論文　下水汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの力学的特性

武田字浦*1・久保田純司*2・高木宣章*3・児島孝之*4

要旨：下水汚泥スラグ粗骨材をコンクリート用粗骨材として使用するため，骨材の物理的性質，コンクリートのフレッシュ特性，硬化コンクリートの力学的特性，乾燥収縮，耐凍害性，圧縮疲労特性について実験・検討を行った。その結果，砕石に比べ下水汚泥スラグ粗骨材のすり減り減量および破砕値は大きく，下水汚泥スラグ粗骨材置換率の増加に伴いスランプおよび空気量が増加し，緒強度は低下した。乾燥収縮および耐凍害性，圧縮疲労強度は下水汚泥スラグ使用量に影響を受けず普通コンクリートとほぼ同程度であった。

キーワード：下水汚泥溶融スラグ粗骨材，凍結融解試験，圧縮疲労試験

1. はじめに

近年，下水道の普及に伴い，発生汚泥量が増加する傾向にある。そのほとんどは埋め立て処分されているが，最終処分地の残存容量は減少しており，埋め立て処分の継続は限界に近い状況にある。また，天然資源の枯渇等に起因して，循環型社会に適応した経済社会の変革の必要性も問われており，下水汚泥の有効利用が望まれている。

下水汚泥の再利用可能としたものに，汚泥を熔融してスラグ化した下水汚泥スラグがある。下水汚泥スラグをコンクリート用粗骨材として使用するためには，スラグの持つ特性がコンクリートに及ぼす影響を把握することが必要である。本研究では，下水汚泥溶融スラグの物理的性質，ならびに下水汚泥溶融スラグを粗骨材として用いたコンクリートの物性について実験を行った。

2. 実験概要

下水汚泥スラグをコンクリート用粗骨材として使用するために，下水汚泥スラグの物理的性質について検討した。さらに，下水汚泥スラグを粗骨材として用いたコンクリートのフレッシュ特性，硬化コンクリートの力学的特性，乾燥収縮，耐凍害性，圧縮疲労特性について検討を行った。

本実験で使用した下水汚泥スラグは，滋賀県湖南中部浄化センター汚泥溶融設備から製造された空冷スラグである。空冷スラグは，汚泥ケーキ（高分子系汚泥）を循環流動層熱分解炉および立体型旋回式溶融炉により約 1400～1500℃で加熱溶融し自然に冷却したもので，粒径 5～20mm のものを使用した。空冷スラグはガラス質の塊状であるが，冷却速度が遅いと一部結晶化が進むため，一般的に，急冷スラグに比べ強度が大きく，天然骨材とほぼ同等の物性を有するとされているため，砕石の代替骨材としての利用が期待できる。

2.1 試験方法

下水汚泥スラグをコンクリート用粗骨材として使用するため，**表－1** に示す項目について，骨材試験を行った。また，下水汚泥スラグをコンクリート用粗骨材として置換することによって，フ

*1 立命館大学大学院　理工学研究科総合理工学専攻　工修（正会員）
*2 立命館大学大学院　理工学研究科環境社会工学専攻　工修（未会員）
*3 立命館大学　理工学部環境システム工学科教授　工博（正会員）
*4 立命館大学　理工学部建築都市デザイン学科教授　工博（正会員）

レッシュコンクリートおよび硬化コンクリートに与える影響を把握するために，**表－2** に示す項目について検討を行った。圧縮疲労試験は，下水汚泥スラグを粗骨材として用いたコンクリートの構造部材としての利用可能性を検討するために行った。

圧縮疲労試験は，材齢 91 日以上経過した供試体を用い，気中環境下で行った。試験は荷重制御により行い，疲労試験直前に行った静的強度試験をもとに，下限応力比 10%，上限応力比 60, 70, 80%のとした。載荷速度は 4Hz，繰り返し回数は 2.0×10^6 回とし，2.0×10^6 回で破壊しなかった供試体については，静的載荷試験により残存強度を測定した。

2.2 使用材料および示方配合

使用材料を**表－3** に，コンクリートの示方配合を**表－4** に示す。下水汚泥スラグは粗骨材試験と同様のものを用いた。混和剤

表－1　骨材試験方法

項目	方法
ふるい分け	JIS A 1102
密度	JIS A 1110
吸水率	JIS A 1110
単位容積質量	JIS A 1104
実積率	JIS A 1104
すり減り減量	JIS A 1121
破砕値	BS 812

表－2　硬化コンクリート試験方法

項目	試験方法	供試体(cm)
スランプ	JIS A 1101	---
空気量	JIS A 1128	---
圧縮強度	JIS A 1108	φ10x20
曲げ強度	JIS A 1106	10x10x40
引張強度	JIS A 1113	φ15x15
静弾性係数	JIS A 1149	φ10x20
動弾性係数	JIS A 1127	10x10x40
超音波パルス伝播速度	JCI の方法 [1)]	10x10x40
乾燥収縮	JIS A 1129-2	10x10x40
凍結融解抵抗性	JIS A 1148	10x10x40
圧縮疲労	---	φ7.5x15

表－3　使用材料

材料（略記）		主な性質
セメント(C)		普通ポルトランドセメント；密度：3.16g/cm^3，比表面積：3260cm^2/g
細骨材(S)		川砂；表乾密度：2.60g/cm^3，吸水率：1.56%，F.M.=2.73
粗骨材	(G)	砕石；表乾密度：2.70g/cm^3，吸水率：0.70%，F.M.=6.80，最大寸法：20mm
	(Gs)	下水汚泥スラグ；表乾密度：2.65g/cm^3，吸水率：2.16%，F.M.=6.52 最大寸法：20mm
混和剤	W/C=30%	・高性能 AE 減水剤；カルボキシル基含有ポリエーテル系ポリカルボン酸 密度：1.03~1.10g/cm^3 ・AE 助剤(2%溶液)；密度：1.01~1.05g/cm^3
	W/C=50%	・AE 減水剤(25%溶液で使用)；リグニンスルホン酸化合物 密度：1.10g/cm^3 ・AE 助剤(1%溶液)；アルキルアリルスルホン酸化合物 密度：1.19g/cm^3

表－4　コンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					(高性能) AE 減水剤 (cc)	AE 助剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	Gs				
30-0	30	0	43.4	170	566	684	927	0	5657	8485	18.8	3.6
30-25		25					695	223	5657	6788	19.0	5.4
30-50		50					463	446	5657	5657	18.9	5.5
30-75		75					232	669	5657	2828	18.0	4.1
30-100		100					0	892	5657	1980	18.2	4.3
50-0	50	0	44.0	167	334	780	1031	0	3340	1336	7.8	5.5
50-25		25					774	248	3340	1336	8.4	4.6
50-50		50					516	497	3006	1202	7.1	4.3
50-75		75					258	745	2672	668	8.2	4.7
50-100		100					0	993	2338	---	6.5	3.8

として，W/C=30%では高性能 AE 減水剤，W/C=50%では AE 減水剤をそれぞれ用いた。W/C=30%においては，目標スランプを 18±1cm，目標空気量を 4.5±1%とし，W/C=50%においては，目標スランプを 7.5±1cm，目標空気量を 4.5±1%とした。目標スランプおよび空気量は混和剤使用量によって調整した。下水汚泥スラグ粗骨材の置換率は，粗骨材容積に対して内割で 0，25，50，75 および 100%の 5 水準とした。

3. 結果および考察

3.1 骨材試験結果

下水汚泥スラグの粒度分布を**図－1** に示す。粒径 10～20mm の割合が土木学会の標準粒度に比べ少なかった。針状のスラグを含み，ガラス質で，角がとがった骨材が多くみられた。

下水汚泥スラグ粗骨材および砕石の物性値と JIS 規格値を**表－5** に示す。

砕石に比べ，下水汚泥スラグの表乾密度は 2.65g/cm^3，絶乾密度 2.60g/cm^3 と幾分小さい値を示した。しかし，粗骨材における絶乾密度の JIS 規格値は 2.50g/cm^3 以上であり，今回使用した下水汚泥スラグの絶乾密度は，十分に規格値を満足するものであった。

下水汚泥スラグの吸水率は 2.16%であり，砕石 0.70%に比べ，非常に大きい値を示した。規格値 3.00%以下を満たしてはいるが，一般に使用される粗骨材に比べると吸水率が大きくなる傾向を示した。

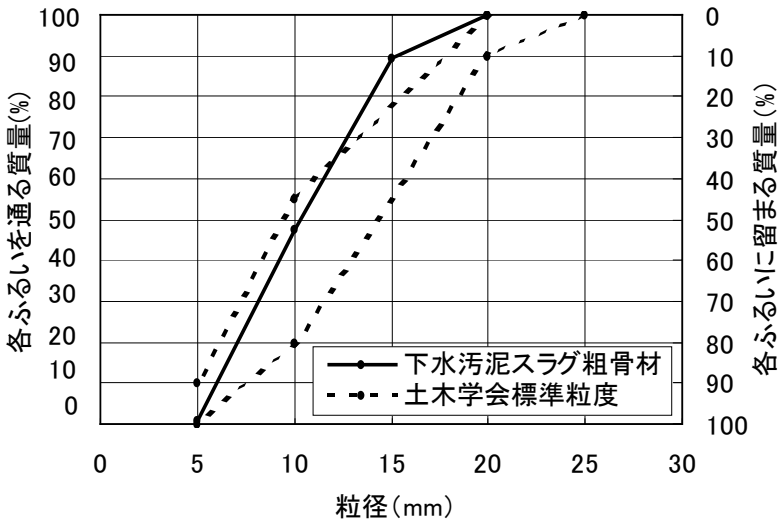
下水汚泥スラグの単位容積質量は 1.52kg/l となり，砕石の 1.61kg/l に比べ，小さい値を示した。実積率は下水汚泥スラグ 58.5%でとなり，砕石の 60.1%と比較すると幾分小さい値を示した。

下水汚泥スラグのすり減り減量は 43.6%であり，砕石の 11.4%に比べ，非常に大きな値を示し規格値を満たさない結果となった。また，破砕値は 41.1%となり，砕石の 15.1%に比べ，非常に大きな値を示した。下水汚泥スラグ粗骨材は，ガラス質で非常に脆く，とがった形状を有するものが多く，砕石と比較して強度がかなり小さいという結果が得られた。

3.2 硬化コンクリート試験結果

(1) 圧縮強度

材齢 7 日，28 日および 91 日における圧縮強度とスラグ置換率の関係を**図－2** に示す。スラグ置換率の増加に伴って，圧縮強度が小さくなる傾向を示し，W/C=30%置換率 100%では，0%に対して 18%の強度低下が観察された。これは，スラグ粗骨材の表面がガラス質で，モルタルとの付着が悪いことおよびスラグ粗骨材の強度が小



図－1　粒度分布

表－5　下水汚泥スラグ粗骨材と規格値の比較

	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すり減り減量 (%)	破砕値 (%)
Gs	2.65	2.60	2.16	1.52	58.5	43.6	41.1
G	2.70	2.68	0.70	1.61	60.1	11.4	15.1
規格 1	---	2.50 以上	3.00 以下	---	55.0 以上*	40.0 以下	---
規格 2	---	2.50 以上	3.00 以下	---	---	---	---

規格 1：JIS A 5005(コンクリート用砕石及び砕砂)　　*：粒形判定実積率
規格 2：JIS A 5308 付属書 1(レディミクストコンクリート用骨材)

さいためと考えられる。材齢 7 日に対する材齢 28 日，および材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度増加率は，スラグ置換に関わらずほぼ同程度であった。また，材齢 28 日までの初期材齢での強度増加率の方が大きい傾向にあった。しかし，W/C=50%置換率 100%のときのみ強度が増加し，材齢 28 日および 91 日では置換率 0%とほぼ同等の強度であった。

(2) 引張強度および曲げ強度

引張強度とスラグ置換率の関係を**図－3** に，曲げ強度とスラグ置換率の関係を**図－4** に示す。

引張強度は，圧縮強度と比較すると，スラグ置換率の増加による強度低下が小さかった。圧縮強度に対する引張強度の比は，W/C=30%で 1/14～1/16，W/C=50%で 1/12～1/15 であり，一般的なコンクリートとほぼ同様の値であった。

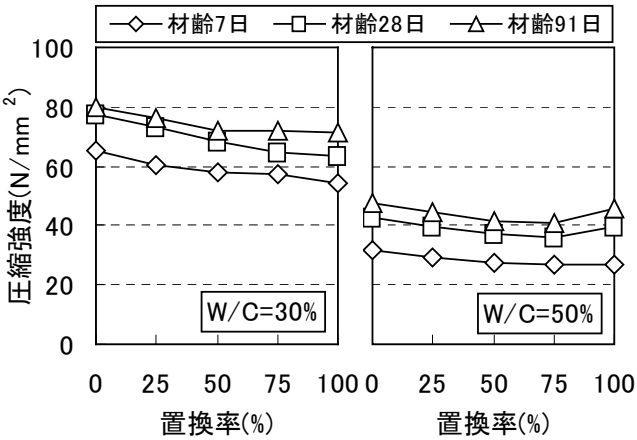
曲げ強度は，粗骨材を下水汚泥スラグに置換することにより，置換率 0%に対して約 20%強度が低下し，さらにスラグ置換率の増加に伴い強度が低下する傾向が観察された。また，圧縮強度に対する曲げ強度の比は，W/C=30%で 1/8~1/11 であり，一般的なコンクリートと比較して小さくなったが，W/C=50%では，1/5～1/8 となり，一般的なコンクリートとほぼ同様の値であった。

(3) 弾性係数および超音波パルス伝播速度

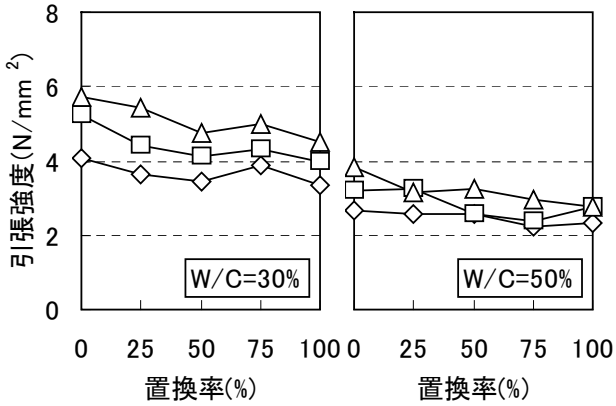
静弾性係数とスラグ置換率の関係を**図－5** に，動弾性係数とスラグ置換率の関係を**図－6** に，超音波パルス伝播速度とスラグ置換率の関係を**図－7** に示す。動弾性係数は縦振動時の 1 次共鳴振動数により求めた。

静弾性係数は，動弾性係数より幾分小さい値を示し，伝播速度の傾向とほぼ一致してスラグ置換による強度低下の影響が観察された。また，静弾性係数，動弾性係数ともに材齢の経過に伴い増加し，その増加の割合はスラグ置換率に関わらずほぼ同程度であった。

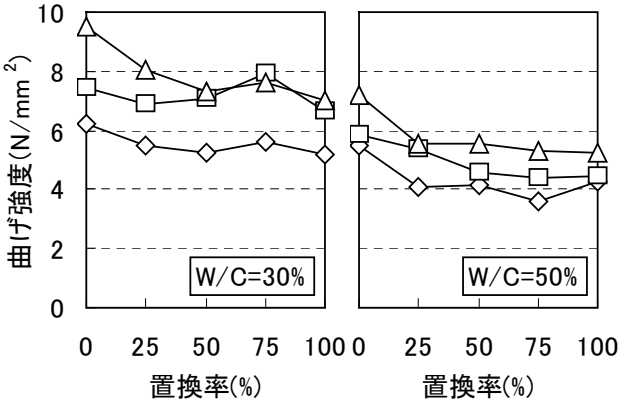
動弾性係数と静弾性係数の比は，W/C=50～75%の普通コンクリートでは 1.04～1.37 であり，強度が大きいほど，長期材齢になるほどこの値



図－2　スラグ置換率と圧縮強度の関係



図－3　スラグ置換率と引張強度の関係



図－4　スラグ置換率と曲げ強度の関係

は小さくなるとされている[2)]。スラグコンクリートは，材齢 7 日のスラグ置換率 100%を除き，この範囲内にあった。W/C=30%では 50%と比べ，その増加の割合は小さく，動弾性係数と静弾性係数の比は 1.14～1.25 であり，W/C=30%では 1.04～1.37 の範囲内にあった。

超音波パルス伝播速度は，W/C=50%でのスラグ置換率 100%を除くと，スラグ置換率が増加す

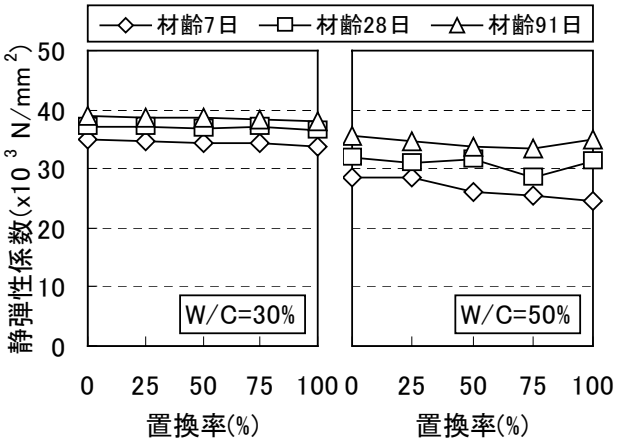
るに伴って伝播速度が幾分低下した。また，材齢の経過に伴い伝播速度は増加し，その割合はスラグ置換に関わらずほぼ同程度であった。W/C=50%の方が，伝播速度の増加の割合が大きくなった。

(4) 乾燥収縮試験

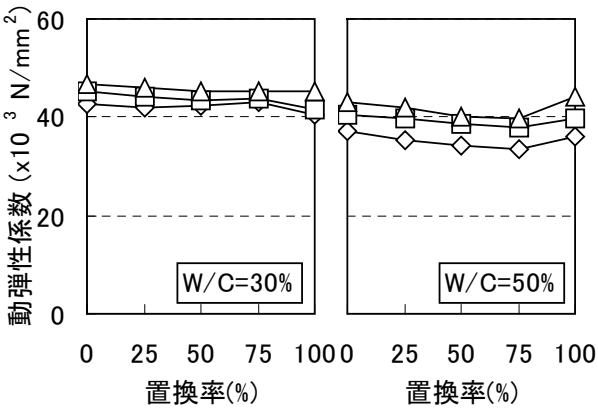
乾燥収縮ひずみの経時変化を**図－8** に示す。下水汚泥スラグ粗骨材の吸水率は 2.16%であり，一般の砕石の 0.70%に比較してかなり大きい。そのため，スラグ骨材コンクリートの乾燥収縮が大きくなることが予測されたが，コンクリートの乾燥収縮は，下水汚泥スラグ粗骨材の使用による影響は少なく，砕石コンクリートと同程度か幾分小さい程度であった。また，別途測定した水分逸散率は，置換率に関わらず W/C=30%で 0.7～0.9%，W/C=50%で 2.3～2.5%と，ほぼ同程度の値を示し，スラグ粗骨材による影響は観察されなかった。

(5) 凍結融解試験

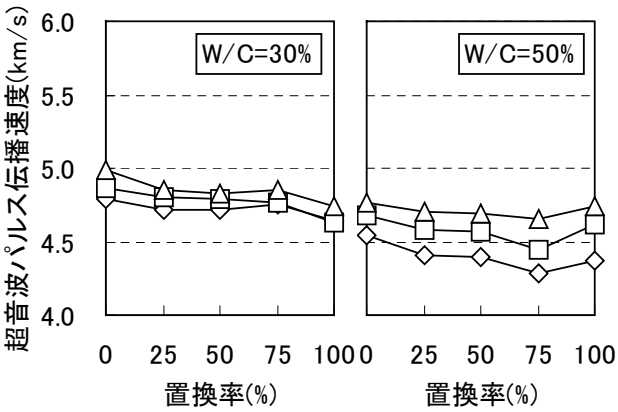
耐久性指数を**表－6** に，質量減少率の経時変化を**図－9** に，相対動弾性係数の経時変化を**図－10** に示す。300 サイクル終了時点で約 0.10～0.17%の質量減少が観察された。これは，表面層の剥離が生じていたためと考えられるが，スラグ置換率による影響は観察されなかった。スラグ置換率の増加に伴って相対動弾性係数が小さくなり，耐凍害性の低下が観察された。これは，スラグ置換率の増加に伴い，低強度の粗骨材量が増加し，コンクリート強度が低下すること，スラグ骨材の吸水率が大きいために凍結可能水量



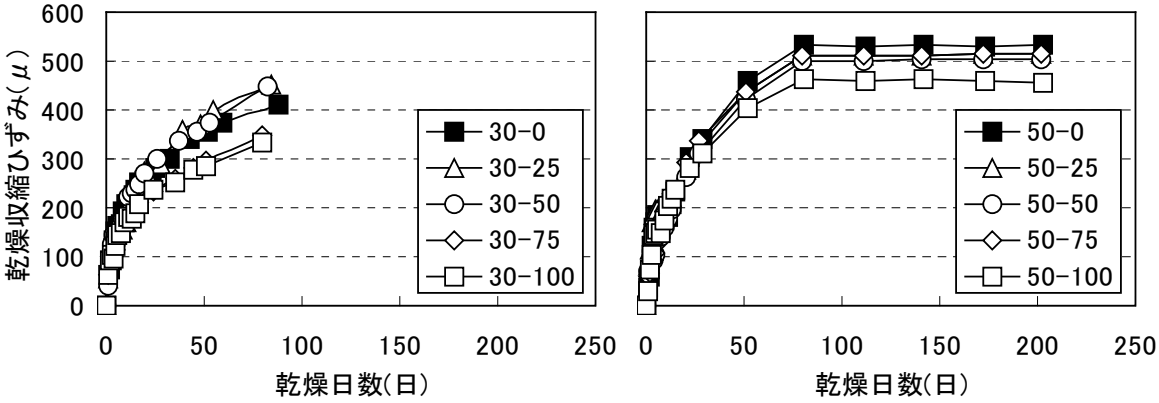
図－5　スラグ置換率と静弾性係数の関係



図－6　スラグ置換率と動弾性係数の関係



図－7　スラグ置換率と超音波パルス伝播速度の関係



図－8　乾燥収縮ひずみの経時変化

が増加することなどが原因と考えられる。

(6) 圧縮疲労試験

表－7 に平均疲労寿命と 200 万回圧縮疲労強度を示す。スラグ置換率の増加に伴い 200 万回圧縮疲労強度は若干低下したが，普通コンクリートとほぼ同程度であった。しかし，本実験結果では供試体数が少なく，ばらつきが大きいと考えられるため，引続き検討を行う予定である。

4. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

1) 下水汚泥スラグ粗骨材は，砕石と比較してすり減り減量と破砕値が大きく，粗骨材自体の強度は小さい。

2) 下水汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの諸強度は，スラグ置換率の増加に伴い低下する傾向にあった。

3) 下水汚泥スラグがコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は小さく，水分逸散率は置換率に関わらず，ほぼ同程度であった。

4) 下水汚泥スラグ粗骨材使用量の増加に伴い，コンクリートの凍結融解抵抗性は低下する傾向にあった。

5) 200 万回圧縮疲労強度は，スラグ置換率の増加に伴い若干低下したが，ほぼ同程度であった。

【参考文献】

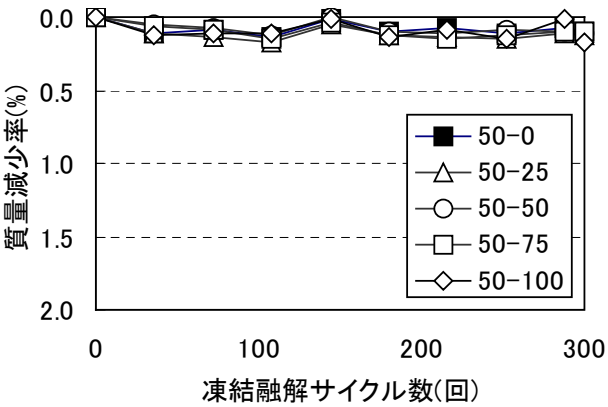
1) 超音波パルス伝播速度の測定方法（試案），日本コンクリート工学協会・コンクリート非破壊試験方法研究委員会報告書，1992

2) 岡田清ら：土木材料学，オーム社，pp.188，1998

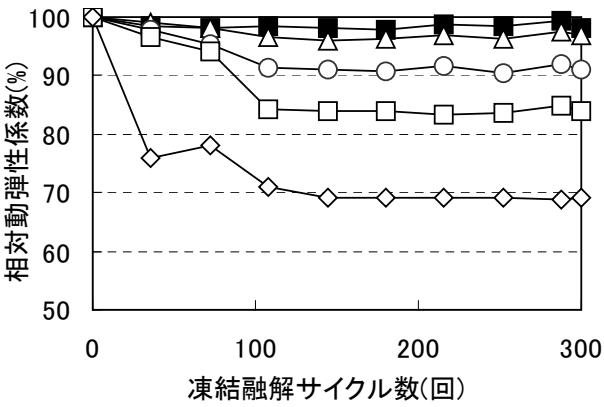
3) 井上正一：コンクリートの圧縮疲労特性と部材設計への適用に関する基礎的研究，京都大学博士論文，pp.31-53，1985.04.

表－6　耐久性指数

配合	50-0	50-25	50-50	50-75	50-100
耐久性指数	98	97	91	84	69



図－9　質量減少率の経時変化



図－10　相対動弾性係数の経時変化

表－7　平均疲労寿命

配合	S_{max} (%)	S_{min} (%)	平均疲労寿命	供試体数 n	$S-\overline{N}$線式	200 万回圧縮疲労強度
普通コンクリート[3]	72~80	10	----	----	*S=-4.395 LogN+97.506*	*69.8(%)*
50-50	60	10	2000000	3	*S=-6.700LogN+109.286*	*67.1(%)*
	70		5189734	5		
	80		37635	5		
50-100	60	10	2000000	3	*S=-6.187LogN+103.007*	*64.0(%)*
	70		1128135	5		
	80		4480	6		