

論文 高性能軽量コンクリートの開発研究

山本祐基子*1・柿崎正義*2・枝広英俊*3・藤井和俊*4

要旨：RC建築物の多機能化・形状の多様化により、高性能のコンクリートが要求されるようになってきた。本研究では高強度の軽量コンクリートで、かつ、高流動コンクリートの開発を目的とし、使用材料及び調合がフレッシュ及び硬化コンクリートの性質に及ぼす影響について検討を行った。その結果、適当な高性能A/E減水剤を使用することによって、経時変化の少ないワーカブルなコンクリートが得られた。W/C=23%の圧縮強度は、シリカフェーム混合セメントを使用したコンクリートで640~780kgf/cm²、高ビークライト系低熱セメントを使用したコンクリートで580~670kgf/cm²が得られた。

キーワード：高性能A/E減水剤，軽量コンクリート，スランプフロー，圧縮強度

1. はじめに

近年、都市開発に伴い建築物の高層化が進み、要求される性能も高度化・多様化し、設計基準強度600kgf/cm²程度の高層RC建築物が構築されてきた。これらに使用されるコンクリートは、高性能A/E減水剤の進歩により低水セメント比の領域でも混練が可能となった。最近では、コンクリート工事の省力化、品質向上を目的とした高流動コンクリートが開発され各方面で研究がなされている。また、軽量コンクリートを高強度化することにより部材断面が小さくなり、固定荷重の低減となり、施工時のトータルコストに大きなメリットがあると考えられる。

本研究は、圧縮強度が600~900kgf/cm²程度の高強度の軽量コンクリートで、かつ、高流動性を目的としており、低熱タイプのセメントにシリカフェームをセメント重量の10%混合したもの(以下:Sセメント)、高ビークライト系低熱セメント(以下:Lセメント)を用いて、材料面及び調合面の要因がフレッシュ及び硬化コンクリートの性質に及ぼす影響について明らかにしたものである。

以下に実験内容及び実験目的を示す。

シリーズⅠ：高性能A/E減水剤の種類による影響…高い流動性を持ち、かつ、強度、耐久性についても通常のコンクリートと同等以上のコンクリート(本論文では、高性能コンクリートとする)に適すると思われる銘柄・主成分の異なる6種類の混和剤を用いて、諸性質を検討した。

シリーズⅡ：セメントの種類による影響…シリーズⅠから選定された混和剤を用いて、S・Lセメントに適する混和剤の選定を行った。

シリーズⅢ：細骨材の種類による影響…シリーズⅡで選定された混和剤を使用し、細骨材3種類(川砂，砕砂，人工軽量細骨材)の違いがコンクリートの性質に及ぼす影響を検討した。

シリーズⅣ：粗骨材かさ容積による影響…粗骨材かさ容積の変化がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響を検討し、細骨材別に適当なかさ容積の選定を行った。

シリーズⅤ：水セメント比による影響…シリーズⅣで選定された粗骨材かさ容積に基づいて、水

*1 三菱建設(株)技術研究所、研究員(正会員)

*2 鹿島技術研究所、第四研究部専門部長、工博(正会員)

*3 芝浦工業大学助教授 工学部建築学科(正会員)

*4 三菱建設(株)技術研究所、副所長(正会員)

セメント比 (18, 23及び28%) がコンクリートの性質に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に実験に使用した材料と物性を示す。

2.2 コンクリートの調合

表-2 にコンクリートの計画調合を示す。ただし、スランプフロー 600±50mm, 空気量 3±1.5%を目標とした。

2.3 コンクリートの練混ぜ方法

図-1 に練混ぜ方法を示す。使用材料は20℃, 60%R.H.の室内で保存し、コンクリートの練混ぜは20℃, 60%R.H.の室内で、容量50ℓの強制練りパン型ミキサで行った。なお、Sセメントでは、所定のスランプフローを得るために、混和剤を分割添加した方が有効であったため、Lセメントの場合とは異なる添加方式を採用した。

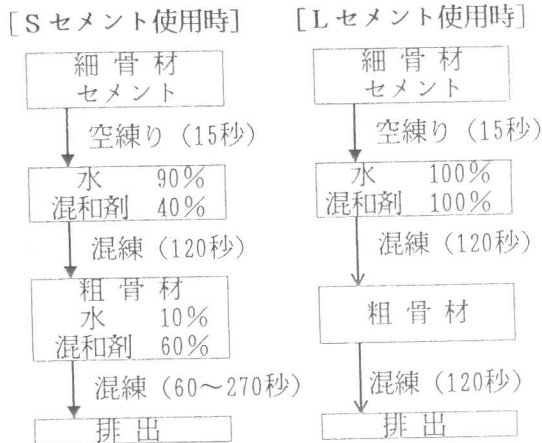


図-1 コンクリートの練混ぜ方法

2.4 コンクリートの試験項目及び方法

表-3 に試験項目及び方法を示す。

表-3 コンクリートの試験項目及び方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	・JIS A 1101による試験器を使用 ・突き回数は各層11回 ・長短2辺の平均値測定
50cmフロー流動時間 (フロータイム)	・コンクリートの拡がりか50cmに到達した時の時間で、4点の平均値
圧縮強度	・JIS A 1108による ・供試体はφ10×20cm(2層6回突き) ・凝結時間が異なるためSセメントコンクリートは翌日Lセメントコンクリートは翌々日脱型
静弾性係数	・コンプレッションメーターを使用 ・最大圧縮強度の1/3
ポアソン比	・コンプレッションメーターを使用 ・最大圧縮強度の1/3における縦歪と横歪の比

表-1 使用材料と物性

使用材料	種類及び物性	記号
セメント	低熱タイプのセメントにシリカフェューム (BET法による比表面積: 20.3m ² /g) をセメント重量の10%混合したものの比重: 3.01, 比表面積: 6000cm ² /g	S
	高ビーライト系低熱セメント 比重: 3.22, 比表面積: 3110cm ² /g	L
粗骨材	膨張頁岩系人工軽量粗骨材 裁断径: 1.59, 吸水率: 2.2, 最大径: 15mm	-
細骨材	栃木県鬼怒川産川砂 裁断径: 2.60, 吸水率: 2.51, 粗粒率: 2.65, 最大径: 2.5mm	R
	栃木県葛生産硬質砂岩砕砂 裁断径: 2.63, 吸水率: 1.53, 粗粒率: 2.98, 最大径: 2.5mm	C
	膨張頁岩系人工軽量細骨材 裁断径: 1.80, 吸水率: 10.7, 粗粒率: 2.68, 最大径: 2.5mm	M
混和剤	高性能AE減水剤	a, b, c, d
	ポリカルボン酸系 (4種類)	e
	フタリソ系 (1種類)	f
	7ミンスルホン酸系 (1種類)	-
	空気量調整剤	-

表-2 コンクリートの計画調合¹⁾

シリーズ	セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材の種類	粗骨材かさ容積 (%)	細骨材率 (%)	重量(kg/m ³)			混和剤の種類	
						セメント	細骨材	粗骨材		
I	S	23	R	0.53	42.5	674	653	541	a~f	
						674	692	541	a, c, e	
III	S	23	R	0.53	42.5	674	653	541	c	
			C			674	660	541		
			M			674	452	541		
	L	23	R	0.53	43.9	674	692	541	a	
			C			674	700	541		
			M			674	479	541		
IV	S	23	R	0.49	46.9	674	720	499	c	
						674	689	518		
						674	653	541		
						674	621	560		
						674	729	499		
						674	697	518		
			C			674	660	541		
						674	629	560		
						M	674	499		499
							674	477		518
							674	452		541
							674	430		560
674	478	541								
674	518	518								
V	S	18	R	0.53	35.2	878	478	541	c	
			C			878	518	518		
		23	R			674	653	541		
			C			674	697	518		
			M			674	452	541		
			R			543	770	541		
28	C	543	813	518						
	M	543	533	541						

[注] 1) 単位水量はW/C10%は158kg/m³, 23%は155kg/m³, 28%は152kg/m³.
2) 骨材は表乾状態で示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 シリーズ I : 高性能 A E 減水剤の種類

図-2 に練上がりからの経過時間とスランプフロー (以下: フロー) の関係を示す。混和剤 a, c, d のコンクリートのフローは、混練後60分まで練上がり直後の70%以上を保持した。混和剤 b のフローは混和剤 f と同様な傾向な傾向を示し、15分以降徐々に低下し、60分後には直後の50%まで低下した。混和剤 e のフローは30分後まで増大し、90分後においても直後の80%以上を保持し、前記に比べて特異な性状を示した。

図-3 にフロータイムとスランプフローの関係を示す。全般的にフローが大きくなるに従い、フロータイムは短くなる傾向であった。混和剤 a ~ e 使用時は、フロー値480~650mmでフロータイム8~20秒であった。混和剤 f のフロータイムは5~11秒と短いにも拘らず、作業上から判断すると粘性の高い傾向であった。

図-4 に高性能 A E 減水剤の種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係を示す。材齢28日の圧縮強度は 640~730kgf/cm²で、いずれの混和剤コンクリートも材齢28日に対する7日の強度比は、83~91%と大きい。また、静弾性係数は、26.5~28.7×10⁴kgf/cm²であった。

以上の結果から、ハンドリング・フロー及び強度性状の良い混和剤 a, c, e が優位であると考えられる。

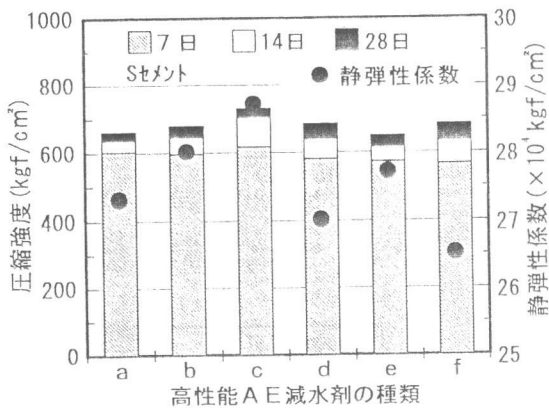


図-4 高性能 A E 減水剤の種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係

3.2 シリーズ II : セメントの種類

図-5 に練上がりからの経過時間とスランプフローの関係を示す。Sセメントを使用したコンクリート (以下: Sセメントコンクリート) のフローは、Lセメントを使用したコンクリート (以下: Lセメントコンクリート) と比較して、いずれの混和剤を用いた場合も経時による低下が小さい。混和剤 e を使用した Lセメントコンクリートは、粘性が高く、作業上の取り扱いが困難であった。

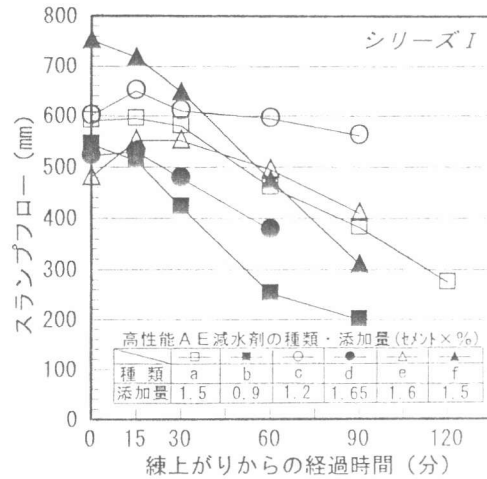


図-2 練上がりからの経過時間とスランプフローの関係

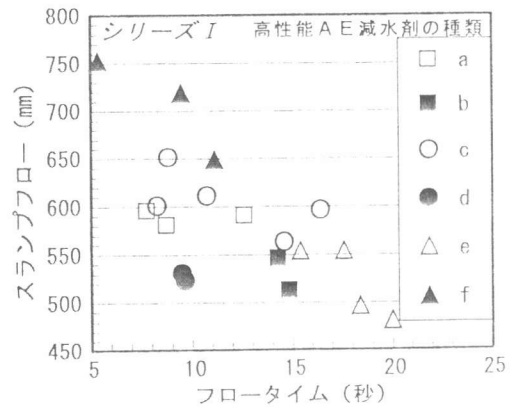


図-3 フロータイムとスランプフローの関係

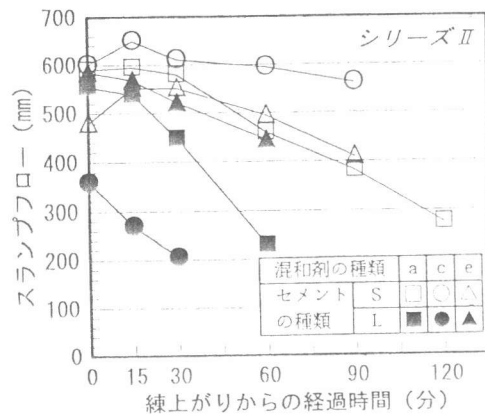


図-5 練上がりからの経過時間とスランプフローの関係

図-6にフロータイムとスランプフローの関係を示す。これより、フロータイムはSセメントコンクリートは短く(7~20秒)、Lセメントコンクリートは長い(35~155秒)という傾向が認められ、Sセメントコンクリートは目標フロー 600±50mmでは5~20秒であった。

図-7にセメントの種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係を示す。圧縮強度は、材齢28日で比較すると、SセメントコンクリートはLセメントコンクリートと同等か、やや大きい傾向を示した。Lセメントコンクリートは材齢7日以降の伸びが大きく、これはセメント中のC₂S含有量が普通ポルトランドセメント(25%)に対し[1]、Lセメントには多いため(50%)であると考えられる。

以上の結果から、Sセメントでは混和剤cがフロー及び強度性状が良好であり、Lセメントでは混和剤aが作業上の取り扱いが良好で、かつ、目標とした強度が得られた。

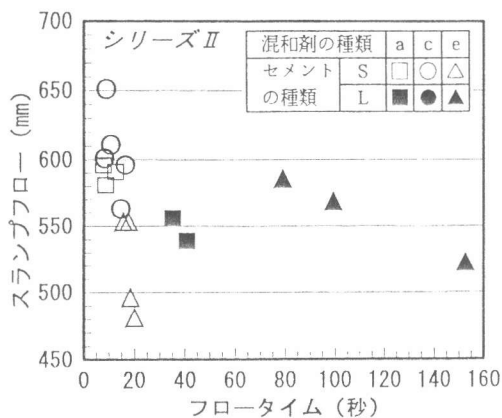


図-6 フロータイムとスランプフローの関係

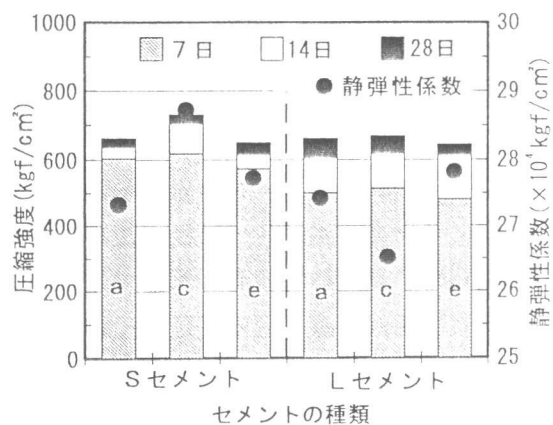


図-7 セメントの種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係

3.3 シリーズIII：細骨材の種類

図-8に練上がりからの経過時間とスランプフローの関係を示す。これより、細骨材の種類によるフロー変化の差は小さく、フローの経時変化に及ぼす影響も認められなかった。

図-9にフロータイムとスランプフローの関係を示す。同一フローで比較すると、両セメントにおいて砕砂のコンクリートは、人工軽量細骨材の場合よりもフロータイムが短い。いずれの細骨材のフロータイムも、フロー値500~600mmのとき、SセメントコンクリートよりLセメントコンクリートの方が長くなった。このためLセメントの場合には、水セメント比の最低値に限界があると考えられ、使用する混和剤の成分などに対する特性を考慮する必要があると考えられる。

図-10に細骨材の種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係を示す。川砂及び砕砂コンクリートの材齢28日圧縮強度は640~730kgf/cm²とほぼ等しく、人工軽量細骨材を使用した場合は580~660kgf/cm²と若干低い。このことは、静弾性係数においても同様であった。

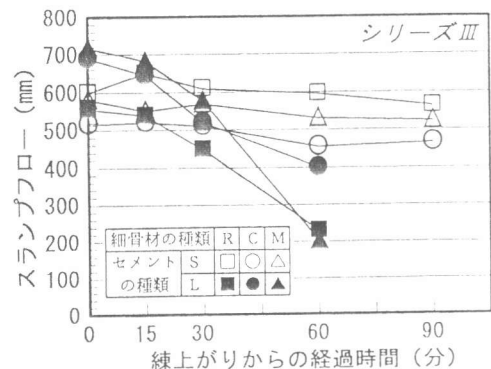


図-8 練上がりからの経過時間とスランプフローの関係

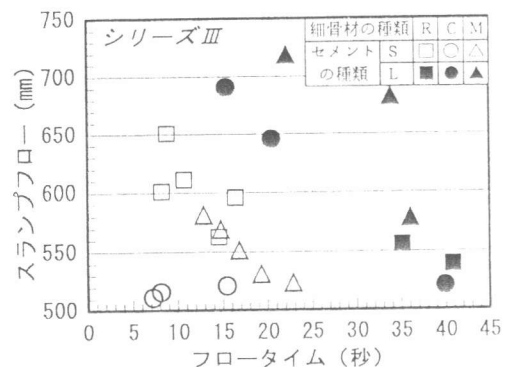


図-9 フロータイムとスランプフローの関係

3.4 シリーズIV：粗骨材かさ容積

図-11に粗骨材かさ容積とスランプフローの関係を示す。川砂コンクリートのフローは粗骨材かさ容積 $0.49 \sim 0.53 \text{ m}^3/\text{m}^3$ では約570mmで、 $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ でやや小さな値を示した。また、砕砂を使用した場合は粗骨材かさ容積 $0.51, 0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ で目標とするフローを示したが、 $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ では粗骨材が目立ち、必ずしもワーカビリティが良好ではなかった。さらに、人工軽量細骨材を使用した場合は $0.53 \text{ m}^3/\text{m}^3$ で目標とするフローを示し、かつ、分離の無いコンクリートが得られた。

以上の結果から、目標フローが得られて、かつ、分離が認められない粗骨材かさ容積は、川砂が $0.53 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、砕砂が $0.51 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、人工軽量細骨材が $0.53 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であると考えられる。

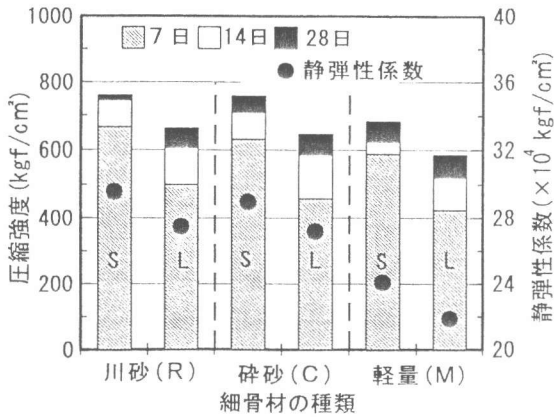


図-10 細骨材の種類と圧縮強度及び静弾性係数の関係

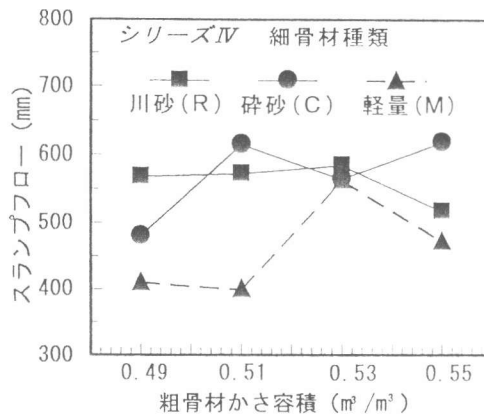


図-11 粗骨材かさ容積とスランプフローの関係

3.5 シリーズV：水セメント比の違い

図-12にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は材齢の増加及び水セメント比の減少に伴う強度の増加が小さくなる。特に、人工軽量細骨材を使用したコンクリートは、骨材自体の強度が小さいため、材齢28日になると水セメント比による強度の差が小さい。この傾向は川砂、砕砂を使用したコンクリートにも認められた。養生方法による圧縮強度の違いは顕著には認められなかった。

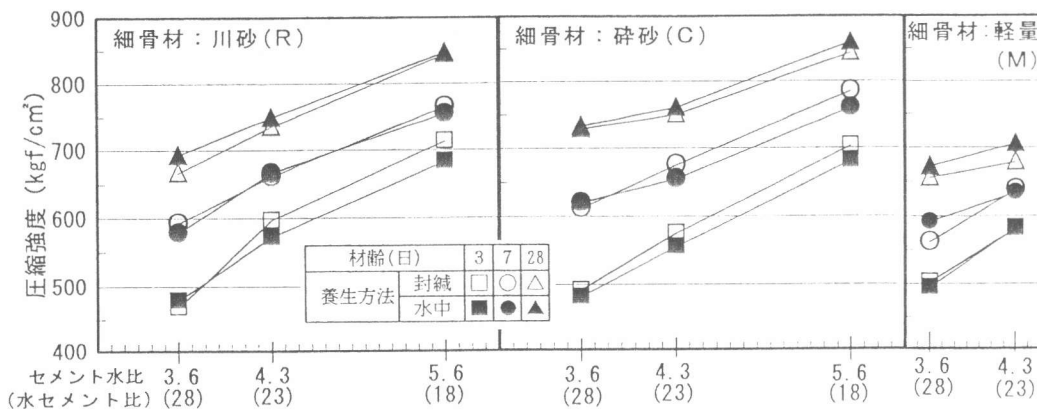


図-12 セメント水比と圧縮強度の関係

図-13に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い大きくなる。人工軽量細骨材のコンクリートは圧縮強度 $700 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ のとき $23.5 \times 10^4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ で、川砂、砕砂コンクリートのそれより25%小さい。この傾向は通常のコンクリートの場合[2]と同じであった。

図-14に圧縮強度とポアソン比の関係を示す。水セメント比18%のコンクリートのポアソン比は、0.22～0.23と高強度ほど高く、23及び28%のコンクリートでは、0.18～0.22の広い範囲に分布しており、既往研究の傾向[3][4]と同じであった。

図-15にセメント水比と比強度との関係を示す。人工軽量細骨材を使用したコンクリートの比強度は、川砂、砕砂のそれより2～4%大きく、高強度コンクリートほど大きくなる傾向を示した。

5. まとめ

本実験の範囲内で、以下の事項が明らかとなった。

- 1) Sセメントコンクリートは、Lセメントコンクリートと比べてスランプフローの持続性が高い。
- 2) Lセメントコンクリートは低い水セメント比(23%)で使用すると、Sセメントコンクリートと比べて、スランプフローが同程度のときフロータイムも長く、扱いにくくなる傾向があるため、セメント・混和剤両者の関連特性を考慮した上で使用する必要がある。
- 3) フローの経時変化は細骨材の種類に拘らず、Sセメントを使用した場合は小さく、Lセメントは大きい。
- 4) Sセメントに適する混和剤を使用した場合、コンクリートのスランプフローは、練上がり後90分でも直後の80%以上を保持することが可能であった。また、粗骨材かさ容積にも影響を受け、川砂は $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$ 、砕砂は $0.51\text{m}^3/\text{m}^3$ 、人工軽量細骨材は $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$ のとき最大フローが得られた。
- 5) 水セメント比23%における圧縮強度は、Sセメントコンクリートでは $680\sim 760\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、Lセメントコンクリートでは $590\sim 650\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。また、水セメント比18%は約 $850\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、28%は川砂及び砕砂を使用した場合 $650\sim 750\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、人工軽量細骨材の場合 $650\sim 700\text{kgf}/\text{cm}^2$ が得られた。

[謝辞] 本研究を実施するにあたって、芝浦工業大学工学部建築学科の宮島、渡邊両名にご協力を頂きました。ここに付して感謝の意を表します。

[参考文献] 1)セメント協会：セメントの常識、1992.2 2)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1991 3)近藤泰夫・坂静雄：コンクリート工学ハンドブック、卓倉書店、1960 4)小阪義夫：各種の骨材を用いたコンクリートのポアソン比について、日建築学会東海支部研究報告、1968.6 5)友澤史紀ほか：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集A 中国、pp.497～498、1990.1

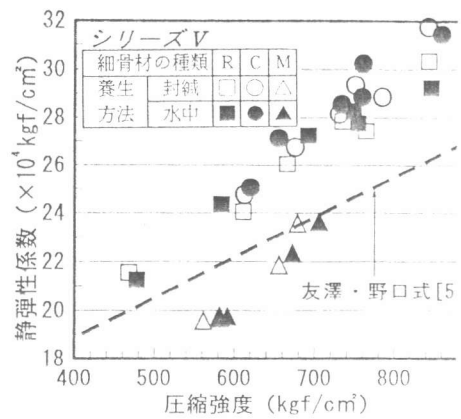


図-13 圧縮強度と静弾性係数の関係

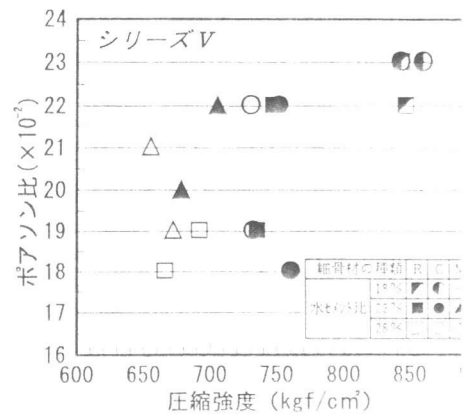


図-14 圧縮強度とポアソン比の関係

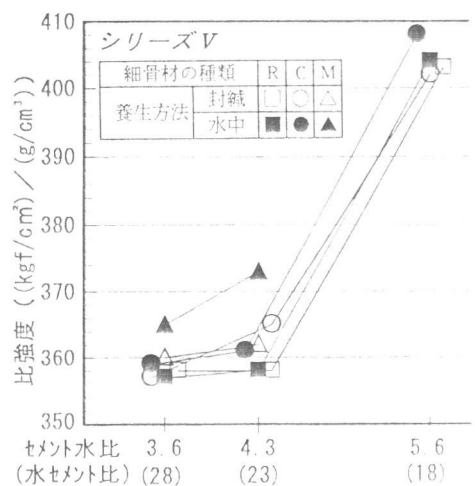


図-15 セメント水比と比強度の関係