

## 超高耐久プレストレストコンクリート部材の実験的研究

オリエンタル白石(株)正会員 工修 ○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  
 岡山大学 正会員 博(工学) 綾野 克紀  
 岡山大学 正会員 博(工学) 藤井 隆史

Abstract : Concrete and mortar using a blast furnace slag sand to fine aggregate is compared with that using a crushed sand, compressive strength and the static modulus of elasticity is comparable, high freeze-thaw resistance, and drying shrinkage strain and we was confirmed that the creep strain is also small. In addition, we examined the complex degradation due to freeze-thaw and cyclic loading of concrete member using the blast furnace slag fine aggregate. As a result, concrete using a blast-furnace slag fine aggregate, the deterioration due to cyclic loading is small, has revealed that the high resistance to composite degradation.

Key words: Blast furnace slag, freeze-thaw resistance, cyclic loading, composite degradation

### 1. はじめに

寒冷地における海岸付近や凍結防止剤を散布する地域では、塩害による劣化に加えて、凍結融解作用による劣化が促進されるため、コンクリート構造物の劣化が著しく進行している。特に橋梁のコンクリート床版は、交通量の多少に係わらず劣化し、土砂化した事例が多く生じており、その耐久性が問題となっている。

著しく劣化した床版では、補修や取り替えが行われており、取り替えでは、プレストレストコンクリート床版（以下、PC床版）が採用されている。このPC床版は、工場で作成されており、プレストレス導入強度を早期に得るために、蒸気養生を行っている。しかし、蒸気養生を行うと、凍結抵抗性が低下する場合がある<sup>1) 2)</sup>。このことから、一般的にPC床版は、耐久性が高いと言われているが、寒冷地や塩害環境下においては、蒸気養生を行ったPC床版は、想定よりも早期に劣化が進行する懸念がある。

一方、既往の研究<sup>1) 2)</sup>においては、高炉スラグ細骨材と高炉スラグ微粉末をコンクリートに配合することで、コンクリートの凍結融解抵抗性が向上することが判っている。この耐凍害性を持つ高炉スラグ細骨材をコンクリートの細骨材としたコンクリートの構造部材へ適用拡大するためには、凍害に加えて、疲労による劣化に対する劣化についても把握する必要がある。そこで、凍害および疲労（繰返し荷重載荷）の複合劣化において、細骨材に高炉スラグ細骨材および砂岩砕砂を用いたコンクリートの鉄筋コンクリート（以下、RC）梁およびPC梁を作成し、複合劣化を作用させた載荷試験を行い、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート部材の有効利用の可能性について実験的検討を行った。

### 2. RC梁およびPC梁における凍結融解および繰返し載荷による複合劣化試験

#### 2.1 試験体概要

梁試験体の概要を図-1に示す。梁試験体の寸法は、長さ1,350mm×幅125mm×高さ200mmで、RC構造とPC構造の梁とした。RC梁およびPC梁とも曲げ耐力を同等となるように、鋼材寸法や位置を調整した。コンクリートの配合を表-1に示す。結合材には早強ポルトランドセメント（密度3.13g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材には砂岩砕石（最大寸法20mm、表乾密度2.74g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.60%、粗粒率7.67）、細骨材には砂岩砕砂（CS、表乾密度2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.49%、粗粒率2.23）および高炉スラグ細骨材（BFS、表乾密度

2.72g/cm<sup>3</sup>, 吸水率1.12%,粗粒率3.06)を用いた。砂岩砕砂を用いたコンクリートの混和剤には, AE剤および高性能減水剤を使用し, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートには, 高性能減水剤, 増粘剤および消泡剤を用いた。コンクリートの水セメント比は, 35%とし, 単位水量は155kg/m<sup>3</sup>とした。試験に用いたコンクリートおよび鋼材の物性値を表-2に示す。

## 2.2 試験体の複合劣化試験

各試験体は, 前養生4時間, 昇温速度15°C/hr, 最高温度50°Cを5時間保持, 温度降下は自然冷却とした蒸気養生の後, 材齢7日までの気中養生を行った。静的載荷試験は, 各試験体の終局荷重まで載荷した後, 一度除荷し, 再び終局荷重まで載荷した1サイクルの荷重載荷を経験させた。載荷方法を図-2に, 写真-1に荷重載荷の状況を示す。

複合劣化試験は, 凍結融解試験30サイクルと疲労試験20万サイクルを交互に行い, この組合せを1サーキットとし, これを繰り返した。凍結融解試験は, JIS A 1148: 2010に規定される水中凍結融解方法 (A法) に準じた。なお, 溶液には質量パーセント濃度で10%NaCl水溶液を使用した。試験体に吸水シートを巻き付け, 湿潤状態で凍結させ, 20°Cの塩水中で融解を行った。所定の凍結融解サイクル終了後に行う疲労試験は, 最小荷重をRC梁のひび割れ発生荷重である15kNに, 最大荷重をRC梁の使用荷重の2倍である45kNとし, 周波数が5Hzのサイン波を載荷した。なお, PC梁については, 試験初期に最小荷重10kN, 最大荷重70kNで疲労載荷を2500サイクル行った。各試験体の疲労試験は同時に行えないため, 開始までに10%NaCl水溶液中に静置した。疲労試験の開始前および終了後には, ひび割れの進展状況を確認した。

表-1 試験梁に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE剤 (C×%)	高性能減水剤 (C×%)	増粘剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
			W	C	S		G				
					BFS	CS					
35.0	4.5	49.0	155	443	0	863	921	0.01	0.8	0.00	0.0
35.0	2.0	42.0	155	443	782	0	1,088	0.00	0.8	0.04	0.7

表-2 試験梁に用いたコンクリートおよび鋼材

No.	種類	コンクリート				主鋼材				設計曲げ耐力 (kN・m)	
		細骨材	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )		鋼材種類/ 配置本数	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )		
			18hr	7日	18hr	7日					
1	RC	CS	40.3	57.5	36.8	38.1	SD345	2-D13	402	200	15.640
2		BFS	42.7	54.8	36.2	40.0					
3	PC	CS	40.3	57.5	36.8	38.1	SBPR930/ 1080	φ11	1125	200	15.643
4		BFS	42.7	54.8	36.2	40.0					

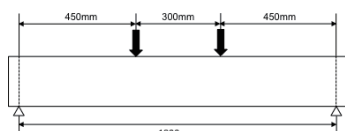


図-2 載荷方法



写真-1 載荷状況

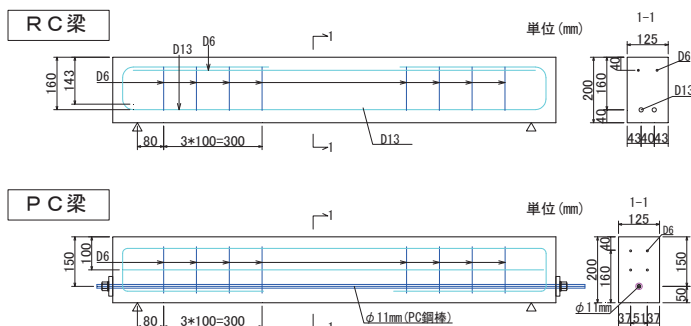


図-1 静的載荷および複合劣化試験の試験体寸法

試験体の部材としての耐久性を比較する上で、使用するコンクリートが凍結融解試験 (A法) では差がないことを確認しておく必要がある。そのため、使用するコンクリートの凍結融解抵抗性について、疲労載荷試験と平行して高炉スラグ細骨材をコンクリートの細骨材と、砂岩砕砂を細骨材としたコンクリートを比較した。凍結融解試験は、JIS A 1148: 2010に規定される水中凍結融解方法 (A法) に準拠して行った。なお、凍結水は梁試験体と同様に10%NaCl水溶液を使用した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 凍結融解抵抗性の試験結果

表-2に示すように使用したいずれのコンクリートも圧縮強度は、ほぼ同じである。また、耐凍害性についても図-3に示すように300サイクルまでに相対動弾性係数が60%を下回ってはなかった。砂岩砕砂を用いたコンクリートについては、AE剤を用いることで凍結融解抵抗性が発揮できている。一方、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いればAE剤を使用しなくても、十分な凍結融解抵抗性が発揮されることが分かる。

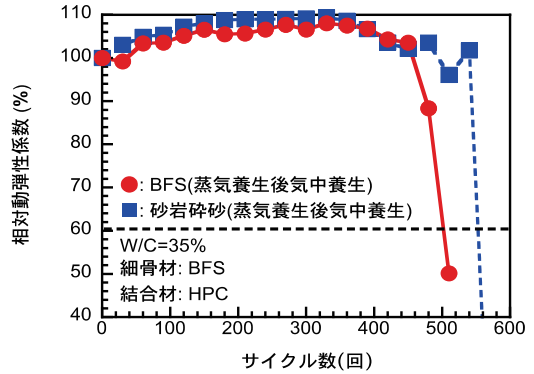


図-3 使用コンクリート供試体の凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

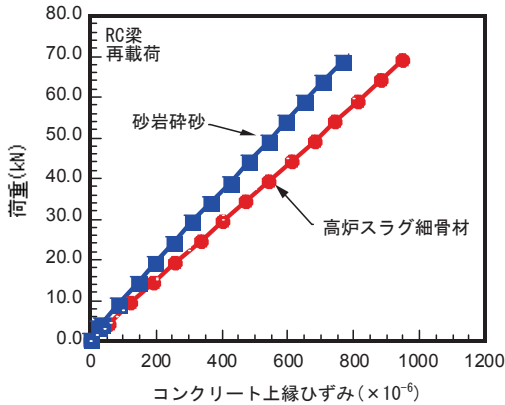


図-4 再載荷時の荷重-コンクリート上縁ひずみ (RC 梁)

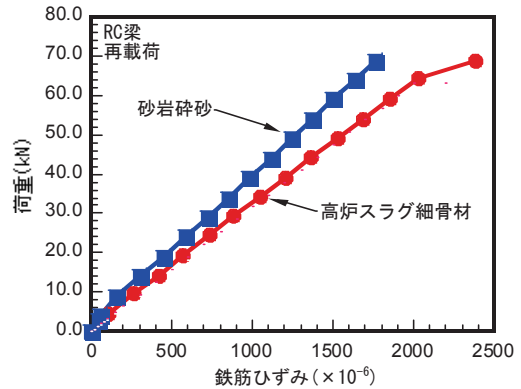


図-5 再載荷時の荷重-鉄筋ひずみ (RC 梁)

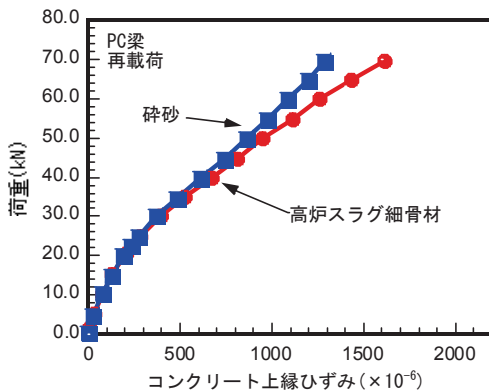


図-6 再載荷時の荷重-コンクリート上縁ひずみ (PC 梁)

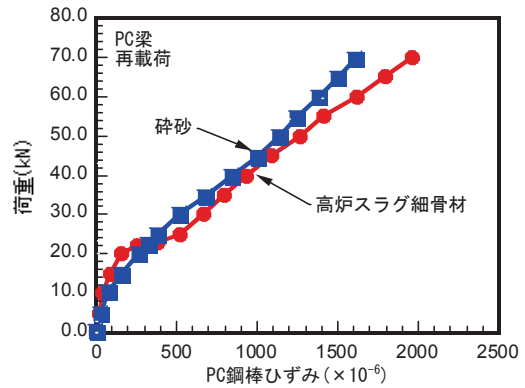


図-7 再載荷時の荷重-鉄筋ひずみ (PC 梁)

### 3.2 梁の複合劣化試験結果

図-4,5 は, RC 梁の再載荷した時の荷重-コンクリート上縁ひずみ図および荷重-鉄筋ひずみ図である。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた梁は, 砂岩砕砂を用いたものに比べ, 同一荷重においてコンクリート上縁のひずみが若干大きくなっている。図-6,7 は, PC 梁の再載荷した時の荷重-コンクリート上縁ひずみ線図および荷重-PC 鋼材ひずみ図である。細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた梁は, 砂岩砕砂を用いたものに比べ, 同一荷重においてコンクリート上縁のひずみが若干大きくなっている。これは, ひび割れの下縁からの高さが異なり, そのため中立軸の位置の違いが要因の一つと考えられる。RC 梁の方は, 差が大きい, PC 梁の方は, 砂岩砕砂と高炉スラグ細骨材の差は大きくない。表-3 は, 複合劣化試験の破壊・終了した結果である。図-8 は, 複合劣化試験がそれぞれ終了した状況のひび割れ図と終了時の状況写真を示す。複合劣化のひび割れ図および試験終了時の梁の状態から, No.1, No.2 の RC 梁は, ひび割れが分散し, その幅も小さい。一方, No.3, No.4 の PC 梁は, ひび割れが載荷点の直下に集中しており, そこから上縁に向かって進展していることが判る。

表-3 複合劣化試験の結果

No	種類	細骨材	凍結融解	疲労載荷	破壊状況・終了状況
			サイクル	(万回)	
1	RC	CS	240	160	鉄筋の破断で終了
2		BFS	600	400	2倍以上の複合劣化作用でも不変
3	PC	CS	360	240	上縁コンクリートの欠損で終了
4		BFS	600	400	2倍以上の複合劣化作用でも不変

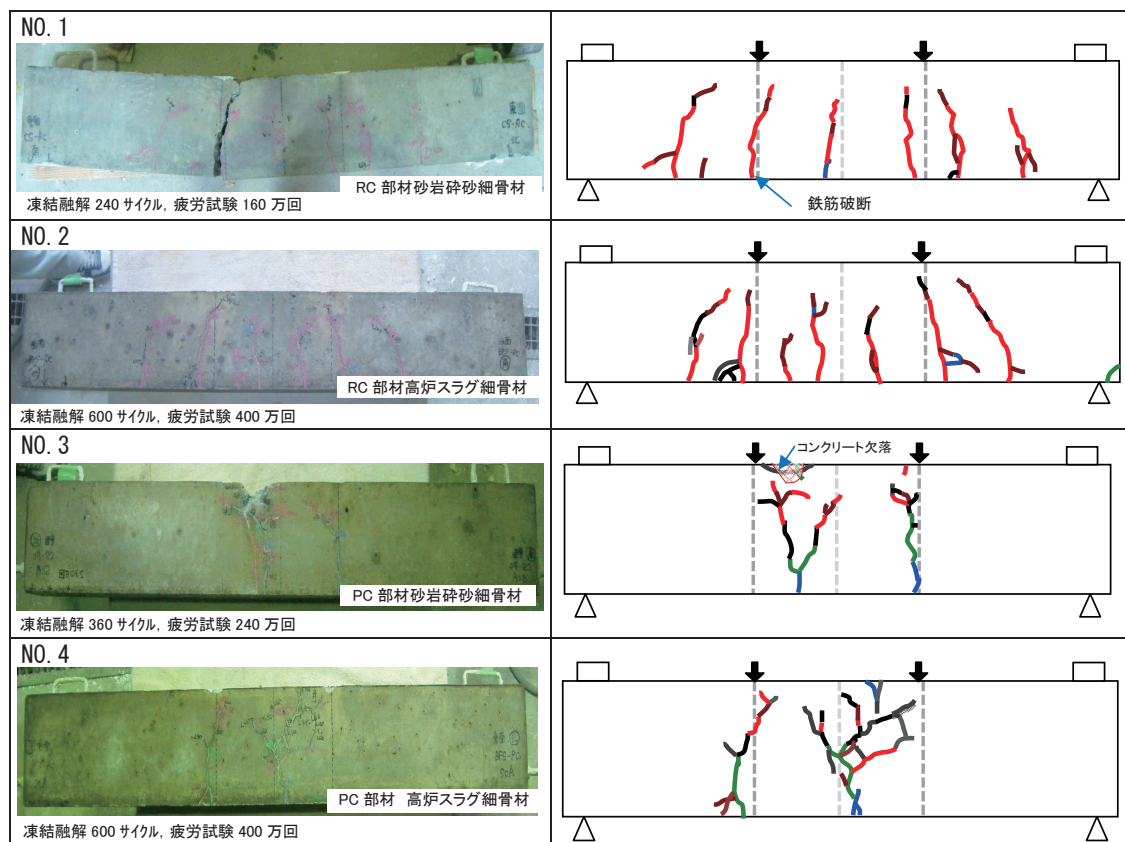


図-8 複合劣化試験の終了時の状況とひび割れ図

砂岩砕砂を用いたNo.1のRC梁は、主鉄筋が破断して試験を終了とした。ひび割れ図からは、その破断した位置のひび割れの傾向が明瞭ではないが、終了後に梁を切断したところ、ひび割れ部分の鉄筋の発錆が確認されたことから、腐食とひび割れ部に応力が集中したためと考えられる。No.3, No.4のPC梁は、砕砂、高炉スラグ細骨材とも疲労載荷200万回、凍結融解300サイクル以上の複合劣化作用を受けているが、No.3においては疲労載荷240万回、凍結融解360サイクルで上縁のコンクリートの欠落により試験を終了した。砕砂を使用したPC梁のひび割れ図においては、曲げひび割れ本数が増加することなく、載荷位置付近にひび割れが集中していき、疲労載荷回数が増加すると、載荷圧縮域を避けるように水平方向にひび割れが進展していった。

最小荷重および最大荷重時の上縁コンクリート、鉄筋およびPC鋼棒に生じる応力を表-4 および表-5 に、分布図を図-9 および図-10 に示す。RC梁においては、上縁コンクリート応力状態が細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた梁 No.2 は、砂岩砕砂を用いた梁 No.1 に比べ、大きい応力度を受けて、かつ、応力振幅も大きい状態で疲労載荷を行っている。また鉄筋の応力度、応力振幅も同様である。

PC梁においては、上縁コンクリート応力状態が細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた梁 No.4 は、砂岩砕砂を用いた梁 No.3 に比べ大きい応力度を受けてかつ、応力振幅も大きい状態で疲労載荷を行っている。PC鋼材応力度は、砂岩砕砂を用いた梁 No.3 の方が、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた梁 No.4 より大きい応力度、応力振幅で作用している。RC梁とPC梁の上縁コンクリート応力強度を比べるとPC梁の上縁コンクリートの応力度比の振幅は、RC梁よりも大きく、上縁コンクリートにおいてはPC梁の方が、RC梁よりも負担が大きい。引張側の鋼材である鉄筋、PC鋼棒の応力強度比の振幅は、鉄筋の応力振幅がPC鋼棒の応力度振幅よりも大きい。

表-4 疲労載荷時のRC梁のコンクリートおよび鋼材に作用する応力

RC梁		上縁コンクリート応力 (N/mm <sup>2</sup> )		鉄筋応力 (N/mm <sup>2</sup> )	
		45kN	15kN	45kN	15kN
砕砂	実験値	18.3 (32%)	5.4 (9%)	223 (65%)	60 (17%)
	計算値	22.9 (40%)	7.6 (13%)	279 (81%)	93 (27%)
高炉スラグ細骨材	実験値	24.5 (45%)	7.6 (14%)	267 (77%)	85 (25%)
	計算値	23.4 (41%)	7.6 (14%)	279 (81%)	93 (27%)

表-5 疲労載荷時のPC梁のコンクリートおよび鋼材に作用する応力

PC梁		上縁コンクリート応力 (N/mm <sup>2</sup> )		PC鋼棒応力 (N/mm <sup>2</sup> )	
		45kN	15kN	45kN	15kN
砕砂	実験値	28.3 (49%)	5.2 (9%)	800 (86%)	630 (68%)
	計算値	31.4 (62%)	5.0 (11%)	770 (83%)	600 (65%)
高炉スラグ細骨材	実験値	32.5 (59%)	5.3 (10%)	756 (81%)	616 (66%)
	計算値	34.0 (55%)	6.2 (9%)	770 (83%)	600 (65%)

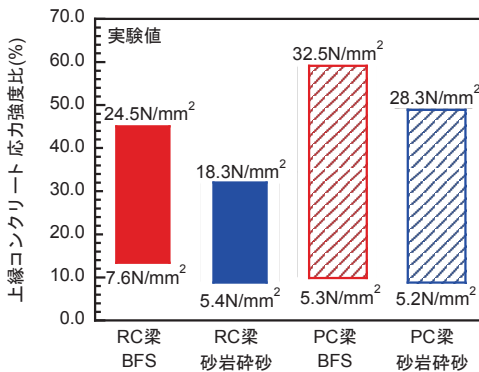


図-9 疲労載荷時のコンクリート応力度比の比較

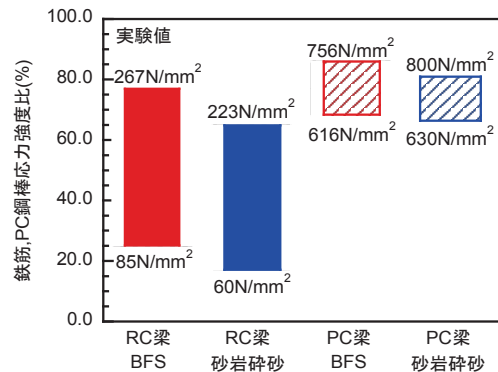


図-10 疲労載荷時の鋼材応力度比の比較

ひび割れ状態や疲労载荷作用時の応力状態から、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、砂岩砕砂を用いたものより、複合劣化に対して優位性が見られる。また、PC梁は、複合劣化作用に対してRC梁に比べて優位性が見られる。これは、RCとPCとの構造の違いにより、引張鋼材とコンクリートとの負担率も違っており、破壊形態も異なることが考えられる。砂岩砕砂を用いたPC梁は、上縁のコンクリートが徐々に剥落したことで中立軸が下がり、上縁のコンクリート応力度とPC鋼棒応力度が大きくなり、複合劣化により、損傷が進行したと考えられる。高炉スラグ細骨材のPC梁は、コンクリート応力度状態が高い状態においても、優れた劣化抵抗性が見られる。

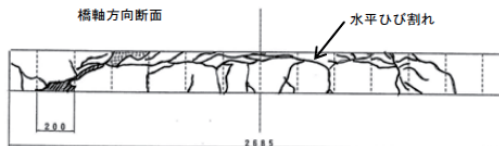


図-11 床版に入った橋軸方向断面のひび割れ例<sup>3)</sup>

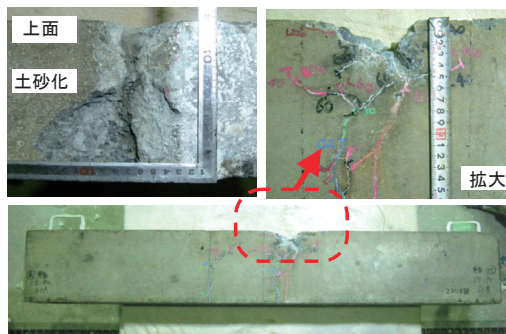


写真-2 PC梁の上縁部の破壊状況

図-11は、近年損傷が見られるRC床版のひび割れ図の一例<sup>3)</sup>である。この状態で更に水が

関与すると表面の擦りみがき現象により、床版上面のコンクリートは、急激に土砂化していきと考えられている。写真-2は、今回の砂岩砕砂を用いたPC梁の梁上縁部の損傷状態を示す。梁の上端部が疲労と凍結融解の繰返しを受けて、水の影響をさほど受けなくてもコンクリート表面が土砂化している。一方、高炉スラグ細骨材を用いたPC梁は、健全性を保っている。このことから、コンクリート強度、耐凍害性はほぼ同じであるが、梁の载荷試験では、高炉スラグ細骨材を使用することで、非常に耐久性が向上している。今後、水の影響を受けた場合については検証が必要と考える。

#### 4. まとめ

本研究において、以下が確認ができた。

- (1) non-AEコンクリートにおいて、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、凍結融解抵抗性が低下することなく、耐久性が高いことが分かった。
- (2) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート構造物のRC梁およびPC梁の凍結融解および繰返し载荷による複合劣化について検討した結果、高炉スラグ細骨材を用いることで、凍結融解および繰返し载荷による複合劣化を抑制することが分かった。
- (3) コンクリートが高い応力度でかつ大きな応力度振幅を受けた状態においても、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、高い耐久性を有することが分かった。

#### 参考文献

- 1)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,pp.1-6,2013.11
- 2)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抵抗性に関する研究,土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造),Vol.70,No.4,pp.417-427,2014.12
- 3)横山広ほか：床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.32,No.2,pp.451-455,2010