

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート床版の輪荷重走行疲労試験

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○俵 道和
 オリエンタル白石(株) 正会員 博(環境学) 杉田 篤彦
 オリエンタル白石(株) 正会員 博(環境学) 二井谷 教治

Abstract : In this study, wheel load running fatigue test was conducted on a floor slab testing body produced with blend of 100% of blast-furnace slag fine aggregate. By comparing with the results of a similar wheel load running fatigue test on concrete using crushed sand, the influence due to the difference in fine aggregate for concrete was evaluated. As a result, concrete using crushed sand showed a center displacement of about 20 mm under a load of 353 kN, and a running frequency of 420,000. It was confirmed that the blast-furnace slag fine aggregate had a center displacement of about 6 mm even under a load of 392 kN and a running frequency of 554,000, with sufficient fatigue durability as compared with the crushed sand.

Key words : Blast-furnace slag fine aggregate, Floor slab, Wheel load running fatigue test

1. はじめに

近年、車両の大型化や交通量の増加に伴って既設道路橋の鉄筋コンクリート床版の損傷が顕在化している¹⁾。損傷事例の一つとして床版の抜け落ちが挙げられる。その原因として、コンクリート床版の上面部に発生しているコンクリートの土砂化が挙げられる。土砂化のメカニズムについてはいくつかの説があるが、床版上面に水が浸入することで凍害やアルカリ骨材反応、湿潤状態での圧縮強度の低下などにより劣化したコンクリートが路面の走行車両の繰り返し荷重により破碎して土砂化が発生、進行し、床版厚が減少して抜け落ちに至ると考えられている。

一方、高炉スラグ細骨材（以下、BFS）を使用したコンクリートは、凍害、中性化、アルカリシリカ骨材反応および塩害などに対して高い耐久性を示すことが既往の研究²⁾から明らかになっており、BFSを用いたコンクリートを床版に適用することで長寿命化につながると考えられる。しかしながら、高炉スラグ細骨材を100%使用したコンクリートの疲労耐久性について検討された事例はほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、BFSをコンクリート用細骨材として100%使用したコンクリートについて輪荷重疲労走行疲労試験を実施し、過去に砕砂を用いたコンクリートについて実施された輪荷重走行疲労試験の結果³⁾と比較するとともに、BFSを用いたコンクリートのプレストレストコンクリート床版（以下、PC床版）への適用性について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

BFSは、JIS A 5011-1 コンクリート用スラグ骨材 第1部：高炉スラグ細骨材に適合し、倉敷の製鉄所で製造されたものを使用した。砕砂は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕砂を使用した。表-1に細骨材の物性値を示す。結合材として、BFSを使用したコンクリートには普

表-1 細骨材の物性値

種類	BFS1.2	砕砂
表乾密度 (g/cm ³)	2.77	2.63
吸水率 (%)	0.22	0.84
粗粒率	2.11	2.85

表-2 コンクリートの配合

細骨材種類	結合材種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
BFS	普通	30.0	4.5	41.0	155	517	723	995
砕砂	早強	36.0	4.5	39.0	154	428	677	1067

通ポルトランドセメントを使用し、砕砂を使用した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。プレストレストコンクリートには、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⁴⁾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。粗骨材は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕石 (密度: 2.65g/cm³) を使用した。混和剤は、BFS を用いた配合には増粘剤 (液体タイプの高機能特殊増粘剤) および高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) を使用し、砕砂を用いた配合にはの高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) を使用した。

2.2 配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。BFS を用いたコンクリートの PC 床版および間詰め部には普通ポルトランドセメントを用いて水セメント比を 30%とした配合を用いた。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 35N/mm²を確保するために、水セメント比を 30%に設定した。砕砂を用いたコンクリートの PC 床版には一般的なプレキャストプレテンション方式の構造物に用いられる早強ポルトランドセメントを用いて水セメント比を 36%とした配合を用いた。

2.3 輪荷重走行疲労試験体

図-1 に試験体の形状寸法を示す。試験体は、床版支間方向がフルプレストレスとなるように設計されたPC床版を対象とし、接合構造は図-2 に示すエンドバンド鉄筋による継手を採用した。試験体は、床版支間3.0mの連続版を対象として設計を行い、正の曲げモーメントに着目し床版支間2.5mの単純支持として試験を行った。床版厚は、道路橋示方書⁵⁾に準拠し式 (1) を用いて算出した。

$$t = (3L + 11) \times 0.9 = 18\text{cm} \quad (1)$$

ここに、t : 床版厚 (cm) , L : 床版支間 (m)

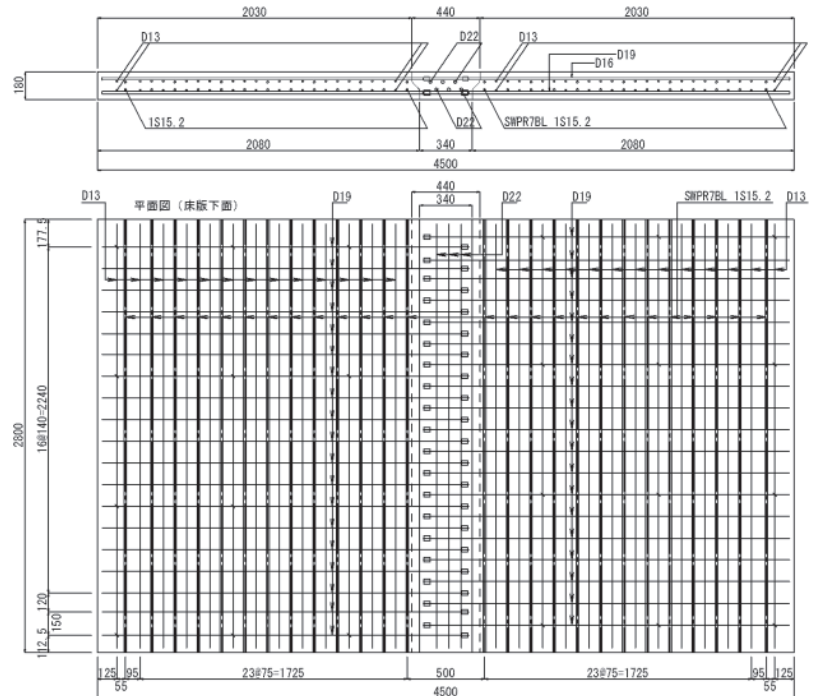


図-1 試験体の形状寸法

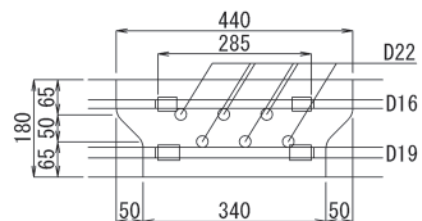


図-2 接合部の構造詳細図

試験体は、実構造物と同様に床版支間方向はプレテンション方式でプレストレスを導入し、その直角方向はRC構造とした。接合部のエンドバンド鉄筋は上下2段に140mm間隔で、上段にはSD345のD16、下段にはSD345のD19を配置した。接合部の床版支間方向にはSD345のD22を上下2段に配置した。PC鋼材はSWPR7BL φ15.2を使用し、上縁には300mm間隔、下縁には150mm間隔で配置した。橋軸方向鉄筋はSD345のD16(上段)およびD19(下段)を使用し、継手長は285mm(15D)とした。接合部のPC床版端部の中央にテーパを付け、上側はR30mmで面取りを行った。これは、貫通ひび割れの抑制を目的としている。打継面は、凝結遅延剤による洗い出しを行った。PC床版については、コンクリート打込み後に最高温度を40℃とした蒸気養生を行い、コンクリート強度を確認したのちにプレストレスを導入した。プレストレス導入後にBFSを用いたPC床版は1週間の水中養生を行った。砕砂を用いた試験体については、試験体形状や試験方法はBFSと同一条件であり、コンクリートの配合のみ異なる条件で試験を実施した結果を示す。

3. 試験方法

3.1 試験体の設置

図-3に試験体の荷重位置および支持条件を示す。試験体は、橋軸直角方向は回転可能な単純支持、橋軸方向は端部を横桁で支持し、浮上りを防止して輪荷重走行疲労試験機に固定した。荷重装置は、クランク式輪荷重走行試験機を使用した。

3.2 荷重方法

輪荷重走行試験は、図-4に示す荷重ステップで行った。初期荷重は、既往の方法⁶⁾を参考に157kNまで荷重し4万回走行ごとに順次19.6kNずつ走行荷重を増加させた。計測は、所定の走行回数時の荷重レベルを静的に荷重および除荷して行った。計測は、輪荷重の走行回数が0, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 1万, 2万, 4万, 以降荷重増加直後(2万回ごと)に行った。

BFSを用いた試験体に関して、当初の予定としては砕砂と同じ荷重ステップを予定していた。しかしながら、BFSを用いた試験体は走行回数320,000回で自動制御による静的荷重を行う予定であったが自動制御での静的荷重が行われなかったために走行回数334,146回まで荷重し静的荷重を行った。さらに、当初の予定では最終の荷重荷重392kN、走行回数520,000回を予定していたが、走行回数520,000回においてもBFSは荷重荷重の低下が確認されなかったために荷重荷重392kN、走行回数554,450回まで走行試験を行った。BFSを用いた試験体は、走行回数554,450回でも荷重荷重の低下は確認されず、輪荷重走行装置の橋軸直角方向の傾きが試験機に定められている許容値を越えたために試験を終了した。

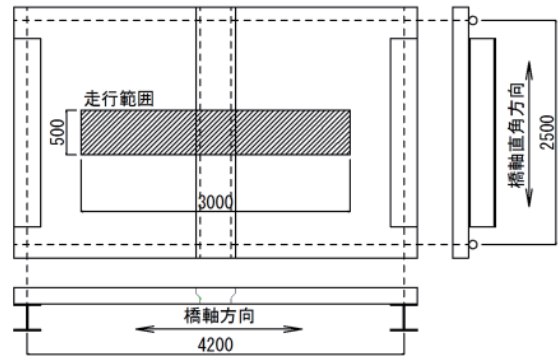


図-3 試験体の荷重位置および支持条件

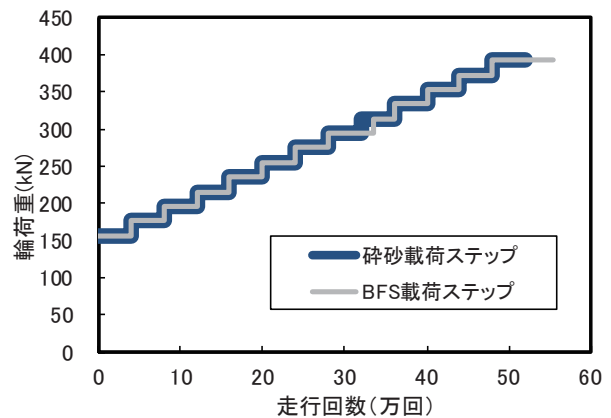


図-4 荷重ステップ

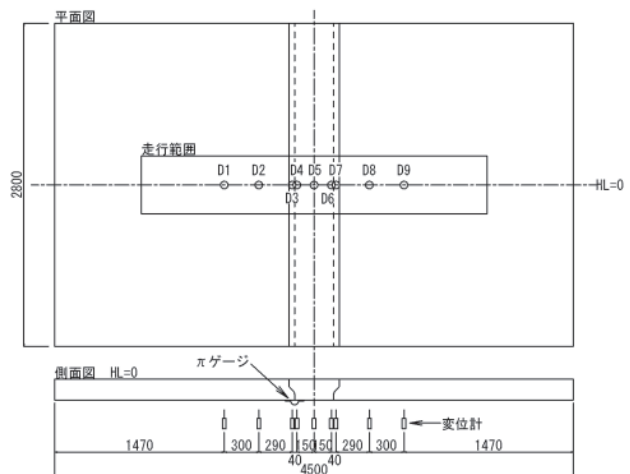


図-5 計測位置図

表-3 硬化コンクリートの試験結果

細骨材種類	試験時期	プレキャスト床版部			間詰め部		
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
BFS	試験開始時	98.3	6.1	43.8	74.4	4.4	36.2
	試験終了時	97.7	5.2	45.0	76.9	4.2	37.6
砕砂	試験開始時	61.7	4.4	34.1	64.5	4.6	35.6
	試験終了時	63.2	4.8	35.0	64.8	4.6	35.9

3.3 測定項目

測定項目は、床版のたわみ、打継目地の段差および開き、ひび割れ発生状況、橋軸方向のたわみ分布、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみとしたが、本稿では床版のたわみ、打継目地の段差および開き、ひび割れ発生状況、橋軸方向のたわみ分布の試験結果について報告を行う。測定器の取付け位置を図-5に示す。

4. 試験結果

4.1 硬化コンクリートの試験結果

表-3に硬化コンクリートの試験結果を示す。砕砂を用いた試験体の試験時の圧縮強度は61~65N/mm²を示した。BFSを用いた試験体は、普通ポルトランドセメントを用いて材齢18時間でプレストレスの導入強度35N/mm²以上を確保させるために水セメント比を30%に設定した。その結果、プレキャスト床版部の試験時の圧縮強度は97~99N/mm²を示した。

4.2 支間中央のたわみ変化

図-6に荷重時と除荷時の変位計D5のたわみ変化を示す。砕砂を用いた試験体のたわみは走行回数とともに増加し、荷重段階353kN(走行回数40万回から42万回)でたわみが急激に増加し、20mmを超えても破壊せずに試験機の許容範囲を超えたため、走行試験を終了した。そのうち392kNまで静的荷重を行ったが完全な破壊には至らなかった。BFSを用いた試験体のたわみは走行回数とともに増加したが、荷重が392kN、走行回数55.4万回においてもたわみは6mm程度であり砕砂を用いた試験体と比較しても十分な疲労耐久性を有している。残留たわみについては、BFSおよび砕砂を用いた試験体について荷重時のたわみが約5mm時点で比較すると、同程度の残留たわみであることが確認された。砕砂およびBFSを用いた試験体は、ひび割れの進展に伴って剛性が低下し、たわみが増加したものと考えられる。

4.3 打継目地段差の変化

打継目地の近傍に設置した2台の変位計(D3とD4)の荷重時の相対変位を目地段差とし、目地段差の変化を図-7に示す。砕砂を用いた試験体の段差は走行回数とともに増加し、走行回数36万回から急激に増加した。BFSを用いた試験体についても段差は走行回数とともに増加しているが、走行回数

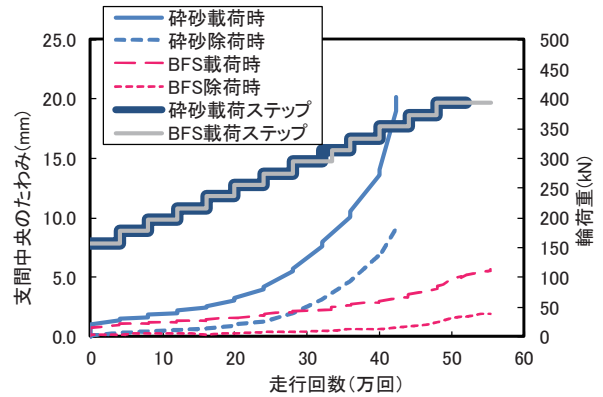


図-6 走行回数と支間中央のたわみの関係

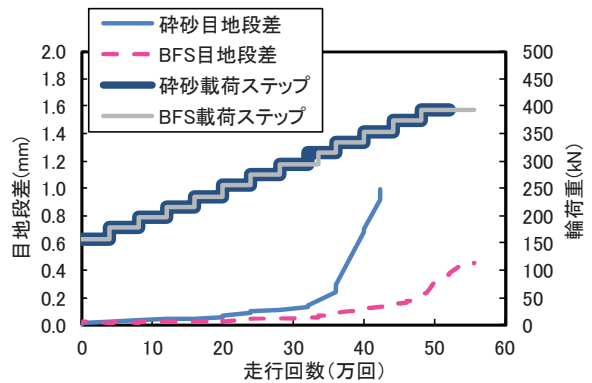


図-7 打継目地段差の変化

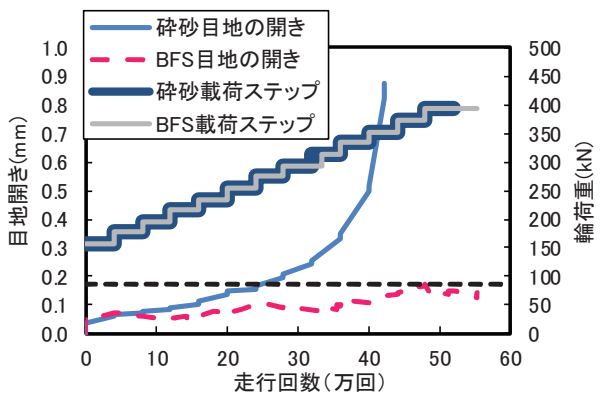


図-8 打継目地開きの変化

55.4万回で約0.5mmと砕砂を用いた試験体と比較して1/2程度であった。

4. 4 打継目地開きの変化

図-8に走行回数による荷重時の打継目地開きの変化を示す。接合部鋼材の許容目地開き量として、コンクリート標準示方書に示される異形鉄筋使用時の許容ひび割れ幅⁷⁾を適用すると、 $w_a = 0.005c = 0.005 \times 35\text{mm} = 0.175\text{mm}$ (c : かぶり mm) となる。砕砂および BFS を用いた試験体について荷重開始直後の目地開きは許容値以下を示した。砕砂を用いた試験体の目地開きは、初期荷重の約1.7倍を荷重した時点でひび割れ幅は許容値を超えた。BFSを用いた試験体については、初期荷重の約2.5倍を荷重した時点でもひび割れ幅は許容値以下を示した。

4. 5 橋軸方向のたわみ分布

図-9に砕砂を用いた試験体の橋軸方向のたわみ分布を示し、図-10に BFS を用いた試験体の橋軸方向のたわみ分布を示す。2005年に東名高速道路の日本平において、走行車両の軸重が実測されている。この実測結果に基づいて計算された1年あたりの軸重の繰返し回数は、基本軸重を156.9kNとした場合、3,450回相当であることが報告されている⁸⁾。さらに、水の影響を考慮して100年相当の軸重の走行回数を計算すると 3.45×10^7 であるとされている。今回行った輪荷重走行試験の荷重と走行回数について、RC床版のS-N曲線⁸⁾を適用してマイナー則に従うと仮定した場合、100年相当の荷重ステップは、274kN荷重時の約4,000回走行時となる。274kN荷重時の橋軸方向のたわみ分布は、砕砂および BFSを用いた試験体はともに中心部から±170mm位置の目地位置についてもたわみ分布は緩やかに変化していることからPC床版部と間詰め部の一体性が十分に確保されていることが確認され、BFSを用いた試験体についても砕砂を用いた試験体と同様にPC床版と間詰め部の一体性について良好な結果が得られた。

4. 6 ひび割れ発生状況

図-11に試験体下面のひび割れ発生状況を示す。同図に示す破線は輪荷重の走行範囲を示す。BFS および砕砂 A は最終の荷重荷重時のひび割れ発生状況を示し、砕砂 B は BFS の最終の荷重荷重時の中央たわみ(5mm)と同程度の状況のひび割れ発生状況を示す。中央のたわみが同程度のBFSと砕砂 Bは、プレキャスト床版部と間詰め部に発生したひび割れに連続性が確認されなかった。BFSについても

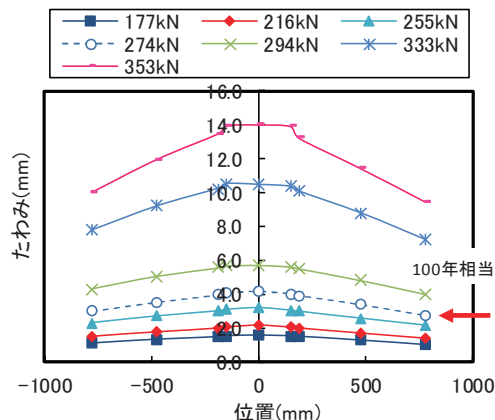


図-9 砕砂の橋軸方向のたわみ分布

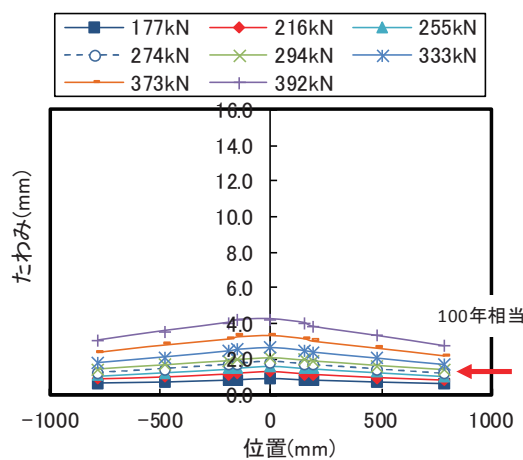


図-10 BFSの橋軸方向のたわみ分布

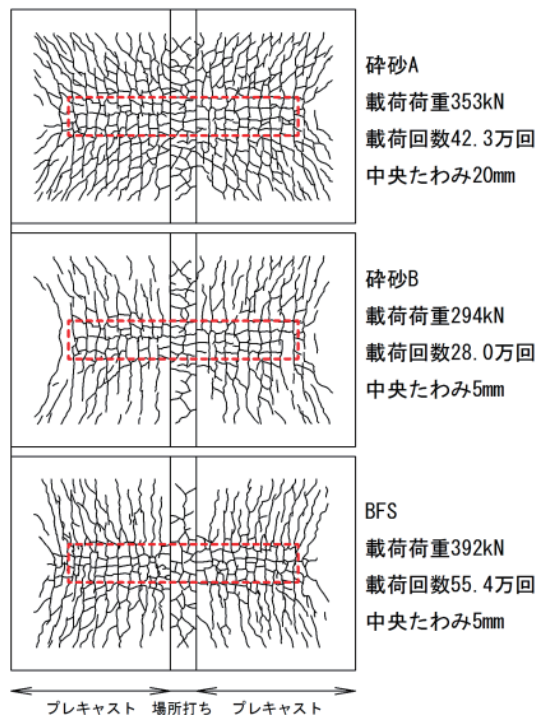


図-11 試験体下面のひび割れ発生状況

は、プレキャスト床版部と間詰め部に発生したひび割れに連続性が確認されなかった。BFSについても

載荷回数または載荷荷重を増加することで砕砂 A のようにプレキャスト床版部と間詰め部について連続的なひび割れ発生状況を示すものと考えられる。

4. 7 走行回数と輪荷重の関係

図-12 に過去に試験を行った，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⁹⁾，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⁹⁾および砕砂，BFS を用いた PC 床版試験体の輪荷重走行

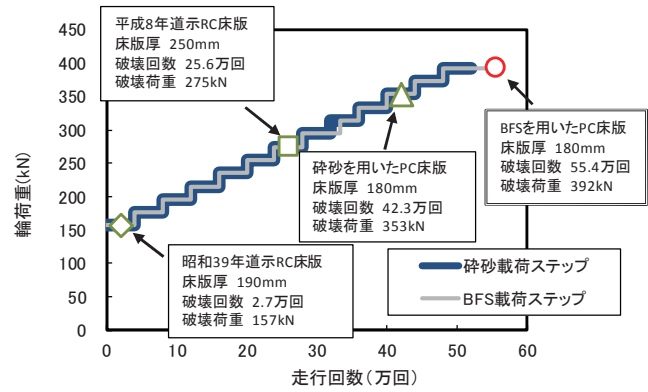


図-12 走行回数と輪荷重の関係

疲労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 床版について遜色ない性能を有していることが確認された。BFS を用いたコンクリートは，砕砂を用いたコンクリートよりも高い強度が得られており，細骨材種類の影響とともにコンクリート強度の影響も含まれた試験結果となっている。今後，コンクリート強度は同程度で細骨材種類のみ変化させたコンクリートについても輪荷重による疲労耐久性を検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

- (1) 砕砂を用いた試験体のたわみは走行回数とともに増加し，荷重 353kN，走行回数 42 万回で 20mm 程度であったが，BFS を用いた試験体のたわみは，荷重 392kN，走行回数 55.4 万回においても 6mm 程度であり，BFS を用いた試験体は砕砂を用いた試験体と比較しても十分な疲労耐久性を有していることが確認された。
- (2) BFS を用いた試験体は，輪荷重走行疲労試験の最終段階まで PC 床版部と間詰め部が一体構造として機能してい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) 関口幹夫：供用27年間のRC床版追跡調査結果，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 259-264，1998. 11
- 2) 藤井隆史ほか：コンクリートの耐久性に及ぼす高炉スラグ細骨材の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第13巻，pp1-6，2013. 11
- 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) 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
- 5) 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
- 6) 土木学会鋼構造委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004. 11
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002
- 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) 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