

# 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト部材の研究開発

綾野 克紀<sup>\*1</sup>・二井谷 教治<sup>\*2</sup>・細谷 多慶<sup>\*3</sup>・高橋 克則<sup>\*4</sup>

走行車両による荷重の繰返しや寒冷地における凍結融解作用および凍結防止剤の散布によって多くの道路橋の劣化が顕在化している。とくに、床版防水が機能をしていないことで水が侵入し、荷重の繰返し作用による損傷がより大きくなっている場合がある。本研究報告では、高炉水砕スラグを細骨材として用いることで、コンクリートの凍結融解抵抗性が高まり、また、水中での疲労寿命も長くなることを示す。高炉スラグ細骨材には、粗骨材のアルカリシリカ反応や塩化物イオンの浸透を抑制する効果をもちながら、高炉スラグ微粉末のようにコンクリートの中性化は促進しないこと、また、AE 剤を用いなくても凍結融解抵抗性が得られることなども知られており、高耐久なコンクリート部材への活用が期待されている。

キーワード：高炉スラグ細骨材、凍結融解抵抗性、水中疲労、クリープ、乾燥収縮

## 1. はじめに

走行車両による荷重の繰返しや寒冷地における凍結融解作用および凍結防止剤の散布によって、取替えの必要のある床版が 230 km 以上にのぼるといわれている。床版部材とともに老朽化したはり部材の負担を軽減し、その寿命を延ばすためには、床版部材の軽量化がはかれ、かつ、取替え工事における交通規制を短縮できる高耐久なプレキャスト PC 床版の活用が望まれている。

本研究報告では、微粉末として結合材の一部に用いられることの多かった高炉スラグを細骨材として用いることで、Non-AE であっても、高い凍結融解抵抗性をもつプレキャスト部材を製造することが可能であることを示す。

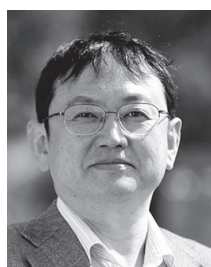
## 2. BFS コンクリートの耐久性

図 - 1 および図 - 2 は、それぞれ、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。これらのコンクリートに AE 剤は用いていない。高炉スラグは、微粉末として用いても、細骨材として用いても、AE 剤を用いることなく、高い凍結融解抵抗性を得ることができる。

図 - 3 は、細骨材に高炉スラグ細骨材を 100% 用いたコ

ンクリートの凍結融解抵抗性を比較したものである。Non-AE コンクリートであっても、約 500 サイクルの凍結融解に対して相対動弾性係数は 100% が保たれており、AE としたコンクリートでは、1 500 サイクルでも相対動弾性係数は 100% を保っている。図 - 4 は、Non-AE および AE コンクリートに、それぞれ、550 サイクルおよび 1 500 サイクルの凍結融解作用を与えたのちに、水中で繰返し荷重を載荷し、その壊れるまでの回数を調べた結果である。なお、上限および下限の荷重の作用によって生じる応力は、凍結融解作用を与える前の強度に対して、それぞれ、25% および 2.5% としている。AE コンクリートには、2 000 万回の繰返し荷重でも破壊に至っていないものも含まれているが、そのコンクリートが 2 000 万回の繰返し荷重で壊れたとして、生存確率 50% の疲労寿命を求めると、Non-AE コンクリートで、43 万回、AE コンクリートで 950 万回となる。なお、早強ポルトランドセメントと砕砂を用いた AE コンクリートに、300 サイクルの凍結融解を与えたのちの水中疲労による生存確率 50% の疲労寿命は、約 87 万回である。高炉スラグ細骨材を用いることによって、凍結融解抵抗性が高くなり、凍結融解作用を受けたのちの水中疲労も低下しにくくなる。

図 - 5 および図 - 6 は、それぞれ、高炉スラグ細骨材を



<sup>\*1</sup> Toshiki AYANO

岡山大学大学院  
環境生命科学研究所 教授



<sup>\*2</sup> Kyoji NIITANI

オリエンタル白石 (株)  
技術研究所



<sup>\*3</sup> Kazuyoshi HOSOTANI

ランドス (株)  
技術部



<sup>\*4</sup> Katsunori TAKAHASHI

JFE スチール (株)  
スチール研究所

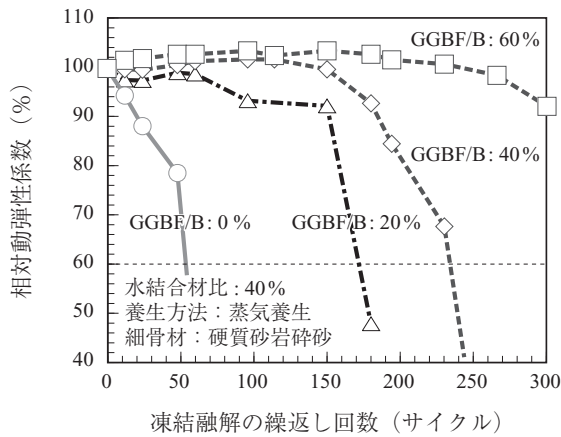


図 - 1 高炉スラグ微粉末 (GGBF) の影響

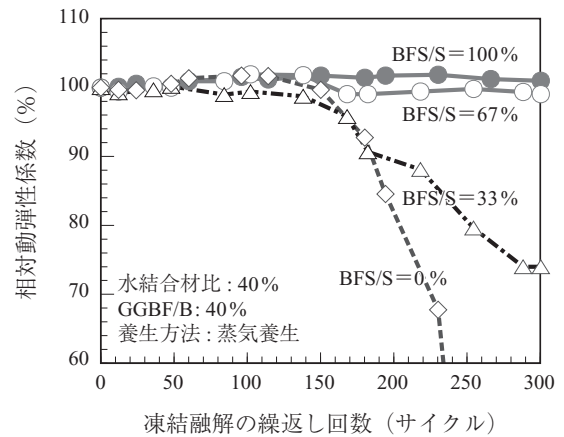


図 - 2 高炉スラグ細骨材 (BFS) の影響

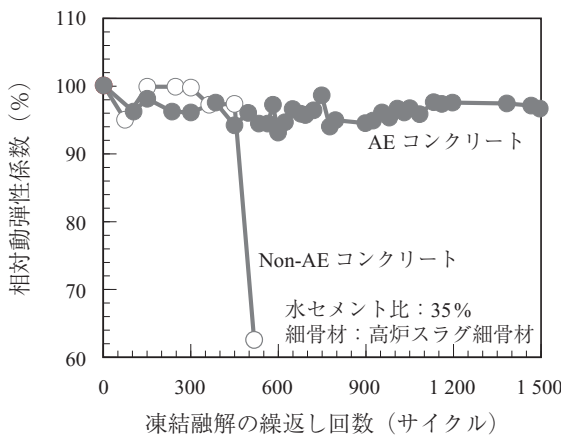


図 - 3 AE 剤の影響

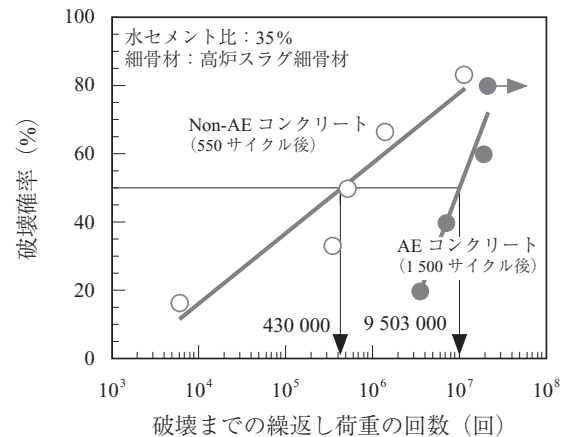


図 - 4 水中疲労

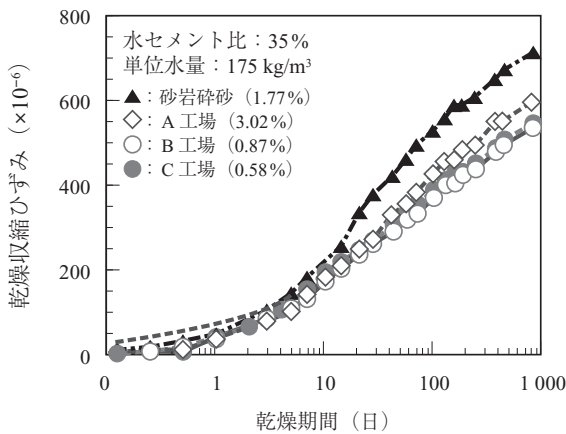


図 - 5 乾燥収縮ひずみの経時変化

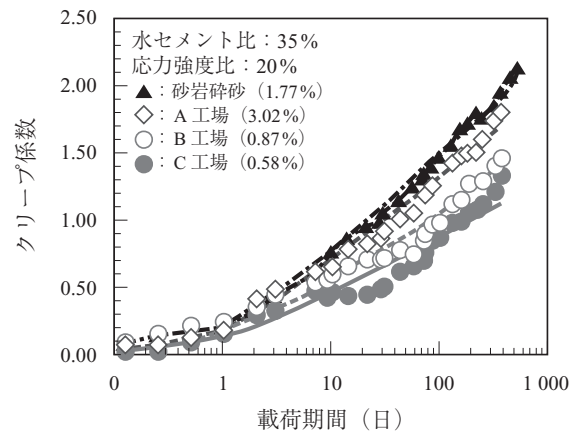


図 - 6 クリープの経時変化

用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープの経時変化である。高炉スラグ細骨材を用いることで、乾燥収縮ひずみおよびクリープともに小さくなる。また、吸水率の小さな高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートほど、乾燥収縮ひずみ、クリープともに小さくなる傾向がある。

### 3. 高炉スラグ細骨材の耐久性改善のメカニズム

高炉スラグ細骨材は、高炉（溶鋳炉）で鉄鉄を製造する

際に副産物として生成する高炉スラグを原料として製造される。品質の安定した鉄鉄を効率よく製造するためには、高炉スラグの特性が安定していることが不可欠であるため、製鉄所ごとに相違はあるものの、各製鉄所から発生する高炉スラグの化学成分は大きく変動することはない。

溶融状態の高炉スラグに大量の水で急速に冷却して得られる砂粒状の高炉水砕スラグが得られ、これの磨砕機などを用いて整粒、粒度調整したものが高炉スラグ細骨材であ

る。化学成分、物理的性質、環境安全性などは、JIS A 5011-1（コンクリート用スラグ骨材－第1部：高炉スラグ骨材）に規定されている。高炉スラグ細骨材は、急冷されているためガラス質の材料であり、高炉スラグ微粉末と同様の化学組成であることから、潜在水硬性を有している。また、高温処理を経ているため塩化物や有機物を含まないという長所も持っている。高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたモルタルを薄片化し、偏光顕微鏡で観察した結果を図-7に示す。砕砂の場合、セメントペースト部と骨材の界面は明確に分かれており、反応層は見られないのに対し、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルでは、セメントペースト部と高炉スラグ細骨材の界面に骨材とペースト間の反応にともなって変化したと思われる層が認められる。この反応が塩害、凍害に対して寄与していると考えられ、フリーディング抑制などの適切な配合設計をすることで、一般の細骨材に比べて耐久性を改善できる。

高炉スラグ細骨材を用いたモルタルを、塩水環境で凍結融解試験をした際の内部組織についてSEM-EDXで観察した結果を図-8に示す。通常の砂を用いた場合には、ペースト部中の骨材界面近傍には遷移帯に起因する元素検出が低いエリア、あるいは、CHによるCa濃度のみが突出したエリアが観察されるのが一般的であるが、高炉スラグ細骨材を用いたモルタルではそのような大きな不均質などは認められず、ペースト部と界面部との元素検出、元素存在レベルがともに類似していることが分かる。高炉スラグ細骨材および天然砂を用いたモルタルの気孔径分布を図-9に示す。高炉スラグ細骨材を用いることによって $0.1\mu\text{m}$ 以下の毛細管空隙が低下していることが確認される。

これらのことから、骨材界面部が通常のペースト部分に近いレベルの緻密な組織になっていると考えられる。通常、骨材とペースト界面部には遷移帯があり、組織的に粗で、一般的 $0.02\sim 0.8\mu\text{m}$ の空隙が多いとされている。高炉スラグ細骨材を適用することによって、セメント系反応を起こすイオンが骨材から供給されて増加し、低水セメント比に近い状態になることによって骨材界面の遷移帯の構造が緻密化し、塩化物イオン浸透の抑制、亀裂が進展しやすい脆弱部の強化がなされたと考えられる。

また、高炉スラグ細骨材を適用した場合、高炉スラグ微粉末と類似の反応が起こることで、Alイオンの供給、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費が起こりながらゲル化すると考えられる。このゲルによっても塩素の固定化や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解抑制効果が発現すると考えられる。

以上のように、高炉スラグ細骨材を用いることで、高炉スラグ微粉末と類似の反応が骨材－ペースト界面部で起こり、脆弱部の強化や塩化物固定効果が発現し、耐久性が改善しているものと推定される。

#### 4. プレキャストRC部材への適用

プレキャストRC部材は、プレキャストPC部材に比べて比較的小型の構造物が多く、さまざまな用途に対応するために形状が複雑で薄肉となり、耐久性に課題があることが指摘されている。また、プレキャストRC部材の製造方

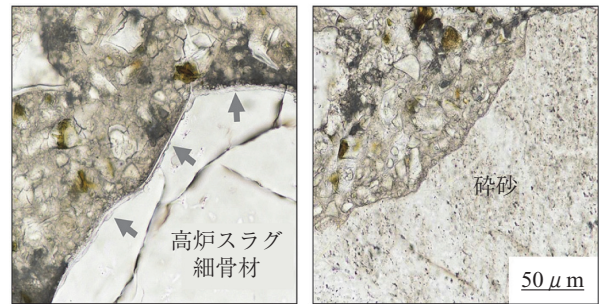


図-7 高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたモルタル薄片の顕微鏡観察結果

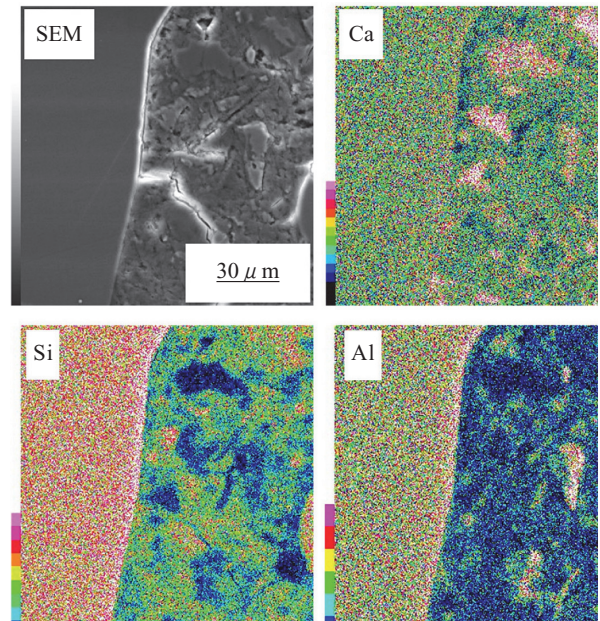


図-8 高炉スラグ細骨材を用いたモルタルのEDXマッピング (Ca, Si, Al)

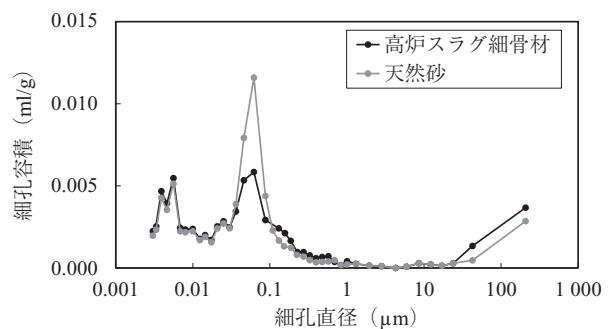


図-9 高炉スラグ細骨材および砕砂を用いたモルタルの28日養生後の細孔径分布

法は、蒸気養生を用いた促進養生と外部振動機を用いた締固め方法が特徴であり、使用するコンクリートには、出来上りの外観を重視したNon-AEコンクリートが多く用いられている。このため、凍結融解抵抗性が低下し、供用期間内での補修や更新が行われる事例があり、高炉スラグ細骨材を用いた耐久性の高いプレキャストRC部材の適用が求められている。

凍害によるプレキャストRC部材の劣化事例を写真-1



写真 - 1 プレキャスト RC 部材の凍害例 1



写真 - 2 プレキャスト RC 部材の凍害例 2

および写真 - 2 示す。写真 - 1 は、中国地方の山間部で施工された  $W/C=41\%$  の Non-AE コンクリートの張出し歩道製品で、設置後わずか 10 数年で損傷を受けた事例である。平成 28 年度の気象データによれば、この製品が施工された地域の 2 月の日最低気温の平均は、 $-3.4^{\circ}\text{C}$  で、 $-5^{\circ}\text{C}$  以下となった日は年間に 16 日あった。写真 - 2 は、同様の製品を、2 月の日最低気温の平均が  $-1.0^{\circ}\text{C}$  で、 $-5^{\circ}\text{C}$  以下となった日が年間 2 日の中国地方の山間部で施工した例である。施工後、20 数年で更新せざるを得ない状況になっている。

高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートを用いたプレキャスト RC 部材の適用例を写真 - 3 から写真 - 5 に示す。写真 - 3 および写真 - 4 は、それぞれ、車道用および歩道用張出し製品に適用した例である。これらの歩・車道用張出し製品には、以下のメリットを期待して高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト RC 部材が用いられた。

- 雪寒地域での設計供用期間の延長
- 場所打ち工法よりも容易で経済的な道路拡幅
- 基礎部擁壁の再構築を省略
- 仮設工事が少なくなることによる早期交通開放

写真 - 5 は、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの遮塩性能を活かし、埋設パネル化による海洋構造物へ適用された事例である。

図 - 10 および図 - 11 は、それぞれ、蒸気養生の最高温度および脱型後の追加水中養生期間が、コンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。これらの結果から、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの高い凍結融解抵抗性を引き出すためには、増粘剤を用いること、従来の製品と製造方法は大きく異なり、蒸気養生時の最高温度は  $40^{\circ}\text{C}$  以下を守ること、脱型後には 7 日間以上の水中養生を行うことが製造上の要諦であることは明らかである。なお、図 - 11 から水中養生期間は 3 日以上とも読み取れるが、耐スクレーリングの観点などから 7 日以上とした。

## 5. プレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験

旧基準で設計された鋼鉄桁橋の RC 床版の劣化が顕在化

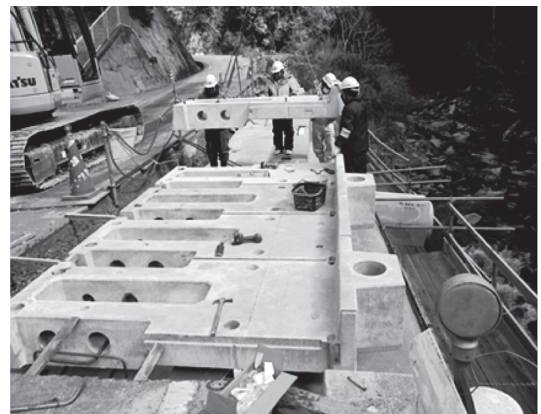


写真 - 3 プレキャスト RC 部材の適用例 1



写真 - 4 プレキャスト RC 部材の適用例 2



写真 - 5 プレキャスト RC 部材の適用例 3

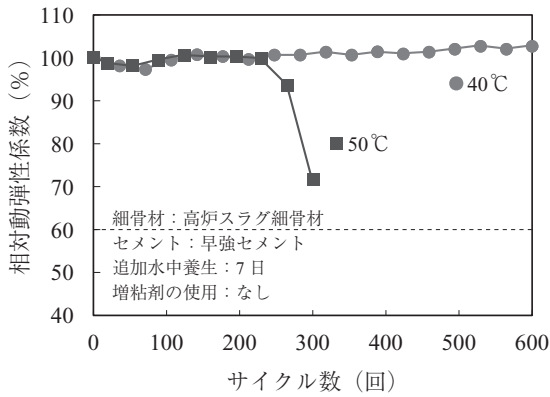


図 - 10 蒸気養生の最高温度の影響

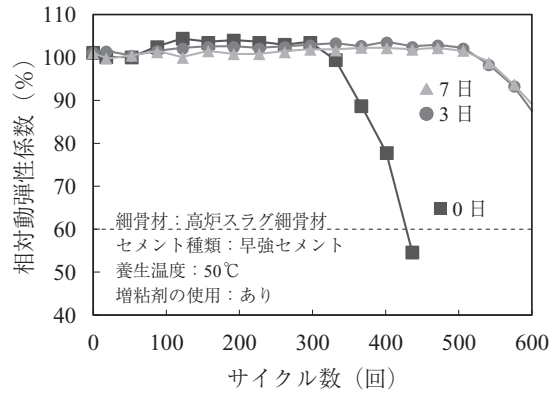


図 - 11 蒸気養生後の追加水養生の影響

しており、その抜本的な対策として取替えが行われている。この場合、交通規制期間を短くする必要があること、および現行の基準で設計しても死荷重を増加させないために版厚を薄くする必要があることから、プレキャストPC床版を用いるのが一般的である。プレキャスト部材の採用にあたっては、確実な耐荷性能を有する接合方法が不可欠であり、プレキャストPC床版用の継手も各種開発されてきている。エンドバンド継手<sup>2)</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機械式定着併用重ね継手の一種で、ループ継手では、最小版厚は240mm程度が一般的<sup>3)</sup>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。写真-6にエンドバンド継手の例を示す。

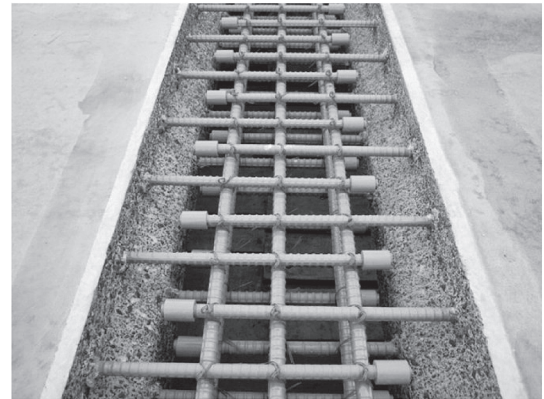


写真 - 6 エンドバンド継手

写真-7にエンドバンド継手を場所打ち部で形成したプレキャストPC床版の輪荷重走行試験を示す。プレキャストPC床版は、橋軸方向がRC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。供試体の形状寸法および鋼材配置は、既往の試験<sup>2)</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2800mm、橋軸方向の長さが4500mm、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。供試体は、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、供試体上面に並べた500mm×200mmの鋼製版上を橋軸方向に中央から±1500mmの範囲で移動し、道路橋示方書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増荷を行った。4万回の走行ごとに静的荷重を行い、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。

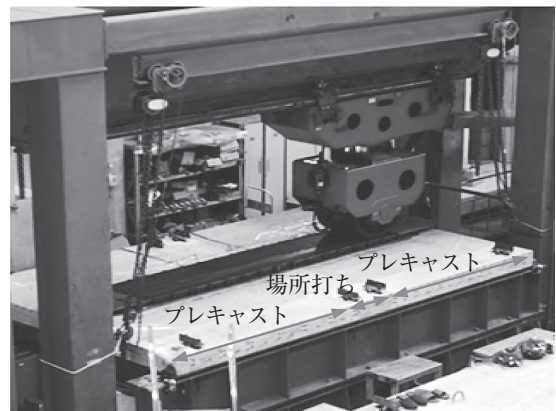


写真 - 7 輪荷重走行試験

図-12に、走行回数と供試体中央位置のたわみを示す。細い曲線は、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の結果で、太い曲線は、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を用いた結果である。いずれのコンクリートも、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、水セメント比を、それぞれ、35.0%および30.0%としている。なお、試験時のコンクリートの圧縮強度は、砕砂を用いたもののプレキャスト部が62.5N/mm<sup>2</sup>で、場所打ち部が64.7N/mm<sup>2</sup>である。一方、

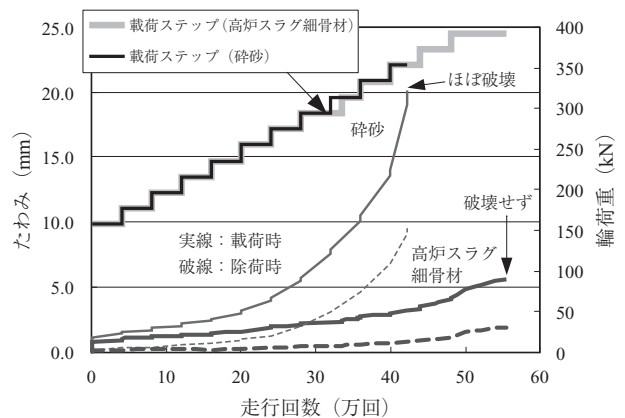


図 - 12 走行回数とたわみとの関係

高炉スラグ細骨材を用いたもののプレキャスト部が 98.0 N/mm<sup>2</sup>、場所打ち部が 75.7 N/mm<sup>2</sup> である。

砕砂を用いたプレキャスト PC 床版では、353.0 kN の輪荷重が載荷された走行回数 423 000 回のとき、たわみが約 20 mm 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 kN の 2.5 倍の輪荷重を走行させたのちでも、たわみは 5 mm 程度と小さく、破壊に至っていない。ここでは詳細を割愛するが、強度の違いを既往の S-N 曲線で補正して評価しても、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 - 13 および図 - 14 は、それぞれ、砕砂を用いたプレキャスト PC 床版および高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験終了時における供試体下面のひび割れ状況の比較を示す。両者の結果を比較すると、ひび割れの発生方向などに差異はないものの、高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版のほうが、ひび割れの本数が少なく密度が小さいことがわかる。高炉スラグ細骨材を用いた供試体の接合部のひび割れ性状に着目すると、プレキャスト PC 版のひび割れ性状と大きく異なることはなく、エンドバンド鉄筋に沿ったひび割れも見られない。これらのことから、最大輪荷重 392.2 kN が載荷された走行回数 554 450 回の試験終了時においても、鉄筋の継手が健全に機能しており、接合部の疲労耐久性も確保されていることが確認できる。

プレキャストコンクリート製品は、整った設備と環境の下で製造され、現場で施工されるコンクリート部材に比べて一般的には品質が高いと認識されることも多い。しかしながら、その耐久性については、養生方法によって左右され、適切な養生がなくては所要の耐久性は確保できない。特に、高炉スラグ細骨材のように、それ自体の反応によって高い耐久性を発揮するものについては、初期の蒸気養生温度の制御や、その後の追加給水養生が不可欠である。写真 - 8 は、プレキャスト PC 床版を水中養生するための養生槽の例である。

## 6. おわりに

現在、国土交通省では、i-Construction のもと、生産性向上への取組みが積極的に推進されており、その方策の柱の一つがコンクリート構造物のプレキャスト化である。また、各高速道路会社を始めてとして、インフラの大規模更新が進められている。このような状況のなか、より高い耐久性を有する高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート部材が、これらの施策に対して少しでも多く貢献できれば幸いである。

### 謝 辞

本研究は、内閣府・NEDO による戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として実施しているものである。ここに記して謝意を表する。

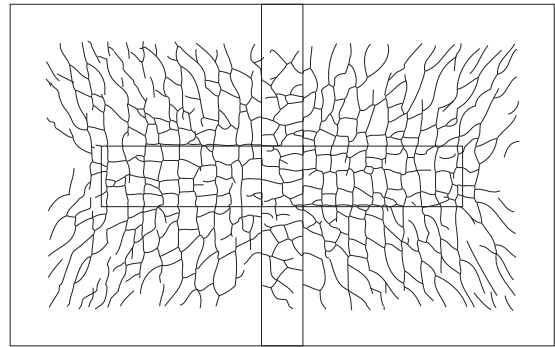


図 - 13 砕砂を用いたプレキャスト PC 床版の試験終了時における下面のひび割れ状況 (353.0 kN の輪荷重が載荷された走行回数 423 000 回の試験終了時)

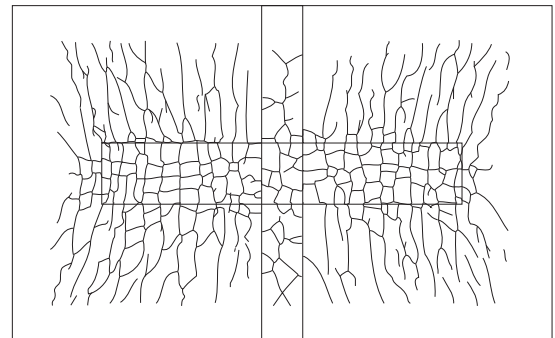


図 - 14 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版の試験終了時における下面のひび割れ状況 (392.2 kN の輪荷重が載荷された走行回数 554 450 回の試験終了時)

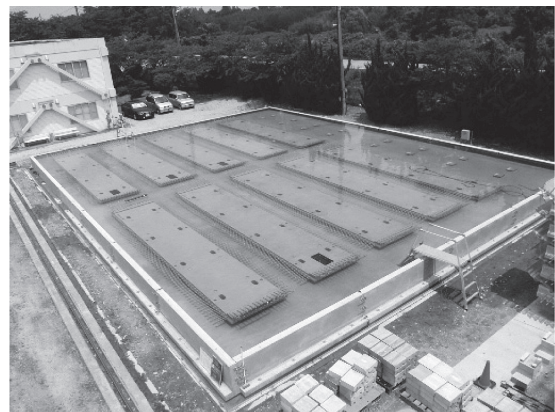


写真 - 8 プレキャスト PC 床版の水中養生の例

### 参考文献

- 1) 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, Vol.66, No.8, pp.588-593, 2017.8
- 2) 大谷悟司, 阿部博之, 中村雅之, 原健悟: 新しい RC 接合構造を用いたプレキャスト PC 床版の輪荷重走行試験, 第 16 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.191-194, 2007
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 道路橋用プレキャスト床版設計・製造便覧, 2004
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, pp.260-289, 2012

【2017 年 8 月 22 日受付】