

# 論文 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版の適用性について

俵 道和\*1・二井谷 教治\*2

**要旨：**高炉スラグ細骨材を 100%使用して製造したプレキャストプレストレストコンクリート床版の試験体で輪荷重走行試験を実施した。砕砂を使用した試験体で同様の輪荷重走行試験の結果と比較することで、コンクリートの細骨材の違いによる影響を評価した。その結果、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、砕砂を使用したコンクリートと同等以上の疲労耐久性を有することが確認された。さらに、高速道路での実際の輪荷重を想定した荷重を載荷した場合の輪荷重走行試験を実施した。その結果、100年間使用する場合に必要な、乗り心地に関わる使用性および輪荷重の繰返しに対する安全性が確保されていることが確認された。

**キーワード：**高炉スラグ細骨材, プレキャストプレストレストコンクリート床版, 輪荷重走行試験, 耐久性

## 1. はじめに

近年、高速道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化が顕在化している。劣化の主な理由は、車両の大型化に伴う交通荷重の増加、塩害および凍結融解による作用であると考えられている。平成27年度からは特定更新等工事が開始し、今後、多くの橋梁において床版取替工事が計画されている。桁を補強せずにこれらの橋梁の寿命を維持するために、死荷重を増やことは望ましくない。プレストレストコンクリート（以下、PC）部材は、鉄筋コンクリート部材よりも薄くできるため、橋の寿命を維持するために望ましいと考えられる。さらに、更新工事中の交通規制の期間を短縮するには、プレキャスト部材が不可欠である。

コンクリート用天然骨材の枯渇化に伴い、良質な細骨材の入手が困難な状況であり、天然資源の保全や資源循環型社会形成の観点からも高炉スラグ細骨材（以下、BFS）をコンクリート用細骨材としての活用が注目されている。BFSのコンクリート用細骨材としての利用については以前から検討が行われており、近年では、BFSを100%使用したコンクリート（以下、BFSコンクリート）の研究および実用化も進んできた。適切な品質のBFSを選定し、適切な製造方法を行うことで、同一水セメント比で砕砂を用いたコンクリートと比較し、圧縮強度が同等以上になることや、塩化物イオン浸透抵抗性や凍結融解抵抗性が向上することなどが報告されている<sup>1)2)</sup>。

本研究では、BFSコンクリートを用いたプレキャストPC床版を開発することを目的とし、輪荷重に対する疲労耐久性を評価するため、2箇所の試験機関で輪荷重走行試験を実施し、道路橋床版への適用性について検討を行った。これらの結果を受け、実際の高速道路橋の床版取替工事へ適用した事例を報告する。

## 2. BFS コンクリートの基礎物性

BFSコンクリートは、先述の通り既往の研究から塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性などの耐久性が向上することが明らかとなっている。PC部材へ適用する場合、有効プレストレスの確保の観点から、クリープおよび乾燥収縮も重要な物性である。普通砕砂を用いたコンクリートとBFSコンクリートについて乾燥収縮およびクリープを比較した結果を図-1および図-2に示す。なお、セメントは早強セメントを使用し、単位水量155kg/m<sup>3</sup>、水セメントは36%および細骨材率は42%である。BFSコンクリートは、普通砕砂を用いたコンクリートに比べ、乾燥収縮やクリープが小さく、プレストレスト量の低減を抑制できる。高い有効プレストレスを確保できるため、PC部材に適しているといえる。

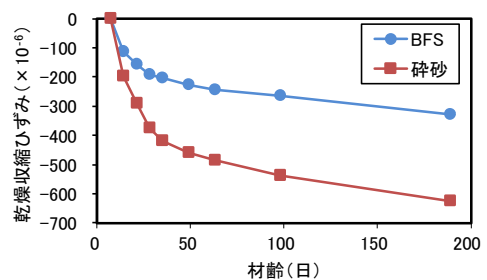


図-1 乾燥収縮の結果

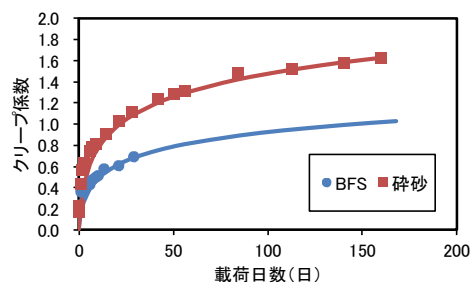


図-2 クリープ試験の結果

\*1 オリエンタル白石株式会社 技術研究所 主任研究員 工修（工学）（正会員）

\*2 オリエンタル白石株式会社 技術本部 技師長 博士（環境学）（正会員）

表-1 コンクリートの配合

細骨材種類	セメント種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	SP
BFS	普通	30.0	4.5	41.0	155	517	723	995	2.99
砕砂	早強	36.0	4.5	39.0	154	428	677	1067	4.65

### 3. 荷重漸増载荷による疲労耐久性の評価

#### 3.1 概要

プレキャスト PC 床版では、一体性を確保できる接合方法が不可欠であり、各種接合工法が開発されてきている。機械式定着を併用した重ね継手<sup>3)</sup>は、鉄筋の付着力と鋼管の支圧力の複合作用により応力の伝達を行う継手方法の一種である。ループ継手では、最小版厚は240mm程度が一般的であるのに対し、適用する床版支間によっては、最大40mm程度版厚を薄くすることが可能である。図-3に本試験で採用した機械式定着を併用した重ね継手を用いた接合部を示す。

BFS コンクリートにより製造したプレキャスト PC 床版を場所打ちコンクリートによって機械式定着を併用した重ね継手で接合した構造について、輪荷重に対する疲労耐久性を検証するため、荷重漸増载荷による輪荷重走行試験を実施した。

#### 3.2 試験体および試験方法

機械式定着を併用した重ね継手を用い、場所打ちコンクリートによって接合したプレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験を行った。プレキャスト PC 床版は、橋軸方向が鉄筋コンクリート構造、床版支間方向がプレテンション方式でプレストレスを与えた PC 構造である。試験体の形状寸法および鋼材配置は、既往の試験<sup>3)</sup>に準じ、床版支間 3.0m の連続版として設計し、床版支間方向の幅が 2,800mm、橋軸方向の長さが 4,500mm、床版の厚さは道路橋示方書<sup>4)</sup>の規定による最小版厚である 180mm とした。試験体は、床版支間 3.0m の連続版と等価な曲げモーメントが作用する支間 2.5m の単純支持としている。輪荷重は、橋軸方向に中央から±1,500mm の範囲で移動し、道路橋示方書<sup>4)</sup>に示される設計荷重の 100kN に衝撃係数と安全係数を考慮した 157.0kN から、4 万回ごとに 19.6kN ずつ増加させる階段状荷重漸増载荷を行った。4 万回の走行ごとに静的载荷を行い、たわみ、ひずみの計測およびひび割れ発生状況を記録した。

表-1 にコンクリートの配合を示す。BFS は、倉敷の製鉄所で製造された BFS1.2 (表乾密度 2.77g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.22%, 粗粒率 2.11) を使用した。粗骨材には、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕石 (表乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>) を使用し混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。砕砂コンクリートに使用した砕砂は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕砂 (表乾密度 2.63g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.92%, 粗粒率 2.83)



図-3 機械式定着を併用した重ね継手を用いた接合部

を使用した。既往の試験<sup>5)</sup>に用いた試験体は、プレキャスト PC 部材に一般に用いられる早強ポルトランドセメントと砕砂を用いたコンクリートが使用された。水セメント比は、36.0%で、試験時のコンクリートの圧縮強度は、プレキャスト部が 62.5N/mm<sup>2</sup> で、場所打ち部が 64.7N/mm<sup>2</sup> である。一方、今回の試験に用いた試験体は、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートを使用した。PC には、一般的に初期強度を確保するために早強ポルトランドセメントが用いられる。既往の研究<sup>6)</sup>より BFS を用いた場合に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの方が凍結融解と疲労の複合劣化を受ける場合に、早強ポルトランドセメントより高い耐久性が得られることが示されており、本試験において BFS を用いたコンクリートには普通ポルトランドセメントを使用した。普通ポルトランドセメントを用いた場合は、材齢 18 時間でプレストレスの導入強度として 35.0N/mm<sup>2</sup> を確保するために、水セメント比を 30.0% に設定した。試験時のコンクリートの圧縮強度は、プレキャスト部が 98.0N/mm<sup>2</sup>、場所打ち部が 75.7N/mm<sup>2</sup> である。2 種類のコンクリートで水セメント比が異なる理由は、材齢 18 時間における圧縮強度が、プレストレスを導入できる 35N/mm<sup>2</sup> となるよう調整したためである。プレキャスト PC 床版部は蒸気養生を行った後に、BFS コンクリートは 1 週間の水中養生を行い、砕砂コンクリートは湿潤養生を行った。接合部のコンクリートはどちらも 1 週間の湿潤養生を行った。

#### 3.3 試験結果および評価

図-4 に、走行回数と試験体中央位置のたわみを示す。細い曲線は、早強ポルトランドセメントと砕砂を用いたコンクリートで製作した試験体の結果で、太い破線の曲線は、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を

表-2 コンクリートの配合

細骨材種類	セメント種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	SP
BFS	早強	43.0	4.5	44.0	158	367	825	1012	2.76

用いたコンクリートで製作した試験体の結果である。

砕砂を用いたプレキャスト PC 床版では、353.0kN の輪荷重が載荷された走行回数 423,000 回するとき、たわみが約 20mm に達し、ほぼ破壊に近い状態に達した。一方、高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版は、基本荷重である 157.0kN の約 2.5 倍である 392.2kN の輪荷重を走行させた後でも、たわみは 5mm 程度と小さく、破壊に至っていない。当然ながら、コンクリートの圧縮強度の差が試験結果に影響していることは確かであるが、BFS コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版は、輪荷重に対する高い疲労耐久性が確保されていることが確認された。

図-5 に過去に試験を行われた、昭和 39 年道路橋示方書に準拠した床版厚 190mm の RC 床版試験体<sup>7)</sup>、平成 8 年道路橋示方書に準拠した床版厚 250mm の RC 床版試験体<sup>7)</sup>および砕砂、BFS を用いた PC 床版試験体の輪荷重走行試験結果の比較を示す。その結果、過去の試験結果と比較しても BFS を用いた PC 床版は遜色ない性能を有していることが確認された。

#### 4. 高速道路での使用を想定した疲労耐久性の評価

##### 4.1 概要

現在、高速道路において劣化した鉄筋コンクリート床版の取替工事が数多く実施されている。そこで、BFS コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版の高速道路への適用性を検討するため、輪荷重走行試験を行った。

3 章で示した輪荷重走行試験では、セメントやコンクリートの圧縮強度の違いがあるため、一般的なコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版の試験結果と直接比較することはできなかった。そこで、この試験に使用する試験体では、セメントは一般的なプレキャスト PC 床版に使用される早強セメントとし、コンクリートの圧縮強度についても、一般的なプレキャスト PC 床版と同等となるよう調整を行った。コンクリート配合を表-2 に示す。

##### 4.2 試験体および試験方法

試験体の形状寸法および配筋条件、試験方法については、高速道路での適用性を検討した既往の研究<sup>8)</sup>に準じた。試験に用いた試験体を図-6 に示す。3 章で示した試験体と同様に、2 枚のプレキャスト PC 床版を中央部で機械式定着を併用した重ね継手を用いて、場所打ちコンクリートによって接合した。試験体は、高速道路に適用

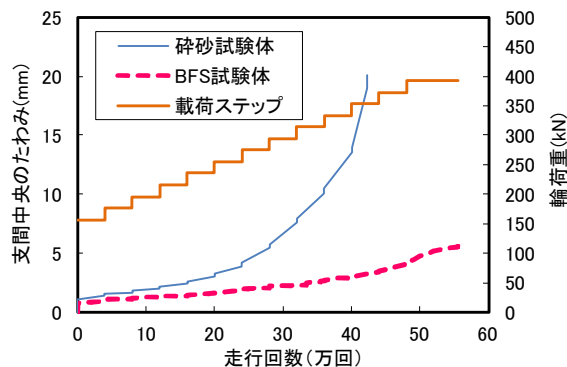


図-4 走行回数と支間中央のたわみの関係

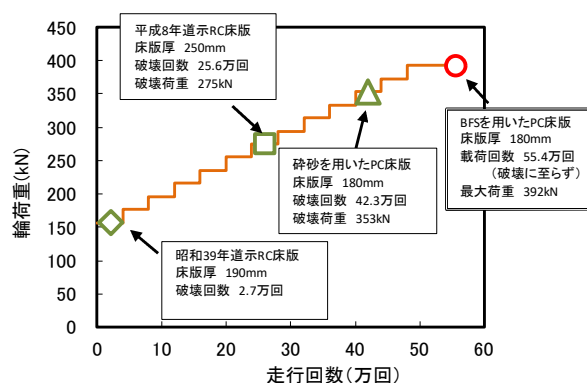


図-5 走行回数と輪荷重の関係

する床版支間 3.0m の連続床版として設計されたもので、版の厚さは 220mm である。構造は、輪荷重走行方向が鉄筋コンクリート構造、輪荷重走行直角方向が PC 構造である。なお、プレストレスは、ポストテンション方式によって与えた。

試験に用いるプレキャスト PC 床版は、コンクリート打込の翌日に脱型し、その後 1 週間水中で養生を行った。これは、BFS コンクリートの持つ優れた耐久性能を十分に引き出すためには、初期の湿潤養生が重要であるためである。試験体は、4 辺で支持し、輪荷重走行方向の 2 辺はピンおよびピンローラ線支承とした。輪荷重走行直角方向の 2 辺は、試験体の限られた長さでも、できる限り連続床版の挙動となるよう弾性支持の線支承とした。

高速道路で実測された 1 年あたりの軸重の等価繰返し回数は、既往の研究<sup>8)</sup>に基づき、基本軸重を 157 kN に対して 3450 回とする。すなわち、100 年間に高速道路の床版が 157 kN の基本軸重の繰返し荷重を受ける回数は、 $3.45 \times 10^5$  回となる。実際の高速道路の床版は水の影響を受けるとひび割れ面のコンクリートの摩耗が著しく促

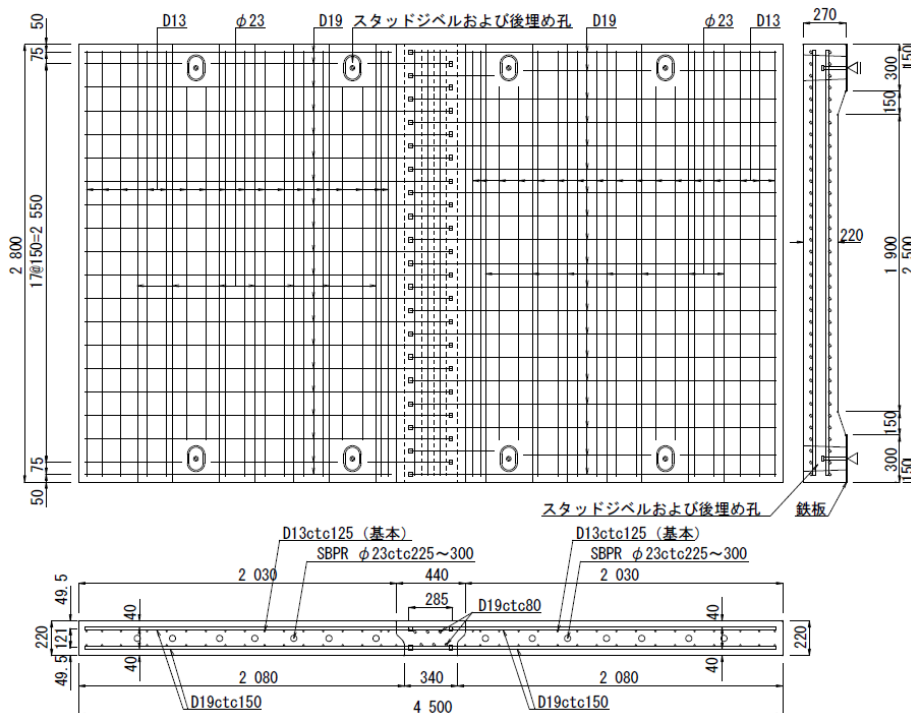


図-6 試験体形状図

進されることを考慮し、気中の条件で行う輪荷重走行試験では、さらに100倍である $3.45 \times 10^7$ 回載荷する<sup>8) 9)</sup>。

なお、実際の試験での輪荷重の基本荷重は250 kNとする。この基本荷重に対して、157 kNの輪荷重が $3.45 \times 10^7$ 回の繰返しによって試験体を受ける疲労損傷度と等価な繰返し回数は、一般的に道路橋に適用されるS-N曲線を適用し、輪荷重による疲労損傷がマイナー則に従うとすれば、 $9.10 \times 10^4$ 回となる<sup>8)</sup>。この計算結果から、輪荷重走行試験では、載荷の第1ステップを100年相当の載荷段階とし、250 kNの基本荷重を $1.00 \times 10^5$ 回載荷する。さらに、第2ステップでは、100年相当の載荷以降の余剰耐力や安全性を確認する目的で、荷重を400 kNに上げ、 $9.00 \times 10^5$ 回載荷する。輪荷重は、橋軸方向に中央から $\pm 1,500$ mmの範囲で載荷した。

#### 4.3 試験結果および評価

図-7にPC床版部および接合部に使用したコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数の関係を示す。試験時のコンクリートの圧縮強度は、プレキャスト部が $62.5 \text{ N/mm}^2$ で、場所打ち部が $65.9 \text{ N/mm}^2$ である。同図に土木学会の圧縮強度と割裂引張強度およびヤング係数の関係式<sup>10)</sup>もあわせて示す。圧縮強度とヤング係数の関係については、土木学会の関係式より多少高めの傾向を示し、圧縮強度と割裂引張強度の関係については土木学会の関係式より小さくなる傾向が確認された。また、プレキャスト床版部と接合部についてほぼ同程度の圧縮強度が確認された。

図-8に走行回数と試験体中央のたわみの関係を示す。

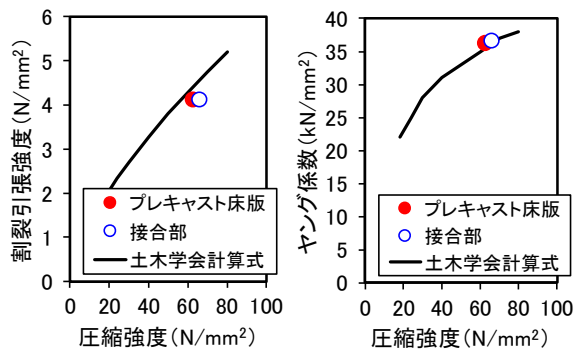


図-7 圧縮強度と割裂引張強度

およびヤング係数の関係

走行回数が100万回(荷重は400kN)においても、たわみは1mm程度で耐荷性能も健全な状態を維持していた。また、等を確認する目的で、荷重を400kNとして $9.00 \times 10^5$ 回載荷した第2ステップ終了時においても、試験体中央のたわみは、2mm程度であった。耐荷力に関しても健全な状態であり、十分な余剰耐力を保持していることが確認できた。

図-9に各載荷ステップ後の試験体下面のひび割れ発生状況を示す。輪荷重の走行範囲(500×3,000mm)を赤色の破線で示す。ひび割れ性状に関しては、第1ステップ終了時では、試験体下面に数本のひび割れが発生した。そのほとんどが橋軸直角方向のひび割れであり、ひび割れ幅もすべて0.05mm以下の軽微なものであった。荷重を400kNとして90万回載荷した第2ステップ終了時には、ひび割れ本数が増加するとともに格子状に進展したが、ひび割れ幅はすべて0.20mm以下であった。

また、第1ステップと第2ステップの載荷後において、試験体の上面に水を溜めて確認した結果、試験体下面への漏水は確認されず、貫通ひび割れは発生していないことが確認された。

図-10に第1ステップおよび第2ステップ終了時の輪荷重走行方向のたわみ分布を示す。黒塗りのマークで示したものが第1ステップ終了時のたわみ分布であるが、接合部での折れ曲がりや接合目地部での段差がなく、100年相当の載荷後でも、乗り心地に関する使用性が確保されていることが確認された。

これらのことから、BFSコンクリートを用いた場合でも、本試験で採用した配合および製造仕様を採用することで、接合部を含むプレキャストPC床版は、高速道路で100年間使用する場合に必要な乗り心地に関わる使用性、および輪荷重の繰返しに対して十分な安全性を確保できることが確認された。

### 5. BFSコンクリートの床版取替工事への適用

BFSコンクリートを用いたプレキャストPC床版の高速道路への適用性を、輪荷重走行試験により検討した結果、十分な安全性と使用性が確保できていることが確認できた。この結果を受け、実際の高速道路における、床版の取替工事に採用された。

図-11に床版取替工事の状況を示す。BFSコンクリートを用いたプレキャストPC床版を適用した橋梁は、鋼3径間連続非合成4主桁桁橋で、橋長は約144m、全幅員は約10mである。取替えプレキャストPC床版の1枚当たりの寸法は幅約2.0m、長さ9.7m、厚さ0.22mである。採用されたBFSコンクリートを用いたプレキャストPC床版は、全体で71枚の内4枚である。BFSコンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用した。プレキャスト床版の製造は、輪荷重走行試験の試験体と同様の方法とした。

床版の取替工事においては、プレキャストPC床版同士を接合するための場所打ちコンクリートが欠かせない。一般的には、レディーミクストコンクリートが用いられる。BFSコンクリートを用いたプレキャストPC床版の接合では、コンクリートが特殊であり、且つ打設量が少ないことから、図-12に示す移動式ミキサを用いて現場でBFSコンクリートを製造することとした。場所打ちのBFSコンクリートは、プレキャストPC床版に用いたのと同じ材料と配合とした。セメント、BFSおよび粗骨材を事前に計量して袋詰めした状態（ドライミックス）で現場に搬入し、現場では水と化学混和剤のみ計量し、移動式ミキサを用いて練混ぜを行った。コンクリートの打込みは、生コン運搬車でコンクリートを受けて、生コン運搬車から直接打込みを行った。接合部のBFSコンク

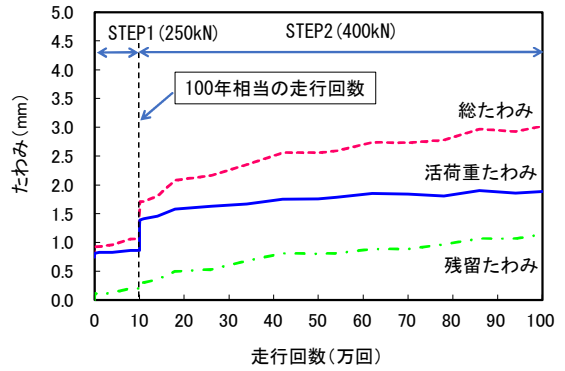
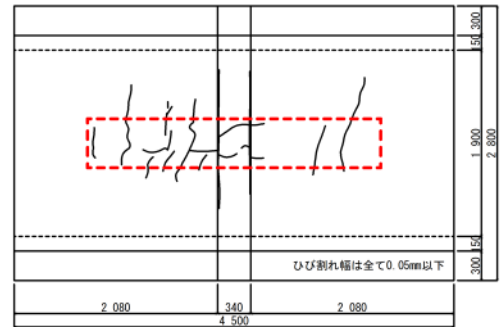
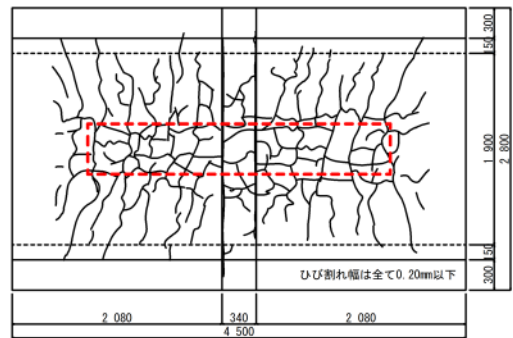


図-8 走行回数と支間中央のたわみの関係



(a) 第1ステップ終了時



(b) 第2ステップ終了時

図-9 各ステップ載荷後の試験体下面のひび割れ発生状況

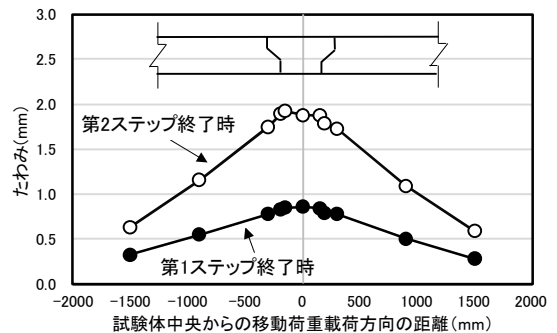


図-10 輪荷重載荷方向のたわみ分布

リートは、現場で7日間以上の湿潤養生を行った。図-13にPC床版および接合部に使用した一般的な砕砂を用

いたコンクリートと BFS を用いたコンクリートの圧縮強度の比較を示す。砕砂を用いたコンクリートについては、PC床版は工場で製作し、接合部のコンクリートは生コンプラントで製造を行った。BFS コンクリートについては、PC床版は生コンプラント、接合部については移動式ミキサを用いて製造した。BFS コンクリートは、砕砂を用いたコンクリートと同等以上の強度が得られることが確認された。なお、硬化後の BFS コンクリートは、一般的なコンクリートと外観性状などの相違は確認されなかった。

## 6. まとめ

本研究の範囲で以下の結論が得られた。

- (1) 荷重漸増荷重による輪荷重走行試験の結果、BFS コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版は、砕砂を用いた一般的なコンクリートのプレキャスト PC 床版と比較し、同等以上の高い疲労耐久性を有することが確認された。
- (2) 高速道路での供用を想定した輪荷重走行試験の結果、BFS コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版は、高速道路で 100 年間使用する場合に必要な乗り心地に関わる使用性、および輪荷重の繰返しに対する十分な安全性が確保されていることが確認された。
- (3) BFS コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版は、一般的なコンクリートを用いた場合と同様に、床版の取替工事に適用できることが確認された。

謝辞 本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)の一部として実施した。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 岸谷孝一, 友沢史紀, 沼田晋一: コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準作成に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.1, pp.213-216, 1979
- 2) 藤井隆史, 細谷多慶, 杉田篤彦, 綾野克紀: 高炉スラグを用いたコンクリートの中酸化, 塩化物イオン浸透性および時間依存性変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.637-642, 2015
- 3) 阿部浩幸, 大谷悟司, 原健悟: 新しい RC 接合構造を用いたプレキャスト PC 床版 (SLJ スラブ) の性能確認試験, 土木学会第 62 回年次学術講演会, V-183, pp365-366, 2007.9
- 4) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 平成 14 年 3 月
- 5) 阿部浩幸, 大谷悟司, 原健悟: 新しい RC 接合構造を



図-11 床版取替工事の状況



図-12 移動式ミキサ

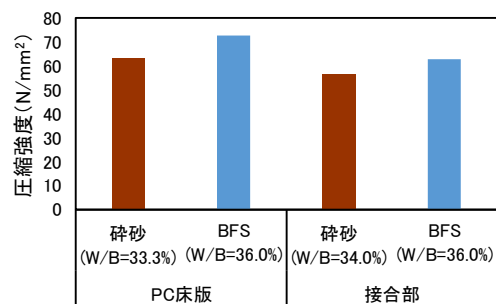


図-13 部材同一養生を行った材齢 28 日の圧縮強度

用いたプレキャスト PC 床版 (SLJ スラブ) の性能確認試験, 土木学会第 62 回年次学術講演会, V-183, pp365-366, 2007.

- 6) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解作用後の水中疲労に関する研究, 材料, 第 66 巻, pp.588-593, 2017.8
- 7) 国土技術政策総合研究所資料 第 28 号: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 平成 14 年 3 月
- 8) 長尾千瑛, 広瀬剛: プレキャスト PC 床版継手の疲労耐久性照査試験, 第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.189-192, 2017
- 9) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, pp.627-632, 1987
- 10) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, pp38-43, 2017