

I 桁橋の横方向補剛材撤去に伴う鉛直荷重下の全体、局所変形挙動

Global/local structural characteristics of I-girder bridges with simple transverse-stiffening systems under vertical loading

長井正嗣*, 藤野陽三**, 黒田充紀***, 山崎和夫****, 柄川伸一*****, 下見成明*****

Masatsugu NAGAI, Yozo FUJINO, Mitsutoshi KURODA, Kazuo YAMAZAKI, Shinichi EGAWA and Nariaki SHITAMI

*工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)

**ph.D. 東京大学教授 工学系研究科土木工学専攻 (〒136 文京区本郷 7-3-1)

***工博 足利工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒326 足利市大前町 268)

****首都高速道路公団 工務部設計技術課課長 (〒100 千代田区霞ヶ関 1-4-1)

*****首都高速道路公団 工務部設計技術課課長補佐 (〒100 千代田区霞ヶ関 1-4-1)

*****川鉄エンジニアリング(株) 土木設計室課長 (〒112 文京区後楽 1-1-5)

This paper concerns the three dimensional structural behavior of a three-I girder bridge. The bridge is analysed by FEM with large number of degrees-of-freedom. Using a bridge with conventional transverse-stiffening members such as lateral bracing, cross beam and sway bracings, the effects of removal of these members on global/local behavior of the bridge is studied from the viewpoint of fatigue-proneness. The possibility of a bridge system with simple transverse-stiffening systems, leading to easy fabrication and maintenance, is discussed.

Key Words : I-girder bridges, simpler structures, durability, FEM analysis

1. まえがき

我国の鋼橋では、鋼重量最小化を目標とした薄肉補剛構造を用いる設計が行われてきた。これは、我国の公共構造物において「初期建設コスト最小化」が目標とされ、「重量ベースで積算する」という積算体系が在ったためである。材料が相対的に高価であった時代には、この最小重量設計に基づく薄肉補剛構造は妥当なものと言えよう。

しかしながら、交通量の増大のなかで、それらの橋梁の一部には、供用後 10~20 年で疲労損傷が目立ってきている。また、鋼の弱点である腐食の問題と相俟って短スパン領域ではその競争力の低下が言われている。

鋼橋をとりまく環境をみると、以上のような競争力の低下のみでなく、将来は高齢化社会の到来と、あわせ建設業に関わる技能者不足が指摘されている。このような観点からは、以下の 2 点を考慮する必要がある¹⁾。

(a). 現在 60 万橋を超える鋼橋は、21 世紀の比較的最早い時期にその 50%以上が 50 才を超えと言われている。したがって、そのメンテナンスには多くの人手と費用が必要になると考えられる。そのため、新しく建設する橋にはメンテナンスミニマムとなるシステムの開発が欠かせない。

(b). 今後のプロジェクトの実施には、より経済的なシステムが要求される。その場合、単に鋼重量ミニマムを目標とするだけでなく製作、施工、維持管理まで考慮したトータルコストミニマムを目指す必要がある。

以上の要求に答えるための新しい橋システムの早急な開発が望まれる訳であるが、経済性と耐久性を同時に兼ね備えたシステムの開発は容易ではない。

耐久性の観点からは現在問題となっている疲労からの解放が重要な課題である。疲労は主桁とそれを補剛する荷重分配横桁、対傾構、また荷重分配を期待しない対傾構や下横構といった 2 次部材（設計上、主桁と共同して鉛直方向の荷重に抵抗するとは考えない部材）の交差点に生じる応力集中に起因して多く発生している。また、この応力集中に起因する疲労の発生を予測するのは現状の研究レベルの範囲では困難と言われている。そこで、1 つの考え方として、これら 2 次部材の撤去が可能であれば、応力集中箇所の低減が期待できる。あわせ、2 次部材の省略や簡素化は製作工数の低減やメンテナンスの容易さにもつながり、トータルとして好ましい方向に向かうものと考えられる。既設の橋梁システムを対象に、横方向補剛材の撤去に伴う応力の変動が明らかになれば、既設橋梁の損傷の有無から判断してある程度疲労フリー化システムの予測の可能性が考えられる。なお、本文では床板、主桁以外の部材を横方向補剛材と呼ぶ。

横方向補剛材の撤去に伴う橋の力学性状の検討を行った既往の研究として以下が挙げられる。文献 2) では有限帯板法 (FSM) により部材撤去に伴う桁橋の挙動を検討しており、主桁と床版の相対角度と下横構の関係を検討し、下横構の撤去の可能性を示唆している。文献

3) では、同じく下横構の撤去に伴う橋全体の力学性状をFEM解析より検討している。撤去による全体挙動の変化が少ないことが示されるとともに、経済性や施工性の面での有利性が示されている。しかしながら、疲労損傷に関連する局所応力の増大が、撤去に伴い別の場所で発生しないかが懸念されており、下横構撤去のための今後の課題となっている。文献4)では、3本主桁をもち、全て対傾構で横方向に補剛された実際の活荷重単純合成桁(スパン 28.7m)を対象に、部材撤去を行った場合の挙動が報告されている。そこでは、1).偏載荷重時、横構がないと荷重分配性能が低下する(10%程度)、2).対傾構の数は荷重分配性能に影響を与えない、3).対傾構を中央一カ所のみとした場合、対傾構の軸力が2倍程度となる、といった、横方向補剛材の撤去の可能性を探る上での有益な情報が得られている。文献5)では、同じ橋梁を対象に、対傾構を撤去した場合の影響をFEM解析(全体解析とブーミング解析の併用)により検討し、スパン中央にのみ一個の対傾構を残した場合、その部材力が3倍程度になることを示している。また、この部材力の増大に対処できれば、部材撤去によるその他の力学性状の変化が小さいことから、十分横方向補剛材の撤去が可能と考えられると説明している。

以上は主に交通荷重を対象とした、つまり鉛直荷重作用に着目したものである。文献6)では、風荷重作用下での下横構の有無の影響を比較的粗い要素分割のFEM解析から検討し、下横構の撤去によって設計上何ら不都合が生じないことを説明している。但し、この検討では対傾構は従来システムと同様(6m 間隔)で、その撤去による挙動の変化は検討されていない。文献7)では、下横構のない系に横荷重を載荷しFEM解析より力学特性を検討している。そして、桁端部での横構の必要性和中間対傾構が横荷重の面からある程度の間隔で必要であることを説明している。

以上紹介した研究では、疲労損傷と密接に関係する前述の部材交差部に生じる応力集中が床版厚を含めた構造系の変化に伴いどのように変化するかのかの検討が総合的

に行われていない。そのためシンプル化システムの可能性を考える上で十分な資料が準備されているとは言い難い。

そこで、本研究では、分配横桁をもつ桁橋を対象に、横方向補剛材の撤去に伴う全体的な変形とあわせ局所的な変形を、ブーミング解析を行わず、大次元のFEM解析より明らかにし、部材撤去の可能性について検討を行うとともに将来システムの方向性について考察を加える。当然、補剛部材のシンプル化に伴い、部分的には応力増が予想される。ここでは、床版厚の増加がこの応力増にどの程度有効であるかを重点的に検討することとする。

2. 橋梁モデル

図-1に、今回計算の対象とした橋モデルを示す。橋はスパン 39m の3本主桁(桁高 1.6m, 間隔 3.1m)をもつ単純活荷重合成桁で、床版厚は 210mm である。スパン中央に荷重分配横桁をもち、5m 間隔で中間対傾構が配置され、また下横構が配置されており、主桁の補剛システムとしては一般的なI桁橋である。

3. FEMモデル

図-2にFEMモデルと要素分割を示す(見やすさのため床版と主桁は分離して表示している)。床版と上フランジは合成されているものとする。なお、部材撤去に伴う応力や部材力の変化の状況を明らかにすることを主目的としているため、コンクリート床版の地覆や壁高欄は無視している。

床版は 20 節点のアイソパラメトリックソリッド要素で、上フランジ、腹板および鉛直補剛材は 8 節点または 6 節点シェル要素で、対傾構、下横構ははり要素でモデル化している。このようなモデル化を行った理由は、床版をソリッド要素でモデル化するとともに、その他の部材をすべてシェル要素で分割した詳細なFEM解析(半橋モデルに対して約 168,000 自由度)を行った結果との比較および使用するコンピュータの容量を考慮して決定している。なお、FEMモデル作成に関する詳細は文献

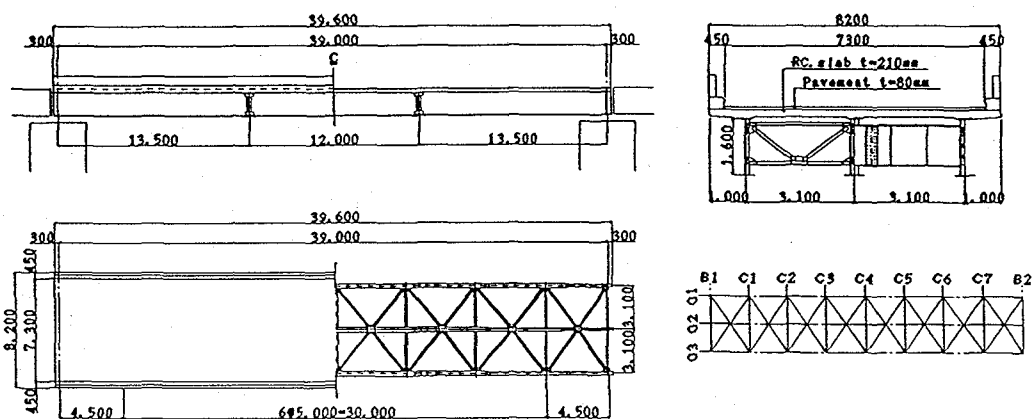


図-1 橋モデル

8) を参照されたい。

今回のモデルの全節点数は約 20,000 で、全自由度は約 80,000 である。使用したソフトは MARC K4⁹⁾、コンピュータは FACOM VP-2000 である。

4. パラメータと荷重ケース

本研究では、I 桁橋を対象に下横構や対傾構といった横方向補剛材を撤去することによる橋の全体的な挙動とともに局所的な挙動の変化に注目する。まず図-1 に示した橋モデルを基本システムとし、順次部材を撤去していく。また、下横構と対傾構の一部を撤去したシステムについて床版厚をパラメータとした検討を行う。以下に、各システムを定義する。

SA---基本システム

SB---基本システムから下横構を撤去する。

SC---システム SB から中間対傾構 C1, C3, C5, C7 (図-1 参照) を撤去する。この構造系では、中間対傾構の間隔は 10m となる。

SD---システム SC から、さらに中間対傾構 C2, C6 を撤去する。この構造系では、端対傾構と分配横桁のみが横方向補剛材となる。

SC1---システム SC で、床版厚を 250mm とする。

SC2---システム SC で、床版厚を 290mm とする。

図-3 に荷重ケースとケース番号を示す。荷重は内、外主桁上と主桁 (G1, G2) 間に集中荷重 10tf を作用させ、それを支間方向に移動させた計 9 ケースとする。なお、床板張出し部の荷重は、本モデルでは荷重位置が外主桁から 30cm と短く、張出し部荷重と主桁上荷重に大差は生じないと考えられることから取り扱わなかった。

5. 単一荷重載荷時の力学特性

まず、第4節で説明した単一荷重 (10tf) 作用下での基本的な性状について考察を行う。

5.1 荷重分配性能

図-4 (a), (b) にそれぞれ G2, G1 上に荷重載荷した場合の横桁位置でのたわみから求めた荷重分配係数を示す。G2 上に荷重を載荷した場合、桁にほぼ均等に荷重が分散されることがわかる。この場合、下横構、対傾構部材の撤去や床版厚の増厚といった構造系の変化に伴う差異はほとんど見られなかった。荷重を G1 上に載荷

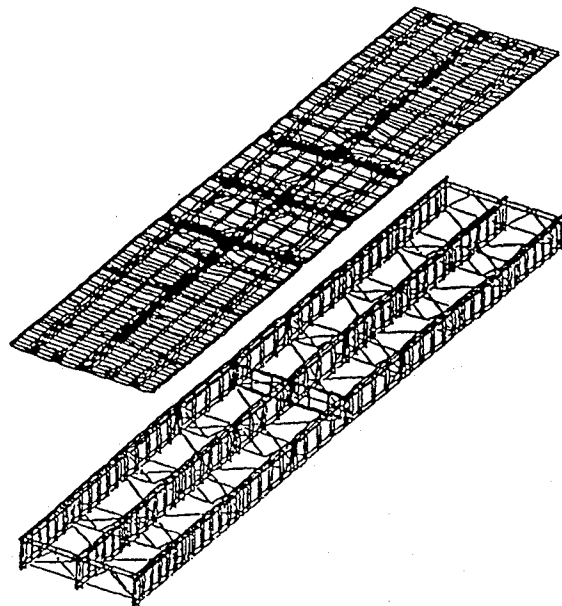


図-2 有限要素分割

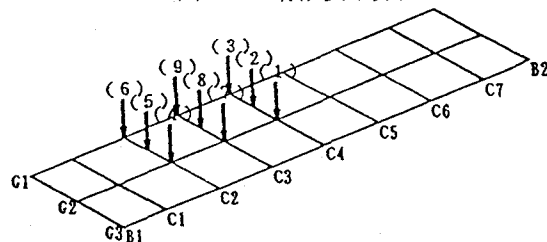


図-3 荷重ケース

すると、下横構の有無によって分配が 25% 程度変化する。これは、よく知られているように横構がねじれに抵抗するためである。詳細に検討を行っていないが、これにより主桁部材の寸法が大きく変更されることはないを考える。一方、下横構撤去後の構造系の変化 (対傾構の撤去) による変動はほとんど見られない。床版厚を 250, 290mm と増厚することによって分配の変化が 20%, 15% となって床版の効果が期待できる。床版がどの程度荷重分配に寄与するかは今後の課題とするが、床版厚の増厚によって分配性能が向上することが確かめられた。

5.2 分配横桁位置の局所応力

鉛直補剛材上端部とウェブギャップ板 (主桁上フランジと分配横桁上フランジ間に挿入される板を言う) の垂直応力が構造系によってどのように変化するかを検討する。応力値は要素積分点での値から、鉛直補剛材の上端、

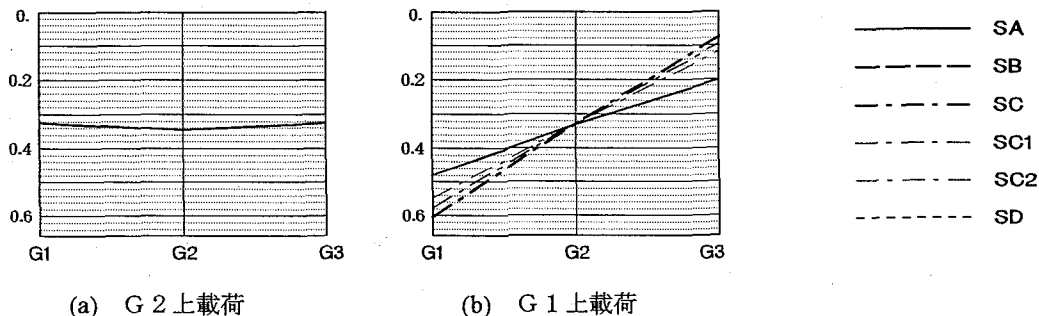


図-4 荷重分配係数

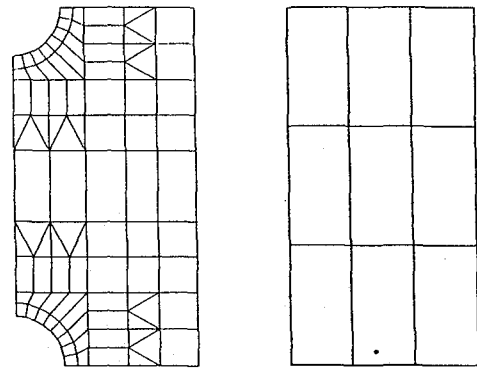
ウェブギャップ板の上端または下端コーナーの応力を推定したものである。本FEMモデルでは計算機の容量の関係でスカラップを設けていない(図-5(b)参照)。別途、分配横桁位置を対象とし、スカラップを設けた詳細な解析(図-5(a)参照)との比較を行ったが、着目位置については、いずれの荷重ケースも応力はほぼ同じとなることを確認できている。

なお、荷重ケースは発生応力が大きいケース(1)~(3)を対象とする。また、せん断応力は値そのものが小さかったことから説明を省略する。

図-6に示す垂直応力(σ_y)の変化について説明する。まず下横構を撤去した系(システムSB)の挙動について考察する。荷重ケース(1)(G2上载荷)では、G1R1、G3L1位置で応力が漸増するが、それ以外の着目位置での応力変動はほとんどみられない。荷重ケース(2)(主桁間の床版に荷重载荷)では、床版の曲げ変形でウェブギャップ板が押し込まれるか、または引き上げられることによって応力集中が生じることが知られている¹⁰⁾。この応力はG1R1位置で増加するが、その他の着目位置では減少する。荷重ケース(3)(G1上载荷)では、G3L1位置で応力が増大する。このケースでは、それぞれ対称位置にある着目点で応力が平滑化されていることがわかる。下横構の撤去によって、腹板の下フランジ位置での橋軸直角方向変位の拘束が開放され応力が平滑化されたものと考ええる。

次に、中間対傾構の撤去した場合の応力変動をみると、G1R1、G3L1位置で応力が増大する傾向がみられるが、その他位置での変動は比較的小さい。

システムSCで床版厚を厚くすると(システムSC1、SC2)、よく知られているように、荷重ケース(2)で



(a) 詳細解析 (b) 本パラメータ解析

図-5 ウェブギャップ板のFEM要素分割

応力がかなり低下する。しかし、その他の荷重ケース(主桁上に荷重载荷)での応力低下はそれほど顕著ではない。床版厚の増厚は主桁間の荷重载荷に対して効果が大きく、そのような载荷が実際に想定される場合は床版厚の増厚で局所応力を大幅に低減できる。一方、主桁上に輪荷重が作用する場合は、応力は低下するものの、荷重ケース(2)に比べると効果は小さい。

以上より、荷重ケース(1)(中桁上载荷)では、外桁位置に取付く鉛直補剛材上端部G1R1、G3R1の応力が、下横構、対傾構の撤去によって徐々に増大していく。この場合、床版厚の増厚が変形を防止する効果をもたらすものの、荷重ケース(2)で見られる程の顕著な効果は期待できない。荷重ケース(2)(主桁G1、G2間の床版上载荷)ではG1R1の応力が増加するが、この場合、床版厚の増厚によって応力の大幅な低減が可能となる。荷重ケース(3)(外桁上载荷)では、下横構の拘束が開放されて局所応力が平滑化され、基本システムで

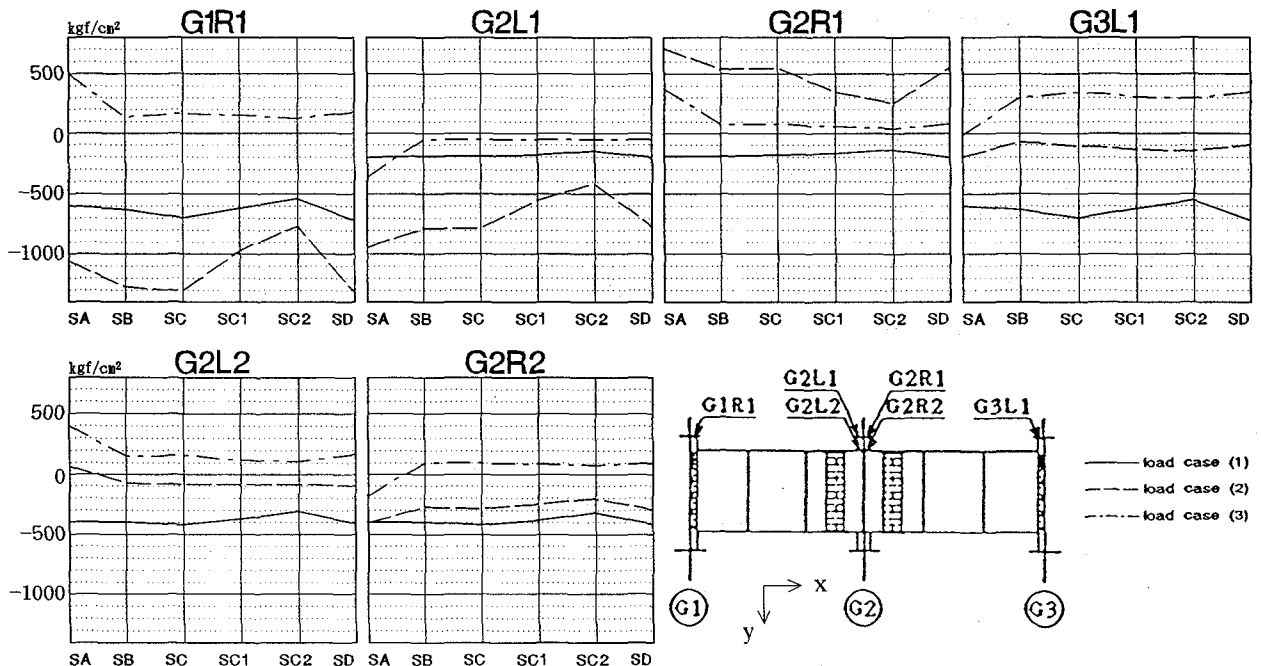


図-6 分配横桁位置の応力(σ_y)

生じていた応力に比べて小さくなる。このケースは対傾構の数やまた床版厚の影響をほとんど受けない。

図-7に垂直応力 (σ_x) の変化を示す。 σ_x はウェブギャップ板の横桁側 (G2L2, G2R2位置) で大きな値を示す。そのため、これらの位置にのみ着目して考察を行う。

下横構を撤去すると、荷重ケース(3)で応力の変化が見られ、両者の応力が平滑化される。すなわち、G2L2で生じている大きな応力が減少し、G2R2位置の応力と同程度となってくる。さらに中間対傾構を撤去すると、応力はいずれの荷重ケースも増加するが、その程度は小さくなく、対傾構の数による応力の変化は小さいと言える。また、荷重ケース(1)では、G1R1, G3L1位置の応力 (σ_y) で見られた傾向と同様、下横構、対傾構の撤去に伴い応力は徐々に大きくなる。また、床版を増厚することでこの応力は減少する。

その他の荷重ケース (ケース(4)~(9)) で生じる応力に着目すると、構造系の変化に伴う応力の増減は同じ傾向を示し、また荷重位置が離れているため応力そのものが小さい値となる。このような傾向は以下のいずれの着目部材でも同様である。

5. 3 中間対傾構 (C2) 位置鉛直補剛材の局所応力

図-8に鉛直補剛材上端部に生じる垂直応力 (σ_x , σ_y) の構造系による変化を示す。なお、ここでの荷重ケースは、C2位置に荷重が載荷されるケース(4)~(6)を対象としている。

垂直応力 (σ_x) は小さく、また構造系の変化による応力変動も小さい。

垂直応力 (σ_y) は σ_x に比べて大きい。構造系の変化による応力の変化は小さく、下横構や対傾構の撤去の影響は小さいと言える。この場合も、主桁間の床版上に

荷重が作用するケース(5)に対して、床版厚を増厚する効果が大きい。また、対傾構を撤去することによって (モデルSD), いずれの荷重ケースでも応力がほとんど発生しないことがわかる。

5. 4 中間対傾構 (C2) の軸力

図-9に対傾構軸力の構造系による変化を示す。上弦材 (U1) は荷重ケース(5) (G1, G2間の床版上載荷) で大きな値となる。これは、桁間の床版に作用する荷重によって床版が変形して桁が開こうとするのを上弦材が拘束するためである。この場合、床版厚を厚くすると、床版の変形が小さくなって軸力も小さくなる。下横構の有無や中間対傾構撤去の影響はほとんど受けない。

斜材 (D1~D4) 軸力は下横構の撤去によって変動が見られる。荷重ケース(6) (外桁上載荷) での軸力変化が大きく、D1, D2部材の軸力が減少し、D3, D4部材の軸力が増大する。これは荷重分配性状に差が生じたためと考えられる。D3, D4部材の軸力が増加することになるが、D1, D2部材に生じていた大きな軸力が減少して全ての斜材で軸力が同程度となる。荷重ケース(4) (中桁上載荷) では、下横構の撤去で軸力が若干低下し、対傾構の撤去で基本モデルと同程度となる。

下弦材 (L1~L4) に着目すると、下横構撤去によって、下弦材L1, L4の軸力が減少して0に近くなる。一方、荷重ケース(6)を除いて、L2, L3部材の軸力が大幅に増大する。これは、下横構の撤去によって腹板の面外方向 (橋軸直角方向) の変位が自由となって、L1, L4部材に力が流れなくなるためである。

5. 5 分配横桁および中間対傾構 (C2) 位置の主桁腹板応力

部材撤去による横方向補剛材の応力や部材力の変化に着目してきたが、部材撤去によって主桁の局所応力が大

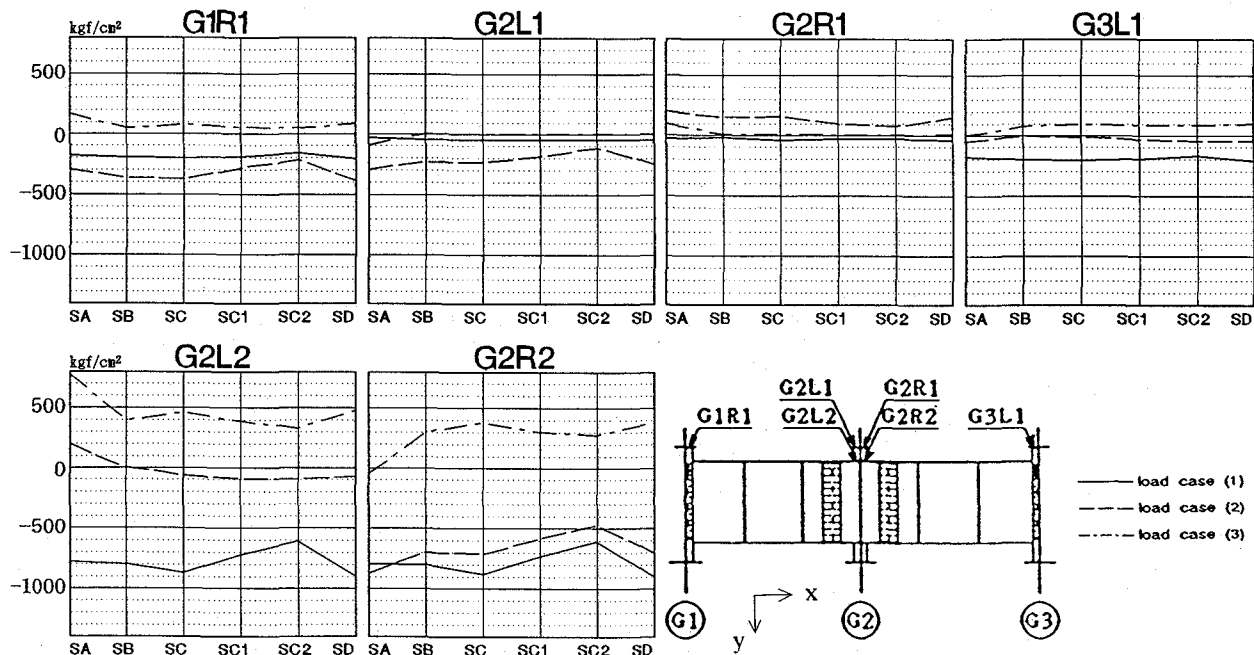


図-7 分配横桁位置の応力 (σ_x)

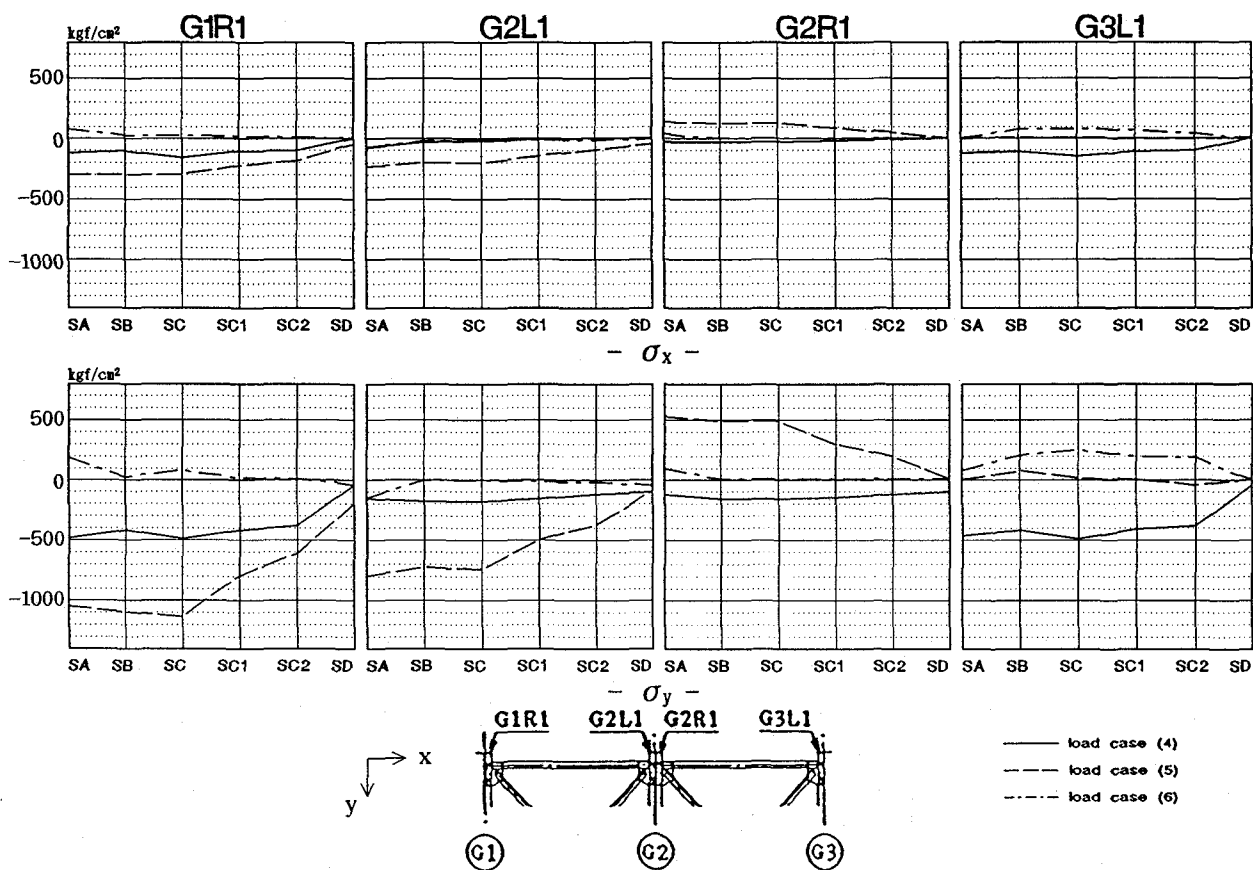


図-8 中間対傾構(C2)位置の応力(σ_x , σ_y)

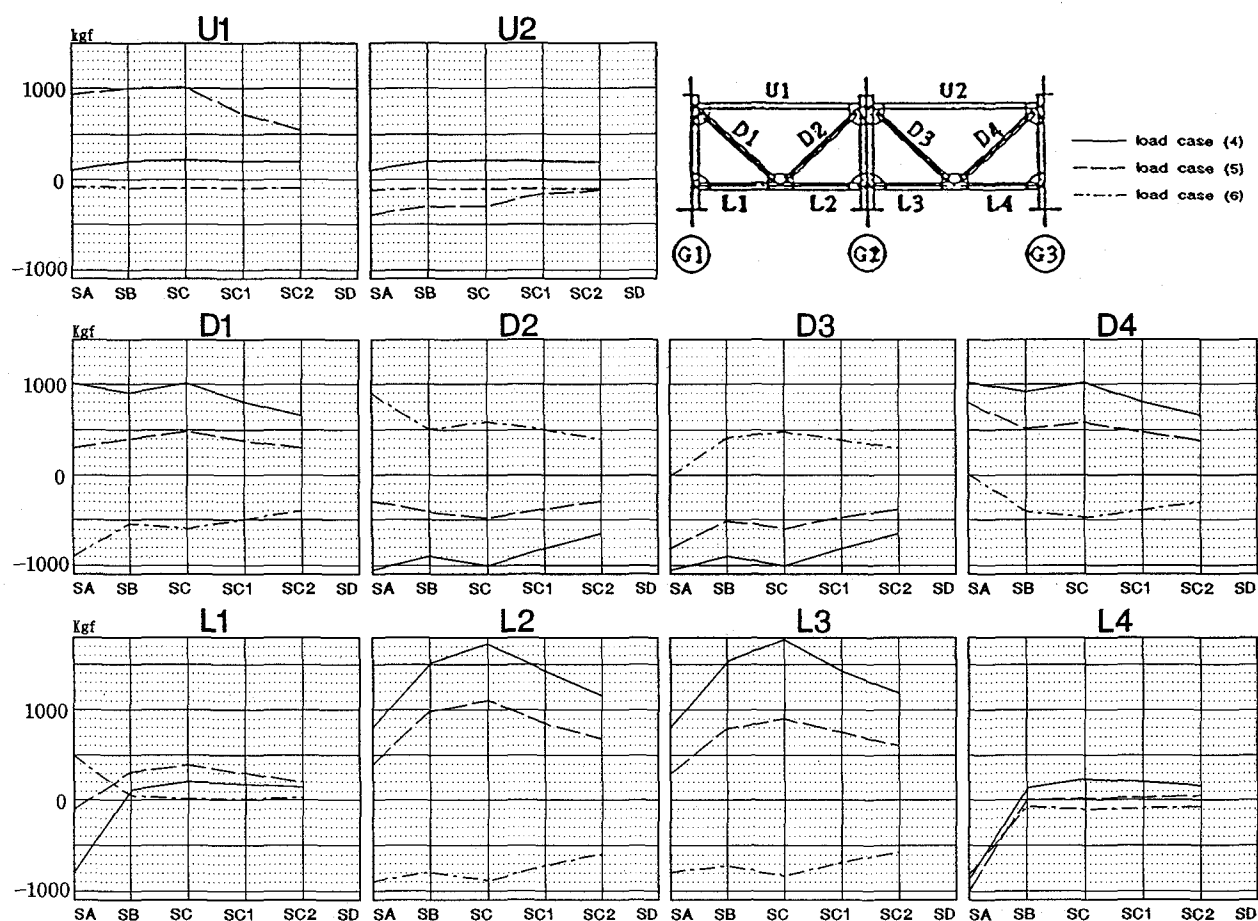


図-9 中間対傾構(C2)位置の部材軸力

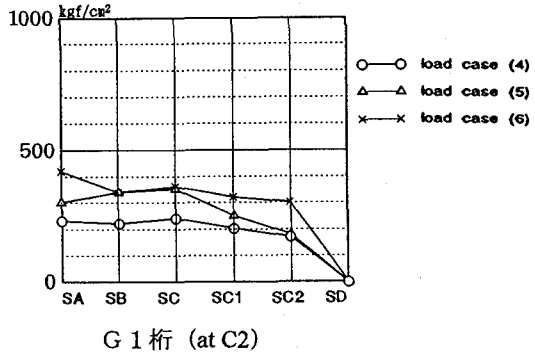
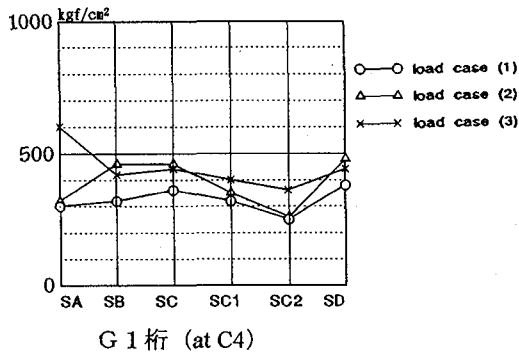


図-10 腹板の板曲げ応力

きく変化しないか、増大しないかという疑問が生じる。図-10にG1桁のC4（分配横桁位置）、C2（中間対傾構位置）での腹板の板曲げ応力の変化を示す。この応力は桁の横断面変形に伴う腹板の曲げ応力で、横桁や対傾構から10mm離れた位置で腹板上端の応力をプロットしている。ここではG1桁の結果のみを示しているが、G2、G3桁の応力はいずれも絶対値がG1桁を超えていないこと、また以下に説明する構造系の変化による応力の変動も同様の傾向を示すため説明を省略している。

図より、部材撤去に伴う主桁の応力の変化は小さいことがわかる。したがって、とくに腹板を厚くして対応する必要はないと考えられる。シンプル化を意図して水平補剛材を省略し腹板を厚くしていけば、応力値は更に減少するものと考えられる。

6. 単一荷重が同時に複数載荷した場合の力学特性

5節では、単一荷重が主桁上に作用した場合の構造システムと主に局所変形挙動の関係について考察を行い基本的な特性を明らかにした。

さて、橋システムの疲労からの解放を検討するには、実際の荷重走行を想定した検討を行う必要がある。すなわち、各橋梁に応じて荷重の載荷位置や大型車の混入率を明らかにして検討を行う必要がある。そのため、各橋梁で個別の検討が必要となって一般論は困難となる。ここでは、本研究で対象とした橋の車両走行をある程度模した組合せ荷重載荷（単一荷重の組合せ）を考え、構造システムと局所応力の関係について考察を加える。

6.1 単一荷重の組合せ

図-11に対象とした載荷状態を示す。ケース(x-1)、(x-2)は横断面内で、それぞれ単一荷重が2、4個（それぞれ合計20,40tf）の載荷状態を表す。さらに、荷重を橋スパン方向に10m間隔で3組載荷したケースをケース(x-1)', (x-2)'とする。なお、ケース(x-2)は横断面内で対称の荷重載荷となる。ここで、xはそれぞれa,b,cに対応する。

横断面内の荷重載荷のうち、ケース(a)が本橋の荷重載荷状態に最も近い（図-12参照）。ケース(b)は車両が

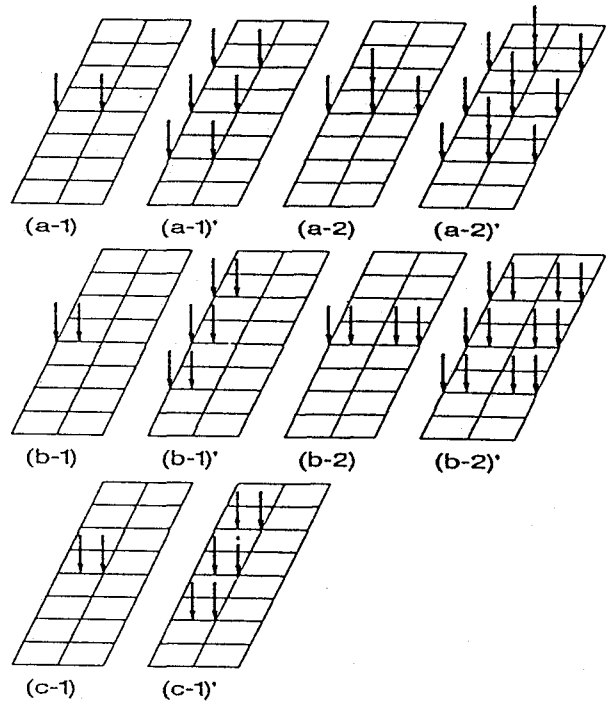


図-11 単一荷重の組合せ

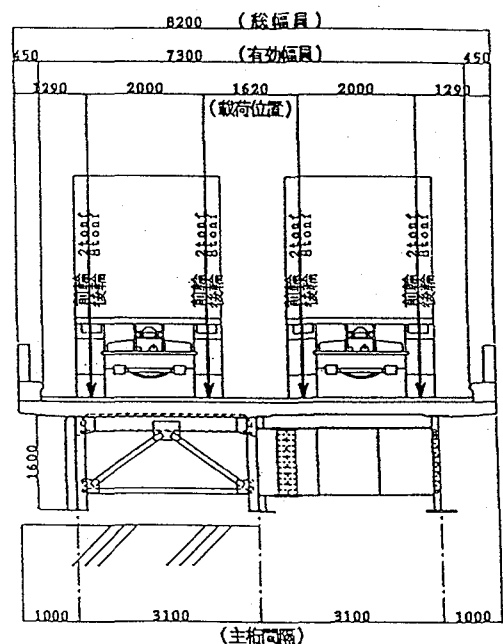


図-12 車両走行

橋の横断面内の外側を、(c)は内側を走行する場合を想定している。また、スパン方向 10m 間隔の載荷は後輪間隔 10m で 3 台の車両が載荷する場合を想定している。

以下の応力、部材力はすべて絶対値で表示している。また、荷重ケース(b),(c)については、紙面の都合もあって、構造系の変化によって応力が増大する箇所を中心に説明する。

6. 2 分配横桁 (C 4) 位置の局所応力

図-1 3 に荷重ケース(a)での垂直応力 (σ_y) の変化を示す。荷重ケース(a-1), (a-1)' では、基本システムの G 3 L 1 位置の応力が大きい。この傾向は G 2 L 2, G 2 R 2 位置でも見られる。一方、ケース(a-2), (a-2)' では、下横構、対傾構の撤去に伴い G 1 R 1, G 3 L 1 位置の応力が増加する。分配横桁のみの S D モデルでは、基本システムに対してケース(a-2) で 25%、ケース(a-2)' で 70% 増大する。しかし、この場合でも、対傾構間隔を 10m としたシステム (S C) で床版厚を増厚していけば応力レベルは基本モデルに近いものとなる。

図-1 4 に荷重ケース(b)の結果示すが、応力の増加が

見られた G 1 R 1, G 3 L 1 位置のみの変化を示す。このケースでは、G 1 R 1 の応力が大幅に増加することになる。床版厚をアップしても基本システムと同程度にはならない。また、ケース (b-2), (b-2)' も同様に応力が増加するが、このケースでは床版厚の増厚によって応力を基本システム以下にできる。

第 5 節の荷重ケース(2)で説明したように、このケースでは下横構や対傾構の撤去に伴い応力 (－：圧縮) が漸増する。一方、荷重ケース(3)では、応力の符号が逆 (+：引張) で、下横構を撤去すると応力の絶対値が減少する。そのため、両者の組合せを考えると基本システムに対して大幅に応力が増加することになる。荷重の組合せによって、応力が急増する箇所が生じることがわかる。なお、床版厚を増厚 (210→250mm) すると、応力は 850kgf/cm² 程度に低下して、基本システム (荷重ケース(a)) の最大値約 900kgf/cm² と同程度となる。

図-1 5 に荷重ケース(c)の結果を示す。基本システムに対して応力が増加する G 1 R 1, G 3 L 1 位置のみの結果を示す。この荷重ケースでは応力の絶対値もかなり大きく、しかも下横構や対傾構の撤去によって応力が増

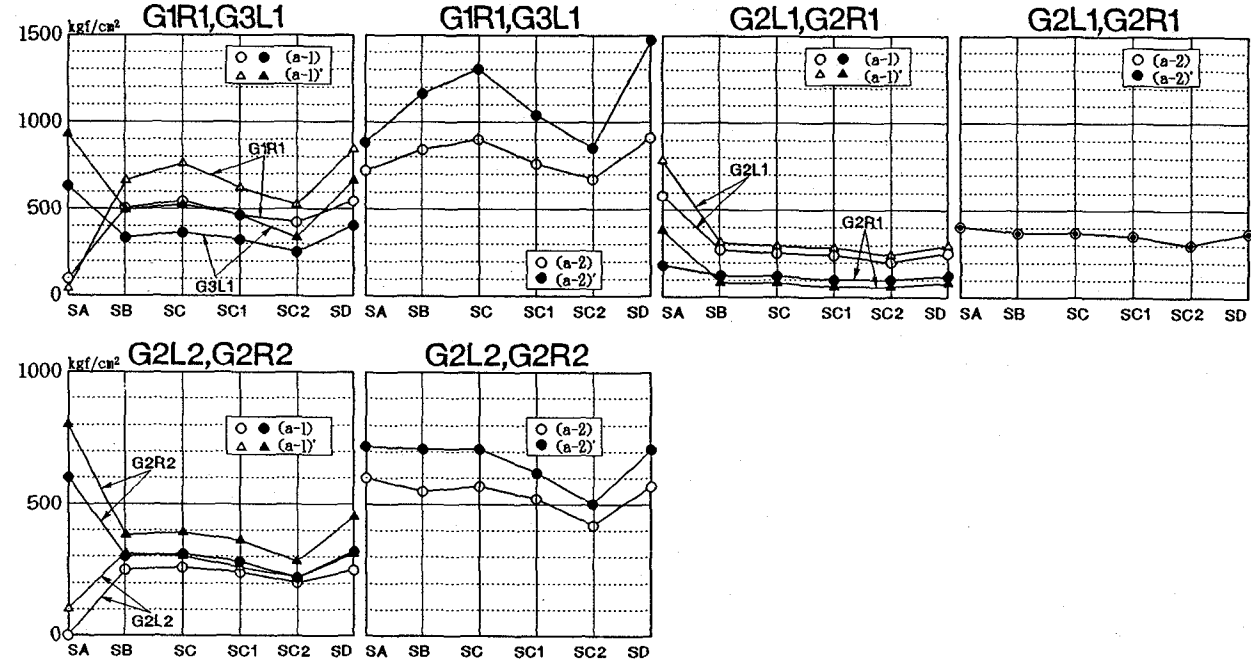


図-1 3 分配横桁位置の応力(σ_y), 荷重ケース(a)

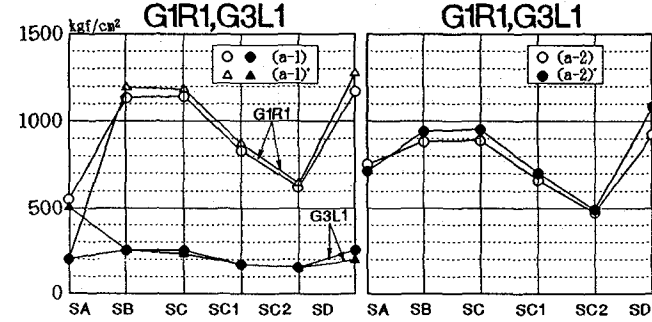


図-1 4 分配横桁位置の応力(σ_y), 荷重ケース(b)

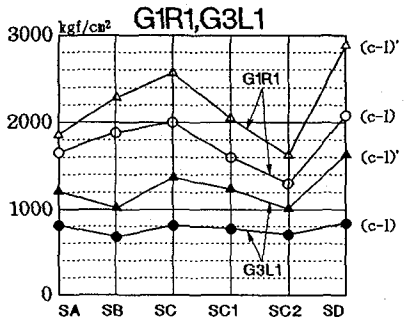


図-1 5 分配横桁位置の応力(σ_y) 荷重ケース(c)

加する。それでも、床版厚を増厚（210→250mm）すると基本システムと同程度となることがわかる。

次に垂直応力（ σ_x ）の変化について説明する。第5節で説明したように応力値の大きいG2L2，G2R2に着目する。

図-16に荷重ケース(a)の結果を示す。ケース(a-1)，(a-1)'ではG2L2の応力が増加するが，G2R2の応力が低下して，基本システムに比べて応力は小さくなっていることがわかる。ケース(a-2)，(a-2)'では，部材撤去に伴って応力が徐々に増加するものの，床版厚を増厚（210→250mm）することで，基本システムの応力レベル以下となることがわかる。荷重ケース(b)では，(b-1)，(b-1)'で応力は半分以下と大幅に低下する。また，ケース(b-2)，(b-2)'の応力は100kgf/cm²前後と小さく，部材撤去による変動も小さい。

図-17に荷重ケース(c)の結果を示す。 σ_y 同様，大きな応力値が得られ，しかも下横構，対傾構の撤去に伴い増加する。この場合，床版厚の増加（210→250mm）で基本システム以下（約20%減）となる。

6.3 中間対傾構（C2）位置鉛直補剛材の局所応力

荷重ケース(x-1)'，(x-2)'（但し，x=a,b,c）の応力には，本計算ケースの制約からC6上の荷重載荷の効果が考慮できていない（C2位置の載荷でC6位置の応力を評価すればよいが，C6位置の鉛直補剛材の要素分割が粗いため評価できない）。そのため，橋スパン方向の荷重載荷は2組となる。しかしながら，C6位置の荷重は着目位置から20m離れているため，その影響は小さい。

図-18に荷重ケース(a)の結果を示す。応力変動その

ものが小さいことがわかる。図-19に，応力増が見られる荷重ケース(b)，(c)でのG1R1，G3L1位置の応力を示す。これらの荷重ケースでG1R1位置の応力増加が見られるが，床版厚の増厚（210→250mm）で基本システムの最大応力以下となる。

6.4 中間対傾構（C2）の軸力

まず，斜材の軸力について説明する。図-20に荷重ケース(a)の軸力変動を示す。D1，D4部材の軸力が荷重ケース(a-1)，(a-1)'で増加するが，部材D2，D3の基本システムで見られる大きな軸力に比べて小さな値となっている。また，荷重ケース(b)，(c)では軸力は小さくなった。

図-21に荷重ケース(a)の下弦材の軸力変化を示す。第5節の単一載荷で説明したように，L1，L4部材の軸力が低下し，L2，L3部材の軸力が増加する。しかし，L2，L3部材の増加した軸力の最大値は基本システムの最大値を超えない。荷重ケース(b)では，下弦材の軸力は大幅に低下している。

図-22に荷重ケース(c)の結果を示す。この場合，L2，L3の軸力が大幅に増大して基本システムの最大値（L4部材）より大きくなる。しかし，この場合も床版厚を増厚（210→250mm）すると，基本システムで生じる最大値程度となる。

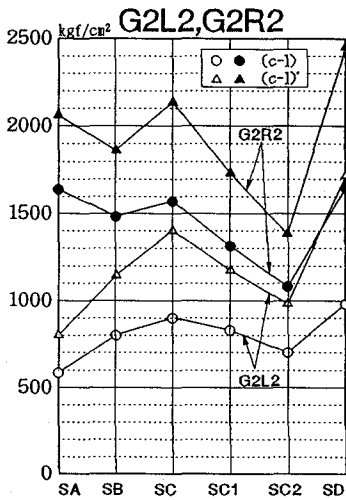


図-17 分配横桁位置の応力（ σ_x ）荷重ケース(c)

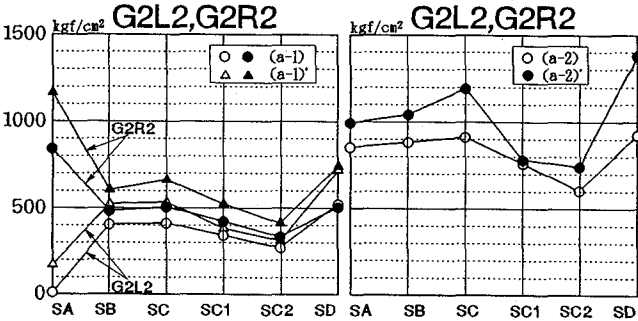


図-16 分配横桁位置の応力（ σ_x ），荷重ケース(a)

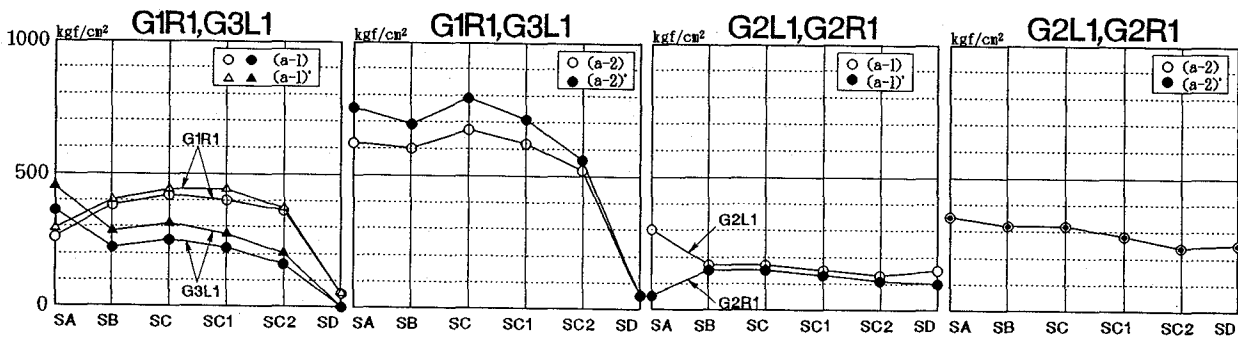


図-18 中間対傾構(C2)位置の応力（ σ_y ），荷重ケース(a)

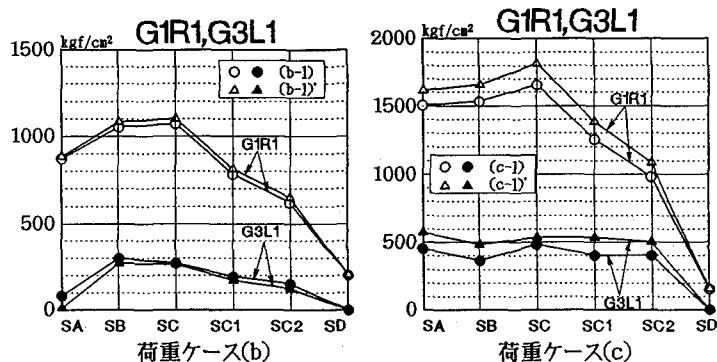


図-19 中間対傾構(C2)位置の応力(σ_y), 荷重ケース(b), (c)

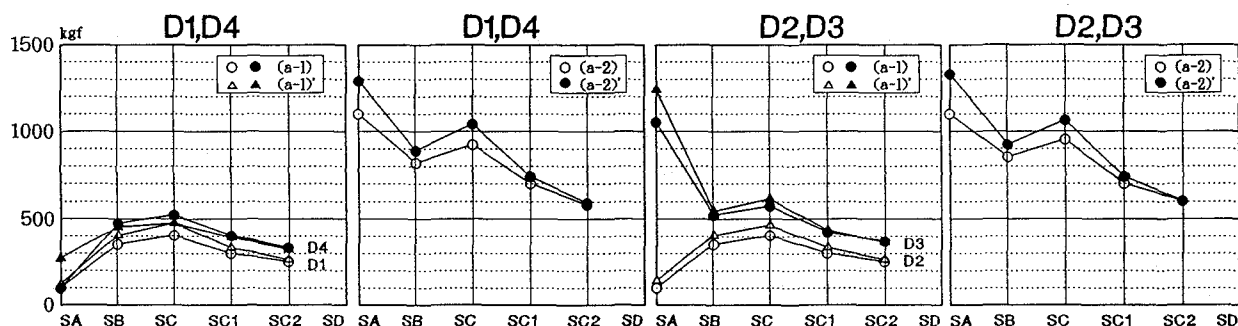


図-20 中間対傾構(C2)位置の斜材軸力, 荷重ケース(a)

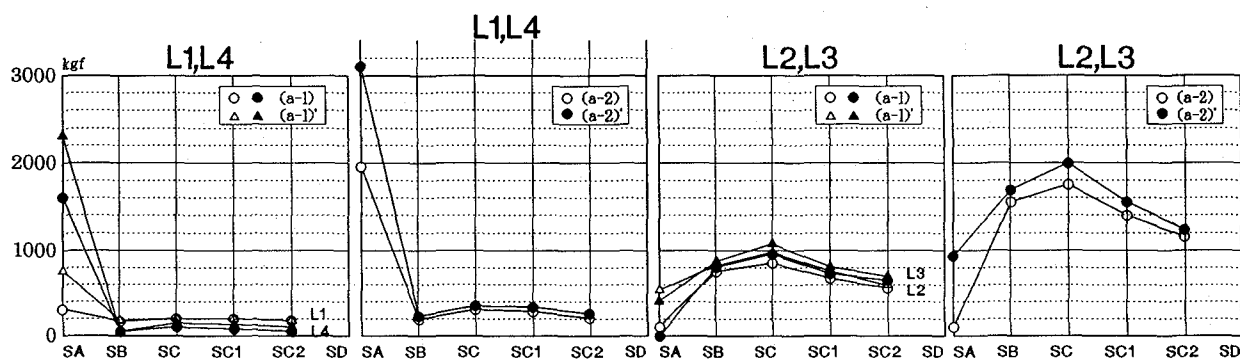


図-21 中間対傾構(C2)位置の水平材軸力, 荷重ケース(a)

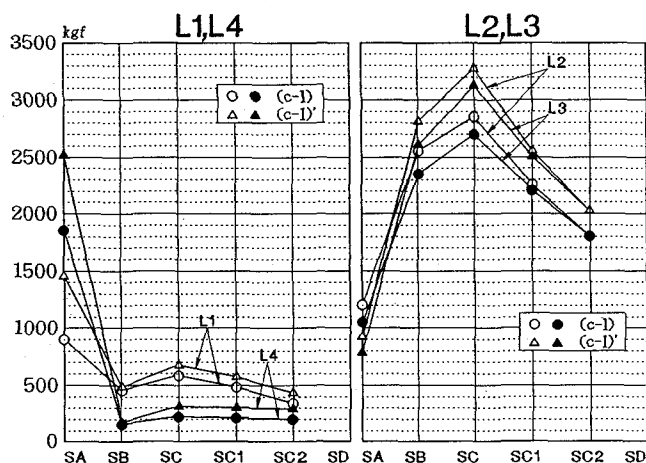


図-22 中間対傾構(C2)位置の水平材軸力, 荷重ケース(c)

7. まとめ

本研究は、時代の要求に対応するため桁橋の疲労フリー化、すなわち耐久性の向上とシンプル化が同時に達

成できるシステムの可能性を探るために行ったものである。具体的には、FEM立体解析より、従来の補剛システムをもつ3本主桁のI桁橋において、補剛部材の撤去に伴

う橋全体と、あわせ疲労損傷が報告されている主桁と分配横桁や2次部材の接合部の局所応力の変化に同時に着目した検討を行い可能性を検討した。なお着目した荷重は交通荷重を対象とした鉛直荷重である。

以下に本研究で得られた結果を要約するとともに、将来システムについて考察を加える。

下横構や中間対傾構を撤去すると、基本システムに比べて荷重分配性能が多少低下すること、荷重状態によって一部の局所応力が大きくなるが、全体挙動に大きな差異は生じないことが明らかとなった。

部材撤去に伴う局所的な応力の増加は分配横桁位置でみられたが、床版厚を増厚することで低減が可能となる。今回の橋モデルでは、下横構なし、対傾構間隔10mを前提として、床版厚を210mmから250mmに増厚することでほぼ基本システムと同程度の応力レベルにできる。これより、今回検討の対象とした補剛システムをもつ橋システムにおいて、仮に疲労損傷が生じないことが保証できているとすれば、床版厚を増厚を前提として下横構や対傾構の一部を撤去した疲労フリーのシンプル化システムが可能と考えられる。逆に、疲労損傷が報告されている橋においては、部材撤去を行いかつ局所応力を低減させるには大幅な床版の増厚が予想され、必ずしも魅力的な対策とならないと考えられる。しかしながら、一般論としてどの程度床版厚を増厚すれば部材撤去が可能かを定量的に特定するのは今後の課題となった。

今回の検討では、分配横桁位置での局所応力が部材撤去に伴い増大することを説明した。横桁を上フランジ位置に揃えて接合することで応力の低減が可能となる。事実、首都公団では上記部位の構造詳細の変更を既に行っている¹¹⁾。このような対応によって横桁位置でみられた応力集中が大幅に低減できることを前提とすれば、床版厚を増厚せずに下横構の撤去と対傾構間隔を10m程度にするといった構造のシンプル化の可能性が考えられる。すなわち、全体挙動に大きな差異が生じないことから、応力集中が生じる構造ディテールの改良を行うことによって構造のシンプル化が可能と考えられる。あるいは、局所応力が大きくなりすぎないことを前提に、現在の補剛システムから別の補剛システムが検討されてよいと考えるが、その特定については今後の課題となった。

現在、省力化システムの開発を意図した少補剛形式の検討が各所で進められている¹²⁾。しかしながら、局所応力の変動に着目した研究は、解析の労力が大きいこともあってか少ない。また橋システムの挙動をはり理論の範囲で予測することに造詣の深いエンジニアにとっても、局所応力の変動を簡単に予測するのは困難であり、横構ありきか等々、システムの方向性を探る上ではしばしば混乱が生じている。本解析は3本主桁に限定した検討であり、また実際の疲労フリー、シンプル化橋梁の実現にはケースバイケースで実験も必要と考えられるが、本検

討が今後の桁橋のシンプル化の推進に役立てば幸いと考ええる。

謝辞

本研究を行うに当たり、梶原堅生、木暮恭輔氏(川鉄システム開発(株))には具体的な解析を担当して頂き厚く感謝致します。疲労に関連する考察については、川井豊氏(川崎製鉄(株))および坂野昌弘助教授(関西大学)に有益なコメントを頂いた。本研究は、首都公団の開発研究課題テーマの1つとして、あわせて土木学会鋼構造委員会新技術小委員会の設計法WG(主査：藤野陽三)の活動の1つとして行ったものである。三木千寿教授(東京工業大学)、奈良敬教授(岐阜大学)、西川和廣室長(建設省土木研究所)他WGメンバーには解析の中間報告等で有益なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理(招待論文)，土木学会論文集，No.501, I-29, pp.1-10, 1994年
- 2) 大塚久哲，佐賀弘一：合成I桁橋の立体解析に基づく変形および部材結合力の特性把握，土木学会，構造工学論文集，Vol.35A, pp.889-897, 1989年
- 3) 大塚勝，佐藤哲也，竹中裕文，和地輝雄：下横構を省略したプレートガーダー橋の提案，橋梁と基礎，Vol.27, No.11, pp.33-39, 1993年
- 4) (社)日本鋼構造協会：構造物の立体挙動と設計法，JSSCテクニカルレポート，No.21, 1992年
- 5) 中原俊之，古田均，杉浦邦征，渡邊英一：実働荷重による鋼I桁橋の疲労解析と2次部材の効果に関する2,3の考察，土木学会第46回年次学術講演概要集，pp.400-401, 1991年
- 6) (社)日本橋梁建設協会・設計部会：プレートガーダー橋の下横構の省略に関する一考察，橋梁と基礎，Vol.23, No.9, pp.37-40, 1989年
- 7) 名取暢，明橋克良，尾下里治：鋼I桁橋における構造形式の簡略化に関する検討，横河ブリッジ技法，No.21, pp.13-30, 1992年
- 8) M.Kuroda, M.Nagai, Y.Fujino, S.Egawa, and Y.Kawai : On finite element modeling of I-girder steel bridges, Proc. of the 5th EASEC, pp.315-320, Goldcoast, Australia, 1995年
- 9) MARC ユーザーズマニュアル A-E, 1992年
- 10) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，1994年
- 11) 首都高速道路公団工務部：鋼構造物標準図集，1994年
- 12) 山縣敬二：省力化に対応した橋梁構造：JSSC, No.13, pp.2-11, 1994年

(1995年9月18日受付)