論文 鉄鋼スラグ骨材のコンクリート構造部材への適用性に 関する基礎実験

五嶋 邦宏*1·長友 克寬*2·松山 哲也*3·下村 誠一*4

要旨:本研究は,普通骨材を徐冷鉄鋼スラグ粗骨材と急冷鉄鋼スラグ細骨材とで置換したコ ンクリートの力学的性質について実験的に検討したものである。スラグ骨材の質量置換率を 粗・細骨材ともに0,30,60%とし,これらを組合わせた4種類の配合を対象とした。検討 事項は,コンクリート自体の圧縮強度・割裂引張強度・弾性係数・ポアソン比,鉄筋コンク リートはりに使用した場合の曲げ耐力・せん断耐力・たわみ・ひび割れ分散性である。実験 結果より,鉄鋼スラグは構造部材用の骨材として十分使用可能であること等を明らかにした。 キーワード:鉄鋼スラグ,粗骨材,細骨材,リサイクル,鉄筋コンクリート

1. はじめに

産業副産物の再資源化および良質骨材の枯渇 の両面から鉄鋼スラグが有効利用されているこ とは周知の事実である。しかし,その用途は路 盤材や無筋コンクリート用骨材等が主流であ り,しかも粗骨材と細骨材の両方を積極的に利 用した例は限定されている^{1),2)}。今後,廃棄物溶 融スラグ等,他の再資源骨材との競合を考える と,非構造材のみならず構造コンクリート用骨 材としての積極的使用が望まれる。

本研究は,普通砕石および砕砂をそれぞれ質 量比で最大60%まで徐冷鉄鋼スラグ粗骨材および 急冷鉄鋼スラグ細骨材で置換したコンクリート を対象とし,その力学実験を通して構造コンク リートへの適用性を検討したものである。

実験では、まず、骨材置換率を種々に変化さ せたコンクリートを用いた円柱供試体を作製 し、その圧縮強度、弾性係数等の基本的力学特 性を調べた。次に、同様に骨材置換率を種々に 変化させたコンクリートを用いて、曲げ破壊お よびせん断破壊を想定した2種類のはり試験体 を作製した。そしてその対称2点載荷試験を行 い,得られた実験結果と土木学会コンクリート 標準示方書³⁾の規定式に基づく計算値との比較を 通して,鉄鋼スラグを用いた構造部材の力学的 特性について評価した。

2. 鉄鋼スラグ使用コンクリートの 力学特性

2.1 実験計画

表-1 に今回使用した粗骨材および細骨材の スラグによる質量置換率の組合せを示す。実験 では、表中に○で示した4種類の組合せを対象 とした。なお、以下では、これらの組合せを表 中の()内に示した記号を用いて表記する。

表-1 スラグによる骨材質量置換率の組合せ

		細骨材置換率(%)()内は表示記号					
		0	30	60			
粗骨	0	⊖ (G00−S00)					
材置換率(%)	30		(G30-S30)	(G30-S60)			
	60			(G60-S60)			

^{*1} 高松工業高等専門学校専攻科学生 建設工学専攻(正会員)

- *2 高松工業高等専門学校教授 建設環境工学科 博士(工学)(正会員)
- *3 日本興業株式会社 開発部(正会員)
- *4 日本興業株式会社 開発部

2.2 使用骨材

表-2 に使用骨材の物理的性質を示す。全骨材とも密度は2.5 以上であるが、砕砂と徐冷スラグの吸水率がやや大きい。砕砂は若干低品質の骨材であり、本研究ではこれを使用したコンクリートの品質をスラグとの併用により改善できるか否かを検討することも目的の一つとした。

図-1,2 に粗骨材および細骨材の合成粒度曲線をそれぞれ示す。両図中には、土木学会標準示方書⁴に規定された標準粒度範囲を点線で示しているが、今回用いた全ての骨材置換率の合成粒度曲線がこの範囲内に収まっている。

2.3 配合設計

表-3 に今回の実験で用いた示方配合の一例 を示す。まず、土木用コンクリート2次製品へ の使用を念頭におき、水セメント比W/C=42%、 目標スランプ10±2.5 cm、目標空気量1.5±1% となる配合を試験練りによって求め、これを基 本となる配合とした。試験練りでは、セメント に対する高性能減水剤の使用割合を固定し、単 位水量Wのみを変化させた。同一スランプに対す る表中のWの増減からも分かるように、細骨材を 30%程度スラグで置換することにより若干の流動 性の改善が見られ、一方粗骨材のスラグ置換率 の増加に伴って流動性は逆に若干低下した。

基本となる配合の決定後,W/Cを約±5%増減 させた配合を試験練りによって求めた。

最終的に,上記の3種類のW/Cについて直径 10cmの標準円柱供試体を作製し,水中標準養生 後,材齢28日において強度試験を実施した。

2.4 圧縮強度fc'-セメント水比C/W関係

図-3 に圧縮強度fc'とセメント水比C/Wとの 関係を、4種類の骨材置換率の組合せについて

表-2 使用骨材の物理的性質

	骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (%)
細品	砕砂 S	2.53	3.8	2.69
「fi 材	急冷スラグ Ss	2.79	1.1	2.26
粗骨材	砕石 Gc (20-15)	2.61	3.3	7.00
	砕石Gf (15-5)	2.61	3.3	6.03
	徐冷スラグ Gs	2.61	4.5	6.83



呼び寸法 (mm) 図-2 使用細骨材の合成粒度曲線

					-								
		目標 スランプ (cm)	W/C (%)	目標 空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)							
配合記号	粗骨材の 最大寸法 (mm)							細骨	骨材	粗	骨材 (m	m)	高性能
						水	ゼメノ	77.74	急冷	砕石	砕石	徐冷	減水剤
						w		「Pff179」	スラグ	Gc	Gf	スラグ	Ad
								5	Ss	20-15	15-5	Gs	(cm ³ /m ³)
G00-S00					47	150	357	821	0	622	414	0	2232
G30-S30	20	10	12	15	46	145	345	586	251	449	300	321	2158
G30-S60	20		42	42 1.5	46	155	369	337	505	439	292	313	2307
G60-S60					46	155	369	337	505	251	167	627	2307

表-3 示方配合の一例



それぞれ示す。図中には回帰直線および回帰式 も併せて表示している。C/Wが小さい領域にお いては、スラグ無置換のG00-S00が他の3つの 組合せよりもfc'は大きい。全ての組合せにおい て、C/Wの増加に伴ってfc'はほぼ直線的に増加 するが、その増加率はG00-S00が最も小さく、 スラグ置換を行った方が大きい。G30-S30と G30-S60との比較より、細骨材をスラグ置換す ることは強度的に有利であるが、G30-S60と G60-S60との比較より、粗骨材を過剰にスラグ 置換すると強度の増加率は低下する。

同図中のRは回帰式の相関係数を表している が、上述したように、砕砂が若干低品質である ため、スラグ無置換のG00-S00のRが最も小さ く、fc'のばらつきは一番大きい。これをスラグ で置換した他の3つの組合わせはRがほぼ1に近 くなっており、fc'とC/Wの直線性が高まりかつ fc'のばらつきの改善がなされている。

上述した強度発現性状と、粗骨材のスラグ置 換率が大きいほどフレッシュコンクリートの フィニッシャビリティーおよびプラスティシ ティーは若干低下したことを考えあわせると、 骨材置換率としてはG30-S30およびG30-S60の 組合せが適当であると考えられる。

2.5 圧縮強度fc'と他の力学特性値の関係

図-4 に割裂引張強度ftとfc'との関係を示す。 骨材置換率の組合せの如何に関わらず,fc'の増 加に伴ってftも増大するが,fc'≒40MPaを超え るとその傾向は頭打ちとなる。

図-5 に1/3 fc'時における割線弾性係数Ecと



fc'との関係を示す。骨材置換率の組合せの如何に 関わらず,fc'の増加に伴ってEcも増大し,同じ fc'であれば骨材置換率の大きい配合ほどEcも大 きい。一般にEcはfc'の1/3乗に比例するといわれ ており⁵⁾,図中に示した各置換率の組合せに対す る回帰式はほぼそれに対応している。

図-6 に1/3 fc'時におけるポアソン比vとfc' との関係を示す。同じfc'であれば置換率の大きい 場合の方がvは大きい。また,骨材無置換の





G00-S00および置換率の小さいG30-S30ではfc' の増加に伴ってνも増大するが、置換率の大き い他の2つの配合ではfc'の如何に関わらず ν ≒ 0.21の大きな値をとる。

3. 曲げ破壊を想定した鉄鋼スラグ使用 コンクリートはりの力学特性

3.1 曲げ試験体

状・寸法を示す。試験体は幅100mm, 高さ 200mm, スパン長1800mmの対称2点荷重を 受ける単純ばりである。断面内には材質SD295A の主鉄筋D16を2本配置した。中央にはひび割 れ分散性を調べるため、600mmの曲げモーメン トー定区間を設けた。計測事項は、(1)荷重P, (2)曲げモーメント一定区間の両端および中央に おけるたわみδ,(3)曲げモーメント一定区間に おけるひび割れ幅, (4)はり中央断面位置での主 鉄筋歪み ε sおよびコンクリート圧縮縁歪み ε cで ある。試験体は、養生室内の通路にて気中養生 し、材齢28日において実験に供した。

表-4,5に使用したコンクリートおよび鉄筋 の力学的性質を示す。コンクリート強度fc'は, 載荷装置の能力の制限から30MPaを目標とし、

図-3 中に示した回帰式よりC/Wを求め,配合 計算に用いた。G00-S00のfc'が特に低く出てい るが、これは低品質砕砂の使用に伴って評価誤 差が大きいにも関わらず同回帰式をそのまま適

表-4 はり試験用コンクリートの力学的性質

配合記号	圧縮強度 fc' (MPa)	弾性係数 Ec (GPa)
G00-S00	17.5	14.2
G30-S30	30.7	20.4
G30-S60	26.9	21.3
G60-S60	27.0	22.2

表-5 はり試験用鉄筋の力学的性質

	降伏応力度 fy (MPa)	引張強度 fu (MPa)	弾性係数 Es (GPa)
主鉄筋D16	353	517	193
主鉄筋D22	370	556	194
スターラップD6	348	519	205



用したこと、および試験体を気中養生したこと が主原因である。同図から分かるようにC/W≒ 2.1でfc'≒35 MPaの強度発現は可能である。

以下では, 種々の力学的特性に関する実験値 と土木学会コンクリート標準示方書3の規定式に 基づく計算値との比較により,鉄鋼スラグの構 造コンクリート用骨材としての適用性を検討す る。その際,計算値を安全側に評価するため, 規定式に含まれる部分安全係数は全て1.0として 計算する。

3.2 全体举動

写真-1 に破壊状況の一例を示す。まず、曲 げモーメントー定区間において曲げひび割れが ほぼ等間隔で発生し,次第にその本数が増加し た。主鉄筋の降伏後、この曲げひび割れは大き く成長し、最終的にコンクリート圧縮域の破壊 によって耐力に至った。

図-8 に荷重P-中央たわみδ関係を示す。何

れの置換率の組合せにおいても,主鉄筋降伏後 大きな変形を示して耐力に至る典型的な曲げ引 張破壊を生じた。G00-S00の初期変形剛性が低 く出ているのは,コンクリートの弾性係数が小 さいためであり,スラグによる骨材置換が挙動 全体に与える影響は小さいものと考えられる。

3.3 使用時挙動の評価

図-9 に P=25kN(終局荷重Puの約1/3)時 における中央たわみ∂の実験値と計算値との比 較を示す。図中の数字は計算値に対する実験値 の比を示しているが,各骨材置換率の組合せと もに両者は良好な一致をみている。

図-10に主鉄筋の引張応力度σs=100MPa時における曲げモーメントー定区間でのひび割れ幅wの実験値と計算値との比較を示す。ここに、実験値は、6個のπ型ゲージの測定値をその標点間を横切る曲げひび割れ本数で割ることにより求め、その際コンクリートの伸びは無視した。また、σsは、はり中央断面の主鉄筋に貼付した歪ゲージの読みから計算した。図中の太実線は計算値を表しているが、全ての骨材置換率の組合せにおいて実験値との良好な一致をみている。幾つかのπゲージ区間において実験値が計算値を上回っているのは、実験値に対するσsをひび割れ面ではなくコンクリート内部での歪みをもとに評価しているため、実際のひび割れ面でのσsはもっと大きいことが一因である。

3.4 終局時挙動の評価

図-11 に曲げ耐力Muの実験値と計算値との 比較を示す。図中の数字は計算値に対する実験 値の比を示しているが,各骨材置換率の組合せ ともに両者は良好な一致をみている。

4. せん断破壊を想定した鉄鋼スラグ使用 コンクリートはりの力学特性

4.1 せん断試験体

図-12 にせん断破壊を想定したはり試験体の 形状・寸法を示す。試験体は幅100mm,高さ 300mm,スパン長1400mmの対称2点荷重を 受ける単純ばりである。断面内には材質SD295A



の主鉄筋D22を2本配置した。使用材料の性質 は表-4,5に示す。計測事項は、曲げスパンに 代えてせん断スパンにおけるひび割れ幅を測定 した以外は全て曲げ試験体と同一である。

4.2 全体挙動

写真-2に破壊状況の一例を示す。まず,曲 げモーメントー定区間において曲げひび割れが 発生し,次いでせん断スパンにも斜ひび割れが 生じ始めた。その後,この斜めひび割れが大き く成長し,最終的にその先端のコンクリート圧



図-12 せん断試験体の形状・寸法(単位mm)

縮域の破壊によって耐力に至った。

図-13 に荷重P-中央たわみる関係を示す。 何れの置換率の組合せにおいても,耐力到達後 の荷重低下率の比較的大きい,典型的なせん断 圧縮破壊の性状を示している。なお,同図にお いてもG00-S00の初期変形剛性が低く出ている が,これも曲げ試験体と同様にコンクリートの 弾性係数が小さいためであり,スラグによる骨 材置換が挙動全体に与える影響は小さいものと 考えられる。

4.3 終局時挙動の評価

図-14 にせん断耐力Vuの実験値と計算値と の比較を示す。図中の数字は計算値に対する実 験値の比を示しているが,各骨材置換率の組合 せともに両者は良好な一致をみている。

5. 結論

- (1)低品質骨材を鉄鋼スラグ骨材で置換したコン クリートは、スランプ、空気量、セメント水 比が同一の場合、置換しないコンクリートよ りも高セメント水比での圧縮強度および強度 の変動を改善できる。
- (2) 鉄鋼スラグ骨材を用いたコンクリートは、その置換率が大きくなるほど同じ圧縮強度での弾性係数およびポアソン比が大きくなる。
- (3) 鉄鋼スラグ骨材は,構造コンクリートの使用 および終局の両限界状態に対して使用可能で あり,その力学的性能は土木学会コンクリー ト標準示方書の規定式を用いて評価できる。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会九州支部:コンク



写真-2 せん断試験体の破壊状況の一例



リートにおける産業廃棄物利用研究会報告 書, 2000.11

- 2)日本コンクリート工学協会中国四国支部:廃 棄資源のコンクリート材料への有効利用に関 するシンポジウム論文集,2001.11
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(設計 編),土木学会,1996
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書(施工 編),土木学会,2002
- 5) 岡村 甫:コンクリート構造の限界状態設計 法(第2版),共立出版株式会社,1984