再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響

INFLUENCE OF QUALITY OF RECYCLED AGGREGATE
ON QUALITY OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

菊池 雅史*, 道正 泰弘**, 安永 亮***, 江原 恭二****

増田 彰*****

*Masafumi KIKUCHI, Yasuhiro DOUSYOU, Akira YASUNAGA,
Kyouji EHARA and Akira MASUDA*

The availability and applicability of recycled aggregate as aggregate resources have already proved by many researchers. The other hand, practical application of recycled aggregate concrete containing this type of aggregate for structural concrete has never adopted in Japan.

To promote practical application of recycled aggregate concrete, there are many points that must be solved concerning the correlation between qualities of recycled aggregate and properties of recycled aggregate concrete. From this point of view, 35 types of recycled aggregate concrete produced from seven types of recycled aggregates, and properties of this type of concrete, such as fresh concrete, unit weight of dry condition, strength, drying shrinkage, neutralization, freezing and thawing, and so on, were examined.

The correlation between qualities of recycled aggregate and properties of recycled aggregate concrete were clarified through these test results.

Keywords: recycled aggregate, recycled lightweight aggregate, recycled aggregate concrete, recycled aggregate lightweight concrete, correlation between aggregate and concrete, value of relative quality.

再生骨材, 再生軽量骨材, 再生コンクリート, 再生軽量コンクリート, 骨材とコンクリートの相関性, 相対品質値

1. はじめに

解体工事に伴って発生するコンクリート塊の再資源化に関する研究は比較的早くから進められてきている。しかし、本格的な実用化の研究が着手されたのは、「法律第48号：再生資源の利用の促進に関する法律」が制定された1991年以降といえる。1994年の「コンクリート副産物の再利用に関する用途別品質基準案（建設省技調発第88号）」は、コンクリート用再生骨材の実用化に際しての、品質の暫定的な目安を示すことによって利用促進を図ることとなった。

このように、実用化のための法令等は次第に整っているが、技術的には解決すべき研究課題が残されている。その第1は再生骨材の品質の適切な評価方法であり、第2は再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響を解明することであり、第3は再生骨材の品質に応じた所要品質コンクリートの適切な調査設計を確立することである。

本研究は、このような観点から、これまで筆者らが行ってきた研究成果^{1), 2), 3), 4)}をもとに、再生骨材の品質と再生コンクリートの品質との相関性について総合的に検討したものであり、これらを踏まえて再生コンクリートの適切な調査設計を確立するための基礎的資料を得ようとするものである。

2. 既往研究の沿革

わが国における再生骨材および再生コンクリートに関する研究はおおよそ以下の3つに大別できる。

①1973年の第1次石油危機を契機として着手されたもので、良質な骨材資源の枯渇に伴う代替骨材としての適用性に関する研究の位置付けであり、研究の背景には最終処分場の確保が困難となりつつあった当時の状況もある。内容的には、再生骨材の使用によるコンクリートの品質低下に関する研究^{5), 7)}が多い。

②1980年代から着手され、再生骨材の積極的な利用

* 明治大学理工学部建築学科 助教授・工博

** 東京電力(株)電力技術研究所構造研究室
主任・工修

*** 明治大学 大学院生(現住友金属鉱山(株)・工修)

**** 明治大学 大学院生
(現清水建設(株)広島支店)・工修***** 東京電力(株)電力技術研究所構造研究室
主任研究員

Assoc. Prof., Dept of Architecture, Science & Tech, Meiji Univ., Dr. Eng.

Researcher., Civil Eng. and Architecture Dept, Power R & D Center, TEPCO., M. Eng.

Graduate Student, Meiji Univ. (at present, Sumitomo Metal Mining Corp.), M. Eng.

Graduate Student, Meiji Univ. (at present, Shimizu Hiroshima Branch.), M. Eng.

Senior Researcher., Civil Eng. and Architecture Dept, Power R & D Center, TEPCO.

のための、あるいは高度利用に関する研究で、普通骨材の一部を部分的に置換することにより、構造用骨材としての適用性の確認および実用化のための基礎的研究^{8), 9)}が中心となっている。

③1990年代には、再生骨材としての利用の観点のみならず、永久的な骨材資源として、また地球環境を考慮した再生骨材のあり方等に関する研究^{1), 2), 3), 4), 9), 10)}が着手されてきている。

3. 本検討に用いた再生骨材

本検討に用いた再生骨材の製造方法およびその物性について、以下に示す。

3-1 原コンクリート

表-1に示すように、普通骨材および構造用人工軽量骨材を用い、実験室および骨材製造工場で作製した圧縮強度の異なる普通コンクリート3種類(R1, R2, R3)および軽量コンクリート1種を3種類(RL1, RL2, RL3)、27~28年前に製造された無仕上げの軽量コンクリート2種のPCaパネル1種類(RL4)の合計7種類を原コンクリートとした。

3-2 再生骨材の製造

実験室および骨材製造工場で作製した原コンクリートについては、ほぼ作製後2ヵ月~1年後の間で、また、PCaパネルについては、製造後27~28年後に再生骨材の製造に供した。製造は図-1に示すジョークラッシャーを用いて、そのオープンセットを普通コンクリートにあっては20mm、軽量コンクリートにあっては15mmにセットして破碎した後、ふるい分けにより5mmふるいに留まるものを粗骨材、通過するものを細骨材とした。

3-3 再生骨材の物性

普通コンクリートを原コンクリートとして製造した骨材(以下、再生骨材という)および軽量コンクリートを原コンクリートとして製造した骨材(以下、再生軽量骨材という)の外観、主要物性をそれぞれ写真-1および

表-2に示す。

(1) 外 観

再生骨材および再生軽量骨材のいずれもその形状は碎

表-1 本検討で用いた各種骨材の概要

試験体概要		原骨材および原コンクリートの概要			
		原骨材の種類	調合概要		4週圧縮強度
呼び名	記号	およびその概要	W/C (%)	スランブ (cm)	(kgf/cm ²)
普通	細骨材 N	川 砂 ※1	—	—	—
	粗骨材 G	硬質砂岩碎石 (JIS A 5005)	—	—	—
軽量	粗骨材 F	石炭灰系人工軽量骨材(造粒)	—	—	—
	粗骨材 L	膨張頁岩系人工軽量骨材(非造粒)	—	—	—
再生	細骨材 R1s	粗骨材: 硬質砂岩碎石 (JIS A 5005)	2.5	18±2	117.3 ※2
	粗骨材 R1g		3.5		81.6 ※2
	細骨材 R2s		4.5		71.4 ※2
	粗骨材 R2g		5.5		51.8 ※2
	細骨材 R3s	細骨材: 川 砂	5.5		約40.0 ※3
	粗骨材 R3g		6.5		約20.0 ※3
再生軽量	細骨材 RL1s	【軽量1種】粗骨材: 石炭灰系(F)と膨張頁岩系(L)を等量混合	4.5	22±2 ※4	47.2
	粗骨材 RL1g		5.5		39.7
	細骨材 RL2s		7.0		26.3
	粗骨材 RL2g				
	細骨材 RL3s	【軽量2種】細・粗骨材ともに膨張頁岩系	不明 ※5		約40.0
	粗骨材 RL3g				
量種	細骨材 RL4s				
	粗骨材 RL4g				

※1 大井川採取

※2 1990年に筆者らが作製した梁型試験体及び圧縮強度試験体

※3 1991年に試験機関において作製された圧縮強度試験体

※4 再生軽量1種のスランブは1955年頃に採用されていた値(11)を示した

※5 1967~1968年頃に軽量骨材製造工場で作製されたもの

図-1 再生骨材の製造に供したジョークラッシャーの概要

骨材種別	普通	再生	軽量	再生軽量
細骨材	N	R1s, R2s, R3s		RL1s, RL2s, RL3s, RL4s
粗骨材	G	R1g, R2g, R3g	F, L	RL1g, RL2g, RL3g, RL4g

写真-1 各種骨材の外観

表-2 本検討で製造、使用した各種骨材の主要物性

試 験 概 要		細 骨 材								粗 骨 材										
		普 通 再 生				再 生 軽 量				普 通 軽 量			再 生			再 生 軽 量				
						1 種		2 種								1 種		2 種		
試 験 項 目	試 方 法	N	R 1 s	R 2 s	R 3 s	RL1s	RL2s	RL3s	RL4s	G	F	L	R 1 g	R 2 g	R 3 g	RL1g	RL2g	RL3g	RL4g	
最大寸法 (mm)		5	5			5				20	15			20			15			
粗粒率: F. M.		JIS A 1102	2.92	3.61	3.86	3.72	3.41	3.51	3.46	3.89	6.72	6.53	6.62	6.71	6.69	6.66	6.31	6.49	6.45	6.30
比重	絶 乾 時	細骨材 JIS A1109	2.58	2.03	2.08	2.01	1.71	1.57	1.66	1.34	2.60	1.35	1.29	2.35	2.32	2.32	1.77	1.76	1.76	1.41
	表 乾 時	粗骨材 JIS A1110	2.61	2.32	2.32	2.29	2.01	1.93	1.98	1.79	2.63	1.55	1.42	2.44	2.42	2.44	1.98	1.98	1.98	1.67
吸水率 (%)		F. L: JIS A1135	1.18	14.3	11.5	13.9	17.9	23.0	19.6	33.5	0.89	14.5	9.86	3.96	4.39	5.05	12.1	12.3	12.5	19.0
単位容積質量(kg/ℓ)		JIS A 1104	1.74	1.27	1.32	1.16	1.17	1.15	1.18	0.83	1.54	0.82	0.81	1.31	1.30	1.30	0.98	0.96	0.95	0.74
実 積 率 (%)			67.6	62.6	63.5	57.7	68.2	73.2	71.1	67.5	59.1	60.7	62.1	55.6	56.3	56.1	55.7	54.7	54.2	52.6
骨材 40t破砕値(%)		B. S. 812	—	—	—	—	—	—	—	—	13.8	39.3	39.1	18.4	22.8	25.2	30.5	32.4	38.1	36.1
強度 10%破砕力(t)			—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.54	8.56	—	—	—	8.97	7.73	7.13	6.43

石状であるが、全体的には原コンクリートの圧縮強度が小さいものの、稜線の角張りは鈍くなり、形状もやや偏平になる傾向が観察された。また、再生骨材においては、原コンクリートの強度が大きいものの、もとの骨材（以下、原骨材という）の破断が顕著であった。

(2) 粒 度

粗骨材のふるい分け試験結果を図-2に示す。再生粗骨材の粒度分布は、いずれも15mmでJASS 5に規定する普通骨材の標準粒度の通過率を越える値を示した。

一方、再生軽量粗骨材は、JIS A 5002に規定する標準粒度範囲に適合した。細骨材については、再生細骨材および再生軽量細骨材のいずれにおいても、0.3～2.5mmの間でそれぞれに規定する標準粒度範囲に適合しない通過率を示し、表-2に示すように、粗粒率3.41を越える粗目の骨材となった。また、原コンクリートの圧縮強度が骨材の粒度に及ぼす影響は認められなかった。

(3) 比 重

粗骨材の絶乾比重は、再生粗骨材で2.3程度、軽量コンクリート1種および2種を原コンクリートとする再生軽量細骨材ではそれぞれ1.8弱および1.4程度であり、いずれも普通コンクリートおよび軽量コンクリートの一般的な気乾比重の値とほぼ同等であった。

細骨材の絶乾比重は、再生細骨材で2.0～2.1の範囲であり、普通モルタルの気乾比重とほぼ同等の値となった。一方、原コンクリートを軽量コンクリート1種および2種とした再生軽量細骨材では、それぞれ1.57～1.71および1.34であり、いずれも軽量コンクリート1種および2種の一般的な気乾比重の値に比べてやや小さい。

また、原コンクリートの圧縮強度が骨材の比重に及ぼす影響については、今回の実験の範囲では、明確な傾向はみられなかった。

(4) 吸 水 率

粗骨材の吸水率は、再生粗骨材でほぼ4～5%の範囲にあり、原コンクリートの強度が大きくなるのに伴って吸水率は小さくなる傾向が認められた。再生軽量粗骨材

図-2 本検討で用いた各種粗骨材のふるい分け試験結果

の吸水率は、原コンクリートを軽量コンクリート1種および2種とした場合で、それぞれ約12%、19%であった。

細骨材は粗骨材に比べて再生細骨材では2.5～3.5倍、再生軽量細骨材では1.5～2倍の高い吸水率であった。

(5) 実積率

粗骨材の実積率は、再生粗骨材では56%前後、再生軽量粗骨材では53～56%程度であり、いずれも原骨材の実積率より小さな値であった。

細骨材については、再生細骨材で58～64%、再生軽量細骨材で68～73%の範囲で、前者は原骨材に比べてかなり小さな値であり、後者は同等か大きめの値であった。

(6) 骨材強度

骨材強度試験結果を表-2に示す。硬質砂岩碎石(40t破砕値:13.8%)を用いた圧縮強度200～1200kgf/cm²の原コンクリートから製造した再生粗骨材の骨材強度は、40t破砕値で、ほぼ18～25%の範囲であった。一方、石炭灰系人工軽量骨材(10%破砕力:9.54t)、膨張頁岩系人

工軽量骨材（10%破砕力:8.56t）を用いた圧縮強度260～472kgf/cm²の原コンクリートから製造した再生軽量粗骨材については、10%破砕力でほぼ6.4～9.0tの範囲であり、原骨材に比べて、同等もしくは小さくなる傾向がみられた。また、原コンクリートの圧縮強度との関係については、再生粗骨材および再生軽量粗骨材のいずれにおいても、圧縮強度が大きくなるのに伴って骨材強度も大きくなる傾向が認められた。

本検討で骨材強度の判定に用いたB.S. 812法は、一定の容器中に所定の見掛けの容積試料を詰めて圧密する試験であることから、試料骨材の実積率が試験結果に及ぼす影響が比較的大きいといわれている¹²⁾。図-3は各種骨材の圧密変位を、図-4は実積率と40t破砕値または10%破砕力の関係を示したものである。一般に、実積率の小さな骨材は角張りを有しており、同一の荷重に対して圧密変位が大きくなり、その初期の変位の段階で角張っている部分が小片に破砕されることになる。従って、試料の強度が同一の場合には、実積率が小さいものほど骨材強度も小さく判定される場合が多い。また、図-5は原コンクリートの圧縮強度と骨材強度の関係を示したものであるが、両者の間には相関性が認められる。

図-3 各種骨材の圧密変位試験結果

図-4 各種骨材の実積率と骨材強度の関係

4. 再生コンクリート

前項で示した再生骨材を用いたコンクリート（以下、再生コンクリートという）および再生軽量骨材を用いたコンクリート（以下、再生軽量コンクリートという）について、その実験概要、実験結果およびその検討を以下に示す。

4-1 実験概要

(1) 使用材料

a. セメント：普通ポルトランドセメント(K₂₈:420kgf/cm²)を用いた。
b. 骨材：再生骨材3種類、再生軽量骨材4種類、比較用として普通骨材および人工軽量骨材を用いた。これら骨材の種類、記号および主要物性は表-2に示した通りである。

c. 混和剤：水セメント比35%以下のものには、アーク系高性能AE減水剤およびレソ系空気連行補助剤を、水セメント比45%以上のものには、リソルボン酸系AE減水剤および樹脂酸塩系空気連行補助剤を用いた。

(2) 試料コンクリート

本検討に用いた試料コンクリートの種類、調合概要等を表-3に示す。

a. 種類：骨材種類、骨材の組合せ、再生骨材の普通骨材への混合割合（以下、置換率という）および水セメント比等を変化させて合計44種類の試料コンクリートを作製した。

b. 調合：水セメント比は、25, 35, 45, 55 および65%

※1. 各試験とも圧壊型のジョークラッシャーで破砕した
※2. 骨材の最大寸法は本実験以外は25mm

図-5 原コンクリートの4週圧縮強度と再生骨材、再生軽量骨材の骨材強度の関係

の5水準、細骨材率は、水セメント比、骨材の実積率および置換率等を考慮して原骨材使用の場合に対して1.1～3.3%の間で増減した。単位水量および混和剤の量は所要のスランブおよび空気量が得られるように調整した。
c. 目標スランブおよび空気量：再生コンクリートでは、スランブ18±2mm、空気量3±1%（ただし、凍結融解試験用は4.5±1.5%）とし、軽量コンクリートでは、スランブ21±2mm、空気量4.5±1.5%とした。

(3) 試験項目、試験体および試験方法

フレッシュコンクリートでは、スランブ、空気量および単位容積質量を、硬化したコンクリートでは気乾単位

容積質量、圧縮・引張・曲げ強度、乾燥収縮、中性化、塩分遮蔽性および凍結融解の諸試験を行った。試験体および試験方法等の概略を表-4に示す。

4-2 実験結果およびその検討

4-2-1 フレッシュコンクリートの性質

水セメント比の異なる5種類の再生コンクリートおよび4種類の再生軽量コンクリートのスランプと空気量について、それぞれ平均値およびその範囲で示したものが図-6である。

(1) スランプ

a. 再生コンクリート：表-3に示すように、 18 ± 2 cmのスランプを得るための単位水量は、再生骨材による置換率を細・粗骨材とも15%とした再生コンクリートにおいては、普通コンクリートに比べて、 $4 \sim 8 \text{ kg/m}^3$ 増加した。

一方、細・粗骨材とも30%または粗骨材のみ100%置換した場合、いずれも $8 \sim 12 \text{ kg/m}^3$ の増加となった。

また、目標スランプに対する変動は再生細骨材の置換率の増加に伴い、大きくなる傾向が認められた。

表-3 試料コンクリートの種類および調査概要

試料コンクリートの種類					調査概要				
コンクリートの区分および記号	原骨材の組合せ	骨材の記号	置換率(%)※	W/C	s/a	単位水量	単位容積質量	単位容積質量	単位容積質量
呼び名	記号	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
普通コンクリート	G N	G	N	0	0	2.5	37.5	174	696
				3.5	39.0	150	429		
				4.5	40.5	182	405		
				5.5	42.0	170	309		
				6.5	43.5	184	283		
再生コンクリート	R1-15	R1g+G	R1s+N	1.5	1.5	2.5	38.6	178	712
	R2-15	R2g+G	R2s+N	1.5	1.5	3.5	40.1	158	451
	R3-15	R3g+G	R3s+N	1.5	1.5	4.5	41.6	187	416
	R1-30	R1g+G	R1s+N	3.0	3.0	5.5	43.1	178	324
	R2-30	R2g+G	R2s+N	3.0	3.0	6.5	44.6	192	295
	R3-30	R3g+G	R3s+N	3.0	3.0	7.5	46.1	192	295
	R1-100	R1g	N	1.0	0	2.5	39.7	182	728
	R2-100	R2g	N	1.0	0	3.5	41.2	162	463
	R3-100	R3g	N	1.0	0	4.5	42.7	191	425
再生軽量コンクリート	RL1-15	RL1g+FL	RL1s+N	1.5	1.5	5.5	44.2	182	331
	RL2-15	RL2g+FL	RL2s+N	1.5	1.5	6.5	45.7	196	302
	RL3-15	RL3g+FL	RL3s+N	1.5	1.5	7.5	47.2	196	302
	RL1-30	RL1g+FL	N	3.0	0	2.5	40.8	182	728
	RL2-30	RL2g+FL	N	3.0	0	3.5	42.3	162	463
	RL3-30	RL3g+FL	N	3.0	0	4.5	43.8	191	425
	RL1-50	RL1g+FL	N	5.0	0	5.5	45.3	182	331
	RL2-50	RL2g+FL	N	5.0	0	6.5	46.8	196	302
	RL3-50	RL3g+FL	N	5.0	0	7.5	48.3	196	302
	RL4-15	RL4g+FL	RL4s+N	1.5	1.5	3.5	45.0	174	387
	RL4-30	RL4g+FL	N	3.0	0	4.5	46.5	170	309
	RL4-50	RL4g+FL	N	5.0	0	5.5	48.0	178	274
						6.5	49.5	183	282

※：容積比による。

b. 再生軽量コンクリート： 21 ± 2 cmのスランプを得るための単位水量は、再生軽量骨材による置換率を細・粗骨材とも15%および粗骨材のみ30%置換した再生軽量コンクリートでは、軽量コンクリート1種に比べて $2 \sim 5 \text{ kg/m}^3$ の増加となった。

一方、再生軽量粗骨材のみ50%置換した場合では、 $2 \sim 8 \text{ kg/m}^3$ の増加となった。

以上のことは、再生骨材および再生軽量骨材の特性、即ち、実積率の小ささと骨材の破断面のポアの多さによるもので、両者に起因する空隙を充填するためのモルタル分の増加と、骨材形状の悪さに起因するコンシステンシーの低下の2つが主な原因と考えられる。

(2) 空気量

表-4 本検討で行った試験項目、試験体および試験方法等の概略

試験項目	試験体形状 (cm)	試験方法	試験体数	養生条件案
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101	—	温度：20℃
	空気量	JIS A 1128	—	湿度：RH80%
コンクリート	単位容積質量	JIS A 1116	—	—
硬化後	単位容積質量	JIS A 1108	—	—
	圧縮強度	JIS A 1108	各3体	—
	引張強度	JIS A 1113	—	—
	曲げ強度	JIS A 1106	—	—
コンクリート	中性化※1	フェノール法	—	—
	塩分遮蔽※2	ファイン法	—	—
コンクリート	乾燥収縮	JIS A 1129	各2体	—
	凍結融解	ASTM C 666A	—	—
		JIS A 1127	—	—

※1：恒温湿槽：CO₂濃度：5%、温度：30℃、湿度：RH60%

※2：人工海水(NaCl 3%)と乾燥機(30℃、RH60%)中に12時間ずつ入替、24時間を1サイクルとした

図-6 各種コンクリートのスランプおよび空気量試験結果

再生骨材および再生軽量骨材の骨材修正係数は、それぞれ 0.2～0.4%, 1.5～2.4% の範囲にある。図-6 に示す空気量は、これらの骨材修正係数を差し引いた値である。

目標空気量に対する変動は、再生細骨材および再生軽量細骨材を置換した場合で大きくなる傾向がみられた。

4-2-2 硬化したコンクリートの性質

(1) 単位容積質量

再生コンクリートの気乾単位容積質量は、2.1～2.4 kg/ℓ で、普通コンクリートの 2.3～2.4 kg/ℓ に比べると、同等もしくは若干小さくなった。再生軽量コンクリートについては、1.8～2.0 kg/ℓ でほぼ軽量コンクリート 1 種の範囲にある。

各種コンクリートの練上がり時単位容積質量 (ρ_w) と気乾単位容積質量 (ρ_d) の関係を図-7 に示す。これによると、骨材種類および置換率に係わらず直線的な相関関係がみられる。

また、再生コンクリートでは練上がり時に比べて 0.01～0.07 kg/ℓ、再生軽量コンクリートでは 0.05～0.15 kg/ℓ の低減がみられた。

(2) 4 週圧縮強度

図-8 は、各種コンクリートの 4 週圧縮強度を骨材種類および置換率別にプールし、その平均した値をそれぞれ普通コンクリートおよび軽量コンクリートを基準としたときの強度比で示したものである。

a. 再生コンクリート：再生骨材の種類の影響は、水セメント比 25～65% の各平均値では、普通コンクリートに対して、R1 および R2 においては 90% 以上の強度が得られ、水セメント比 45～55% の範囲では、ほぼ同等の強度が得られている。

再生骨材の置換率の影響については、細・粗骨材ともに 30% 置換した R-30 において、若干低下する傾向がみられたものの相対的にはそれほど顕著ではない。

また、水セメント比 45% に限定すれば、粗骨材を全量置換した R-100 において高い強度が得られている。

b. 再生軽量コンクリート：再生軽量骨材の種類の影響については、水セメント比 55% および 65% の一部を除き、軽量コンクリートに比べて高い強度を示した。

再生骨材の置換率の影響については、粗骨材のみ 30% および 50% 置換した場合に高い強度が得られている。

図-9 は、各種コンクリートのセメント水比と 4 週圧縮強度の関係を示したものであり、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートともに直線的な相関関係がみられた。このことから、調査設計に際しては、この種のコンクリートでも、従来の水セメント比算定式の適用が可能といえる。

(3) 引張、曲げ強度

図-7 各種コンクリートの練上がり時単位容積質量と気乾単位容積質量の関係

図-8 各種コンクリートの 4 週圧縮強度試験結果

図-9 各種コンクリートのセメント水比と 4 週圧縮強度の関係

図-10に、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの4週圧縮強度と4週引張および4週曲げ強度との関係を示す。これによると、4週引張および4週曲げ強度ともに4週圧縮強度と高い相関がみられた。また、相対的には、再生コンクリートの4週曲げ強度が高強度域で普通コンクリートに比べ若干低下したが、他は普通コンクリートおよび軽量コンクリートとほぼ一致した。

(4) 乾燥収縮

図-11に各種コンクリートの乾燥収縮試験結果の一例として、水セメント比55%の場合における測定結果を示す。これによると、乾燥期間26週における乾燥収縮率は、再生コンクリートで $7 \sim 9 \times 10^{-4}$ 、再生軽量コンクリートで $8 \sim 11 \times 10^{-4}$ であり、1975年版JASS 5解説(2節)に示された「常用」コンクリートの品質の目標値「 8×10^{-4} 以下」を越えるものが多かった。

また、全体的な傾向として、原コンクリートの強度が小さい程、また、置換率が大きくなるのに伴って乾燥収縮率も大きくなる傾向にあった。

乾燥期間52週までの実測値をもとに回帰式により推定した再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの終局値は、それぞれ $10.5 \sim 18.5 \times 10^{-4}$ 、 $12.4 \sim 14.5 \times 10^{-4}$ の範囲内となり、前者で普通コンクリートに比べて1.1～2倍、後方で軽量コンクリートに比べて1.1～1.3倍程度大きな値となった。

なお、再生軽量コンクリートにおいては、細骨材・粗骨材ともに15%置換したものと、粗骨材のみ30%置換したものの終局収縮値はほぼ同程度であった。

図-12に、水セメント比および置換率の異なるコンクリートの単位水量と26週乾燥収縮率の関係を示す。

原コンクリートの強度が大きい再生骨材を用いた上で、細・粗骨材の置換率を30%以下とし、さらに、単位水量を 185 kg/m^3 以下にすることにより、 8×10^{-4} 以下に適合する収縮率のコンクリートが得られるといえる。

(5) 中性化および塩分遮蔽性

図-13に、水セメント比35%、55%の各種コンクリートの促進中性化および塩分浸透試験の結果を骨材種類および置換率別にプールして平均した値で示す。

これによると、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの中性化深さは普通コンクリートおよび軽量コンクリートと同程度であった。

水セメント比が中性化深さに及ぼす影響については、再生軽量コンクリートでより顕著であった。このように、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの中性化深さが、普通および軽量コンクリートのそれと同程度であった理由としては、単位セメント量が前者でやや多いことによるものといえる。

一方、塩分浸透深さについては、全体としては中性化と同様な傾向がみられた。しかし、再生軽量コンクリ

図-10 各種コンクリートの4週圧縮強度と4週引張強度および4週曲げ強度の関係

図-11 各種コンクリートの乾燥収縮試験結果の一例 (水セメント比55%)

トについては、水セメント比55%とした場合、再生コンクリートに比べて、全体的に大きな塩分浸透深さを示すことから、コンクリートの調合に際して水セメント比の設定には十分な配慮が必要である。

(6) 耐久性指数

図-14に、水セメント比55%の各種コンクリートの耐久性指数の測定結果を示す。再生コンクリートの耐久性指数は、300サイクル時でいずれも90%以上の値であり、普通コンクリートと同等であった。

これに対して再生軽量コンクリートでは90～120

サイクルで耐久性指数 60% 以下となった。

また、軽量コンクリートに比べて、凍結融解に対する抵抗性はやや劣るといえる。

5. 骨材物性とコンクリートの諸物性の関係

4-2-2. で示したように、硬化した再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの品質は、使用する再生骨材、再生軽量骨材の物性のみでなく、置換率を含んだ複数の因子の影響を受けることが確認できた。

従って、再生コンクリートの品質を定量的に推測するためには、これらを包含した相対的な品質を評価軸として、それとの相関性で検討するのが適切な方法といえる。

そこで本項では、骨材の物性と置換率を因子として求めた相対品質値を評価軸として、コンクリートの品質との相関性について検討を行うこととした。

5-1. 骨材の相対的な品質の求め方

骨材の相対的な品質については、(1)式に示すように、使用する骨材の物性値とその絶対容積の積の和を、使用した全骨材の絶対容積の和で除して求めている。(ただし、骨材強度等、骨材の品質値が粗骨材のみの場合は(2)式による。)

なお、骨材強度については、3-3(6)で述べたように実積率の影響が大きいことから、(3)式に示す方法で求めた値を相対品質値とした。

$$Q_t = \frac{[Q_vG \times a + Q_rG \times b] + [Q_vN \times c + Q_rN \times d]}{a + b + c + d} \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{[Q_vG \times a + Q_rG \times b]}{a + b} \quad (2)$$

$$Q_t' = Q_t \times \beta \quad (3)$$

ここに、

Q_t : 再生(軽量)コンクリートに用いた骨材の相対品質値

Q_t' : 実積率による補正品質値

Q_vG : 再生(軽量)コンクリートに用いた原粗骨材物性値

Q_vN : 再生(軽量)コンクリートに用いた原細骨材物性値

Q_rG : 再生(軽量)コンクリートに用いた再生(軽量)粗骨材物性値

Q_rN : 再生(軽量)コンクリートに用いた再生(軽量)細骨材物性値

a, b, c, d : コンクリート中の各骨材の絶対容積 (kg/ℓ)

β : 補正係数 ($\beta = K / [\text{各種骨材の実積率}]$)

K : 実験常数 (60 ± 5%)

※実験常数は、筆者らが行った実積率に関する一連の実験結果¹⁵⁾を統計処理して定めたもので、本検討では、60%を採用している。

5-2 圧縮強度との関係

4-2-2(2)で示したように、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの4週圧縮強度は、骨材の種類および置換率の影響が大きい。

図-15に、再生骨材の相対40t破壊値と再生コンクリートの4週圧縮強度の関係を示す。これによると、600 kgf/cm^2 を越えるものにおいては、相対40t破壊値が大きくなるのに伴い4週圧縮強度は小さくなる傾

図-1-2 各種コンクリートの単位水量と乾燥収縮率の関係

図-1-3 各種コンクリートの促進中性化および塩分浸透試験結果

図-1-4 各種コンクリートの凍結融解試験結果の一例 (水セメント比55%)

図-15 普通骨材、再生骨材の相対40t破砕値とコンクリートの4週圧縮強度の関係

図-16 軽量骨材、再生軽量骨材の相対10%破砕力とコンクリートの4週圧縮強度の関係

向を示し、相関係数も0.57~0.61と比較的明確な相関性がみられた。

また、図-16は、再生軽量骨材の相対10%破砕力と再生軽量コンクリートの4週圧縮強度の関係を示したものである。300kgf/cm²を越えると相対10%破砕力が大きくなるのに伴い4週圧縮強度も大きくなる傾向を示し、一部には相関性の高いものもみられたが、強度区分の影響は明確にはみられなかった。

図-17に再生骨材および再生軽量骨材の相対吸水率とそれら骨材を用いたコンクリートの4週圧縮強度の関係を示す。これによると、再生コンクリートは、300kgf/cm²を越えると相対吸水率が大きくなるのに伴い4週圧縮強度は小さくなる傾向がみられ、さらに600kgf/cm²を越えるものにおいてはその傾向が顕著になり、相関係数も0.59~0.63と比較的明確な相関性がみられた。一方、再生軽量コンクリートは、各水準ともに相対吸水率が大きくなるのに伴い4週圧縮強度は小さくなる傾向がみられ、一部には相関性の高いものもみられたが、強度区分の影響は明確にはみられなかった。

以上のことから、再生コンクリートおよび再生軽量コ

図-17 各種骨材の相対吸水率とコンクリートの4週圧縮強度の関係

図-18 各種骨材の相対吸水率とコンクリートの乾燥収縮率の関係

ンクリートの4週圧縮強度は、本方法で定量的に推測することが可能であるといえる。

5-3 乾燥収縮との関係

4-2-2(4)で示したとおり、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの乾燥収縮は、4週圧縮強度同様、骨材の種類およびその置換率の影響が大きい。

図-18に、再生骨材および再生軽量骨材の相対吸水率と、それら骨材を用いたコンクリートの26週乾燥収縮率の関係を示す。これによると、再生コンクリートでは、相対吸水率が大きくなるのに伴い乾燥収縮率も大きくなる傾向がみられ、相関係数も0.52~0.86と比較的高い。

また、相対吸水率1.8~3.5%の範囲では、相対吸水率1%の増加に対して、26週乾燥収縮率が0.4~1.0×10⁻⁴程度大きくなることが推測できる。このことから、本方法により再生コンクリートの品質で実用上最大の問題である乾燥収縮率についても定量的に推測できるといえる。

一方、再生軽量コンクリートでは、各水準ともに骨材の影響は明確にはみられなかった。

5-4 その他のコンクリート物性との関係

上記以外の骨材の相対品質値とコンクリート品質の関係については、本検討の範囲で明確な相関はみられなかった。

6. まとめ

再生骨材および再生軽量骨材の品質が再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの品質に及ぼす影響を解明するため、各因子との相関性について検討を行った結果、大要以下のような知見が得られた。

(1) 骨材物性のうち、吸水率、実積率および骨材強度は、再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの品質に与える影響が大きく、骨材品質を評価する物性として重要である。また、これらの諸物性は原コンクリートの圧縮強度の影響が大きい。

(2) 全体的に再生コンクリートおよび再生軽量コンクリートの品質は、乾燥収縮を除き、ほぼ普通コンクリートおよび軽量コンクリートの品質の範囲内にある。

従って、乾燥収縮低減を考慮して、適切な骨材の品質管理および調査設計を行うことにより、構造用コンクリートとしての適用が可能である。

(3) 相対40t破砕値および相対吸水率と再生コンクリートの4週圧縮強度には相関性がみられ、その傾向は高強度のコンクリートほど明確である。

(4) 相対吸水率と再生コンクリートの乾燥収縮率は比

較的明確な相関関係がみられた。従って、使用する骨材全体の物性を相対的に評価することにより、乾燥収縮率を定量的に推測することが可能である。

(5) 再生軽量コンクリートについては、相対10%破砕力および相対吸水率と4週圧縮強度の間で、やや相関がみられたが、他の相対品質値とコンクリートの品質の間には、明確な相関はみられない。

(6) 以上のことから、再生コンクリートの品質については、本検討で提案した相対品質値を用いることにより、コンクリートに要求される重要な品質について定量的に推測することが可能である。

謝 辞

本研究の実施にあたりまして、(財)建材試験センター 柳 啓氏、日本メサライト工業(株) 山下時夫氏および明治大学卒論生 須川英樹氏(1991年度)、松田和昭氏(1992年度)、小椋貴光氏(1993年度)、小林祐介氏(1994年度)に多大の御協力を賜りました。ここにそのことを記し、厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 菊池雅史、道正泰弘、安永 亮、増田 彰：「軽量コンクリート1種を破砕して得られた骨材を用いたコンクリートの基礎的性状に関する研究(その1~2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp369-372 1994.9
- 2) 菊池雅史、道正泰弘、安永 亮他：「再生軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性状に関する研究(その1~2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp409~412 1993.9
- 3) 菊池雅史、安永 亮他：「再生骨材およびそれを用いたコンクリートの総合評価に関する研究(その1~2)」日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) pp557~560 1992.8
- 4) Masafumi KIKUCHI, Akira YASUNAGA, Kyouji EHARA: The Total evaluation of Recycled Aggregate and Recycled Concrete, RILEM, Vol. 33, pp. 367-377, 1994
- 5) (財)建築業協会 建設廃棄物処理再利用委員会(委員長 笠井芳夫)「再生骨材コンクリートに関する研究」コンクリート工学 Vol. 16 pp18~31 1978.7
- 6) 向井 毅、菊池雅史：「特殊な材料を用いたコンクリート(その14)講座 再生骨材」コンクリート工学 Vol. 25 No. 1 pp103-108 1987.1
- 7) (財)建築業協会 建設廃棄物処理・再利用委員会：「コンクリート解体物の再利用に関する研究報告書」昭和51年3月
- 8) (財)国土開発技術研究センター「建設事業への廃棄物利用技術の開発に関する調査報告書」昭和61年3月
- 9) (財)国土開発技術研究センター「再生コンクリート利用技術の開発 平成5年度報告書」平成6年3月
- 10) 友沢史紀他：「完全リサイクルコンクリート(エコクリート)の研究」日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp341-342 1994.9
- 11) 平賀謙一、篠沢和久「軽量コンクリートの施工」丸善 昭和35年
- 12) 爾見軍治、嶋谷宏文：「コンクリート用骨材の破砕値とコンクリートの強度」セメント技術年報 Vol. 19 pp292-297 昭和41年
- 13) 西林新蔵他：「再生コンクリートに関する基礎的研究」セメント技術年報 Vol. 36 pp147-150 1982
- 14) 鳥居和之他：「再生骨材の舗装コンクリート用骨材としての適用性」コンクリート工学年次講演論文集 pp85-88 1984
- 15) 例えば、向井 毅、菊池雅史、市川信雄：「コンクリート破砕物およびそれを用いたコンクリートの性質に関する研究」セメント技術年報 Vol. 35 pp150-153 1981

(1995年3月10日原稿受理, 1995年5月9日採用決定)