

論文

[1047] 高強度軽量コンクリートの力学的性状に及ぼす各種要因の影響

正会員○椎葉大和 (福岡大学建築学科)

本田 悟 (福岡大学建築学科)

荒木 恵 (福岡大学建築学科)

1. はじめに

近年、都市における住宅確保の一手段としての鉄筋コンクリート造による集合住宅の高層化傾向に関心が集まり、大手建設業を中心として高層RC造の研究・開発意欲は非常に旺盛である。このRC造の高層化に伴いコンクリート強度も高強度化し、既存の高層RC造の設計基準強度の最高値は480kgf/cm<sup>2</sup>程度まで使用され、階数も40階を越え、軒高が130m近い建築物も出現している。また、従来の高強度コンクリート用骨材は主に砕石であり、建築重量の軽減を考えた場合に軽量骨材の使用が有効であるが、軽量骨材の使用例が少ないために、その性状に関する研究[1]も少ないのが実状である。従って、本報では、主に水セメント比(5水準)、養生方法(4及び2水準)及び供試体の形状(2水準)などの要因が高強度コンクリートの力学的性状に及ぼす影響について得られた実験結果をまとめて、若干の比較検討を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料、調合と混練及び供試体作製と養生方法

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを、骨材(表1)は海砂とフライアッシュ焼成の造粒型の軽量骨材[2]を用いた。また、混和剤は相溶性を考慮して同一メーカーの高性能AE減水剤、AE剤(空気量調整用)及び流動化剤を用いた。なお、柱形供試体の水セメント比30%の場合のみ国内産シリカフューム(表2)を内割りでセメント重量の10%混入した。

(2) 調合と混練

コンクリート(軽量1種)の基本調合は空気量5%、単位水量は水セメント比に関係なく170kg/m<sup>3</sup>、細骨材率は各水セメント比(5水準)につき各々39~43%まで定めた。また、スランプは高性能AE減水剤により15cm程度としたベースコンクリートを、さらに流動化剤後添加により21cm程度まで増大させた。なお、表

表1 骨材の物理的性質

項目 骨材	比重		吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	粗粒率
	絶乾	表乾				
海砂	2.55	2.58	0.85	1.64	64.3	2.18
人工軽骨	1.38	1.58	14.2	0.87	63.3	6.50

表2 シリカフュームの物理化学的性質

比重	化学成分 (%)					pH
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	
2.24	89.5	0.4	0.9	1.5	0.2	8.67

表3 実施調合での混和剤添加率と混練時の性状

水セメント比 (%)	混和剤添加率 (C×wt%)			混練時の性状			
	高AE減水剤 (%)	AE剤 (%)	流動化剤 (%)	混練直後		流動化後	
				スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
30	0.95	0.12	0.15	12.5	4.6	22.0	5.1
35	0.60	0.02	0.25	12.0	4.9	20.0	4.9
40	0.30	0.01	0.30	14.5	5.0	20.5	4.8
45	0.10	0.01	0.30	15.5	5.2	20.0	5.1
50	0.30	0.01	0.30	17.0	4.8	20.0	4.6

3には実施調合時の混和剤添加率及び混練直後と流動化後のスランプと空気量を示す。

### (3) 供試体作製と養生方法

標準供試体としてφ10×20cmを用い、養生は標準水中養生、実験室外での現場水中養生及び実験室内での現場封かん養生と現場気中養生の4水準とした。次に、コア供試体採取用の図1に示す柱形供試体は、実験室内での現場封かん養生及び現場気中養生の2水準とした。

また、柱形供試体用コンクリートは強制練りミキサで製造し、打込み高さは一層約80cmと設定し、各層ごとに棒状及び型わくバイブレータで振動締固めて作製した供試体は打込み4日後に脱型を行なった。その際、現場封かん用供試体は脱型直後に養生塗膜剤を塗布した後、布製養生シート及びビニールで覆って養生を行なった。

なお、標準供試体及び柱形供試体の作製期間は8月上旬から9月中旬にかけての約1ヶ月間である。

## 3. 実験結果とその検討

### 3.1 標準供試体と養生方法との関係

#### (1) 圧縮強度とヤング係数 (図2, 図3)

養生方法及び水セメント比別に材令と圧縮強度の関係を図2に、また、水セメント比(30~50%)及び材令(7~91日)における割線ヤング係数( $E_{1/3}$ )と圧縮強度の関係を図3に示す。

図2より、低水セメント比ほど材令28日以後の圧縮強度増進率が高く、特に水セメント比30%では材令91日で25%の強度増を示し、気中養生を除いて養生による影響は少ない。さらに、水セメント比30%の同一調合条件で碎石使用〔3〕及び軽量骨材使用の場合の圧縮強度を気中養生を除いた3養生で比べると、材令28日強度では碎石の場合は軽量骨材の場合の約17%増を示すが、以後の強度増進率は低くなり、材令91日では使用骨材による差はほとんど生じていない。また、軽量骨材の圧縮強度に対する効果は、水セメント比30~40%で気中養生の場合を例にとると、他の3養生に比べて気中養生では水分の十分な供給なしで材令28日強度が12%程度増加している。さらに、同一条件で碎石使用〔3〕では、他の3養生の場合に比べて気中養生での圧縮強度の低下が認められる。これらのことから、軽量骨材使用による圧縮強度の増加は、軽量骨材特

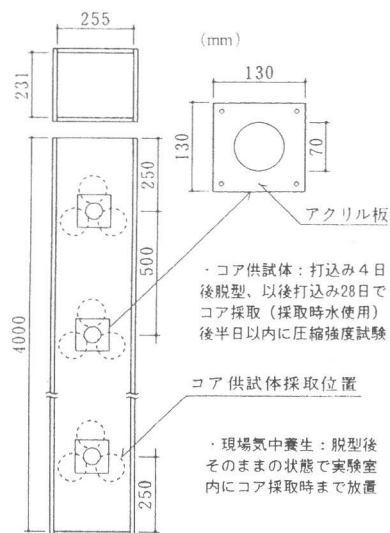


図1 柱形供試体及び合板型枠

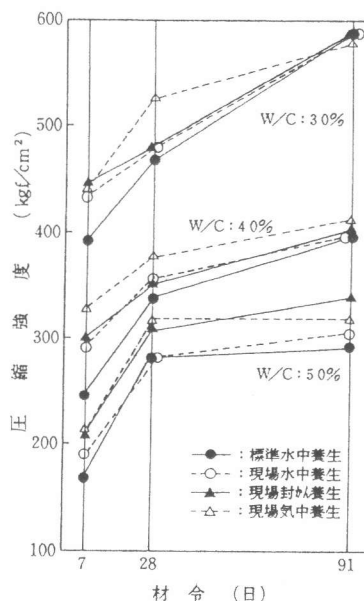


図2 水セメント比の違いによる圧縮強度と材令

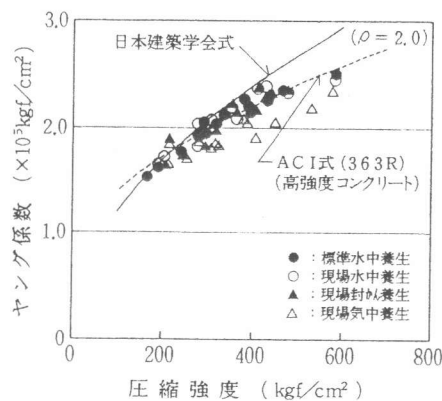


図3 圧縮強度とヤング係数

有の適当な水分のモルタル中への放出に基づいた自己養生作用〔4〕によると考えられる。

なお、引張強度の場合も高強度化に伴い強度の頭打ちが生じ、水セメント比30%の場合は最大45kgf/cm<sup>2</sup>程度で、養生方法別の引張強度/圧縮強度は標準水中養生では1/10~1/12に対して、他の3養生では1/10~1/14程度であって、碎石使用の場合〔3〕とほとんど比率に差はない。

図3より、圧縮強度とヤング係数の関係は碎石使用の場合〔3〕と同様に、軽量骨材の場合も圧縮強度の高強度化に伴いヤング係数の増加傾向が弱まり、圧縮強度とヤング係数の関係は図3に示すACI(363R)式が建築学会式より適合性が高いことが認められる。全般にヤング係数は $2.5 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>程度でほぼ定常状態に近づき、その現象は圧縮強度が400kgf/cm<sup>2</sup>を越えるあたりから生じてくる。特に軽量骨材も碎石使用の場合〔3〕と同様に、気中養生の場合は封かん養生に次いで最もヤング係数が低く、他の3養生(標準水中、現場水中及び封かん養生)に比べて $0.15 \sim 0.35 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>(平均約18%)程度低い結果となっている。

### (2) 超音波速度及び反発硬度と圧縮強度(図4)

圧縮強度に対する超音波速度(音速)及び反発硬度の関係を、養生方法別に材令(7~91日)及び水セメント比(30~50%)を含めて図4に示す。

全般に圧縮強度に対する音速及び反発硬度ともに、図4の一次回帰式で示されるような比較的良好な相関関係が成立し、音速での相関係数が反発硬度の場合より高い。また、養生方法別では気中養生の場合が、碎石使用の場合〔3〕と同様に軽量骨材でも他の3養生に比べて比較的相関が低い。このことは、気中養生に伴ってコンクリート中の含有水分が逸散することに起因していると思われる。なお、圧縮強度が400~500kgf/cm<sup>2</sup>に至ると、音速及び反発硬度ともにほぼ頭打ちとなり、その際の音速は $4.3 \times 10^3$ m/s、反発硬度は50程度である。この頭打ちの結果から、コンクリートの高強度化につれ、非破壊試験による圧縮強度推定の適用範囲が問題となってくる。

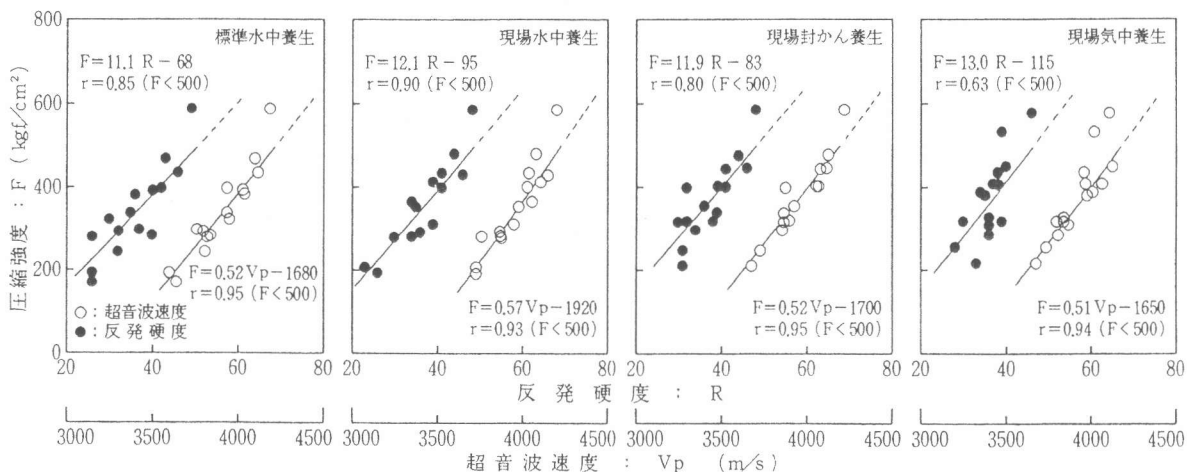


図4 養生方法に伴う圧縮強度と超音波速度及び反発硬度

### (3) 熱伝導率(図5)

材令28日と91日における水セメント比及び養生方法別の熱伝導率を図5に示す。

全般に熱伝導率は材令や水セメント比よりも養生方法による影響が大きい。特に気中養生の熱伝導率を他の3養生の場合の平均値と比べると、10~20% ( $0.14 \sim 0.33$ kcal/m·h·°C)程度の熱伝導率の低下が認められる。使用骨材による影響としては、長期材令での4養生における熱伝導率

は、碎石使用の場合[3]は1.6~2.2kcal/m・h・℃の範囲内にあるのに対して、軽量骨材では1.2~1.6kcal/m・h・℃と熱伝導率の低下により断熱性は向上している。

### 3. 2 柱形供試体による強度分布と養生方法との関係

#### (1) 柱形供試体のコア圧縮強度の分布 (図6)

養生方法の異なる図1の柱形供試体 (231×255×400mm) より採取した材令28日のコア供試体 (φ10×20cm) について、水セメント比別に供試体の高さによる圧縮強度の分布状態を図6に示す。

全般的に水セメント比の低下に伴うコンクリート強度の増加につれ、柱上部と下部の圧縮強度の差が小さくなっている。コア採取高さ8ヶ所での圧縮強度の平均値(100%)を基準として、

各々(シリカフューム混入の柱は除外)の柱上部と下部の強度を養生別に比較すると、封かん養生では上部で80~96%、下部で100~122%、同様に気中養生では上部で82~94%、下部で101~128%と柱上・下部で強度差が生じ、水セメント比によっては30%前後の強度差も認められる。特に水セメント比30%(シリカフューム混入)と50%の比較では、水セメント比30%で封かん養生の場合は柱上部が643kgf/cm<sup>2</sup>、下部が659kgf/cm<sup>2</sup>、気中養生の場合は柱上部が627kgf/cm<sup>2</sup>、下部が643kgf/cm<sup>2</sup>と、両養生の柱上・下部の強度差は16~19kgf/cm<sup>2</sup>にすぎない。しかし、水セメント比50%の場合は、柱上部は下部に対して気中養生では36%、封かん養生では21%の圧縮強度の低下が認められる。

#### (2) コア圧縮強度と供試

体形状(標準供試体、コア供試体)及び養生方法(図7)

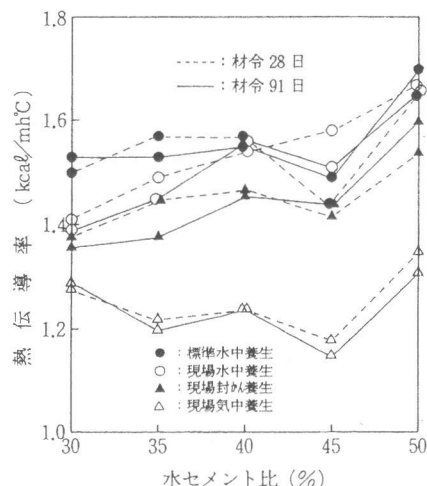


図5 熱伝導率と水セメント比

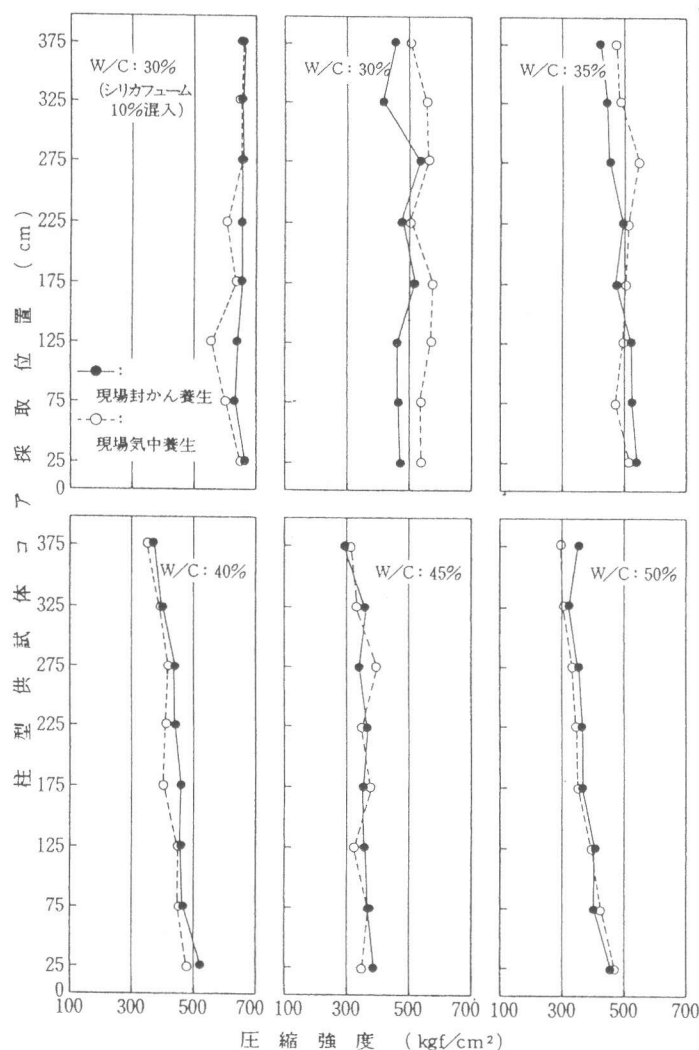


図6 コア供試体による圧縮強度の高さ分布

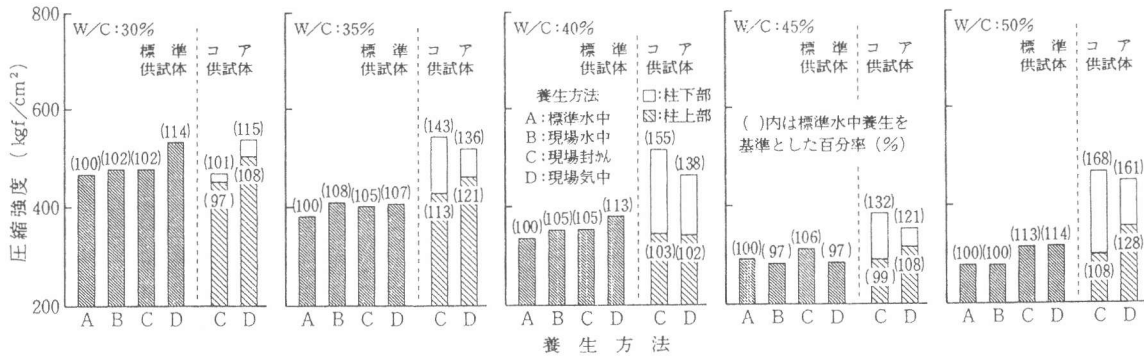


図7 供試体の形状（標準供試体、コア供試体）及び養生方法が圧縮強度に与える影響

材令28日での標準供試体とコア供試体の圧縮強度及び標準水中養生による標準供試体の強度を基準（100%）とした場合の各養生ごとの供試体の強度比率を図7に示す。

標準水中養生による圧縮強度比の傾向としては、標準水中の場合に比べて他の3養生の強度比率が若干高く、気中養生では10%前後の強度増を示している。さらに、標準及びコア供試体を比べると、コア供試体の水セメント比及び養生を含めた柱上・下部の強度比率の平均は、柱上部で109%、下部で137%と、標準供試体の標準水中養生の圧縮強度より高く、かつ、柱上部と下部の強度差が大きい。

(3) 養生方法とコア圧縮強度 (図8)

材令28日での各供試体高さごとのコア圧縮強度の養生方法別の比較を図8に示す。

特に水セメント比30%の場合は、シリカフューム混入では水分の保持により比較的ポゾラン反応が期待できる封かん養生、無混入では気中養生での圧縮強度の発現が高い。

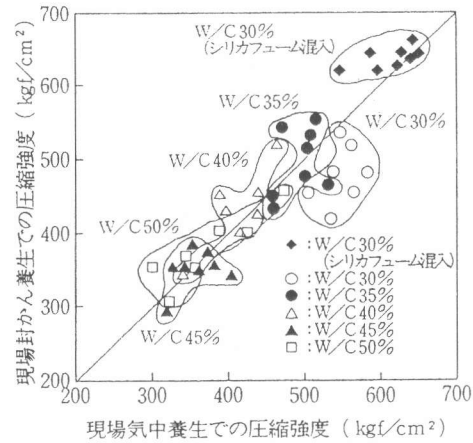


図8 養生方法とコア圧縮強度

(4) コア圧縮強度とヤング係数 (図9)

養生方法ごとに材令28日での採取高さにおける圧縮強度とヤング係数の関係を図9に示す。

圧縮強度500kgf/cm²前後で図3と同様に、ヤング係数の頭打ちが生じ、かつ、圧縮強度とヤング係数の関係はACI (363R) 式の適合性が高い。なお、シリカフューム混入の場合もACI式の延長線上に位置している。

(5) 超音波速度及び反発硬度とコア圧縮強度 (図10)

材令28日における水セメント比、養生方法及び高さごとの圧縮強度に対する超音波速度（音速）及び反発硬度の関係を図10に示す。

音速及び反発硬度と圧縮強度との間には各々

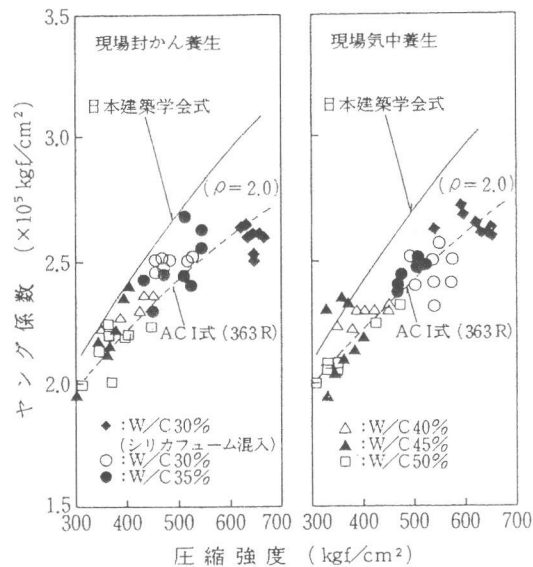


図9 ヤング係数とコア圧縮強度

図10に示す一次回帰式が成立するが、音速に比べて反発硬度での相関が低い。全般に標準供試体の場合(図4)と同様に、圧縮強度の増加に伴い音速及び反発硬度の増加傾向は圧縮強度500kgf/cm<sup>2</sup>付近から頭打ちを生じる。このように、コンクリートは強度の増加につれて岩石に近づき、非破壊試験に頭打ち現象[5]が生

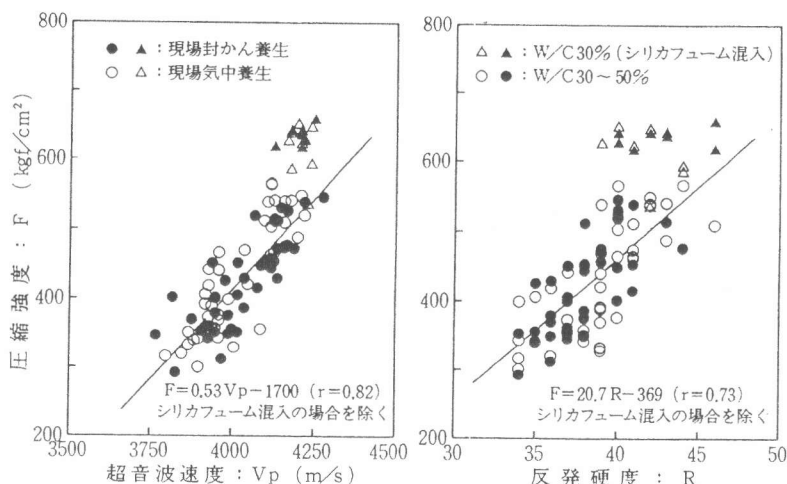


図10 コア圧縮強度に対する超音波速度及び反発硬度

じることから、現今の超高層RC造の圧縮強度と非破壊試験結果との適合性は低くなる。

#### 4. まとめ

(1) 標準供試体では高強度化につれて長期材令(28日~91日)での圧縮強度増進率が増加している。特に気中養生では軽量骨材特有の自己養生効果により、他の養生の場合より強度が若干高い。また、熱伝導率は養生方法による影響が大きく、1.2~1.6kcal/m·h·°C程度の範囲内にある。

(2) 柱形供試体では全般に柱下部に対して上部の圧縮強度が低いが、水セメント比の減少につれて柱上・下部の強度差が減少している。しかし、供試体の形状による比較では、標準供試体を標準水中養生を行なった場合よりコア供試体による封かん及び気中養生の場合の強度が高い。

(3) 標準供試体及びコア供試体ともに圧縮強度とヤング係数の関係では頭打ちが生じ、両者の関係はACI式が適合している。また、圧縮強度と非破壊試験の関係は高強度化につれて非破壊試験結果の頭打ち現象により、圧縮強度と非破壊試験結果との適合性は低下してくる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究C）の助成によるものである。

#### 参考文献

- 1) 椎葉大和・本田悟・荒木恵：各種セメントを用いた高強度軽量コンクリートの諸特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，13-1，pp.33~38，1991
- 2) 杉田英明・御手洗泰文・椎葉大和：石炭灰軽量骨材の品質とコンクリートの諸特性について，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，pp.53~58，1989
- 3) 椎葉大和・本田悟・荒木恵・高村正励：高強度コンクリートの物性に関する実験的研究（その1），日本建築学会九州支部研究報告，第32号，pp.53~56，1991
- 4) 佐治泰治・松藤泰典・重藤和之・ビクター・サンペル：開放性空隙を有する多孔質骨材を用いたコンクリートの暑中適用性について（その1），日本建築学会九州支部研究報告，第29号，pp.13~16，1986
- 5) 十代田知三・園原秀俊：コンクリート非破壊試験に関する若干の考察，セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，第18回，pp.43~48，1991