標準コアおよび小径コアを用いた 人工軽量骨材コンクリート造建物の耐久性調査

寺田謙一^{*1}・石川雄康^{*2}・佐原晴也^{*3}・若林信太郎^{*4}

概要 竣工後約36年を経過した人工軽量骨材コンクリート造建築物について、直径50mmの標準的なコアと直径25mmの小径コアを用いて、圧縮強度、静弾性係数および中性化等の耐久性調査を行った。その結果、人工軽量骨材コンクリートが十分な耐久性を有することが確認できた。また、小径コアを用いて、人工軽量骨材についても普通コンクリートと同様に、構造体コンクリート強度および中性化を評価できることが確認できた。

キーワード：人工軽量骨材、コンクリート、耐久性、小径コア、圧縮強度、中性化、静弾性係数

1. はじめに

近年、阪神大震災に端を発した耐震安全性への関心、省資源あるいは社会資本の維持・保全という社会の要請を背景に、コンクリート構造物の耐久性に関する関心が急速に高まっており、実構造物における耐久性調査が多く行われている。これらの調査事例はいずれも普通コンクリートを対象としたもので、人工軽量骨材コンクリートを使用した構造物に関しては、人工軽量骨材が国内に導入されてからの歴史が浅いこと、また、普通コンクリートと比較すると物件数が少ないことなどから、ほとんど調査報告のないのが実情である。しかしながら、独立行政法人建築研究所から「長期間屋外暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状」¹⁾が報告されるなど、人工軽量骨材コンクリートの中長期的な耐久性に関する調査も実施され始めている。今般、竣工後約36年を経過した人工軽量骨材コンクリート造建築物の調査を実施する機会を得たので、圧縮強度および中性化等の耐久性調査を行った。

本調査では一般的に用いられる粗骨材の最大寸法の3倍の直径のコアを用いるのと併せて、構造部材に与える損傷が軽微なことから普通コンクリート構造物を対象に普及しつつある小径コア²⁾を用いた。すなわち、本調査は以下の2点を主眼において行った。

- ① 軽量コンクリートを使用した実構造物の耐久性の確認
- ② 小径コア手法の軽量コンクリートへの適用性の確認

2. 調査概要

2.1 調査対象施設の概要

写真-1に、調査対象施設の外観写真を示す。

- ^{*1} てらだ・けんいち／㈱TRD（正会員）
^{*2} いしかわ・ゆうこう／太平洋マテリアル㈱ 開発研究所（正会員）
^{*3} さわら・はるや／日本国土開発㈱ 技術研究所（正会員）
^{*4} わかばやし・しんたろう／㈱錢高組 技術研究所（正会員）

表-1に、調査対象施設の概要を示す。施設は琵琶湖の湖畔に立地している。

表-2に、使用コンクリートの種類および施工の概要を示す。

設計基準強度は18N/mm²であるが、コンクリートの配合に関しては不明である。上部構造に、粗骨材寸法が20mm以下の軽量コンクリート1種が用いられている。基礎部分のコンクリートは普通コンクリートである。

コンクリートはミキサを用いて現場で混練されており、骨材は現場に野積みされていたようである。コンクリートの運搬は一輪車で行い、打ち込んだ後竹棒を用いて締め固められている。打設時期、1回の打設量および養生方法などは不明である。

写真-1 調査施設の外観

表-1 調査施設の概要

建 物 名	太平洋セメント㈱琵琶湖保養所
建 設 地	滋賀県大津市下阪本1-32-7
竣 工 年	1966年6月、調査時点での経過年数36年
建物概要	a) 構造 本館：RC造2階建て 共通館：木造平屋建て
	b) 建築面積 219.16 m ²
	c) 床面積 1階：218 m ² 、2階：121 m ² 、計339 m ²

表-2 コンクリートの種類および施工の概要

コンクリート種類	上部構造：軽量コンクリート1種 ($F_c=18\text{ N/mm}^2$, 配合詳細は不明) 基礎部：普通コンクリート
粗骨材	人工軽量骨材アサノライト (20 mm 以下)
細骨材	野洲産川砂
製造	現場ミキサ練り (0.4 m ³)
コンクリートの運搬	ミキサ→一輪車受け→打込み場所
締固め (充てん方法)	竹棒による締固め

表-3 コア採取箇所および本数

位置 記号	コンクリ ート種類	階数	部位	環境 条件	方角	標準 コア	小径 コア
W-1	軽量	1F	壁	外部	北面	1体	2体
W-2	軽量	1F	壁	内部	南面	1体	3体
W-3	軽量	2F	壁	内部	北面	1体	2体
W-4	軽量	2F	壁	内部	北面	1体	2体
W-5	軽量	2F	壁	内部	南面	1体	3体
C-1	軽量	1F	柱	外部	北面	1体	2体
C-2	軽量	1F	柱	外部	東面	1体	4体
C-3	軽量	2F	柱	外部	東面	1体	2体
S-1	軽量	2F	床	外部	(東側)	1体	2体
N-1	普通	1F	基礎	外部	東面	1体	—

2.2 調査箇所

表-3 に、コア採取箇所および本数を示す。

写真-2 に、コア採取状況を示す。写真-3 に、標準コアを示す。また、写真-4 に、小径コアを示す。

1 階および 2 階の壁、柱、スラブおよび基礎の合計 10 箇所から、直径 50 mm のコア (以下、標準コアと呼ぶ) を各 1 本採取した。直径を 50 mm としたのは、壁厚さが 15 cm 程度であり、直径 100 mm では高さ h と直径 d の比 $h/d=2$ が確保できなかったためである。小径コアは、直径を 25 mm とし、標準コアの近傍から 2~4 本採取した。

2.3 試験項目および試験方法

(1) 標準コア

1) 圧縮強度試験

標準コアの圧縮強度試験は、JIS A 1107「コンクリー

写真-2 コア採取状況 (W-3)

写真-3 標準コア (C-1)

写真-4 小径コア (C-1)

Investigation on Durability of Artificial Light-weight Aggregate Concrete Structure by Standard Size Cores and Small Size Cores

By K. Terada, Y. Ishikawa, H. Sawara and S. Wakabayashi

Concrete Journal, Vol. 42, No. 10, pp. 29~34, Oct. 2004

Synopsis Authors have investigated on compressive strength, Young's modulus and neutralization with standard size cores and small size cores sampled from artificial light-weight aggregate concrete structure aged 36 years. From the results artificial light-weight aggregate concrete is durable, and estimation method for strength and neutralization of concrete in structures by small size cores is applicable not only to normal weight concrete but also artificial light-weight aggregate concrete.

Keywords : artificial light-weight aggregate, concrete, durability, small size core, compressive strength, neutralization, Young's modulus

トからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

2) 静弾性係数試験

静弾性係数試験は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して行った。

3) 中性化深さ

中性化深さは、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して行った。なお、測定は側面を測定面とする方法と割裂面を測定面とする二つの方法で行った。なお、側面を測定面とする場合は、測定は現地においてコア採取後直ちに行った。

4) 断面観察

コアの断面を顕微鏡で観察し、ひび割れ等の有無を確認した。

(2) 小径コア

1) 圧縮強度

圧縮強度試験用供試体は、採取したコアより、原則として大きな粗骨材が含まれる部分避けてキャッピング後の高さ h と直径 d の比 h/d が、 $h/d=2$ となるように切り出した後、供試体の両端面に硫黄キャッピングを施して作製した。

小径コアの圧縮強度試験は、最大容量 2 000 kN の一軸圧縮試験機を用いて、載荷速度 0.25 N/mm²/s の荷重制御で行い、荷重は容量 50 kN の荷重計で測定した。

2) 中性化深さ

現地において採取したコアを用いて、フェノールフタレイン法により、側面を 4 点測定した。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度

(1) 調査部位ごとの圧縮強度平均値

表-4 に、圧縮強度および静弾性係数の試験結果を示す。

図-1 に、調査部位ごとの圧縮強度を示す。

調査部位ごとの小径コアと標準コアの圧縮強度差は、平均値と比較した場合、 -4.6 N/mm^2 から 20.2 N/mm^2 の範囲にある。 20.2 N/mm^2 と最も差の大きい C-3 における標準コアは目地部分から採取したコアである。C-3 で採取した 2 体の小径コアの強度がほぼ等しいことから考えて、目地部から採取した標準コアに収縮による微細なひび割れ等の局部的な欠陥があったものと推定される。そこで、これ以降は、C-3 の標準コア強度を除いて検討を行うこととする。

(2) 小径コア強度と標準コア強度の関係

図-2 に、C-3 を除く小径コア強度と標準コア強度の関係を示す。小径コア強度は、調査部位ごとの平均値とした。図中の実線は線形回帰式を示し、点線はこれまでに提案した小径コアによる普通コンクリートの構造体コンクリート強度の推定式 (1)³⁾ において、 $h/d=2$ とした場合の小径コア強度と標準コア強度の関係式である。

図-1 調査位置ごとの圧縮強度

$$\hat{X} = x - \left(a - b \frac{h}{d} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\hat{X}$: $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ コア強度の推定値 (N/mm²)

x : 小径コア強度 (N/mm²)

$\frac{h}{d}$: 小径コア供試体の高さ h と直径 d の比

a, b : 実験により定められた定数

(ここでは、 $a=12.9, b=6.0$)

図-2 小径コア強度と標準コア強度の関係

図からわかるように、小径コア強度と標準コア強度の相関は強く、軽量コンクリートにおける小径コアと標準コアの関係式は、普通コンクリートの関係式とほぼ一致する。よって、軽量コンクリートについても、普通コンクリートと同様の方法で、小径コアによる構造体コンクリート強度の推定が可能である。

(3) 建物の圧縮強度の評価

表-4 に、普通コンクリートの関係式 (1) を用いて小径コア強度を標準コア強度に換算したものを補正後強度として示す。小径コアに関してはこの補正後強度を用いて、施設の圧縮強度の評価を行う。

1) 施設全体の強度

表-5 に、圧縮強度の母平均の推定結果を示す。

標準コアで推定した施設全体の圧縮強度の母平均は、 $38.3 \pm 9.5 \text{ N/mm}^2$ であり、95%信頼限界の下限値は 28.8 N/mm^2 である。おなじく、小径コアで推定した母

表-4 圧縮強度および静弾性係数の試験結果

コンクリート種類	調査位置 記号	標準コア			小径コア圧縮強度 (N/mm ²)					
		圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (g/cm ³)	静弾性係数 (kN/mm ²)	試験値			補正後		
					全試料	部位ごとの 平均値	小径コアと 標準コアの 圧縮強度差	全試料	部位ごとの 平均値	小径コアと 標準コアの 圧縮強度差
軽 量	W-1	27.1	1.94	12.5	33.7	32.2	5.1	32.9	31.3	4.2
					30.8			29.7		
	W-2	21.7	1.94	14.4	22.8	21.5	-0.2	21.6	20.6	-1.1
					17.4			16.4		
					24.6			23.7		
	W-3	53.4	1.97	19.8	54.8	53.2	-0.2	53.9	52.2	-1.2
					51.5			50.6		
	W-4	41.7	1.97	18.9	45.8	48.5	6.8	44.6	47.5	5.8
					51.3			50.3		
	W-5	34.9	1.97	17.2	43.4	39.8	4.9	42.3	38.8	3.9
					40.3			39.4		
					35.7			34.7		
	C-1	52.3	1.99	18.6	58.9	47.7	-4.6	57.9	46.8	-5.5
					50.9			50.0		
					33.3			32.6		
	C-2	42.5	1.92	17.9	48.7	40.9	-1.6	47.7	40.0	-2.5
					33.2			32.2		
					42.1			41.3		
					39.7			38.8		
	C-3	28.4	1.93	12.6	49.7	48.6	20.2	48.7	47.5	19.1
					47.5			46.4		
	S-1	32.5	1.92	16.7	28.9	34.0	1.5	28.2	33.1	0.6
					35.0			34.0		
					37.9			37.0		
	試料数	9	9	9	24	9	9	24	9	9
	平均値	37.2	1.95	16.5	39.9	40.7	3.5	39.0	39.8	2.6
	標準偏差	11.1	0.03	2.7	10.8	10.1	7.2	10.7	10.1	7.2
	試料数 ^{*1)}	8	8	8	22	8	8	22	8	8
	平均値	38.3	1.95	17.0	39.1	39.7	1.5	38.2	38.8	0.5
	標準偏差	11.3	0.03	2.4	10.9	10.3	3.9	10.9	10.3	3.8
普 通	N-1	23.5	2.32	24.8	—	—	—	—	—	—

*1) C-3を除いた場合

平均は $39.8 \pm 7.7 \text{ N/mm}^2$ であり、95%信頼限界の下限值は 32.0 N/mm^2 である。表中に母平均の差の検定結果を示すが、標準コアと小径コアの母平均に有意差は認められない。

また、ばらつきは大きいものの、表-4に示したように、いずれの供試体においても圧縮強度は設計基準強度である 18 N/mm^2 以上であり、構造体の強度としては十分良好な耐久性を維持している。

2) 採取位置ごとの圧縮強度

表-5中に、標準コアおよび小径コアをまとめて、採取位置ごとの圧縮強度の母平均を推定した結果を示す。試料数が少ないこともあり、統計的には有意とはならないものの、採取階、部材および方角の違いによる圧縮強

度の差が大きい。採取階での違いは、骨材が野積みされていたことから、打設時の骨材の含水状態の変動の影響が考えられる。また、柱と壁の違いは、断面の大きさの違いによる締固め効果および打設後の乾燥程度の違いなどの影響が考えられる。方角での違いの原因はあきらかではないが、日射等の気象条件の違いにより、打設後初期の乾燥程度に違いが生じたことも考えられる。

3.2 静弾性係数

図-3に、静弾性係数と標準コア強度の関係を示す。図中の曲線は、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準」に示される静弾性係数の推定式に、供試体の単位容積質量の平均値 1.95 t/m^3 を代入したものである。文献4)によれば、日本建築学会規準式と実測値の相関

表-5 圧縮強度の母平均の推定

施設全体の圧縮強度推定値		
	標準コア	小径コア
試料数	8	9
平均値	38.3	39.8
標準偏差	11.3	10.1
95%信頼区間	±9.5	±7.7
95%信頼限界の下限値	28.8	32.0
母平均の差の検定	$t_0=0.289<t(0.05, 15)=2.131$	

階ごとの圧縮強度推定値		
	1F	2F
試料数	8	9
平均値	35.3	43.0
標準偏差	11.8	8.1

部材ごとの圧縮強度推定値		
	壁	柱
試料数	8	7
平均値	36.9	43.3
標準偏差	13.5	6.0

環境条件ごとの圧縮強度推定値		
	外部	内部
試料数	9	8
平均値	39.2	38.8
標準偏差	8.7	12.6

方角ごとの圧縮強度推定値		
	北面	南・東面
試料数	8	9
平均値	44.0	34.6
標準偏差	10.0	9.0

図-3 静弾性係数と標準コア強度の関係

において、軽量コンクリート1種の場合には0.76を乗ずることによって、推定式と実測値の一致精度が向上するとされている。図中に実線で示したものが、規準式に0.76を乗じたものである。実測値は実線によく一致しており、このことから、竣工後36年経過した軽量コンクリートにおいても、材齢1年程度までの軽量コンクリートを試験して得られる静弾性係数とほとんど変わらない

写真-5 標準コア断面の顕微鏡写真

と判断できる。

3.3 顕微鏡観察

写真-5に、標準コア断面の顕微鏡写真を示す。コア断面にひび割れ等の異常は認められなかった。コンクリートの静弾性係数は経年とともに、乾燥やマイクロクラックの発生等により低下することがあるとされているが、本調査における軽量コンクリートにおいては、ひび割れも認められないこと、および静弾性係数が1年程度の材齢初期のレベルを維持していることなどから、劣化はほとんど進行していないと判断される。

3.4 中性化

(1) 施設全体の中性化深さ

表-6に、中性化深さの測定結果を示す。標準コアの割裂面での測定値でみると、屋外環境下のモルタル仕上げの箇所での中性化深さは最大で7mm程度で、中性化はほとんど進行していない。中性化抑制効果の小さい仕上げを施してある屋内のW-2およびW-5における中性化深さは、12.5mmおよび20.0mmであったが、かぶり厚さの範囲内であり、鉄筋の発錆等は認められず、健全な状態であった。

(2) 小径コアと標準コアの中性化深さの関係

図-4に、調査位置ごとの中性化深さを示す。図中の小径コアによる中性化深さは、調査部位ごとの平均値で示した。

小径コアによる中性化深さと割裂面で測定した標準コアによる中性化深さの差は最大で7.1mmであり、試験結果はほぼ一致する。

また、小径コアの1調査部位から無作為に1個抽出した中性化深さの平均値は6.0mmで、調査部位ごとの平均値5.7mmとほぼ等しいことから、小径コアを用いて中性化深さを測定する場合には、標準コアと同じ試料数を用いれば実用上問題はないといえる。

以上のことから、圧縮強度と同様に、中性化深さにつ

表-6 中性化深さの測定結果

コンクリート種類	調査位置 記号	標準コア						小径コア		
		仕 上 げ		割裂面中性化深さ (mm)		側面中性化深さ (mm)		側面中性化深さ (mm)		
			厚さ (mm)	最大値	平均値	最大値	平均値	採取位置ごとの平均値	標準コア割裂面との差	1個無作為抽出
軽 量	W-1	モ ル タ ル	25	9.0	7.1	0	0	0.0	-7.1	0.0
	W-2	砂ずり(漆喰) ^{*1)}	30	22.0	20.0	12	11	21.6	1.6	23.1
	W-3	モ ル タ ル	7	7.0	4.0	13	7	5.3	1.3	8.7
	W-4	モ ル タ ル	5	5.0	4.4	10	6	5.8	1.4	3.7
	W-5	砂ずり(漆喰) ^{*1)}	30	14.0	12.3	12	9	16.6	4.3	19.0
	C-1	モ ル タ ル	25	1.0	0.6	0	0	0.0	-0.6	0.0
	C-2	モ ル タ ル	25	1.5	0.5	2	1	0.0	-0.5	0.0
	C-3	モ ル タ ル	25	1.5	0.7	2	1	1.8	1.1	1.9
	S-1	モ ル タ ル	50	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
	試料数	—	—	9	9	9	9	9	9	9
	平均値	—	—	6.8	5.5	5.7	3.9	5.7	0.2	6.2
	標準偏差	—	—	7.3	6.8	5.9	4.4	8.0	3.1	8.9
普 通	N-1	—	7	0	0	3	1	—	—	—

*1) 消石灰、土、すさが入った空隙の多い下地であった。

図-4 調査位置ごとの中性化深さ

いても小径コアを用いて実用的な精度で評価できると考えられる。

4. ま と め

本調査により得られた知見を以下にまとめる。

(築造後 36 年を経過した軽量コンクリートの耐久性)

- 1) 壁、柱および床から採取したコア供試体の圧縮強度は、いずれの供試体においても設計基準強度 18 N/mm² 以上を有しており、構造体の強度としては十分良好な耐久性を維持していた。
- 2) 各供試体の静弾性係数は材齢 1 年程度までの軽量コンクリートを試験して得られる静弾性係数とほぼ同程度で、経年による低下は認められず、十分良好な耐久性を維持していた。
- 3) 中性化深さは、仕上げの種類により異なり、モルタル仕上げの部分での中性化はほとんど進行してい

なかった。

中性化抑制効果の小さい仕上げの部分では、20 mm 程度の中性化が認められたが、かぶり厚さの範囲内であり、鉄筋の発錆は認められなかった。

(小径コア手法の軽量コンクリートへの適用性)

- 4) 軽量コンクリートにおける小径コアと標準コアの強度の関係は、普通コンクリートの場合とほぼ同様であり、軽量コンクリートについても普通コンクリートと同様の方法で、小径コアにより構造体コンクリート強度の推定が可能である。
- 5) 中性化深さに関しても、小径コアと標準コアの試験値がほぼ等しいことから、小径コアによって中性化深さを実用的な精度で評価できる。

5. お わ り に

本調査は、太平洋セメント(株)より施設の提供を受け人工軽量骨材 (ALA) 協会およびソフトコアリング研究会 (株) 銭高組、前田建設工業(株)、日本国土開発(株)で構成)が共同して行ったものである。ご協力いただいた方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大久保孝昭・長谷川拓哉・濱崎 仁・杉山 央・土村克郎・友澤史紀・飛坂基夫：長期間暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状，日本建築学会構造系論文集，No. 561，pp. 23～29，2002. 11
- 2) 寺田謙一・谷川恭雄・中込 昭・佐原晴也：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法，コンクリート工学，Vol. 39，No. 4，pp. 27～32，2001. 4
- 3) 若林信太郎・谷川恭雄・中込 昭・佐原晴也・寺田謙一：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法に関する研究（その 2：構造体コンクリート強度推定式の設定），日本建築学会構造系論文集，No. 561，pp. 9～18，2002. 11
- 4) 人工軽量骨材 (ALA) 協会：技術資料 No. 5，1988. 5