

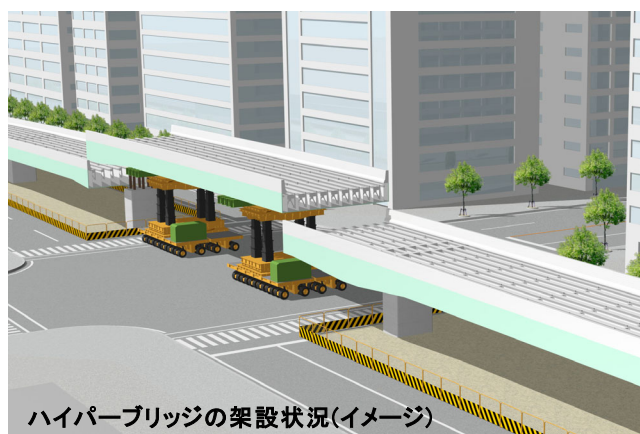
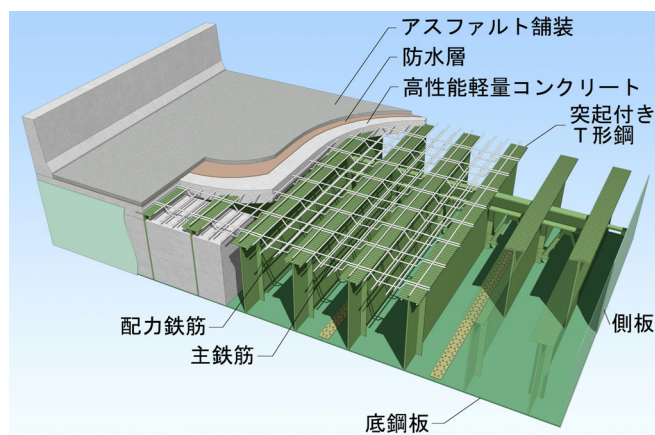
ハイパーブリッジの開発 ―連続化と床版部の疲労耐久性の検証―

桁高さを抑え、景観に優れた立体交差橋梁

赤坂 雄司・原 夏生・松林 卓・上村 明弘^{*1}・神田 恭太郎^{*1}・熊野 拓志^{*1}

Development of Hyper-Bridge – Verification of Continuous Structure and Fatigue Durability – Low height, and an excellent overpass bridge in the spectacle

Yuji AKASAKA, Natsuo HARA, Taku MATSUBAYASHI, Akihiro UEMURA, Kyotarou KANDA, Takushi KUMANO



研究の目的

ハイパーブリッジとは、突起付きT形鋼を主桁に用い、床版部に高性能軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成床版橋であり、他の橋梁形式と比較して構造高を低く抑制することが可能である。立体交差高架橋などの多径間連続形式として更なる構造高の抑制、長支間化に対するニーズが高く、長支間・連続合成床版橋としての技術の確立が求められるようになった。こうした背景の下、前田建設工業と川鉄橋梁鉄構とが共同でハイパーブリッジの開発に取り組んでいる。

技術の説明

ハイパーブリッジは、DFTを底鋼板に溶接して主構造が構成され、正の曲げモーメントに対して圧縮側はDFTフランジと現場打設コンクリートの合成断面で抵抗し、引張り側は底鋼板で抵抗する合理的な構造である。中間支点をモデルにした負曲げ静的载荷試験を実施して、中間支点部に発生するひび割れ制御設計が可能であること、また定点疲労载荷試験からは、139kNで103億回に相当する繰返し荷重を与えても、普通コンクリート、軽量コンクリート共に押し抜きせん断破壊は生じず、両者とも優れた疲労耐久性があること、さらに、階段状荷重漸増载荷による輪荷重走行試験から、ハイパーブリッジの高性能軽量コンクリート床版は極めて高い疲労耐久性を有していることが検証された。

主な結論

ハイパーブリッジの中間支点部を想定した実物大負曲げ静的载荷試験、高性能軽量コンクリートを用いた床版部の定点疲労試験ならびに移動輪荷重走行試験の各々についての、試験概要とその結果の概要について述べた。

負曲げ静的载荷試験から、負曲げ部においても平面保持の仮定が成立し、ひび割れ幅も精度良く推定できることが明確となり、定点疲労载荷試験と輪荷重走行試験から、ハイパーブリッジの構造形式は疲労耐久性にすぐれていること、また高性能軽量コンクリート床版は高い疲労耐久性を有していることが検証された。

^{*1} 川鉄橋梁鉄構(株) 橋梁事業本部 技術部 開発技術室

ハイパーブリッジの開発 — 連続化と床版部の疲労耐久性の検証 —

赤坂 雄司 原 夏生
松林 卓 上村 明弘^{*1}
神田 恭太郎^{*1} 熊野 拓志^{*1}

要 旨

ハイパーブリッジとは、突起付きT形鋼を主桁に用い、床版部に高性能軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成床版橋であり、他の橋梁形式と比較して構造高を低く抑制することが可能である。立体交差高架橋などの多径間連続形式として更なる構造高の抑制、長支間化に対するニーズが高く、長支間・連続合成床版橋としての技術の確立が求められるようになった。こうした背景の下、前田建設工業と川鉄橋梁鉄構とが共同でハイパーブリッジの開発に取り組んでいる。

本論文では以下のことが明確となった。中間支点をモデルにした負曲げ静的載荷試験を実施して、中間支点部に発生するひび割れ制御設計が可能であること、また定点疲労載荷試験からは、139kNで103億回に相当する繰り返し荷重を与えても、普通コンクリート、高性能軽量コンクリート共に押し抜きせん断破壊は生じず、両者とも優れた疲労耐久性があること、さらに輪荷重走行試験から、ハイパーブリッジの高性能軽量コンクリート床版は極めて高い疲労耐久性を有していることが検証された。

キーワード ハイパーブリッジ／立体交差道路／合成床版橋／高性能軽量コンクリート／負曲げ／床版／疲労耐久性／定点疲労載荷試験／輪荷重走行試験

目 次

- | | |
|--------------|-------------|
| 1. はじめに | 4. 定点疲労載荷試験 |
| 2. ハイパーブリッジ | 5. 輪荷重走行試験 |
| 3. 負曲げ静的載荷試験 | 6. おわりに |

DEVELOPMENT OF HYPER-BRIDGE —VERIFICATION OF CONTINUOUS STRUCTURE AND FATIGUE DURABILITY—

Yuji AKASAKA	Natsuo HARA
Taku MATSUBAYASHI	Akihiro UEMURA
Kyotarou KANDA	Takushi KUMANO

Synopsis:

The Hyper-Bridge is steel and concrete composite slab bridge, which uses deformed flange T-shapes steel and super lightweight aggregate concrete. This bridge can reduce structural height low compared with other bridge. Further this bridge is requested the establishment of the technology for continuous structure such as overpassing bridges, and as for long length.

We clarified that making the middle fulcrum a model it negatively bend, static loading examination was executed, and the crack control design generated in the middle fulcrum part was possible. Moreover, from fixed point cycle loading test, even if the repetition load that corresponded to 10.3 billion times in 139kN was given from the fixed point, it became clear that both super lightweight aggregate concrete and normal concrete are not causing the shearing destruction, and there was tiredness durability excellent with both. From the wheel running test, that super lightweight aggregate concrete slab of Hyper-Bridge was scarcely damaged and had the excellent fatigue durability.

* 1 川鉄橋梁鉄構(株) 技術部 開発技術室

1. はじめに

突起付き T 形鋼(以下 DFT と称する)を主桁に用いた鋼・コンクリート合成床版橋は、他の橋梁形式と比較すると、最も構造高を低く抑制することができ、急速施工が可能であることや、景観性に優れる等の特長がある¹⁾。

合成床版橋は、従来から単径間形式として実績を重ねてきたが、近年では、耐震性や車両の走行性向上、さらには立体交差高架橋への適用など、連続化技術の確立が求められるようになった。また長支間化へのニーズも高く、床版部に高性能軽量コンクリート(独立空隙型低吸水性の軽量骨材を用いたコンクリート、粗骨材では 24 時間吸水率が 5.0%以下で、骨材の圧縮強度が 800N/mm^2 以上)²⁾を適用することは、これに応えようとするものである。これらの背景の下、前田建設工業と川鉄橋梁鉄構とが共同で、道路立体交差の急速施工法に適用することを目的として、ハイパーブリッジ(高性能合成床版橋)として開発を進めている。

ここでは、ハイパーブリッジの中間支点部を想定した実物大負曲げ静的載荷試験、高性能軽量コンクリートを用いた床版部の定点疲労試験ならびに移動輪荷重走行試験の各々についての試験概要とその結果について述べる。

2. ハイパーブリッジ

2.1 ハイパーブリッジの概要

DFT とは形鋼の圧延時にフランジ外面に横節状の突起を成型した T 形鋼であり、合成床版橋では、図-1 に示すように DFT を底鋼板に溶接して主構造が構成される。この構造形式は、正の曲げモーメントに対して、圧縮側は

DFT フランジと現場打ちしたコンクリートの合成断面で抵抗し、引張側は底鋼板で抵抗する合理的な構造である。鋼とコンクリートの合成は DFT の突起とコンクリートの付着や機械的せん断抵抗などによるため、他形式と比較してスタッドなどのずれ止めが不要となること、ならびに合理的な構造によって構造高が低減できる。

また、鋼部材の材片数や溶接延長の最小化により工場での製作工程が短縮でき、さらに架設時には底鋼板と端板、側板により箱形状が構成されるため、型枠支保工・足場工を大幅に削減できると共に、桁の下面に凹凸のないすっきりした構造であり、環境に配慮した景観の実現に寄与できる。

なお、ここで想定した立体交差のモデルは、5 径間連続合成床版橋(支間: $29.5\text{m}+45\text{m}+60\text{m}+45\text{m}+29.5\text{m}$, 2 車線、図-2 参照)であり、その支点部と支間中央部の断面形状を図-3 に示す。

2.2 技術的課題

ハイパーブリッジの主な技術的課題は次の①～③である。

- ①合成床版橋の連続化技術の確立
- ②高性能軽量コンクリート床版の疲労耐久性の確認
- ③ハイパーブリッジの複合ラーメン化技術の確立

合成床版橋自体は、従来から単径間形式として実績を重ねてきた橋梁であるが、立体交差高架橋への適用には連続化技術の確立が必要である。また長支間化のために適用する高性能軽量コンクリート床版は、実用化に疲労耐久性の確認が必要となる。これらの要素技術の確立に

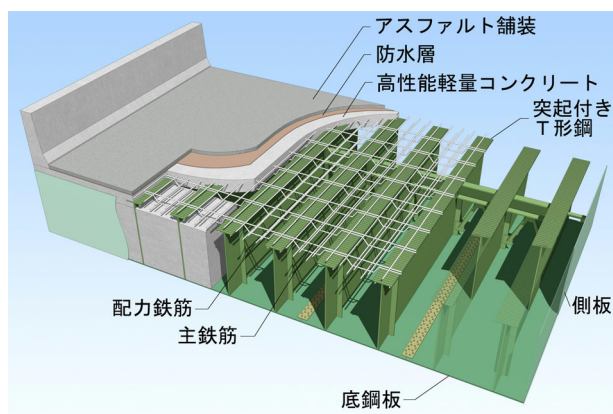


図-1 ハイパーブリッジの構造例

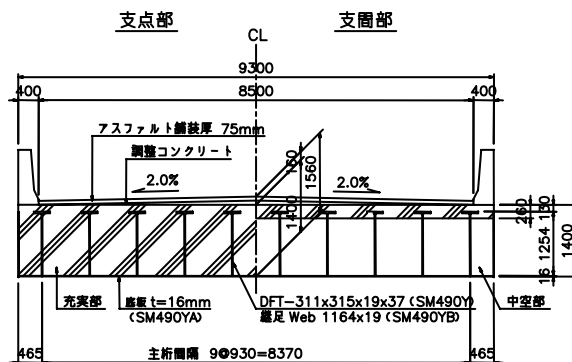


図-3 ハイパーブリッジの断面構造

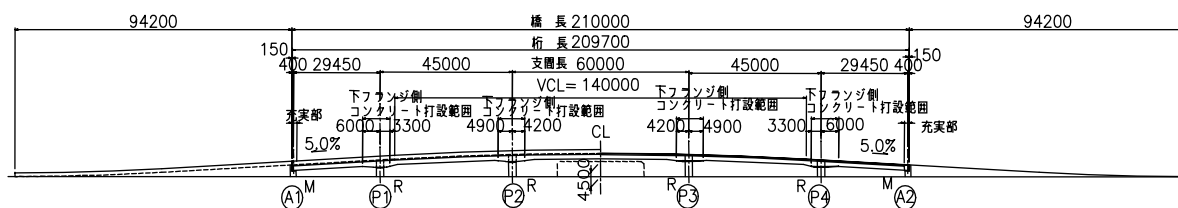


図-2 立体交差のモデル

よって、ハイパーブリッジが完成する。

ハイパーブリッジは構造高を支間長比の 1/40 程度に抑えることが可能であり、鋼床版箱桁橋などの従来工法と比較すると、立体交差施工延長を最大約 15% 短縮することが可能である。また橋脚との剛結一体化による複合ラーメン化することによって、従来必要であった橋脚の梁部が不要となる。

このハイパーブリッジの適用により、簡単な試算ではあるが、従来工法に比較して、立体交差道路の建設工期を 10%、建設コストを 5% 縮減できる見通しを得ている。

建築限界をクリアするために必要な橋梁下空間の比較を、剛結一体化したハイパーブリッジと従来工法について図-4 に示す。また、構造高が低くできる場合に立体交差区間の施工延長が短くなるイメージを図-5 に示す。

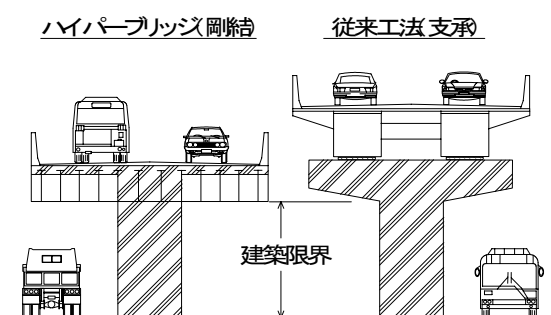


図-4 剛結一体化した場合の橋梁下空間の比較

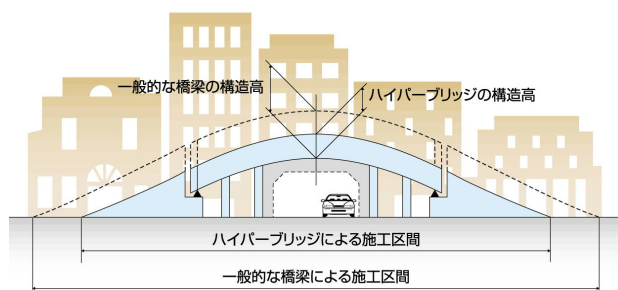


図-5 構造高を抑えることによる施工延長短縮効果

3. 負曲げ静的載荷試験

プレストレスしない連続合成桁の中間支点部のひび割れ制御設計方法はほぼ確立されている^{3), 4)}。ここでは、従来設計法の適用の可能性について、また中間支点部に発生する負の曲げモーメントに対してのひび割れ制御設計のために、実物大の梁の載荷試験を実施した。以下に負曲げ静的載荷試験の概要と結果を示す。

3.1 負曲げ静的載荷試験の概要

DFT のサイズおよび床版鉄筋の径とピッチは実橋と同じとし、かつ試験体のせん断スパン比が実橋と同等となるように試験体の諸元を決定した。ひび割れ制御用に配置した鉄筋比がひび割れ幅に与える影響を明らかにする

ため、鉄筋比を変えた 2 体(A タイプ, B タイプ)の試験を実施した。

載荷方法は、載荷点を中間支点と見なして試験体を反転させた 3 点曲げとして、10000kN 試験機により静的載荷試験を実施した。試験体下面にひび割れを発生させることにより、500 mmピッチで設けた各測定断面におけるひびきやひび割れ幅、たわみ等について、実験値と理論値の比較を行った。

図-6 は試験体の側面図および断面図を、写真-1 は試験状況を示す。表-1 は 2 試験体の鉄筋比および周長比について、鉄筋のみの場合と DFT フランジを含む場合の値を示したものである⁵⁾。

コンクリートは、実橋の場合と同じ設計基準強度 30N/mm² でかつ膨張コンクリートとした。表-2 にコンクリートの配合を示す。また圧縮側コンクリートと底鋼板のず

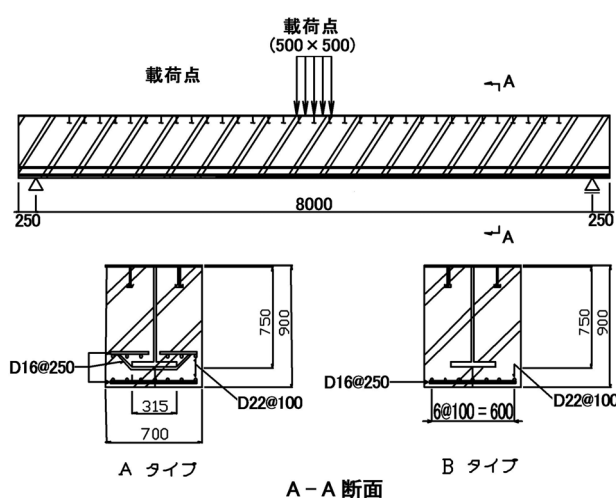


図-6 負曲げ載荷試験体

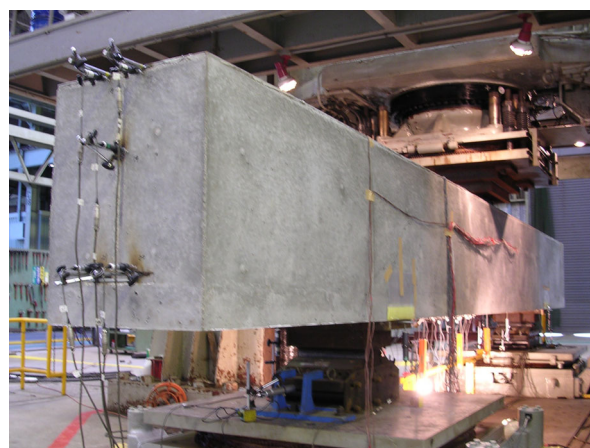


写真-1 負曲げ載荷試験実施状況

表-1 試験体の鉄筋比・周長比

	鋼材比(%)		周長比(mm/mm ²)	
	鉄筋のみ	DFTフランジ考慮	鉄筋のみ	DFTフランジ考慮
Aタイプ	2.4	7.9	0.0043	0.0058
Bタイプ	1.3	6.8	0.0023	0.0038
道示規定値	2.0以上		0.45以上	

表-2 コンクリートの配合

種類	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	スラン プ SL (cm)	空気 量 air (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	膨張 材
普通	20	8± 2.5	4.5± 1.5	50.0	41.9	160	300	751	1088	20
備考	※高性能軽量骨材 ・水セメント比のセメントには膨張材質量を含む									

れが生じないように、底鋼板にスタッドφ19×150を300mmピッチで配置し、ひび割れ幅はπゲージにより測定した。

3.2 結果と考察

(1) 鋼材、コンクリートの試験結果

表-3は鋼材のミルシートによる引張試験結果(降伏応力度)を示したものであり、表-4はコンクリートの試験結果(圧縮強度とヤング係数)を示したものである。これらの結果、鋼材の降伏強度はすべて規定値を上回っており、コンクリートの圧縮強度とヤング係数比はほぼ設計値通りであった。

(2) ひずみの分布

図-7は、支間中央より500mm離れた位置における各載

表-3 鋼材の引張試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ヤング係数比
Aタイプ	31	2.6×10 ⁴	7.7
Bタイプ	36	2.9×10 ⁴	6.9
規定値	30	2.8×10 ⁴	7.0

表-4 コンクリートの試験結果

	DFT (SM490YA)	鋼板 (N/mm ²)		鉄筋 (SD345)
		t=19 (SM490YB)	t=16 (SM490YA)	
供試体	392	465	450	400
(規定値)	355	355	365	345

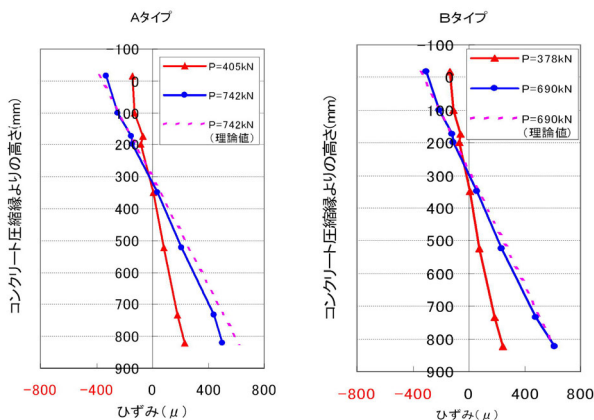


図-7 断面高さ方向のひずみの分布

荷重での断面高さ方向のひずみ(鉄筋、DFTフランジ及びウェブの箔ケージとコンクリートの埋込みゲージによる測定ひずみ)の分布を示したものである。AタイプとBタイプの実験値を比較した場合、鉄筋比の大きいAタイプのひずみが若干小さくなっており、理論通りの傾向が確認できた。さらに試験体Aタイプ、Bタイプともに実験値は概ね直線分布となっており、合成床版橋の負曲げ部においても平面保持の仮定が成立すると考えられる。

(3) 鉄筋ひずみ

図-8は、支間中央より500mm離れた位置における載荷重と最外縁の鉄筋ひずみの平均値との関係を示したものである。図中には、全断面有効とした理論値およびRC断面とした理論値と実験値を示した。なお、図中の設計荷重は、各測定段面における鉄筋の応力度が、3径間連続桁の試設計結果と等しくなる曲げモーメントが発生する載荷重である。

試験体Aタイプ、Bタイプ共に載荷の初期段階では、全断面有効とした理論値とほぼ一致するが、試験体BタイプではAタイプより鉄筋比が小さいにもかかわらず、全断面有効とした理論値からはずれてRC断面とした理論値の線に向かう荷重の値は、Aタイプより大きい。これはAタイプの方が、コンクリートの圧縮強度が高いため、この位置でのひび割れの発生荷重が理論上の値より大きくなったためと推定される。

これらのことより、ひび割れ発生後のひずみの実験値は、荷重が増加してもRC断面と仮定して設計することによりひずみは安全側の値を与えることになる。

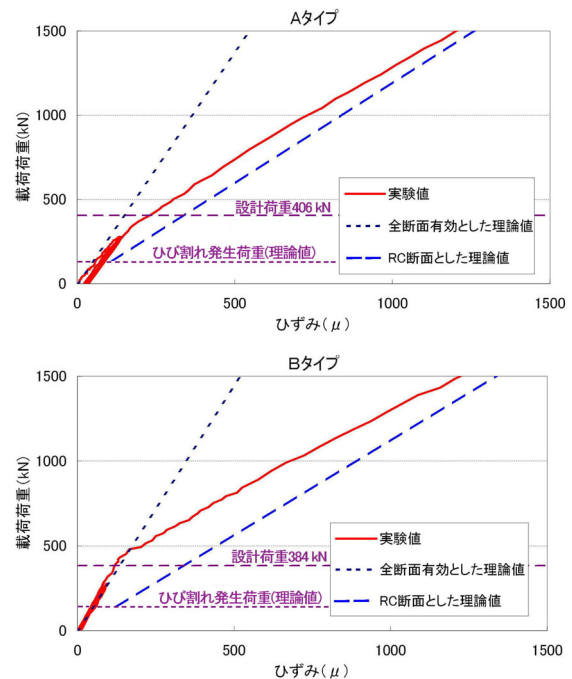


図-8 載荷重と鉄筋ひずみの関係

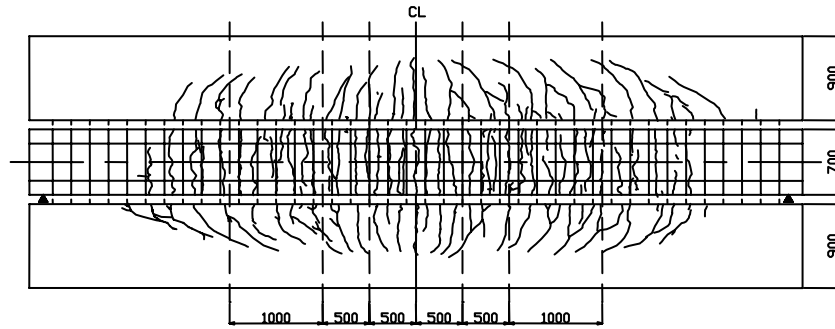


図-9 供試体のひび割れ分布図（Aタイプ）

(4) ひび割れ分布および間隔

図-9 は A タイプの最終ひび割れ分布図を示したものである。ひび割れ間隔の実験値(平均値)は、A タイプで 150 mm, B タイプで 180 mm となった。一方、コンクリート標準示方書(土木学会)のひび割れ幅算定式⁹⁾(以下学会式と称する)のうち、ひび割れ間隔を示す項〔1〕によって求まるひび割れ間隔は 259 mm である。鉄筋比の大きい A タイプは B タイプよりひび割れ間隔が小さく、鉄筋比の増加によりひび割れ分散性が向上したと考えられる。

$$4c + 0.7(c_g - \phi) \quad [1]$$

ここに

c : かぶり(mm)

c_g : 鉄筋の中心間隔(mm)

ϕ : 鉄筋径(mm)

(5) ひび割れ幅

図-10 は、支間中央より 500 mm 離れた位置における載荷荷重とひび割れ幅の関係を示したものである。図中には実験値と学会式〔2〕による計算値を示した。

ここで計算値に考慮する引張鋼材の段数 n として、最外縁の鉄筋のみを考慮した場合(1 段), DFT をひび割れ制御鉄筋の一部と見なした場合(2 段), 試験体 A タイプの場合は 2 段目の鉄筋も考慮した場合(3 段)の各計算値を示した。なお〔2〕式中には収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を見込む項は考慮していない。また計算値の算出においては、RC 断面としてテンションスティフニングを考慮せずに鉄筋の応力度を算出している。

試験体 A タイプ, B タイプ共に、ひび割れ発生荷重の理論値に対して実験値は比較的良く一致しているものの、ひび割れの発生位置は必ずしも鉄筋のひずみ測定位置とは一致していないため、ひび割れ発生荷重は一致しなかったものと考えられる。

また試験体 A タイプと B タイプの実験値を比較した場合、鉄筋比の大きい A タイプのひび割れ幅は B タイプのそれより小さい。

図-11 は、試験体スパン方向の各測定断面の設計荷重におけるひび割れ幅の分布を示したものである。図中には断面として引張鋼材が各段数とした時のひび割れ幅の計算値を示し、試験体 A タイプ, B タイプ共に最大段数の場合に対してテンションスティフニングを考慮した場合の計算値も示した。

ひび割れ幅の最大値は、A タイプで 0.075mm, B タイプで 0.070mm であり、それぞれ RC 断面として引張鉄筋の段数を 3 段, 2 段とした計算値より小さくなる。さらに各試験体の最大値は、テンションスティフニングを考慮した場合に引張鉄筋の段数をそれぞれ 3 段, 2 段とした計算値とほぼ整合する。これにより本形式において、DFT フランジを引張鉄筋の一部として鉄筋段数に考慮のうえ、学会式を適用して最大ひび割れ幅を算定することが可能と考えられる。

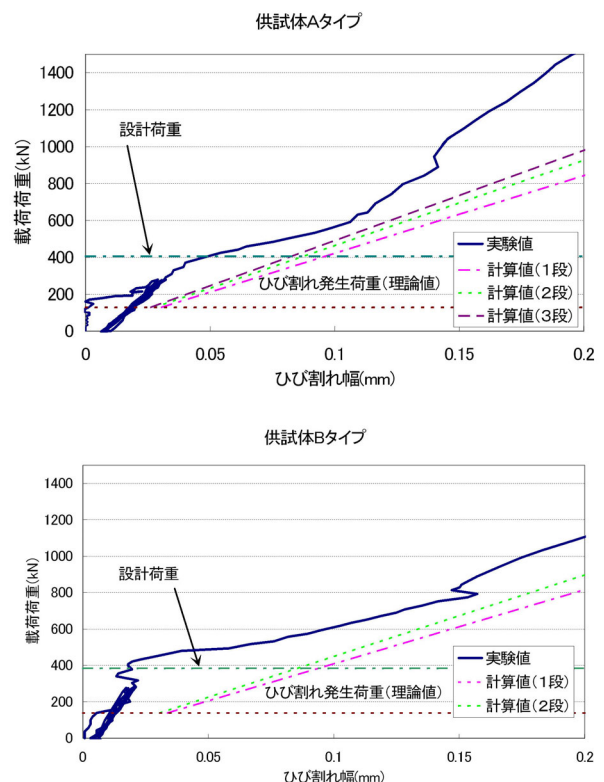


図-10 載荷荷重とひび割れ幅の関係

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}\frac{\sigma_{se}}{E_s} \quad [2]$$

ここに w : ひび割れ幅

k_1 : 1.0

$$k_2 : k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

$$k_3 : k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

n : 引張鋼材の段数

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm^2)

E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm^2)

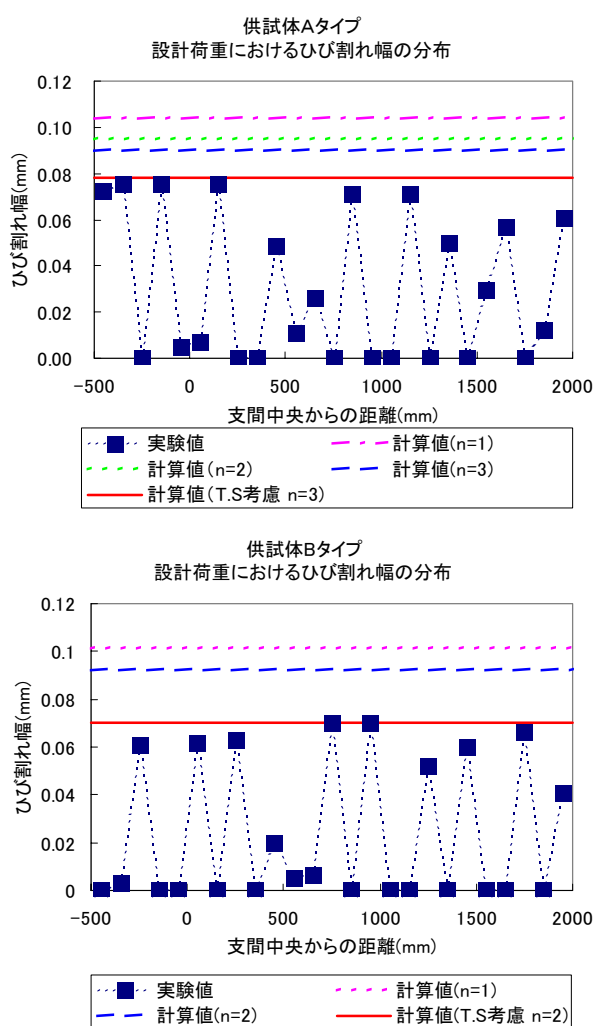


図-11 スパン方向のひび割れ幅の分布

3.3 ひび割れ制御設計法

実験結果から、DFTを用いた合成床版橋の中間支点部におけるひび割れ制御設計は、以下のように実施することが妥当と考えられる。

①従来の「プレストレスしない連続合成桁」と同様、ひ

び割れ制御鉄筋を配置することによる手法で実施する。

②許容ひび割れ幅の算出では、主桁作用に対するひび割れ制御鉄筋よりも床版主筋が最外縁となるため、床版主筋の純かぶりをを用いる。

③DFT フランジを引張鋼材の一部として考慮のうえ、式〔2〕によりひび割れ幅を算出する。

④断面照査においては、図-12に示すように圧縮側コンクリートも有効断面と見なすことができる。

ただし、計算の簡易性や安全側となることを勘案すると、圧縮側コンクリートを考慮せず、鋼桁と鉄筋のみで低抗するとする考え方をとることも可能である。

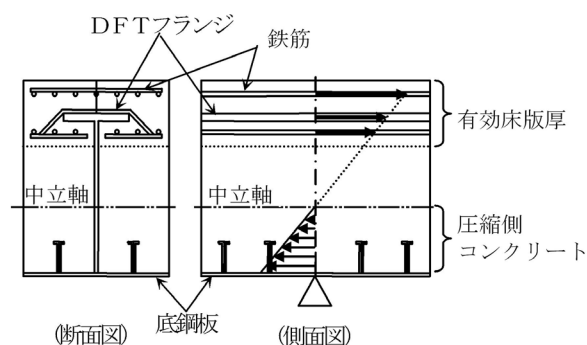


図-12 中間支点部のひずみ分布状態

3.4 負曲げ試験のまとめ

合成床版橋の連続化に際して、中間支点部の挙動を把握することを目的として実施した、実物大負曲げ静的載荷試験から以下の知見を得ることができた。

①負曲げ部においても平面保持の仮定が成立する。

②RC 断面と仮定して計算した鉄筋のひずみは安全側の値を与える。

③ひび割れ幅は、次のことにより安全側に推定できる。

- ・学会式を適用する。
- ・テンションスティフニングを考慮して鉄筋応力度の増加量を算出する。
- ・DFT フランジを引張鋼材の一部として考慮する。

④従来の「プレストレスしない連続合成桁」と同様、ひび割れ制御鉄筋を配置することにより同じ手法で中間支点部を設計することができる。

4. 定点疲労載荷試験

ハイパーブリッジの疲労耐久性を検証するために、高性能軽量コンクリートを用いてモデル試験体を作成し、定点疲労載荷試験を実施した。以下に試験概要と結果を示す。

4.1 定点疲労試験の概要

試験体は、ハイパーブリッジの支間中央部(中空構造)床版をモデル化し、2主桁(DFT)より構成される床版部

試験体中央へT荷重（500mm×200mm）を載荷した時に、床版の応力状態が最も大きくなる位置を FEM 解析により求め、試験体の長手方向に発生するたわみ角が実橋と同じとなるように試験体諸元を決定した。



写真-2 定点疲労載荷試験の載荷状況

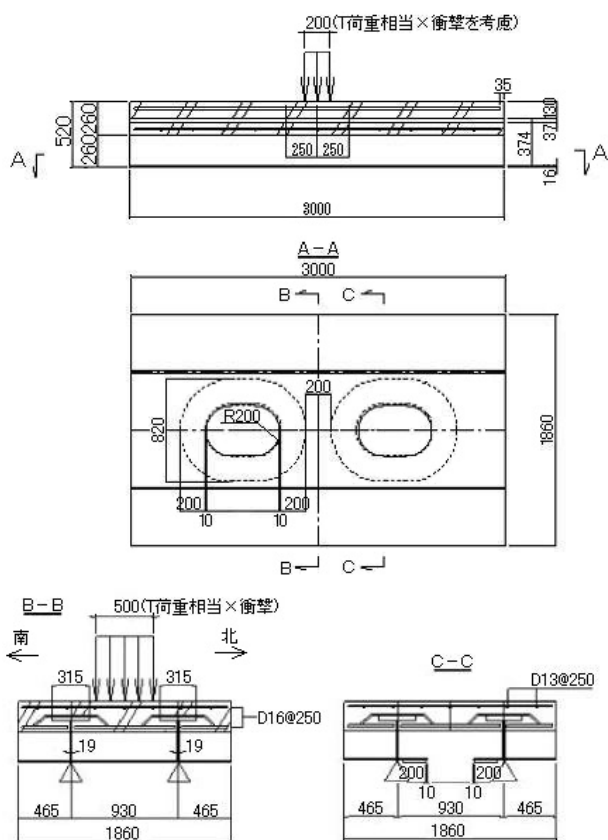


図-13 定点疲労試験の試験体形状

試験体は、普通コンクリートと高性能軽量コンクリートの2体とし、載荷点近傍の主筋、配筋筋にひずみゲージを貼り付け、またコンクリートの中に埋め込みゲージを設置して各部のひずみを、また試験体下面の中心点に等間隔で変位計を設置して変位（たわみ）を測定し、両試験体の発生状況の違い等について確認した。

上載荷重 139kN（T荷重に支間長と床版厚さを考慮した衝撃係数を乗じた値）の時の疲労押し抜き耐力を角田らの提案式⁷⁾を用いて算出し、土木学会の疲労強度を求める式から疲労寿命を計算すると 103.6 億回となる。しかし、載荷は時間的制約から 139kN で 200 万回とし、その後 290kN に荷重を上げて繰り返し載荷を行うこととした。

実際には、角田らの式が疲労押し抜きせん断強度においてもマイナー則（S（応力振幅）-N（繰り返し回数）曲線を用いる推定累積疲労限界則）が成立するとして、139kN で 200 万回載荷し、その後に 290kN に荷重を上げて 33.5 万回載荷すると累積損傷度が 1 となる。この載荷パターンを実施すると、139kN で 103.6 億回に相当する繰り返し載荷となる。なお、今回はその後に、試験装置の最大荷重となる 400kN で 3000 回繰り返し載荷を実施した。

試験体を図-13 に、試験実施状況を写真-2 に示す。

4.2 試験結果と考察

試験結果の概要を次に示すが、理論値として計算しているものは、床版を幅 460mm の梁として全断面有効で算出した値である。

(1) コンクリート

コンクリートの配合と材料試験結果を表-5、6 に示す。

表-5 コンクリートの配合

種類	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	スラブ SL (cm)	空気 量 air (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						水				
						W	C	S	G	Ad
普通	20	8± 2.5	4.5± 1.5	50.0	41.9	160	300	751	1088	20
高性能 軽量	15	18± 2.5	5.5± 1.5	45.0	47.0	165	347	801	*411	20
備考	※高性能軽量骨材 *水セメント比のセメントには膨張材質量を含む									

表-6 コンクリートの物性

		圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	ヤング係数比
普通コン クリート	設計値	30	2.8×10^4	7.1
	試験値	28	3.2×10^4	6.3
軽量コン クリート	設計値	30	1.9×10^4	10.5
	試験値	30	2.1×10^4	9.5

(2) 床版のたわみ

繰り返し回数とたわみの関係を図-14 に示す。普通コンクリート試験体、高性能軽量コンクリート試験体ともに繰り返し回数の増大に伴って、たわみの増加割合は少ないものの、若干の上昇傾向を示した。しかし、ひび割れ発生による大幅なたわみの増加は見られなかった。たわみの解析値と実験値の間で若干差異があるのは、実験値は「版」として挙動しているのに対し、解析値は「梁」として計算していることによるものと考えられる。

また、普通コンクリートと高性能軽量コンクリートのたわみの比は、ヤング係数の値の違いとほぼ同じ値となっている。

なお、ひび割れは、両試験体共に、いずれも載荷点直下の床版下面にて、主筋方向に 1 本発生したが、相対的に比較すると軽量コンクリートの方が普通コンクリートに比較して、ひび割れの長さが大きいことが分かる。また供試体端面においてもともに突起面以外の DFT とコンクリートの付着切れによるひび割れが発生した。なお、床版の表面にはひび割れは発生しなかった。図-15 にひび割れ図を示す。

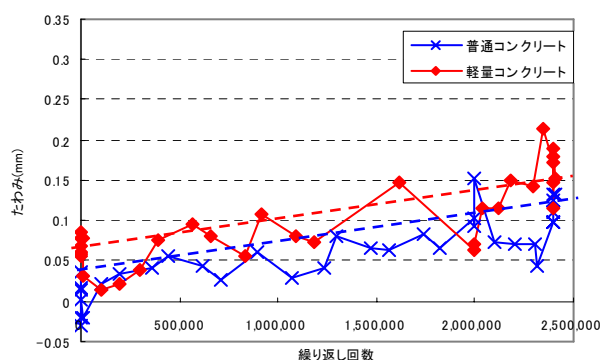


図-14 床版のたわみ

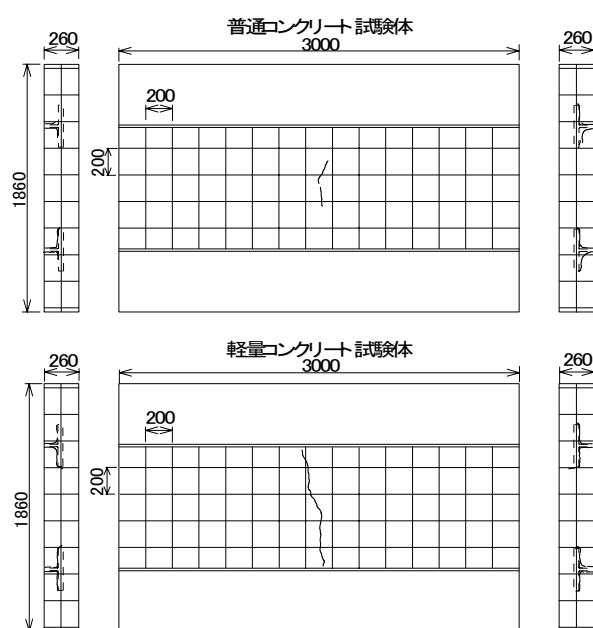


図-15 コンクリート下面および側面のひび割れ

(3) 床版下側鉄筋のひずみ

繰り返し回数と載荷点直下の主筋のひずみの関係を図-16 に示す。載荷点直下の主筋のひずみは高性能軽量コンクリートの方が大きくなっており、これは前述のコンクリートのヤング係数の違いによるものと考えられる。また、計算値と実験値の違いは、前述の「梁」と「版」の違い

によるものと考えられる。

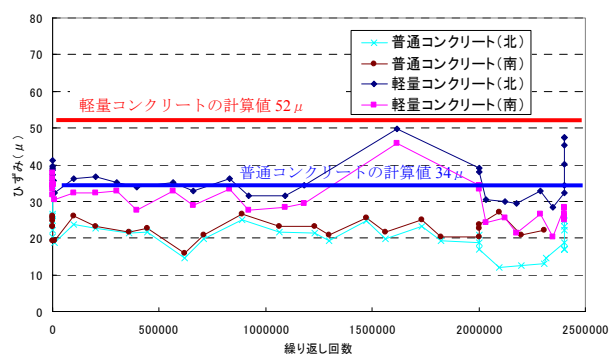


図-16 床版下側鉄筋(載荷点直下の主筋)のひずみ

(4) 床版下面コンクリートのひずみ

床版下面のコンクリートの表面ひずみを測定したものが図-17 である。高性能軽量コンクリートでは 60μ 程度で推移し、普通コンクリートでは 35μ 程度を推移しているが、これらの発生ひずみの差さも両コンクリートのヤング係数の違いによるものと考えられる。また、高性能軽量コンクリートでは、床版下面でひび割れが目視確認された時点(200 万回終了後の荷重を上げた後)に、ひずみが急激に変化していることが分かる。

なお、DFT フランジのひずみは、普通コンクリートと高性能軽量コンクリートの間に大きな差異はなく、発生するひずみの絶対値は小さいものであった。これは DFT が床版の中立軸付近に配置されているためであると考えられる。

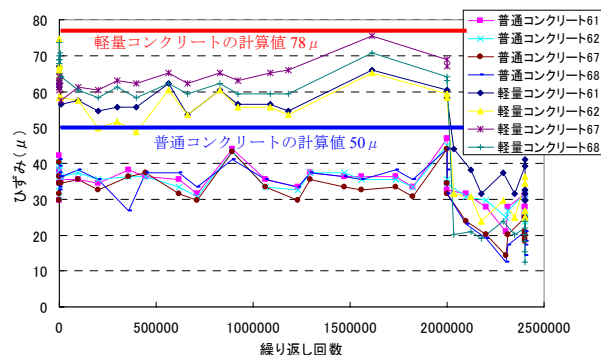


図-17 床版下面コンクリート(主筋方向)のひずみ

4.3 定点疲労試験のまとめ

139kN で 103.6 億回に相当する繰り返し荷重を与えても、普通コンクリート、高性能軽量コンクリート共に押し抜きせん断破壊(放射状のひび割れ)は生じなかったことから、両者ともこれに相当する疲労耐久性があることがわかる。これは、一般のコンクリート床版が 2~3m のスパン長であるのに対して、ハイパーブリッジでは主桁 DFT の間隔が 1m 程度で、主桁フランジがコンクリート床版の中央に配置されているため、載荷重が床版コンク

リートに分散され、その一部は DFT フランジで支持されるという構造上の特徴によるためであると考えられる。

5. 輪荷重走行試験

ハイパーブリッジの床版支間長は 1m 程度であり、輪荷重の分布位置は必ずいずれかの DFT フランジ上となるため、床版部は押し抜きせん断破壊が生じにくい構造である。しかし、高性能軽量コンクリートの力学的特性は普通コンクリートとは異なる^{8), 9)}ことから、床版部の疲労耐久性を検証するために、輪荷重走行試験を実施した。その概要と結果を次に示す。

5.1 輪荷重走行試験の概要

試験体は、立体交差用の 5 径間連続合成床版橋（前述）における最大支間中央部に着目し、試験機の制約から図-18 に示すとおり、活荷重（T 荷重）載荷位置の床版部を実寸大とする部分モデルとした。その他部位の諸元は、T 荷重に対する床版部の応力および変位が実橋における値と同等となることを 3 次元 FEM 解析により確認して決定した。また、高性能軽量コンクリートは呼び強度 30N/mm² とし、その配合は表-7 に示すとおりとした。

輪荷重走行試験は、独立行政法人土木研究所において、国土交通省が提案する階段状荷重漸増載荷による方法に従って実施した。試験体の支持条件は、図-19 に示す G1 桁と G4 桁のウェブ直下を単純支持とし、床版端部を横梁による弾性支持とした。載荷荷重は初期値を 157 kN とし、走行回数 4 万回毎に 19.6kN ずつ増加させ、総走行回数 52 万回においては 392kN となる。写真-3 に試験状況を、図-20 には載荷ステップを示す。

表-7 コンクリートの配合

種類	粗骨材 最大寸法	スラン プ	空気 量	水セメ ント比	細骨 材率	単位量(kg/m ³)				
						水	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	膨張 材
	Gmax (mm)	SL (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	Ad
高性能 軽量	15	18± 2.5	5.5± 1.5	40.0	45.0	165	393	749	※417	20
備考	※高性能軽量骨材 ・水セメント比のセメントには膨張材質量を含む									

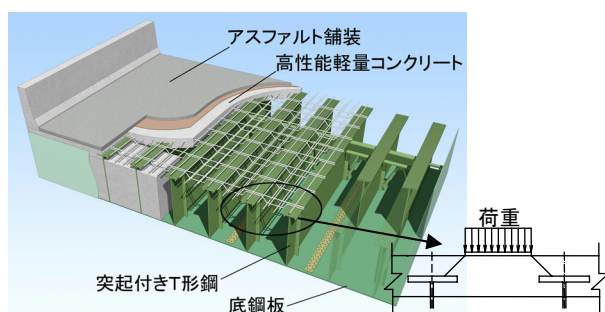


図-18 試験体モデル化部分と載荷位置

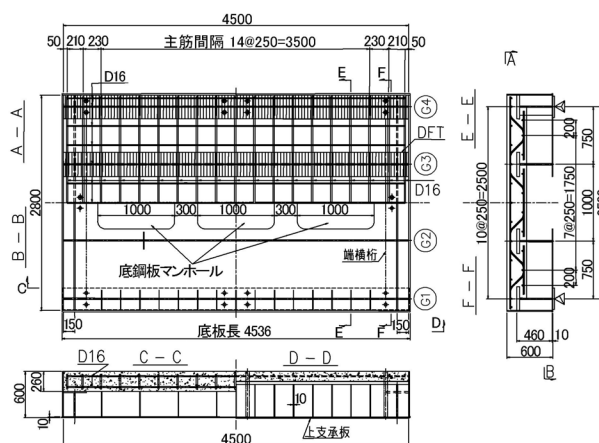


図-19 輪荷重走行試験の試験体形状

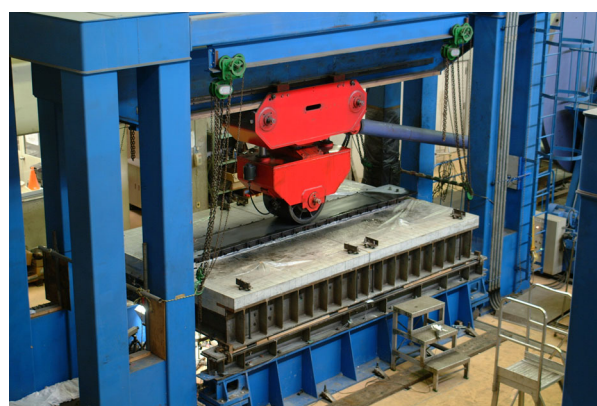


写真-3 輪荷重走行試験実施状況

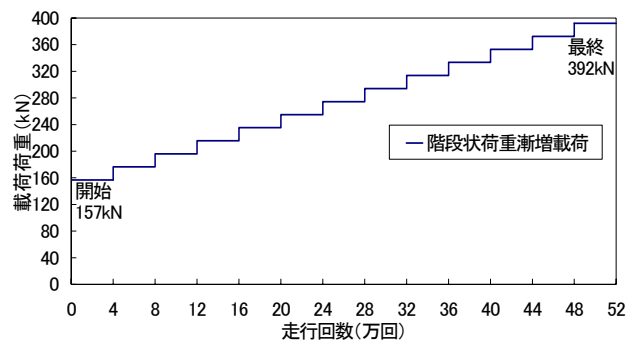


図-20 載荷ステップ

5.2 試験結果

(1) 変位と走行回数

走行回数に対する試験体中央部の静的鉛直変位の推移は図-21 に示すとおりである。参考として、図中に床版支間 2.5m の平成 8 年道路橋示方書に準拠した RC 床版 (RC8) とハーフプレストレスの PRC 床版 (PRC50) に対する試験結果¹⁰⁾を示す。本図に示すように、試験体は PRC 床版の場合と同様に試験終了時点に至るまで変位量の急激な変化は生じなかった。また、試験終了時における 392kN 載荷時の変位は 1.49mm、除荷時の変位は 0.494mm

であり、PRC 床版における値の 20～25% 相当の小さい値であった。なお、本図の変位量は試験体中央部の支持間隔 2.5m に対する最大値であり、床版支間 1.0m に対する最大変位差は、図中に示す値の 3 割程度であった。

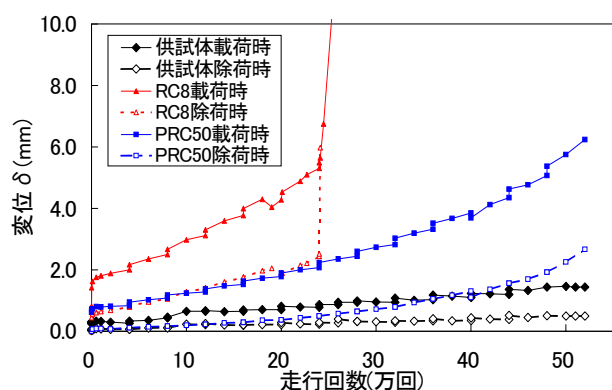


図-21 走行回数と試験体中央部の変位の関係

(2) 床版のたわみ

走行回数 4 万回毎に実施した静的荷重試験における試験体中央部の荷重－変位曲線は、図-22 に示すとおりである。図中には材料の非線形を考慮した 3 次元 FEM 解析の結果も示した。この図から、走行回数と荷重荷重の増加に伴う残留変位のために、各荷重での静的荷重初期の変位は増大するものの、断面剛性（曲線勾配）は初期の荷重から最終荷重まで、低下はほとんど見られず、疲労損傷の影響を考慮しない FEM 解析の結果とよく一致している。このことから、試験終了時においても床版部の累積損傷度は小さく、高い耐久性を有していると言える。

(3) 床版断面のひずみ分布と中立軸位置

試験体中央部近傍における走行回数に対する床版支間方向断面内の弾性ひずみ分布の変化は、図-23 に示すとおりである。本図より、床版断面の中立軸位置は、試験終了時においても圧縮側コンクリートのみを有効とする断面の中立軸位置まで達していないことがわかる。また、この中立軸位置から推定した床版の断面剛性は、圧縮側コンクリートのみを有効とする断面に対する値の約 1.8 倍である。

(4) ひび割れ分布および間隔

試験終了時における G2-G3 間の床版下面のひび割れ状況は図-24 に示すとおりである。この図より試験体には通常の RC 床版の場合と同様に 2 方向ひび割れが進展していることがわかる。しかし、供試体中央部の最終ひび割れ密度は 8.4m/m^2 であり、RC 床版の使用限界状態におけるひび割れ密度 10m/m^2 程度¹¹⁾ および終局限界状態の 17m/m^2 (試算値)¹⁰⁾ と比較して小さい。また、392kN 荷重時の最大ひび割れ幅は 0.26mm で、床版上面にはひび割れは発生せず、押抜きせん断破壊も生じなかった。

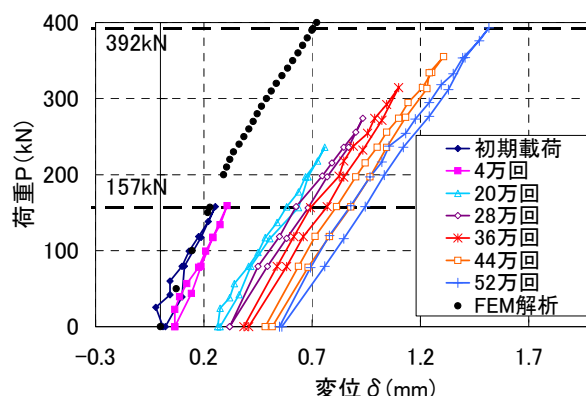


図-22 荷重と供試体中央部の変位の関係

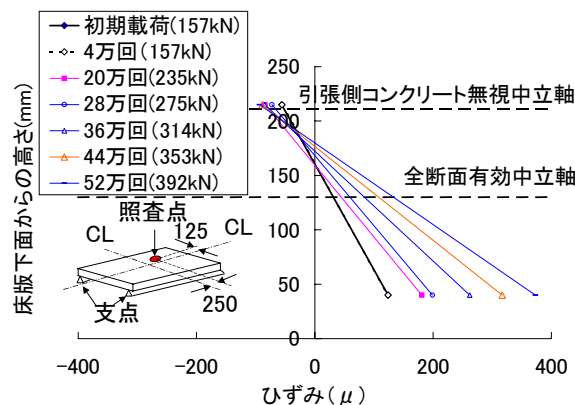


図-23 試験体中央部近傍における断面ひずみ分布

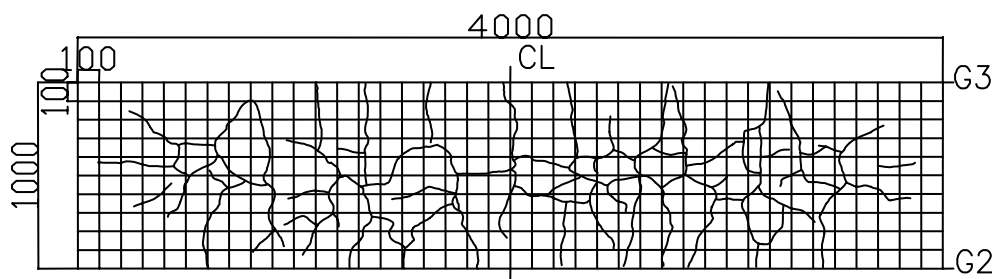


図-24 試験終了時の床版下面のひび割れ状況

5.3 輪荷重走行試験のまとめ

高性能軽量コンクリートを適用したハイパーブリッジの床版部の疲労耐久性について、輪荷重走行試験の結果より下記の知見が得られた。

①床版部は階段状荷重漸増载荷による試験に対して極めて高い疲労耐久性を有する。

②床版部は押し抜きせん断破壊の兆候は見受けられず、試験終了時のひび割れ密度も小さく損傷度は低い。

6. おわりに

以上、ハイパーブリッジの中間支点部を想定した実物大負曲げ静的载荷試験、高性能軽量コンクリートを用いた床版部の定点疲労試験ならびに移動輪荷重走行試験の各々について、試験概要とその結果について述べた。

負曲げ静的载荷試験から、負曲げ部においても平面保持の仮定が成立し、ひび割れ幅も安全側に評価する手法が明確となり、定点疲労载荷試験と輪荷重走行試験から、ハイパーブリッジの構造形式は疲労耐久性にすぐれていること、また高性能軽量コンクリート床版は高い疲労耐久性を有していることが検証された。なお、負曲げ静的载荷試験については、離散ひび割れモデルを用いた三次元 FEM 結果と比較した検証も別途報告している¹²⁾。

今後は、耐震性の向上、桁高の抑制ならびにさらなる合理化を目指して、技術的課題に挙げたハイパーブリッジの複合ラーメン化技術として、ハイパーブリッジと橋脚の急速施工法である REED 工法との剛結一体化工法の確立を目指して開発を進めて行く予定である。

ハイパーブリッジは他の橋梁形式と比較して、最も構造高を低く抑制することができるため、都市部の立体交差道路のみならず、河川橋梁などにも有利な構造形式である。都市部の交通渋滞の解消、美しい都市空間の創造、ならびに景観に配慮した高架橋として、その特徴を活かして社会資本の整備に資して行きたいと考えている。

【参考文献】

1) 横沢和夫, 上村明弘, 小林博之, 赤坂雄司:

RELIEF(リリース)工法で渋滞解消—コストパフォーマンスと景観に優れたハイパーブリッジで魅力あるまちづくり—, 土木技術, VOL.59, No.4, pp.72-76, 2004.4

2) 笹倉伸晃, 佐藤文則, 舟橋政司, 秋山博, 浜田謙: 高性能軽量コンクリートの PC 橋梁上部工への適用に関する研究, 前田建設技術研究所報, Vol.45, pp.39-44, 2004

3) 日本橋梁建設協会: PC 床版を有するプレストレスしない連続合成 2 主桁橋の設計例と解説, 2001.7

4) 中園明弘, 安川義行, 稲葉尚文, 橘吉宏, 秋山洋, 佐々木保隆: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法(上), 橋梁と基礎, Vol.36, No.2, pp.27-35, 2002.2

5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, p.317, 2002.3

6) 土木学会: コンクリート標準示方書性能照査編, p.100, 2002

7) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐火力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号, pp.133-141, 1984.8

8) (社)土木学会: 人工軽量骨材コンクリート設計施エマニユアル, 1985.6

9) 舟橋政司, 原夏生, 横田弘, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.919-924, 2001

10) 建設省土木研究所共同研究報告書: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書, 1999.3

11) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第 374 号, pp.419-426, 1986.10

12) 小林博之, 上村明弘, 神田恭太郎, 赤坂雄司, 原夏生: 突起付き T 形鋼を用いた連続合成床版橋の負曲げ静的载荷試験, 鋼構造年次論文報告集, Vol.12, No.11, pp.75-82, 2004.11