論文　高炉スラグ骨材を使用したＲＣはりの屋外暴露後の力学特性

高橋　恵子[*1]・長友　克寛[*2]・松山　哲也[*3]・五嶋　邦宏[*4]

要旨：本研究は，低品質普通骨材を徐冷高炉スラグ粗骨材と急冷高炉スラグ細骨材とで置換したコンクリートの約１年間屋外暴露後の力学的性質について，実験的に検討したものである。普通骨材に対す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，これらを組合せた４種類の配合を対象とした。主な検討事項は，コンクリートの圧縮強度・弾性係数・ポアソン比・ひずみの経時変化，ＲＣ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，スラグ置換することで低品質骨材によるコンクリートの品質低下を改善できること等を明らかにした。

キーワード：高炉スラグ，粗骨材，細骨材，リサイクル，ＲＣはり

1．はじめに

良質な天然骨材の枯渇と環境保全によるその採取規制の強化から，低品質骨材を積極的に使用することを考えていく時期がきている。一方で，産業副産物である高炉スラグは，天然骨材に替わる新しい骨材資源として評価されている。しかし，その用途は道路用路盤材や無筋コンクリート構造物への適用が主流であり，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)]。

著者等[3)]は，既往の研究において，低品質細骨材を含む普通骨材のかなりの部分を徐冷高炉スラグ粗骨材および急冷高炉スラグ細骨材で置換することによりコンクリートの品質改善が図れること，それをＲＣはりに使用した場合の構造性能は土木学会コンクリート標準示方書[4)]の規定式で評価できること等を明らかにしている。

本研究は，この研究の一環として，上記と同じコンクリートを用いた円柱供試体およびＲＣはり試験体を作製し，その屋外暴露時における力学特性の変化と，暴露後における構造コンクリートとしての適用性を検討したものである。

2．高炉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高炉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－２に使用材料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大きい。砕砂は試験的使用において微細ひび割れが発生するなど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改善できるか否かを検討した。

図－１に圧縮強度f_c'とセメント水比C/Wとの関係を，４種類の骨材質量置換率の組合せについてそれぞれ示す。本研究では，材齢28日での

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
粗骨材置換率(%)	0	○ (G00-S00)		
	30		○ (G30-S30)	○ (G30-S60)
	60			○ (G60-S60)

*1　高松工業高等専門学校専攻科　建設工学専攻　（正会員）
*2　高松工業高等専門学校　建設環境工学科教授　博士（工学）（正会員）
*3　日本興業株式会社　土木事業本部室長（正会員）
*4　高松工業高等専門学校専攻科　建設工学専攻　（正会員）

目標圧縮強度をf_c'＝30MPaに設定し，図中に示した回帰式よりC/Wを求め，配合計算に用いた。目標空気量は1.5%，目標スランプ値は15cmとした。**表－３**に採用した示方配合を示す。

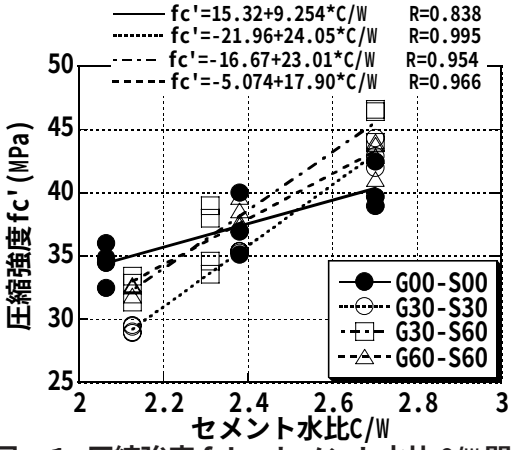
４種類のスラグ置換率の配合について，直径10cmの円柱供試体，10cm×10cm×40cmの無筋曲げ試験体，および後述する２種類のＲＣはり試験体を作製した。材齢４日目で脱型し，その後屋外暴露しながら所定の材齢において強度試験等を実施した。なお，直射日光および風雨による影響をみるため，同一の円柱供試体および曲げ試験体についても養生室内に放置し，材齢28日において圧縮試験を実施した。以下で検討する圧縮強度，弾性係数，ポアソン比の材齢28日における実験値は，この養生室内放置の試験体に対するものである。

2.2 圧縮強度

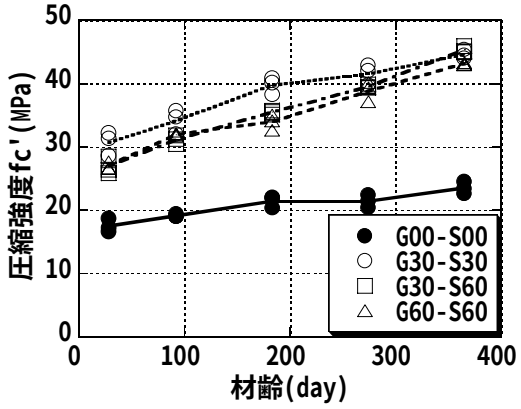
図－２に圧縮強度f_c'と材齢との関係を，４種類の骨材質量置換率の組合せについてそれぞれ示す。骨材置換率が大きいG30-S60，G60-S60は，材齢1年でも強度増加を続けているが，骨材置換率の小さいG00-S00，G30-S30はその傾向が頭打ちになっている。スラグ無置換のG00-S00が，他の３つの組合せに比較してf_c'が小さくなっているのは，低品質砕砂の使用に伴い，**図－１**中の回帰式によるC/Wの評価誤差が大きかったことにある。なお，**図－２**中の各材齢でのf_c'のばらつきについても，G00-S00が一番大きい。

2.3 割線弾性係数

図－３に材齢28日（養生室内放置）と材齢１年（屋外暴露）における割線弾性係数E_cの比較を示す。図中の数字は材齢28日に対する材齢１年のE_cの比を示している。右側から左側の棒グラフへとスラグ置換率が小さくなるにつれてE_cは小さくなり，かつ材齢の増加に伴うE_cの変化は増加から減少へと転じている。これは，圧縮強度の違いの影響，および低品質骨材の使用量の多いものほど微細なひび割れが多数生じたことが主



図－１ 圧縮強度 f_c' －セメント水比 C/W 関係（養生室内放置の場合）



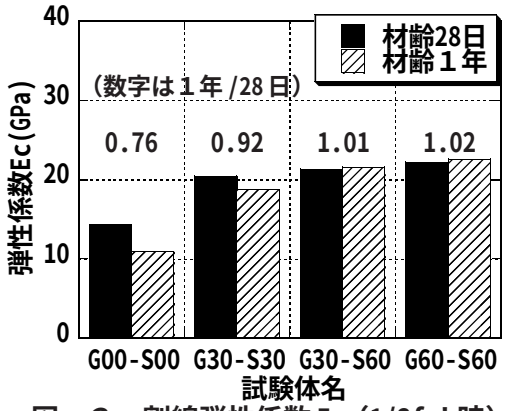
図－２ 圧縮強度 f_c' の経時変化

表－２ 使用骨材の物理的性質

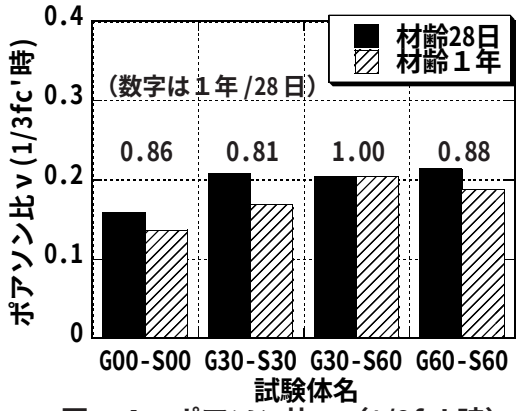
	骨材種類	表乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	砕砂 S	2.53	3.8	2.69
	急冷スラグ Ss	2.79	1.1	2.26
粗骨材	砕石 Gc (20-15)	2.61	3.3	7.00
	砕石 Gf (15-5)	2.61	3.3	6.03
	徐冷スラグ Gs	2.61	4.5	6.83

表－３ ＲＣはり試験体の示方配合

配合記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	W/C (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³) 水 W	セメント C	細骨材 砕砂 S	細骨材 急冷スラグ Ss	粗骨材 砕石 Gc 20-15	粗骨材 砕石 Gf 15-5	粗骨材 徐冷スラグ Gs	高性能減水剤 Ad (cm³/m³)
G00-S00	20	15	60	1.5	51	150	250	931	0	607	404	0	2232
G30-S30			46		47	150	326	598	256	443	296	317	2232
G30-S60			49		47	150	306	360	540	442	295	315	2232
G60-S60			51		48	150	304	361	541	250	166	624	2307



図－３　割線弾性係数 Ec（1/3fc' 時）



図－４　ポアソン比ν（1/3fc' 時）

原因と考えられる。

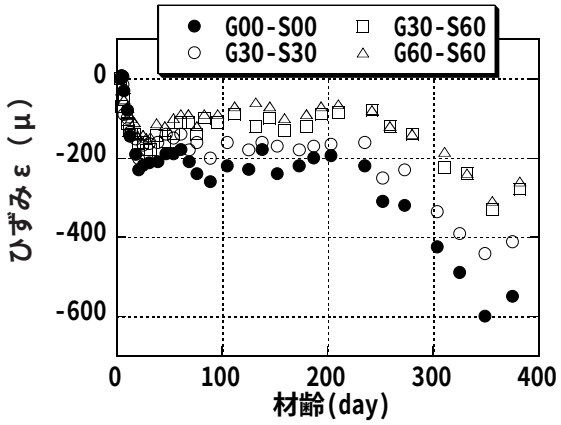
2.4 ポアソン比

図－４に材齢28日（養生室内放置）と材齢１年（屋外暴露）におけるポアソン比νの比較を示す。図中の数字は材齢28日に対する材齢１年のνの比を示している。スラグ置換率にかかわらず材齢１年のνが材齢28日に比べ小さくなっている。ポアソン比νの値そのものは，G00-S00が最も小さい。

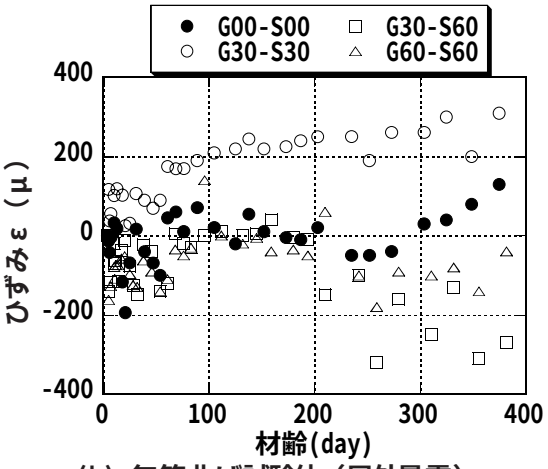
2.5 長さの変化率

図－５に材齢の増加に伴う無筋曲げ試験体およびＲＣはりのひずみの変化を示す。ひずみは，間隔10cmの標点距離の変化をコンタクトゲージによって計測することで求めた。

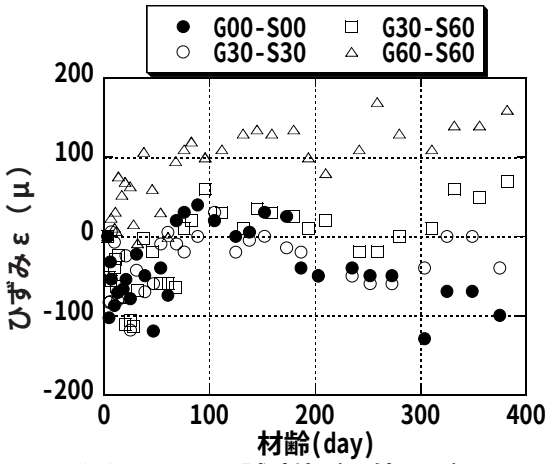
同図(a)に養生室内に放置した無筋曲げ試験体のひずみの経時変化を示す。収縮ひずみはスラグ置換率の大きいものほど小さい。材齢200日を越えたあたりから収縮ひずみが大きく増加し始めているのは，室温が上昇し始めたことが一因と考えられる。しかし，収縮ひずみのピークは600μ以下であり，土木学会示方書[4)]の屋内での



(a) 無筋曲げ試験体（養生室内放置）



(b) 無筋曲げ試験体（屋外暴露）

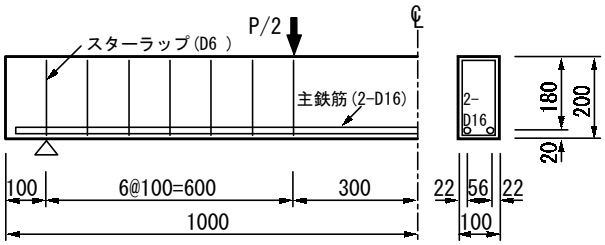


(c) ＲＣはり試験体（屋外暴露）

図－５　ひずみの経時変化

最終的な収縮ひずみ620μという規定値以下に収まっている。

同図(b)に屋外暴露した無筋曲げ試験体のひずみの経時変化を示す。ひずみとスラグ置換率の間には明確な傾向は見られない。材齢200日を越えたあたりから収縮ひずみが若干低下し始めているのは，降雨量が多くなったことが一因と考



図－６　曲げ試験体の形状・寸法（単位㎜）

写真－１　曲げ試験体の破壊状況の一例

えられる。収縮ひずみのピークは300μ程度であり，土木学会示方書の屋外での最終的な収縮ひずみ350μという規定値以下に収まっている。

同図(c)に屋外暴露したＲＣ曲げ試験体のひずみの経時変化を示す。ひずみは引張主鉄筋位置におけるものであるが，この鉄筋の拘束効果によりひずみの大きさは**同図(b)**の約1/2になっている。収縮ひずみはスラグ置換率が大きいほど，小さい傾向にはあるが，明確ではない。

以上のことより，低品質骨材を高炉スラグで置換することで，圧縮強度や弾性係数などの改善がなされ，かつ収縮ひずみについても問題ないことが明らかとなった。

3．曲げ破壊を想定した高炉スラグ使用ＲＣはりの力学特性

3.1 曲げ試験体

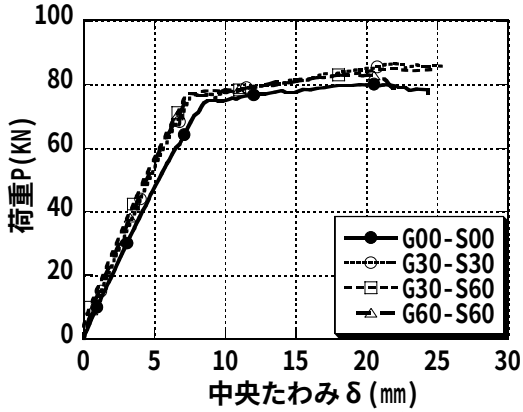
図－６に曲げ破壊を想定したＲＣはり試験体の形状・寸法を示す。試験体は幅１００ｍｍ，高さ200㎜，スパン長1800㎜の対称２点荷重を受ける単純ばりである。断面内には材質SD295Aの主鉄筋D16を２本配置した。中央にはひび割れ分散性を調べるため，600㎜の曲げモーメント一定区間を設けた。計測事項は，荷重P，曲げモーメント一定区間の両端および中央におけるたわみδ，曲げモーメント一定区間におけるひび割れ間隔l_{cr}およびひび割れ幅w，はり中央断面位置ひずみでの主鉄筋ひずみε_sおよびコンクリート圧縮縁ひずみε_cである。試験体は，１年間屋外暴露の後，破壊試験に供した。

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	弾性係数
	ｆｃ’(MPa)	Ec (GPa)
G00-S00	23.5	10.9
G30-S30	44.0	18.7
G30-S60	45.2	21.5
G60-S60	42.9	22.6

表－５　はり試験用鉄筋の力学特性

	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



図－７　荷重Ｐ－中央たわみδ関係（曲げ試験体）

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。

以下では，ＲＣはりの実験値と土木学会コンクリート標準示方書[4)]の規定式に基づく計算値との比較により，高炉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，議論を簡単にするため，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 全体挙動

写真－1にＲＣはり中央部における破壊状況の一例を示す。まず，曲げモーメント一定区間に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－７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－８に P=25kN（終局荷重Puの約1/3）時における中央たわみδ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－９に主鉄筋の引張応力度σs=100MPa時における曲げモーメント一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，実験値を表す各６本の棒グラフは，６個のπ型ゲージによる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たものである。計算値を求める際のσs は，はり中央断面の主鉄筋に貼付したひずみゲージの読みより算出した。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計算値は実験値の平均値を上回っている。幾つかのπゲージ区間において計算値が実験値を下回っているのは，計算値に用いるσs をひび割れ面ではなくコンクリート内部でのひずみの実験値に基づいて求めているためである。これにより，σs は実際よりも小さく評価され，それに伴ってwの値も小さく計算されるのである。

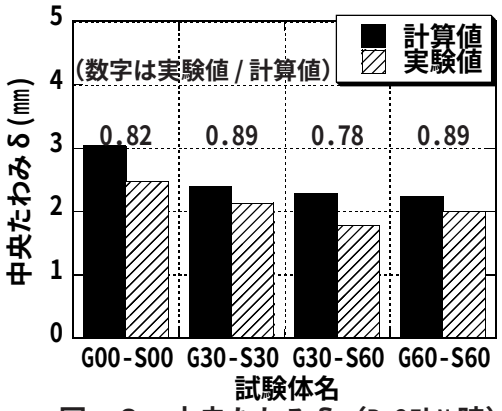
3.4 終局時挙動の評価

図－10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。

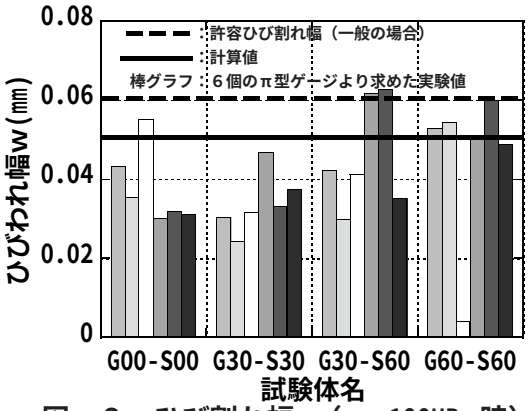
4. せん断破壊を想定した高炉スラグ使用ＲＣはりの力学特性

4.1 せん断試験体

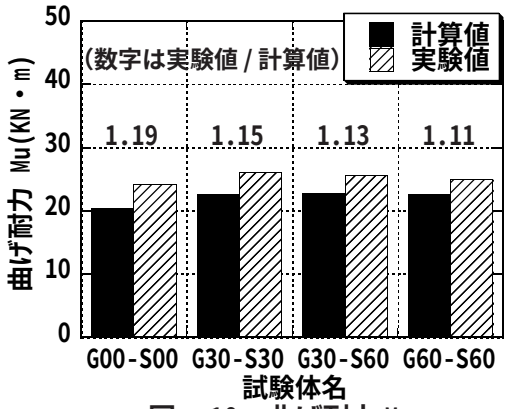
図－11にせん断破壊を想定したＲＣはり試験体の形状・寸法を示す。試験体は幅100mm，高さ300mm，スパン長1400mmの対称２点荷重を受ける単純ばりである。断面内には材質SD295Aの主鉄筋D22を２本配置した。使用材料の性質および主な計測事項は曲げ試験体と同じである。



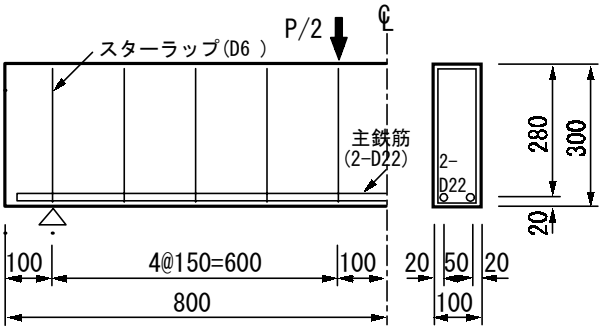
図－８　中央たわみδ（P=25kN 時）



図－９　ひび割れ幅ｗ（σs=100MPa 時）



図－10　曲げ耐力 Mu



図－11 せん断試験体の形状・寸法（単位mm）

4.2 全体挙動

写真－２にせん断スパンにおける破壊状況の一例を示す。まず，曲げモーメント一定区間に

写真－２　せん断試験体の破壊状況の一例

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することで耐力に至った。

図－12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，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，これも曲げ試験体の場合と同様にコンクリートの弾性係数が小さいためである。高炉スラグによる骨材置換がせん断破壊時の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－13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。各骨材置換率の組合せともに，計算値は安全側の評価となっている。

5．結論

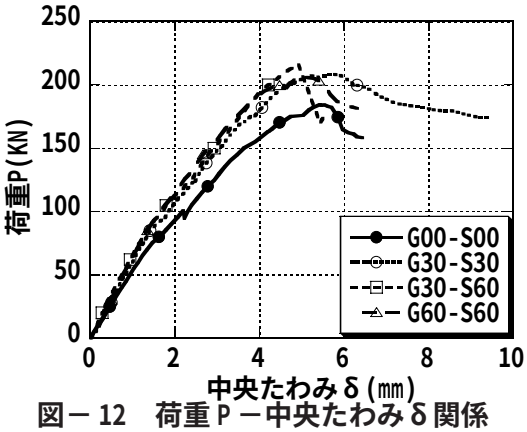
低品質骨材を高炉スラグ骨材で置換したコンクリートの実験を行い，以下の結果を得た。

(1) 高炉スラグ骨材で置換したコンクリートは，同じ材齢での圧縮強度のばらつきが小さく，材齢の増加に伴う圧縮強度の増加傾向が長く継続する。

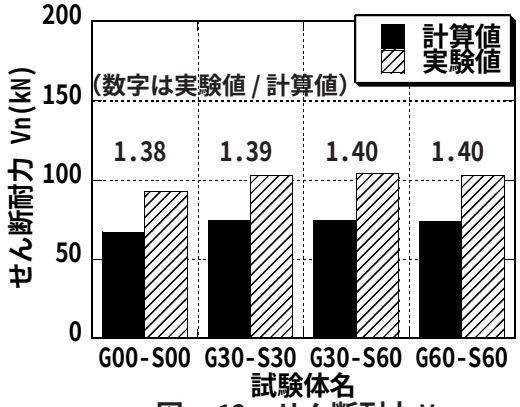
(2) 高炉スラグ骨材による置換率が大きいほど，材齢の増加に伴う弾性係数の変化が小さい。

(3) 高炉スラグ骨材で置換したコンクリートの収縮ひずみは，土木学会示方書の規定値以内に収まる。

(4) 高炉スラグ骨材で置換することにより，ＲＣはりの品質改善が図れ，かつその使用および



図－12　荷重Ｐ－中央たわみδ関係（せん断試験体）



図－13　せん断耐力Vu

終局の両限界状態における力学的性能は土木学会示方書の規定式を用いて評価できる。

謝辞

本研究は，(社)四国建設弘済会技術開発支援制度の助成を受けて実施したものである。ここに，関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会九州支部：コンクリートにおける産業廃棄物利用研究会報告書，2001.11

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) 五嶋邦宏ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1373-1378，2003

4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），土木学会，1996