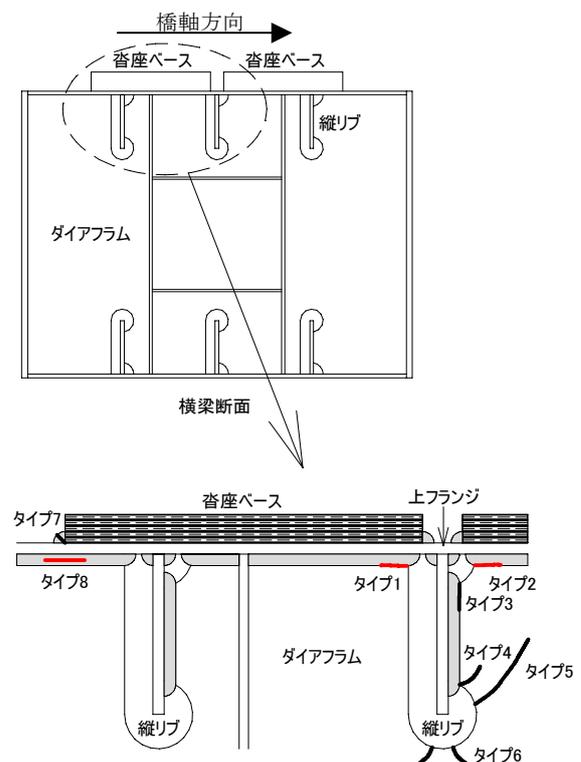


図-1 横梁に発生する典型的なき裂の種類

特に実橋脚で最も多く発生しているタイプ1及びタイプ8き裂発生位置の応力性状から疲労き裂の発生メカニズムを検討した。また、疲労試験で発生した疲労き裂に対する補修・補強策について検討を行った。

## 2. 応力発生メカニズムの解明

### 2.1 試験体の概要

本検討に用いた実物大試験体を図-3に示す。沓座部は橋軸（横梁軸直角）方向に2つあり、上下フランジには縦リブが3本配置されている。また、着目する横梁上フラン

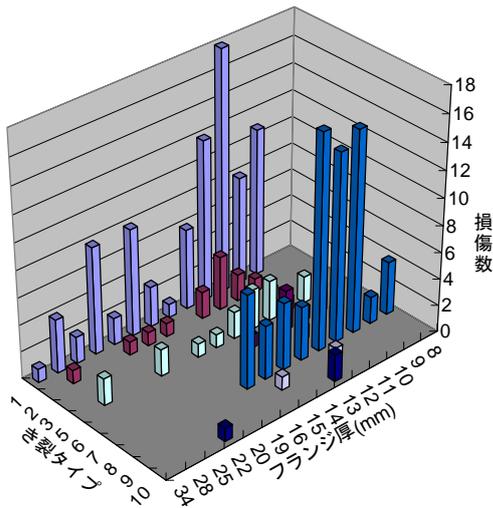
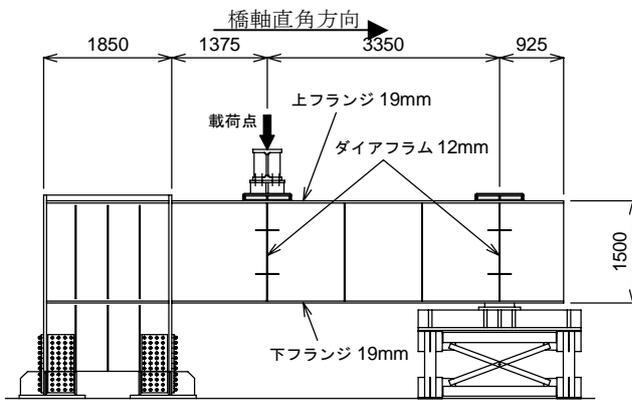
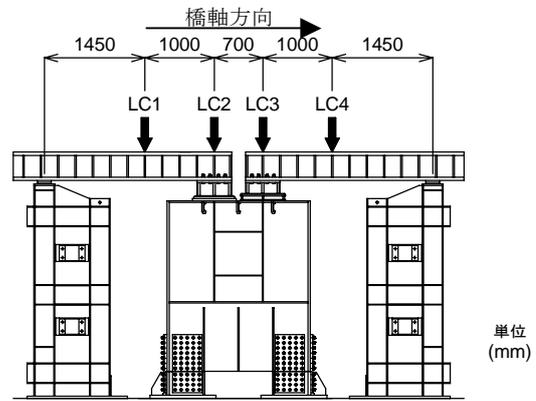


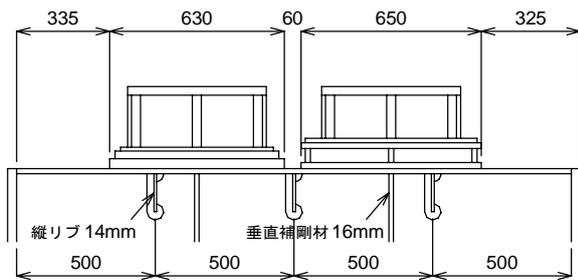
図-2 き裂タイプと上フランジ厚の関係



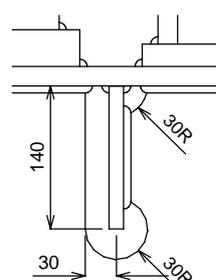
(a) 試験体側面



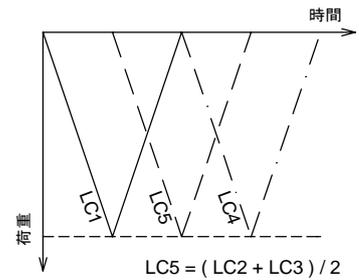
(b) 試験体正面



(c) 横梁断面



(d) 縦リブ貫通部



(e) 疲労荷重方法

図-3 試験体

ジとダイアフラムとの溶接部は7mmサイズのすみ肉溶接となっている。梁フランジとダイアフラムの溶接、及びダイアフラムと縦リブの交差部の形状など、本試験体の構造は、本試験体が製作された1980~1981年当時の首都高速道路公団の標準的な構造である。

試験体は柱底部を試験室フロアに固定し、梁部先端の下フランジ下面を架台で支持した。また、静的荷重試験の荷重パターンは、既往の実働応力計測結果<sup>2)</sup>を参考に、着目するダイアフラムの応力性状が実橋脚と同様となるように決定した。LC2, LC3 荷重は沓座部直上への荷重であり、LC1, LC4 荷重は鉛直力だけではなく沓座部に回転力を与える荷重である。なお、疲労試験では、ジャッキ本数の制約から LC2 荷重と LC3 荷重を同時に行う LC5 荷重を採用した。

### 2.2 FEM解析の概要

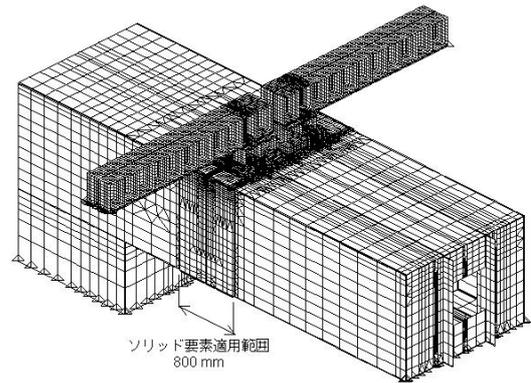
試験体の解析モデルを図-4に示す。着目するダイアフラム近傍のモデル化にはソリッド要素を用い、それ以外の範囲についてはシェル要素を用いた。タイプ1き裂ならびにタイプ8き裂発生点近傍におけるすみ肉溶接部の要素寸法は2mm程度である。この程度の要素寸法では、き裂発生点（止端部やルート部）の応力値そのものを評価することはできないが、応力発生メカニズムや補修・補強策の適用による応力低減効果は評価できるものと考えられる。なお、解析には汎用解析コードCOSMOS/Mを使用した。

### 2.3 FEM 解析結果

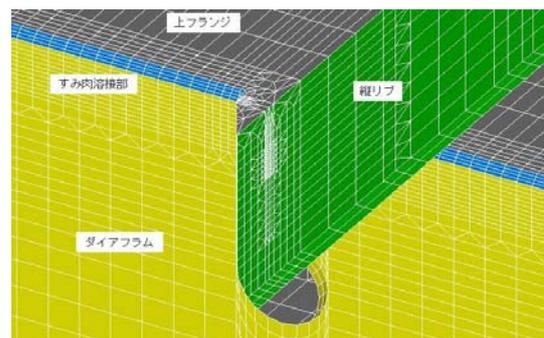
静的荷重試験によって計測されたダイアフラムの鉛直方向応力を解析結果と比較すると図-5 のようになる。ここで、計測点は上フランジとダイアフラムとのすみ肉溶接止端から 10mm 離れた位置である。いずれの位置においても解析結果と試験結果は良く一致しており、特に沓座ベースの直上荷重である LC2 荷重と LC3 荷重における両者の差異は小さい。また、解析から得られた着目部の主応力分布を図-6 に示すが、各部の主応力の大きさと方向も試験結果と良く一致し、かつ実働応力計測<sup>2)</sup>と同様の傾向を示している。ただし、沓座に回転力が作用する LC1 荷重、すなわち車両が橋脚直上から離れた位置を走行している場合の実働応力値は本試験値や解析値よりも小さく、本試験で導入した回転力が実橋脚よりも大きいことが推測される。しかし、前章で述べたように、本検討ではタイプ1き裂とタイプ8き裂を同時に発生させ、その補修・補強策を検討することを目的として、図-3 や図-4 に示す荷重方法を採用している。

#### (1) タイプ1き裂発生点

スリット側まわし溶接止端から発生するタイプ1き裂は図-2 に示したように、実橋脚において最も多く確認されているき裂である。図-7 に解析から得られたダイアフラムの溶接止端における鉛直方向応力分布を示す。また、図-8 に LC2, LC3 荷重時の中央リブまわりの変形図を示す。スリット側の沓座直上に荷重される LC2 荷重時には、一様な圧縮応力が作用しているが、こぼ面に近づくにつれ急激に減少している。また、図-8(a) に示すように、LC2 荷重時には、上フランジ下面とスリットこぼ面のなす角は大きく、開口部が開く変形となっている。こぼ面近傍で応力が急激に減少しているのは、この局所的な変形によって生じる引張応力と沓座から伝達される鉛直力によって生じる圧縮応力が相殺されるためと考えられる。一方、図-8(b) に示すように、LC3 荷重時には、開口部が閉じる変形となっており、この局所変形によって、スリットこぼ面近傍で大きな圧縮応力が発生している。このように、タイプ1き裂発生点に作用する応力は、沓座から伝達される鉛直力とスリット部の局所的な変形に起因すると考えられる。



(a) 全体モデル



(b) 着目部詳細

図-4 FEM 解析モデル

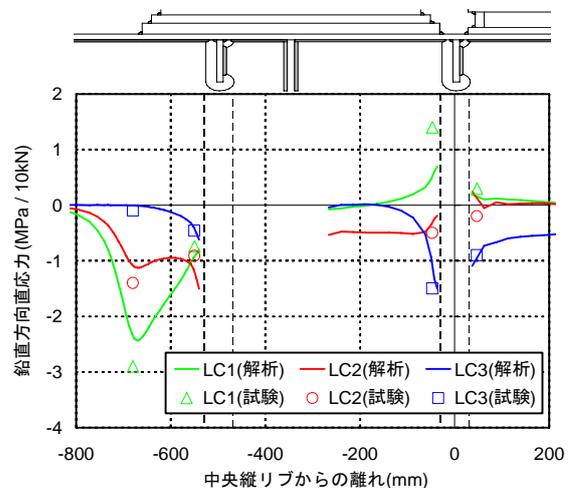


図-5 試験結果と解析結果の比較

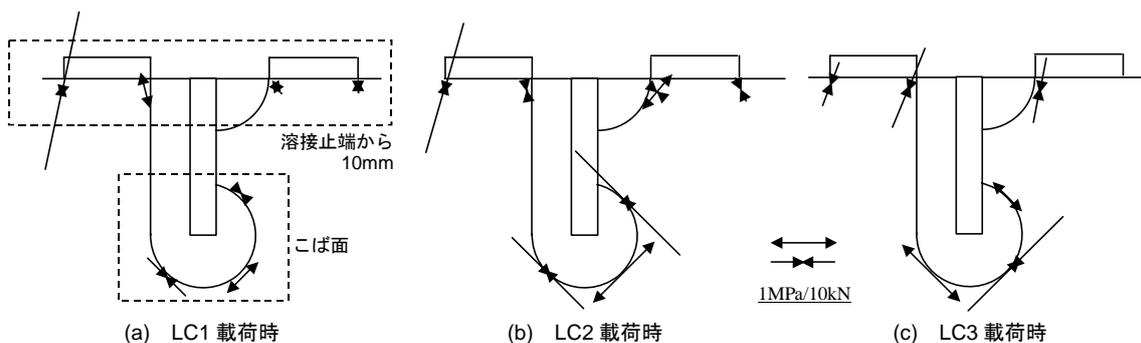


図-6 FEM 解析より得られた主応力分布

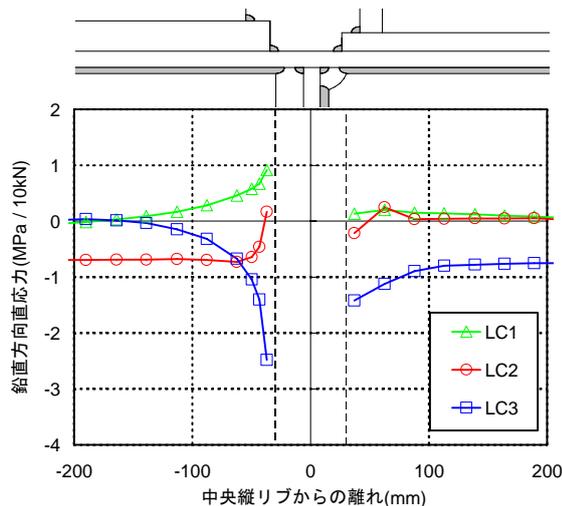


図-7 中央リブ付近の溶接止端応力

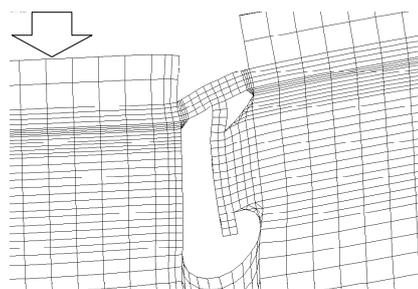
上フランジ厚をパラメータとして実施した FEM 解析の結果を図-9 に示す。スリットこば面近傍の応力は、フランジ厚が大きいくほど、LC2 載荷時には小さく、LC3 載荷時には大きくなっている。すなわち、フランジ厚の増加は必ずしも有利には働かず、特に止端部からのき裂発生に大きな影響を与える LC3 載荷においては、本検討の範囲内であるが、板厚増加により応力値が若干増加している。実橋脚におけるタイプ1き裂の発生点とフランジ厚との関係についての詳細調査は今後の課題とするが、この傾向は、図-2 に示したように、実橋脚で本き裂タイプが板厚に関係なく生じていることと一致している<sup>3)</sup>。

### (2) タイプ2き裂発生点

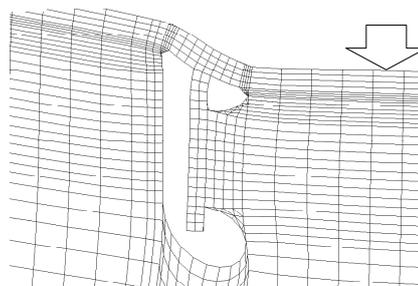
図-7に示したとおり、スカラップ側ダイアフラムにおけるまわし溶接止端部から離れた位置の鉛直方向応力は、スリット側とほぼ同様となっている。ただし、本解析がタイプ1き裂を対象としたモデルであり、要素寸法が異なるために応力値を直接比較することはできないが、スカラップ側ではダイアフラムと縦リブが連結されているために、反対側の沓座載荷 (LC2載荷) 時の沓座の相対変位に起因した局部応力の発生範囲はそれほど大きくない。また、直上の沓座載荷 (LC3載荷) 時には、スリット側で見られたこば面近傍での応力低下が見られず、こば面近傍で圧縮応力が増大している。図-6の主応力分布を見てみると、LC2載荷時とLC3載荷時では主応力の正負が交番していることがわかる。

### (3) タイプ5き裂発生点

図-1に示したように、タイプ5き裂はスリット下方のR部から発生し、上フランジの方向に伝播する。図-8の変形図に着目すると、スリットR部が変形する方向はLC2載荷時とLC3載荷時とは反対であり、図-6に示すように、作用応力も正負が交番し、非常に大きな範囲の繰返し応力が作用している。

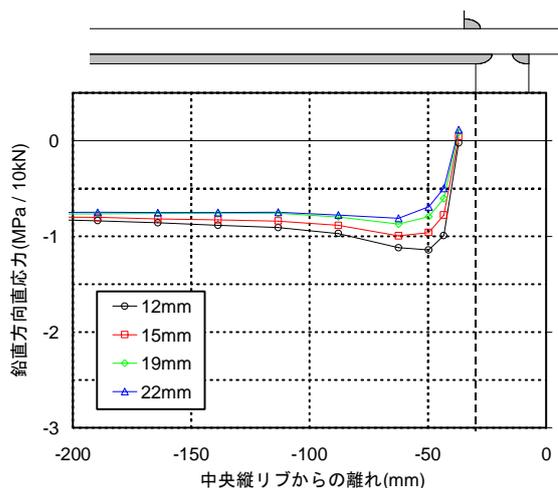


(a) LC2載荷

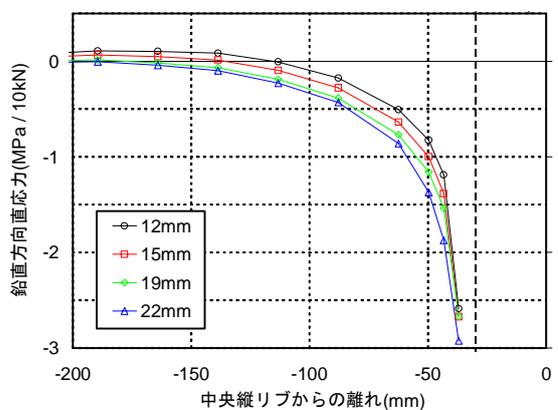


(b) LC3載荷

図-8 中央リブ付近の変形図



(a) LC2載荷時



(b) LC3載荷時

図-9 タイプ1き裂発生点付近の溶接止端応力に及ぼす上フランジ厚の影響

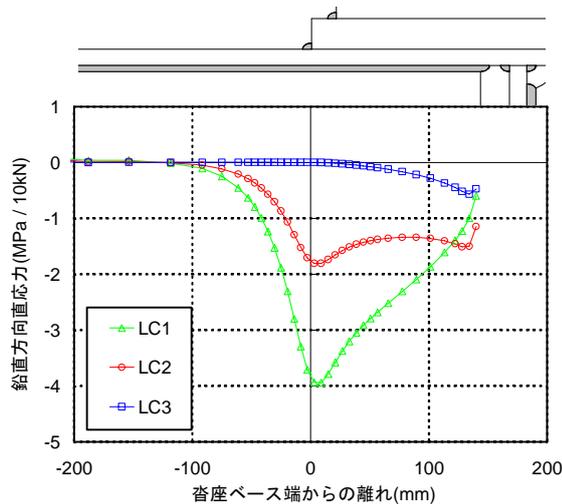


図-10 沓座ベース端付近の溶接ルート応力

#### (4) タイプ8き裂発生点

図-2からわかるように、タイプ8き裂も実橋脚において数多く確認されているき裂タイプである。このタイプのき裂は沓座ベース端直下の上フランジとダイアフラムの溶接ルート部から発生している。解析から得られた溶接ルート部の鉛直方向応力分布を図-10に示す。LC1载荷ならびにLC2载荷において、応力は沓座ベース端直下に集中している。タイプ8き裂が沓座ベース端直下を起点としているのはこの大きな応力集中のためである。

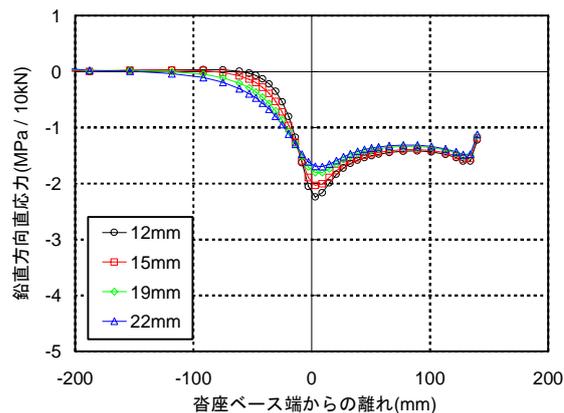
上フランジ厚をパラメータとして実施したFEM解析の結果を図-11に示す。これより、沓座ベース端直下の応力集中は、いずれの载荷ケースにおいても、板厚が大きいほど小さくなっていることがわかる。図-2で本き裂タイプの発生が板厚の小さい場合に集中しているのは、このことに起因しているためと考えられる。

### 3. 疲労き裂の発生・進展状況の確認

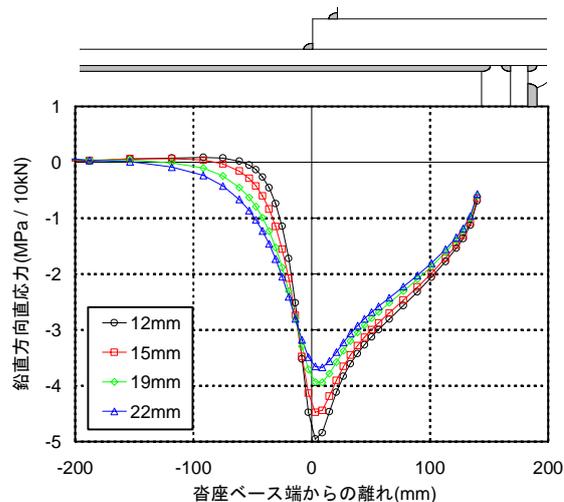
疲労試験における载荷点はLC1, LC5ならびにLC4の3点とし、図-3(e)に示したような载荷波形で繰返し载荷を行った。荷重範囲は静的载荷試験結果を参考に、タイプ1,2及び8き裂を载荷回数200万回以内に発生させることを意図して450kNとし、下限荷重は30kNとした。

#### (1) タイプ1き裂

疲労試験で観察された中央リブ付近でのタイプ1き裂を写真-1, 写真-2に示す。写真-1は133万回到達時、写真-2は180万回到達時に撮影されたものである。また、ダイアフラム表裏面の溶接部表面で観察されたき裂長さと繰返し载荷回数の関係を図-12に、溶接止端ならびにスリットこぼ面から10mm離れた位置で計測したき裂発生点付近の作用応力振幅と繰返し载荷回数の関係を図-13に示す。



(a) LC1 载荷時

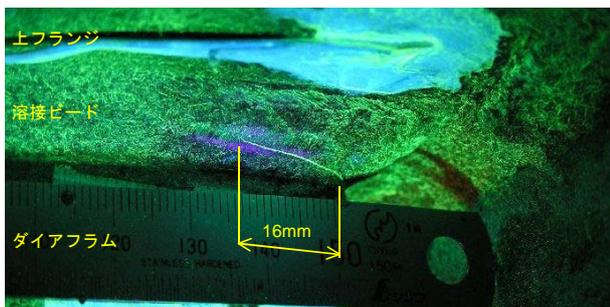


(b) LC2 载荷時

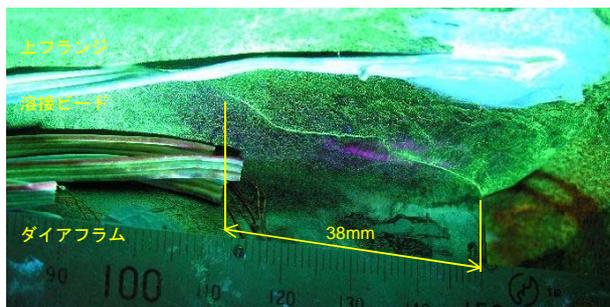
図-11 沓座ベース端付近の溶接ルート応力に及ぼす上フランジ厚の影響

繰返し载荷回数が80万回に到達した時点で、ダイアフラム側のまわし溶接止端部を起点とするき裂が観察された。このき裂は、溶接部を上フランジに向かって進展した。図-12に示すように、ダイアフラム表裏面とも、130万回付近でき裂進展速度が急激に大きくなっている。これは、写真-1, 写真-2に示したように、溶接ルート部から発生したき裂がビード表面まで進展したためである。まわし溶接止端部から発生したき裂は、このルートき裂と合体（横梁中央側）もしくはルートき裂の背面となって停止した（梁・柱接合側）。ルートき裂は溶接部に沿って進展を続けたが、試験を中断した250万回の繰返し载荷では上フランジに達することはなかった。

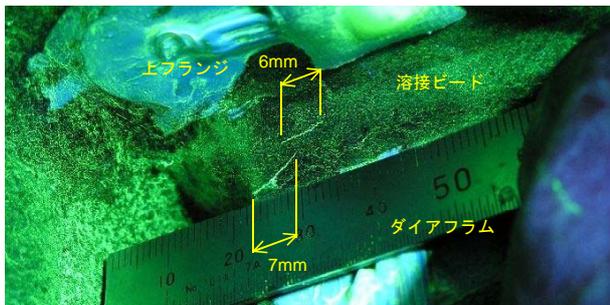
本き裂タイプに関しては、実橋脚においても、溶接止端部と溶接ルート部を起点とするき裂がそれぞれ単独で、もしくは本試験のように両方とも観察されている。また、溶接止端部から発生したき裂は上向きに進展したが、これも実橋脚において観察されている挙動である。



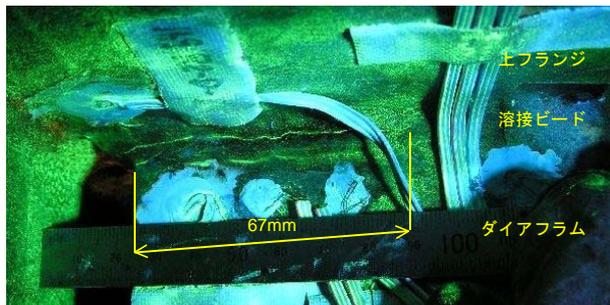
(a) 横梁中央側から視準



(a) 横梁中央側から視準



(b) 梁・柱接合部側から視準



(b) 梁・柱接合部側から視準

写真-1 133万回到達時におけるタイプ1き裂の状況

写真-2 180万回到達時におけるタイプ1き裂の状況

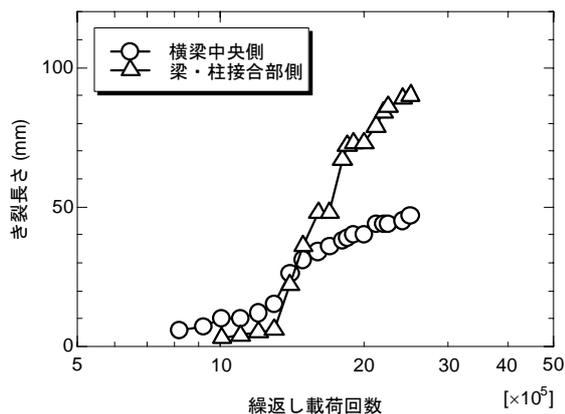


図-12 タイプ1き裂のき裂長さと繰返し载荷回数との関係

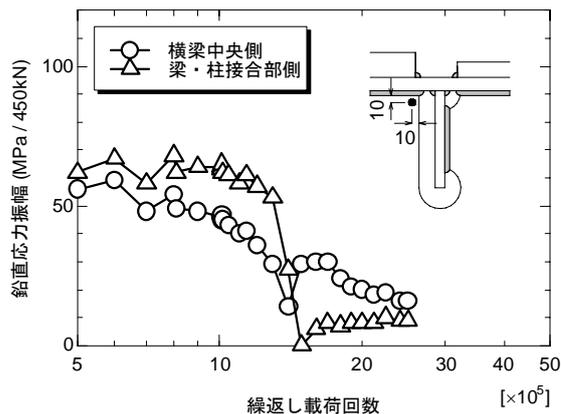


図-13 タイプ1き裂発生点近傍における応力振幅と繰返し载荷回数との関係

## (2) タイプ8き裂

タイプ8き裂はタイプ1き裂発見後の90万回到達時に初めて観察された。実橋脚と同様に、この疲労き裂は沓座ベース端直下を起点としたルートき裂であり、溶接部に沿って進展した。LC1 载荷側の沓座ベース端直下で観察されたタイプ8き裂を写真-3に示す。

本き裂のき裂長さと繰返し载荷回数の関係を図-14に、溶接止端から10mm離れた位置で計測した沓座ベース端直下の作用応力振幅と繰返し载荷回数の関係を図-15に示す。図-12に示したタイプ1き裂に比べ、本き裂は発見当初から大きい速度で進展したため、試験続行のために、後述する補修・補強を繰返し载荷回数が100万回に達した時点で行った。

本疲労試験では、タイプ1き裂とタイプ8き裂、ならびにいくつかのタイプ7き裂（沓座ベース取付け溶接部からのルートき裂）が観察され、2章で議論したタイプ2

き裂やタイプ5き裂は観察されなかった。

## 4. 補修・補強策の検討

ここでは、実橋脚での発生頻度が高く、本疲労試験でも観察されたタイプ1き裂ならびにタイプ8き裂に対する補修・補強策について述べる。補修・補強策としては、①上フランジとダイヤフラムとのすみ肉溶接部を完全溶け込み溶接を用いて再溶接する方法、あるいは②既設の沓座ベースを撤去し、1枚の大きいサイズの沓座ベースをボルト接合により再設置する方法などが考えられる。しかしながら、これらの策を供用中の実橋脚に講じる場合には、多大な労力を要することが予想される。そこで、本検討では、施工性に優れた小型の当板部材による補修・補強策について検討した。

#### 4.1 タイプ1き裂に対する補修・補強策

上述したように、タイプ1き裂発生点に作用する応力は沓座から伝達される鉛直力とスリット部の局所的な変形に起因する。それゆえ、作用応力を低減させるためには、これら2つの要因に対する策を講じる必要がある。

##### (1) FEM解析による検討

試験体を用いた検証に先んじて解析的評価を行った。

図-16の解析モデルは、これらの要因に対して抑制効果を発揮するものと予想される対策を示している。対策構造Aはスリット部の局部変形を抑制するためにダイアフラムと縦リブにL形状の当板部材をボルト接合する構造であり、対策構造Bは上フランジとダイアフラムとの溶接部を介して伝達される力を低減するために上フランジとダイアフラムにL型の当板部材をボルト接合する構造である。図-16には示していないが、対策構造Cとして、上フランジと縦リブにL型の当板部材をボルト接合する構造についても解析を行った。なお、本解析ではボルト継手はモデル化していない。

図-17の解析結果は、スリットこぼ面における鉛直方向応力の変化を示している。これからわかるように、対策構造Aが適用された場合、LC3 載荷時には圧縮応力が大きく低減するものの、LC2 載荷時には逆に圧縮応力が大きくなっている。これは、スリット部の局部変形が強く拘束され、この局部変形により生じる引張応力が抑制されたために、沓座から伝達される力に起因した鉛直方向の圧縮応力が顕著に現れたものと考えられる。一方、対策構造Bや対策構造Cが適用された場合、すべての載荷ケースで応力は低減するが、LC1 からLC4 までの移動載荷時に発生する応力振幅を考えると、その低減効果は対策構造Aが最も大きいといえる。

図-18には、補強前モデル、対象構造Aおよび図-19に示す対象構造Dについて、LC2ならびにLC3載荷時の溶接止端部と溶接ルート部に沿う鉛直方向応力分布を示している。図-18(a)に示す溶接止端部に沿う分布では、図-17に示した結果と同様に、対象構造Aを施すことによってまわし溶接部止端部の応力はLC2載荷時には増大しているが、LC3載荷時には大きく減少している。しかしなが

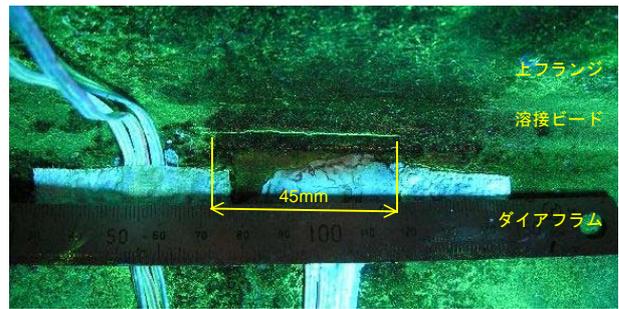


写真-3 92万回到達時におけるタイプ8き裂の状況  
(梁・柱接合部側から視準)

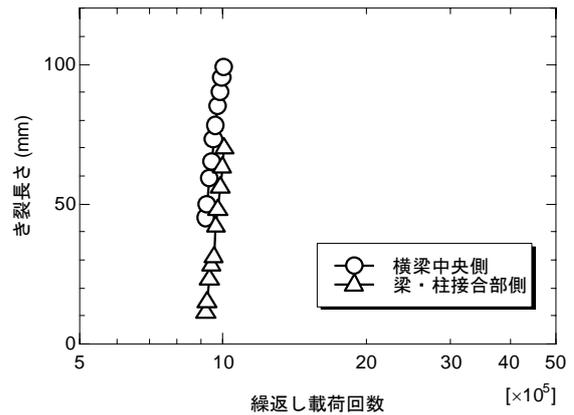


図-14 タイプ8き裂のき裂長さ（mm）と繰返し載荷回数（×10<sup>5</sup>）との関係

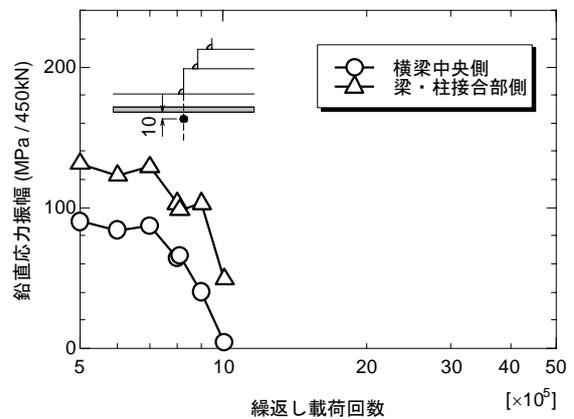
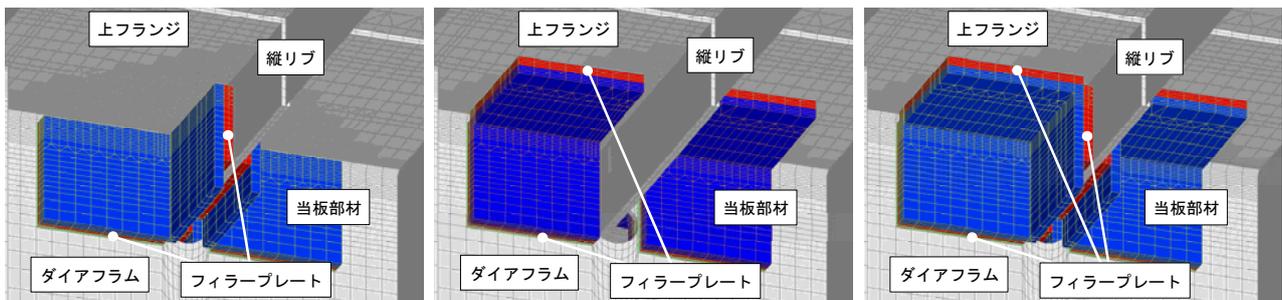


図-15 タイプ8き裂発生点近傍における応力振幅と繰返し載荷回数（×10<sup>5</sup>）との関係



(a) 対策構造A

(b) 対策構造B

図-19 対策構造D

図-16 タイプ1き裂の対策構造

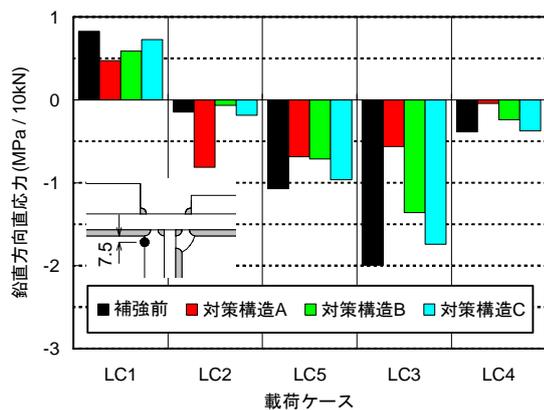
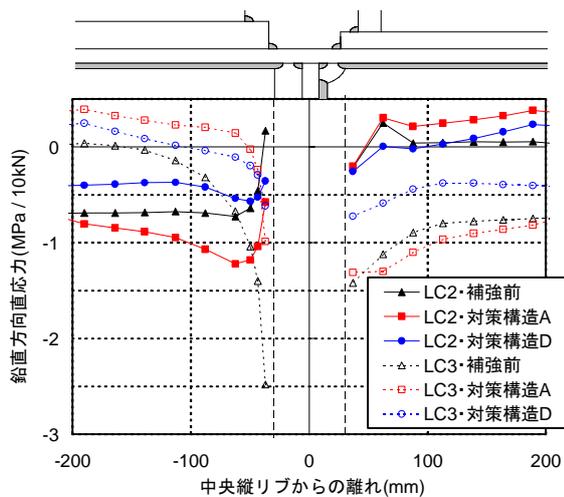


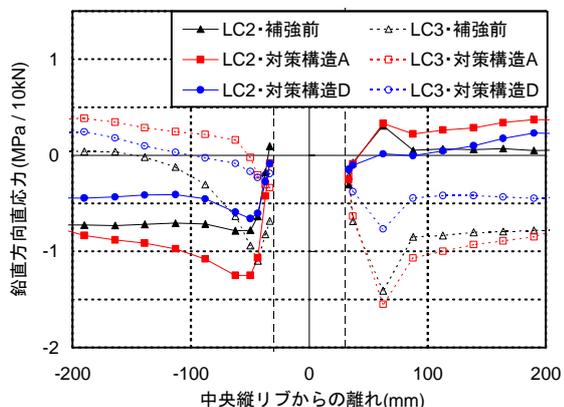
図-17 対策構造 A, B, C の適用による溶接止端応力の変化



写真-4 実橋脚における沓座の形式



(a) 溶接止端



(b) 溶接ルート部

図-18 対策構造 A, D の適用による鉛直方向応力の変化

ら、図-18(b)に示すように、タイプ1き裂のもう一方の起点である溶接ルート部の応力は、対策構造Aの適用によって増大する傾向がある。そのため、次のステップとして、対策構造Aと対策構造Bを同時に適用することを考えた。図-19の解析モデルは、ダイアフラムと上フランジ、縦リブを一部材で連結する構造（対策構造D）を示している。図-18から、対策構造Dを適用することによって、



写真-5 疲労試験体へのワンサイドボルトの適用

溶接止端の応力も溶接ルート部の応力も十分に低減していることがわかる。また、タイプ2き裂発起点における応力も十分に低減している。なお、ここには示していないが、この対策構造Dの適用によって、タイプ5き裂発起点の応力もまた十分に低減した。

## (2) 試験体を用いた検証

上記で確認された対策構造の適用効果を実橋脚においても発揮させるためには、当板部材と上フランジとの連結を確実にすることが重要となる。写真-4に示すように沓座が箱形式である場合（写真左側）には、当板部材と上フランジとの接合にワンサイドボルト（高力ボルト）を適用することができる。実際、試験では、対策構造Dを適用するに際し、箱形式となっている沓座側にワンサイドボルトを用い（写真-5参照）、効果確認のための静的荷重試験を行った。その結果、解析結果と同程度の応力低減が確認された。

しかしながら、実橋脚においては、多くの沓座がプレート形式であり、仮に箱形式である場合でも、ワンサイドボルトを適用できるだけの十分な空間がない場合が多い（写真-4右側）。そこで、本検討では、ワンサイドボルト適用に代替する方法を模索することとした。

まず、き裂発起点での応力低減効果を明確にするため、疲労損傷の無い健全なダイアフラムを用いた検討を行った。このダイアフラムは試験体の支持点直上に位置する

表-1 健全ダイアフラムを用いて検討した対策パラメータ

ケース名	上フランジ		ダイアフラム		縦リブ		充填材	リフトアップ
	F	B	F	B	F	B		
補強前								
ケースA1	○	○	○	○				
ケースA2	○	○	○	○	○	○		
ケースA3			○	○	○	○		
ケースA4	○	○	○	○	○	○	○	
ケースA5	○		○	○	○	○	○	○

表-2 損傷ダイアフラムを用いて検討した対策パラメータ

ケース名	上フランジ		ダイアフラム		縦リブ		充填材	リフトアップ
	F	B	F	B	F	B		
補強前								
ケースA2	○	○	○	○	○	○		
ケースA6	○		○	○	○	○		○
ケースA7	○	○	○	○	○	○		○
ケースA4	○	○	○	○	○	○	○	
ケースA5	○		○	○	○	○	○	○
ケースA8	○	○	○	○	○	○	○	○

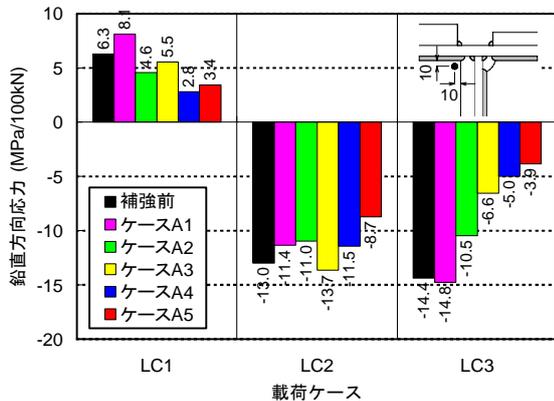


図-19 健全ダイアフラムの静的荷試験結果

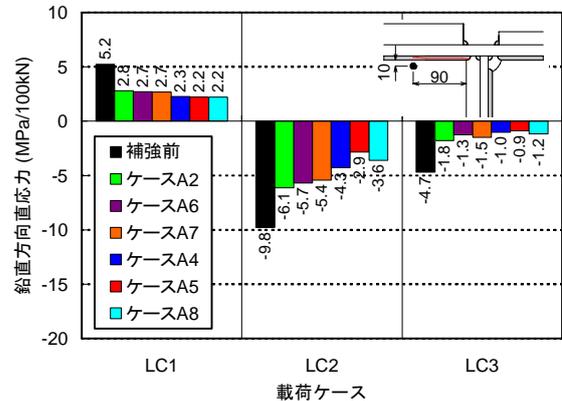


図-20 損傷ダイアフラムの静的荷試験結果

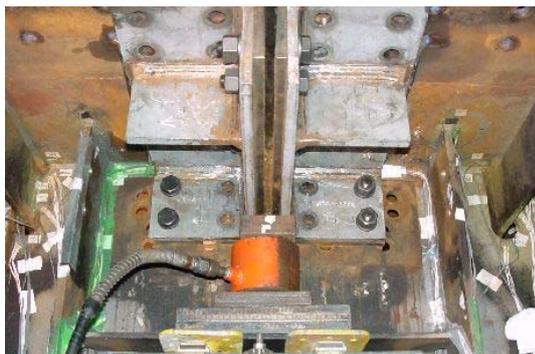


写真-6 リフトアップ施工

が(図-3参照), 本検討では, 支持条件は変えずに荷重位置のみ着目ダイアフラム直上に移動した. 表-1に検討した対策パラメータを示す. 表中のFはフィルタープレートが設置されたことを示し, Bは高力ボルトによる締付けがなされたことを示す. ケースA1, A2およびA4における当板部材と上フランジとのボルト接合は沓座ベースの外側で行った. また, ケースA4, A5では, 上フランジとフィルタープレートとの間に, 隙間を充填する目的で鉄粉入りのエポキシ樹脂を適用した. なお, 適用された厚みは1mm程度であった. さらに, ケースA5では, フィルタープレートと当板部材との間の隙間を小さくするため, 写真-6に示すように, 充填材硬化後に油圧ジャッキを用いたリフトアップ施工を行った. 導入力はおおよそ50kNである. なお, 文献4)では, 鋼床版垂直補剛材すみ肉溶接部に着目し, 当板部材と垂直補剛材とのボルト接合において, テーパーカラーを用いて当板部材を持ち上げること

が, 当板部材とデッキプレートとの密着度を高め, 着目部位の応力低減に有効であるとしている.

静的荷重試験により確認されたタイプ1き裂発生点近傍における鉛直方向応力の変化を図-19に示す. 上述の対策構造Bに類似したケースA1を適用した場合の応力低減はわずかであるが, これは, 当板部材と上フランジとのボルト接合位置がダイアフラムから離れた沓座ベースの外側であったために, 確実な密着が得られなかったことに起因しているものと推測される. また, 上述の対策構造Aに類似したケースA3を適用した場合には, LC3荷重時において明確な応力低減が確認されたが, LC2荷重時の応力低減は無かった. さらに, 対策構造Dに類似したケースA2を適用した場合には, すべての荷重ケースで応力の低減を確認することができた. 特に大きな応力低減効果を発揮したのは, 充填材の適用やリフトアップ施工の実施により, 当板部材と上フランジとの密着性を高めたケースA4とA5であった.

次に, 疲労損傷を有する横梁中央側のダイアフラムを対象に, 特に疲労き裂先端近傍の応力の変化に注目して静的荷重試験を実施した. 表-2に検討した対策パラメータを示すが, ここでは健全ダイアフラムを用いた検討でケースA4とA5が最も大きな効果を示したことから, 沓座ベースの外側における当板部材と上フランジとのボルト接合の有無, 充填材適用の有無, リフトアップ施工実施の有無をパラメータとしたケースA6~A8を追加した.

静的荷重試験により確認されたき裂先端近傍における鉛直方向応力の変化を図-20に示す. いずれのケースにおいても50%程度の応力低減が認められるが, 充填材を適

用したケースA4, A5, A8の低減効果が特に高い。また、その中でも、写真-6に示したように、ダイアフラム近傍でリフトアップ施工を実施し、上フランジとのボルト接合を実施しないケースA5が最も優れた低減効果を示した。これは試験体と当板部材の直角度が異なったために、沓座ベースの外側における上フランジとのボルト締付けが、ダイアフラム近傍でのリフトアップ効果を減少させるように作用し、当板部材と上フランジとの密着度が低下したことに起因すると推測される。

また、これらの補強構造設置に伴う、横梁上フランジと縦リブ溶接部のフランジ側応力の増加は見られず、若干減少する傾向にあった。

以上の検討結果から、疲労試験ではケース A5 を適用し、その効果の疲労耐久性を確認することとした。

#### 4.2 タイプ8き裂に対する補修・補強策

3章で述べたように、溶接ルート部を起点とするタイプ8き裂は、沓座ベース端直下に生じる大きな応力集中に起因して発生する。それゆえ、このタイプのき裂に対する補修・補強策として、沓座ベース端直下での荷重抵抗面積を拡大し、溶接部を介して伝達されていた応力を低減する方法を考えた。この場合、リブを取付けたL形状の当板部材を上フランジとダイアフラムにボルト接合する方法も考えられるが、ここでは、図-21に示すように、き裂先端にストップホールを設けた後、T形状の部材を沓座ベースの外側で上フランジにボルト接合し、L形状の部材を用いてT形状部材とダイアフラムをボルト連結する方法について検討した。これは、部材を分割することで、1部材あたりの重量を軽減するとともに、部材設置精度の向上を図ったためである。また、図-21および後述する写真-7に示すように、当板部材が非常に大きいのは、ボルト列数、すなわち当板部材の大きさが着目溶接部の応力低減効果に及ぼす影響について検討するためである。なお、ストップホールは補修・補強後に再開する疲労試験でのき裂進展の有無を確認するため、き裂先端から50mm離れた位置に設置した。

ボルト列数をパラメータとして実施した補強効果確認のための静的荷重試験結果を図-22に示す。ここでは疲労試験の荷重パターンであるLC1, LC5およびLC4の荷重ケースで静的荷重試験を行った。図-22(a)はき裂先端、図-22(b)は隣接するスリットこば面での計測結果であり、いずれも鉛直方向応力(表裏面の膜応力)を示している。これより、き裂先端における作用応力は、ボルト列数が多いほど若干小さくなる傾向にあることがわかる。また、スリットこば面における作用応力は、ボルト列数が多いほど増大する傾向にあった。これは、当板部材の設置範囲が広いほど、部材が設置されている範囲のダイアフラムが変形しにくくなり、スリット開口部の変形がより上フランジダイアフラム接合部に集中するためであると考えられる。

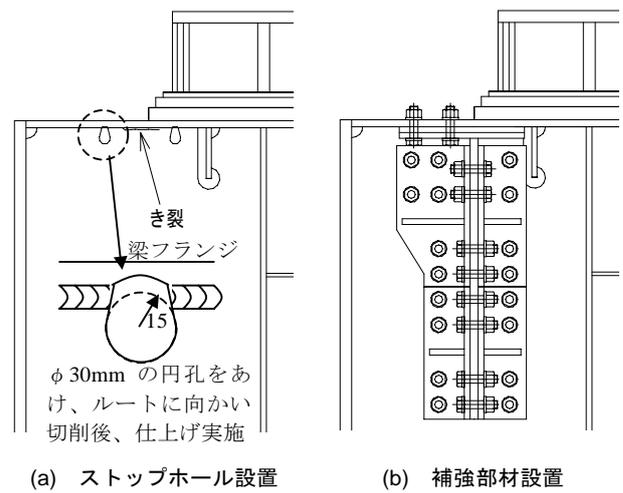


図-21 タイプ8き裂に対する補修・補強策

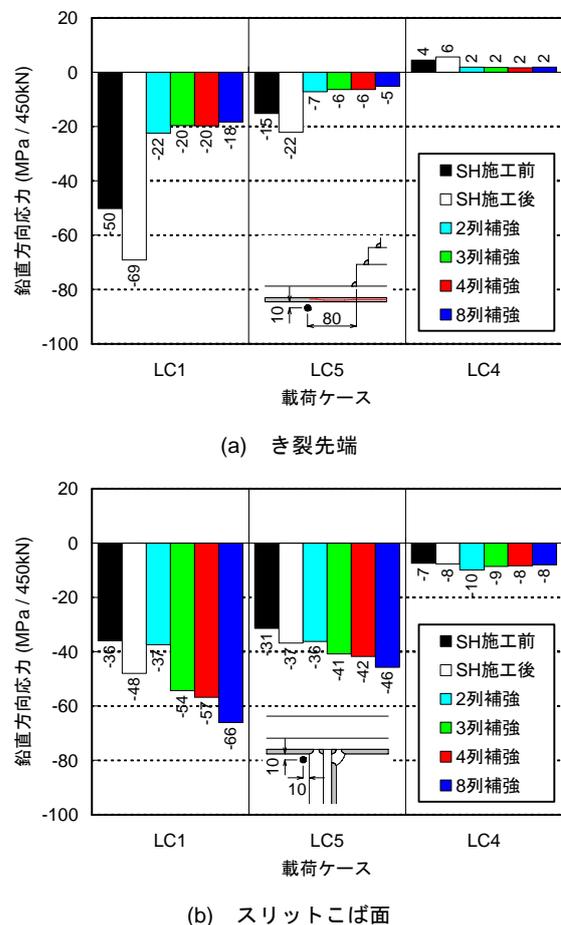


図-22 ボルト列数をパラメータとした静的荷重試験結果

以上の結果から、設置するボルト列数は2列程度(部材長さとしては200mm程度)で良いと考えられたが、本試験条件から推測される作用断面力を用いて継手計算を行った結果、必要ボルト列数は4列と算出された。そのため、スリットこば面における作用応力の増大が懸念されたが、写真-7に示すように、試験体に適用するボルト列数は4列とした。

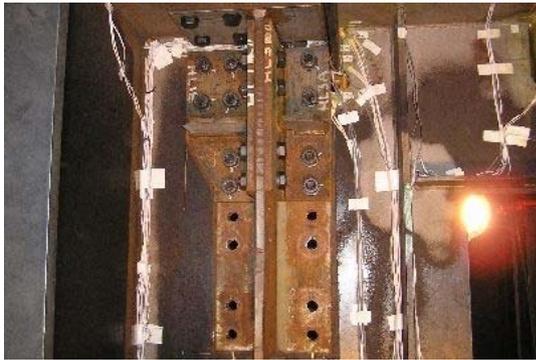


写真-7 疲労試験で適用したタイプ8き裂に対する補強構造

## 5. 補強効果の疲労耐久性の確認

疲労試験で発生したタイプ1き裂とタイプ8き裂を対象に、ストップホール施工ならびに4章で検討した補強構造の適用を行った。タイプ8き裂に対しては100万回到達時、タイプ1き裂に対しては250万回到達時にこれらの対策を施し、最終的に450万回まで繰返し載荷を行った。

疲労試験終了後に当板部材を撤去し、き裂進展の有無を確認した。その結果、タイプ1き裂に関しては、先行していた梁・柱接合部側のき裂に進展はなく、遅れていた横梁中央側のき裂が梁・柱接合部側のき裂長さ程度にまで進展していた。しかしながら、き裂前方の少し離れた位置に設けたストップホールには至っておらず、ストップホールからの新たなき裂発生も確認されなかった。また、タイプ8き裂に関してもき裂の進展は無く、ストップホールからの新たなき裂発生も確認されなかった。さらに、タイプ8き裂に対する補修・補強策の適用によって応力の増大が懸念されたスリットこぼ面においても、新たな疲労き裂の発生は確認されなかった。

## 6. おわりに

鋼製橋脚横梁支点直下ダイヤフラムの疲労損傷に対する補修・補強策について検討するため、実物大試験体を用いた疲労試験ならびにFEM解析を実施した。本検討から得られた知見を以下に示す。

- (1) タイプ1き裂発生点に作用する応力は、沓座から伝達される鉛直力とスリット部の局所的な変形に起因する。
- (2) 本検討の範囲では、上フランジ厚が大きくなっても、タイプ1き裂発生点に作用する圧縮応力の低下は見られなかった。
- (3) タイプ1き裂に対する補修・補強策として、ダイヤフラムと上フランジ、縦リブを一部材で連結する構造について検討した。この当板部材と上フランジの連結に高力ボルト（ワンサイドボルト）が利用できない場合、充填材の適用やリフトアップ施工の実施

が代替案の1つとなりうる。

- (4) タイプ8き裂の発生原因は、沓座ベース端直下の溶接部における応力集中であるが、この集中は上フランジ厚が大きくなると緩和される。
- (5) タイプ8き裂に対する補修・補強策として、上フランジにT型形状の部材を設置し、この部材をL型形状の部材でダイヤフラムに連結する構造について検討した。き裂を有する試験体に適用し、補強効果の疲労耐久性を確認した結果、350万回の繰返し載荷ではき裂の進展は確認されなかった。

今回、タイプ1き裂に対する補修・補強策の一要素として充填材すなわち樹脂材料を使用した。本試験条件で200万回の繰返し載荷に耐え得ることを確認したものの、実施工で適用するためには、制約された施工時間内での養生方法の開発や疲労特性の解明などいくつかの問題が残っている。今後、これらの課題に取り組み、信頼性の高い補修・補強策を構築していく所存である。

また、本研究で示したように、沓座端部の応力集中や、縦リブとの交差部での局部変形に起因して、鋼製橋脚支点直下ダイヤフラムにおいて多くの疲労き裂が発生したことから、現在、首都高速道路株式会社の当該部位の設計においては、①ダイヤフラムと上フランジの溶接は完全溶込み溶接、②縦リブとの交差部にスカラップを設けない、③2つの支承が有る場合には沓座を連続化（1枚板化）することとしている。

**謝辞：**本検討は、首都高速道路技術センターの「首都高速道路の鋼構造物の点検・補修・補強に関する調査研究委員会」（委員長：法政大学・森猛教授）での審議を経て行われたものであり、委員の方々に数々の貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表する次第です。

## 参考文献

- 1) 木ノ本，下里，弓削：鋼横梁支点直下ダイヤフラム溶接部の疲労損傷原因の一考察，第59回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-548，pp.1093-1094，2004.9.
- 2) 竹淵，穴見，町田，梶原，中野，斉藤：鋼製橋脚支点部直下ダイヤフラムディテールの疲労挙動，第60回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-420，pp.837-838，2005.9.
- 3) 岡田，梶原，穴見，溝江：沓座直下のダイヤフラム疲労損傷に対する板厚の影響，土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，I-9，pp.18-19，2006.5.
- 4) 公門，森，田中，宮原，小芝：鋼床版垂直スティフナーすみ肉溶接部の疲労を考慮した補強方法，第60回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-501，pp.999-1000，2005.9.

(2006年9月11日受付)