

立体トラス型ジベルを用いた合成床版橋の 設計・施工と載荷実験

DESIGN, CONSTRUCTION AND FIELD TEST OF THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB BRIDGE
WITH PYRAMIDAL SHEAR CONNECTORS

太田俊昭* 日野伸一** 今井富士夫*** 坂田隆博※ 笹山 仁※※

By Toshiaki OHTA, Shin-ichi HINO, Fujio IMAI, Takahiro SAKATA and Hitoshi SASAYAMA

A new type of steel-concrete composite slab system with pyramidal shear connectors has been developed by authors. This system was first applied to the skew composite hollow slab bridge on Route 3 of the National Highway in 1987. The field test was carried out in order to confirm the safety and to clarify the structural properties of the composite slab bridge. The construction and the field test give us the following informations. (1)The period of the field construction can be considerably shortened by assembling the steel system. (2)The concrete can be cast without any staging because the naked steel structure has high flexural and torsional rigidity. (3)This composite slab system is a favorable structure as a skew slab bridge.

1. まえがき

近年、橋梁床版を対象に各種形式の合成床版が開発されており、施工実績もあげつつある。著者らは、ピラミッド状のずれ止めを介してコンクリートと鋼板の一体化を図った合成版構造(TSC合成版と称する)の開発を進めており、ずれ止めや合成部材としての基本的力学特性については一応の成果を得ている(1)~(5)。

TSC合成版構造の特徴は、コンクリート打設前の鋼板構造が立体トラス構造として機能するので、型枠や支保工を不要とするような耐荷力や曲げ剛性を保有すること、合成後にはトラス斜材のずれ止めおよびせん断抵抗の相乗効果を期待できることである。また一方で、打設前の鋼板構造の製作はすべて工場で行われるため、高い品質と精度が保証されとともに、現場作業の省力化、工期短縮も可能となる。

以上のような特徴を有するTSC合成版構造が、福岡市近郊の国道3号筑紫野バイパスに初めての中空斜合成床版橋(橋名:原田緑道橋)として計画、施工された。本橋は、OFFランプ部の立体交差の桁下

*	工博	九州大学教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
**	工博	九州大学助教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)
***	工博	宮崎大学助教授	工学部土木工学科	(〒889-21 宮崎市学園木花台西1丁目1番)
※		佛建設技術研究所福岡支社技術第2部	(〒810 福岡市中央区渡辺通2丁目1番10号)	
※※		石川島建材工業佛第2事業部	(〒104 東京都中央区八重洲2丁目6番21号)	

本論文は、現行の道路橋示方書⁶⁾の規定ならびに著者らが先に実施した一連の室内実験の結果を基に行った本橋の設計および施工の概要について述べるとともに、この種の合成床版橋の合理的な設計法の確立に有用な資料を得る目的で供用開始前に実施した実橋載荷実験の結果について報告するものである。

ずれ止めにトラス型ジベルを採用したのは、本ジベルはずれ止め効果はもちろんのこと、ジベル頂部を太径異径鉄筋で連結すれば立体トラス構造となるため、合成以前の鋼板構造に高い曲げ剛性、ねじり剛性も期待できるからである。すなわち、コンクリート打設時における鋼重やコンクリート重量を鋼板構造自体で維持できることになり、本橋では支保工を使用する必要がなかった。この後者の効果は、従来のスタッドジベルなどには期待できない。図-2は断面の詳細図である。本橋はコンクリートの引張り域に発泡スチロールを埋設して、中空にすることにより自重の軽減を図っている。

合成床版橋の設計照査は、コンクリートの硬化前の鋼構造（以下、架設系と称す）とコンクリート硬化後の合成構造（以下、完成系と称す）の2つの系について行う必要がある。本橋でのこれらの照査のための構造解析には、直交異方性版モデルと直交斜格子モデルによる有限要素法が用いられた。これら2つの解析結果はほぼ一致した。本論文では、トラス斜材のせん断力やねじりモーメントに対する力学性状についても言及するため、これらの考察に便利な直交斜格子モデルを取り扱うことにする。図-3に直交斜格

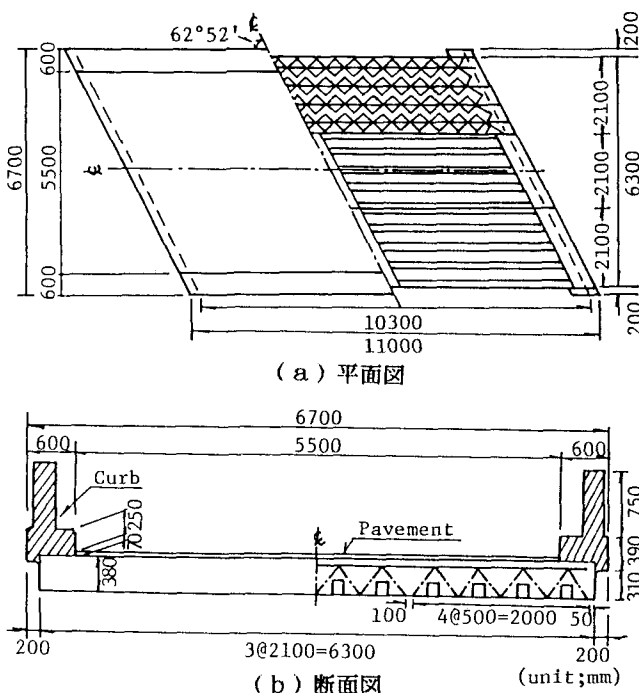


図-2 断面詳細図

子モデルを示す。

版構造を格子モデルに置換する場合、格子桁の各部材の剛性が問題となる。本解析では、図-3に示すように、計算容量を小さくするために、実際のトラス配列よりも少ない部材のものを用いた。このときの各部材の剛性値は、以下のようにして算定した。

まず、橋軸方向については立体トラス1列のトラス構造としての剛性値を算定し、これを単位幅あたりに換算する。橋軸直角方向についても同様に、単位幅あたりのものを予め算定する。次に、版を格子モデルに置換するための各部材の有効幅を定める。そして、その有効幅と単位幅との比率を先に求めた単位幅あたりの剛性値に掛けて得たものを、格子桁の各部材の剛性値とした。表-1は、2つの系の単位幅あたりの剛性値である。

以下に、これらの基準値の算定法を概説する。

①架設系

橋軸方向の立体トラス1列の構造は図-4に示すものとなる。この構造の曲げ剛性 I_N は、底部鋼板と上弦材の断面積を用いて、次式のように表わされる。

$$I_N = A_s (h - \delta)^2 + A_p \delta^2 \quad (1)$$

ここに、 $\delta = A_s h / (A_s + A_p)$ で底部鋼板の板厚中心からトラス図心までの距離、 h は立体トラスの高さ、 A_s 、 A_p は、それぞれ上弦材、底部鋼板の断面積である。

また、ねじり剛性 J_N は、斜材を薄板に置き換えた準閉断面を想定すれば、次式となる。

$$J_N = 4 F^2 / (2b/t_{eq} + B/t_p) \quad (2)$$

ここに、 $F = Bh/2$ 、 B と t_p はそれぞれ底部鋼板の幅と板厚、 b は立体トラスを中空三角形断面に置き換えた場合の斜板の板幅、 t_{eq} は斜板の換算板厚である。

図-5に示すように、ねじりモーメントによる斜材の δ と準閉断面の斜板の δ が等しいものと仮定すると、換算板厚 t_{eq} は次式で与えられる。

$$t_{eq} = (E/G) A_p (ab/d^3) \quad (3)$$

ここに、 E 、 G はそれぞれ鋼材のヤング係数とせん断弾性係数、 d は斜材の長さ、 a は橋軸方向のトラスパネルの半区間である。

ここでは、トラス高さは部材の長さに比べて十分小さいので、せん断変形の影響は無視できるものとした。

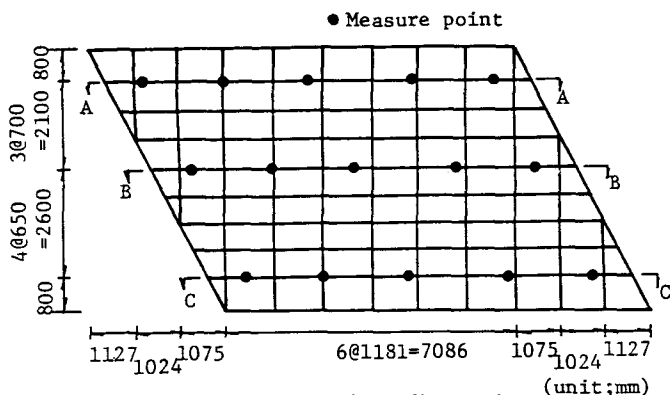


図-3 直交斜格子モデル

表-1 単位幅あたりの剛性値

	架設系		完成系	
	主桁	横桁	主桁	横桁
曲げ剛性 (EI)	443	0.128	1378	1226
ねじり剛性 (GJ)	34.3	0.196	695	7.80

注) 完成系は鋼換算、単位: $\times 10^6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$

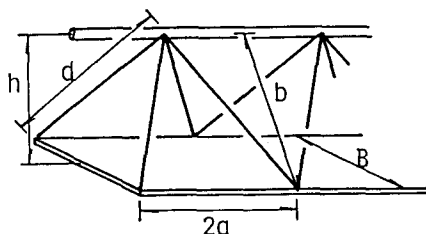
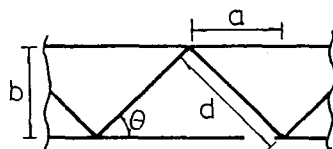
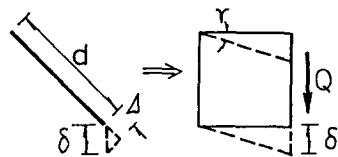


図-4 立体トラス形状



(a) 斜材の形状



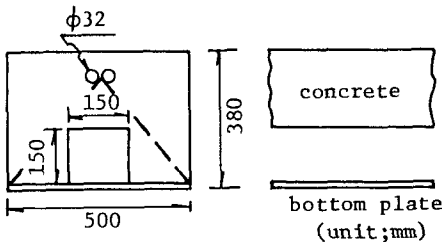
(b) 斜材と板の力学モデル

図-5 斜材と換算板のせん断変形

次に橋軸直角方向についてみると、立体トラスの頂部間には上筋が配置されるものの、強固な連結とはならない。よって、外力に対する抵抗要素は底部鋼板のみと考えられるので、橋軸直角方向の単位幅あたりの剛性は底部鋼板の剛性となる。

②完成系

完成系での橋軸方向の立体トラス1列に相当する断面は、図-6（a）のような中空箱形断面となる。この断面の曲げ剛性は、通常の鉄筋コンクリート構造の剛性算定法に準拠して、コンクリートの引張り域の影響を無視して算定した。またねじり剛性の算定では、断面腹部のねじり抵抗はすべてコンクリートが負担するものと考えて、斜材の影響は無視した。



(a) 橋軸方向断面 (b) 橋軸直角方向断面
図-6 完成系断面

さらに、橋軸直角方向の断面は、図-6（b）のように、設計が安全側となるように考えて、発砲スチロールが配置されている中間部はすべて空間であると仮定した。この仮定は、曲げ剛性には影響しないが、ねじり剛性は実際よりも低減した値となる。

これらの剛性はすべて鋼換算値を用いた。換算の際の鋼とコンクリートとの弾性係数比は、次式に示すように、曲げ剛性についてはヤング係数比を、ねじり剛性に関してはせん断弾性係数比を使用した。

$$\left. \begin{aligned} n_b &= E_s / E_c \quad (\text{曲げ剛性換算に対して}) \\ n_t &= G_s / G_c \quad (\text{ねじり剛性換算に対して}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、添字の s、c は鋼およびコンクリートを表す。

(2) 設計の考え方

本橋の設計で考慮された荷重は以下のとおりである。

①架設系：鋼板や鉄筋などの鋼重、コンクリート重量、コンクリート打設に伴う作業荷重および打設時の衝撃

②完成系：舗装、高欄、地覆および活荷重

これらの荷重に対する主要部材の架設系および完成系における最大設計応力度の照査結果を表-2に示す。架設系における上弦材と圧縮斜材の許容応力度は、道路橋示方書に定められた軸座屈を考慮した値である。斜材は、コンクリート硬化後は断面力の抵抗に寄与しないと考えた。一方、設計における完成系での鋼とコンクリートの弾性係数

表-2 部材の使用材料と応力度照査

比は、道路橋示方書を参考にして、 $n_b=15$ 、 $n_t=13.3$ を用いた。また、これまでの室内疲労実験で、底部鋼板とトラスとを直接溶接した場合には、SS41級の鋼板で 200万回疲労強度がおよそ720kgf/cm²と低減することが明らかとなっている⁷⁾。よって、今回の設計ではこれらを直接溶接するのではなく、補強と溶接点の点在をなくす意味から、

	使用材料	架 設 系		完成系	総 計	
		設計値	許容値		設計値	許容値
上 弦 材	SD30 D32×2	1474	1628	323	1797	1800
底部鋼板	SS41 t=9	472	1400	713	1185	1400
斜 材 (圧縮) (引張)	SS41 FB 12×25	828	1142	—	828	1142
		702	1400	—	702	1400
コンクリート	300	—	—	81	81	100

注) 単位は、強度についてはkgf/cm²、寸法についてはmmである。
コンクリートの使用材料の項は設計基準強度を示している。

その間に平鋼を挿入した。さらに、より安全性を考慮して、本橋では完成系での底部鋼板の（活荷重に加えて、合成後の死荷重に対する）発生応力度を 700kgf/cm^2 程度となるようにした。

本橋の活荷重に対するたわみは 6.7mm となり、スパン比としては約 $1/1500$ と極めて小さいものとなった。

2.3 製作および施工

本橋の特徴の1つは、現場製作部分を極力少なくし、工場製作によるプレハブ化を行うことにより、品質の向上と現場作業の短縮を図ったことである。実際、初めての実橋製作であるということから、工場製作には材料準備から組立終了まで3カ月の期間を要したものの、現場工事ではすべての工程を1カ月半程度で終わることができた。特に架設系の取り付けはトラッククレーンによる一括架設で行われたので、ほぼ2時間で終了した。

これらの工程を紹介すれば、次のようになる。

(1) 工場製作

まず斜材を1要素ごと鋼板よりガス切断にて切り出す（図-7（a））。これらと上弦材となる異径鉄筋を平面上でトラスとなるようにすみ肉溶接にて接合する（図-7（b））。

次いで中央で 50mm のキャンバーとなるように治具固定された底部鋼板に立体トラスとなるように溶接する。このとき、斜材と底部鋼板の間には $32\text{mm} \times 12\text{mm}$ の平鋼が配置された（図-7（c））。しかしながら、溶接ひずみは大きく、許容値 $\pm 5\text{mm}$ 内に納めるのは困難で、結果的にはすべて+側に上越し気味に製作された。最後に、重量軽減を図るための発泡スチロールを設置した。発泡スチロールと鋼板の接触面には鋼板の腐食を防ぐため、タールエポキシ樹脂を塗布した。この発泡スチロールの挿入は、コンクリート厚に換算して、 4.5cm の低減を図ったことになる。

この鋼板構造は、現場へのトラック移送を考慮して、橋軸方向に3パネルに分割して製作した。現場移送には高床トレーラを使用したが、3つのパネルを上乗せすることで、1台のトレーラで移送できた。

(2) 現場工事

高床トレーラにて一括移送された鋼板構造は、現場製作ヤードにて3パネルを突合せ溶接にて一体化し、上筋を配置したのち、トラッククレーンにて一括架設した（写真-1）。所定位置への据え付け完了後、

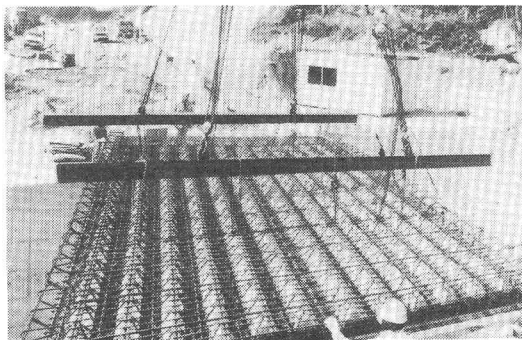


写真-1 一括架設風景

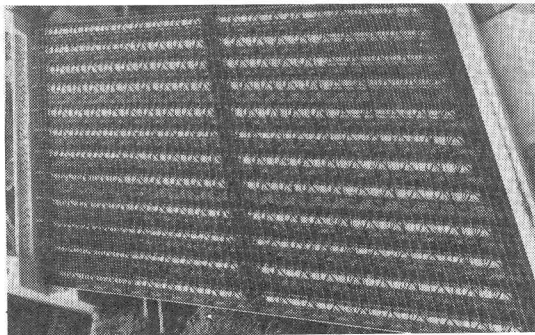
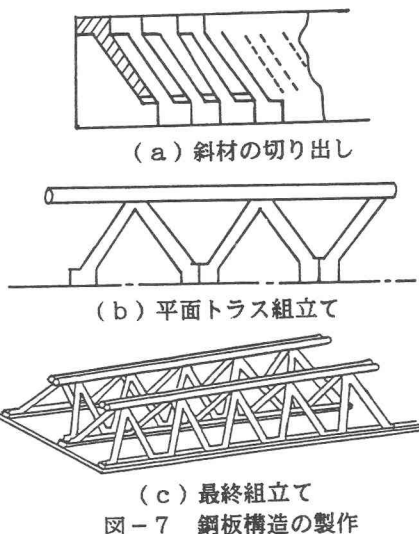


写真-2 架設終了状況



橋台とアンカーボルトにて固定した。写真-2は架設終了状況である。その後、側面型枠を設置し、コンクリートを2層に分け打設した。通常の床版では配筋中に作業荷重によってかぶりが増減し易いが、本橋はそれらの主要な部分が溶接にて強固に一体化されているので、この管理は容易であった。また、鋼板構造は高い剛性を有しているので、支保工を設置する必要はなかった。さらに、コンクリート打設は橋梁全般に亘って一度になされるので、橋面上は継目のないものとなっている。

3. 実橋載荷試験による検討

3. 1 実験概要

実験は、設計との比較ができるように架設系と完成系について行った。架設系の実験では、コンクリート打設前後の鋼板構造の各要素のひずみと橋のたわみの変化を計測した。完成系では、総重量20tfのダンプカー2台による載荷試験を行った。その載荷方法は、図-8に示すように、橋軸方向線(a~c線)とこれに斜交する線(1~3線)との交点に車両後輪の軸線中心が一致するよう、車両を配置した。よって、本図のa~c線と図-3のA~C線とは異なるものである。本実験では、1台のトラックを図-8の交点すべてに順次載荷した後、2台のトラックをa~c線上に並行載荷した。

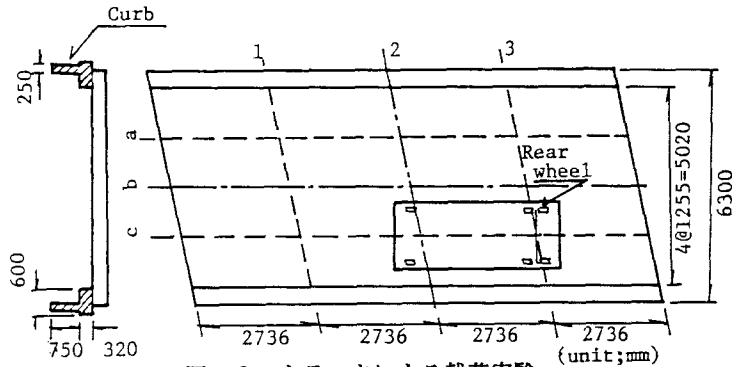


図-8 トラックによる載荷実験

3. 2 結果および考察

実験によって得られた結果を架設系、完成系について整理すると、以下のようになる。

(1) 架設系

前述したように、架設系の実験は打設コンクリート重量に対する鋼板構造の変化をみたものである。

図-9は、図-3におけるB線上の鋼板構造のたわみ、ならびに上弦材と底部鋼板のひずみの変化を示したものである。図中、○は実験値を、実線は格子モデルによる理論解を表わしている。図から明らかなように、理論解は、実験挙動をよく表現していると云えよう。

この結果は、格子桁に使用した剛性値がほぼ妥当で、かつ本橋ではせん断変形の影響を無視しても差し支えないことを示すものである。

斜版橋である本橋では、せん断系の断面力として、曲げに伴う

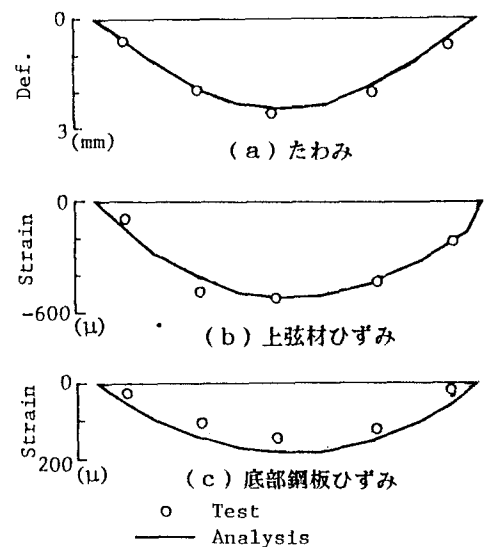


図-9 架設系のたわみ、上弦材と底部鋼板のひずみ

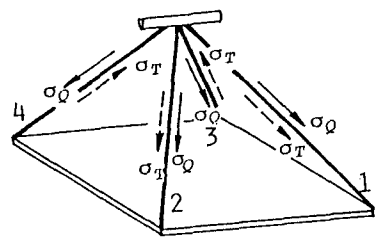


図-10 斜材に作用する軸力

せん断力とねじりモーメントが発生する。すなわち、立体トラスの斜材軸力は、図-10に示すようにせん断力による軸力とねじりモーメントによる軸力の複合軸力になるものと考えられる。このような見地から、図-11では斜材の軸ひずみを、(a)せん断力によるひずみ、(b)ねじりモーメントによるひずみ、ならびに(c)複合ひずみ(実験値は直接データ)の3者について整理してみた。図中の記号は実験値であり、実線と破線は理論解である。

図から明らかなように、せん断力による軸ひずみは両者ともよく一致している。ねじりモーメントによる軸ひずみに関しては、モード形状は一致するものの、定量的には本解析では不十分のように思える。しかしながら、複合ひずみでは、本橋ではせん断力によるものが支配的であるため、その誤差は小さくなっている。

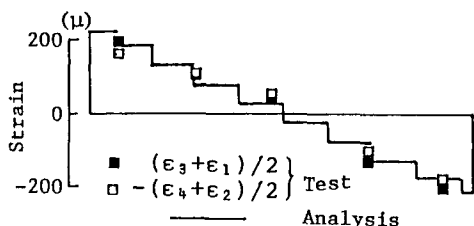
(2) 完成系

完成系では20tfの重量のダンブカーによる様々な載荷を行ったが、ここでは、図-8に示す点a2と点c2に2台のダンブカーを並行載荷した場合の結果について考察する。なお、結果は架設系と同様に版中央部(B線上)のものである。また、解析にはコンクリートの圧縮試験より得られた弾性係数比 $n_b=8.2$ 、 $n_t=7.2$ を用いた。

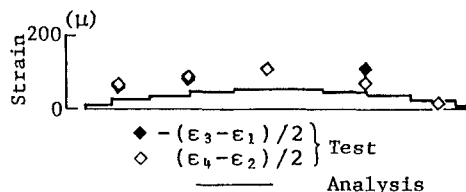
図-12は、(a)に橋軸方向部材のせん断力を、(b)にねじりモーメントを示したものである。

ここで、理論による解は実線で、実験より得られたトラス斜材のひずみから各断面力に換算したもの、すなわち、トラス斜材の分担断面力は○で示す。図から明らかなように、完成系では、トラス斜材は部材断面力にほとんど寄与していないことが判る。このことは、格子モデルの橋軸方向部材の剛性算定で、トラス斜材の影響を無視したことが妥当であることを示している。

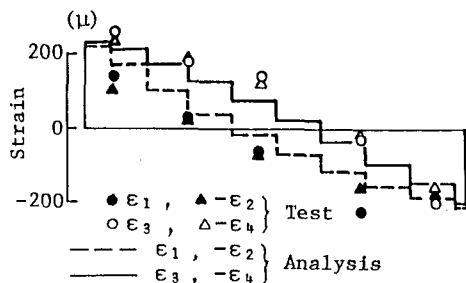
図-13は、橋軸方向のたわみ、ならびに上弦材と底部鋼板のひずみを図示したもので、○は実験値、破線は理論解を表わしている。図から明らかなように、理論解は実験値を大幅に上回っている。図-8にあるように、本橋にはコンクリートの大きな壁高欄が中間にスリットもなく付設されている。上記の差は、この壁高欄のはり作用によるものと考えて、壁高欄の剛性も考慮した解析を併せ行った。その結果が図中の実線である。壁高欄の影響を考慮した理論解と実験値はよく一致している。すなわち、付帯設備である壁高欄も、構造系全体の剛性に大きく寄与すると云える。



(a) せん断力によるひずみ

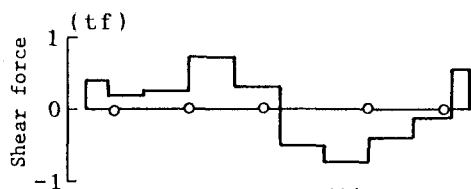


(b) ねじりモーメントによるひずみ

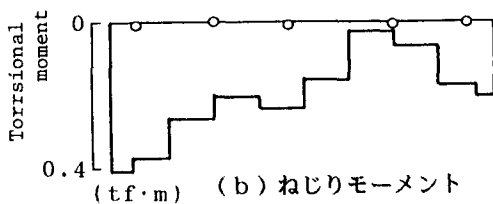


(c) 複合ひずみ

図-11 架設系の斜材軸ひずみ



(a) せん断力



(b) ねじりモーメント

図-12 橋軸方向部材のせん断力とねじりモーメント

4. あとがき

本橋は、建設省九州地方建設局が昭和63年3月に計画・施工したものである。また、本橋の設計・施工ならびに実橋試験の方法および結果については「原田緑道橋建設技術委員会」（太田俊昭委員長）において検討された。

本研究で得られた結果を要約すると、以下になる。

- (1) 本橋の現場施工は短期間で行うことができ、また立体トラス型ジベルの効果から、コンクリート打設時には鉄筋コンクリート床版橋では必要な支保工を省くことが可能となった。
- (2) 立体トラス型ジベルの斜材は、コンクリート打設時にはせん断力に対する抵抗機能のみならず、ねじりモーメントにも抵抗するので、本構造は斜角を有する版構造に特に有効である。
- (3) コンクリート硬化後の完成系の挙動に対しては、トラス斜材は主構造として無視できる。
- (4) 壁高欄も、橋全体の剛性に大きく寄与する。

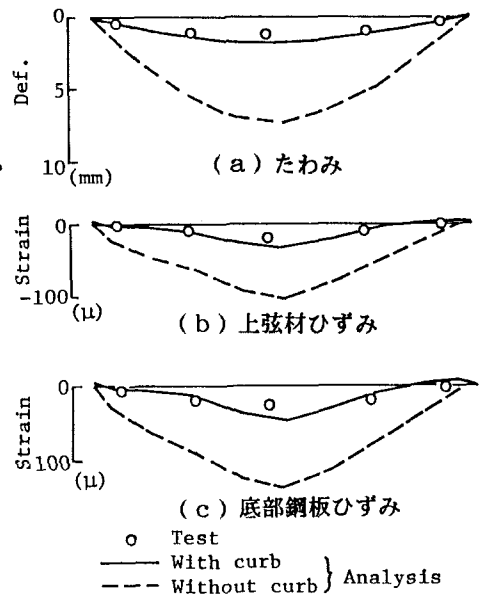


図-13 完成系のたわみ、
上弦材と底部鋼板のひずみ

本実験を遂行するにあたり、多大なる御尽力、御助言を賜った建設省福岡国道工事事務所・朝倉肇前所長はじめ関係各位に深甚なる感謝の意を表する次第です。

《参考文献》

- 1) 太田、日野、浜田、今金、今井：トラス型ジベルの押抜きせん断挙動、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.119～124、1986
- 2) 太田、日野、奥石、日向：立体トラス型ジベルを有する合成版構造の力学特性と設計法に関する研究、構造工学論文集、Vol.34A、pp.279～305、1988
- 3) Ohta, T., Hino, S., Imai, F. and Asakura, H.: Design and Construction of a New Steel-Concrete Composite Slab Bridge, Proceedings of Pacific Concrete Conference, Auckland, Vol.1, pp.393～404、1988
- 4) 高橋、太田、日野、大野：高強度コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成版型部材の静的弾塑性挙動と終局限界性能、構造工学論文集、Vol.35A、pp.1245～1258、1989
- 5) 今井、中沢、太田、南：立体トラス型ジベルを有する鋼・コンクリート合成はりのせん断特性、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第2号、pp.375～380、1989
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1980
- 7) 井口、太田、日野、宮崎：TSC合成はり（版）部材の曲げ疲労耐力、土木学会西部支部研究発表会、pp.48～49、1988

(1989年10月2日受付)