

TSC床版合成桁橋（荅陽橋）の載荷実験とその設計法について

LOADING TEST AND DESIGN OF TSC COMPOSITE GIRDER BRIDGE (REIYO BRIDGE)

太田俊昭¹⁾、日野伸一²⁾、田中征夫³⁾、丸内 進⁴⁾、酒井甚一郎⁵⁾

BY Toshiaki OHTA, Shin-ichi HINO, Ikuo TANAKA, Susumu MARUUCHI, Jin-ichiro SAKAI

Reiyo bridge is a new type of composite I-girder bridge which was constructed as the entrance way of Kyusyu Electric Reihoku Power Station. The bridge has a span of 34.1 m, and an effective width of 13.0m, and was easily and speedily erected using steel-concrete composite slab decks with pyramidal shear connectors, which was named TSC slab. A field loading test on the bridge was carried out in order to confirm the validity of the proposed design method for such a composite I-girder bridge. In this paper, the loading test results and some recommendations for the design are discussed, comparing with analytical results by using grillage and finite strip methods.

1 まえがき

立体トラス型ジベル（以下TSCと略記する）を持つ合成床版（TSC床版）に関する研究については、以前より著者らにより解析的・実験的研究が続けられ、TSCのずれ止め性能・コンクリート合成前のTSC付き底鋼板の座屈耐荷力や合成版としての耐荷力・疲労特性などの構造特性に関し、通常のRC床版に比べて優れた性能を持つことが明らかにされている^{1)~7)}。また、TSC床版を橋梁へ適用した場合の設計・製作・架設方法についてもガイドラインとなるべき有用な知見が得られている⁸⁾。TSC床版の実橋への適用例としては、九州の国道3号線に架けられた原田緑道橋があるが⁹⁾、これは主桁を持たない床版橋であった。しかし、合成前においても、立体トラス骨組として大きい耐荷力と曲げ剛性を有するTSC付き底鋼板のメリットを合理的に利用すべく、単に床版としてではなく、型枠・支保工を不要とする合成桁橋の主桁圧縮フランジの一部として活用することを検討した結果、TSC床版合成桁として実現したのが、九州電力・荅北発電所の進入路に架けられた荅陽橋である。荅陽橋のTSC床版の概要を図-1に示す。本橋の一般形状は図-2に示す

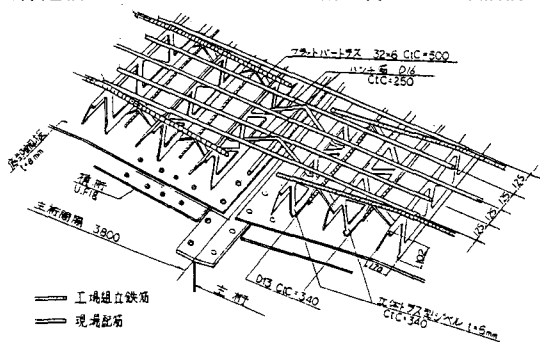


図-1 TSC床版概要図

1) 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)
2) 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)
3)	九州電力(株)	荅北発電所建設所	(〒863-25	熊本県天草郡荅北町年柄字荅陽)
4) 工修	九州電力(株)	情報通信部	(〒810	福岡市中央区渡辺通2丁目1番82号)
5) 工修	日立造船(株)	鉄構設計部	(〒554	大阪市此花区桜島1丁目3番40号)

ように、支間長34.1m、主桁本数4本、桁高1800mm、有効幅員13.0mであり、両側に歩道を有する単純合成桁橋である。主桁間隔3.8mおよび床版厚16cm（内底鋼板の板厚 8mm）は、いずれも現行道路橋示方書（以下道示と略称する）の規定によれば、許容限界値に近いものである。また、本橋の設計に先立ち、模型桁による座屈安全性を照査した実験結果から¹⁰⁾、圧縮フランジにはTSC以外に補剛リブを一切設けない構造とした。

疲労安全性に関しては、はりおよび版供試体による室内疲労実験の結果より¹¹⁾、TSC床版の底鋼板許容疲労応力度を660Kg/cm²として設計した。図-3にTSC床版の断面詳細を示す。荅陽橋の設計・製作・架設に関する記述は別紙¹²⁾に譲ることとして、実際に実橋で測定された応力と解析的に求められた設計値とを比較検討することは、今後の設計方法や製作技術の改善に役立つことはいうまでもない。

そこで、本論文ではTSC床版合成桁としての力学的特性を明確にするために、今回、現地において床版打設時におけるTSC床版の応力状態や荅陽橋完成後に行った載荷・走行実験の結果と設計値、および種々の解析結果を比較検討し、TSC床版合成桁橋の設計法について検討を行う。

2. 実験および解析の概要

2.1 実験概要

本実験では、

- ① 合成前コンクリート打設時の床版と主桁の応力度とTSC床版の変形
- ② 養生中および後死荷重載荷後のコンクリートの乾燥収縮、温度変化、およびコンクリート・TSC底鋼板の応力の経時変化

等を観測する。さらに完成後には20tfトラック2台による

- ③ 静的載荷実験
- ④ 走行実験

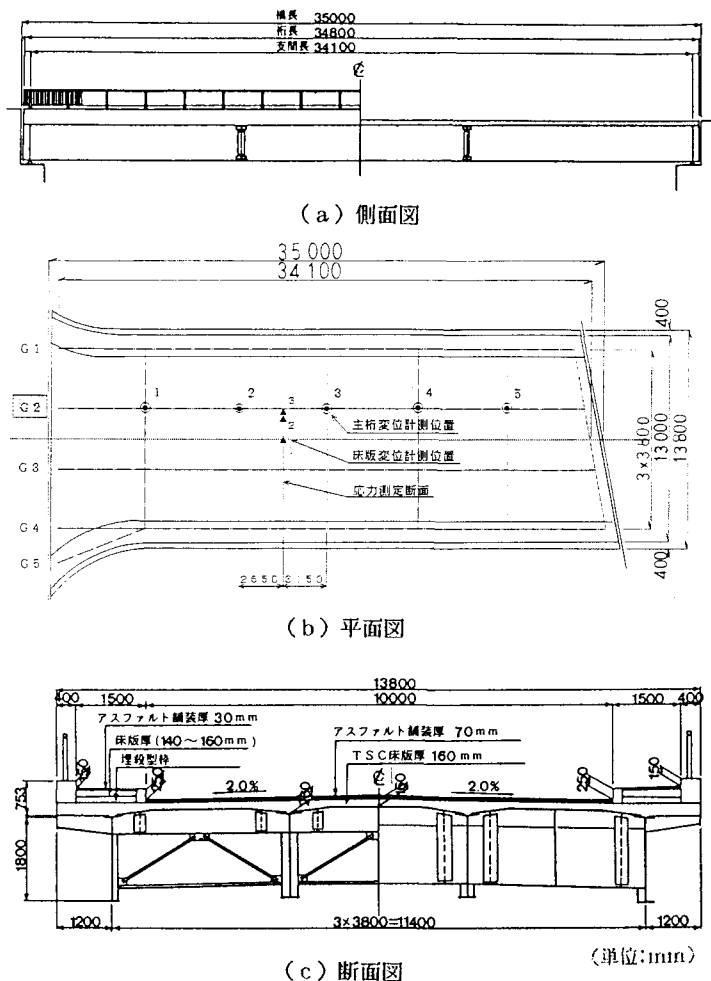


図-2 荅陽橋の一般図および変位・応力計測位置

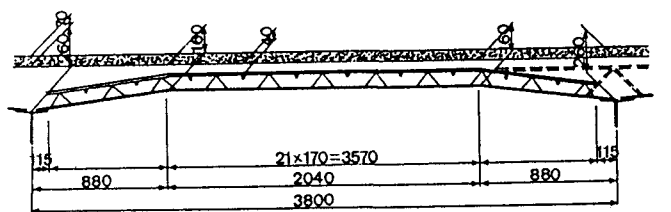


図-3 TSC床版詳細図

(単位:mm)

をそれぞれ行い、主要部の応力・変位を測定する。走行実験結果からは、20tfトラック走行時の衝撃係数、固有振動数、および走行後の自由減衰振動から構造減衰を把握する。変位は電気式変位計を図-2 (b)に示す位置に取付け計測した。また、床版応力計測用のひずみゲージは橋梁の断面方向に取付けた。

2. 2 設計および解析モデル

床版の設計においては橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ単位幅当たりの断面剛性を持つ、単純ばりモデルを用いた。また、主桁は通常の合成桁と同様に床版有効幅を考慮した断面剛性を持つ格子桁として設計した。以上の設計値や実験による計測値と比較検討するために、TSC床版と主桁系に対して以下に示す3種類の解析モデルを考え打設時の変形と応力を解析した。

(1) TSC、底鋼板および主鉄筋から構成される格子モデル（床版用）

(2) 主鉄筋を上弦材、TSCを斜材、底鋼板を下弦材とするトラスモデル（床版用）

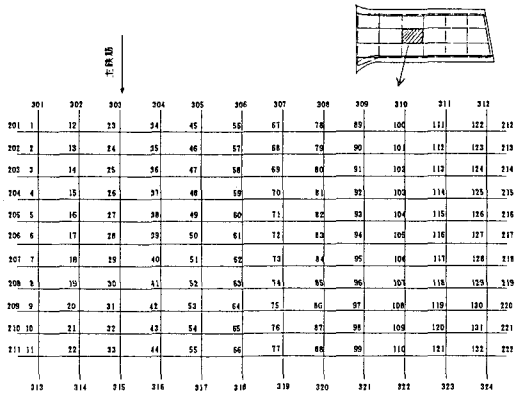
(3) 全体系の一部（G2桁）を境界条件を考慮して取りだした有限帯板法によるFSMモデル（主桁と床版の立体解析） また、

それらの要素分割図を図-4に示す。以上の解析結果と計測値とを床版と主桁とについて比較検討する。

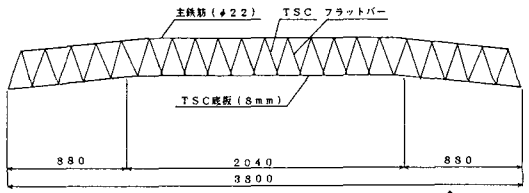
3 床版打設時の応力・変形

3. 1 TSC床版のたわみ・応力度

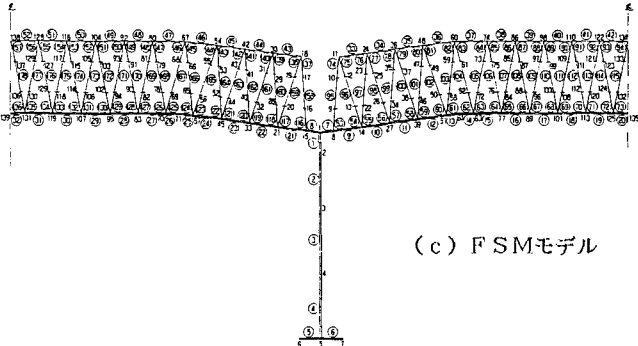
たわみの解析値と計測値とを比較した結果を図-5に示す。計測値の最大たわみは2.1mmであるが、格子解析値は1.4mm、FSM解析値は2.0mmとなっている。いずれのケースもほぼ同じような傾向を示している。また、応力解析結果・計測値と設計値との比較を表-1に示す。



(a) 格子モデル



(b) トラスモデル



(c) FSMモデル

図-4 TSC床版の解析モデル

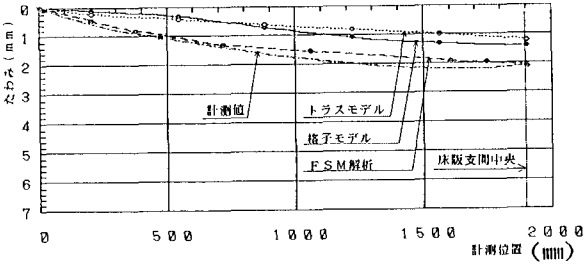


図-5 TSC床版のたわみ（ケース・床版打設時：床版2）

表-1 TSC版の応力の比較 (kgf/cm²)

		TSC上弦		主鉄筋		底鋼板	
		橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向	橋軸方向	橋軸直角方向
解析値	格子モデル	-466	-378	-333	-91	-	-
	トラスモデル	-481	-351	(-52)	-69	-	-
	F S Mモデル	-344	-240	-325	-85	-	-
	設計値 (単純ばり)	-673	-724	-445	142	-	-

() 内は床版としての応力度を示す。

表-1に示す応力度はコンクリート死荷重による応力度を示し、鋼重による応力度は含まない。設計値が他の解析値に比べてかなり大きめに出ている。また、底鋼板の橋軸直角方向(主鉄筋方向)の応力度の設計値は引張りになっているが、これとは反対に解析値と計測値の結果は、すべて圧縮状態になっている。これは設計上単純支持としたTSC付き底鋼板が実際は主桁上で高力ボルトにより剛結に近い状態で接合され、連続版としての挙動を示すとともに、図-3に示すように折れ曲がり点を持ったTSC付き底鋼板と鉄筋とが一種のアーチ系を成し、両者に圧縮力が伝達されたものと考えられる。

以上のように、設計値は計測値・解析値よりかなり大きめの値を示し、設計としては安全側の結果を示している。また、計測値はTSC床版を格子として解析した結果に比較的近いことを考えるとTSC床版の設計では、TSC付き底鋼板と鉄筋とから構成される格子桁として解析することが実用であると考えられる。

底鋼板の圧縮主桁フランジとしての有効幅を検討するため、底鋼板応力度の支間方向分布に関してF

SM解析結果と計測値とを図-6に示す。この図からは橋軸方向応力度の分布に関してせん断遅れの現象は見られない。よって支間3.8mの床版は主桁作用に対して全幅有効と考えられる。

3.2 主桁応力度

測定結果と解析結果の結果の一例を図-7に示す。G1桁(外桁)とG2桁(中桁)の計測値を表-2に、特にG2桁については計測値、設計値、格子解析値、F S M解析値を比較する。

床版打設時の応力度はG1桁・G2桁ともに同等の値を示している。また、G2桁については、設計値が計測値にくらべ15~20%、また、F S M解析値は10%程度の大きな応力度となっている。主桁の中立軸の位置の計測値は、解析値とほぼ同じ値を示し、両解析の妥当性が立証されている。

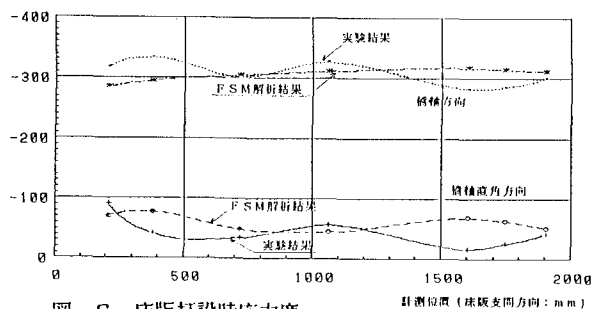
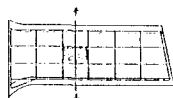


図-6 床版打設時応力度 (床版2)

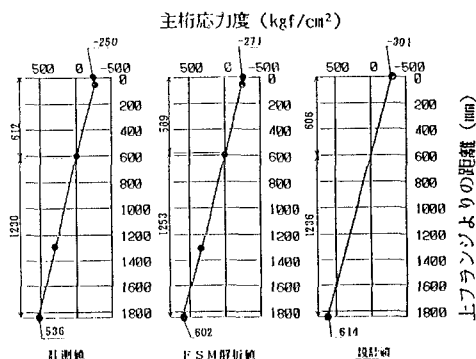
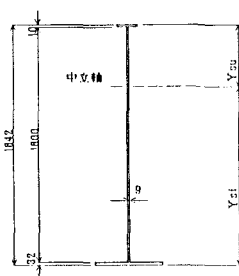


図-7 主桁応力度・中立軸位置の比較 (計測値・F S M解析値・格子解析値)
(床版打設時、G2桁)

表-2 主桁応力度の比較

(kgf/cm²)

フランジ	種別	G1桁	G2桁
上フランジ	計測値	-214	-250
	F S M解析値	---	-271
	設計値(格子)	---	-301
下フランジ	計測値	538	536
	F S M解析値	---	602
	設計値(格子)	---	614

3.3 主桁および床版のひずみ経時変化

主桁および床版のひずみ経時変化は、温度変化に加えてコンクリートの乾燥収縮・クリープによって生じるものである。ここでは、床版のコンクリート打設からトラック載荷試験にいたる約40日のクリープ・乾燥収縮解析を行い、計測結果と比較検討する。

コンクリート構造のクリープ・乾燥収縮解析法として、これまで多数の解析法が提案されているが、ここでは取扱いが容易でかつ比較的妥当性のある評価を与え得るTrost式を適用する¹³⁾。

解析条件として、以下を仮定する。

- (1) 基本乾燥収縮ひずみ量は、床版と同時に打設した無応力供試体(φ20×40)による実測データと道示の解説に基づく値の2通りについて行う。
- (2) クリープ係数は、道示のデータを用いる。
- (3) コンクリートの弾性係数は、圧縮試験の計測データと既往の研究結果¹⁴⁾に基づき決定する。

図-8、図-9に主桁下フランジとコンクリートのひずみの経時変化記録と解析結果とを示す。図中、解析結果の太線は乾燥収縮実測データに基づくもので、細線は道示のデータに基づくものである。また、現場の湿度変化を考慮して、それぞれの相対湿度40%および70%の場合をそれぞれ実線・破線で示した。図中、解析値は前死荷重載荷後(床版コンクリート打設直後)の計測値を開始点としてプロットした。また、後死荷重についても解析値を計測値分だけシフトさせた。

一般的に、乾燥収縮の実測データを用いて解析した結果は、各部の経時変化の挙動をよく追跡できていると思われる。また、道示の収縮データを用いた解析値は、計測値よりもかなり小さめの結果を示している。

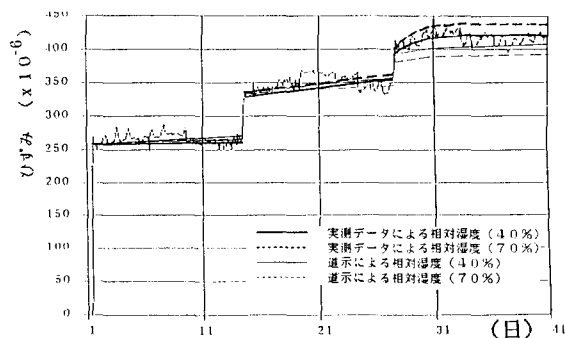


図-8 主桁下フランジのひずみ経時変化

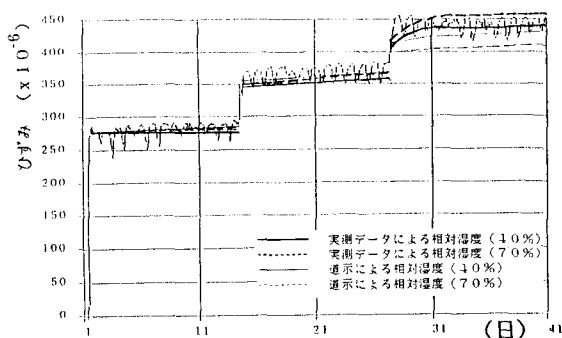


図-9 床版コンクリートのひずみ経時変化

なお、図中には示されていないが、設計値は実測値より大きくなっている。これは、設計においては長期材令を念頭においていることを考えれば妥当な結果と考えられる。

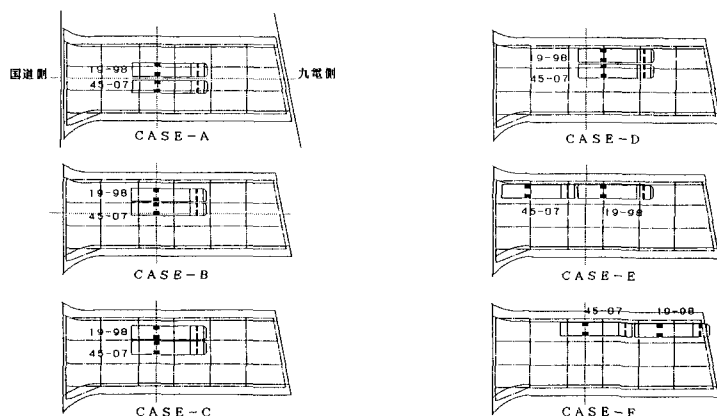


図-10 静的載荷実験ケース

4 静的載荷実験

4.1 床版のたわみと応力

静的載荷実験ケースにおけるトラックの載荷状態を、図-10に示す。この内、CASE-AとCASE-Bが床版に対する実験である。計測値と比較のために床版打設時と同じ

解析モデル〔2.2(1)〕を用いて合成後の解析を行い、解析値と計測値とを比較検討した。

図-11にTSC床版のたわみについて計測値と格子解析結果を比較している。各ケースの最大たわみは表-3に示すとおりである。表-3の結果から計測値はCASE-A、CASE-Bともに格子解析結果とほぼ同等の結果を示している。床版打設時の傾向は型枠としてのたわみが約2mmであったが、合成後はTSC床版のたわみが0.5mmと非常に小さく、版としての剛度が高いことを示している。この結果から、活荷重に対するTSC床版のたわみの小さいことは、版として分配効果が良いことを示している。

表-4にTSC床版の応力計測値と解析値の結果を示す。表中、標準養生、現場養生とあるのは、ひずみ計測値を応力に換算する際に用いた弾性係数測定用のコンクリート円柱供試体の養生状態を示す。表-4に示すTSC床版の底鋼板のトラック荷重による応力度は、計測値で高々83kgf/cm²、格子解析値で114kgf/cm²となっている。設計値は両者に比べかなり大きめの値となっている。これは、設計時には橋軸方向、橋軸直角方向において床版を一本のはりとし、また荷重を集中荷重として載荷して、応力を安全側に計算したためである。また、載荷実験では静的載荷で衝撃が含まれていないことも応力度が小さい原因となっている。

表-3 最大たわみの比較 (mm)

	ケース・A	ケース・B
計測値	0.50	0.46
格子解析(床版)	0.40	0.50

図-12に床版応力度の分布状況を示す。橋軸方向および橋軸直角方向の応力度の分布は連続版の傾向を示している。設計計算時には単純はりとして計算していたが、今回の検討結果からTSC床版の応力分布は四辺固定の格子桁に近いと考えられる。

4.2 主桁のたわみと応力

計測結果を図-13に示す。図中格子解析とあるのは、設計で採用した主桁系を格子として解析した結果であり、はりモデルとあるのは、床版、地覆、歩道部床版、ハンチをす

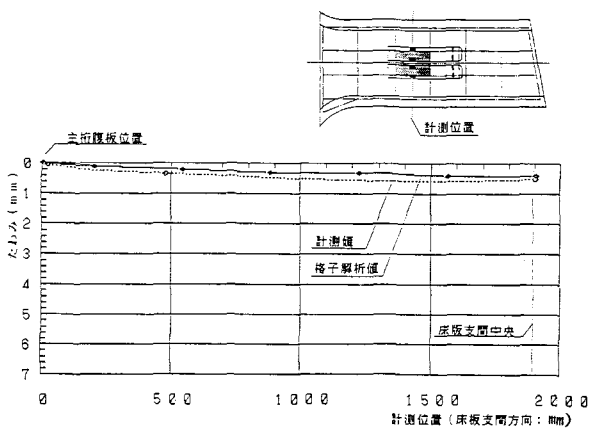


図-11 TSC床版のたわみ(ケース・A:載荷時)

表-4 TSC床版静的載荷結果 (kgf/cm²)

CASE			主鉄筋方向			配力筋方向		
			床板上縁		底板下縁	床板上縁		底板下縁
			標準養生	現場養生		標準養生	現場養生	
計測値	A	1	-10.8	-9.7	79.0	-8.1	-7.2	36.0
		2	-10.1	-9.1	83.0	-7.5	-6.7	36.0
	B	1	-9.1	-8.2	72.0	-7.0	-6.3	28.0
		2	-10.3	-9.2	81.0	-8.0	-7.1	36.0
格子解析値	A		-15.0		72.0	-6.0		25.0
	B		-24.0		114.0	-6.0		27.0
単純はり			-57.0		442.0	-46.0		340.0

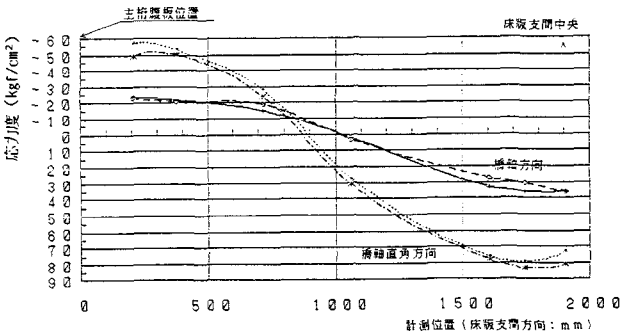


図-12 静的実験におけるTSC床版応力度分布(ケース・A:床版2)

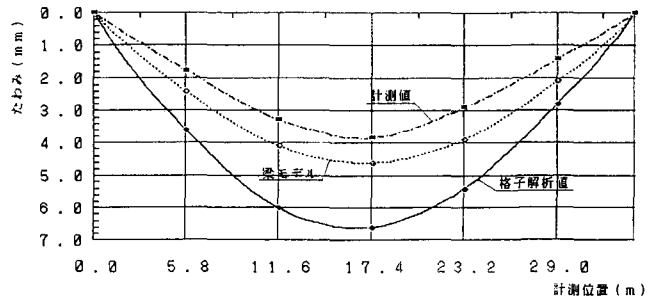
べて主桁剛度として考慮し、橋を一本のはりとして計算した結果である。計測値と計算値とを表－５に示す。

格子解析の結果は計測値に比べて大きくなっている。これは前述のごとく床版の剛度が非常に高く分配効果が大きいことと、格子解析では床版の連続性と床版剛度が正確に反映されていないことに原因すると考えられる。はりモデルの場合が比較的計測値に近い傾向を示している。この結果からわかるように、計測値がはりモデルによる計算値より小さいということは、TSC床版の分配効果が良いということを示していることになる。

次に、応力測定結果を図－１４および表－６に示す。応力度と中立軸の比較は、CASE-CについてG2桁（中央断面）で行う。これらより、応力度・たわみともに格子解析値は計測値より大きな値を示している。これは解析に用いた格子モデルでは主桁部の剛性を実際より過小評価するためと考えられる。

表－５ 主桁変位の比較 (mm)

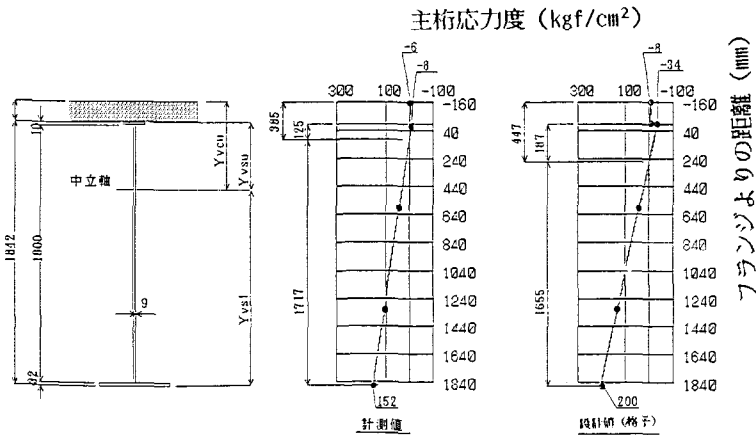
CASE		計測値	梁モデル	格子解析値
C	1	3.87	4.6	6.6
	2	3.83		
D	1	3.81	4.5	7.0
	2	3.84		
E	1	3.25	3.7	6.1
	2	3.25		
F	1	2.95	3.5	5.7
	2	2.88		



図－１３ 主桁のたわみ（ケース・C、載荷時、G2桁）

表－６ 桁応力度と中立軸の位置（G2けた中央断面）

	応力度 (kgf/cm ²)			中立軸 (mm)	
	計測値	設計値(格子)		計測値	設計値(格子)
コンクリート上縁	-6	-8	y vcu	385	447
上フランジ	-8	-34	y vsu	125	187
下フランジ	152	200	y vsi	1717	1655



図－１４ 主桁応力度・中立軸位置の比較（載荷時・G2桁）

5 動的載荷試験

5.1 車両の固有振動数と減衰

20tfトラックの動特性を調べるために、実験に用いた2台のトラックの前後を事前に堅固な路上で揺すりトラックの固有振動数と減衰の特性を調べた。トラックの固有振動数は3Hz前後にあり、減衰は対数減衰率で0.09~0.34である。また、軸重は前輪で5.26tfと5.68tfであり、後輪で14.76tfと14.60tfであった。

5.2 走行試験結果

走行実験は、図-15に示すケースについて各2回、いずれもトラックの走行速度30km/hで実施した。表-7に固有振動数の計測結果を一覧表にして示す。これより、本橋の固有振動数は4.0Hz、減衰定数0.015となる。

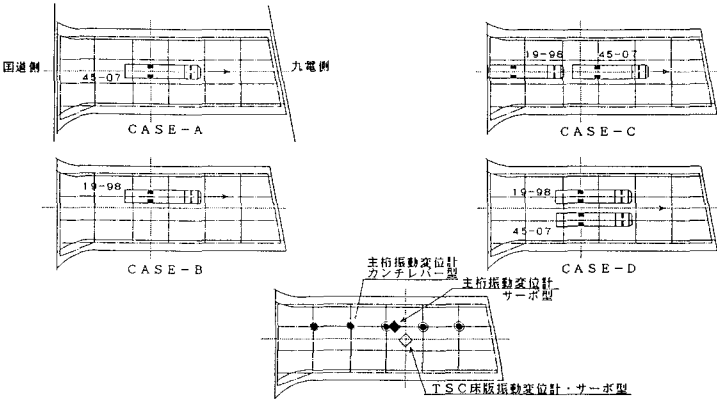


表-7 固有振動数

CASE	f (HZ)	δ	減衰定数
A	1 4.0	0.08	0.012
	2 4.0	0.05	0.008
B	1 3.3	0.09	0.014
	2 4.1	0.06	0.009
C	1 4.1	0.08	0.013
	2 4.0	0.10	0.017
D	1 4.2	0.13	0.021
	2 4.0	0.15	0.023
平均値	4.0	0.09	0.015

図-15 動的走行実験ケース

また、振動便覧¹⁵⁾には一般橋梁の基本振動数と支間長の関係が示されている。今回の実験結果を図中にプロットすれば、図-16のようにほぼ一般橋梁の平均値に対応している。すなわち、実験CASE-A・Bについて求めた固有振動数の平均値4.0をプロットすると図に示すような傾向となり、一般の橋梁と同等の固有振

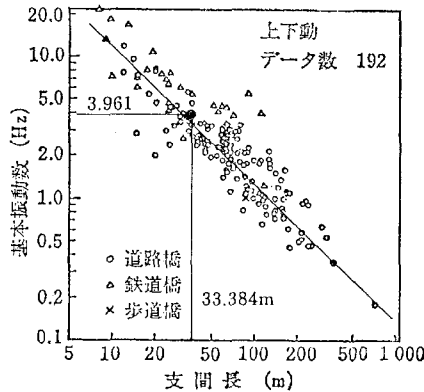


図-16 基本振動数と支間長の関係

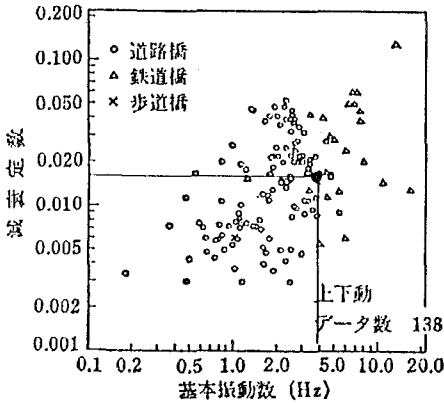


図-17 減衰定数と基本振動数の関係

動数となる。減衰定数と基本振動数との関係もまた同様で、図－17に示すように、この関係も一般の橋梁とTSC床版合成桁橋とは大差なく、TSC床版を有するこの合成桁橋の振動特性は一般橋梁と同等であると推測される。

実験結果より衝撃係数を計算した。その結果を表－8に示す。衝撃係数の求め方としては種々の考え方があるが、ここでは振動波形から読み取れる動たわみと静たわみの比として求めている。計算の方法は下に示す式により、

$$\text{衝撃係数} = \frac{\text{動的振幅の2分の1}}{\text{静たわみ}}$$

のように計算した。

衝撃係数の平均値は 0.122であり、道示の衝撃係数の式により求めた値 ($i = 0.235$) よりは、小さくなっている。これは、舗装面がまだ車輪のダメージを受けていないこととトラックとの共振現象がなかったことに原因すると考えられる。

表－8 衝撃係数計算結果

CASE		静たわみ η_1 (mm)	動たわみ η_2 (mm)	η_2 / η_1
A	1	1.50	0.190	0.127
	2	1.40	0.225	0.161
B	1	1.70	0.190	0.112
	2	1.80	0.225	0.125
C	1	1.60	0.200	0.125
	2	1.70	0.225	0.132
D	1	3.00	0.375	0.125
	2	3.20	0.210	0.066

平均値=0.122

6 まとめ

TSC床版合成桁橋の載荷実験を行い、実験結果と解析結果との比較検討によりTSC床版を有する合成桁橋の静的・動的特性を調べるとともに、その設計値について考察した。

その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 床版打設時の応力とたわみを計測し、①格子モデル、②トラスモデル、③FSMモデルによる3種類の解析値と比較検討を行った。その結果、計測値・解析値ともに設計値より小さくなっているとともに、解析値は、3者ともほぼ同様な結果を示した。以上より、TSC床版は四辺固定版としての挙動を示していることがわかり、単純はりとしての設計は床版に対し安全側になる。
- (2) 床版打設時の橋軸直角方向の応力分布から支間3.8mの床版にはせん断遅れの現象は見られず、主桁作用としての床版は全幅有効と考えてよい。
- (3) 床版打設時の主桁応力度を計測値・FSM解析値・設計値の3者について比較したが、主桁としての応力状態は、設計値が15～20%、FSM解析値が10%、それぞれ測定値を上回った。
- (4) 床版コンクリートの乾燥収縮、クリープによる床版・主桁応力度の経時変化は、既往のクリープ解析値を適用してよく追跡できることがわかった。
- (5) 20tトラック2台の活荷重による床版の静的たわみは計測値が 0.5mmと小さく、格子解析値と同様の結果を示した。また、床版応力度の計測値も格子解析値とほぼ同様の値を示し、設計値より小さくなった。この結果より、設計値は計測値よりかなり大きく、TSC床版の実際は4辺固定の格子解析値に近い挙動を示し、連続版としての傾向が強いことがわかる。
- (6) 20tトラックを載荷し主桁のたわみと応力度とを計測したが、たわみは計測値が格子解析値をはるかに下回った。これは歩道部の床版や地覆などの剛度が正確に反映されていないことも一つの原因ではあるが、TSC床版の荷重分配が非常に良いことも原因していると考えられる。歩道部床版・地覆などを主桁剛度の計算に入れて橋梁を一本のはりとしてたわみを計算すると、大体計測値に近いたわみになる。
- (7) トラック走行実験により橋梁の固有振動数と減衰定数を求めた。一般の橋梁との比較のために振動便

覧にあるデータと比較したところ、ほぼ平均的な結果となり、TSC床版合成桁橋は、一般橋梁と同等の振動特性を示すことがわかった。

(8) 走行実験より衝撃係数を算定したところ平均値で 0.122 となった。これは道路橋示方書の衝撃係数の式による値 0.235 よりかなり小さい値となっている。

以上、TSC床版をはじめて合成桁橋に適用した苓陽橋について、本橋の構造特性を明らかにするとともに、今後この種の橋梁の合理的設計法を確立する上で有用となる種々の知見が得られたものと思われる。最後に、本橋の設計・製作に対し、多大のご助言、ご協力を賜ったTSC研究会の委員各位に深甚なる謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 太田、奥石、安田：積層化有限要素法によるトラス型ジベル付き合成床版の解析、土木学会第40回年次学術講演会概要集、1985. 9.
- 2) 今金、太田、今井：積層化有限要素法によるトラス型ジベル付き合成床版の解析（第2報）、土木学会第41回年次学術講演会概要集、1986.11.
- 3) 太田、日野、浜田、今金、今井：トラス型ジベルの押し抜きせん断挙動、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1986. 9.
- 4) 太田、日野、北之園、今井：トラス型ジベルを有する鋼板-コンクリート合成桁の力学特性、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1986.11.
- 5) 井口、太田、安田：繰返し荷重下における立体トラス型ジベルを有する合成床版の力学的挙動、土木学会第41回年次学術講演会概要集、1986.11.
- 6) 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、1988.3.
- 7) 山口、太田、日野、井ノ畑：合成桁橋の架設時における立体トラス型ジベルの補剛効果、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1989.9.
- 8) TSC研究会：TSC合成版を用いた合成桁橋の設計・製作に関する研究報告書、1989. 3.
- 9) 太田、日野、今井、坂田、笹山：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、構造工学論文集、Vol.36A、1990.3.
- 10) 太田、山口、日野：立体トラス型ジベルを有する合成桁圧縮フランジの架設時における座屈強度、構造工学文庫、Vol.37A、1991.3.
- 11) 日野、太田、兼澤、鬼束：TSC合成版部材の疲労強度と繰返し荷重下における応力推定、土木学会第45回年次学術講演会概要集、1990.9.
- 12) 田中、丸内、滝沢、富沢、太田：苓陽橋（TSC床版合成桁）の設計と施工、橋梁と基礎（掲載予定）
- 13) H.Trost：Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons, Der Stahlbau, 37, H11, 1968.
- 14) H. ヲツシュ、D. ヲツベル：コンクリート構造のクリープと乾燥収縮、鹿島出版会
- 15) 土木学会：振動便覧、1985.

(1990年10月12日受付)