

論文 高強度コンクリートの粗骨材品質判定法に用いる基準モルタルの検討

山本 明雄^{*1}・瀬戸 謙一郎^{*1}・片桐 冬樹^{*1}・大友 忠典^{*2}

要旨: 本研究では圧縮強度が 100 MPa を超える高強度コンクリートを対象として、基準モルタルと評価対象粗骨材からなるコンクリートの早期の圧縮強度により粗骨材の品質の適否を判定する試験法を開発している。ここでは、セメント系基準モルタルについて検討したもので、適切な材料・配合・養生方法等を設定することで、基準モルタルの圧縮強度は、材齢 1 日で 100 MPa、材齢 3 日で 150 MPa が得られることが明らかとなり、実験結果に基づいて基準モルタルの試案を提案した。

キーワード: 高強度コンクリート、粗骨材、品質評価、温水養生、圧縮強度、モルタル

1. はじめに

近年、PC 斜張橋や LNG タンク等の土木構造物の大型化が進み、加えて建設コストの低減への要求が高まるなか、コンクリートの高強度化の必要性が高まっている。筆者らも、地下連続壁を対象に設計基準強度 80 MPa という高強度を満足する高性能コンクリートの開発 [1] を行い、現在実工事への適用段階に入っている。

高強度コンクリートの圧縮強度は粗骨材の品質に大きく依存し、良質の粗骨材を使用することが 100 MPa レベル以上の高強度コンクリートを製造するための必要不可欠な条件であることは広く知られている。したがって、骨材の品質を合理的に迅速に判定する技術の確立が極めて重要である。過去の研究 [2] を概観すると、比重、吸水率、破碎値、表面粗さなどの骨材の物理的性質に基づいて判定する方法と、対象とする骨材を用いたコンクリートの試験の結果から判定する方法に大別される。前者の方法はコンクリート試験を行わずに済むことからより望ましいものの、未だ確実な判定基準を示す段階に至っていないようである。後者は圧縮強度という特性値を測定することから、直接的で説得力のある判定法であって、この方法に沿った品質基準（案）[3] が示されている。

この方法に類する試験法の検討を著者らも進めており、それは基準モルタルを設定し、この基準モルタルと評価対象粗骨材からなるコンクリートの圧縮強度によって粗骨材の品質を判定しようというものである。その場合、骨材品質を迅速に判定するためには、基準モルタルはできるだけ短時間で要求されるコンクリート強度以上に達する必要があり、ここでは、汎用性の高い材料・設備を用いて短時間に 100 ~ 150 MPa の圧縮強度が得られる基準モルタルの材料・配合、締固め方法および養生方法について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 基準モルタルの目標性能

モルタルと粗骨材の弾性係数が大きく異なる場合、モルタル-粗骨材間の剛性の違いに起因する応力集中が起こるとの報告 [4] があり、樹脂等の有機系材料を結合材として使用するとセメントコンクリートとは異なった性状を示すことが推測されることから、本研究においては無機系

*1 鹿島建設(株)技術研究所研究員、工修（正会員）

*2 鹿島建設(株)技術研究所主管研究員、（正会員）

材料を基準モルタルの結合材として取上げることとした。

本研究で設定した基準モルタルの目標性能を以下に示す。

- ・圧縮強度 100～150 MPaが短期間（材齢 3 日以内）で得られること
- ・特殊な材料、装置を必要とせず、供試体の作製、養生、試験が容易なこと

2. 2 使用材料

使用材料を表-1に示す。結合材は普通、早強およびビーライト高含有の3種のポルトランドセメントを、細骨材は高強度コンクリートに適することが確認されている碎砂と硅砂を用いた。混和剤は、低水セメント比でモルタルの粘性が小さいポリカルボン酸系高性能AE減水剤とモルタルの空気量を極力抑えるための消泡剤を使用した。

2. 3 検討項目の概要

本研究で取上げた検討項目を以下に示す。各項目における要因と水準を表-2に示す。

①締固め方法に関する検討：

W/Cの低下に伴ってモルタルの見掛けの粘性が高まるため、強度試験用供試体の作製の際に連行される気泡が抜けず、強度に悪影響を及ぼすことが懸念される。そこで、締固め方法が圧縮強度に及ぼす影響を確認するため、突き棒による方法（JIS A 1132）とバイブレータによる方法を比較した。後者は、テーブルバイブルータ（振幅：約1mm、振動数：50Hz）上で供試体を作製するもので、モルタルを2層に分けて打込み、各層20秒間振動を加えて締固めた。

②養生方法に関する検討：

強度発現を促進させるための簡易な方法として温水養生を取り上げ、早期に目標レベルである100～150 MPaの圧縮強度が

得られるような最適養生温度のパターンを検討した。ただし、事前に行った凝結試験から始発時間を考慮して、温水養生の開始は練上り8時間経過後とした。

③結合材の種類、水セメント比の検討：

上記2項目の試験結果を基に選定した養生方法および締固め方法を用いて、結合材の種類、水セメント比および材齢と圧縮強度との関係について検討した。

④硅砂の使用に関する検討：

使用的細骨材は良質で品質の安定したもので、かつ入手し易いものであることが望ましい。ここでは、国内で標準的な細骨材として相馬産硅砂を取り上げ、粒度分布を変化させて、フレッシュ時の性状および強度発現性を検討した。

表-1 使用材料

	種類	備考
結合材	普通ポルトランドセメント	3社混合、比重:3.14
	早強ポルトランドセメント	3社混合、比重:3.16
	ビーライト高含有セメント	T社製、比重:3.22, C ₂ S=55%
細骨材	硬質砂岩碎砂	比重:2.62, 吸水率:1.03%, 実積率:65.8%, 粗粒率:2.88
	相馬産硅砂	比重:2.59, 吸水率:0.72%
減水剤	高性能AE減水剤	F社製、ポリカルボン酸系
	消泡剤	K社製、シリコン系

表-2 各項目における要因と水準

検討項目	材料	W/C	検討内容		
締固め方法	早強	25%	[使用機械]		
	碎砂	—	突き棒 バイブルータ		
養生方法	早強	25%	[養生温度パターン]		
	ビーライト	20%	20°C(8hr)+40°C一定(拂) 20°C(8hr)+70°C一定(拂)		
	碎砂	—	20°C(8hr)+40°C(3hr)+70°C(拂) 20°C標準種姓		
結合材の種類、W/C、材齢と強度の関係	—	—	[結合材]	[W/C]	[材齢]
	碎砂	—	早強 ビーライト 普通	20 25% 30	1, 2, 3, 7日
硅砂の使用(粒度の影響)	ビーライト	20%	[準拠した粒度分布の基準]		
	硅砂	—	コンクリート標準示方書 JSCE B-501 "混水の試験方法" ISO規格		

2. 4 試験方法および試験項目

モルタルはスランプフロー $70 \pm 5\text{ cm}$, 空気量 $3 \pm 1\%$ を満足するものとし, 単位水量を 267 kg/m^3 (コンクリートとして 165 kg/m^3 に相当 [1]) に固定して配合を決定した。代表的な配合を表-3に示す。練混ぜは 100 l 強制2軸ミキサを用い, 練混ぜ時間は $W/C = 20\%$ で7分, 25% および 30% で5分とした。圧縮試験用供試体 ($\phi 10 \times 20\text{ cm}$) はモルタル打設後直ちにポリエチレン袋で供試体の上部を包んで封緘し, $20^\circ\text{C} \cdot 60\%$ の恒温恒湿条件室中で8時間前養生した後, 鋼製型枠を付けたままで所定の温水中に型枠上面まで浸漬させて養生した。所定の材齢まで養生を行った後脱型し, 機械研磨による端面の処理を行い圧縮試験に供した。供試体の数は3本とした。本研究で実施した試験項目は表-4に示すとおりである。

表-3 代表的な配合(碎砂使用)

結合材 の種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	減水剤	消泡剤
普通	20	267	1335	736	CX5.5%	CX0.01%
早強				735	4.0%	
ビーライト				756	1.7%	

表-4 試験項目

試験項目及び規準	
フ	スランプフロー試験 (JSCE-F 503)
レ	空気量試験 (JIS A 1128)
ッ	単位容積重量試験 (JIS A 1116)
ン	硬压縮強度試験 (JIS A 1108)
コ	化静弾性係数試験 (JSCE-G 502)

3. 実験結果と考察

3. 1 締固め方法の検討

早強セメント ($W/C = 25\%$) を使用した同一の試料を用い, 突き棒およびバイブレータにより締固めた場合の強度発現を図-1に示す。なお, 養生方法は 40°C (3 hr) + 70°C とした。図中のプロットは, 供試体3本の平均値を示す(以下すべての図も同様)。

この図より, 突き棒の方がバイブルータに比べて, いずれの材齢においても圧縮強度は若干大きく, 両者の強度の差は材齢1日で約 10 MPa 程度

で, その差は材齢と共に小さくなる傾向が認められた。各材齢における供試体の単位体積重量は, 突き棒で平均 2.35 ton/m^3 , バイブルータで平均 2.32 ton/m^3 で突き棒の方が若干大きく, また, 圧縮強度の変動係数は, 前者が $0.6 \sim 3.4\%$, 後者が $1.7 \sim 4.5\%$ の範囲にあり, 突き棒の方が若干バラツキは小さいという結果であった。

3. 2 養生方法に関する検討

図-2(a)および(b)に結合材として早強セメント ($W/C = 25\%$) およびビーライトセメント ($W/C = 20\%$) を使用した場合の養生パターンと強度発現の関係を示す。

図-2より, 両ケースとも養生温度が高いほど強度発現は早まる。ただし, 早強セメントにおいては, 70°C 一定の場合に比べ, 40°C (3 hr) + 70°C の方が材齢にかかわらず $10 \sim 20\text{ MPa}$ 大きな強度を示した。これは前養生8時間後にいきなり 70°C の高温下に置いた温度ショックの影響と考えられる。一方, ビーライトセメントにおいては, 70°C 一定の場合の方が 40°C (3 hr) + 70°C の場合に比べて強度発現は若干良好で, 早強セメントで見られたような温度ショックの影響は認められず, 材齢7日まで材齢と共に強度が増進した。

供試体3本の圧縮強度の変動係数は温水養生で $0.8 \sim 4.5\%$ の範囲にあり, 標準養生の 1.

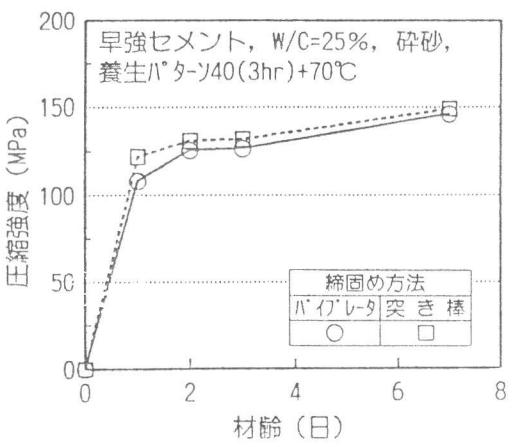
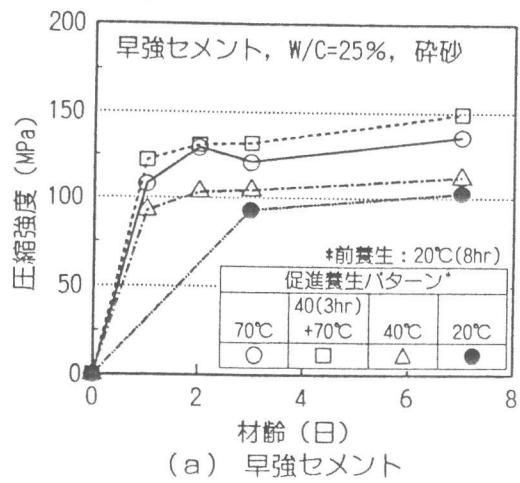


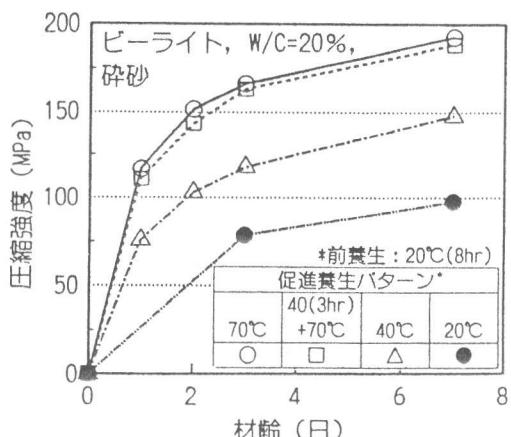
図-1 締固め方法と強度発現

1～2.5%に比べて若干バラツキは大きい結果であった。温水養生のパターンは、短期間に強度を発現させるという観点から、前養生8時間+40℃3時間の温水養生+70℃温水養生する方法、あるいは前養生8時間+70℃温水養生する方法が望ましく、後者はセメントの種類によっては温度ショックの影響が若干現れるという結果である。

モルタルの圧縮強度は大略、早強セメント使用、W/C=25%の配合では材齢3日で140 MPa、ビーライトセメント使用、W/C=20%では材齢3日で150 MPaが得られると言う見通しが得られた。



(a) 早強セメント



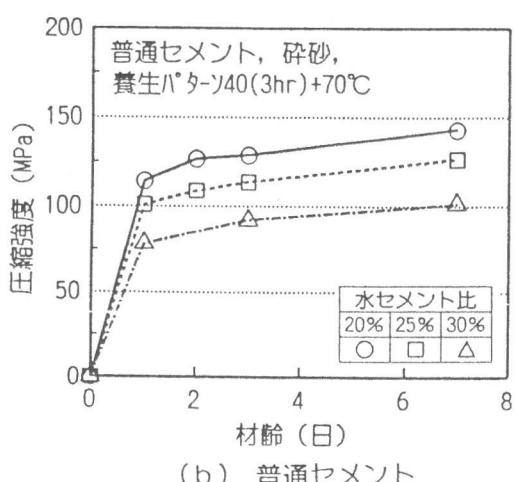
(b) ビーライト高含有セメント

図-2 養生パターンと強度発現

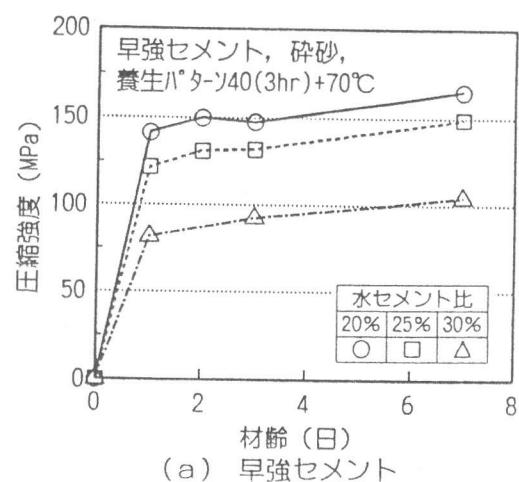
3.3 結合材の種類、水セメント比の検討

W/C=20, 25および30%における強度発現を結合材の種類毎に図-3(a)～(c)に示す。なお、養生方法は40℃(3 hr)+70℃、締固め方法は突き棒による方法とした。

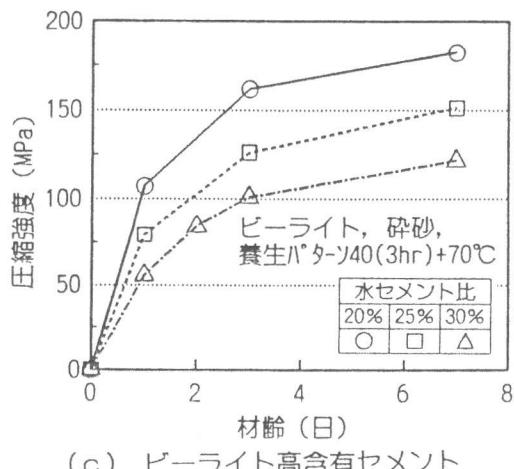
図-3から、当然のことながらW/Cの減少と共に圧縮強度は増加した。セメントの種類の影響をW/C=20%の条件で見ると、強度発現の早さは早強>普通>ビーライトの順であるが、早強及び普通セメントは材齢3日程度で強度がほぼ頭



(b) 普通セメント



(a) 早強セメント



(c) ビーライト高含有セメント

図-3 W/Cと強度発現

打ちになるのに対して、ビーライトセメントは3日以降も強度が増加し、材齢7日では約180 MPaを示した。また、モルタルの見掛けの粘性は、早強セメントでかなり大きく、ビーライトセメントのワーカビリティーが最も良好であった。したがって、総合的にはビーライトセメントが最も適すると判断され、この場合、 $W/C = 20\%$, 40°C (3 hr) + 70°C の養生方法で、材齢1, 3, 7日でそれぞれ105, 158および179 MPaが得られることが確認された。

3. 4 硅砂の使用に関する検討

国内で品質が安定し、入手し易いという条件を考慮して、相馬産硅砂を細骨材として実験を行った。粒度分布は3種類に調整し、それらは土木学会コンクリート標準示方書、ISO規格およびJSCE-B501『モルタルの圧縮強度によるコンクリート用練混ぜ水の試験方法』中に規定されている細骨材の粒度分布に準拠したものである（以下JSCE, ISO, B-501と略記）。各粒度分布を図-4に示す。JSCEが粗粒率2.72で最も粗く、以下ISO, B-501の順に粗粒率2.58, 2.16と細かい粒度のものである。

$W/C = 20\%$ 、ビーライトセメントを使用した場合の各粒度分布でのフレッシュ時の性状および強度発現性を表-5および図-5に示す。養生方法は 40°C (3 hr) + 70°C 、締固め方法は突き棒による方法とした。

表-5より、粗粒率が小さいB-501およびISOの方が、JSCEに比べてスランプフローは若干大きくなるものの、その差は4~6 cm程度であった。

図-5より、材齢3日までは、JSCEの方がISOおよびB-501に比べて若干圧縮強度は大きくなるものの、その差は2~5 MPaで、細骨材の粒度が変化しても強度発現の差異はわずかなものであった。また、細骨材として碎砂を使用したもの（粒度分布はJSCEに準拠）と比較すると、碎砂の方が材齢にかかわらず約15 MPa圧縮強度が大きくなつた。これは、細骨材の形状、表面粗度等の影響によるものと推察される。

4. 各検討項目における結論と規準モルタルの作製方法（案）の提案

設定した目標性能を満足する基準モルタルを作製するために、各検討項目に関して上記実験結果から得られた結論を以下に示す。

①締固め方法に関する検討：

突き棒とバイプレータとでは、圧縮強度の発現に影響を及ぼすほどの締固め性能の差異は認

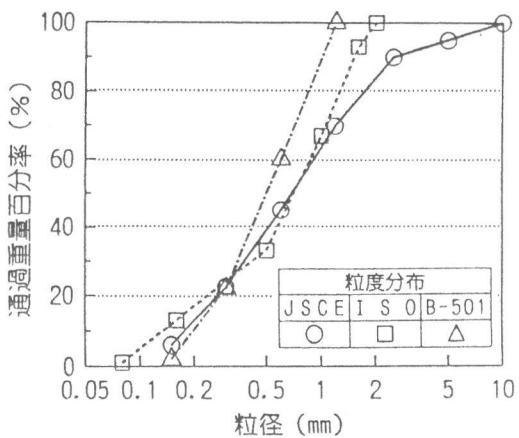


図-4 細骨材(硅砂)の粒度分布

表-5 フレッシュ時の性状

粒度分布	減水剤添加率 (%)	スランプフロー(cm)	空気量 (%)
JSCE	1.7	72.0	2.1
ISO		78.8	2.3
B-501		76.5	2.4

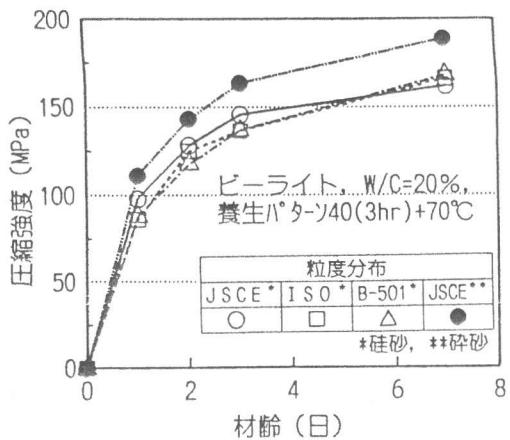


図-5 粒度分布と強度発現

められず、突き棒を用いて十分な締固めを行える。

②養生方法に関する検討：

早期に100～150 MPaの圧縮強度を得るための養生温度パターンは、結合材の種類により異なり、早強セメントでは40°C(3hr) + 70°Cの養生温度パターンが、また、ビーライトセメントでは70°C一定のパターンが適する。

③結合材の種類、水セメント比の検討：

強度発現およびフレッシュ時のワーカビリティーから総合的に判断すると、結合材はビーライトセメントが最も適し、この場合、W/C = 20%，40°C(3hr) + 70°Cの養生方法で、材齢1および3日でそれぞれ105および158 MPaの圧縮強度が得られる。

④硅砂の使用に関する検討：

細骨材の粒度分布を粗粒率で2.1
6から2.72に変化させても、フレッシュ時の性状および圧縮強度に及ぼす影響は小さい。相馬産硅砂を使用した場合の圧縮強度は、硬質砂岩碎砂に比べて、材齢にかかわらず約15 MPa小さい。

以上の結論を基に基準モルタルの作製および試験方法（案）を表-6に示すように提案する。この方法によれば、材料の入手、モルタルの練混ぜ、供試体の作製、養生、試験が比較的容易であり、基準モルタルの圧縮強度は材齢1日で約100 MPa、3日で約150 MPaが得られる。なお、ここで選定した作製方法（案）に沿って数回の繰返し実験を行い、強度の再現性が高いことを確認している。

表-6 規準モルタルの作製方法（案）

	強度レベル	
	$f_c = 100 \text{ MPa}$	$f_c = 150 \text{ MPa}$
材料	結合材：ビーライトセメント 細骨材：相馬産硅砂（粒度分布は示方書に準拠） 減水剤：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	
配合	水セメント比： $W/C = 20\%$ 単位水量： $W = 26.7 \text{ kg/m}^3$ 混和剤添加量：所定のフロー、空気量を満足	
練混ぜ方法	練混ぜ：強制2軸ミキサ 練混ぜ時間：7分	
締固め方法	突き棒による方法 (JIS A 1132)	
養生方法	20°C(8時間) + 70°C温水(所定材齢)	
材齢	1日	3日

5. おわりに

高強度コンクリート用粗骨材の品質評価法に使用する基準モルタルについて、その作製および試験方法（案）を提案した。今後、粗骨材の品質を変えたコンクリート実験を実施し、有用な高強度コンクリート用粗骨材の品質評価法の構築を目指したい。

参考文献

- 1) 大友忠典・信田佳延・横関康祐・瀬戸謙一郎・田沢雄二郎：高性能地下連続壁のコンクリートの実大規模実証実験、鹿島技術研究所年報、Vol. 42, pp. 35-40, 1994. 10
- 2) 國府勝郎・飛坂基夫：高強度コンクリートと骨材、コンクリート工学、Vol. 28, No. 2, pp. 14-22, 1990. 2
- 3) (財) 国土開発技術研究センター、総プロ 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発、1993. 3
- 4) 桜本文敏・鈴木清孝・武居幸次郎・閑田徹志：超高強度コンクリートに関する開発研究（その1）、鹿島技術研究所年報、Vol. 40, pp. 101-108, 1992. 10