

(7) 硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成床版橋（金桜橋）の現場載荷試験

Field Loading Tests of Steel-Concrete Composite Slab Bridge (KINOH-BRIDGE) Filled with Rigid Urethane

太田貞次*, 太田俊昭**, 日野伸一***, 山田岳史****, 高田信次*****

Teiji OTA, Tosiaki OTA, Shinichi HINO, Takeshi YAMADA, Shinji TAKADA

- | | | |
|---------|----------------------|------------------------------|
| * 工博 | (株)宮地鐵工所技術部技術開発課 | (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3番地) |
| ** 工博 | 九州大学大学院工学研究科 教授 | (〒812-0053 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1) |
| *** 工博 | 九州大学大学院工学研究科 助教授 | (〒812-0053 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1) |
| **** 工博 | (株)神戸製鋼所機械研究所構造強度研究室 | (〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台1-5-5) |
| ***** | 福岡市都市整備局都市計画課 | (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神1-8-1) |

The simple supported steel-concrete composite slab bridge with rigid urethane has many advantages such as light weight, structural performance and time reduction at construction site. Kinoh-Bridge is constructed as application of the recycling resources concept to this composite slab bridge. In this bridge, rigid urethane has been enclosed with empty cans due to recycling resources and reduction of the expensive urethane material.

The most important matter must be evident in the structural performance as well as the composite bridge. Static and truck loading test on the real bridge enclosed with empty cans has been carried out. In addition, comparing between the test result and three types of numerical analysis by 3-dimensional finite element method, grid and plate analytical method have been conducted to discuss the validity of these analysis and streamlined design.

Key Words : steel-concrete composite bridge, recycling bridge, rigid urethane, field loading test,

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版橋は、底鋼板とこれを補剛するTリブから構成される鋼桁を引張側強度部材ならびにコンクリート打設時の型枠として活用する合理的な橋梁形式であり、低桁高を要求される都市内の中小スパン橋梁に多くの実績を有している^{1),2)}。

また、鋼・コンクリート合成床版橋の断面引張域のコンクリートを軽量で透水性のきわめて低い硬質ウレタン（比重0.03程度）と置き換えた「硬質ウレタンを充填した合成床版橋」が死荷重の軽減と鋼板内部の防錆などの特長を併せ持つ橋梁として開発され³⁾、多く建設されている。更に、生活廃棄物のリサイクル化に対する社会的ニーズの高まりの中で、硬質ウレタン層内に空き缶を封入して再利用するコンセプトのもと「リサイクリング橋」が開発され⁴⁾、平成9年12月に福岡市に金桜橋が建設された。

著者等は、このリサイクリング橋の実用化に際して実橋を使用した載荷試験として、金桜橋現地で架設時における死荷重（コンクリート床版）載荷試験、完成後におけるトラック載荷試験および自由振動試験を行いその構造特性を把握するとともに、格子解析、版解析、3次元有限要素解析を行い、解析結果と現場試験結果とを比較検討した。

ここでは金桜橋における載荷試験結果について報告するとともに、これら3種類の解析法の設計計算への適用性と合理的設計法について考察する。

2. 金桜橋の概要

金桜橋は福岡市城南区に建設された橋長34.0m、有効幅員16.0mの硬質ウレタンを充填した合成床版橋のウレタン層内に約14万個の空き缶が封入されたリサイクリング橋である。空き缶は地元11の小学校の学童のリサイクル作業により収集され、土木のイメージアップとともに地域住民に身近な橋梁となるよう計画・建設された。金桜橋の横断面形状を図-1に示す。

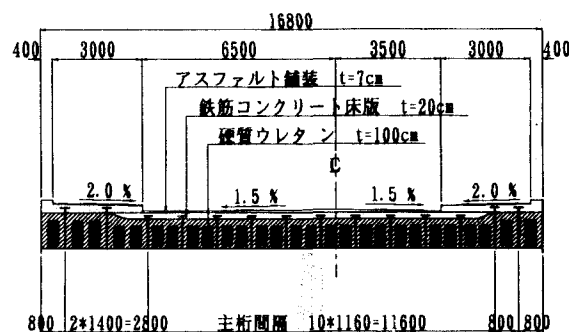


図-1 金桜橋横断面図

3. 解析の概要

本研究では、実橋を使用した現場計測結果と格子解析、版解析、3次元有限要素解析の3種類の解析による計算結

果を比較する事により、これら解析法の設計への適用性を検討する。まず、各解析法の概要を説明する。

3.1 格子解析

格子解析は主桁と横桁を構造要素とする2次元梁モデルに面外荷重を作用させて行った。要素剛性については硬質ウレタン部分を無視し、道路橋示方書から求めた主桁の有効幅を使用して計算した。格子解析モデルを図-2に示す。

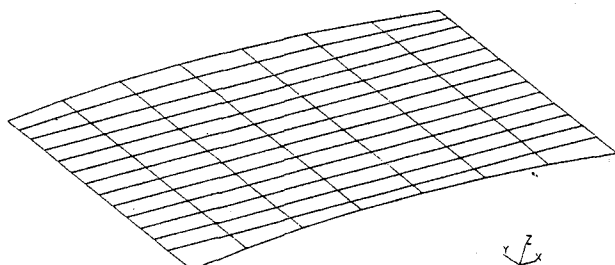


図-2 格子解析モデル

3.2 版解析

版解析で使用する板厚は、橋軸方向・橋軸直角方向のそれぞれについて計算した曲げ剛性をもとに、次式により版の等価板厚として求めた。

$$t^* = \{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot I_g / B\}^{1/3}$$

ここに、

t^* : 床版橋を一枚の版に置換したときの換算板厚

B : 計算対象版幅

I_g : 版幅Bあたりの断面2次モーメント

ν : ポアソン比

さらに、本橋の場合橋軸方向と橋軸直角方向で異方性を示すことから、橋軸方向のヤング係数 E_x とポアソン比 ν_x を基準値として、橋軸直角方向のヤング係数 E_y とポアソン比 ν_y を次式で計算した。

$$E_y = E_x (t_y / t_x)^3, \quad \nu_y = \nu_x (E_y / E_x)$$

計算に使用した材料定数ならびに版解析モデルをそれぞれ表-1、図-3に示す。

表-1 版解析に使用した材料定数

	弾性係数比	t^*	橋軸方向		橋軸直角方向	
			ヤング係数	ポアソン比	ヤング係数	ポアソン比
架設系	—	38.2	2.1×10^4	0.3	1.6×10^4	0.023
完成系	7.5	43.4	2.1×10^4	0.3	1.1×10^4	0.016

(単位: cm, kgf/cm²)

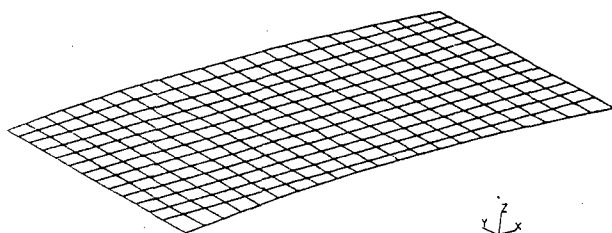


図-3 版解析モデル

3.3 3次元有限要素解析

3次元有限要素解析モデルを図-4に、要素の材料データを表-2に示す。主桁を構成する底鋼板及びTリブのウエブは8節点の3次元シェル要素で、Tリブのフランジは3節点の3次元棒要素で、コンクリート床版と硬質ウレタンは20節点の3次元ソリッド要素でそれぞれモデル化した。

表-2 3次元有限要素解析に使用した材料定数

	ヤング係数	ポアソン比
鋼材	2.1×10^4	0.3
硬質ウレタン	1.1×10^4	0.3
コンクリート	2.8×10^4	0.2

(単位: kgf/cm²)

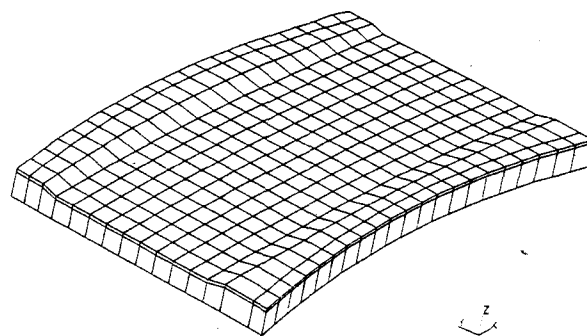


図-4 3次元有限要素解析モデル

4. 現場載荷試験の概要

金桜橋を使用して架設系ならびに完成系に対する載荷試験を行った。架設系ではコンクリート床版を荷重として静的載荷試験を、完成系では20トン積みトラックを2台使用して静的載荷試験及び振動試験を行った。

計測は、鉛直変位と断面内のひずみ、振動加速度について行った。鉛直変位については底鋼板の下側にセットした変位計により、断面内のひずみについては鋼桁の上下フランジ、ウエブの3等分点とコンクリート床版の上側主鉄筋・配力鉄筋ならびに床版上面に貼り付けたひずみゲージにより、振動加速度については底鋼板下側に取り付けた加速度計によりそれぞれ計測した。計測位置を図-5に示す。

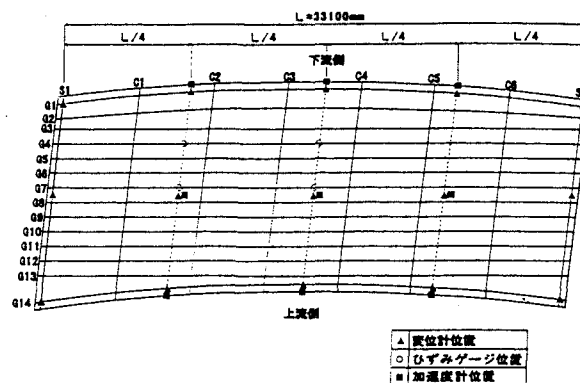


図-5 計測位置

5. 現場載荷試験結果及び考察

5.1 架設系における載荷試験

架設系における死荷重（床版コンクリート）載荷時のG1, G7の底鋼板と上フランジの橋軸方向ひずみの計測値を、格子解析、版解析、有限要素解析による計算結果とともに図-6に示す。死荷重によるひずみの最大値は $\pm 300 \times 10^{-6}$ 前後であり、応力換算で 630 kgf/cm^2 程度となっている。次に計測値と解析値との比較では、最外桁(G1)の上フランジで版解析値が20%程度小さくなっているが、他は実験値と解析値が比較的近い値となる。特に断面の中央に位置するG7桁では、全ての解析値が実験値とほぼ等しい結果になっている。

次に、スパン1/4断面の橋軸直角方向ひずみ分布の計測値を解析値とともに図-7に示す。橋軸直角方向のひずみは 70×10^{-6} 程度と小さな値となっている。実験値と解析値

との比較では、有限要素解析では比較的一致しているが、版解析ではほとんどひずみを生じておらず、また格子解析では正負が反対となる。版解析でひずみがほとんど生じないのは、橋軸直角方向の剛性を過小に計算しているためであり、格子解析では主桁位置を弾性支点とする連続梁として計算するためと思われる。しかし、応力レベルでは非常に小さいため、設計上は問題ないと判断できる。

5.2 完成系における載荷試験

(1) 載荷荷重

床版コンクリートが所要の強度を発現したことを確認した後、20トン積みトラック2台使用して完成系における静的載荷試験を行った。使用したトラックの緒元と車軸重量を図-8に、トラック載荷位置を図-9に示す。

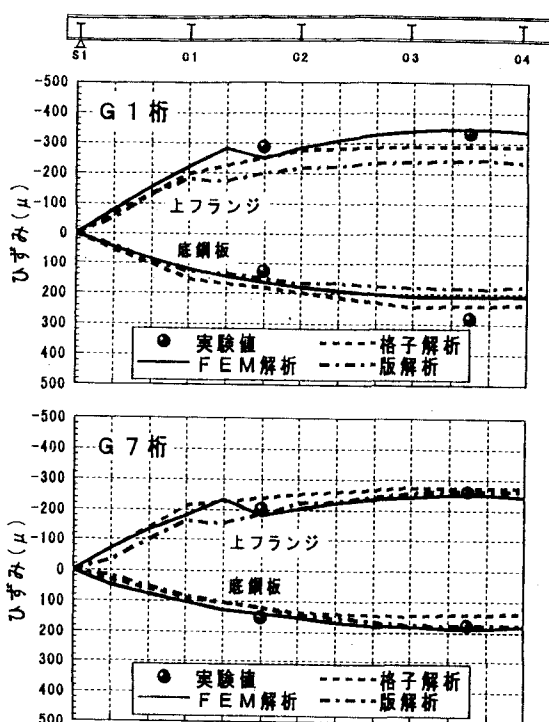


図-6 橋軸方向ひずみ分布（架設系）

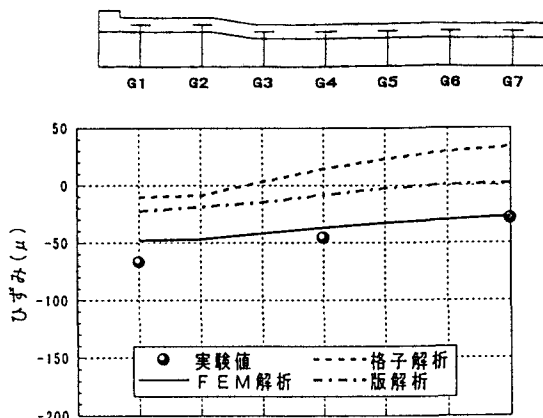
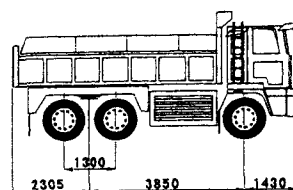


図-7 底鋼板の橋軸直角方向ひずみ分布（架設系）



	前輪 (tonf)	後輪 (tonf)	総重量 (tonf)
1号車	4.050	16.010	20.060
2号車	3.960	16.010	19.970

図-8 20トン積みトラックの緒元

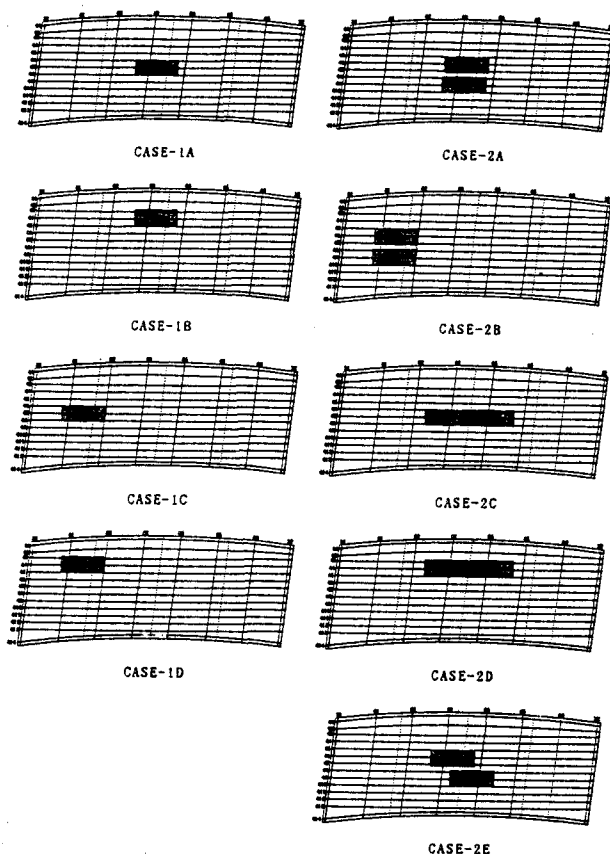


図-9 トラック載荷位置

(2) 対称載荷時 (CASE-2C)

対称載荷時として CASE-2C の位置に 20 トン積みトラック 2 台載荷したケースを取り上げ、たわみとひずみ分布について、最外桁 G1 と橋梁中心に近い G7 の 2 本の主桁を対象に、計測結果及び解析結果との比較について考察する。

橋軸方向のたわみを図-10 に示す。たわみの計測値は最大 5mm で支間長 33.1m の 1/6,620 と非常に小さな値となっている。次に、現場計測値と解析値との比較では、G1、G7 ともに有限要素解析では両者が非常によく一致している。また、格子解析と版解析ではともに計測値よりやや大きな値となる。このことから、設計計算に格子解析や版解析を使用することは、たわみについて安全サイドの結果を与えることがわかる。

次にコンクリート床版と底鋼板の橋軸方向のひずみを図-11 に示す。このときのコンクリート床版と底鋼板のひずみの最大値はそれぞれ 20×10^{-6} 、 40×10^{-6} となっており、これは応力換算で 4kgf/cm^2 、 84kgf/cm^2 となる。現場計測値と解析値との比較では、3 種類の解析法とも計測結果を妥当にシミュレート出来ていることがわかる。

最後に、支間中央断面における橋軸直角方向のひずみ分布を解析値とともに図-12 に示す。本橋は橋軸方向と比較して橋軸直角方向の曲げ剛性が非常に小さいが、コンクリート床版、底鋼板のひずみの計測値はそれぞれ 6×10^{-6} 、 12×10^{-6} となっており、応力換算で 1kgf/cm^2 、 25kgf/cm^2 となる。現場計測値と解析値との比較では、有限要素解析結果が比較的計測値に近い傾向を示すが、他の 2 種類の解析結果は計測値よりかなり大きな値となっている。しかし、実際の設計においては、橋軸直角方向の断面力により鋼桁部分の断面が決まることはなく、経済設計の観点から問題になることはないと思われる。

(3) 偏載荷時 (CASE-2D)

偏載荷時として CASE-2D の位置に 20 トン積みトラック 2 台を載荷したときのたわみとひずみ分布について、計測結果及び解析結果との比較について考察する。

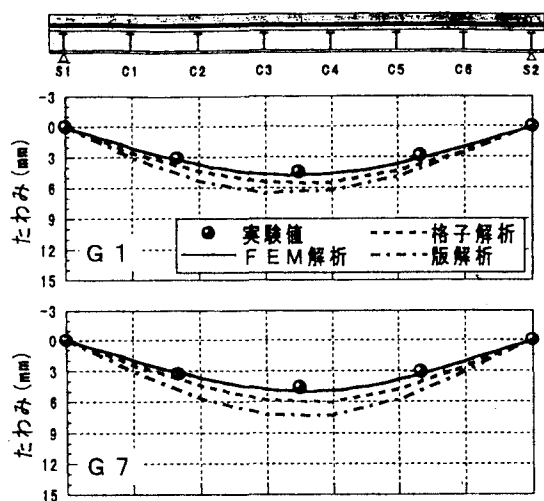


図-10 橋軸方向たわみ分布

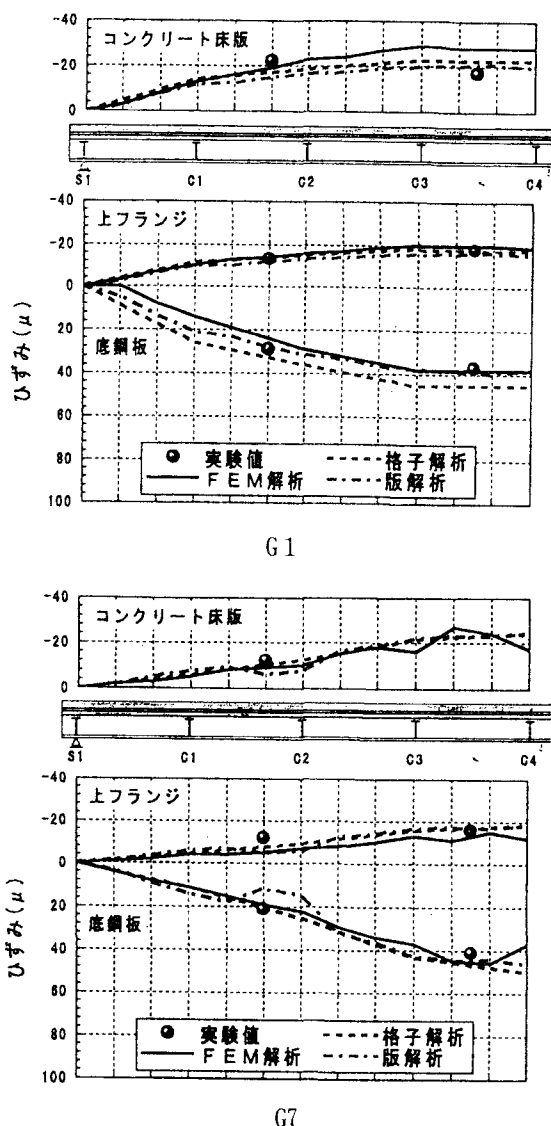


図-11 橋軸方向ひずみ分布

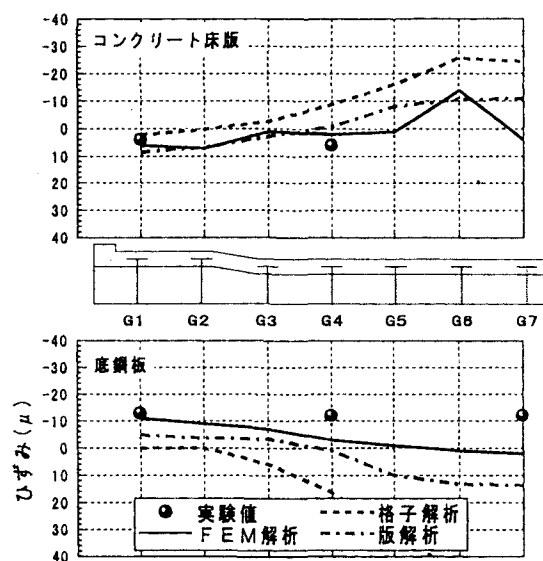


図-12 橋軸直角方向ひずみ分布

橋軸方向の G1, G7, G14 のたわみを図-13 に示す。たわみの計測値は最大 6mm で対称荷重の場合の 5mm より多少大きくなっている。次に、現場計測値と解析値との比較では、有限要素解析では全ての主桁で両者が非常によく一致している。また版解析では多少解析値が計測値より大きな値となるが、計測値同様に橋梁全体に荷重が分配されている。しかし格子解析では、偏載荷重側 G1 でたわみが2倍程度と大きく、反対側の G14 ではたわみがほとんど生じない結果となっており、荷重分配作用を反映できていない。このことから、設計計算に格子解析を使用することは、最大たわみをかなり大きく評価することになる。

次にコンクリート床版と底鋼板の橋軸方向のひずみを図-14 に示す。このときのコンクリート床版と底鋼板のひずみの最大値は G1 でそれぞれ 27×10^{-6} 、 43×10^{-6} となっており、これは応力換算で 5 kgf/cm^2 、 90 kgf/cm^2 となる。現場計測値と解析値との比較では、たわみ同様に格子解析の荷重分配作用が小さい影響がここでも顕著に見受けられた。特に、G1 の底鋼板のひずみが計測値や他の解析値と比較して2倍以上の値となっており、設計に格子解析を使用する場合、外桁においてかなり安全サイドとなる。

最後に、支間中央断面における橋軸直角方向のひずみ分布を解析値とともに図-15 に示す。コンクリート床版、底鋼板のひずみの計測値はそれぞれ 10×10^{-6} 、 15×10^{-6} となっており、応力換算で 2 kgf/cm^2 、 32 kgf/cm^2 となる。次に現場計測値と解析値との比較では、3種類の解析結果とも計測値をシミュレート出来ておらず、解析により橋軸直角方向のひずみを評価することは難しいことがわかる。

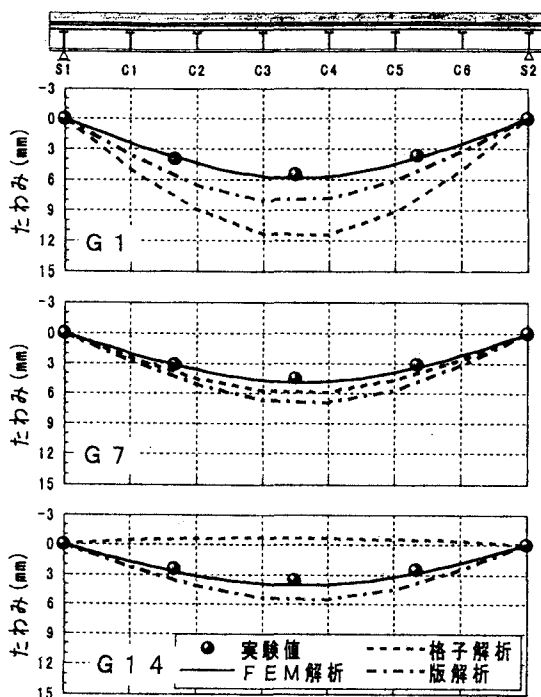
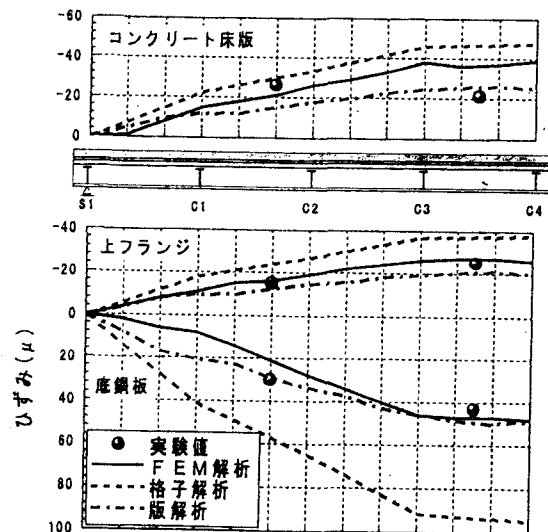
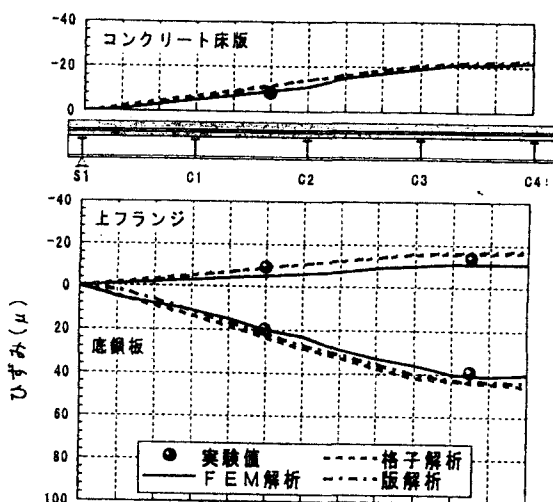


図-13 橋軸方向たわみ分布



G1



G7

図-14 橋軸方向ひずみ分布

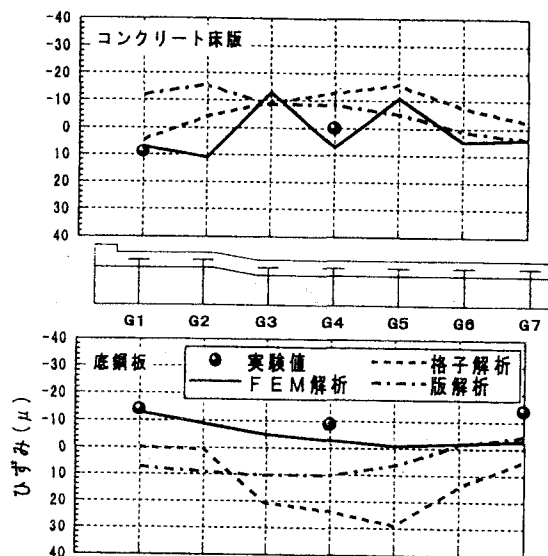


図-15 橋軸直角方向ひずみ分布

5.3 振動試験

一例として CASE-1B の位置に 20 トン積みトラックを偏載荷し、後輪を段差上から落下させることにより橋梁に自由振動を励起させた結果について示す。このときの支間中央断面の振動加速度波形と、支間中央断面と 1/4 断面のフーリエスペクトルをそれぞれ図-16, 17 に示す。図-16 より減衰定数は $h=0.038$ と求められる。これはコンクリート橋 ($h=0.05$) より小さいが合成桁 ($h=0.01$) よりかなり大きな値となっており、硬質ウレタンによる減衰作用によるものと推察される。

次にフーリエスペクトル図から得られる固有振動数と曲げ振動における固有振動数算定式

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{s^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

s : 振動次数, EI : 曲げ剛性, m : 単位体積重量
から計算される 1 次～3 次の固有振動数を表-3 に示す。これらは全て曲げ振動モードで、特に低次の固有振動数を比較すると両者はほとんど一致しており、上式が精度良く適用できることがわかる。

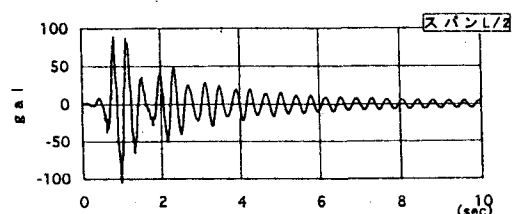


図-16 振動加速度波形 (G7 桁)

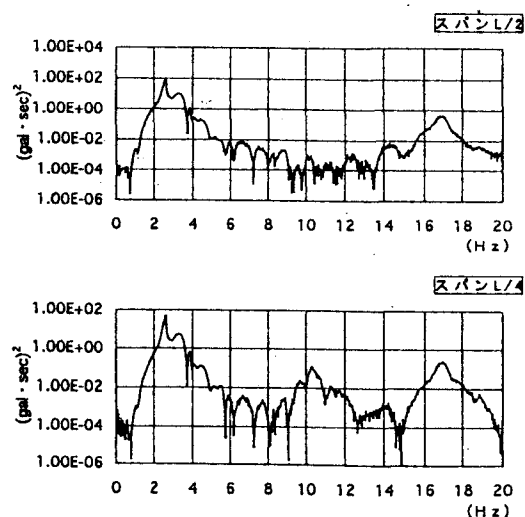


図-17 フーリエスペクトル (G7 桁)

表-3 固有振動数の現場計測値と計算値

	計測値(f_{ex})	計算値(f_{val})	f_{ex}/f_{val}
1 次 (Hz)	2.637	2.638	1.000
2 次 (Hz)	10.303	10.554	0.976
3 次 (Hz)	16.675	23.742	0.702

6. まとめ

硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成床版橋(リサイクリング橋)の金桜橋を使用して現場載荷試験を行い、計測結果と格子解析、版解析、有限要素解析の3種類の解析法による計算結果を比較することにより、これら解析法の設計への適用性について考察した。

本研究成果を整理すると次のようにまとめられる。

- (1) 架設系における死荷重(コンクリート床版)による鋼板の橋軸方向ひずみについては、格子解析、有限要素解析はともに良好にシミュレートできるが、版解析では外主桁の上フランジで20%程度小さな値となった。
- (2) 完成系におけるトラック載荷試験で対称載荷の場合には、たわみ・橋軸方向ひずみともに全ての解析法で良好にシミュレート出来るが、偏載荷の場合には格子解析では荷重分配作用が小さく、載荷位置近辺の計算値は計測値よりかなり大きく得られた。
- (3) 橋軸直角方向のひずみについては、3種類の解析法の全てが計測値よりかなり大きな値となるが、底鋼板の板厚等は橋軸方向の断面力で決まるため不経済設計となることはない。
- (4) 解析法の設計への適用については、3次元有限要素解析は計測値を最もよくシミュレートしているが使用性に劣るため、架設系については格子解析を、完成系については版解析を使用するのが妥当と思われる。架設系については、キャンバー値を求めるためにも格子計解析を用いることが必要となる。
- (5) 合成床版橋の低次の固有振動数は曲げ振動における固有振動数算定式により精度良く計算できる。

参考文献

- 1) 太田・利根川・古室・依田・上田：合成床版橋の設計と施工の現状、橋梁と基礎 Vol. 33, No. 7, 1999 年 7 月。
- 2) 合成床版橋研究会：合成床版橋設計・施工指針(案)，平成 10 年 7 月。
- 3) 太田・深沢・檜貝：硬質ウレタンを充填した合成型枠橋の開発研究、構造工学論文集 Vol. 39A, 1993 年 7 月。
- 4) 太田(俊)・日野・荒瀬・山田・太田(貞)・財津：廃棄物の土木構造物へのリサイクル化に対する一つの試み、土木構造・材料論文集 第 9 号, 1993 年 11 月。