

論文

[1064] 超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす因子の検討

磯屋 孝代*1・佐原 晴也*2・星野 昭平*3・竹下治之*4

1. はじめに

超高強度コンクリートは、良質な骨材および高性能減水剤や混和材などの使用によって圧縮強度800kgf/cm²以上の高強度が得られる。このような高強度領域では、普通コンクリートに比べて使用材料の種類や品質が圧縮強度に与える影響は大きく、超高強度コンクリートの製造にあたっては材料の選定に注意する必要がある。また、単位結合材量が非常に多く水結合材比が極めて小さいために、普通コンクリートと比べて高粘性となり、フレッシュ状態の施工性を評価するにはスランプ値のみでは充分とは言えない [1]。

本研究では、粗骨材の種類、細骨材の表面水、シリカフュームの種類および高温履歴などの超高強度コンクリートの強度に影響する因子のほか、フレッシュコンクリートの流動性や施工性などを評価する試験方法について検討を行った。

表-1 使用材料

セメント C	普通ポルトランドセメント (比重3.16)
シリカフューム SF	顆粒状シリカフューム (ノルウェー産)
フライアッシュ FA	分級フライアッシュ (比重2.35、6000~6500cm ³ /g)
細骨材 S-	浅間山山砂と相模川水系川砂の混合砂 (F.M 2.75)
粗骨材 G	青梅産砕石 (比重2.65、F.M 6.81)
高性能AE減水剤 SP	芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物

2. 使用材料および練り混ぜ方法

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。

2.2 練り混ぜ方法

練り混ぜは、既往の実験結果 [2] に基づき、空練り(S+C+SF+FA) 15秒間、モルタル練り(W+ $\frac{1}{2}$ SP) 2分間、コンクリート練り(G+ $\frac{1}{2}$ SP) 3分間行った。

ミキサは、100ℓパン型強制練りミキサを使用した。

2.3 試験項目

フレッシュコンクリートの試験として、後述するようにスランプ、スランプフロー、グリッド試験、VF試験および5mmふるいでスクリーニングしたモルタルの粘度測定を行い、硬化コンクリートの試験として、圧縮強度(材令7日, 28日, 91日)と実体顕微鏡による表面観察を行った。

3. 実験1:粗骨材の種類による影響

3.1 実験の内容

検討した粗骨材の種類および性状を表-2に示す。破砕値は、静的に載荷した圧縮力(40ton)に対する骨材の破

表-2 粗骨材の種類および性状

産地	岩質	比重	吸水率 (%)	F.M.	実績率 (%)	破砕値 (%)
青梅産	硬質砂岩	2.65	0.603	6.73	59.8	12.37
城山産	硬質砂岩	2.61	1.26	6.70	58.9	14.84
八戸産	石灰砕石	2.69	0.903	6.81	63.2	18.87
魚津産	川砂利	2.83	1.57	6.88	62.8	10.11

砕割合である(BS812)。ここでは、高性能AE減水剤(以下、減水剤と称する)の添加量を一定とした場合のフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度、静弾性係数について比較検討した。

コンクリート配合を表-3に示す。

*1 日本国土開発(株)技術研究所化学研究室(正会員)
 *2 日本国土開発(株)技術研究所コンクリート研究室主任研究員(正会員)
 *3 日本国土開発(株)技術研究所化学研究室長
 *4 日本国土開発(株)技術研究所コンクリート研究室長、工博(正会員)

3. 2 実験結果および考察

フレッシュコンクリートの性状を表-4に示す。スランプは魚津産を使用した場合に最も大きくなったが、その他はほぼ同じであった。一方、スコップによる練り返しなどのコンクリートの作業性は八戸産を使用した場合に容易であり、流動性も良好であった。これは、八戸産および魚津産の実績率が他の粗骨材に比べて3~4%程度大きく、丸みのある粒形であったためと思われる。このようなフレッシュコンクリートのワーカビリティはスランプ値のみで判断するのは難しく、本実験ではスランプフローの方が適切に評価していた。

圧縮強度試験結果を図-1に示す。これらの値は、各材令ごとの3本の平均値である。同図から、城山産を使用した場合に強度が最も小さくなったが、他の粗骨材では大きな強度差は見られなかった。城山産を使用した場合、800kgf/cm²程度で頭打ち状態であることや粗骨材自身が破壊していることから、骨材強度が小さいためコンクリート強度が低下したものと考えられる。一方、その他の粗骨材を使用した場合、28日強度で800~900kgf/cm²程度となった。また、粗骨材の種類によって材令による強度発現が異なり、比較的丸い形状の八戸産および魚津産の場合に、28日強度が低く91日強度では高強度となる傾向があった。これは、粗骨材の破壊があまり見られなかったことから、粗骨材の強度が不足しているのではなく、丸い形状の粗骨材は角張った粗骨材に比べてモルタルとの付着力が小さいためと思われる。すなわち、粗骨材とモルタルとの界面強度が弱い短期材令では強度が低くなるが、長期材令では界面強度が増進するため他の粗骨材と比べても強度の伸びは大きくなり、コンクリート強度が高強度となったものと思われる。

材令28日および91日の静弾性係数は、3.54~4.65×10⁵ kgf/cm²の範囲で変化し、粗骨材の種類による影響が大きくなった。圧縮強度と静弾性係数との関係を図-2に示す。本実験結果では、粗骨材の種類による違いはあるが日本建築学会式よりやや小さく、ACI363式に比較的近い値であった。ポアソン比は0.17~0.21の範囲であった。

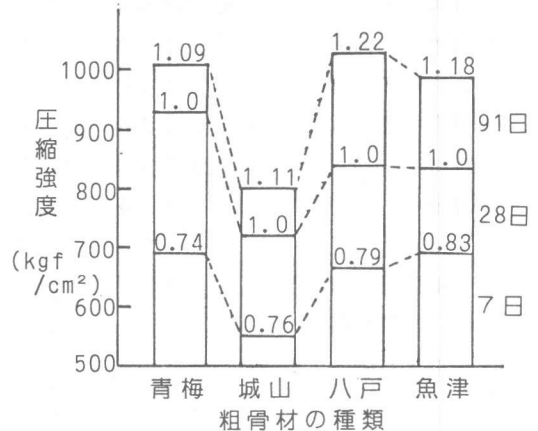
超高強度コンクリートに使用する粗骨材の選定基準として、表乾比重、吸水率、40ton破砕値の因子とコンクリート強度との相関性についても検討したが、いずれの項目も明瞭な関係は得られなかった。

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
		W	C	SF	FA	S	G
26	42	130	450	25	25	745	1053

表-4 フレッシュコンクリートの性状

産 地	スランプ* (cm)	スランプ*70- (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)
青梅産	23.5	56.3	2.5	21.0
城山産	23.5	57.0	2.9	20.0
八戸産	22.5	61.5	3.0	20.5
魚津産	27.0	68.5	3.0	21.0



(注)図中の数値は、28日強度に対する割合を示す。

図-1 圧縮強度試験結果

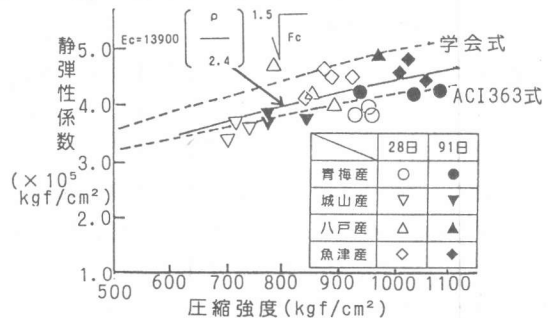


図-2 圧縮強度と静弾性係数との関係

4. 実験2. 細骨材の表面水の影響

4. 1 実験の内容

超高強度コンクリートは、水結合材比が小さく、単位水量が非常に少ないため、コンクリートの性状は僅かな水量の差によって左右されやすい。本実験では、細骨材の表面水率が0～8%の範囲で、コンクリートの流動性および圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

コンクリート配合を表-5に示す。練り混ぜ時に投入する水量は表面水率によって加減し、単位水量は一定とした。

4. 2 実験結果および考察

フレッシュコンクリートの性状を図-3に示す。細骨材の表面水率が0%の場合にスランプが最も小さくなり、2～8%ではほとんど変わらなかった。また、スランプフローも表面水率が0%の場合に小さく、流動性もあまり良くなかった。これは、細骨材の表面水率が低いと、細骨材表面に付着されるセメント、シリカフュームが少なくなり、水、減水剤の吸着する表面積が増加するためにスランプが低下したためと考えられる。このことから、使用する細骨材は、表乾状態より湿潤状態であることが望ましいと思われる。

圧縮強度の結果を図-4に示す。圧縮強度は、細骨材の表面水率による大きな違いはなかった。これは、表面水を正確に測定し単位水量を一定としているためと考えられる。

5 実験3 シリカフュームの種類の影響

5. 1 実験内容

コンクリートを高強度化するため、セメントの一部をシリカフューム（以下、SFと称する）で置換するケースが多い。SFは産地、製造条件によって品質が変化するが、本実験ではSFの種類がコンクリートの性状に及ぼす影響について検討した。SFの品質を表-6、コンクリート配合を表-7に示す。減水剤の添加量は、スランプが23±2cmとなるように調整した。

5. 2 実験結果および考察

フレッシュコンクリートの性状を表-8に示す。同程度のスランプを得るための減水剤の添加量は、粉末状SFを使用した場合、顆粒状SFを使用した場合の約60%に減少した。コンクリートの作業性は、粉末状SFを使用した方が非常に良好であった。これは、図-5の測定結果からも分かるように、粉末状SFを使用した方が顆粒状SFを使用した場合よりもモルタル粘度が低いためと思われる。

表-5 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G
26	42	130	450	50	745	1053

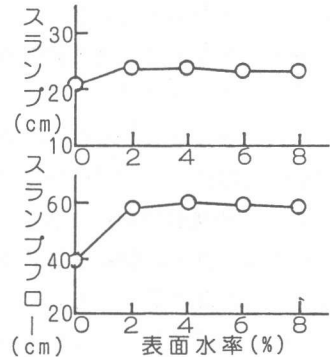


図-3 フレッシュコンクリートの性状

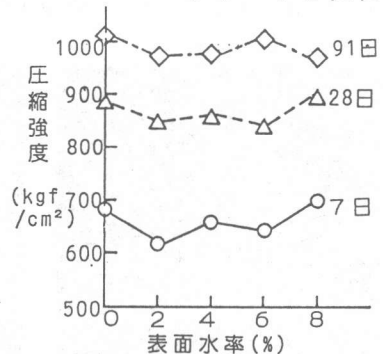


図-4 圧縮強度試験結果

表-6 シリカフュームの品質

種類	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Igloss (%)	か比重
顆粒状	90.1	2.06	1.08	1.4	2.9	0.45
粉末状	94.1	0.40	0.78	0.55	1.4	0.6

表-7 コンクリート配合

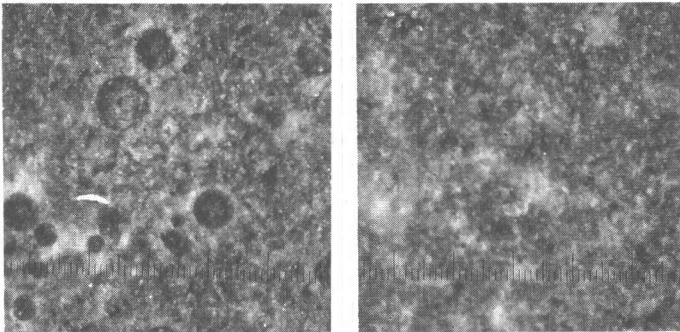
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G
26	40	143	495	55	674	1034

表-8 フレッシュコンクリートの性状

SF種類	減水剤 (C+SF×%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)
顆粒状	4.0	25.5	64×62.5
粉末状	2.5	25.0	64×64

圧縮強度試験結果を図-6に示す。同図から、粉末状SFの方が顆粒状SFに比べ高強度になる傾向があった。これは、顆粒状SFはコンクリート練り混ぜ時においても顆粒が壊れにくく、ポゾラン反応に関与するSFの表面積が小さくなっていることが考えられる。

SFの練り混ぜによる分散程度の違いを観察するため、表-7に示すコンクリート配合から骨材を除いたペースト配合で供試体を作成し、その表面を実体顕微鏡で観察した。実体顕微鏡では倍率が100倍程度であるため、シリカフェームは2次粒子の状態を観察できる。観察結果を写真-1に示す。(a)では、丸形の顆粒状SFが確認でき、2次粒子が壊れにくいことが分かる。一方、(b)では、白っぽく形が変形しているのが粉末状SFであり、顆粒状SFに比べると粒子の形は崩れている。これらのことから、粉末状SFの方が顆粒状SFに比べると分散しやすく、流動性や強度発現に対して有利になることが考えられる。



(a) 顆粒状SF

(b) 粉末状SF

写真-1 実体顕微鏡写真 0.1mm

6. 施工性評価試験方法の検討

超高強度コンクリートは、水結合材比が非常に小さく微粉末を使用しているため、粘性が非常に高い。このため、普通コンクリートとは異なる性状を示し、スランプ値のみではフレッシュコンクリートの性状を評価することは困難である。本研究で得られた実験1、実験2および過去に行った実験のデータを対象に、表-9に示す種々の施工性評価試験を行い、その適用性を検討した。図-7に、各試験値とモルタルの塑性粘度との関係を示す。また、表-10に各試験値とモルタルレオロジー定数(降伏値・塑性粘度)およびコンクリートの作業性との関係についての一覧を示す。モルタルレオロジー定数と比較的相関性が良いのは、スランプフローであった。降伏値はスランプ値に代表され、塑性粘度は粘性を表すことから、スランプフローは、静的状態でのコンクリートの変形程度や流動性の簡単な推定が可能であると考えられる。

超高強度コンクリートは、水結合材比が非常に小さく微粉末を使用しているため、粘性が非常に高い。このため、普通コンクリートとは異なる性状を示し、スランプ値のみではフレッシュコンクリートの性状を評価することは困難である。本研究で得られた実験1、実験2および過去に行った実験のデータを対象に、表-9に示す種々の施工性評価試験を行い、その適用性を検討した。図-7に、各試験値とモルタルの塑性粘度との関係を示す。また、表-10に各試験値とモルタルレオロジー定数(降伏値・塑性粘度)およびコンクリートの作業性との関係についての一覧を示す。モルタルレオロジー定数と比較的相関性が良いのは、スランプフローであった。降伏値はスランプ値に代表され、塑性粘度は粘性を表すことから、スランプフローは、静的状態でのコンクリートの変形程度や流動性の簡単な推定が可能であると考えられる。

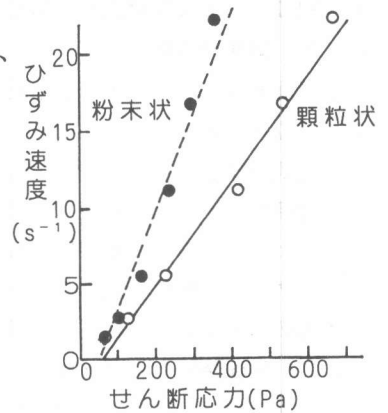


図-5 モルタル粘度

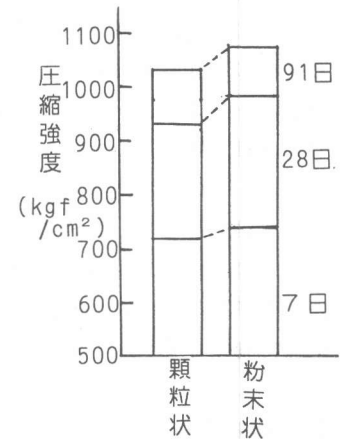


図-6 圧縮強度試験結果

表-9 施工性評価試験方法

試験方法	試験方法および測定項目
モルタル粘度	外筒回転型粘度計による測定 (φ7.3cm) 項目: 塑性粘度、降伏値
グリッド試験	2000rpm振動状態で4cm角の格子を通過する難易 項目: 5ℓのコンクリートが通過する時間
V F 試験	振動式コンシステンシーメータによる試験 項目: 外側に達するまでに要する時間 コンクリートの下がり量
作業性	スコップによる練り返しなどの感覚

一方、ある特定の振動条件下で行われるグリッド試験およびVF試験は、モルタルレオロジー一定数との相関性はあまり良くなかった。これは、コンクリートには粗骨材が含まれるため、単純にモルタルレオロジー一定数のみで決まるのではなく、コンクリートの材料分離抵抗性も影響するためと考えられる。しかし、これらの試験値は、スコップによる練り返しなどのコンクリートの作業性の難易度を良く

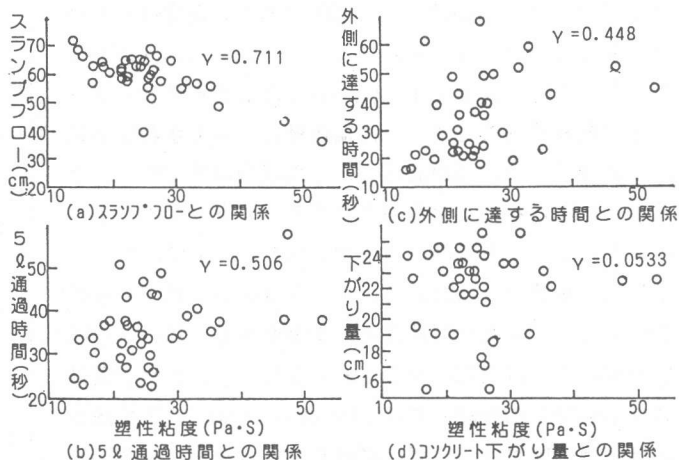


図-7 各施工性評価試験方法とモルタルレオロジー一定数との関係

評価しており、実際のコンクリート打設時の流動性、施工性などの評価には適しているものと思われる。また、VF試験のコンクリートの下がり量

表-10 施工性評価試験の考察

試験方法	測定項目	相関係数		コンクリートの作業性	試験のしやすさ
		降伏値	塑性粘度		
スランプフロー	スランプフロー	0.753	0.711	△	○
グリッド試験	5ℓ通過時間	0.565	0.506	○	△
VF試験	外側に達する時間	0.609	0.448	○	×
	コンクリートの下がり量	0.249	0.0533	×	

は、粗骨材分離の有無をよく評価しており、前報[3]と同様の結果となった。

以上の結果から、スランプ、スランプフローなどによるコンシステンシー試験の他、実際の作業性、施工性などを評価できるグリッド試験、VF試験などを組み合わせて試験することによって、コンクリートのワーカビリティを適切に評価できるものと考えられる。

表-11 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
27	42	150	550	695	1013

7. 実験4 養生方法による影響

7.1 実験内容

超高強度コンクリートは単位セメント量が非常に多いため、材令初期に高温履歴を受け、長期強度が低下することが予想される。このような高温履歴（高温養生）と標準温度履歴（標準養生）の違いが圧縮強度、水和生成物に及ぼす影響について検討した。

コンクリート配合を表-11に示す。供試体には、恒温恒湿室を使用して、実際に模擬柱（75cm×75cm×50cm）に打設した際に測定した温度履歴（最高温度69.8℃）を与えた。

7.2 実験結果および考察

圧縮強度試験結果を図-8に示す。同図から、材令初期に高温履歴を受けたコンクリート強度は、材令1日で600kgf/cm²と高強度であったが、その後の強度の伸びが非常に小さく材令28

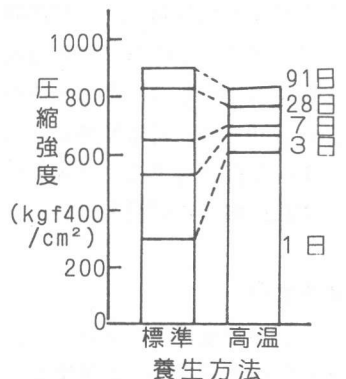


図-8 圧縮強度試験結果

日で約770kgf/cm²、標準養生の約90%となった。図-9に材令28日の供試体の熱分析(TG-DTA)試験結果を示す。示差熱曲線(DTA曲線)から分かる主な生成物は、標準養生を行った場合C-S-H、

エトリンガイト、 Ca(OH)_2 、 CaCO_3 であり、高温養生を行った場合 C-S-H、モノサルフェート、 Ca(OH)_2 、 CaCO_3 であった。エトリンガイトは C_3A と反応してモノサルフェートに移転することから、高温履歴によって水和反応速度が大きくなり、高温養生を行った場合はすでにモノサルフェートに移したものとと言える。エトリンガイトとモノサルフェートは結晶構造が異なり、モノサルフェートは六角板状で針状結晶のエトリンガイトと比べて表面積が小さく、また他の結晶との交差が少ないことから強度発現の面では不利になると考えられる。。また、重量減少率曲線(TG曲線)では、 Ca(OH)_2 、 CaCO_3 の重量減少率は養生温度に係わらずほぼ同じであったが、0~200℃での重量減少率は高温養生を行った方が標準養生の場合より小さくなった。これは、養生温度が高い場合、水和反応や蒸発により自由水やゲル水が消費され、その後の水和反応が進行しにくくなったことが原因の一つと考えられる。

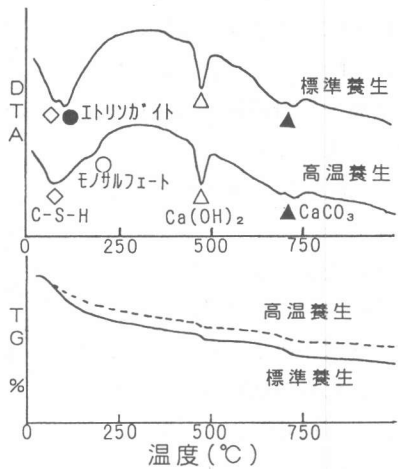


図-9 TG-DTA曲線

圧縮強度に対する引張強度の比率は、高温養生の場合は標準養生に比べて小さくなる傾向があり、また、この比率はいずれの養生方法でも材令が長くなると小さくなった。すなわち、この比率は標準養生の場合、材令7日で1/16、材令28日で1/19、高温養生の場合、材令7日、28日ともに1/19であった。

8. まとめ

本実験結果から、以下のことが明らかとなった。

- ①粗骨材の種類によって、圧縮強度および弾性係数は大きく異なる。粗骨材の各種の品質試験値とコンクリートの圧縮強度との間には、明瞭な関係は認められなかった。
- ②細骨材の表面水は、コンクリートの流動性にはかなり影響を及ぼすが、圧縮強度への影響は少ない。
- ③グリッド試験およびVF試験は、スランプおよびスランプフローと組み合わせることによって、コンクリートの施工性を評価する目安となる。
- ④養生温度によって水和生成物の種類が異なる。
- ⑤材令初期に高温履歴を受けた場合、長期にわたる圧縮強度の伸びが小さい。
- ⑥圧縮強度に対する引張強度の比率は、高温養生の方が標準養生に比べて若干小さくなり、養生方法に係わらず材令が長くなるとその比率は小さくなる。

参考文献

- 1) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートのレオロジー入門、リアライズ社、pp. 1~29、1991.7
- 2) 磯屋孝代ほか：高強度コンクリートの特性に及ぼす練り混ぜ因子の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1、pp. 219-224、1991.6
- 3) 磯屋孝代ほか：結合材の配合比が超高強度コンクリートの品質に及ぼす影、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 451-456、1992.6