

鉄鋼スラグ水和固化体を用いたRCはりの耐荷性能に関する研究

岡山大学大学院 学生会員 ○尾関 唯
 岡山大学 非会員 井上 元
 岡山大学大学院 正会員 藤井 隆史
 岡山大学大学院 正会員 綾野 克紀

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体は、セメントや骨材の代替として製鉄所で発生する副産物を用いて製造される建設材料である。結合材には高炉スラグ微粉末を用い、骨材には製鋼スラグ粗骨材および製鋼スラグ細骨材を用いるため、産業廃棄物の有効利用を促し、天然資源の節約や二酸化炭素の排出抑制に大きく貢献する環境負荷低減材料として期待されている。鉄鋼スラグ水和固化体は無筋の海洋構造物として多くの使用実績がある。本研究では、鉄鋼スラグ水和固化体をRCはりへの適用を想定した場合の検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

表1に本研究で用いたコンクリートの配合の一部を示す。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度: 3.15g/cm³）、高炉スラグ微粉末（密度: 2.89g/cm³）およびフライアッシュ（密度: 2.20g/cm³）を用いた。細骨材には、製鋼スラグ細骨材（密度: 3.26g/cm³, 吸水率: 6.74%）、高炉スラグ細骨材（密度: 2.77g/cm³, 吸水率: 0.72%）および川砂（密度: 2.61g/cm³, 吸水率: 1.98%）を用いた。粗骨材には、製鋼スラグ粗骨材（密度: 3.07g/cm³, 吸水率: 5.02%）、砕石（密度: 2.74g/cm³, 吸水率: 0.54%）を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤および消泡剤を用いた。実験には、水結合材比が30%および60%のものも用いた。

2.2 試験方法

RCはりの試験体の形状および配筋図を図1に示す。梁長1,800mm、梁幅150mm、有効高さ163mm、支間長1,300mm

である。引張鉄筋には6D10-SD295, 3D13-SD295 および2D16-SD295の3種類を用い、せん断補強筋にはD6を用いた。また、鉄筋かぶりは10mm, 20mm および30mmとした。RCはりは、2日間型枠内で養生し、脱型後、材齢14日まで散水養生を行った。RCはりのたわみは、載荷点での変位を測定した。乾燥収縮ひずみ試験には、100×100×400mmの角柱供試体を用い、ダイヤルゲージ法により変位の測定を行った。促進中性化試験は、温度30℃、湿度60%、炭酸ガス濃度20%の条件で行った。

3. 試験結果および考察

図2は、結合材の全てに高炉スラグ微粉末を用い、骨材に製鋼スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの水中養生を行った円柱供試体の圧縮強度と弾性係数の関係を示したものである。実線は土木学会コンクリート標準示方書に示されている圧縮強度と弾性係数の関係である。水中養生においては、弾性係数が材齢の経過に伴い、

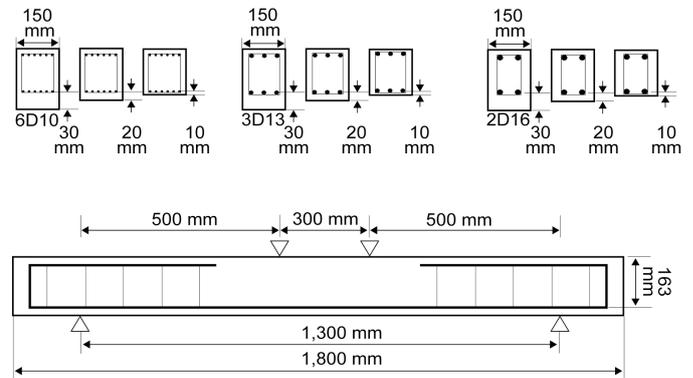


図1 試験体形状・配筋詳細図

表1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	C/B (%)	FA/B (%)	空気量 (%)	単用量 (kg/m ³)								混和剤		
					W	結合材			細骨材			粗骨材		HRWRA (kg/m ³)	DF (g/m ³)
						BF	FA	C	PTCS	BFS	RS	PTCG	CS		
鉄鋼スラグ水和固化体	45	0	0	2.0	175	389	0	0	1,093	0	0	1,029	0	2.33	0.00
フライアッシュを用いた鉄鋼スラグ水和固化体		40	30			117	117	156	0	917	0	1,017	0	3.11	0.04
普通コンクリート		100	0			0	0	389	0	889	0	936	1.56	0.00	

BF: 高炉スラグ微粉末 FA: フライアッシュ PTCS: 製鋼スラグ細骨材 BFS: 高炉スラグ細骨材 RS: 川砂 PTCG: 製鋼スラグ粗骨材 CS: 砕石

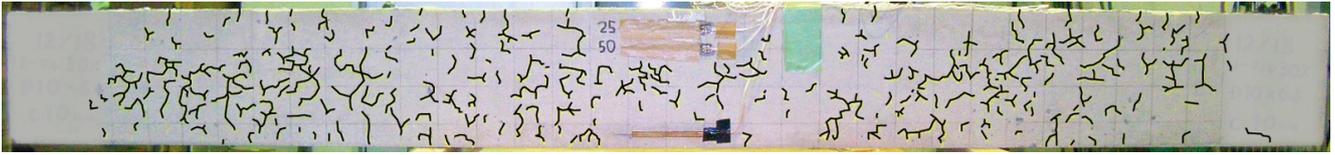


写真 1 鉄鋼スラグ水和固化体を用いたRCはりの表面に発生したひび割れ

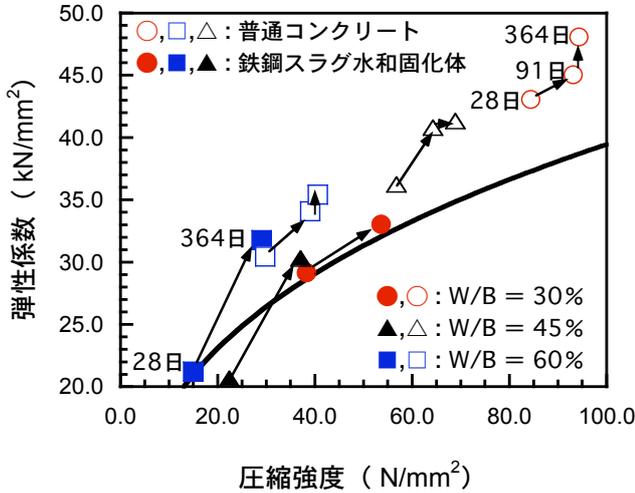


図 2 圧縮強度と弾性係数の関係 (水中養生)

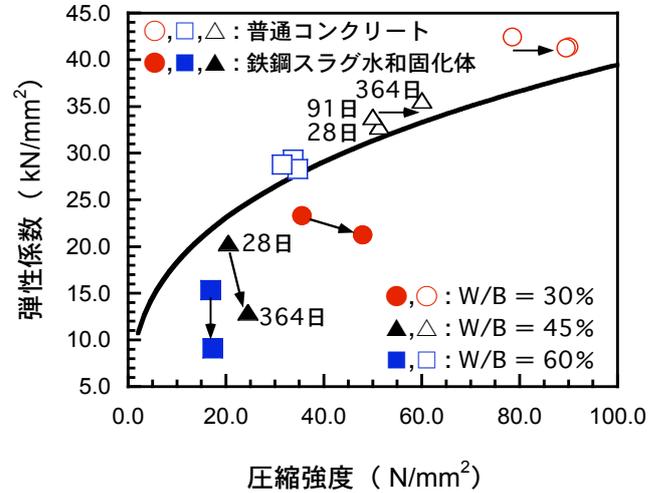


図 3 圧縮強度と弾性係数の関係 (14日以降気中養生)

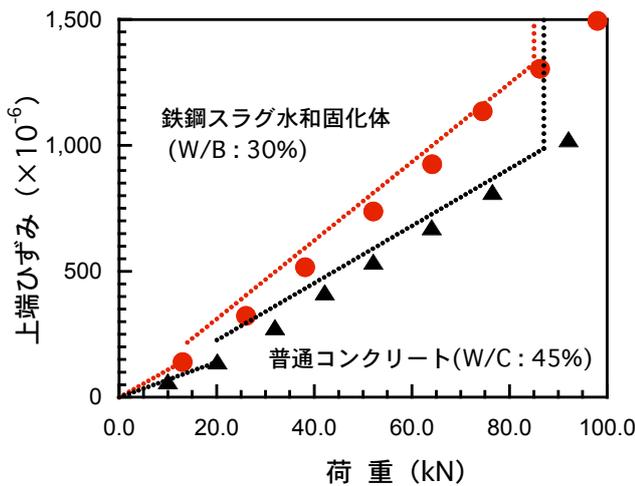


図 4 RCはりの上端における弾性ひずみの測定結果

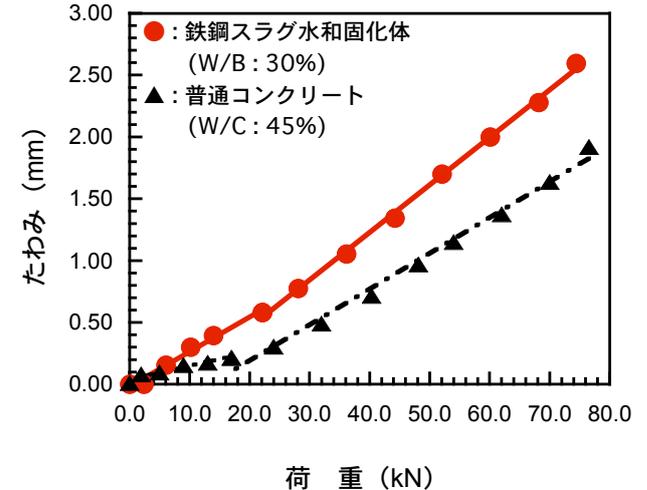


図 5 RCはりのたわみの測定結果

圧縮強度とともに大きくなるのが分かる。一方、図 3 は、脱型後 14 日間散水を行った後に気中養生を行った鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係を示したものである。鉄鋼スラグ水和固化体の弾性係数は、材齢の経過に伴い、大きく低下している。写真 1 は、脱型後 14 日間散水を行った後に気中養生を行った鉄鋼スラグ水和固化体を用いたRCはりの表面に生じたひび割れを示したものである。鉄筋径を 3 種類、かぶりを 3 種類、水結合材比を 3 種類の計 27 種類を実験要因とした全ての鉄鋼スラグ水和固化体を用いたRCはりにおいて、ひび割れが発

生じた。

図 4 は、RCはりの上端におけるコンクリートの弾性ひずみの測定結果を示したものである。この図には、材齢 364 日目における圧縮強度が 40N/mm²~50N/mm² となる鉄鋼スラグ水和固化体および普通コンクリートの結果を示している。破線は円柱供試体の弾性係数を用いて求められた計算結果である。鉄鋼スラグ水和固化体のRCはり上端における弾性ひずみも、計算値が実験値とほぼ一致しており、円柱供試体によって求められた弾性係数の値は妥当であることが分かる。図 5 は、図 4 に示したRCはりのたわみの測定結果を

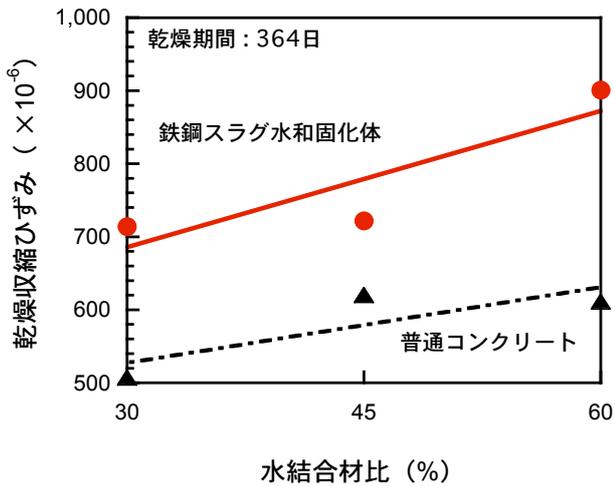


図 6 種々のコンクリートの乾燥収縮ひずみ

示したものである。弾性係数の大きさに順じて、たわみの大きさが小さくなっており、結合材の全てに高炉スラグ微粉末を用い、骨材に製鋼スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体の円柱供試体で求めた極端に小さい弾性係数が、妥当なものであることが、この図からも明らかである。

図 6 に、種々のコンクリートの乾燥期間 364 日における乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。鉄鋼スラグ水和固化体は、普通コンクリートに比べ大きいですが、その差は 200×10^6 程度とわずかである。一方、図 7 に示される促進中性化試験の結果からも、鉄鋼スラグ水和固化体と普通コンクリートの中性化の進行は、ほぼ同じであり、収縮の原因となる乾燥収縮ひずみと中性化は、普通コンクリートと大きな差がないことがいえる。従って、結合材の全てに高炉スラグ微粉末を用い、骨材に製鋼スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体に発生するひび割れおよび弾性係数の顕著な低下は、鉄鋼スラグ水和固化体の内部で製鋼スラグ骨材周辺に有害な膨張が生じているためと考えられる。

図 8 は、製鋼スラグ骨材周辺の膨張を抑制することを目的に、結合材の一部にポゾラン材料のフライアッシュを用い、また製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えた鉄鋼スラグ水和固化体の円柱供試体の圧縮強度と弾性係数の関係を示したものである。なお、この図に用いたコンクリートは、脱型後 14 日間散水を行った後気中養生を行った。この図より、水結合材比が 30% および 45% の場合には、材齢の経過による弾性係数の低下が抑制されていることが分かる。また、27 種類の RC はりにおいても表面にひび割れが全く観察されず、いずれの水結合材比であっても、結合材の一部にフライアッシュを用い、また製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えることにより、ひび割れが抑制

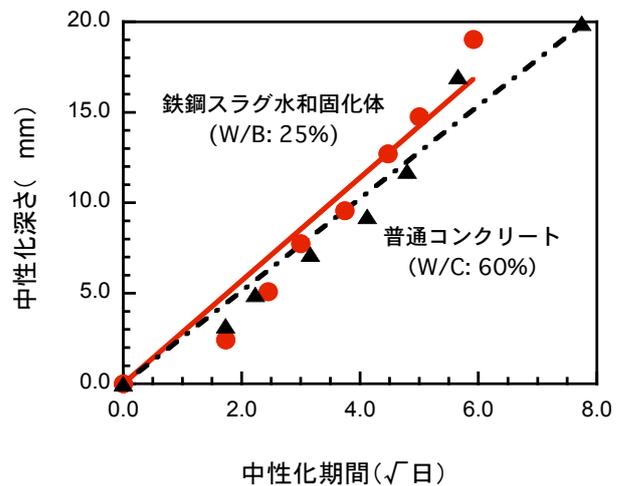


図 7 中性化の比較

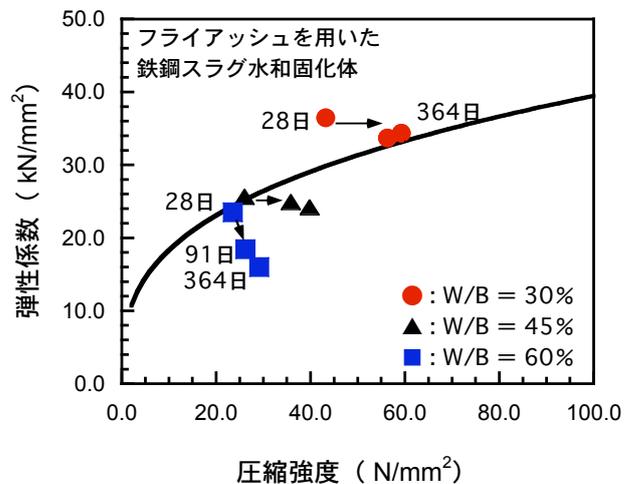


図 8 圧縮強度と弾性係数の関係 (14 日以降気中養生)

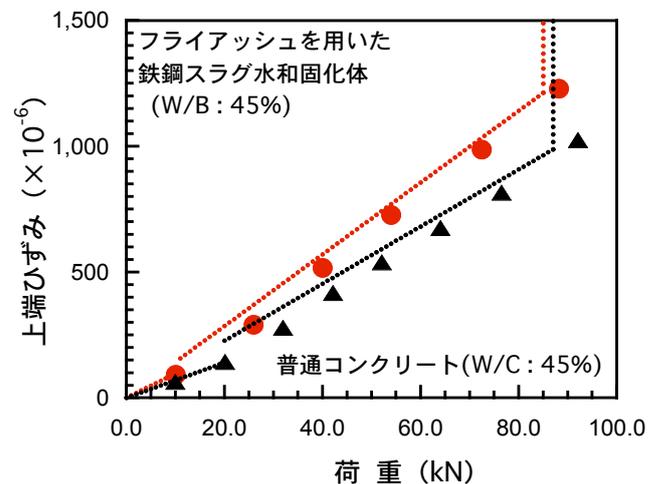


図 9 RC はりの上端における弾性ひずみの測定結果

されることが考えられる。

図 9 は、結合材の一部にフライアッシュを用い、また製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えた鉄鋼スラグ水和固化体の RC はりの上端におけるコンクリートの弾性ひずみの測定結果を示したものである。この図には、材

齢 364 日目における圧縮強度が $40\text{N/mm}^2 \sim 50\text{N/mm}^2$ となるコンクリートの結果を示している。破線は円柱供試体の弾性係数を用いて求められた計算結果である。鉄鋼スラグ水和固化体の RC はり上端における弾性ひずみも、計算値が実験値とほぼ一致しており、円柱供試体によって求められた弾性係数の値は妥当であることが分かる。図 10 は、図 9 に示した RC はりのたわみの測定結果を示したものである。結合材の一部にフライアッシュを用い、また製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えた鉄鋼スラグ水和固化体を用いた RC はりのたわみは、同程度の強度の普通コンクリートのたわみとほぼ同じである。

図 12 に、脱型後 14 日間散水を行った後、気中養生を行った円柱供試体の材齢 364 日目における中性化深さの測定結果を示す。結合材の一部にフライアッシュを用い、また製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えることで、中性化が小さくなっていることが分かる。

図 13 に、種々のコンクリートを用いた RC はりに生じた曲げひび割れを示す。なお、この図に用いた RC はりの引張鉄筋は、6D10-SD295 を用い、鉄筋かぶり厚は 30mm である。図中の実線、点線および破線はそれぞれ設計曲げ耐力の 3 分の 1、3 分の 2 および 3 分の 3 における荷重を載荷した際に生じた曲げひび割れを示している。この図からも、結合材の一部にフライアッシュを用いた鉄鋼スラグ水和固化体を用いた RC はりの曲げひび割れは、普通コンクリートを用いたものに比べ、曲げひび割れの発生本数が少なく、ひび割れの進行する長さも短いことが分かり、曲げひび割れの発生が抑制されることが分かる。

従って、結合材の一部にフライアッシュを用い、製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置き換えることで、RC はりの表面に発生するひび割れを抑制し、鉄鋼スラグ水和固化体の弾性係数の低下を抑えられる。

4. まとめ

結合材の全てに高炉スラグ微粉末を用い、また骨材に製鋼スラグ粗骨材および製鋼スラグ細骨材を用いた鉄鋼スラグ水和固化体は、気中養生を行った場合、時間の経過に伴い弾性係数が低下する。しかし、結合材の一部にフライアッシュを用い、製鋼スラグ細骨材を全て高炉スラグ細骨材に置きかえることで、鉄鋼スラグ水和固化体の弾性係数の低下および RC はりの表面のひび割れの発生が抑制される。また、たわみの大きさは普通コンクリートと同程度となり、設計曲げ耐力載荷時における曲げひび割れの発生量や進行長さを抑え、RC はりの耐荷性能を改善できることが明らかになった。

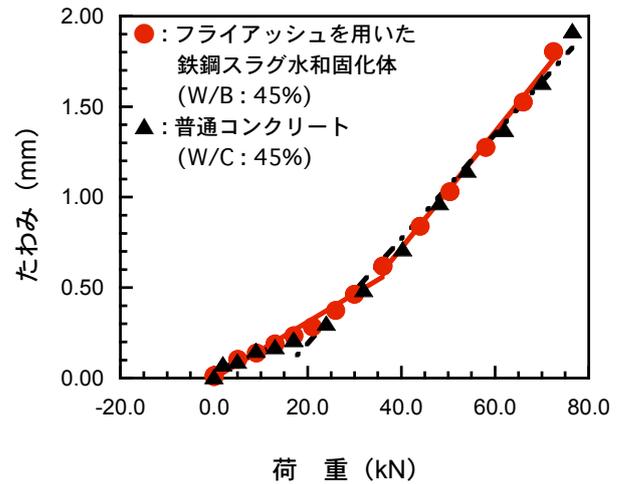


図 10 RC はりのたわみの測定結果

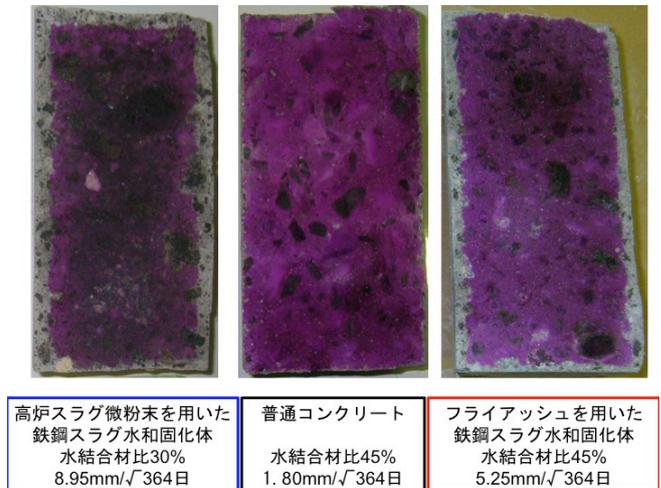


図 11 中性化の比較

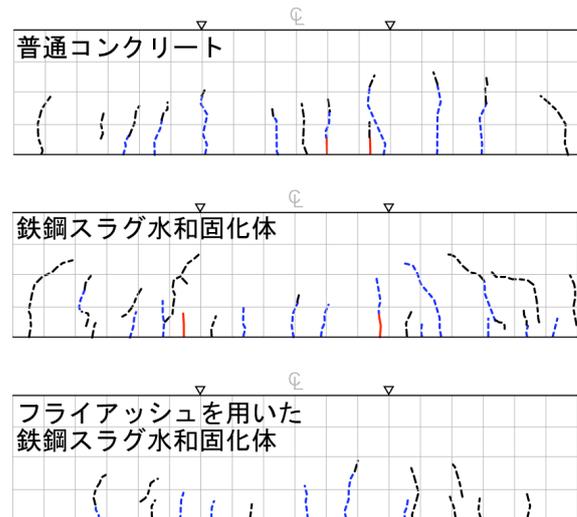


図 12 RC はりに生じた曲げひび割れ

【参考文献】

- 1) 藤井隆史, 藤木昭宏, 綾野克紀, 阪田憲次: 鉄鋼スラグ水和固化体の凍結融解抵抗性とその改善に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.262-273 (2007)