

鋼製橋脚横梁ダイアフラムの補修・補強検討

Examination of Retrofitting Methods for Fatigue Damages in Diaphragm Details inside of Steel Pier Beam under Bridge Girder Support

溝江 慶久
Yoshihisa MIZOE

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
東京技術部保全技術課

八木 貴之
Takayuki YAGI

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
東京技術部保全技術課

江崎 正浩
Masahiro EZAKI

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
東京技術部保全技術課課長

吉家 賢吾
Kengo YOSHIIE

川田工業(株)技術研究所
構造物試験室

本報告は、鋼製橋脚横梁の支点直下ダイアフラムに発生した疲労き裂に対する補修・補強策について検討した成果をまとめたものである。検討では、既設構造物を試験体とした静的載荷試験ならびに疲労試験と、これをモデル化したFEM解析を行い、き裂発生に起因する応力発生メカニズムの解明と疲労き裂の発生・進展状況の確認を行った。また、試験体に発生した疲労き裂に対して補修・補強策を検討し、その適用効果と疲労耐久性を確認した。

キーワード：鋼製橋脚横梁、ダイアフラム、疲労き裂、補修・補強

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。この領域では、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。既往の調査結果^{1),2)}によれば、発生頻度が最も高いのは、横梁上フランジ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、

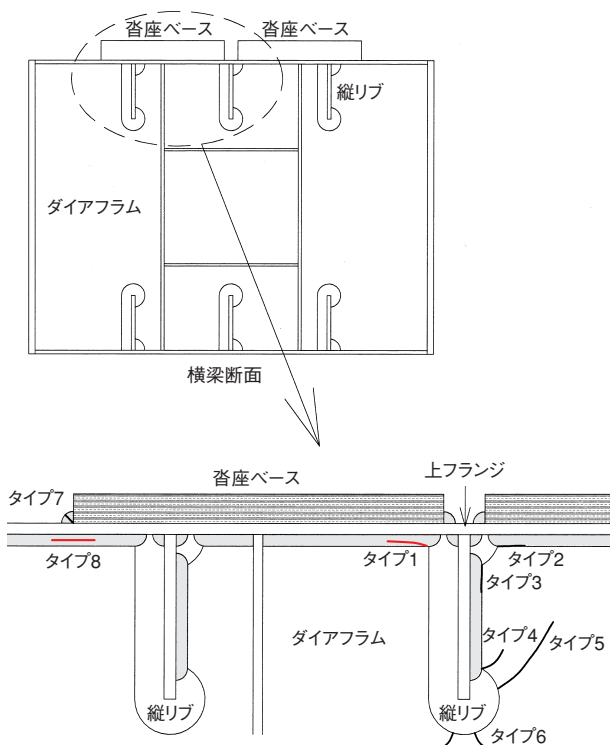


図1 横梁に発生する典型的なき裂の種類

沓座ベースプレート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、当該領域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。

疲労き裂発生の特徴は以下のとおりである。

- ① き裂が発生している横梁の多くは上部工の架け違い部（横梁断面に2つの支承部が存在）である。
- ② 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。
- ③ 上フランジ厚が19 mm以上になるとタイプ8き裂の発生事例は無いが、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、中央環状新宿線の建設に伴い撤去された首都高速道路5号池袋線高松P19橋脚の一部を取り出した実物大試験体を用い、静的載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、疲労試験により疲労き裂の発生・進展状況を確認するとともに、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

(1) 載荷試験とFEM解析の概要

本検討に用いた実物大試験体を図2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ジとダイアフラムとの溶接部は7 mmサイズのすみ

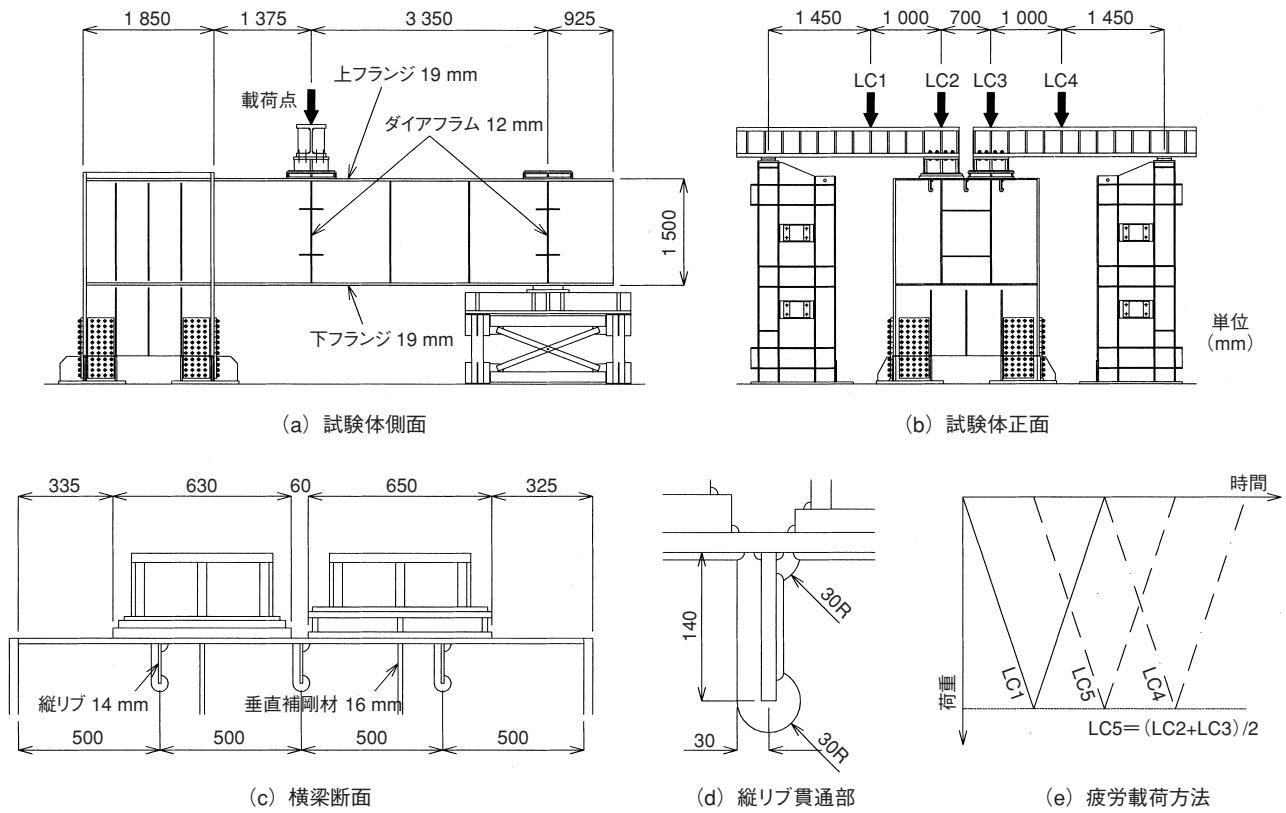


図2 実物大試験体

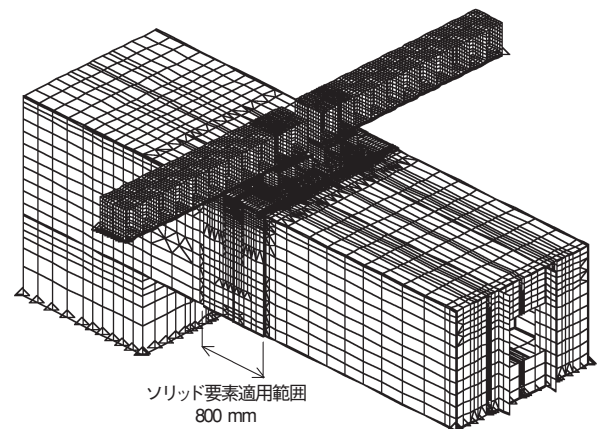
肉溶接となっている。試験体は柱底部を試験室フロアに固定し、梁部先端の下フランジ下面を架台で支持した。また、静的荷重試験の荷重パターンは、既往の実働応力計測結果²⁾を参考に、着目するダイアフラムの応力性状が実橋脚と同様となるように決定した。LC2, LC3荷重は沓座部直上への荷重であり、LC1, LC4荷重は鉛直力だけではなく沓座部に回転力を与える荷重である。なお、疲労試験では、ジャッキ本数の制約からLC2荷重とLC3荷重を同時に行うLC5荷重を採用した。

一方、試験体の解析モデルを図3に示す。モデル化において、着目するダイアフラム近傍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。

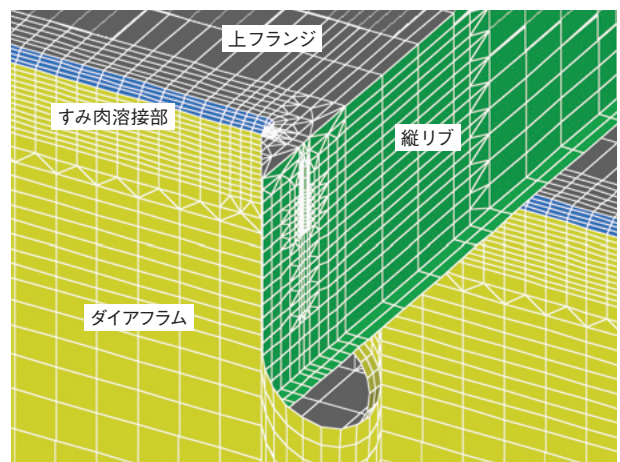
(2) FEM解析結果

a) 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、実橋脚において最も多く確認されているき裂である。図4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5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5 (a) に示すように、LC2荷重時には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



(a) 全体モデル



(b) 着目部詳細
図3 FEM解析モデル

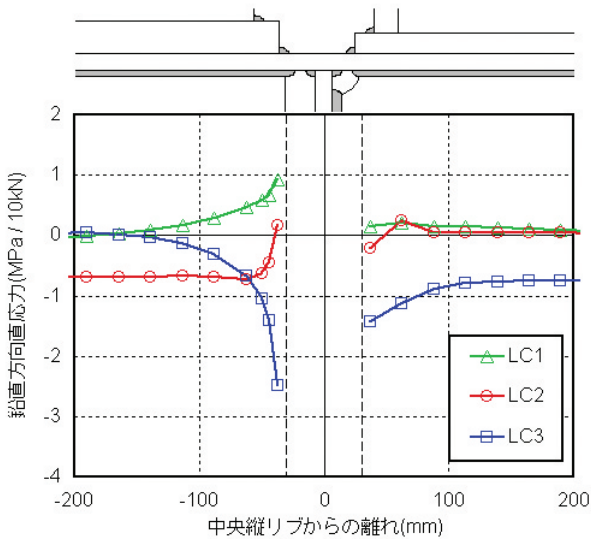
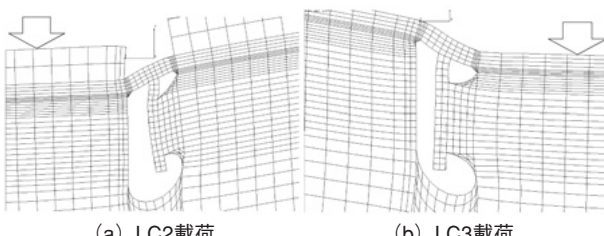


図4 中央リブ付近の溶接止端応力



(a) LC2 荷重 (b) LC3 荷重
図5 中央リブ付近の変形図

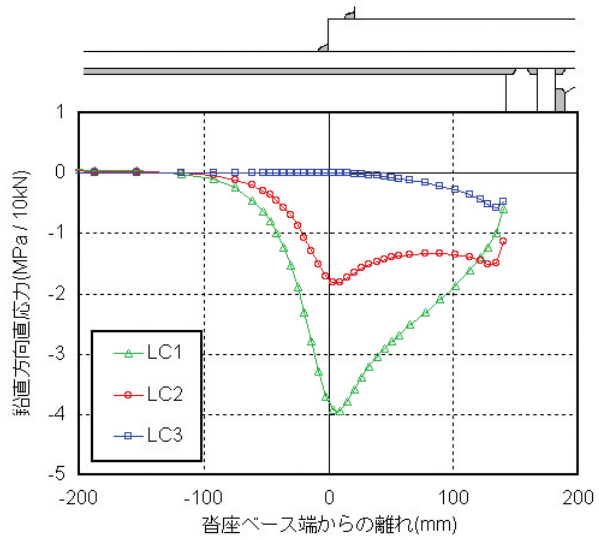


図6 沓座ベース端付近の溶接ルート応力

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5 (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。

以上のように、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。

b) タイプ8き裂発生点

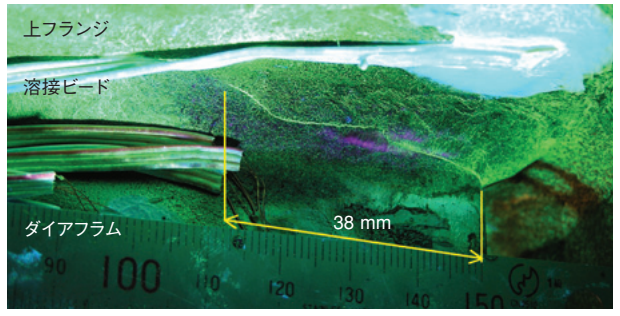
沓座ベース端直下の上フランジとダイアフラムの溶接ルート部から発生するタイプ8き裂も実橋脚において数多く確認されているき裂タイプである。解析から得られた溶接ルート部の鉛直方向応力分布を図6に示す。LC1, LC2 荷重において、応力は沓座ベース端直下に集中している。き裂が沓座ベース端直下を起点としているのはこの大きな応力集中のためである。

3. 疲労き裂の発生・進展状況の確認

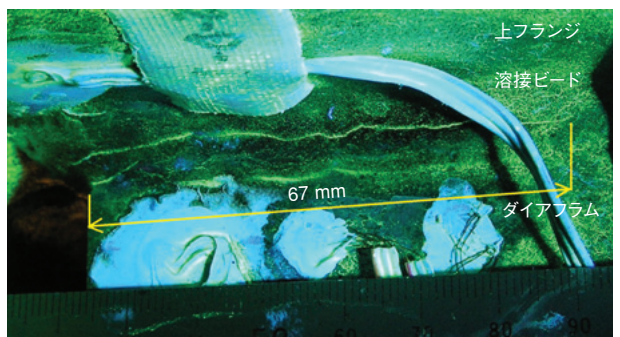
疲労試験における荷重点はLC1, LC5, LC4の3点とし、図2 (e) に示したような荷重波形で繰返し荷重を行った。荷重範囲は450 kNであり、下限荷重は30 kNである。

a) 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に示す。繰返し荷重回数が80万回に達した時点で観察されたダイアフラム側のまわし溶接止端部を起点とするき裂は溶接部を上フランジに向かって進展した。また、溶接部表面で観察されたき裂長さとの繰返し荷重回数の関係を図7に示すが、130万回付近で進展速度が急激に大きくなっているのは、写真1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250万回の繰返し荷重では上フランジに達することはなかった。



(a) 横梁中央側から視準



(b) 梁・柱接合部側から視準

写真1 180万回到達時におけるタイプ1き裂の状況

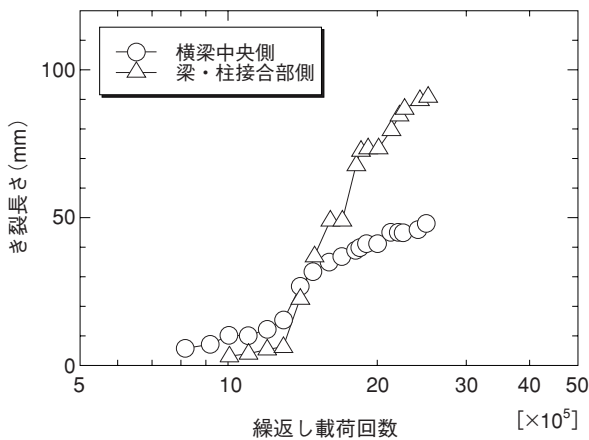


図7 タイプ1き裂のき裂長ささと繰返し载荷回数との関係

b) タイプ8き裂

タイプ8き裂は、繰返し载荷回数が90万回に達した時点で初めて観察された。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2に示す。また、溶接部表面で観察されたき裂長ささと繰返し载荷回数の関係を図8に示す。図7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。

4. 補修・補強策の検討

タイプ1き裂ならびにタイプ8き裂に対する補修・補強策としては、①上フランジとダイア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既設の沓座ベースプレートを撤去し、1枚の大きいサイズの沓座ベースプレート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、写真3や写真4に示す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。

(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。

小型の当板部材による補修・補強を行う場合、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。沓座が箱形式である場合には、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が、実橋脚における沓座の多くは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。そこで、本検討では、ワンサイドボルト適用に代替

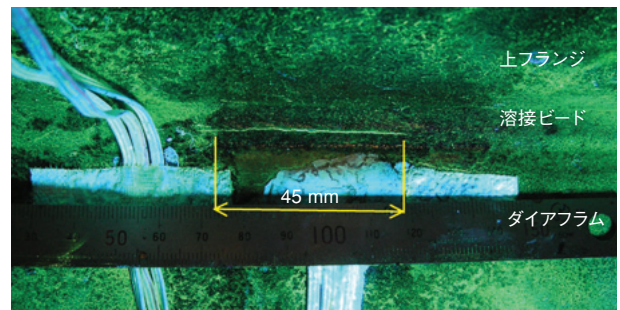


写真2 92万回到達時におけるタイプ8き裂の状況 (梁・柱接合部側から視準)

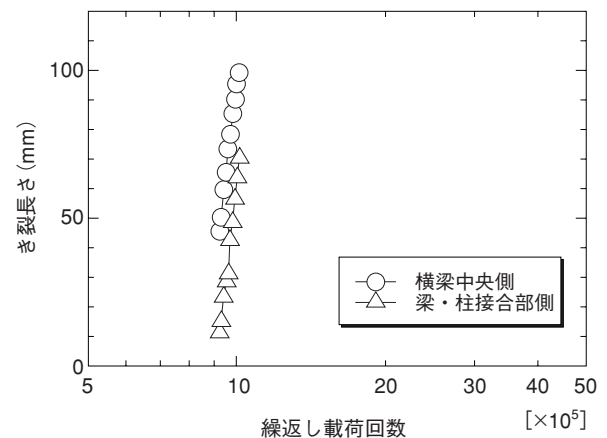


図8 タイプ8き裂のき裂長ささと繰返し载荷回数との関係



写真3 タイプ1き裂に適用した補修・補強策

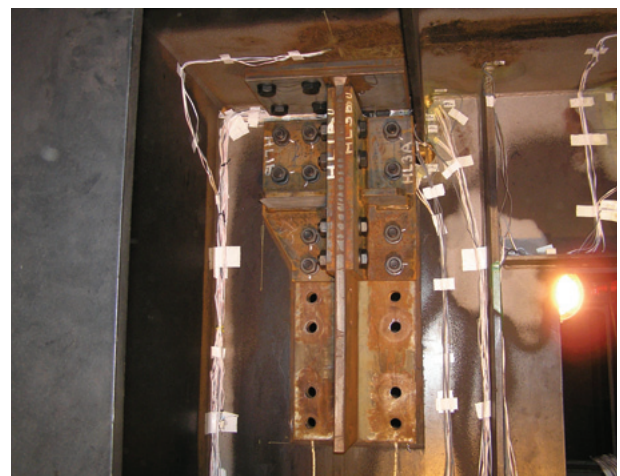


写真4 タイプ8き裂に適用した補修・補強策

する連結方法を模索することとした。

まず、き裂発生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て検討を行った。このダイアフラムは梁部先端に位置するが（図2参照）、ここでは荷重位置のみ移動した。表1に検討ケースを示す。表中のFはフィラープレートが設置されたことを示し、Bはボルト締付けがなされたことを示す。ケースA1およびA2、A4における当板部材と上フランジとのボルト連結は沓座の外側で行った。また、ケースA4、A5では、上フランジとフィラ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（適用厚は1 mm程度）。さらに、ケースA5では、フィラープレートと当板部材との間の隙間を小さくするため、樹脂硬化後に油圧ジャッキ（導入力はおよそ50 kN）を用いたリフトアップ施工を行った。なお、本施工はダイアフラム面近くで行った。

静的荷重試験結果を図9に示す。上フランジ面とダイアフラム面をボルト連結したケースA1では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の外側であったために、ダイアフラム近傍で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、ダイアフラム面と縦リブ面をボルト連結したケースA3では、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、すべての面をボルト連結したケースA2では、すべての荷重ケースで応力低減が確認された。ここで、特に大きな応力低減

表1 健全ダイアフラムを用いて実施した検討ケース

ケース名	上ラウンジ		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	○		○	○	○	○	○	○

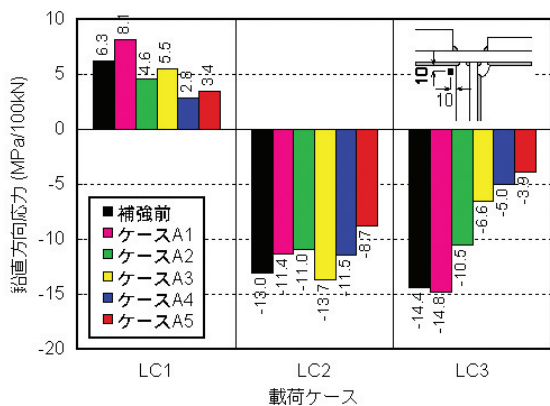


図9 健全ダイアフラムの静的荷重試験結果

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、疲労き裂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に検討ケースを示すが、ここでは健全ダイアフラムでの検討結果を考慮して、新しくケースA6～A8を追加した。

静的荷重試験結果を図10に示す。いずれのケースにおいても50%程度の応力低減は認められるが、充填材を適用したケースA4、A5、A8の低減効果は特に高い。また、その中でも、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たことに起因すると推測される。

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。

(2) タイプ8き裂に対する補修・補強策

上述したように、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、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る応力を低減する方法を考えた。具体的には、写真4に示したように、T形部材を沓座の外側で上フラ

表2 損傷ダイアフラムを用いて実施した検討ケース

ケース名	上ラウンジ		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	○	○	○	○	○	○	○	○

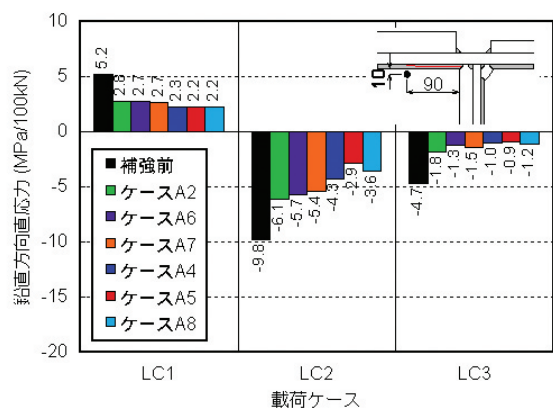


図10 損傷ダイアフラムの静的荷重試験結果

ンジにボルト接合し、L型部材を用いてT型部材とダイアフラムとをボルト接合する方法について検討した。

ボルト列数をパラメータとして実施した静的荷重試験結果を図11に示す。ここでは疲労試験の荷重パターンであるLC1, LC5, LC4の荷重ケースで試験を行った。図11 (a) に示すように、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。一方、図11 (b) に示すように、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、補強範囲が広いほど、部材が設置されている領域のダイアフラムは変形しにくくなり、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。

以上の結果から、適用するボルト列数は2列程度（部材長さとしては200 mm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列となった。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、試験体に適用するボルト列数は4列とした。なお、スリットこば面における応力低減策としては、当該部位に半円形状を有する切欠き孔を設けるなどの手法が考えられる。ただし、実橋脚において沓座直下に位置する当該部位からのき裂発生は確認されていないことや補強後

の疲労試験で当該部位からのき裂発生が無かったことから、その設置の必要性については今後の課題としたい。

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当板部材の設置を行った。タイプ8き裂に対しては100万回荷重時、タイプ1き裂に対しては250万回荷重時にこれらを実施し、最終的に450万回まで繰返し荷重を行った。

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結果、タイプ1き裂では、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までは進展せず、また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。

6. おわりに

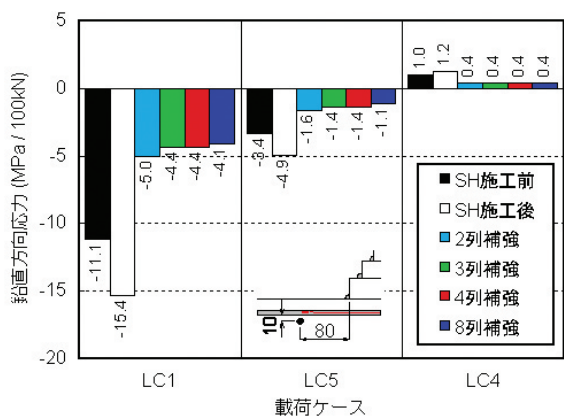
本検討から得られた知見を以下に示す。

- 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部変形に起因する。
- ② タイプ1き裂に対する補修・補強策として、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について検討したが、この部材と上フランジとの連結に高力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。
- ③ 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。
- ④ タイプ8き裂に対する補修・補強策として、上フランジとダイアフラムをボルト接合する構造について検討したが、適用後の疲労試験において、き裂の進展は確認されなかった。

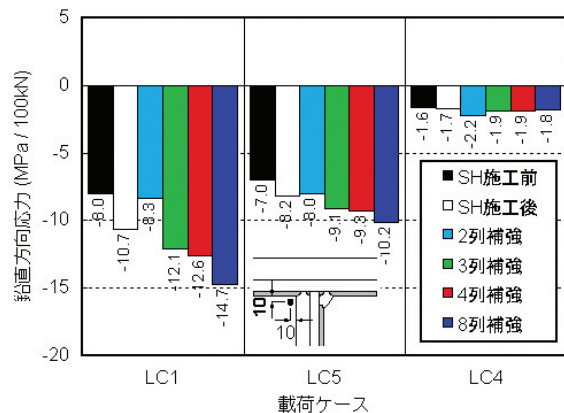
最後に、本検討は首都高速道路株式会社の委託業務研究であり、特に首都高速道路株式会社の梶原仁氏と高知工科大学の穴見健吾講師には、多大なるご指導を賜りました。ここに記して謝意を表する次第です。

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) 竹舘, 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.



(a) き裂先端



(b) スリットこば面

図11 ボルト列数をパラメータとした静的荷重試験結果