

ウェブバイパス工法を用いた

鋼 I 桁下フランジ継手部の連結板取替に関する研究

STUDY ON A LOWER FLANGE CONNECTING PLATES REPLACEMENT FOR AN EXISTING STEEL I GIRDER BRIDGE BY ATTACHING THE ADDITIONAL STEEL PATCH PLATES ON THE WEB PANEL

橋梁工学分野 戸田 健介
Bridge Engineering Kensuke Toda

鋼桁継手部の連結板の腐食に対して、バイパス部材を設置し、腐食損傷部分を新しい部材に取替える方法がある。しかし、本工法では桁下空間が狭隘な場合や交通供用化での施工が困難な場合がある。本研究では、鋼 I 桁継手部の下フランジ連結板の取替を想定し、施工ステップを再現した FEM 解析および実験により、ステップごとの応力性状の検討を行った。実験及び解析の結果、鋼 I 桁下フランジ連結板取替に適用するウェブバイパス工法の実現可能性を示した。

In the case of replacing the splice plate against corrosion damage of the steel girder joint part there is a method of installing an attaching the additional member and replacing the corrosion damaged portion of the girder with a new member. However, there are cases where the spare space is narrow or construction under traffic is difficult. In this study, stress characteristics of each step were investigated by FEM analysis and experiment which reproduced the construction step assuming replacement of the lower flange connection plate of the steel I girder joint part. The results indicate that the feasibility of the lower flange connecting plates replacement for an existing steel I girder bridge by attaching the additional steel patch plates on the web panel.

1. はじめに

鋼 I 桁の高力ボルト摩擦接合継手部における腐食損傷は、高力ボルトが存在し、かつ雨水の滞留がおこりやすい連結板に生じる場合があり、断面減少による純断面降伏耐力の減少やボルト軸力低下によるすべり耐力の低下をもたらす。連結板の腐食による板厚の減厚が母材厚の 10%以上と著しい場合、連結板の取替えがなされる。

連結板を取替える場合、連結板に作用している応力を他の部材に分担させる必要がある。施工実績のある部材取替工法の例として、図-1 に示す取替えの対象となる主桁の腐食損傷部を跨ぐ形で補助部材 (バイパス部材) を下フランジ下面または側面に設置し、その後腐食損傷部を新材材に取替える工法 (バイパス工法) が挙げられる。しかし、下フランジ下面に設置する場合¹⁾、桁下空間が狭隘な場合では施工が困難な場合も考えられる。また、下フランジ側面に設置する場合²⁾、バイパス部材を下フランジに溶接することになるが、交通振動や衝撃による、溶接ビードの乱れや溶接欠陥発生のおそれから、交通供用下での施工は難しい。した

がって、鋼 I 桁継手部の連結板取替に対して、施工性に優れたバイパス工法が求められている。

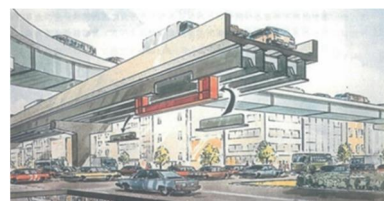


図-1 下フランジ下面に設置するバイパス部材¹⁾

本研究では、まず鋼 I 桁継手部の下フランジ連結板の取替を想定し、施工ステップを再現した FEM 解析により、主桁ウェブに高力ボルト摩擦接合によりバイパス部材を設置する工法 (ウェブバイパス工法) の優位性について検討する。また、鋼 I 桁試験体を用いて施工ステップを再現した実験ステップでウェブバイパス部材を用いた下フランジ連結板取替試験を行い、下フランジからバイパス部材への応力伝達のメカニズムについて検討する。そして下フランジ連結板取替試験の再現解析と試験供試体を基準として、鋼 I 桁断

面およびバイパス部材の断面形状と寸法をパラメータとした FEM 解析を行い、提案するウェブバイパス工法の設計方法について検討する。

2. 鋼 I 桁下フランジ連結板取替えに適用するバイパス工法に関する解析的検討

2.1 FEM 解析の概要

対象は、モーメントプレートとシアプレートによりウェブが連結されている、都市高速における、合成多主桁橋の外主桁とした。

解析モデルを図-2、図-3に示す。図-2における、継手部、一般部、支点部については、主桁およびバイパス部材は一辺 20mm の四辺形シェル一次要素で、床版は板厚方向に 3 分割されるように 50mm×83.3mm×50mm の六面体ソリッド一次要素で分割した。非破壊部は、主桁は 100mm×100mm の四辺形シェル一次要素で、床版は 200mm×83.3mm×200mm の六面体ソリッド一次要素で分割した。また、計算方法は低減積分とした。

継手部のモデル化は、ステップ毎の継手部の荷重分担について初等はり理論による計算値と比較するため、継手部のずれやすさを再現せず完全結合とした。また、ボルト孔なども再現していない。

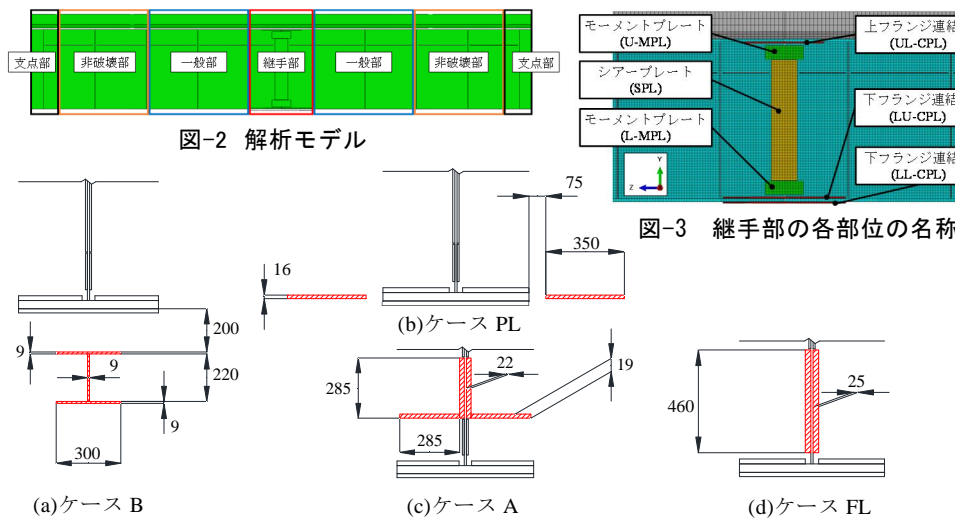


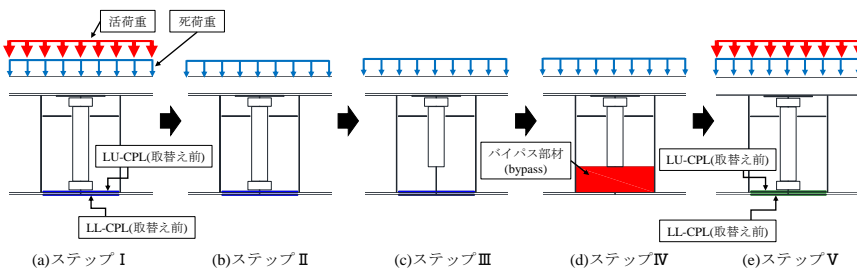
図-2 解析モデル

図-3 継手部の各部位の名称

(a) 荷重条件

(b) 境界条件(桁下面から)

図-4 荷重条件および境界条件



解析ステップ	状態	荷重
I	取替え前の交通供用下を想定した状態	死+活荷重
II	取替えのための交通規制を想定した状態	死荷重
III	ウェブ連結板の一部を撤去した状態	
IV	①バイパス部材を設置後、②下フランジ連結板を撤去した状態	
V	①新規の下フランジ連結板を設置後、②ウェブ連結板も取替え前と同じにした状態	死+活荷重

図-5 解析ステップ

主桁、連結板、バイパス部材の鋼種は、対象橋梁と同じ SM520 とした。解析で使用する材料定数を表-1に示す。これらは文献3)に従って設定した。床版のコンクリートのポアソン比 ν も文献3)をもとには 1/6 (≈ 0.167) と設定した。解析には汎用有限解析コード Abaqus/Standard 2016 を用いた。解析は、弾性有限変位解析としている。

荷重条件を表-2に、荷重条件および境界条件を図-4に示す。荷重方法は、図-4(a)に示すように対象部の設計曲げモーメントのみが継手部に作用する4点曲げ荷重とした。支点には、図-4(b)に示すように下フランジの支承線上の全節点に対して線支持とし、ピン支持、ピン・ローラー支持とした。ピン支持では x, y, z 方向の並進成分を固定し、ピン・ローラー支持では x 方向と y 方向の並進成分を固定している。また、全ての床版節点に対し、x 方向の並進成分を固定した。

解析ステップを図-5に、解析ケースを図-6に示す。ケースごとのバイパス部材の断面形状および寸法は、最も厳しくなる下フランジ連結板撤去時においては許容曲げ引張応力度 σ_a を満足し、かつステップIVの遊間断面の断面二次モーメントおよび中立軸位置がおよそ一定になるように調整した。

表-1 材料定数

材料	鋼(SM520)	コンクリート
ヤング率 E (N/mm ²)	200,000	28,000
ポアソン比 ν	0.3	0.167
降伏点 σ_y (MPa)	355	
許容曲げ引張応力度 σ_a (MPa)	210	
設計基準強度 F_c (MPa)		30

表-2 荷重条件

荷重	死荷重	死荷重 + 活荷重
設計曲げモーメント M_d (kN·m)	6.37×10 ³	9.31×10 ³
設計荷重 P_d (kN)	2504	3660

2.2 解析結果

ステップIVの最大主応力方向を図-7に示す。ケースB, PL, Aではウェブ下端, 下フランジの応力は完全にバイパス部材に伝達されず, 下フランジに最も近いL-MPLを介して伝達された。ケースFLではウェブ下端のクリアランス部を介してバイパス部材に応力が伝達された。このことから, 下フランジ連結板撤去時に主な応力の伝達経路となるのはウェブであり, ウェブにバイパス部材を設置することは効果的である。

3. ウェブバイパス工法を適用した鋼I桁

下フランジ連結板取替えに関する実験的検討

3.1 試験体設計フロー

試験体の各部材の呼称を表-3に示す。主桁I断面を決定し, 荷重荷重を設定し, 座屈照査と補剛材の設計, 継手の設計を行った。なお荷重荷重は, 許容応力度 σ_a の75%が下フランジに作用する荷重を死+活荷重, その半分の荷重($0.5 \times 0.75 \times \text{許容応力度 } \sigma_a$)を死荷重と定義し, 死荷重と活荷重の割合を1対1となるようにした。設計した試験体に対して, バイパス部材の設置の可否を確認するために, 引張側のモーメントプレート撤去

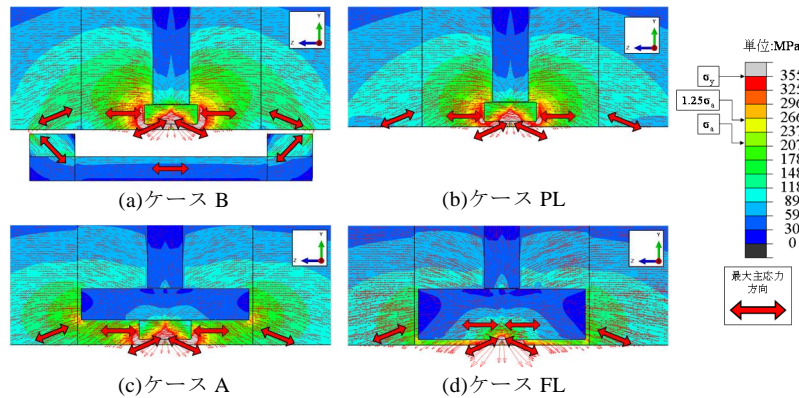


図-7 ステップIV:最大主応力方向

表-4 試験ステップ

ステップ	桁の状態	荷重条件 (下フランジに作用する応力)	試験機載荷荷重
1	既設の状態(取替え前)	死+活荷重相当($0.75 \sigma_a$)	1,368kN
2			
3	バイパス部材設置位置のモーメントプレートを撤去した状態	死荷重相当($0.5 \times 0.75 \sigma_a$)	684kN
4	バイパス部材を設置し, 下フランジ連結板を撤去した状態		
5	下フランジ連結板を復帰させ, バイパス部材を撤去した状態		
6	モーメントプレートを復帰させ, 取替え前と同じにした状態	死+活荷重相当($0.75 \sigma_a$)	1,368kN

表-3 各部材の呼称

種類	部材	呼称	
主桁	上フランジ	UFLG	
	ウェブ	WEB	
	下フランジ	LFLG	
連結板	上フランジ連結板(1枚)	UU	
	上フランジ連結板(2枚組)	UL	
	モーメントプレート(圧縮側)	UMPL	
	シアプレート	SPL	
	モーメントプレート(引張側)	L MPL	
	下フランジ連結板(2枚組)	LU	
	下フランジ連結板(1枚)	LL	
	バイパス部材	バイパス部材	bypass

表-5 荷重方法と試験ステップの関係

試験ステップ	作業内容	荷重(kN)	荷重状況	制御方法	連結板, バイパス部材の有無(有:○, 無:×)			
					LMPL	bypass	LU, LL	UU, UL, UMPL, SPL
1	① 0kN→500kNに載荷(試験開始)	500	載荷	荷重制御	○	×	○	
	② 500kN→1000kNに載荷	1000						
	③ 1000kN→1368kNに載荷	1368						
2	④ 1368kN→684kNに除荷	684	除荷	ホルド	×	○	×	○
	⑤ 引張側のモーメントプレート撤去							
3	⑥ バイパス部材設置	684	ホルド	変位制御	×	○	×	○
	⑦ 下フランジ連結板撤去							
4	⑧ 下フランジ連結板復帰	684	ホルド	変位制御	×	○	×	○
	⑨ バイパス部材撤去							
5	⑩ 引張側のモーメントプレート復帰	684	載荷	荷重制御	○	×	○	
	⑪ 684kN→1368kNに載荷							
6	⑫ 1368→0kNに除荷	0	除荷					

時の照査を行った。その後, 理論計算とFEM解析によりバイパス部材の設計と下フランジ連結板撤去時の照査を行った。

3.2 計測項目

変位計測位置を図-8に, ウェブのひずみ計測位置を図-9に示す。ひずみについては, 主桁一般部から, 継手部の応力性状の変化を確認するために, 可動支承側の遊間部, ウェブボルト内側から1行目の純断面(連結部), 荷重点と支間中央の中間付近の断面(一般部), 引張側モーメントプレート, バイパス部材と下フランジの間のクリアランス(ウェブクリアランス)を計測した。変位については, 主桁の鉛直変位, 上下フランジの遊間離間量を計測した。

3.3 試験ステップと荷重方法

連結板取替え施工を模擬した試験ステップを表-4に, 載荷時の荷重-変位関係のイメージと試験ステップとの関係を表-5に示す。載荷方法は, ステップ1, 2, 6は荷重制御で行い, 部材の撤去, 設置を行うステップ3~5は変位制御で純曲げ載荷を行った。

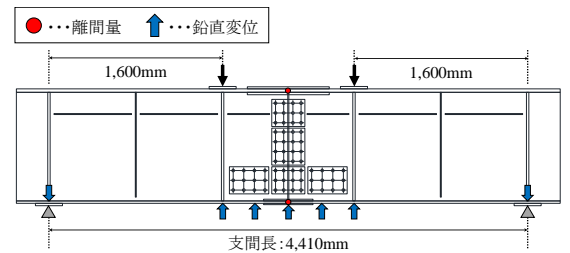


図-8 変位計測位置

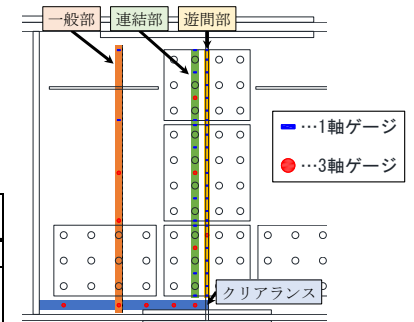


図-9 ウェブのひずみ計測位置

3.4 試験結果

(1) 鉛直変位と上下フランジの遊間離間量

ステップと鉛直変位，上下フランジの遊間離間量の関係を図-10，図-11にそれぞれ示す。部材の設置，撤去の作業を行うステップ3~6について，鉛直変位，離間量ともにステップ3では，大きな増加はなかったが，ステップ4で増加した。ステップ5では大きな増減なく，ステップ6で増加した。以上より，鉛直変位と下フランジの遊間の離間量の増加に対して，引張側モーメントプレートの撤去は大きく影響せず，下フランジ連結板撤去時が最もクリティカルとなる。

(2) ウェブの応力性状

ウェブの橋軸方向応力分布を図-12に示す。全ステップを通して一般部，連結部，遊間部断面の主桁，既設連結板に許容応力度 σ_a を超える応力は確認されなかった。また，部材の撤去，設置を行うステップ3以降で最も大きな応力が生じるのは遊間部であった。

ウェブクリアランスのミーゼス応力分布を図-13に示す。ステップ4で，唯一 c-2 の位置で，ミーゼス応力が σ_a を超えたが，許容応力度 σ_a に施工時荷重に対する割増係数 1.25 を考慮した $1.25 \sigma_a (=175\text{MPa})$ は超えなかった。なお，ステップ 1,6 の c-3 の位置で $1.25 \sigma_a$ を超えたが局所的なものであると考えられる。

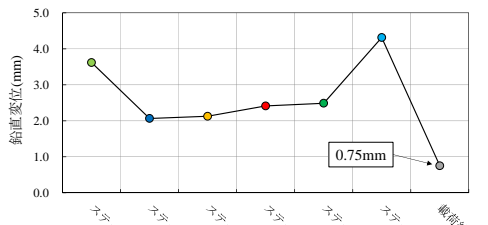


図-10 支間中央の鉛直変位

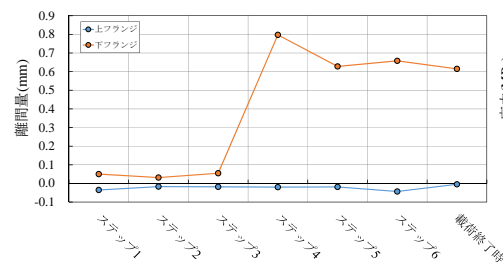
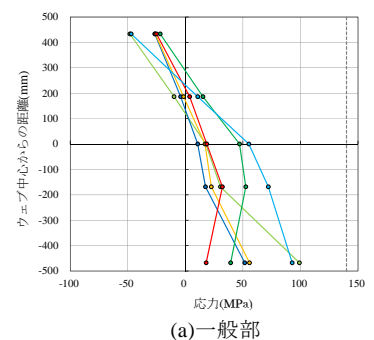
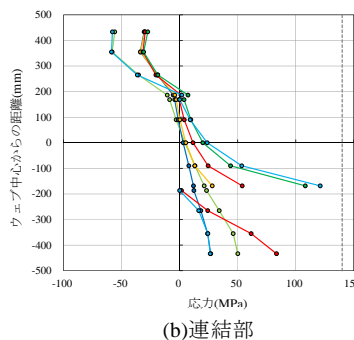


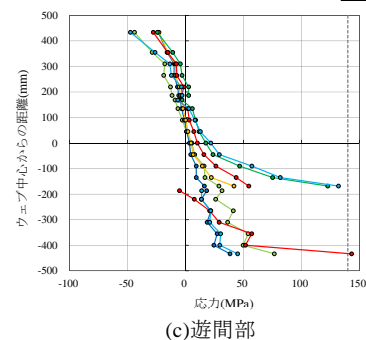
図-11 上下フランジの遊間離間量



(a)一般部



(b)連結部



(c)遊間部

図-12 ウェブの橋軸方向応力分布

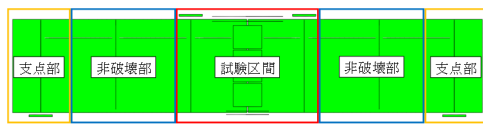


図-14 解析モデル

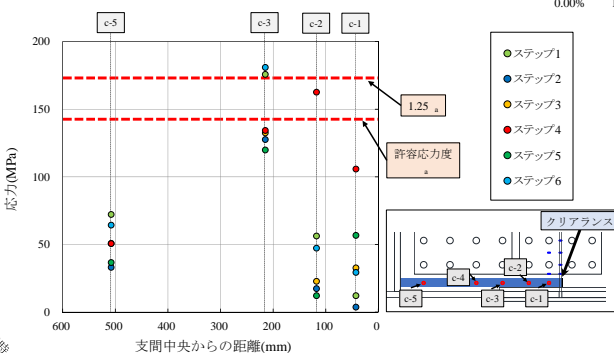


図-13 ウェブクリアランスのミーゼス応力分布

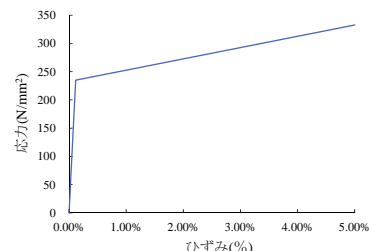


図-15 解析に用いた
応力-ひずみ関係

表-6 材料定数

材料	SS400
ヤング率 E (N/mm^2)	200,000
ポアソン比	0.3
降伏点 σ_y (N/mm^2)	235
許容応力度 σ_a (N/mm^2)	140

4.2 解析結果

ステップ4のcase2の最大主応力線図と計測値とcase2の下フランジ連結板取替え前後と下フランジ連結板撤去時(ステップ1,4,6)のウェブクリアランスの最大主応力の値とその方向を図-17に示す。最もクリティカルになると考えられるc-2の位置で下フランジ連結板撤去時と下フランジ連結板取替え前後の最大主応力の方向と値は計測値と解析値でほとんど一致した。

ステップ4のc-2における橋軸方向応力とミーゼス応力を図-18に、ウェブ遊間部の橋軸方向応力分布を図-19に示す。図-18よりステップ4の計測値のミーゼス応力は、理論値の橋軸方向応力の約3.1倍であった。図-19より計測値と解析値でステップ4のウェブ遊間部の橋軸方向応力の分布形状は同様な傾向を示し、case2の方が簡易にモデル化したcase1に比べて試験結果とよく整合した。

5. 鋼I桁下フランジ連結板取替えに適用する

ウェブバイパス工法の設計方法の提案

5.1 FEM解析の概要

解析モデル、解析条件は、4章と同様とした。

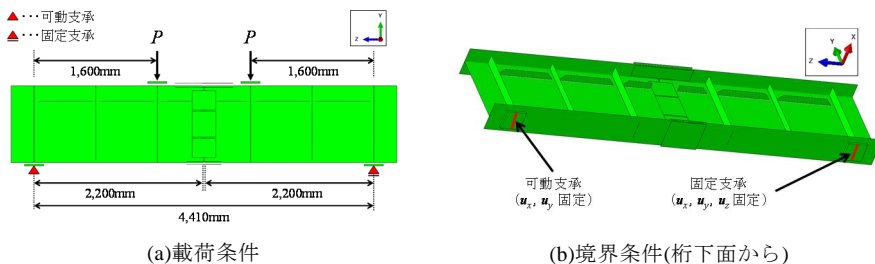


図-16 荷重条件および境界条件

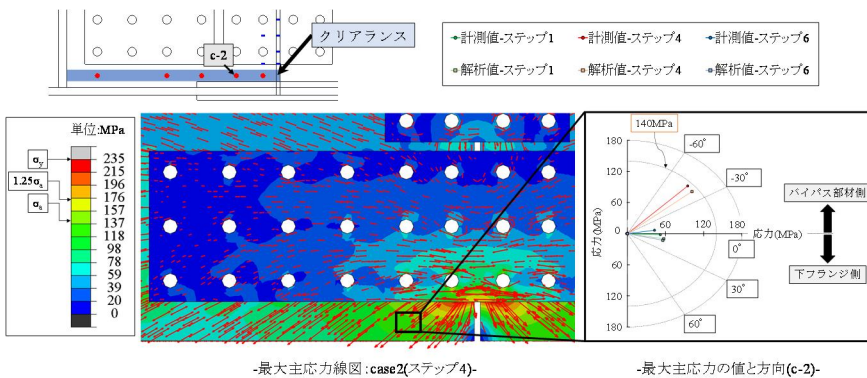


図-17 最大主応力線図：case2(ステップ4)

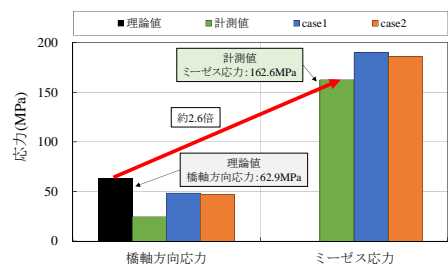


図-18 ウェブクリアランスのミーゼス応力分布(ステップ4)

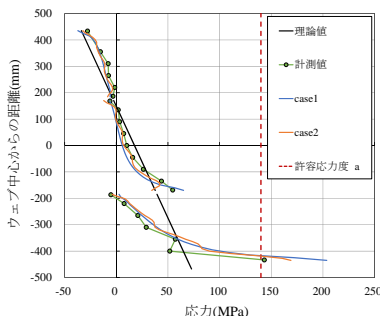


図-19 ウェブ遊間部の橋軸方向応力分布(ステップ4)

解析ケースを表-9に示す。originalは下フランジ連結板取替え試験の再現解析である。originalを基準とし、uft64~fw470-lft32-wt9は鋼I桁の断面形状を、bt11~bt66はバイパス部材の板厚を調整し下フランジ連結板撤去時の断面二次モーメントをそれぞれパラメータとした。なお、全ケースにおいて、試験と同様に、死荷重載荷時に許容応力度 σ_a の75%が、死+活荷重載荷時にはその半分の応力(0.5×0.75×許容応力度 σ_a)が下フランジに作用するように載荷荷重を調整した。

5.2 解析結果

図-20にウェブクリアランスのミーゼス応力の分布を、ミーゼス応力の最大値が生じた位置の最大主応力角度を図-21に示す。図-20よりミーゼス応力の最大値は全ケースで、支間中央からの距離が0~152.5mmの範囲、すなわち連結部断面内で確認されたことから、下フランジ連結板撤去時のウェブクリアランスの応力照査は、連結部断面で行う必要があると考えられる。また、図-21からわかるように、角度の大きさは、全ケースでほぼ同じ大きさとなった。

表-7 荷重条件(4章)

荷重	死荷重	死+活荷重
作用曲げモーメント M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	1.09×10^3	5.47×10^3
集中荷重 P (kN)	342	684

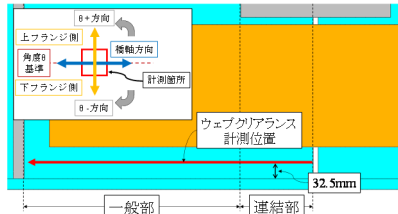
表-8 解析ケース(4章)

解析ケース	ボルト孔のモデル化	ボルト孔のピッチ	連結板、バイパス部材の結合範囲
case1	無	無	接合面全体
case2	有	試験と同様	有効な材間圧縮力の範囲を考慮

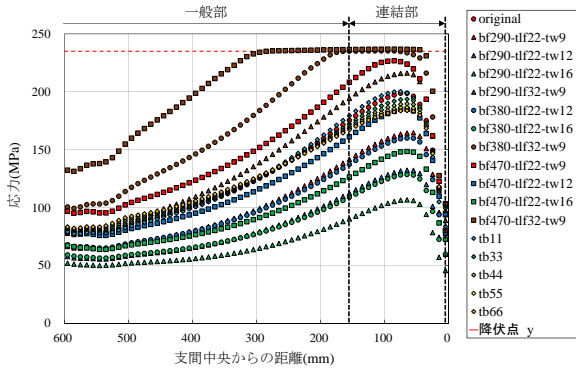
表-9 解析ケース(5章)

解析ケース	t_w mm	t_{bw} mm	t_b mm	t_{tw} mm	t_{ts} mm	σ_a	σ_a	P_D kN	P_{DL} kN	
original	32	1,000				22	0.65	0.54	342	684
uft64	64					22	0.66	0.53	366	732
hw1310		1,310	380	9	18	0.65	0.56	469	938	
hw810		810	22	27	27	0.66	0.53	270	539	
bf290-lft22-tw9					12	0.65	0.55	274	549	
bf290-lft22-tw12					16	0.65	0.57	293	586	
bf290-lft22-tw16					16	0.65	0.60	317	633	
bf290-lft32-tw9				32	9	0.64	0.51	362	724	
bf380-lft22-tw12				22	12	0.65	0.55	361	722	
bf380-lft22-tw16				380	16	0.65	0.57	385	771	
bf380-lft32-tw9				32	9	0.65	0.49	460	919	
bf470-lft22-tw9		1,000			9	0.65	0.52	410	819	
bf470-lft22-tw12				470	12	0.65	0.54	429	857	
bf470-lft22-tw16					16	0.65	0.56	454	907	
bf470-lft32-tw9					32	0.65	0.47	557	1,114	
bt11					11	0.45	0.41			
bt33					33	0.79	0.64			
bt44					44	0.91	0.72	342	684	
bt55					55	1.00	0.80			
bt66					66	1.07	0.86			

記号	単位	説明
t_w	mm	上フランジ板厚
t_{bw}	mm	ウェブ高
t_b	mm	上下フランジ板幅
t_{tw}	mm	下フランジ板厚
t_b	mm	ウェブ板厚
t_{tw}	mm	バイパス部材板厚
I_{step1}	mm^4	ステップ1:遊間部の断面二次モーメント
I_{step4}	mm^4	ステップ4:連結部の断面二次モーメント
I_{step1}	mm^4	ステップ1:遊間部の断面二次モーメント
I_{step4}	mm^4	ステップ4:連結部の断面二次モーメント
σ_a		I_{step4} / I_{step1}
σ_a		I_{step4} / I_{step1}
P	kN	載荷荷重
P_D	kN	死荷重載荷時の載荷荷重P
P_{DL}	kN	死+活荷重載荷時の載荷荷重P



(a)計測位置



(b)ミーゼス応力分布

図-20 ステップ4：ウェブクリアランスのミーゼス応力分布

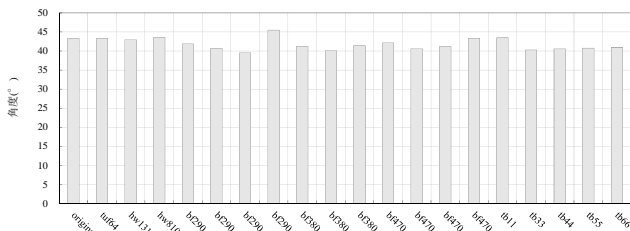


図-21 ステップ4：ウェブクリアランスのミーゼス応力最大値発生位置の最大主応力角度

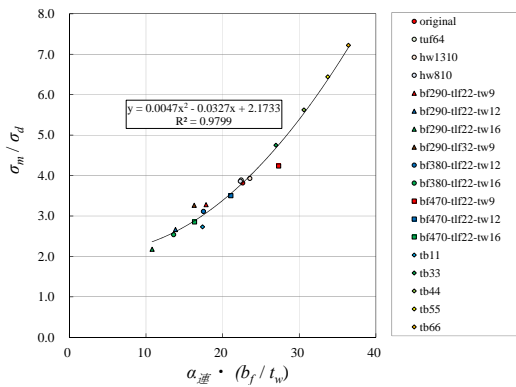


図-22 $\alpha_{\text{連}} \cdot (b_f / t_w)$ と σ_m / σ_d の関係

5.3 ウェブクリアランスの応力照査式

$\alpha_{\text{連}}$, b_f , t_w と図-20におけるウェブクリアランスのミーゼス応力の最大値 σ_m , σ_m 発生位置のステップ4の橋軸方向応力の理論値 σ_d の関係を図-22に示す。図-22より $\alpha_{\text{連}} \cdot (b_f / t_w)$ と σ_m / σ_d は、比例の関係にあり、 σ_m / σ_d は、鋼I桁の断面形状に依存する値である b_f / t_w とステップ4の連結部の断面剛性に依存する値である $\alpha_{\text{連}}$ によって決まると考えられる。

以上より、下フランジ連結板撤去時の合成応力を考慮したウェブクリアランスの応力照査式として式(1)を提案する。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_d} = 0.0047 \times \left(\alpha_{\text{連}} \times \frac{b_f}{t_w} \right)^2 - 0.0327 \times \left(\alpha_{\text{連}} \times \frac{b_f}{t_w} \right) + 2.2$$

$$\Leftrightarrow \sigma_m = \{ 0.0047 \times a^2 - 0.0327 \times a + 2.2 \} \times \sigma_d < 1.25 \sigma_a \quad (1)$$

ここに、

σ_m (MPa): ウェブクリアランスのミーゼス応力最大値

σ_d (MPa): ウェブクリアランスの応力(理論値)

$I_{\text{連step1}}$ (mm⁴): ステップ1の遊間部断面二次モーメント

$I_{\text{連step4}}$ (mm⁴): ステップ4の遊間部断面二次モーメント

$\alpha_{\text{連}}$: $I_{\text{連step4}} / I_{\text{連step1}}$

b_f (mm): 下フランジ板幅

t_w (mm): ウェブ板厚

σ_a (MPa): 許容応力度

$$a: \alpha_{\text{連}} \times \frac{b_f}{t_w}$$

6. まとめ

本研究では、鋼I桁継手部の下フランジ連結板の取替えに適用するウェブバイパス工法の優位性および設計方法について検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 下フランジ連結板撤去時における主な応力伝達経路は、下フランジ近傍のウェブであり、ウェブにバイパス部材を設置することは効果的である。
- 2) 下フランジ連結板を撤去した際のウェブの応力は、下フランジからウェブの応力伝達経路となるウェブクリアランスで最大主応力方向が変化し、設計計算で用いる橋軸方向の応力では評価できない。
- 3) 鋼I桁下フランジ連結板取替えに適用するウェブバイパス工法について設計する場合、下フランジ連結板撤去時のウェブクリアランスの応力照査が最も重要と考えられ、単軸応力(橋軸方向応力)だけではなく合成応力を考慮する必要がある。
- 4) ウェブバイパス工法に用いるバイパス部材を設計する場合、下フランジ連結板撤去時のウェブクリアランスの応力照査が最も重要である。照査には、簡略化のため、連結部断面の理論値の応力に鋼I桁の断面形状に依存する下フランジ板幅をウェブ板厚で除した値と、ステップ1に対するステップ4の連結部の断面二次モーメントの割合を乗じた値で照査することを提案する。

<参考文献>

- 1) 河野紀利, 中村一平, 藤井康男: 補助部材を用いたバイパス工法による鋼I桁主桁補修, 阪神高速道路公団技報大7号, 1987.3
- 2) 川村弘昌, 竹内正一, 鮫島力, 西谷朋晃: バイパス工法による連結板取替え手法, 鋼構造年次論文報告集, Vol.24, pp384-490, 2016.11
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説書II鋼橋編, 2012.3