

補修溶接がウェブギャップ部の疲労性状に及ぼす影響

INFLUENCE OF RETROFITTING WELD ON FATIGUE STRENGTH OF WEB GAP DETAIL

石井博典*, 堀江佳平**, 新名 勉***, 貝沼重信****, 山田健太郎*****

Hironori ISHII, Yoshihei HORIE, Tutomu NIINA, Shigenobu KAINUMA and Kentaro YAMADA

*	株式会社 横河ブリッジ	技術本部研究所	(〒261-0005 千葉県美浜区新港 88)
**工修	阪神高速道路公団	湾岸管理部	(〒550-0011 大阪市西区阿波座 2-1-1)
***工修	阪神高速道路公団	大阪建設局	(〒550-0006 大阪市西区江之子島 2-1-5)
****工修	名古屋大学大学院 助手	工学研究科 土木工学専攻	(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)
*****Ph.D.	名古屋大学大学院 教授	工学研究科 土木工学専攻	(同 上)

Fatigue cracks on web gap plates, connecting between upper flange of main girder and its cross beam, have been retrofitted according to "Retrofitting Manual of Hanshin Expressway". And more rational retrofitting method was required to reduce retrofitting cost. First, the static loading tests were carried out on two types of plate girder models with full-scale web gap detail. Second, the field measurements were also performed before and after retrofitting. As the result, it was confirmed that the stress on web gap plate was influenced by the retrofitting weld and the retrofitting method was revised in order to reduce the stress.

Key Words: web gap plate, retrofitting weld, field measurement, fatigue crack, plate girder bridge

1. はじめに

鋼 I 桁橋の主桁上フランジと荷重分配横桁 (以下、横桁という) の上フランジの間 (以下、ギャップ部という) に取り付けられたウェブギャップ板 (以下、ギャップ板という) や対傾構取付部の垂直補剛材の溶接部に疲労損傷が数多く発見されている¹⁾⁴⁾。これらの疲労損傷は、昭和 55 年の道路橋示方書改訂以前に建設された床版支間が大きく床版厚の薄い橋梁において多数発見されており、それ以後に建設された橋梁に発見されるケースはまれである²⁾。ギャップ板に発生する疲労損傷は、図-1 に示す 4 タイプに分類されているが³⁾、上端回し溶接部から発生するタイプ 1 の損傷数が最も多く、全体の 70% 程度を占めている⁴⁾。主桁腹板に亀裂を生じるタイプ 4 の損傷は、他のタイプの損傷と同時に発見されることが多い。

上記の疲労損傷の発生要因は、図-2 に示す輪荷重載荷に伴う RC 床版のたわみ変形に起因する主桁上フランジの首振り変形 (以下、床版作用という) と、隣接する主桁間の相対たわみ差 (以下、主桁作用という) であり、前者が主要因であると考えられている^{1) 5) 6)}。

阪神高速道路公団では、このようなギャップ板に発生する疲労損傷に対して、図-3 に示す既設のギャップ板 (板厚 9mm, スカラップ有) を撤去し、板厚 19mm のスカラップのないギャップ板に取替える補修方法³⁾ (以下、現行補修方法という) が開発された。

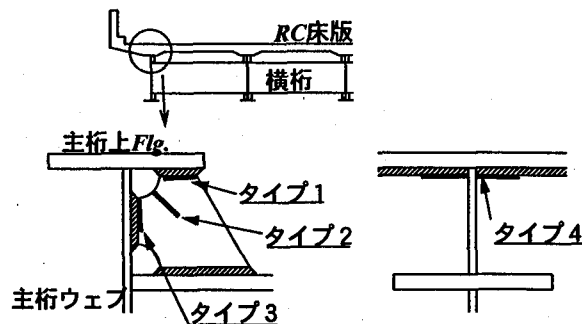


図-1 ギャップ部の疲労損傷事例

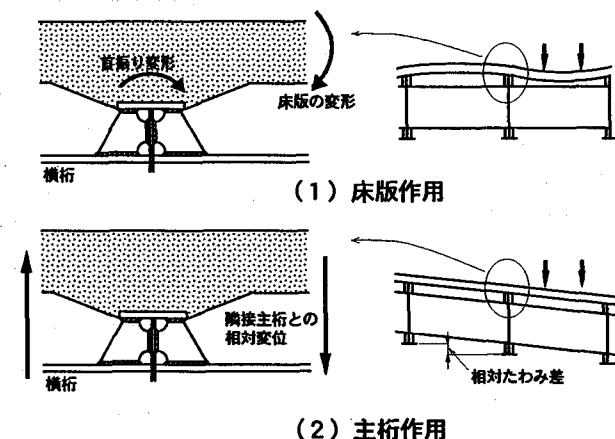


図-2 疲労損傷の発生要因

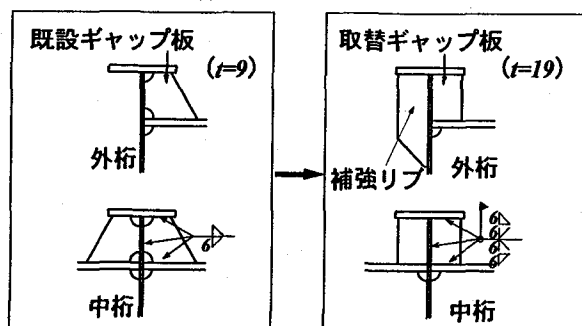


図-3 現行補修方法の模式図

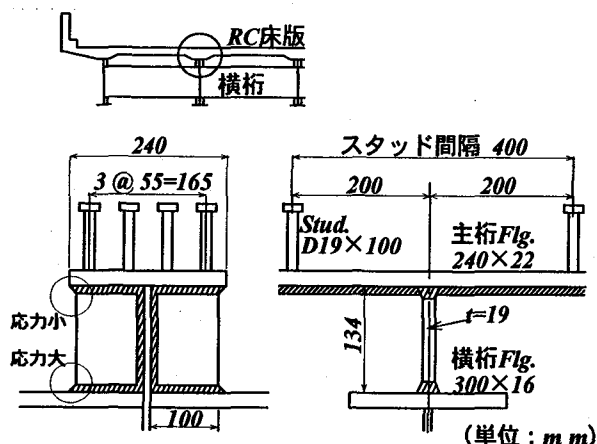


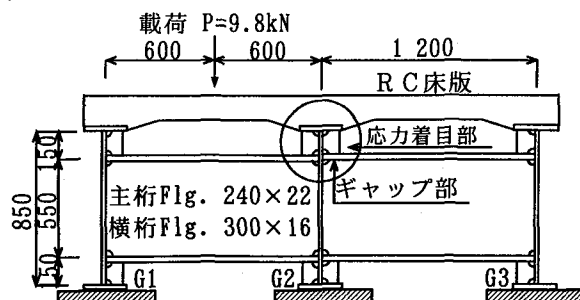
図-4 補修後に追跡調査した橋梁のギャップ部

既設のギャップ板には台形と矩形があるが、新規に取り替えるギャップ板は施工性を考慮して矩形で統一されている。

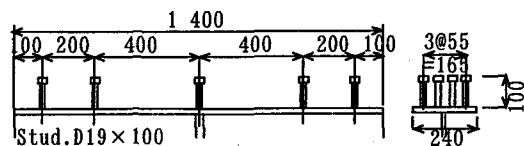
ギャップ板の補修は、損傷発生率の高い径間から損傷の有無に関わらず径間単位で進められてきた⁴⁾。今後は損傷発生率の低い径間を補修するケースが増加するため、経済的な補修方法の確立が望まれている。また、補修後に実施された実橋調査において、①補修後のギャップ板の応力性状は既設構造とは異なり、上端に比べて下端の応力が高いこと、②近年の重車両交通の著しい増加の影響もあると考えられるが、実働応力が比較的高いこと、が確認された。よって、補修方法の改良が必要であると考えられた。

なお、図-4に示すように、応力測定を行った橋梁はギャップ板がスタッド間隔 400mm の中央にあり、スタッドジベルがギャップ板直上にないスタッド配置であった。

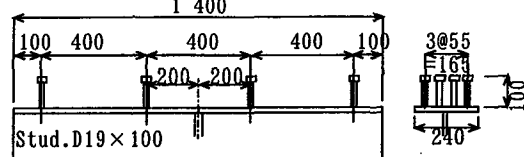
ところで、参考文献 5) によれば、主桁上フランジのスタッド配置法が、ギャップ板の応力性状に影響を及ぼすことが確認されている。また、現行補修方法開発時の検討では、補修時の溶接収縮により主桁上フランジが変形することが確認されている²⁾。著者らは、スタッド配置法に加えて、溶接補修時の主桁上フランジの変形がギャップ板の応力発生性状に何らかの影響を与えると考えた。そこで、本研究では、スタッド配



(1) 試験体の概要

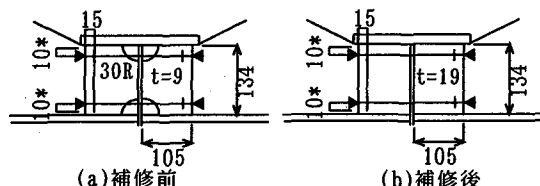


(a) スタッド有

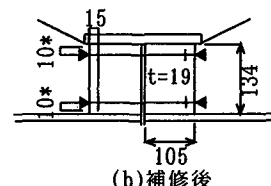


(b) スタッド無

(2) スタッドの配置方法



(a)補修前



(b)補修後

※溶接止端より10mm

(3) ギャップ板形状および測定位置詳細

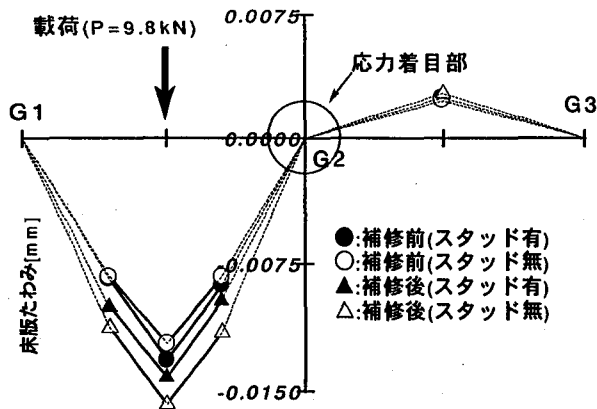
図-5 模型試験体

置を変えた模型試験体の静的載荷試験と FEM 解析により取替補修前後のギャップ板の応力発生性状を調べ、補修後はギャップ板下端の応力が大きくなる原因を明らかにとした。また、その対策として、著者らが既報^{6),7)}において提案したギャップ板上端部の疲労強度向上方法の適用を検討し、実橋で試験施工してその効果を確認した。

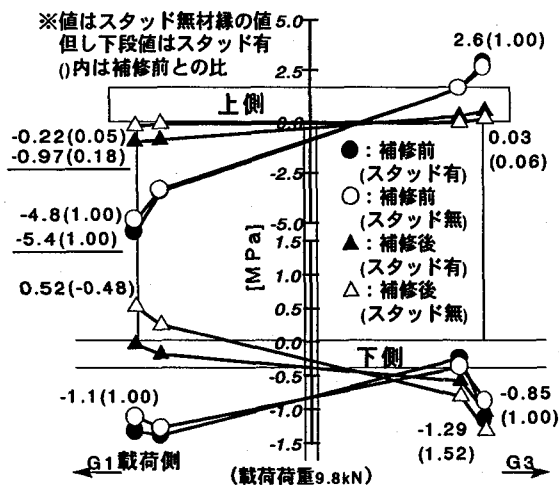
2. 模型試験体の静的載荷試験

2.1 試験方法

図-5に模型試験体の形状および寸法を示す。試験体は主桁間隔 1,200mm、床版厚 150mm の 3 主桁であり、橋軸方向長さは 1,400mm である。主桁の上フランジと横桁の上フランジの間には実橋と同じサイズのギャップ板(幅 100mm×板厚 9mm×高さ 134mm)を設置した。既設のギャップ板には台形と矩形があるが、試験では形状による影響を取り除くため、ギャップ板形状は補修後と同じ矩形とした。スタッド配置がギャップ板の応力に及ぼす影響⁹⁾を考慮し、試験体は図中に示すようにギャップ板直上にスタッドのある試験体(以下、スタッド有モデルという)と、ギャップ板



(1) 床版のたわみ分布



(2) G2 桁ウェブギャップ板の応力分布

図-6 静的載荷試験結果

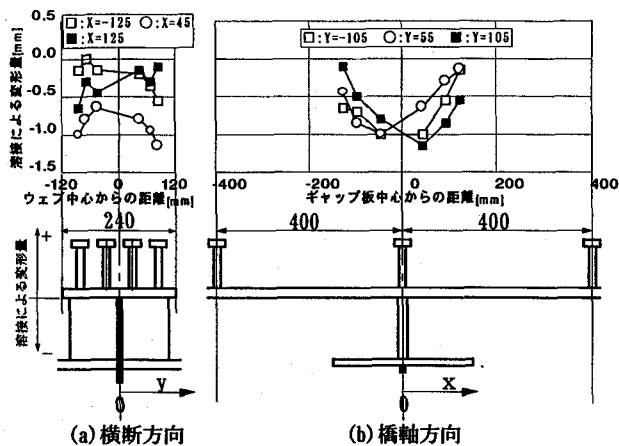
がスタッド間隔の中央にある試験体(以下、スタッド無モデルという)の2種類とした。スタッド無モデルのスタッド配置は、図-4に示した橋梁と同じ諸元である。

静的載荷試験は、まず、この既存構造で行った。次に、図-3の現行補修方法に従って補修した後、同様の試験を実施した。載荷は試験体の各主桁下フランジを試験床に固定して行い、床版支間中央に9.8kNを載荷した。ひずみゲージ貼付位置は、材縁面と、材縁より15mmの位置とした。溶接止端からの距離は、いずれも10mmとした。ギャップ板の面外変形を考慮し、材縁より15mmの位置のひずみゲージは表裏に貼付した。また、補修溶接による主桁上フランジの面外変形量を確認するため、補修前後で主桁上フランジと横桁上フランジの距離を隙間ゲージで測定した。

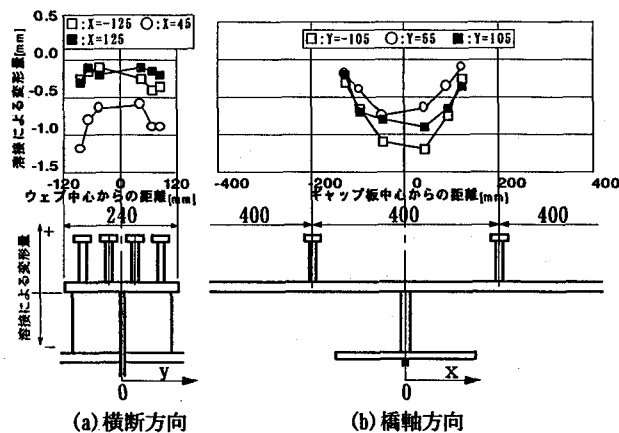
2. 2 試験結果

(1) 載荷試験結果

図-6に補修前後における床版のたわみ分布とG2桁におけるギャップ板溶接線の応力分布を示す。なお、材縁より15mmの位置における応力は、表裏の平均値である。



(1) スタッド有モデル



(2) スタッド無モデル

図-7 補修溶接による主桁上フランジ面外変形

床版のたわみは、補修後、特にスタッド無モデルで増加している。応力分布に着目すると、補修前では下端と比較して上端の応力が卓越しており、既往の測定結果^{1), 2), 3), 4)}や解析結果⁵⁾に一致している。また、スタッド有モデルとスタッド無モデルの応力分布には差異が見られない。一方、補修後ではギャップ板上端左側の応力はスタッド有モデルで補修前の18%、スタッド無モデルで5%に低減している。この低減率は9mmから19mmに増厚した板厚効果(9/19=47%)を大きく上回っている。また、ウェブギャップ板下端の応力分布は補修前後で傾きが変化している。補修前の応力分布の勾配は床版のたわみ変形の勾配(着目部では右上がりの勾配)と一致しているが、補修後の応力分布の勾配は床版のたわみ変形の勾配と逆の傾きになっている。特にスタッド無モデルでは補修後のギャップ板下端の応力勾配が大きく、材縁における応力の絶対値は増厚取替えにより増加している。

(2) 補修時の主桁上フランジの溶接変形

図-7に補修溶接による模型試験体の主桁上フランジの面外変形測定結果を示す。スタッド有・無モデル

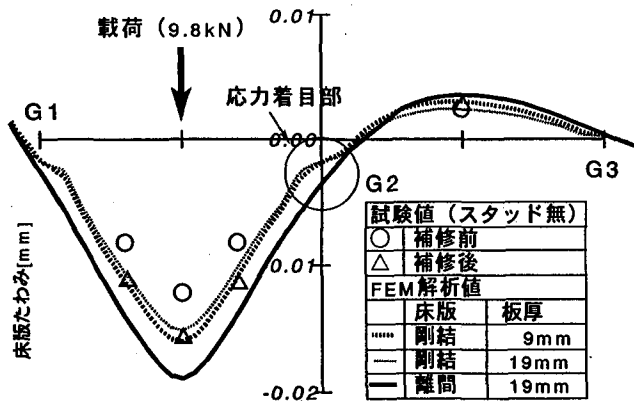
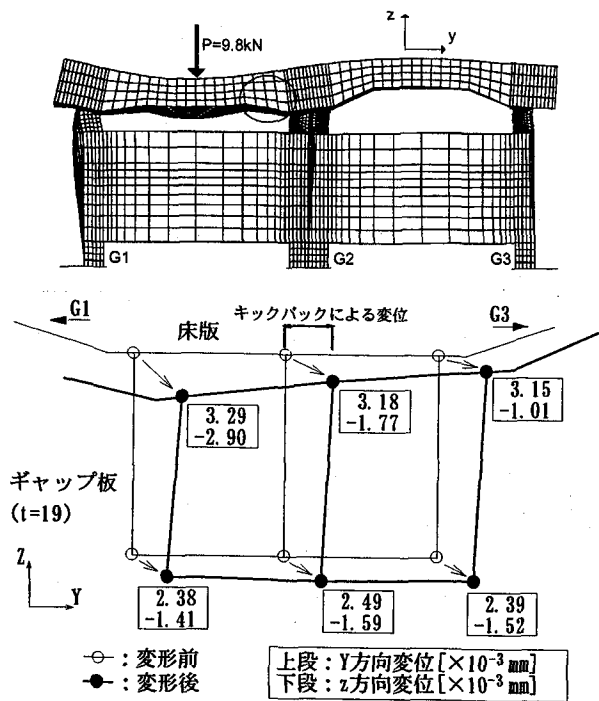
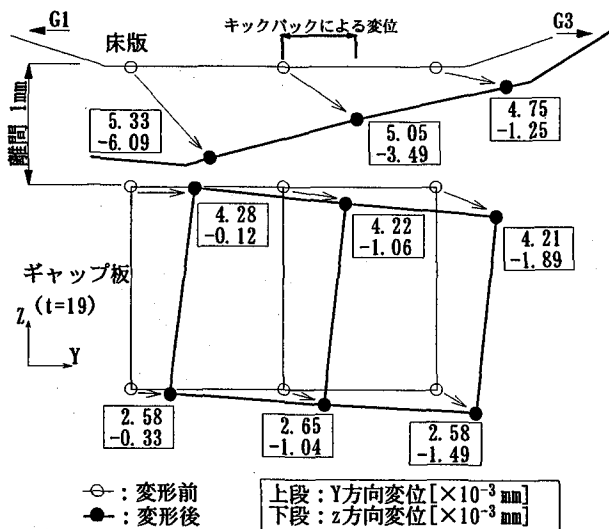


図-11 床版たわみ分布図

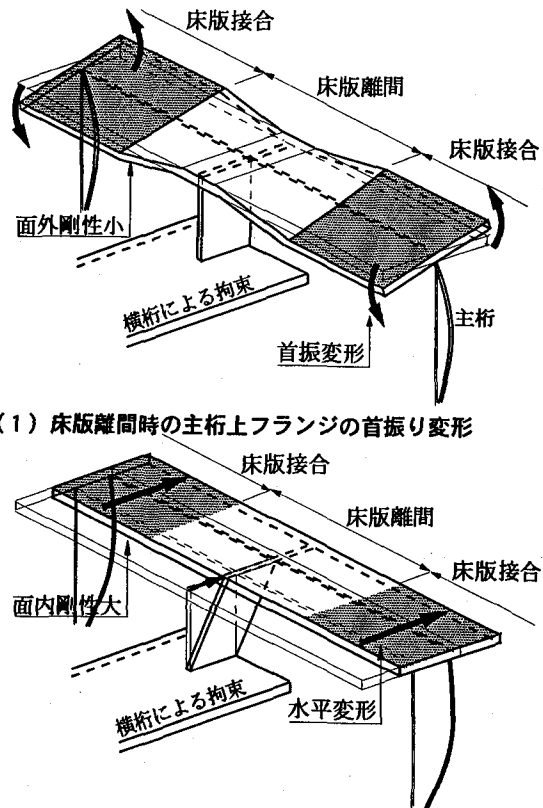


(1) 床版剛結モデル



(2) 床版離間モデル

図-12 G2 ギャップ板の変形図



(1) 床版離間時の主桁上フランジの首振り変形

(2) 床版離間時のキックバックによる水平変形

図-13 床版離間時の変形模式図

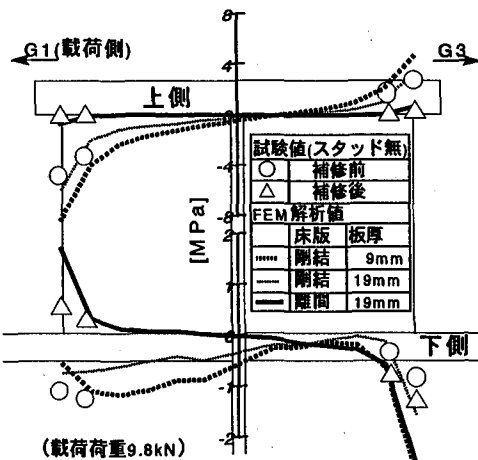


図-14 G2 ギャップ板の応力分布

床版の間に隙間が生じる(以下、床版離間という)ことが明らかとなった。この床版離間が補修後のギャップ板の応力性状に影響を及ぼすと考えられた。そこで、図-10に示す試験体モデルのFEM解析を行い、補修溶接による床版離間がギャップ板に及ぼす影響について検討した。床版には8節点ソリッド要素を、鋼部材には4節点シェル要素を使用した。試験体の対称性を考慮して、橋軸方向の1/2をモデル化した。解析モデルは、床版離間を考慮しないで主桁上フランジと床版の節点を剛結としたモデル(以下、床版剛結モデル

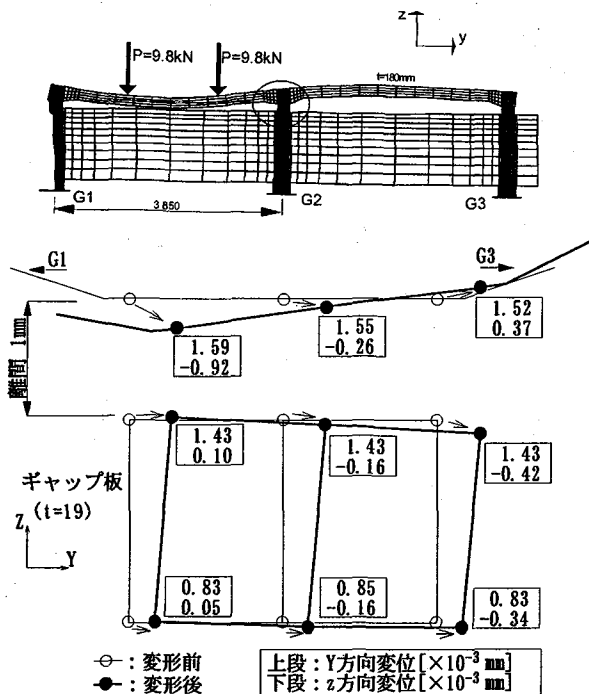


図-15 実橋モデルの変形図 (床版剥離モデル)

という)と、ギャップ板直上で主桁上フランジと床版が完全に離間したと仮定し、主桁上フランジと床版の節点を一定区間 (スタッド無モデルの中央スタッド間隔 400mm) 接合せず、1mm 離間させたモデル (以下、床版離間モデルという) の 2 種類とした。なお、着目部の最小メッシュ寸法は 10mm $\times$ 20mm とした。

3. 2 FEM 解析結果

図-11 に FEM 解析結果の床版たわみ分布図を示す。床版剛結モデルでは、ギャップ部で床版の変形が拘束されていることがわかるが、床版離間モデルではそれが見られない。FEM 解析値は試験値より約 20% 程度大きい。床版離間モデルの変位は床版剛結モデルの変位より大きく、その増加の割合は試験値の補修前後の割合にほぼ等しい。よって、模型試験において補修後に床版のたわみが増加したのは、主桁上フランジと床版の離間による影響と考えられる。

図-12 に G2 桁のギャップ板の変形模式図を示す。床版剛結モデルでは、床版のたわみ変形に伴ってギャップ板に、①面内曲げ変形 (首振り変形) と②せん断変形が生じていることがわかる。前者は床版たわみ変形を床版支点 (主桁上フランジ) が拘束するために生じるものである。それに対し、後者は床版中立軸位置と床版支点との間に距離があるため、ギャップ板上端が (その距離) $\times$ (床版たわみ角) の変形量だけ G3 方向に水平に押し出される結果生じるものである (以下、キックバックという)。図からわかるように、床版剛結モデルでは前者の首振りの影響が大きい。

一方、床版離間モデルでは面内曲げ変形に比べてせん断変形が卓越していることがわかる。これは、ギャップ板直上近傍で床版と主桁上フランジが離間し

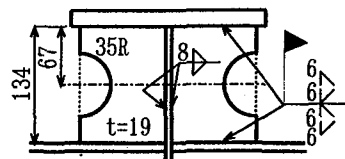


図-16 ギャップ板の応力低減案

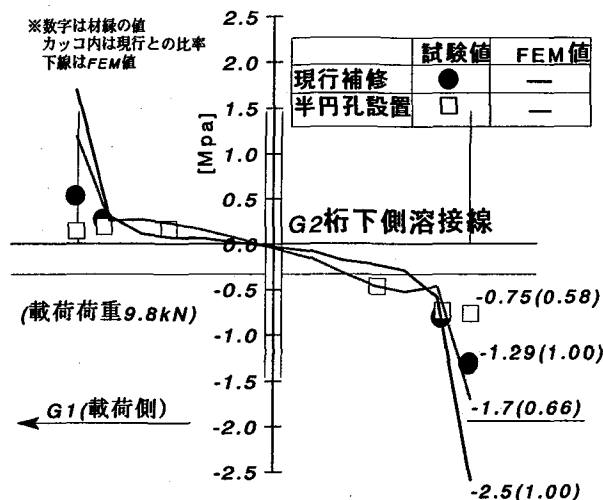


図-17 半円孔設置の効果

ているために首振りの影響がほとんどなく、キックバックの影響が顕著となったものと考えられる。なお、ギャップ板の変形量は床版離間量 (1mm) に比べて十分小さいので、離間した床版と主桁上フランジが接触することはない。

以上を模式的に説明すると、図-13 のようである。ギャップ板直上で主桁上フランジと床版が離間している場合、RC 床版の変形は隣接スタッド位置より主桁上フランジに伝達される。この時、床版離間部のフランジの面外剛性が小さいため、首振り変形についてはギャップ板に与える影響は小さい。一方、キックバックによる水平方向の変形については、主桁上フランジの面内剛性が大きいので、ギャップ板への影響も大きくなる。よって、補修溶接により床版と主桁上フランジが離間した場合、ギャップ板はキックバックの影響が顕著になると考えられる。

図-14 に FEM 解析結果の応力分布を示す。床版剛結モデルは、板厚 9mm, 19mm とともに首振り変形の影響を大きく受けるため、上端の応力が卓越しており、応力分布の勾配も床版のたわみ変形勾配と一致している。試験値に比べて解析値が大きいものの、補修前の試験の応力分布性状は床版剛結モデルの解析結果と一致している。一方、補修後については、試験の応力分布の傾向は床版離間モデルの解析結果と一致しており、上端の発生応力が小さく、下端の応力勾配は床版のたわみ勾配と逆向きである。よって、室内試験により得られた補修後の応力分布は、溶接補修による床

版離間の影響によるものであると考えられる。

なお、このキックバックの影響が今回用いた狭い主桁間隔特有の現象でないことを確認するため、解析については実物大モデル（主桁間隔 3850mm、床版厚 180mm）についても行った。実物大モデルにおける床版剥離モデルの変形図を図-15 に示す。試験体モデル同様、キックバックの影響が顕著となっており、実物大モデルにおいても今回の試験体と同様の挙動を示すことが確認できた。

4. 応力低減による補修方法の提案

4. 1 室内試験

(1) 検討方法

前述したように、補修時の床版離間によりギャップ板下端の応力が増加することが明らかになった。また、その傾向はスタッドがギャップ板直上にある場合により顕著であった。ところで、図-16 に示す著者らが既報⁶⁾で検討した半円孔の設置による応力低減法（以下、半円孔設置案という）は、ギャップ板上端部に着目したものであり、解析においては床版の首振り変形に着目し、ギャップ板上端に面内の曲げモーメントを付加した。よって、今回のようなキックバックによる水平方向の変形は検討していない。しかし、半円孔の設置は、今回のような水平方向の変形により発生するギャップ板下端の溶接部の応力低減にも効果があると考えられたため、前述の補修後の室内試験体にガス切断により半円孔を設置し、静的載荷試験を行った。

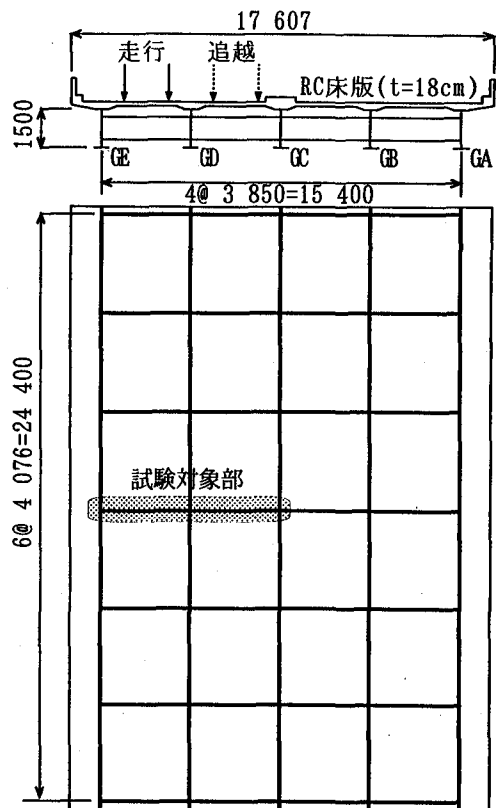
半円孔のサイズおよび設置位置は参考文献 6) の検討結果を参考に決定し、図-16 中に示すように半径 35mm の半円孔をギャップ板高さ方向の 1/2 の位置に設置した。室内試験は、ギャップ板下端の応力増加が顕著なスタッド無モデルで行った。試験に併せ、前述の FEM 解析モデルによる検証も行った。

(2) 検討結果

G2 桁ギャップ板下端の応力分布を現行補修方法と半円孔設置案で比較した結果を図-17 に示す。試験では、回し溶接部の応力は 58% に低減している。解析値は試験値より高いが、解析でもほぼ同様の低減効果が得られており、半円孔の設置が補修溶接後に比較的大きな応力が発生するギャップ板下端溶接部の応力低減にも効果があることが確かめられた。

4. 2 実橋応力測定

前述した室内試験では、床版作用に着目した試験を行い、補修溶接がギャップ板の応力性状に与える影響について明らかにするとともに、その対策案として半円孔設置案の応力低減効果を確認した。しかし、実橋においては主桁作用の影響等もあると考えられた。そこで、実橋における溶接補修後の応力発生性状および半円孔設置案の応力低減効果を確認するため、2種類のギャップ板を実橋に設置して応力測定を行った。



注) 対象とした2径間は全ての諸元

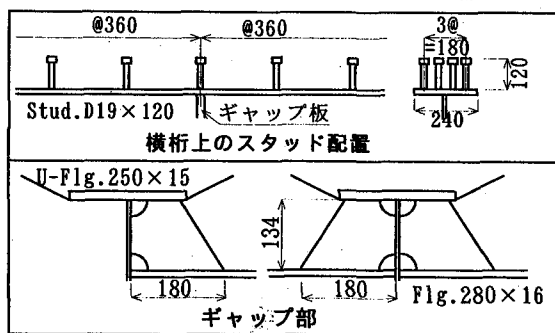


図-18 応力測定対象橋梁

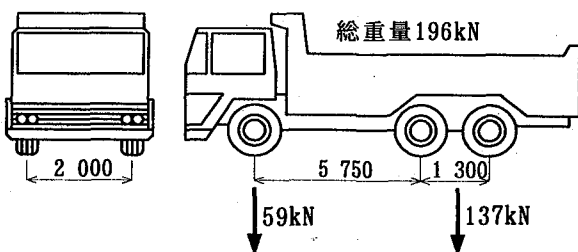
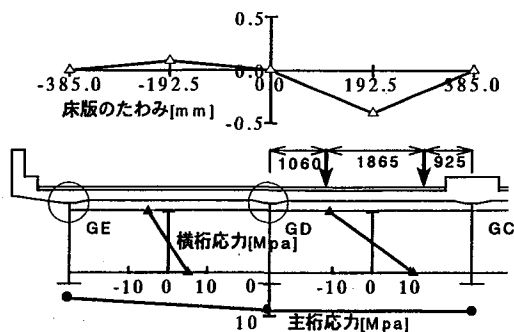
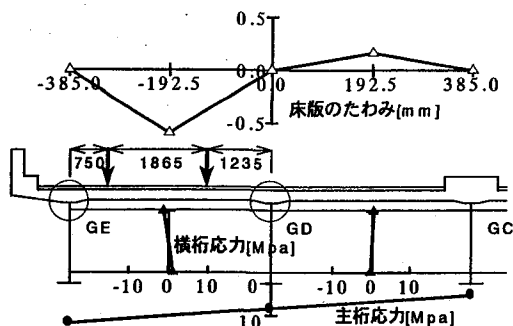


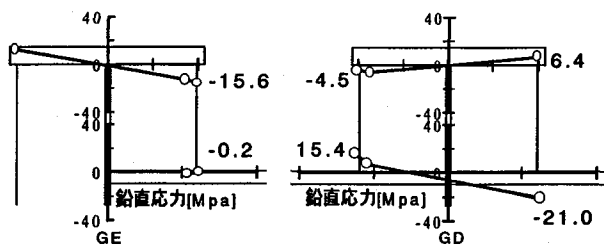
図-19 載荷車の諸元

(1) 応力測定方法

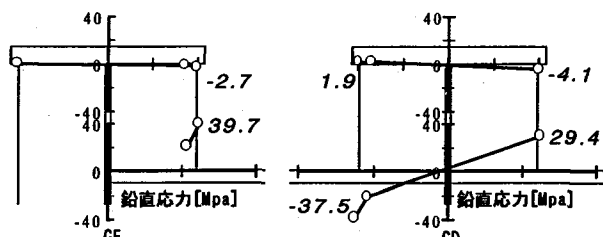
対象橋梁の諸元を図-18 に示す。本橋は、既設鋼 I 桁橋の内の標準的諸元を有する支間長 24.4m の単純合成5主 I 桁橋である。昭和 55 年の道路橋示方書改訂以前に建設されたため、主桁間隔 3,850mm に比べて、床版厚が 180mm と薄い。既に全パネルで鋼板接着による床版補強が完了している。図中に示すように、本橋ではスタッドがギャップ板の直上に配置さ



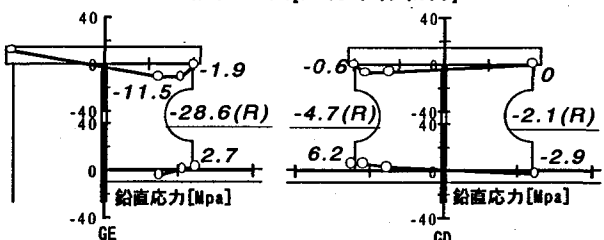
(1) 載荷位置および主桁・横桁の応力、床版のたわみ



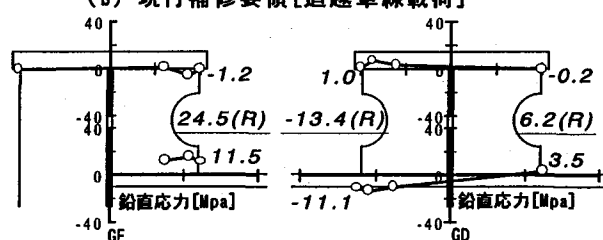
(a) 現行補修要領[走行車線載荷]



(b) 現行補修要領[追越車線載荷]



(c) 半円孔設置案[走行車線載荷]



(d) 半円孔設置案[追越車線載荷]

注) 下線(R)は円孔壁の応力

(2) ギャップ部の応力

図-20 実橋応力測定結果

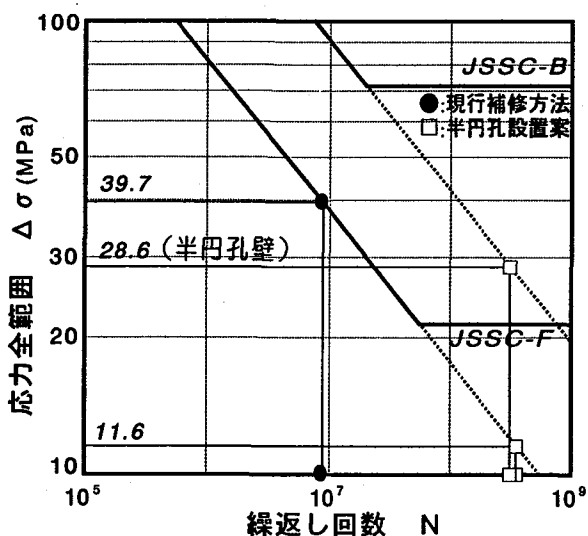


図-21 疲労寿命の比較検討

れている。既設のギャップ板は、幅 180mm×厚さ 9mm×高さ 134mm の台形板で、250mm×15mm の主桁上フランジと 280mm×16mm の横桁上フラ

表-1 疲労寿命の比較検討結果

		応力測定結果		繰返し回数 N	比率*2	照査等級
		$\varepsilon_{\max}^{*1}$ [10 ⁻⁶]	$\sigma_{\max}$ [MPa]			
現行補修	溶接部	193	39.7	8.8×10^{-6}	1.0	JSSC-F
半円孔設置案	溶接部	56	11.5	3.6×10^{-8}	40.9	JSSC-F
	円孔部	139	28.6	3.2×10^{-8}	36.3	JSSC-B

*1 $\varepsilon_{\max}$ は測定されたひずみの内最大値

*2 比率は現行補修方法との発生応力の比

ンジの間にすみ肉溶接で取り付けられていた。

試験施工は連続する同一諸元の2径間で行い、各径間のギャップ板を現行補修方法と半円孔設置案で補修した。補修後、図-19に諸元を示す荷重車1台を用いて静的載荷試験を行った。載荷試験は、走行車線を一車線規制して荷重車を載荷するケース(走行車線載荷)と追越車線を規制して荷重車を載荷するケース(追越車線載荷)の2ケースとし、測定時には荷重車以外に混入車両のないことを確認した。ひずみゲージの貼付位置は、室内模型試験体と同位置とした。半円孔設置案のギャップ板では溶接部の他、高い応力が発生すると考えられる半円孔壁材縁面のひずみも測定した。

(2) 応力測定結果

補修後における現行補修方法、半円孔設置案の応力分布を図-20に示す。なお、補修前後で主桁上フランジの形状測定を行った結果、模型試験体と同様に主桁の上フランジに1mm程度の面外変形がみられた。

追越車線載荷、走行車線載荷ともに上端の応力は小さく、下端の応力が大きい。GD桁では床版のたわみ勾配とギャップ板下端の応力分布勾配は逆転しており、床版離間によるキックバックの影響であると考えられる。追越車線載荷時のGE桁下端に大きな応力が発生しているが、追越車線載荷時はGE桁側の床版の変形が小さく、横桁の曲げ応力が大きいことから、主桁作用による影響が大きいと考えられる。

現行補修方法と半円孔設置案を比較すると、現行補修方法では下端の溶接部に大きな応力が発生しているが、半円孔設置案では下端の回し溶接部に発生する応力は現行補修方法の30%程度まで低減している。ただし、半円孔設置案では半円孔部に比較的大きな応力が発生していることから、半円孔壁からの疲労損傷発生について検討が必要と考えられた。

(3) 各補修方法の疲労寿命の比較

応力測定結果から、半円孔設置案では回し溶接部の応力は低減するが、半円孔部には比較的高い応力が発生することが確認された。回し溶接部の疲労寿命が向上したとしても、半円孔の疲労寿命が回し溶接部に比べて低ければ、この位置で疲労損傷が生じることが考えられる。そこで、静的載荷試験により測定された回し溶接部、半円孔部の応力を応力範囲と考え、現行補修方法、半円孔設置案の疲労寿命をJSSCの疲労設計指針⁹⁾に基づいて試算した。

現行補修方法と半円孔設置案で各部の疲労寿命を比較した結果を図-21と表-1に示す。なお、回し溶接部の疲労強度等級はJSSC-F等級(荷重伝達型すみ肉溶接継手、止端破壊)、半円孔の疲労強度等級はJSSC-B等級(ガス切断縁、仕上げ)とした。表中の応力値は、静的載荷試験結果から抽出した各ディテールにおける最大値である。

半円孔設置案では、半円孔部と溶接部の疲労寿命はほぼ同程度であるが、溶接部より半円孔部の疲労寿命が短い。ギャップ板の寿命は半円孔部の寿命で決定される。半円孔設置案の疲労寿命は現行補修方法の約36倍となっており、半円孔の設置がギャップ板下端溶接部の応力低減についても十分な効果があることが確認できた。

5. まとめ

ギャップ板に生じる疲労損傷を対象として、模型試験体とFEM解析により補修溶接がギャップ板の応力性状に及ぼす影響を明らかにするとともに、ギャップ板の応力低減法を提案した。また、実橋試験施工によ

り、実橋における応力低減効果を検証した。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) ギャップ板の補修溶接時の主桁上フランジ溶接変形により、スタッドの配置に関わらず床版と主桁上フランジが1mm程度離間する。
- (2) 上記の離間により、ギャップ板の応力性状が変化する。この結果、上端溶接部は板厚効果以上に応力が低減するが、下端溶接部には比較的高い応力が発生する。特にギャップ板直上にスタッドがない場合にこの傾向が顕著である。よって、現行の補修方法で補修後には、ギャップ板下端に疲労損傷が発生する可能性があると考えられる。
- (3) ギャップ板に半円孔を設置した半円孔設置案では、回し溶接部の応力は30%程度に低減する、半円孔部に比較的大きな応力が発生するが、半円孔部の疲労強度は高い^{9),10)}ことから、ギャップ板全体の疲労強度は大幅に改善される。

参考文献

- 1) 北沢正彦, 大西俊之, 川北司郎, 林秀侃: 鋼I桁主桁と横桁あるいは対傾構との取合部の疲労損傷とその対策, 阪神高速道路公団技報, 第6号, pp.122-134, 1986
- 2) 林秀侃, 中村一平, 仲矢忠士: 鋼I桁橋の疲労損傷の補修と補強, 阪神高速道路公団技報, 第8号, pp.191-202, 1988
- 3) 阪神高速道路公団: 道路構造物の補修要領, 第1部 鋼構造物, 1990
- 4) 中村一平, 関本宏, 本村春一: 鋼橋の疲労損傷と補修・補強計画, 阪神高速道路公団技報, 第10号, pp.116-123, 1990
- 5) 大倉一郎, 塩崎哲也, 福本口秀士, 南荘淳: 垂直補剛材上端の疲労亀裂を低減させるスタッド配置, 土木学会論文集, 第525号/I-33, pp.97-108, 1995
- 6) 貝沼重信, 山田健太郎, 西岡敬治, 中村一平, 石井博典: 鋼I桁橋の主桁上フランジと横桁の取合部の応力緩和による疲労強度向上法, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1025-1032, 1997
- 7) Kainuma S., Yamada K., Kagawa N., Nishioka T. and Ishii H.: Improving Effect on Fatigue Strength of web Gap plate by Semi-Circular Cut-out, APSBLAF 96, pp.91-98, 1996
- 8) 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, 1993
- 9) 貝沼重信, 山田健太郎, 香川直輝, 西岡敬治, 石井博典: 主桁と横桁の取合部の応力緩和による疲労強度向上効果, 土木学会第52回年次学術講演会概要集IA, pp.506-507

(1998年9月18日受付)