

鋼 I 桁対傾構取合い部の疲労補強を目的とした床版下面増厚工法の開発

Development of strengthening method for the purpose of strengthening the fatigue damages
at the intersection between main girder and sway bracing on highway steel bridges

緒方 紀夫*, 前田 良文**, 岩崎 雅紀***, 濱田 仁****

Norio Ogata, Yoshifumi Maeda, Masanori Iwasaki and Jin hamada

*, **日本道路公団 試験研究所 橋梁研究室 (〒194 東京都町田市忠生 1-4-1)

, *株式会社 横河ブリッジ 研究所 (〒261 千葉県千葉市美浜区新港88)

In recent years, the fatigue damages at the intersection between main girder and sway bracing on highway steel bridges have been often developed. This paper proposes the strengthening method that is increasing the thickness of reinforced composite slab using wave type deck plate from the bottom side. Both series of small size static tests, full-scaled static and fatigue test were performed, and the strengthening method was studied and executed. Finally, the application for the strengthening method have been discussed.

Key Words: Repair, Fatigue damages, Reinforced composite slab, Deck plate, Full-scaled testing

1. 研究概要

東名高速道路を始めとする1970年代に建設された鋼 I 桁橋において、主桁と荷重分配対傾構の取合い部¹⁾およびRC床版に疲労損傷が多数発見されている。発生原因は、いずれも設計交通量を遥かに上回る重車両の大量走行に起因するところが大きい。前者については、設計段階では考慮されない①RC床版のたわみ変形に起因する主桁上フランジの首振り現象(以下、床版作用という)と②主桁の相対たわみ差に起因する対傾構部材の軸力による応力集中(以下、主桁作用という)が原因であることが明らかにされている²⁾。中でも、床版作用の影響が大きいことが明らかにされている。後者については、移動輪荷重疲労試験の結果、輪荷重の移動に伴って交番するせん断力に対して、RC床版が薄いために疲労強度が低いことが明らかにされている³⁾。

前者の補修方法としては、局所の疲労強度を向上する完全溶込み溶接とTIG処理の併用工法(局部補修工法という)が実用化されている⁴⁾。RC床版の補強工法として実用化されている縦桁増設(1本)によっても床版たわみが低減し、応力低減効果が得られることも明らかになっている(縦桁増設工法という)⁵⁾。しかし、その後の重車両交通量の著しい増大、溶接施工品質のばらつきなどにより、疲労亀裂が再発した事例もあり、上記の補修だけでは十分ではなく、さらなる応力低減を図る必要性があると考えられた。

一方、後者の補修方法としては、①樹脂注入工法、②縦桁増設工法、③上面増厚工法、④鋼板接着工法などが標準化されている⁶⁾。しかし、①は補強効果がほとんど

ない、②はせん断疲労強度を高められない、③は長期の交通規制を必要とするなど問題点がある。

荷重分配対傾構取合い部の疲労補強工法として、縦桁や対傾構のさらなる添加、垂直補剛材上端部の一部増厚取替⁷⁾なども考えられたが、①死荷重増加が少ない方が望ましい、②既設橋の多くはすでに縦桁増設が実施されている、③供用下での作業となる、④荷重分配対傾構を一時的にしても撤去することは問題が多い、⑤床版作用応力の低減効果が期待できるなどから、交通規制の必要がない既存RC床版を下面から部分的に増厚補強する工法(以下、下面増厚工法という)の開発に着手し、①小型実験(下面補強材料の選定と断面性能調査)および実大供試体の②静的載荷実験(補強効果の定量的検討)と③疲労実験(補強効果の耐久性検討)を実施し、基本的問題点を解決した。

本報告は、それらについて報告するものである。

2. 下面増厚工法の概要

2. 1 下面増厚工法の基本的考え方

RC床版を下面から補強する工法としては、下面に網状鉄筋とPPモルタル⁸⁾、アクリル樹脂系モルタルを塗布する補強工法⁹⁾や鋼板接着工法¹⁰⁾などが実施、もしくは研究されている。これらはRC床版の補強を期待したものであり、対傾構取合い部の局部応力緩和を図れる程の床版剛性向上効果はないと考えられた。そこで、本論文では、図-1に示す下面増厚工法を考えた。建築用デッキプレート¹¹⁾を下面補強鋼板として用い、隙間に

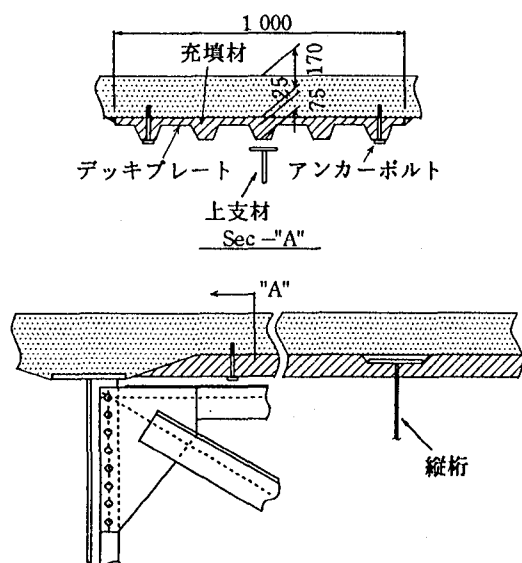


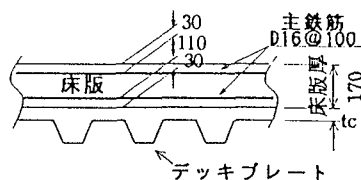
図-1 提案補強工法

表-1 デッキプレート諸元

	形状・寸法	エンボス加工
EV		
EUA		

表-2 試算結果

型式	鋼板厚 ts(mm)	I*(cm ⁴), I/Irc*(%)			重量(kg/m ²)*		
		tc=1.0***	tc=2.0***	tc=3.0***	tc=1.0***	tc=2.0***	tc=3.0***
EV50	1.2	59985	6431.4	68928	21.3	21.6	21.8
		207.8	222.8	238.8			
	1.6	69056	74656	80629	17.5	18.0	18.4
EUA	1.2	77468	83920	90779	23.8	24.6	25.3
		280.8	304.2	329.0			
	1.6	90821	99017	107737	7.6	20.0	20.8
		329.0	358.0	391.0			



付図：デッキプレート
添加すき間tc(cm)

*：下面増厚後の床版の断面2次モーメント，**：下面増厚前の床版の断面2次モーメント28.867 (cm⁴)

：付図参照，*：単位面積当たりの重量，充填材は2350 (kg/m³)として算出した

注入材を充填することによって既存RC床版の剛性向上を図るものである。

2.2 下面補強鋼材の検討

下面補強鋼材としては、

- ① "JIS G 3352 デッキプレート"¹¹⁾に規定されるデッキプレート
- ② 建築合成スラブ用デッキプレート
- ③ 橋梁RC床版用埋め殺し型枠
- ④ 曲げ鋼板

などがあげられた。しかし、次の点を考慮して、建築合成スラブ用デッキプレート（以下、デッキプレートという）を用いるのが適していると考えられた。

- ①材料入手が容易である。
- ②充填材との高い付着強度が期待できる。
- ③端末形状が既存RC床版のハンチ部形状(1:3)と同じ形状のものが製品化されている。

表-1は、デッキプレートの一例である¹²⁾。

次に、図-1に示すイメージに従って下面増厚した場合

合の床版剛性と死荷重増加を試算した結果を表-2に示す。RC床版とデッキプレートが完全に合成できれば、約2倍以上の剛性向上が期待でき、使用するデッキプレートは小型軽量のものでよいことがわかる。しかし、疲労補強効果は、剛性向上程度に比例する。そこで、実験では、表-1に示したデッキプレートのうちから最も断面の大きなEUA(1.6mm)を用いるのを基本とした。また、補強による死荷重増加を考慮して、増厚範囲を対傾構取合い部の1m範囲に限定することとした。

2.3 アンカーの検討

鋼板接着工法の場合、約400(mm)ピッチ(最大500mmピッチ)でアンカーが設置される。アンカー設置の目的は、①施工時の鋼板仮固定、②樹脂注入圧による鋼板たわみの防止、③補強後における床版疲労進行遅延の期待、④余剰耐力の期待、⑤床版落下の防止であり、アンカーは強度計算に考慮していない。本下面増厚工法においても、充填材の付着力のみによって既設RC床版と補強部材が合成されることが望ましく、施工性からも、アンカー本数は、少ない方が望ましい。

(1) 無補強のO_r供試体は約3(tonf)で曲げひび割れが入り始めて約16(tonf)で曲げ破壊したのに対し、一体打設したH₄供試体は約6(tonf)まで合成効果が見られた。その後、約15(tonf)でデッキプレートがコンクリート端部から剥離し、約26(tonf)で曲げ破壊した。

(2) 無収縮モルタルを注入したH21供試体は、無収縮モルタルの付着力により約9.4(tonf)まで合成効果が見られた。その後、デッキプレートがコンクリート端部から剥離し始め、最終段階ではフランジ縁から既存コンクリート内部に向かって割れが生じ、約22(tonf)でせん断破壊した。

(3) H22供試体は、ずれ止めの併用により、約12(tonf)まで合成効果が見られた。その後、デッキプレートとコンクリートが端部から剥離し始めたが、最終段階ではフランジ縁から既存コンクリート内部に向かって割れが生じ始め、約26(tonf)でせん断破壊した。

(4) エポキシ樹脂モルタル(C社製品)を注入したH3供試体は、約3(tonf)からデッキプレートとエポキシ樹脂モルタルが剥離し始めたが、最終段階ではコンクリート端部から約28(tonf)でせん断破壊した。

(5) エポキシ樹脂モルタル(B社製品)を十分に注入できなかったH11供試体は、低荷重段階で支間中央付近のコンクリートに曲げひび割れが発生したが、最終段階までデッキプレートとエポキシ樹脂モルタルが剥離せず、約36(tonf)でせん断破壊した。

(6) エポキシ樹脂モルタル(B社製品改良型)を注入したH12供試体は、約10tonfからデッキプレートとエポキシ樹脂モルタルが一部で剥離したが、約34(tonf)まで合成効果が見られた。最大荷重後は、デッキプレートとエポキシ樹脂モルタルが端部で剥離して、図-6(1)に示すように、断面ひずみが重ね梁状になり、曲げ破壊とせん断破壊が混在した破壊となった。H11供試体に比べてたわみが大きいのは、弾性係数の差によると考えられる。

(7) 下面補強鋼板としてEVを用い、エポキシ樹脂モルタル(B社製品改良型)を注入したH13供試体も、低荷重からデッキプレートとエポキシ樹脂モルタルが剥離し、曲げひび割れが発生したが、約26(tonf)まで合成効果が

載荷位置

800

500

Q

A

A

シーラ材

100

400

100

3@200=600

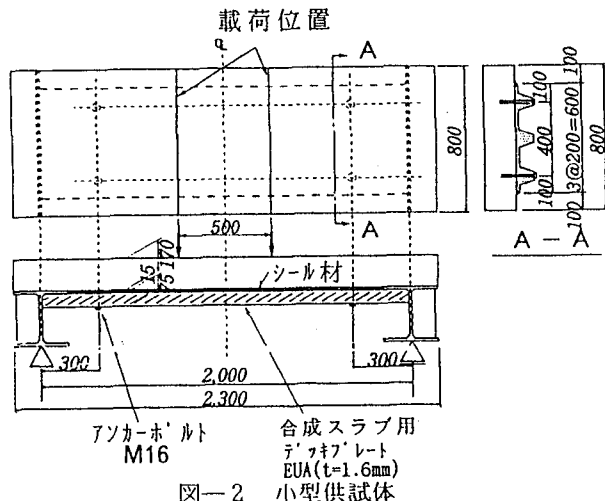
800

A - A

アソカーボルト M16

合成スラブ用
デッキプレート
EVA (t=1.6mm)

図-2 小型供試体



マーク	デ「キ」レ「ト」	充填材	充填材の弾性率 (kgf/cm ²)	備考
Or	なし	なし	——	無補強
H11	EUA	エポキシ樹脂モルタル B社製品	39,300	粘性大
H12	EUA	エポキシ樹脂モルタル B社製品改良型	18,000	振動注入 粘性小
H13	EV	エポキシ樹脂モルタル B社製品改良型	18,000	粘性小
H21	EUA	無収縮モルタル A社製品	278,000	
H22	EUA	無収縮モルタル A社製品	279,000	ずれ止め併用 振動注入
H3	EUA	エポキシ樹脂モルタル C社製品	120,000	
H4	EUA	コンクリート	——	一体打設

見られた。最終段階ではデッキプレートとエポキシ樹脂シ樹脂モルタルが剥離し、せん断破壊した。

(8) 全ての供試体共に、アンカーボルトには、最終段階まで軸力変化は生じなかった。

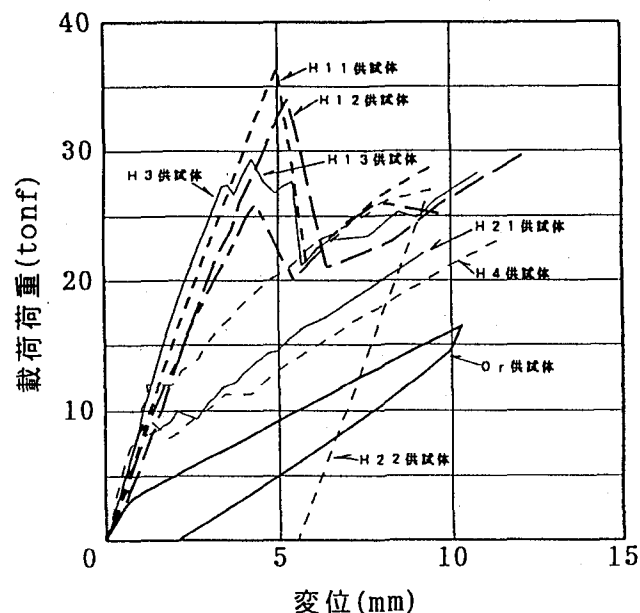
したがって、下面補強材料としては、デッキプレート(EUA, 1.6mm)を用いることとし、

① デッキプレートにずれ止めを用い、安価な無収縮モルタルを注入する方法(H22供試体の諸元)

② 流動性を高めたエポキシ樹脂モルタル(B社製品改良型)を注入する方法(H12供試体の諸元)

の両者共に適していると判断されたので、実大実験では両者を用いることとした。

4. 実大実験

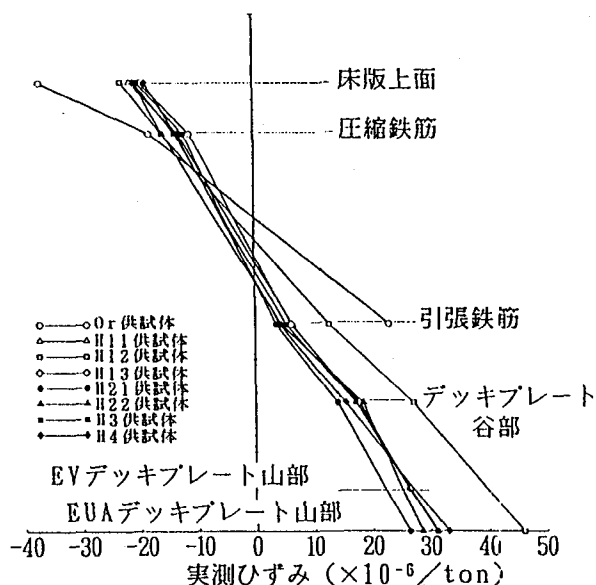


図一4 支間中央の荷重変位線

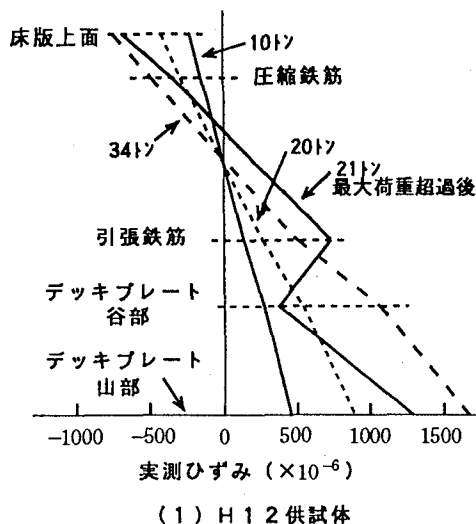
4. 1 実験方法

図一7に実大供試体の一般図を示す。供試体形状は、東名高速道路の鋼1桁橋の主桁間隔、RC床版厚を分析して管理数量の多い形状とした。充填材は、G1・G2間は無収縮モルタル、G2・G3間にはエポキシ樹脂モルタルとし、対傾構の取合い部に幅1mで充填した。実験対象構造系は縦桁増設前後と下面増厚後の3段階とし、補強効果を比較した。

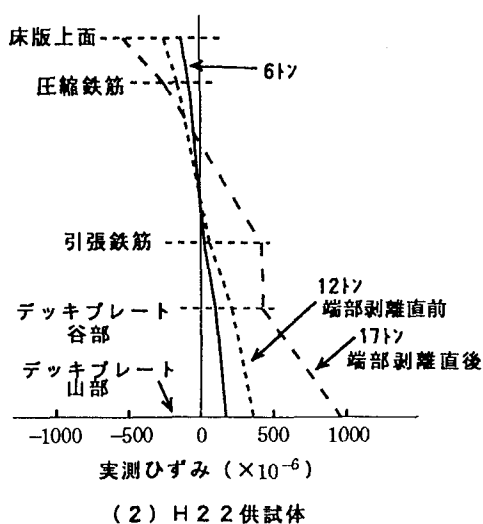
静的荷重試験は、図一8に示す荷重位置とした。すなわち、T荷重(2×10ton, ただし、荷重間隔は2m間隔とした)を、横断面方向には3ケース(①～③)、橋軸方向に5ケース(中央対傾構S2断面上, 補強材端部直上および一般部の合計15ケース)荷重した。ただし、下面増厚後は、各主桁間で充填材が異なるため、中央対傾構S2断



図一5 中央断面ひずみ分布比較



(1) H12供試体



(2) H22供試体

図一6 中央断面のひずみ分布変化例

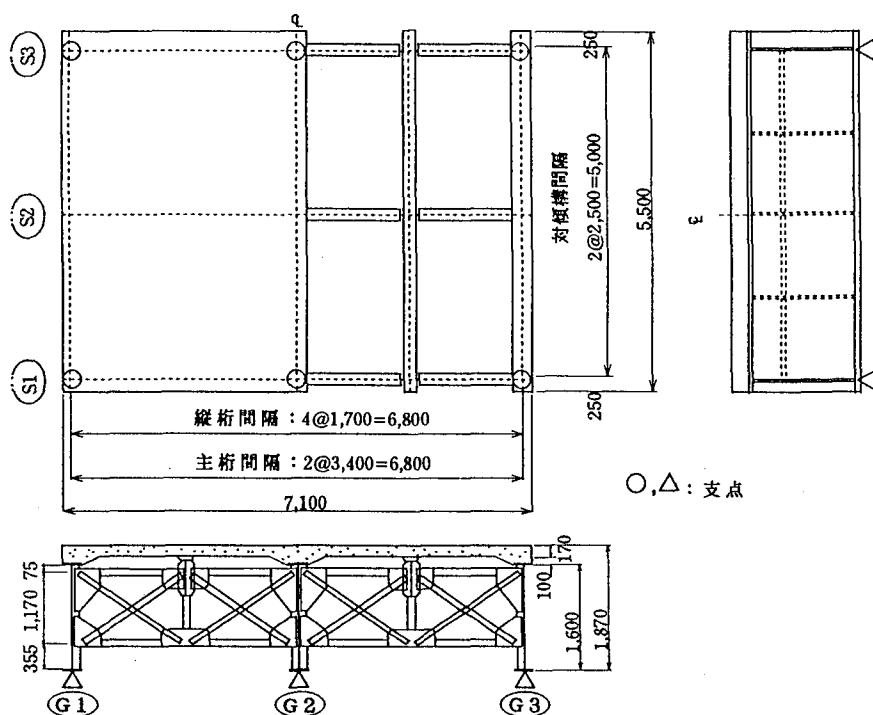


図-7 実大供試体一般図

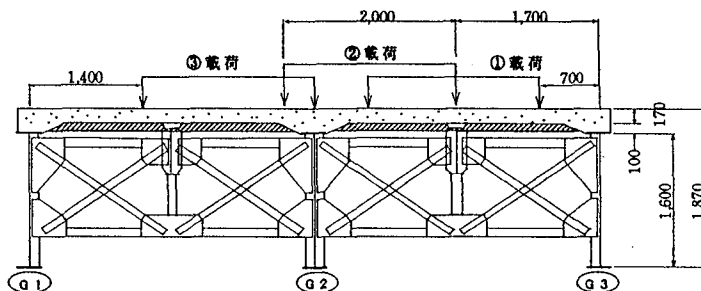


図-8 載荷位置

面上に限って①～③載荷の対称載荷を行った。

静的載荷試験終了後、G1・G2間およびG2・G3間の中央対傾構S2断面上について①載荷と同じ載荷条件（ただし、荷重振幅は28ton）で200万回の繰返し載荷を行い、補強効果の耐久性を調査した。

なお、縦桁増設および下面増厚に際して、RC床版を劣化させることは、実験の都合上行っていない。

4. 2 実験結果

実験結果を以下にまとめる。

(1) 床版たわみ

図-9にたわみ分布を載荷条件別に比較して示す。G3主桁垂直補剛材上端部の応力が最も高かった①載荷の場合、G2、G3間のたわみ量は、縦桁増設により0.26mm低減し、さらに下面増厚によって0.39mm低減した。これに伴って、G3桁側の床版たわみ角は、新設時に対し

て、縦桁増設により66%に、下面増厚により30%に低減した。他のケースの場合、たわみ量は低減したもの、片側の載荷位置が縦桁上あるいは主桁上に配置されるため、床版たわみ角ではあまり変化がなかった。

(2) 垂直補剛材先端の鉛直方向応力

図-10は、各主桁垂直補剛材上端部の鉛直方向ひずみの橋軸直角方向の影響線である。ここで、 L_z はG3桁と載荷位置との距離を表す。床版たわみ角の低減程度が大きい部位(G3桁取合い部)で、縦桁増設により約70%に、下面増厚により約36%に応力が低減できることが明らかになった。ただし、輪荷重が縦桁や主桁の直上近傍に載荷される場合、本工法による効果は小さい。増設縦桁に力が流れているためであると考えられる。

(3) 床版ひずみ

図-11に載荷直下の主鉄筋断面のひずみ分布の一例を示す。小型実験結果と同様、完全に合成されていることがわかる。また、図-12に主鉄筋および配力筋のひずみ

分布を例示する。補強前に高いひずみが実測された部位は全てひずみが低下している。本下面増厚工法は、床版に悪影響を及ぼすことはないと判断される。

(4) 上支材ガセット取合い部の局部ひずみ

図-13は、上支材ガセット取合い部に生じる疲労損傷に対する本工法の効果をみたものである。縦桁増設によって増加したガセットの局部ひずみは、本下面増厚工法により新設時と同程度までひずみを減少するという2次の効果があることが明らかになった。

(5) 充填材の比較

無収縮モルタル側に载荷したケースでは、新設時・縦桁増設時の载荷を行わなかったため低減率は比較できないが、下面増厚後エポキシ樹脂モルタル側対称载荷ケースとほぼ同様であった。

(6) 繰返し载荷による各部のひずみ変化

①载荷およびその対称位置について、200万回の繰返し载荷を行い、各部のひずみ変化を計測したが、いずれの部位も変化がなかった。

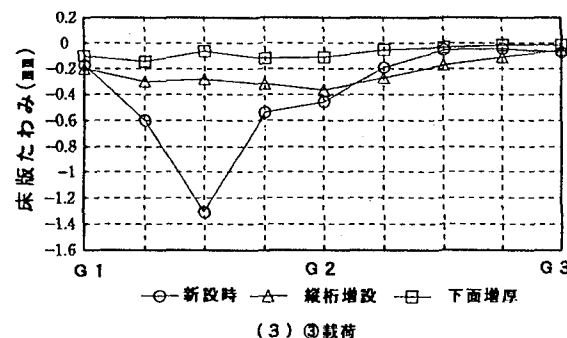
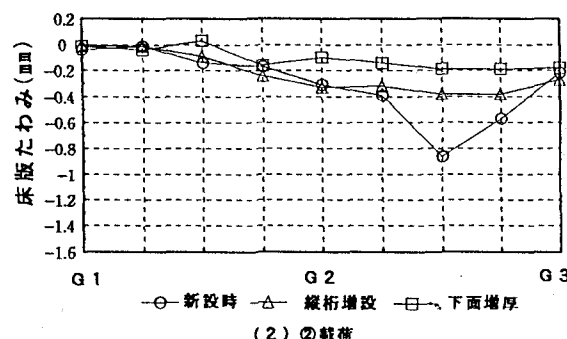
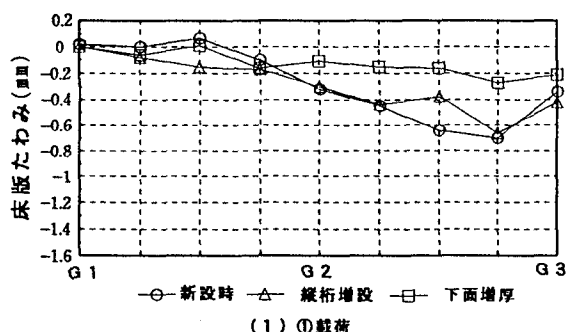


図-9 中央対傾構S2断面におけるたわみ分布 (P=20tonf)

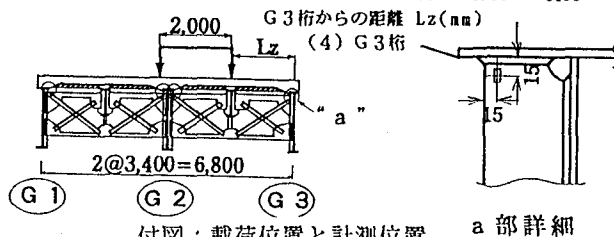
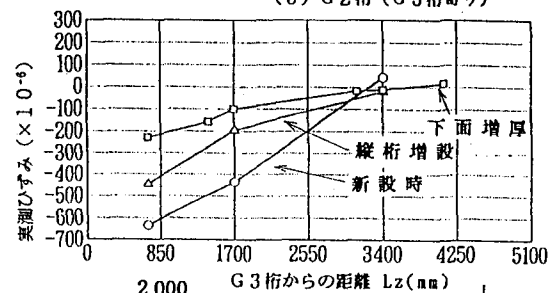
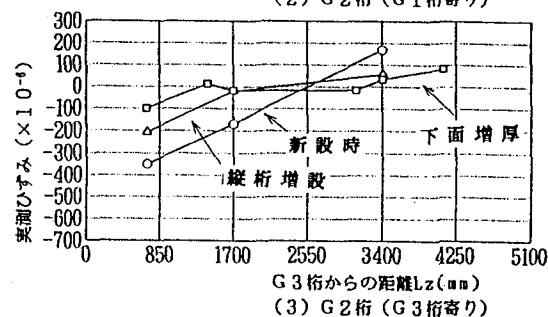
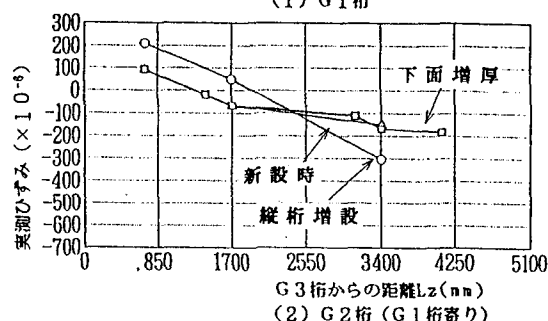
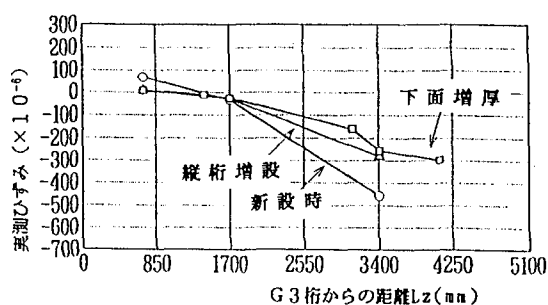
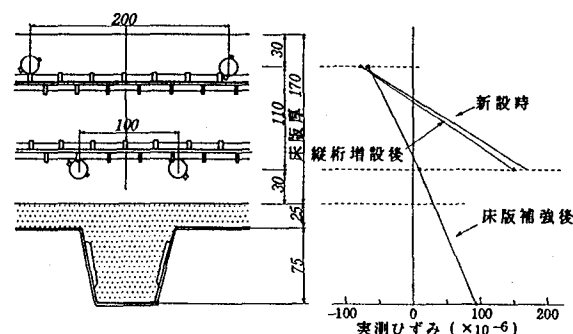
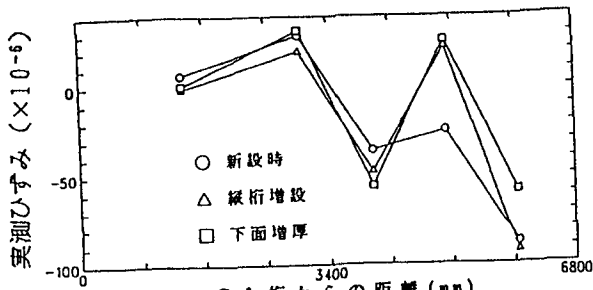
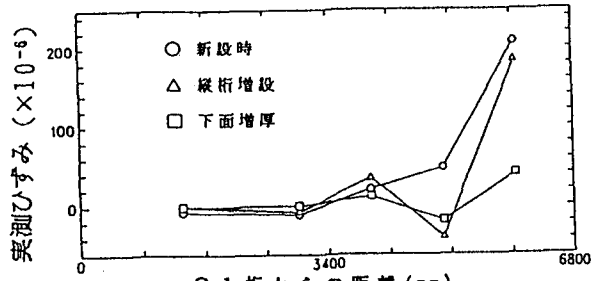


図-10 鉛直ひずみの橋軸直角方向影響線 (P=20tonf)

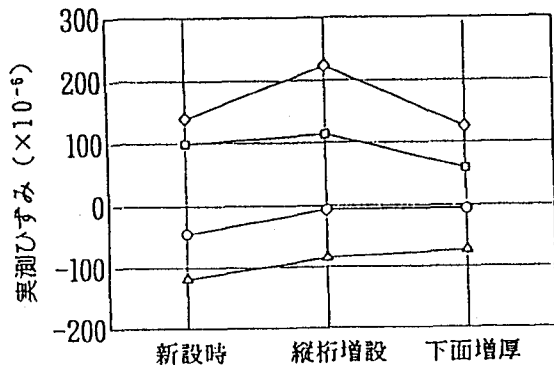
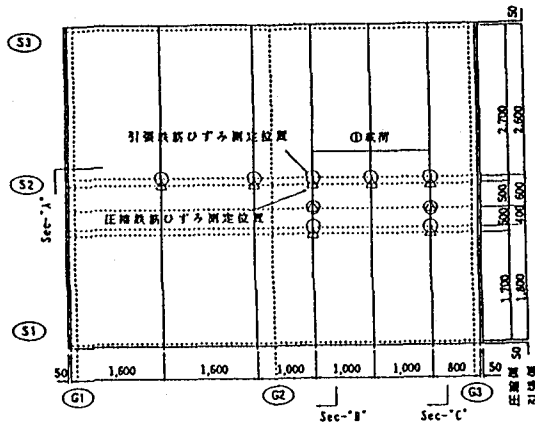




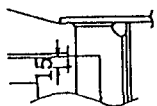
(1) Sec-"A" 圧縮側主鉄筋



(2) Sec-"B" 引張側主鉄筋

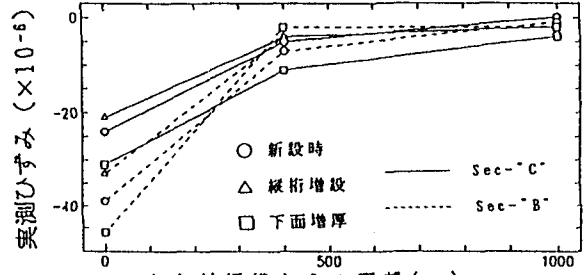


(1) ①載荷

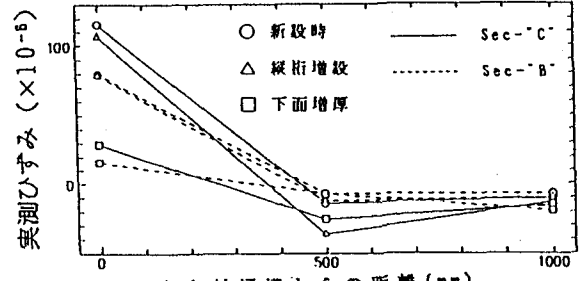


付図：計測位置

- G1桁
- △ G2桁 (G1桁寄り)
- G2桁 (G3桁寄り)
- ◇ G3桁

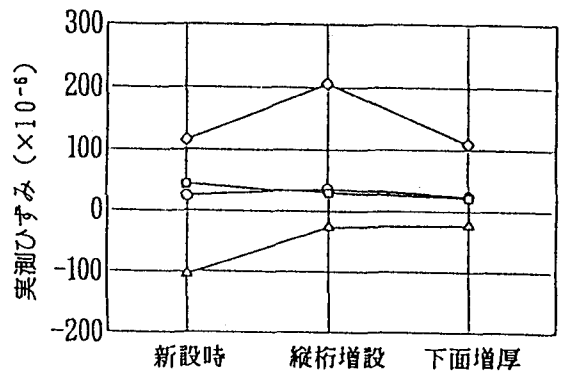


(3) 圧縮側配力鉄筋

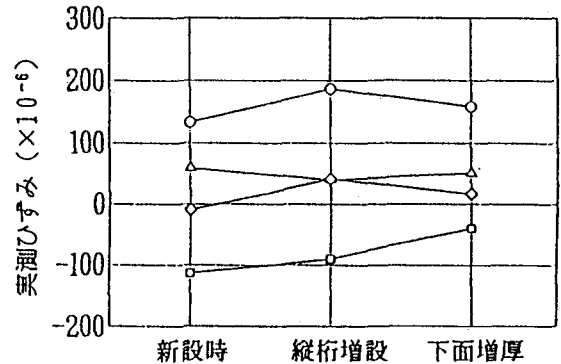


(4) 引張側配力鉄筋

図—12 主鉄筋および配力筋のひずみ分布
(①載荷, $P=20\text{tonf}$)



(2) ②載荷

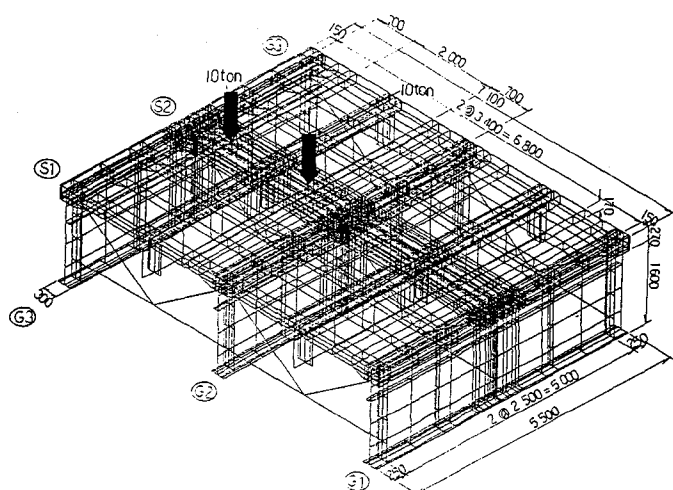


(3) ③載荷

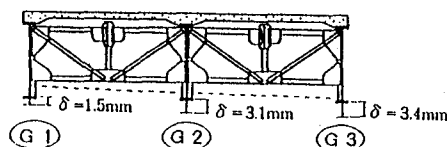
図—13 上支材ガセット取合い部の局部ひずみ
($P=20\text{tonf}$)

5. 実橋における効果の試算

以上のとおり、本工法は床版作用による応力を低減できることが明らかとなった。しかし、実橋では、床版作用と主桁作用が共に作用する。そこで、実大供試体の3次元F. E. M. 解析を行って床版作用と主桁作用の応力を求めると共に、実大供試体と同じ諸元の実橋における実測たわみ¹³⁾を用いて実橋における主桁作用による応力を試算し、実橋における補強効果について検討した。図一14に解析モデルと解析方法を示す。下面増厚に対しては、中央対傾構の取合い部の幅1mの床版剛性を3倍向上させた。床版作用による応力は、主桁の鉛直方向変位を拘束し、①載荷と同じ荷重を載荷して算出した。



解析ケース	載荷条件	境界条件
実大供試体	床版直接載荷	主桁鉛直方向拘束なし
解析	床版直接載荷	主桁鉛直方向拘束あり
実橋解析	なし	主桁鉛直方向強制変位 (下図参照)



図一14 解析モデルと解析方法

表-4 解析結果(kg/cm²)

解析項目		補強前 新設時	補強後	
			縦桁増設	下面増厚
実測値		-1331	-938(70)	-480(36)
実大供試体 解析値	床版作用	-800		-327.6(39)
	主桁作用	-40		-40(100)
	合計	-840		-367.6(43)
実橋解析値	床版作用	-800		-327.6(39)
	主桁作用	-60		-60(100)
	合計	-860		-387.6(45)

※カッコ内は補強前に対する比率(%)

主桁作用による応力は、①載荷における各主桁の実測たわみを鉛直方向の強制変位として与えて算出した。実橋の実測たわみは、支間30mの実橋における20ton車両の載荷試験結果¹³⁾に基づく主桁たわみを用いて同様に解析した。

解析結果から、G 3 主桁垂直補剛材上端部の鉛直方向応力を表-4 にまとめて示す。

実大供試体についての実測値と解析値は異なるので、比率で比較する。実大供試体の補強前の解析結果に示すように応力比率は床版作用：主桁作用＝95：5と、床版作用がほとんどである。このうちの床版作用分が39%に低減されるから、解析では下面増厚により合計応力は43%に低減される結果となった。実験値に比べて比率が若干高いのは、下面増厚モデルが異なるためであると考えられる。一方、実橋の場合、主桁作用による応力比率は7%とわずかであった。たわみ量は大きいものの、たわみ差が小さいためであると考えられる。したがって、実橋においても、実大実験と同程度の補強効果が期待できると考えられる。

6. 1 まとめ

以上、鋼Ⅰ桁橋の主桁と対傾構取合い部の応力低減を図る工法として、RC床版の下面増厚工法を開発し、実橋における補強効果を試算した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 下面補強鋼板としては、入手の容易さ、付着強度向上の期待などから建築合成スラブ用デッキプレートが適している。

(2) 充填材は、エポキシ樹脂モルタルと無収縮モルタルが適している。ただし、無収縮モルタルを用いる場合、ずれ止めの併用が望ましい。

(3) アンカーボルトは、施工時におけるデッキプレートの仮固定および落下防止として、今回の小型実験で行ったような位置に配置すればよい。

(4) 実大実験の結果、下面増厚により垂直補剛材先端の鉛直方向応力は、新設時に比べて約36%に低減できる。特に、輪荷重が主桁間に配置され、床版たわみ角が大きい部位に高い効果が期待できる。実橋の場合も、約45%に応力を低減することが可能である。

(5) 縦桁増設工法は、上支材ガセット取合い部の応力を増加させるが、本下面増厚工法により新設時と同程度まで低減できる。

(6) 本下面増厚工法がRC床版の鉄筋応力に影響を及ぼすことはない。

なお、本下面増厚工法は、アンカーボルトの施工、デッキプレートの設置および充填材の注入作業など、床版下面からの上向き施工であるが、これらは特別な技術を必要とせず、また、デッキプレートなどの材料、あるいは充填材の注入ポンプなどの施工設備は、軽量で持ち運

びが容易なものである。本工法は、施工性においても優位な点が多いと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路公団東京第一管理局・(社)建設機械化研究所：構造物変状対策工検討報告書（供用下における鋼橋の補修方法の検討），1986.3
- 2) 寺田博昌・溝口博考：主桁・対傾構取合部局部応力の検討，横河橋梁技報 第15号，pp19～pp25，1986.1
- 3) 阪神高速道路・阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性，pp18～pp81，1991.12
- 4) 三木千寿・竹之内博行・森 猛・大川征治：主桁と対傾構との取合部の疲労損傷に対する補修方法の提案，構造工学論文集Vol. 34A，pp543～pp550，1988.3
- 5) 日本道路公団東京第一管理局・(社)建設機械化研究所：構造物変状対策工検討報告書（供用下における鋼橋の補修方法の検討），1987.3

- 6) 日本道路公団：維持修繕要領 橋梁編，第3編コンクリート構造物 [I] 鋼橋鉄筋コンクリート床版，pp4-1～pp4-pp128，1988.5
- 7) 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，pp129～pp162，1990.6
- 8) 永井健・小玉克巳・佐藤貢一：プレキャスト床版を下面増厚したRC床版の補強効果，土木学会第48回年次講演会/1-63，pp274～pp275，1993.9
- 9) 大阪工大・摂南大学・八幡工学実験場構造実験センター：アクリル樹脂コンクリートと補強筋による床版増厚補強工法の開発研究報告書，1992.3
- 10) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領 第2部 コンクリート構造物，PP3～ pp31，1990.6
- 11) JIS, G 3352, 1991.10
- 12) 日鐵建材工業株式会社：日鐵Eデッキフロア，1989.8
- 13) 日本道路公団東京第一管理局・(社)建設機械化研究所：構造物変状対策工検討報告書（供用下における鋼橋の補修方法の検討），1986.3

（1994年9月14日受付）