

鋼少数主桁橋梁に適用する I 形鋼格子床版の疲労耐久性

Fatigue Durability of Concrete-Filled I-beam Grid Slabs Applied in Widely Spaced Girder Bridges

高木優任*, 水口和之**, 檜作正登***, 藤井康盛****, 松井繁之*****

Masahide TAKAGI, Kazuyuki MIZUGUCHI, Masato HIZUKURI, Yasumori FUJII and Shigeyuki MATSUI

*工修 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

** 日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部 構造技術課長代理 (〒460-0008 名古屋市中区栄 4-1-1)

*** 日本道路公団 名古屋管理局 桑名管理事務所 改良助役 (〒511-0854 三重県桑名市大字蓮花寺字鍋谷 608-2)
(前 日本道路公団 名古屋建設局 名古屋工事事務所)

**** 新日本製鐵(株) 建材開発技術部 マネジャー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

*****工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Many widely-spaced girder bridges in which structural rationalization is achieved by reducing the number of girders and the design span of slabs is widened have been constructed as an effective means for reducing construction cost. In widely-spaced girder bridges, it is important to ensure the durability of slabs whose span is made large to rationalize the whole structural system. In order to evaluate the fatigue durability of concrete-filled I-beam grid slabs, a wheel running fatigue test using actual-size slabs with a 6m span was carried out based on the essential design for a widely-spaced girder bridge. As a result, it was found that concrete-filled I-beam grid slab had a sufficient fatigue strength under heavily over loading states.

key words : fatigue durability, wheel running test, composite slab

1. はじめに

現在、鋼橋においては、省力化、経費節減、維持管理費用の低減などの観点から、構造を合理化し、かつ主桁本数を削減した少数主桁橋梁が計画・建設されている。しかしながら、床版は自動車荷重が直接作用する部材であるため、最も疲労損傷しやすく、従来の床版の設計においては、RC床版の損傷などの反省を踏まえ、床版支間を2~3m程度とし、床版厚を大きくすることによって耐久性を確保する方向にあった。したがって、少数主桁橋梁に適用される床版には、橋梁の長寿命化・機能保持のためにも、床版の耐久性を確保することが重要な問題であると認識されている。

このような認識に立ち、長支間床版の耐久性を確保するため、プレキャストPC床版、移動型枠によるPRC床版、鋼・コンクリート合成床版などが開発・検討されている。I形鋼格子床版は、図-1に示すように、小型のI形鋼を主部材とした鋼・コンクリート合成床版であり、I形鋼のウェブにあけられた孔(パンチ孔という)を通して配力筋を配置し、I形鋼の下面に型枠として底板と呼ばれる垂鉛鉄板(厚さ1mm)を取り付けたものである。この鋼の骨組みをパネルとして工場で製作し、パネルを現地に輸送して桁上に架設・調整した後、コンクリート

を打設するプレハブ床版であり、急速施工、現場施工の省力化が可能である。また、パネル下面に鋼板を有するため、桁下への落下物の心配がなく防護工を最小限にでき、安全施工が可能である。さらに、パネル自体が高い剛性を有しているため、コンクリート打設以前でも作業用車が通行でき、なおかつコンクリートまで工場で打設する工場製作のプレキャスト床版に比較して、現地まで

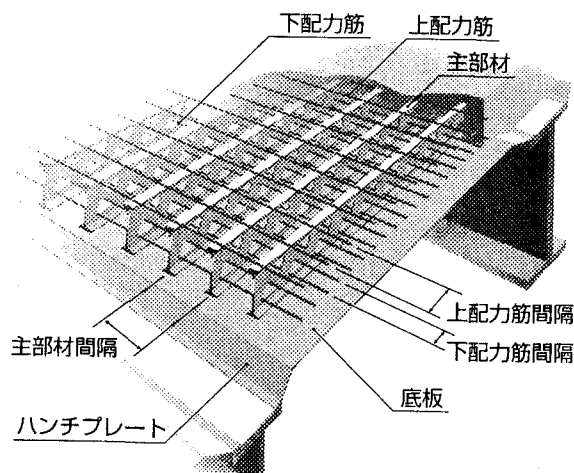


図-1 I形鋼格子床版

のパネルの輸送重量が軽量であり、輸送・架設の省力化が可能であるなどの特徴を有している。

本論文は、少数主桁橋梁への適用を想定した、床版支間が6m程度となるI形鋼格子床版を対象として、その疲労耐久性を確認すべく検討を行った結果について報告するものである。

2. 検討の概要

既往の研究により、道路橋における床版の損傷原因は荷重の移動にあることが指摘されており、鉄筋コンクリート(RC)床版については、移動荷重では一定点荷重の場合よりも疲労強度が1/5,000程度に低下することが実験により確認されている^{1)・2)}。一方、従来タイプ(床版支間4m以下)のI形鋼格子床版の疲労破壊はRC床版のそれとは異なり、I形鋼の疲労破壊により終局状態に至ることが確認されており、実橋レベルでは十分な耐久性・信頼性を有することが確認されている³⁾。

従来、I形鋼格子床版では、I形鋼の高さが105mm、130mm、150mmの3種類が用いらてきたが、長支間床版に対応するため、新たに大型のI形鋼(高さ200mm)を使用することになる。従来型のI形鋼格子床版と比較して、長支間床版では、

- ・大型のI形鋼を使用すること
- ・曲げとせん断の比率が従来の床版と異なり、曲げが支配的となること
- ・支間の増加によりたわみが増加すること

などから主部材の疲労破壊以外の要因により破壊に至る可能性がある。したがって、長支間に適用するI形鋼格子床版の疲労耐久性を評価するため、実物大の供試体を用いて移動荷重疲労試験を行うことにした。

3. I形鋼格子床版の移動荷重疲労試験

3.1 試験の概要

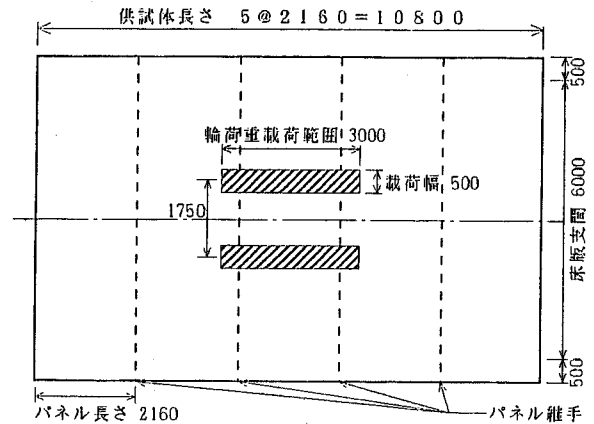
試験は長支間床版用の移動荷重疲労試験機⁴⁾を用いて行い、床版を支間6mで単純支持し、支間の中央に道路橋示方書に規定されているT荷重と同寸法(載荷面20×50cm、車輪間隔1.75m)の1軸2輪荷重を載荷した。

3.2 供試体の概要

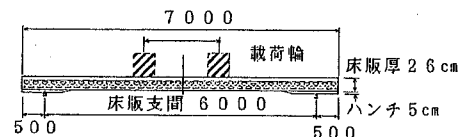
床版供試体の概要を表-1、寸法を図-2に示す。供試体の断面決定に際しては、以下のような考え方をとった。

(1)供試体の設計

I形鋼格子床版の設計法は鋼道路橋設計便覧⁵⁾に示されている。しかしながら、その適用支間は単純版で4m以下に制限されている。長支間床版へのI形鋼格子床版の適用にあたっては、鋼道路橋設計便覧による設計法を



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2 供試体の寸法

表-1 床版供試体の概要

供試体寸法	7000×10800×260mm	
床版支間	L=6m(単純版)	
床版厚	26cm	
主部材	サイズ	I-200(材質:SS400)
	ピッチ	18cm
配力筋	サイズ	D19(材質:SD345)
	ピッチ	下側10cm, 上側20cm
底板	1mm(パネル継手部は1.6mm)	

床版支間8mまで適用することが提案されており⁶⁾、供試体の設計に際してはこれにしたがってB活荷重により設計を行い、配筋を決定した。

(2)床版厚

I形鋼格子床版の床版厚は、その構造特性から、RC床版よりも薄く設計するのが一般的である。これは、I形鋼を用いているので床版厚が薄くても剛性を高くできることや破壊性状がRCとは異なり、I形鋼の疲労により耐久性が決まることなどによるものである。床版厚は通常、(I形鋼高さ+配力鉄筋径+コンクリートのかぶり)によって決定される。本試験においては、形鋼が大型化したことからかぶりを通常より1cm大きく取って純かぶりを4cm以上とし、床版厚26cmとした。

(3)使用コンクリート

コンクリート系床版においては、乾燥収縮ならびに温度応力などに起因するコンクリートの初期ひび割れが床版の耐久性を低下させる要因になることが指摘されている。この初期ひび割れを低減し、床版の耐久性を向上させる手法として膨張コンクリートの使用が考えられ、その効果が確認されている⁷⁾。I形鋼格子床版は主部材(I

表-2 コンクリートの示方配合

設計基準 強度 σ_{28} (kgf/cm ²)	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラン の範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単位量 (kgf/m ³)					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	混和材 (膨張)
						W	C	S	G		
300	25	8±2.5	4.5	43.0	43.6	164	352	768	1006	1.528	30

混和剤：A E減水剤

混和材：膨張材

形鋼)でコンクリートを仕切るような構造であるので、RC床版に比べて膨張コンクリートによるプレストレスが入りやすく、より一層の効果が期待できる³⁾。本試験で用いた床版コンクリートの示方配合を表-2に示す。ここでは、コンクリート強度が低下しない程度の量として、膨張材を30kgf/m³添加した。

(4) 底板

底板はコンクリート打設時の型枠の役目のみを期待する部材である。そのため、設計上は非強度部材扱いであり、考慮されていない。しかしながら、板厚1mmと薄い部材ではあるが、床版の引張側の有利な位置にあり、実験的にその存在が床版の耐久性を向上させることが確認されている³⁾。今回は、実橋における耐久性を確認するという観点から、底板を取り付けて実験を行うことにした。

(5) パネル継手

I形鋼格子床版は工場で鋼の骨組みパネルを制作し、現場でコンクリートを打設するプレハブ床版である。このため、パネルの輸送制限の関係から、図-3に示すようなパネル継手が発生することになる。パネル継手部では底板が不連続であり、配筋状態も通常部とは異なることから、継手部が疲労耐久性上の弱点になることも考えられる。本試験では、図-2に示すように、パネル継手を輪荷重の走行範囲に2カ所設置し、その耐久性を確認することとした。

(6) 床版コンクリートの打設

床版コンクリートの打設に関しては、桁位置に相当する床版パネルの両端部をH形鋼で単純支持し、設計上の仮定通り、死荷重による応力がI形鋼に導入されるようにした。

3.3 載荷荷重

載荷荷重については、以下の3つのケースを考えた。

- ①道路橋示方書⁸⁾の設計自動車荷重(T荷重)
- ②実路における実測値を考慮した過積載荷重
- ③主部材方向の設計曲げモーメントを再現する荷重

まず最初に、基本的な荷重として、道路橋示方書の設計自動車荷重を位置づけ、T荷重に相当する1軸20tf荷重を最初に載荷することにした。

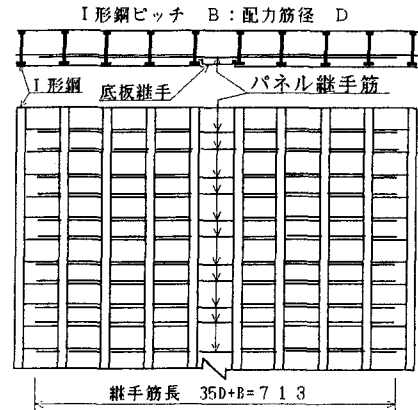


図-3 パネル継手部構造

次に、過積載荷重について、実路における軸重の計測は松井ら⁹⁾などにより行われているが、実用的にはタンデム軸(2軸)で40tf程度が最大であると考えられる。床版の設計に用いるT荷重は、これらの2軸荷重を1軸荷重に変換したものが用いられている。文献10)に従い、軸重40tfのタンデム軸を換算すると、床版支間6mでは32tfの1軸荷重に相当する。したがって、過積載荷重としては軸重32tfを載荷することとした。

主部材方向の設計曲げモーメントを再現する荷重としては、FEM解析の結果、1軸で40tfの荷重を載荷すれば同等の曲げモーメントが得られることがわかったので、軸重40tfを載荷することとした。

上記の載荷ケースを踏まえ、以下の3つのステップにて荷重を載荷することとした。

STEP-1:軸重20tfを4万往復

STEP-2:軸重32tfを30万往復

STEP-3:軸重40tfを10万往復

この載荷荷重は1つの試算では約3万台/日・レーンの交通量の道路における約50年の供用に相当するものである。

3.4 測定

計測項目は床版のたわみ、I形鋼の上下フランジならびにウェブのひずみ、上下配筋鉄筋のひずみである。変位は変位計、鋼材のひずみはひずみゲージにより測定した。動的載荷の途中において、各載荷ステップ毎に定期的に試験機を停止させて、静的載荷による計測を実施した。

3. 5 試験結果

(1) コンクリートの圧縮試験結果

コンクリートの圧縮試験結果を表-3に示す。今回使用したのは設計基準強度が 300kgf/cm^2 (30N/mm^2)の早強コンクリートであるが、水中養生したテストピースの7日強度は 36.0N/mm^2 であり、所定の強度が得られていた。また、試験開始日はコンクリート打設日から73日めであったが、現場養生を行ったコンクリートの強度は 53.2N/mm^2 であった。

なお、試験終了後、コンクリート打設から177日目に床版供試体からコンクリートコアを抜き取り、圧縮試験を行ったが、圧縮強度は 38.4N/mm^2 と、載荷試験開始時のコンクリート強度よりも低い結果が得られた。

表-3 コンクリート圧縮試験の結果

材 齢 (養生方法)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
7日 (標準養生)	36.0	—	3.19
28日 (標準養生)	44.1	—	3.63
73日 (現場養生)	53.2	29.2	4.20
117日 (コアリング)	38.4	28.6	—

(2) 床版コンクリートのひび割れ

所定の載荷を終了した時点で床版上面のひび割れの有無を観察したが、コンクリートにひび割れの発生は認められなかった。床版下面については、亜鉛鉄板があるため観察できなかった。

(3) 床版のたわみ

図-4に繰り返し載荷回数と床版中央面におけるたわみの関係を示す。残留たわみが試験終了時点で約1mm生じたが、繰り返し載荷によっても活荷重たわみはほとんど変化しておらず、繰り返し載荷による床版剛性の低下は生じていないことがわかる。

(4) I形鋼ならびに鉄筋のひずみ

図-5に繰り返し載荷回数とI形鋼のウェブ、下フランジ、および下配力筋のひずみの関係を示す。各測定値の変動は、載荷荷重が増加した場合に見られるが、発生ひずみは小さかった。I形鋼の下フランジとウェブのひずみを比較すると、パンチ孔による応力集中のため、ウェブ部分のひずみが下フランジよりも大きくなっている。また、載荷点近傍の下フランジの発生応力は、主部材方向の設計曲げモーメントを再現する40tf載荷時においても、静的載荷で 180kgf/cm^2 程度しか発生しておらず、引張側コンクリートならびに底板を無視した設計応力

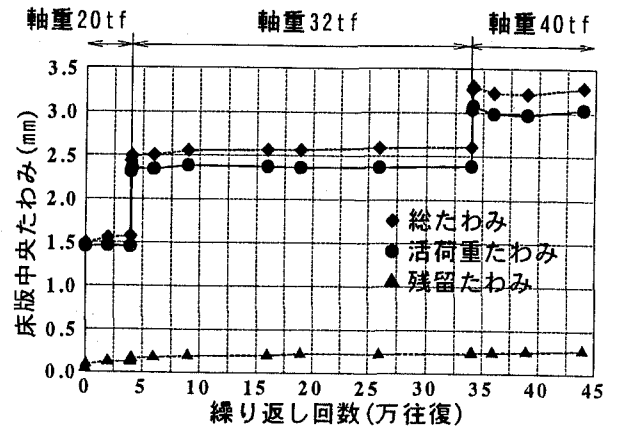


図-4 繰り返し載荷回数-床版中央部のたわみの関係

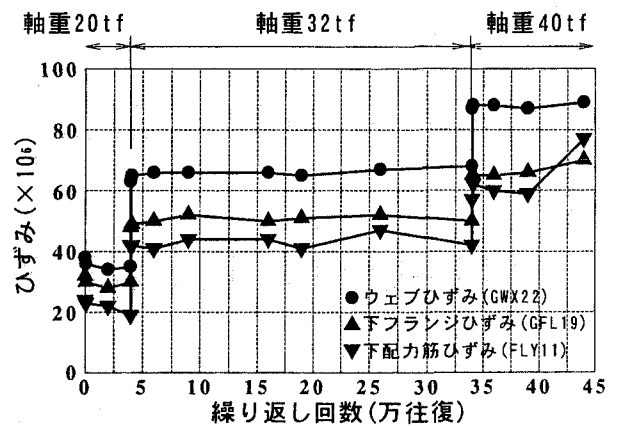
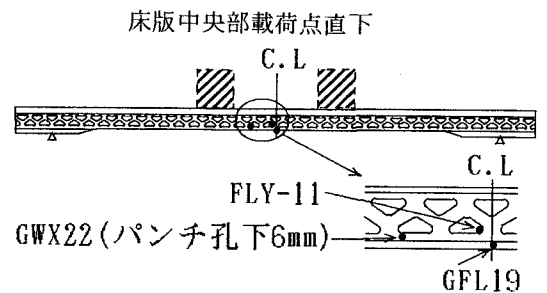


図-5 繰り返し載荷回数-鋼材ひずみの関係

(992kgf/cm^2 、衝撃分を差し引くと 731kgf/cm^2)に比較して非常に低い値であった。しかし、この応力値は後に述べるFEM解析により得られる断面力を使って評価すると、引張側コンクリートならびに底板も有効とした全断面有効とした場合の応力値とよく一致する。このことから、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスや底板の存在による合成のアップが非常に有効に働いていると考えられる。

(5) パネル継手部

試験終了時まで、パネル継手部に変状は見られなかった。

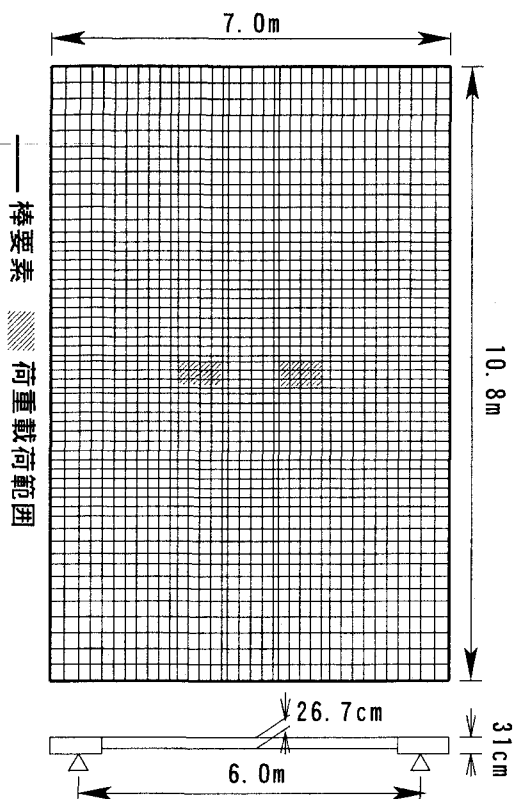


図-6 有限要素分割

4 FEM解析による床版劣化度の評価

繰り返し荷重による床版の異方性の度合いやコンクリートの有効断面を調べるため、FEM解析を実施した。

4.1 解析方法

床版は板要素でモデル化し、コンクリート打設時の型枠として使用した四周のサイドプレートは棒要素でモデル化した。要素分割を図-6に示す。

解析における断面としては、

- ①引張側コンクリートならびに底板も有効とした断面
 - ②引張側コンクリートと底板は無視した断面
- の2種類を考え、I形鋼格子床版を弾性係数を調整した全断面有効の直交異方性版としてモデル化した(図-7)。また、荷重は図-8に示すように、床版の表面に等分布荷重で作用し、これが床版の中央まで45度で分布するものと仮定した。

4.2 断面諸量

(1)コンクリートの弾性係数

コンクリートの弾性係数の設定にあたっては、設計上、コンクリートに発生する応力が 50kgf/cm^2 程度であったことを考慮し、試験終了後、床版コンクリートからコアリングした供試体による圧縮試験の応力-ひずみ曲線の初期勾配をとって、 $E_c=2.90 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

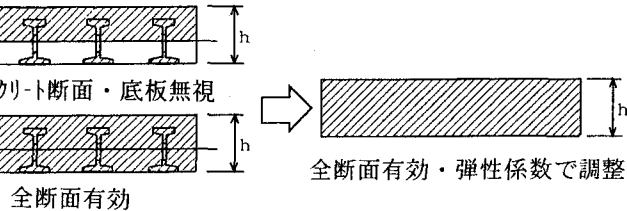


図-7 床版のモデル化

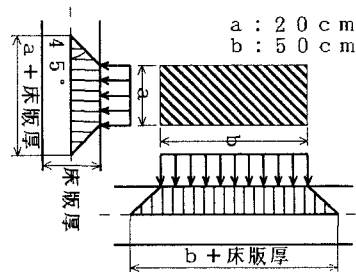


図-8 輪荷重の仮定

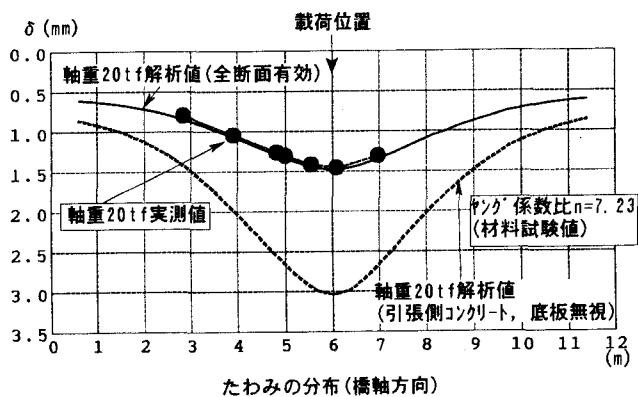


図-9 橋軸方向のたわみ分布

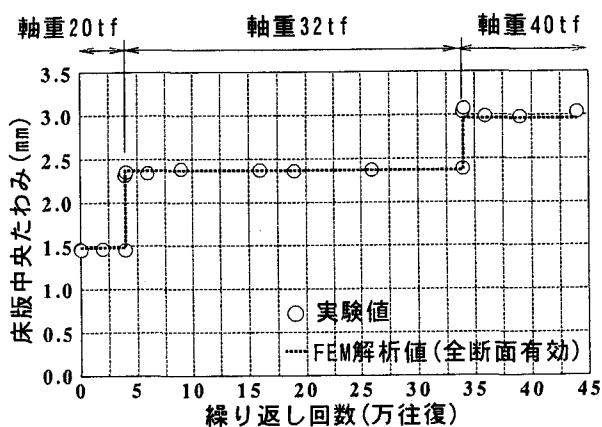


図-10 繰返し荷重回数-床版中央部のたわみの関係

(2)床版厚

床版厚の設定にあたっては、床版コンクリート打設時のたわみ分 0.7cm を考慮し、 26.7cm としてモデル化した。

4.3 解析結果と試験結果の比較

図-9に軸重 20tf を初期荷重した時の橋軸直角方向の

たわみ分布を、図-10 に繰り返し載荷回数と床版中央部のたわみの関係を示す。図中にはFEM解析により得られた値の他、実験により得られた値を併記した。図-9より、床版の挙動は引張側コンクリートならびに底板を有効とした全断面有効の挙動を示していることがわかる。また、図-10より、繰り返し回数が増加しても活荷重によるたわみはほとんど変化せず、全断面有効の場合のたわみとほぼ一致している。

図-11 は、最大たわみを1として、床版の橋軸方向のたわみ比の分布を示したものである。床版にひび割れが生じると、断面剛性が変化するために異方性が変化し、橋軸方向と橋軸直角方向の荷重の分配が変わるため、たわみ比は変化していくと考えられる。しかし、本試験の供試体においてはたわみ比の変化は試験終了まで見られず、たわみ比の形状も全断面有効の場合に一致した。このことより、床版に異方性は発現しておらず、床版のコンクリートにひび割れは発生していないものと推定される。

5. 結論

実物大床版による輪荷重走行疲労試験を行い、支間6mのI形鋼格子床版の疲労耐久性について検討を行った。主な結論を以下に要約する。

(1)床版支間6mの実物大移動載荷疲労試験を実施し、設計軸重(20tf)、過積載荷重(32tf)、設計曲げモーメント再現荷重(40tf)をそれぞれ4万往復、30万往復、10万往復繰り返し載荷したが、載荷点直下のたわみは繰り返し回数が増しても増加せず、床版としての耐荷力性状に変化は見られなかった。

(2)FEM解析により床版剛性の評価を行った結果、今回の実験においては底鋼板も考慮し、なおかつ引張側コンクリートも有効とした全断面有効の挙動を最後まで示しており、床版コンクリートのひび割れは生じていないと推定され、十分な耐久性を有していることが確認された。

(3)繰り返し荷重が作用する輪荷重走行範囲に2ヶ所のパネル継手を設けたが、所定の載荷を終了した時点においても、パネル継手部に損傷は見られず、継手部が弱点となることはなかった。

あとがき

鋼・コンクリート合成床版であるI形鋼格子床版について、その疲労耐久性について調査し、その結果耐久性に問題の無いことが確認された。今回の実験においては膨張コンクリートによるケミカルプレストレスと底鋼板

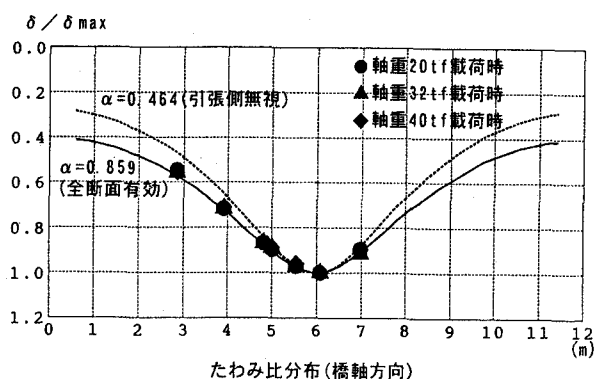


図-11 橋軸方向のたわみ比分布

の効果により、床版は全断面有効の挙動を示し、疲労強度に対して支配的であるI形鋼に発生した応力は非常に低い値であった。この点については、別途、コンクリートを打設しないI形鋼の疲労試験ならびに数値解析による床版の疲労耐久性の評価を実施し、引張側コンクリートを無視した状態に対する検討を実施し、十分な耐久性を有することは確認している。

謝辞 移動載荷疲労試験の実施にあたっては(社)建設機械化協会/建設機械化研究所にご協力をいただいた。ここに記し、関係各位に感謝の意を表する。

<参考文献>

- 1.松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，昭和59年11月
- 2.松井繁之：合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究，鋼構造論文集 vol.1 No.2, 1994.6
- 3.大田孝二，森寛司，高木優任，鈴木清，福田晃，松井繁之：I形鋼格子床版の長支間化に対応する設計法と疲労強度，第3回合成構造の活用に関するシンポジウム,1995.11
- 4.三田健治，飯束義夫：移動載荷疲労試験機の新設について，高速道路と自動車，第39巻第7号，1996.7
- 5.日本道路協会：鋼道路橋設計便覧,昭和54年2月
- 6.大田孝二，森寛司，高木優任，松井繁之：鋼少数主桁橋に適用するI形鋼格子床版の設計法に関する考察，橋梁と基礎，1997.2
- 7.風間徹，増田隆，木曾茂：膨張コンクリートを使用した鋼橋RC床版の特性，橋梁と基礎，1991.9
- 8.日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996.12
- 9.松井繁之，守屋裕兄，谷垣博司：近畿管内11路線における交通荷重実態調査，土木学会第50回年次学術講演会概要集，平成7年9月
- 10.守屋裕兄，谷垣博司，松井繁之，大野義範：活荷重実測結果に基づく設計軸重に関する考察，土木学会第50回年次学術講演会概要集，平成7年9月