

鋼桁橋の主桁-横桁取合い部の疲労に関する解析的検討

A Study on Fatigue Failure at The Web Penetration in Plate Girder Bridges

鈴木博之*, 関 惟忠**, 西岡敬治***, 岩崎雅紀****, 羽子岡爾朗*****

Hiroyuki SUZUKI, Koretada SEKI, Takaharu NISHIOKA, Masanori IWASAKI and Jirou Haneoka

*工博 福井工業大学講師 工学部建設工学科(〒910 福井市学園3-6-1)

** 阪神高速道路公団課長 保全施設部(〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

*** 阪神高速道路公団係長 保全施設部(〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

**** (株)横河ブリッジ課長 技術本部研究所(〒261 千葉市美浜区新港88番)

***** (株)横河メンテック課長 工務部(〒550 大阪市西区西本町1-3-15)

Stress analyses are carried out in this paper in order to obtain stresses of the direction of main girders and cross beams on a web penetration when a T-20 load was applied to composite girder bridges with 5 main girders. These stresses are compared with the stresses measured in existing bridges in service condition. A method to calculate easily stresses of the direction of main girders and cross beams on the web penetration is shown. In addition, assuming that bridges will be strengthened by attaching an additional member with T-section to a lower flange of main girders to protect against fatigue failure on the web penetration, the effect of the strengthening is examined.

Key Words: Fatigue, Plate Girder Bridge, Web Penetration.

1. まえがき

プレートガーダー橋の主桁と荷重分配横桁(以下、横桁という)の取合い部のディテールの一つに横桁フランジが主桁ウェブを貫通している構造がある。この構造の主桁ウェブ側溶接止端部に疲労亀裂の発生の可能性が指摘されている¹⁾。また、アメリカでもこれと類似の構造に疲労亀裂が発見されている²⁾。アメリカにおける構造は主桁の下フランジが箱断面を有する橋脚の横梁のスロットホールを通してウェブを貫通し、主桁と橋脚が一体となった構造で、ウェブ貫通と呼ばれ、亀裂はフランジとウェブを継ぐグルーブ溶接から発生していたと報告されている。

わが国におけるウェブ貫通部に関する研究には坂野らの研究がある^{3, 4)}。文献3)では、主桁応力が作用する3次元モデルを用いた疲労亀裂進展解析により、フランジ貫通型の床組連結部の疲労強度特性について検討している。文献4)では、鉄道橋で用いられるフランジ貫通型床組連結部を対象とした疲労試験を行い、疲労強度特性を検討している。

ところで、ウェブ貫通部は主桁と荷重分配横桁の取合い部であるから、主桁作用による応力ばかりでなく、荷重分配作用による横桁の応力も作用しており、複雑な応

力状態となっている。このような2軸応力状態を再現した実験は困難であり、文献4)においても実験は1軸応力状態で行われている。また、解析上も荷重は主桁ウェブだけに作用させている。しかしながら、上述のようにウェブ貫通部の疲労亀裂の発生、進展には主桁作用による応力ばかりでなく、横桁の応力も関与しているものと考えられる。

本研究では、道路橋合成桁橋を対象にT荷重1台が作用したときのウェブ貫通部の主桁腹板応力と横桁下フランジ応力を解析的に求め、ウェブ貫通部の応力状態を明らかにする。また、ウェブ貫通部の主桁腹板ならびに横桁下フランジに生じている応力を簡便に推定する方法を考察する。さらに、この部位の疲労損傷に対処するため部材を取り付け、補強した場合を想定し、その効果についても検討する。

2. 解析方法

解析は梁要素を用いた格子解析とシェル要素を用いた立体解析の2段階に分けて実施した。解析対象橋梁は阪神高速道路公団と首都高速道路公団の標準図に示される5本主桁の合成桁橋である^{5, 6)}。解析にはCOSMOS/Mを使用した⁷⁾。

解析ケースを表-1に示す。阪神高速道路の橋梁の支間は25m, 30m, 35m, 首都高速道路の橋梁の支間は25m, 30m, 35m, 40mである。首都高速道路の支間30mの橋梁には、ウェブ高さ $h=1,300\text{mm}$, $1,500\text{mm}$, $1,700\text{mm}$ の3橋がある。また、阪神高速道路の橋梁に関しては補強を想定した場合についても解析した。

解析に用いる荷重は既往の実測データとの比較のためT-20とした。なお、解析においては衝撃は考慮していない。

表-1 解析ケース (○:解析実施)

	支間 (m)	腹板高 (m)	主桁 間隔 (m)	載荷 車線	格子 解析	立体 解析
阪神高速	25	1.4	3.85	走行	○	○
				追越	○	○
	30	1.7	3.85	走行	○	○
				追越	○	○
	35	1.9	3.85	走行	○	○
				追越	○	○
首都高速	25	1.5	3.50	走行	○	○
				追越	○	○
	30	1.3	3.50	走行	○	○
				追越	○	○
		1.5	3.50	走行	○	○
				追越	○	○
	35	1.9	3.50	走行	○	○
				追越	○	○
	40	2.1	3.50	走行	○	○
				追越	○	○
阪神高速 (補強後)	25	1.4	3.85	走行	○	○
	30	1.7	3.85	追越	○	○
	35	1.9	3.85	追越	○	○

2. 1 格子解析

格子解析における荷重はすべて主桁-横桁および主桁-対傾構の格点に作用するものとし、格点荷重の大きさはすべて1-0分配法により求めた。荷重は、橋軸直角方向には幅員構成を考慮して追越車線、走行車線それぞれに載荷し、橋軸方向には支間中央に最大曲げモーメントが生じるように載荷した。橋軸直角方向の反力の影響線として阪神高速道路の標準桁の例を図-1に、橋軸方向の影響線として阪神高速道路の支間25mの標準桁の例を図-2に示す。走行車線載荷の場合の荷重載荷位置を図-3に示す。図中のGA, GB, GCは主桁を表し、1, 7は端対傾構、2, 3, 5, 6は中間対傾構、4は横桁を表している。表-2に阪神高速道路の25mの走行車線載荷ならびに追越車線載荷の場合の格点荷重を例示する。

各部材の断面定数を求めるにあたって特に留意した点は以下のとおりである。主桁に関する床版の有効幅は道路橋示方書に従った⁹⁾。横桁と床版には主桁と床版のような合成作用がないので、これらは重ね梁とした。このときの床版の有効幅は格間長とした。対傾構と床版についても、横桁と床版同様、重ね梁とし、床版の有効幅は格間長とした。なお、対傾構の曲げ剛性は文献⁸⁾に与えられている対傾構換算曲げ剛性式を用いて求めた。また、阪神高速道路の橋梁の床版下面には板厚4.5mmの鋼板が接着されているものとし、断面定数を求めるときに合成構造として取り扱うことによって、これを考慮した。一方、首都高速道路の橋梁では鋼板接着が施されていないものとした。阪神高速道路の支間25mの橋梁の断面定数を例として表-3に示す。

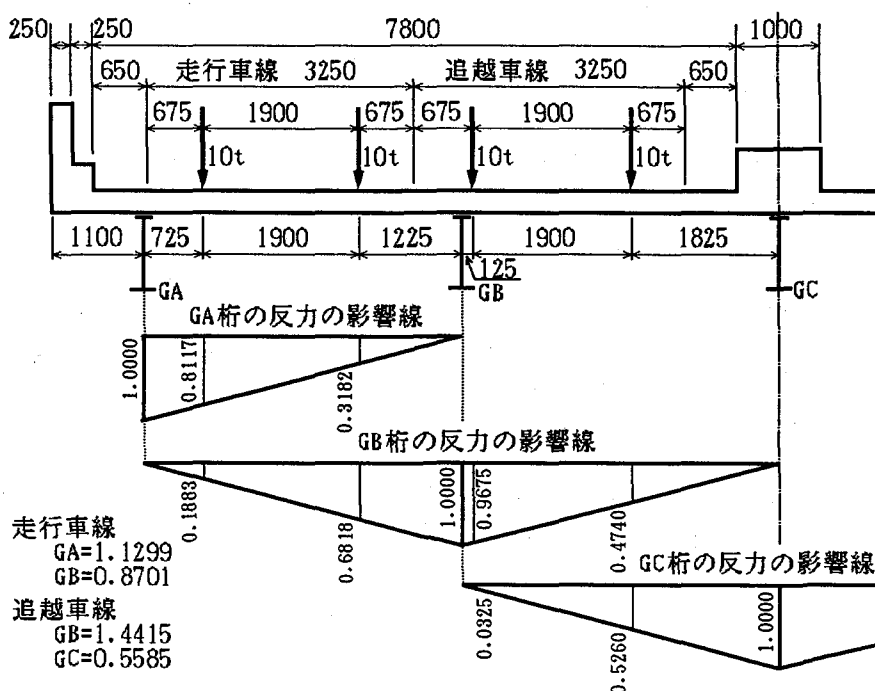


図-1 橋軸直角方向の反力の影響線 (阪神高速道路)

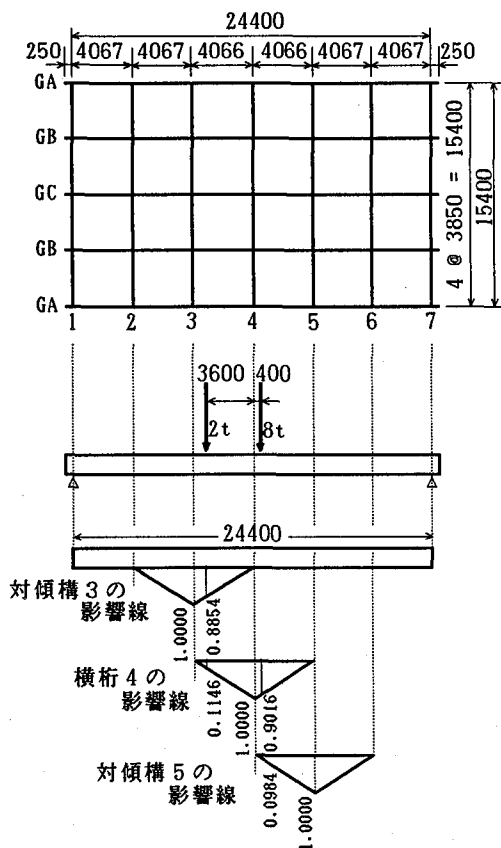


図-2 橋軸方向の影響線(阪神高速道路, 支間2.5m)

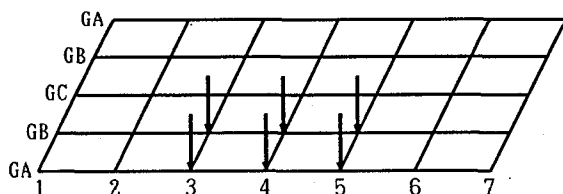


図-3 荷重載荷位置

表-2 格点荷重 (t)

載荷位置	対傾構 主桁	格点荷重 (t)		
		3	4	5
走行車線	GA	2.00	8.41	0.89
	GB	1.54	6.48	0.68
追越車線	GB	2.55	10.73	1.13
	GC	0.99	4.16	0.44

表-3 断面定数

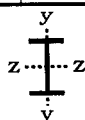
		A (cm ²) (X10 ³)	I _y (cm ⁴) (X10 ⁷)	I _z (cm ⁴) (X10 ⁶)	J (cm ⁴) (X10 ⁵)
主桁	GA	1.20	0.75	3.65	0.82
	GB	1.44	1.30	4.13	1.04
	GC	1.46	1.37	4.47	1.06
対傾構	端	0.72	0.85	0.07	0.57
	中間	1.23	1.69	0.11	1.13
横桁		1.41	1.69	0.38	1.13

A: 断面積

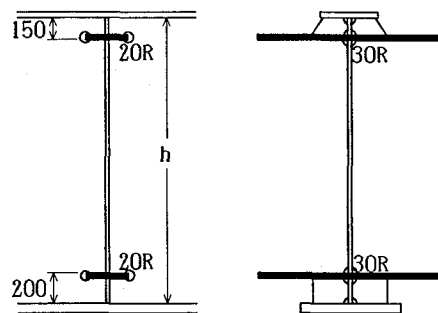
I_y: y軸回りの断面2次モーメント

I_z: z軸回りの断面2次モーメント

J: ねじり定数

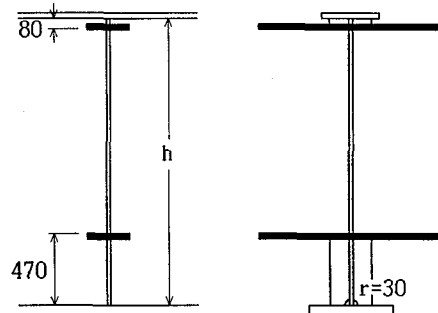


スパン	h
25m	1400mm
30m	1700mm
35m	1900mm



阪神高速道路

スパン	h
25m	1500mm
30m	1300mm
30m	1500mm
30m	1700mm
35m	1900mm
40m	2100mm



首都高速道路

図-4 解析対象部の構造

表-4 主桁, 横桁断面

	支間 (m)	桁	U. Flg 幅×厚 (mm)(mm)	Web 幅×厚 (mm)(mm)	L. Flg 幅×厚 (mm)(mm)
阪神高速	25	主桁	250×20	1,400×9	430×32
		横桁	280×16	1,050×9	280×16
	30	主桁	300×22	1,700×9	500×32
		横桁	290×19	1,350×9	290×19
	35	主桁	350×25	1,900×9	610×32
		横桁	300×20	1,550×10	300×20
首都高速	25	主桁	260×16	1,500×9	410×27
		横桁	300×18	950×9	300×18
	35	主桁	370×22	1,900×9	530×32
		横桁	280×16	1,350×9	280×16
	40	主桁	410×25	2,100×10	550×36
		横桁	260×14	1,550×9	260×14

2. 2 立体解析

解析対象部はGB桁と横桁の取合い部である。解析対象部の構造を図-4に、部材寸法を表-4に示す。阪神高速道路の橋梁ではウェブ貫通部の主桁には20Rのスカールップが設けられているが、首都高速道路の橋梁にはスカールップが設けられていない。解析モデルの一例として阪神高速道路の橋梁の場合を図-5に示す。図に示すようにウェブ貫通部の主桁に設けられたスカールップは多角形で近似した。スカールップに隣接する有限要素が解析モデルにおける最小サイズの要素であり、15mm×30mmの四角形要素である。

立体解析においては作用荷重は変位で与えることにし、格子解析から得られた断面力を用いて計算される上下

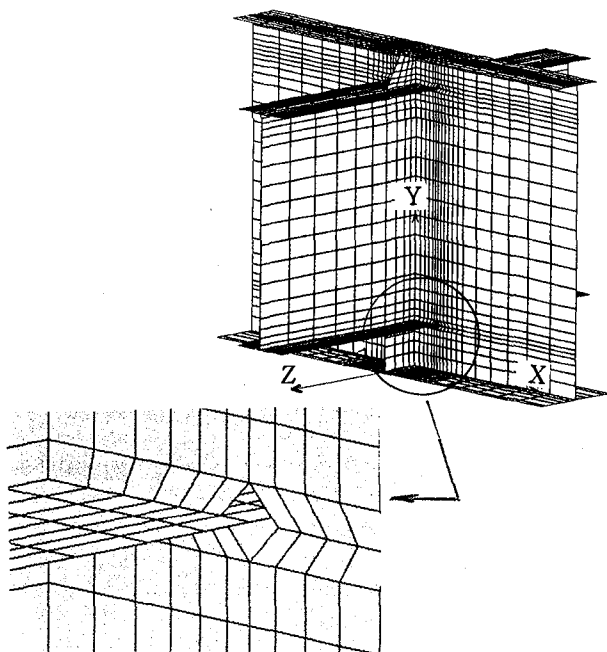


図-5 解析モデル

ランジ縁応力と等しい応力が生じるように変位量を決定した。図-5においてX, Y, Z軸方向変位を U_x , U_y , U_z とし、X, Y, Z軸回りの回転を R_x , R_y , R_z とすると、主桁端面には U_x , U_z , R_x , R_y に強制変位を与え、横桁端面には U_x , U_z , R_y , R_z に強制変位を与えた。

3. 解析結果および考察

3.1 現橋

(1) 格子解析

走行車線載荷および追越車線載荷したときのGB桁のウェブ貫通部における主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の関係を図-6, 7に示す。いずれの載荷状態においても主桁腹板には $70 \text{ kgf/cm}^2 \sim 120 \text{ kgf/cm}^2$ の引張応力が生じている。一方、横桁下フランジ応力は走行車線載荷の場合には最大で 35 kgf/cm^2 程度の圧縮応力が生じているのに対して、追越車線載荷の場合には $110 \text{ kgf/cm}^2 \sim 160 \text{ kgf/cm}^2$ の引張応力が発生している。したがって、走行車線を自動車が通行する場合のGB桁のウェブ貫通部は1軸応力状態とみなして良いようであり、追越車線を通行する場合のウェブ貫通部は主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の2軸応力状態になっていることがわかる。

ウェブ貫通部の応力は、当然のことながら、主桁剛度および横桁剛度に左右されるものと考えられるため、横桁剛度と主桁剛度の比と、走行車線載荷および追越車線載荷したときのGB桁のウェブ貫通部における主桁腹板応力の関係を調査した。結果を図-8, 9に示す。図の横軸は横桁の断面2次モーメントを主桁間隔で除したものの $(I/L)_{CB}$ と主桁の断面2次モーメントを支間長で除し

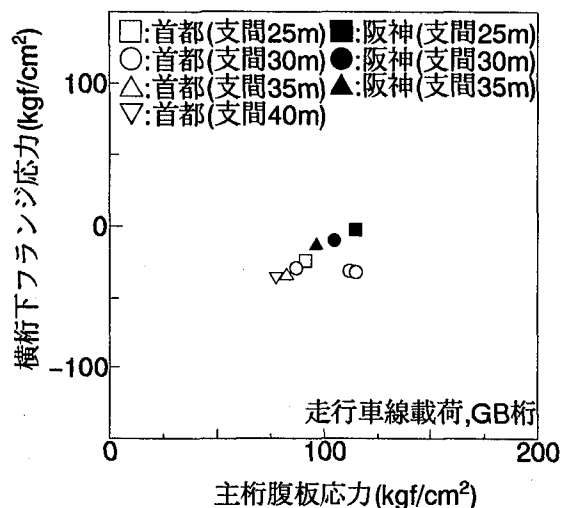


図-6 ウェブ貫通部の主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の関係

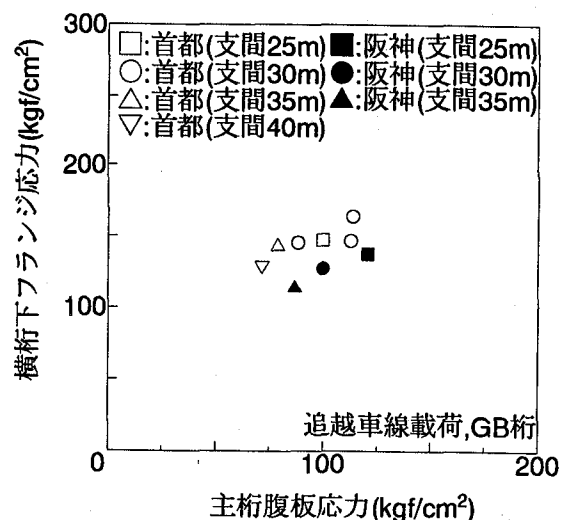


図-7 ウェブ貫通部の主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の関係

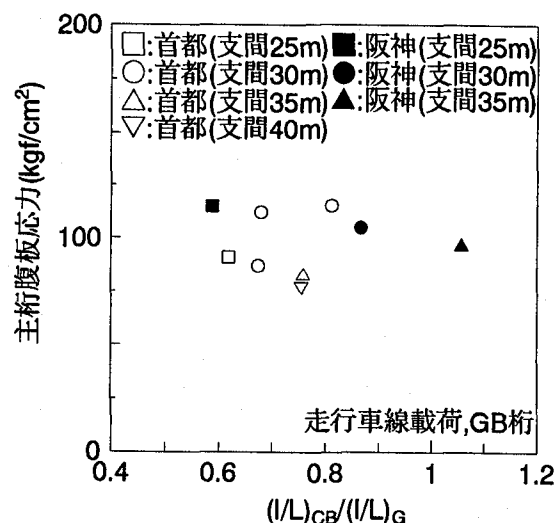


図-8 桁剛度比とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

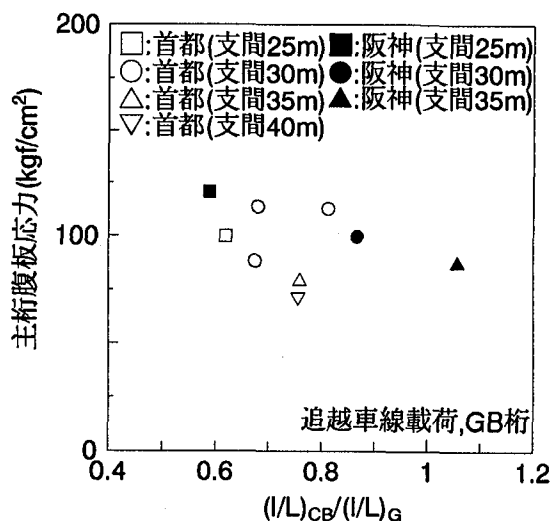


図-9 桁剛度比とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

たもの $(I/L)_G$ の比である。走行車線載荷、追越車線載荷ともに桁剛度比が大きくなるにつれてウェブ貫通部の主桁腹板応力が低下する傾向が見られる。また、支間が短いほど桁剛度比は小さくなり、ウェブ貫通部の主桁腹板応力が大きくなっている。支間が短いほど桁剛度比が小さくなるのは、今回の解析対象橋梁の主桁、横桁の断面2次モーメントの比に大きな違いがなかったことと、主桁間隔が支間によらず3.85m(阪神高速道路)と3.5m(首都高速道路)で一定であったためである。

横桁剛度と主桁剛度の比と、走行車線載荷および追越車線載荷したときのGB桁のウェブ貫通部における横桁下フランジ応力の関係を図-10, 11に示す。図-10より、走行車線載荷の場合、桁剛度比によらず、ウェブ貫通部の横桁下フランジ応力は、阪神高速道路の橋梁で10kgf/cm²程度の圧縮応力、首都高速道路の橋梁で35kgf/cm²程度の圧縮応力でほぼ一定であることがわかる。一方、図-11より、追越車線載荷の場合、桁剛度比が増加するにつれてウェブ貫通部の横桁下フランジ応力は減少することがわかる。

(2) 立体解析

立体解析は、阪神高速道路の橋梁に対しては走行車線載荷、追越車線載荷の両方の場合について行い、首都高速道路の橋梁に対してはウェブ貫通部が2軸応力状態となる追越車線載荷の場合についてのみ行った。

主桁下フランジの公称応力と立体解析で得られたウェブ貫通部における主桁腹板応力の関係を図-12に示す。図には部材軸(橋軸)方向応力と最大主応力がプロットされている。また、図中の線は回帰線である。以下の図においても必要に応じて回帰線を示した。さらに、図-12には文献1)の実測値も示した。実測値は実交通下における測定値であるにもかかわらず、解析値と比較的良好な対応を示していると言える。図-12の部材軸方向応力と最大主応力はウェブ貫通部近傍の主桁腹板の要素群における応力の最大値をプロットしたものである。首都

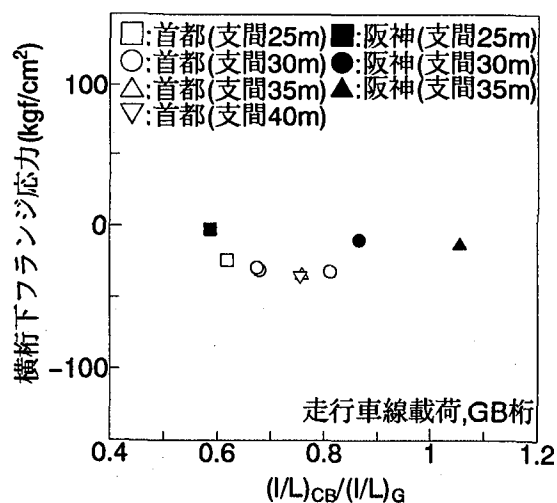


図-10 桁剛度比とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

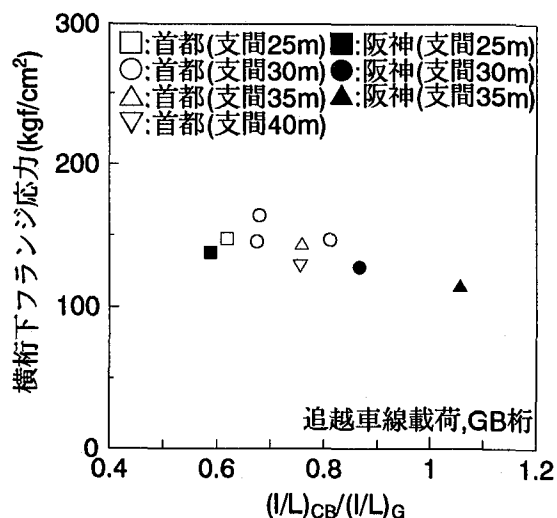


図-11 桁剛度比とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

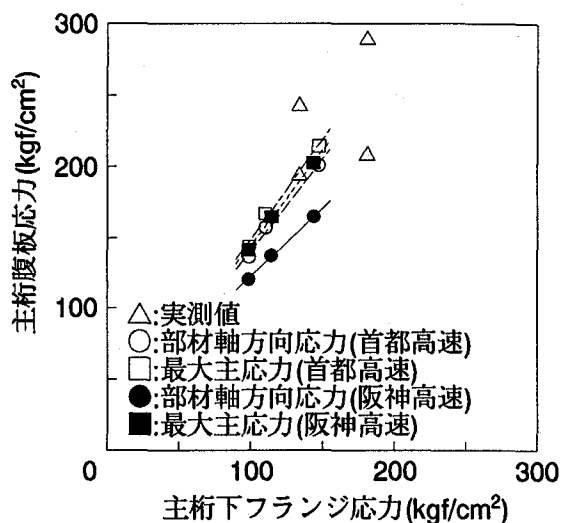


図-12 主桁下フランジの公称応力とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

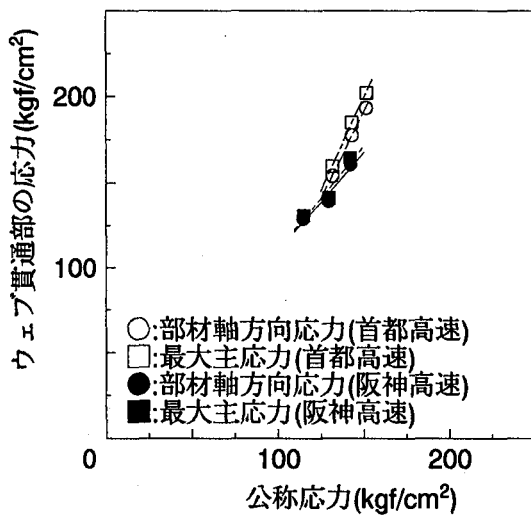


図-13 横桁下フランジの公称応力とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

高速道路の場合、部材軸方向応力が最大になる要素と最大主応力が最大になる要素は一致していたが、阪神高速道路の場合、いずれの解析ケースにおいても部材軸方向応力と最大主応力は同一の要素に生じていなかった。阪神高速道路の橋梁において部材軸方向応力と最大主応力が同一の要素に生じなかったのは主桁にスカーラップが設けられているためであると考えられる。

横桁下フランジの公称応力と立体解析で得られたウェブ貫通部における横桁下フランジ応力の関係を図-13に示す。図には部材軸(橋軸直角)方向応力と最大主応力をプロットした。阪神高速道路の橋梁においては主桁にスカーラップが設けられているため応力が軽減され、首都高速道路の橋梁よりウェブ貫通部の横桁下フランジ応力が全体的に低くなっている。なお、ウェブ貫通部の横桁下フランジ応力に関しては、阪神高速道路の場合も首都高速道路の場合も部材軸方向応力が最大になる要素と最大主応力が最大になる要素が一致していた。

ところで、図-12、13における主桁および横桁下フランジの公称応力とウェブ貫通部の応力には線形関係が認められたので、桁剛度比と、ウェブ貫通部の主桁腹板応力(あるいは横桁下フランジ応力)と主桁(あるいは横桁)下フランジの公称応力 $\sigma_{L.Flg}$ の比の関係を調査した。結果を図-14、15に示す。図中の σ_x は部材軸方向応力であり、 σ_1 は最大主応力である。図-14は、阪神高速道路の橋梁の場合、主桁下フランジの公称応力を1.2倍することによってウェブ貫通部の主桁腹板における軸方向応力が概ね推定できることを示しており、首都高速道路の橋梁の場合は同様に1.4倍であることを示している。また、ウェブ貫通部を最大主応力を用いて評価しようとするときには、阪神高速道路の橋梁の場合、主桁下フランジの公称応力を1.45倍することによってウェブ貫通部の主桁腹板における最大主応力が大略推定できることを示しており、首都高速道路の橋梁の場合は同様に1.5倍であることを示している。図-15

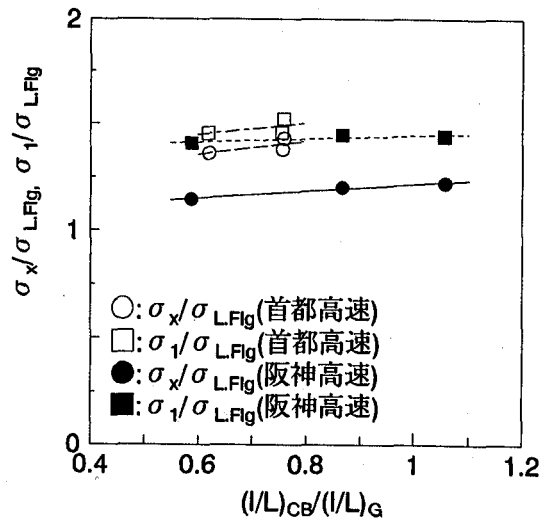


図-14 桁剛度比とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

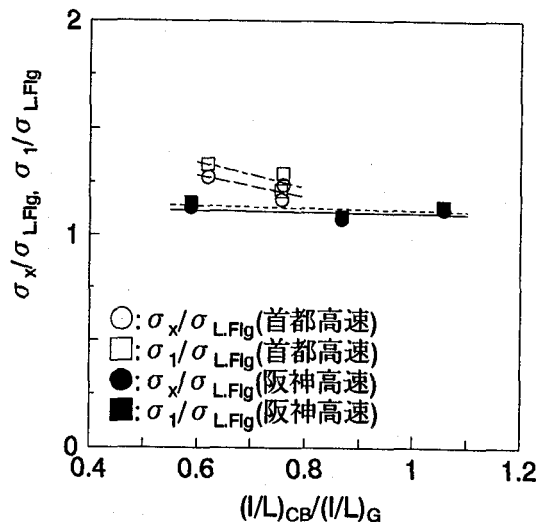


図-15 桁剛度比とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

から、ウェブ貫通部の横桁下フランジ応力は横桁下フランジの公称応力の1.1~1.3倍程度であることがわかる。

3.2 補強の効果

坂野らは鉄道橋において横桁フランジが主桁ウェブを貫通するディテールの疲労試験を行っており、このディテールの強度等級は鉄道構造物設計標準のFあるいはG等級であることを示している⁴⁾。鉄道構造物設計標準においては、F等級およびG等級の疲労限としての応力範囲をそれぞれ460 kgf/cm²、320 kgf/cm²と与えている¹⁰⁾。ところで、阪神高速道路の昭和54年~59年の重量違反車の取締りデータによると、車重の最大値は80.1 tとの報告がある。本解析結果に、このような過積載および衝撃の影響を考慮すると、460 kgf/cm²、320 kgf/cm²の疲労限を容易に越えるので、トラックの走行の繰返しによって、疲労亀裂が発生することが十分考えられる。そこで、これらの橋梁を補強した場合を想定し、その効果を検討した。

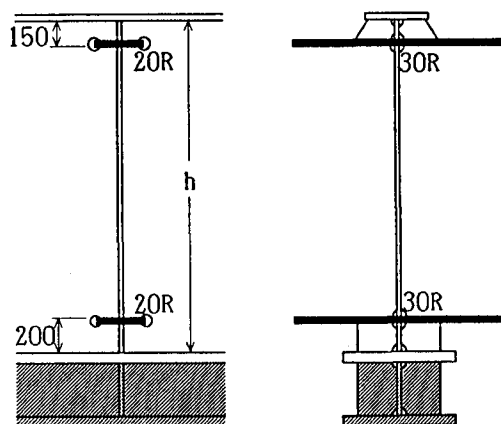


図-16 補強後の構造

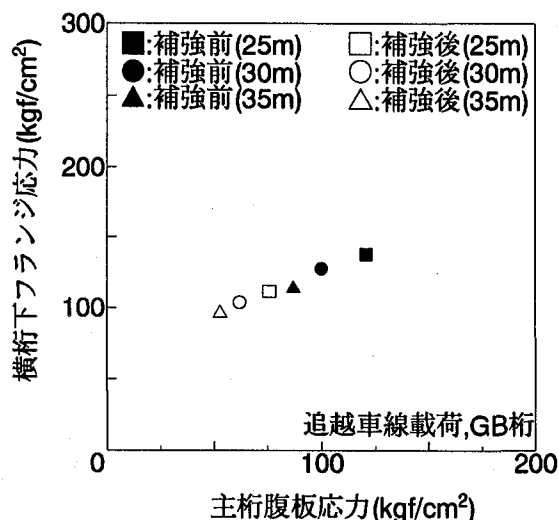


図-17 ウェブ貫通部の主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の関係

補強後の構造として、図-16に示すように、主桁下フランジにT形断面の部材を取り付けた場合を想定した。このT形部材のフランジ断面は主桁下フランジと同じとし、ウェブ高さは300mm、ウェブ厚は主桁ウェブと同一とした。リブプレートの板厚も現橋の板厚と同一とした。解析は阪神高速道路の場合の追越車線載荷についてのみ行った。

格子解析の結果得られたウェブ貫通部の主桁腹板応力と横桁下フランジ応力の関係を図-17に示す。ウェブ貫通部の主桁腹板応力は補強前の約60%に、横桁下フランジ応力は約80%に低下しており、補強の効果が現れていると言える。

シェル要素を用いた立体解析結果を図-18、19に示す。図-18より、ウェブ貫通部の主桁腹板応力は補強前に比べて半減していることがわかる。一方、図-19はウェブ貫通部の横桁下フランジ応力が補強前の80%程度に減少することを示している。本解析では、横桁は補強していないが、主桁を補強したことによって主桁がたわみにくくなり、それに伴って横桁下フランジ応力が減少したためである。

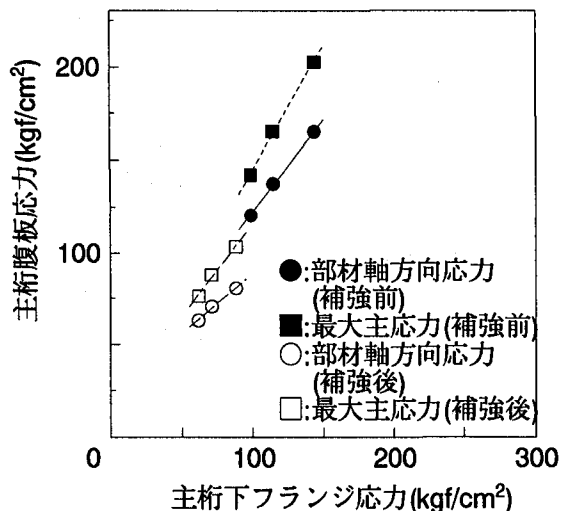


図-18 主桁下フランジの公称応力とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

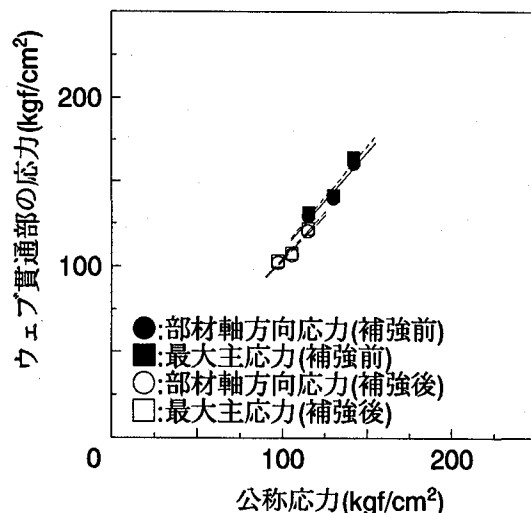


図-19 横桁下フランジの公称応力とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

次に、図-14、15と同じように、桁剛度比と、ウェブ貫通部の主桁腹板応力(あるいは横桁下フランジ応力)と主桁(あるいは横桁)下フランジの公称応力 $\sigma_{L.Flg}$ の比との関係を調査した。結果を図-20、21に示す。図中の σ_x は部材軸方向応力であり、 σ_1 は最大主応力である。図-20は、本稿で想定した補強を実施するとウェブ貫通部の主桁腹板における軸方向応力は主桁下フランジの公称応力に概ね等しくなることを示している。また、ウェブ貫通部を最大主応力を用いて評価しようとする、主桁下フランジの公称応力を1.25倍することによってウェブ貫通部の主桁腹板における最大主応力を大略推定できることを示している。これらを補強前と比較すると、 $\sigma_x/\sigma_{L.Flg}$ 、 $\sigma_1/\sigma_{L.Flg}$ の低下はそれほど大きくないが、これは、補強により主桁断面が増加し、 σ_x 、 σ_1 と比較している主桁下フランジの公称応力も減少したためである。図-21は補強によってウェブ貫通部の横桁下フランジの部材軸方向応力および最大主応力

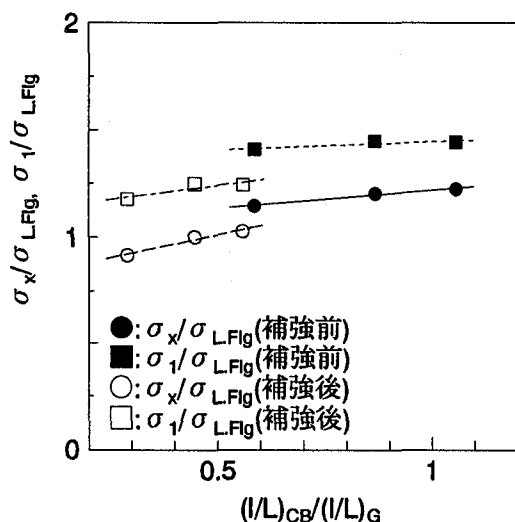


図-20 桁剛度比とウェブ貫通部の主桁腹板応力の関係

が横桁下フランジの公称応力の1.15倍から1.05倍程度に低下することを示している。

4. まとめ

本研究では、5本主桁のプレートガーダー橋を取り上げ、横桁フランジが主桁ウェブを貫通しているディテール(ウェブ貫通部)の応力状態を把握するため、および補強の効果を調査するため、数値解析を実施した。結果は以下の通りである。

(1) 格子解析

1)トラックが走行車線を通行する場合のウェブ貫通部は1軸応力状態に近く、追越車線を通行するには主桁作用による応力と荷重分配による横桁の応力の2軸応力状態になっていた。

2)走行車線載荷、追越車線載荷ともに桁剛度比が大きくなるにつれてウェブ貫通部の主桁腹板応力が低下する傾向を示していた。また、支間が短いほど桁剛度比は小さくなり、ウェブ貫通部の主桁腹板応力が大きくなっていた。

(2) 立体解析

1)阪神高速道路の橋梁の場合、主桁下フランジ応力を1.2倍することによってウェブ貫通部の主桁腹板における軸方向応力が概ね推定できることを示した。また、首都高速道路の橋梁の場合には同様に1.4倍すればよいことを示した。

2)ウェブ貫通部を最大主応力を用いて評価しようとするときには、阪神高速道路の橋梁の場合、主桁下フランジ応力を1.45倍することによってウェブ貫通部の主桁腹板における最大主応力が大略推定できることを示した。一方、首都高速道路の橋梁の場合には同様に1.5倍すれば概ね推定できることを示した。

(3) 補強の効果

1) T形断面を有する部材を用いて主桁を補強する場合

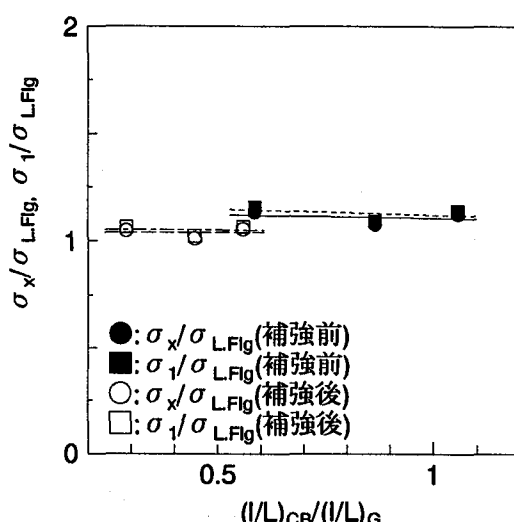


図-21 桁剛度比とウェブ貫通部の横桁下フランジ応力の関係

を想定し、解析したところ、ウェブ貫通部の主桁腹板応力、横桁下フランジ応力ともに低下し、補強の効果が得られることが明らかとなった。

本研究で想定した補強方法は主桁を補強した一種類だけであるので、今後は、横桁を補強する、ウェブ貫通部に部材を添接し補強するなど、より良い補強方法について検討して行きたいと考えている。

参考文献

- 1)米倉徹，長沼敏彦，丸山悟，羽子岡爾朗；鋼鈑桁の横桁下フランジ損傷部調査報告，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，I-215，pp.428～429，平成6年9月。
- 2)阿部英彦，三木千壽訳監修；鋼橋の疲労と破壊，pp.119～135，建設図書，1987年9月。
- 3)坂野昌弘，三上市蔵，西村剛，明比幸造；フランジ貫通型床組連結部の疲労強度に関する解析的研究，鋼構造年次論文報告集，第1巻，pp.571～576，1993年7月。
- 4)坂野昌弘，三上市蔵，村山弘，森脇清隆；フランジ貫通型鉄道橋床組連結部の疲労強度，構造工学論文集，Vol.41A，pp.965～973，1995年3月。
- 5)阪神高速道路公団；鋼単純合成げた標準設計(案)設計図集，昭和42年5月。
- 6)首都高速道路公団工務部；鋼単純合成ゲタ標準設計図集(案)，昭和43年度版。
- 7)SRAC社；COSMOS/M・コマンドノート，1994年。
- 8)〈社〉日本橋梁建設協会；デザインデータブック，p.196，1993年7月。
- 9)日本道路協会；道路橋示方書・同解説，平成6年2月。
- 10)鉄道総合技術研究所編；鉄道構造物等設計標準・同解説鋼・合成構造物，丸善，平成4年10月。

(1995年9月18日受付)