

論文

[1003] 各種鉱物質微粉末を用いた低発熱超高強度連壁コンクリートに関する基礎研究

青木茂*1・三浦律彦*2・十河茂幸*3

1. はじめに

地下構造物の大型化に伴い、土留壁として使用される地下連続壁コンクリート（以下連壁コンクリートと略記する）も高強度化の傾向にあり、構造物の規模によっては設計基準強度で700 kgf/cm² ~ 800kgf/cm² の超高強度連壁コンクリートが必要となることも考えられる。超高強度コンクリートは高層RC建築にみられるように微粉末材料を効果的に用いることによって得られるが、これを連壁コンクリートに適用する際には、トレミー内および掘削溝内での流動性や、止水性確保のための温度ひびわれの抑制など種々の課題がある。また、連壁コンクリートは水中打設のため気中コンクリートより設計基準強度の割増しを大きく採らざるを得ない反面、高性能減水剤とシリカフュームを有効利用した場合でも、水結合材比の低減や発現強度には限度がある。

そこで、水結合材比の低減を基本に、さらに強度増加を図る方策として、セメント粒子の分散効果があり、かつ化学的に不活性な岩石微粉末の利用を考えた。

低結合材比領域で岩石微粉末を混入したコンクリートの研究報告はこれまで少なく[1]、この様なコンクリートの基礎性状を把握するために各種試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントの種類と物性を表-1に示す。低発熱セメントを用いたのは結合材量の増大に伴う壁体の温度ひびわれの抑制を考慮したためである。低発熱セメントには、使用実績のある各種のセメントのうち、高炉スラグ微粉末を混入した2成分系(SC)と、さらにフライアッシュを混入した3成分系(SFC)のセメントを選定した。なお、普通ポルトランドセメント(NP)は、低発熱セメントの断熱温度上昇低減効果を確認するために比較として用いたものである。

表-2に骨材の種類と物性を、表-3に鉱物質微粉末の種類と物性を示す。

表-1 セメントの種類と物性

区分	略号	比重	成分割合(%)		比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (kgf/cm ²)			水和熱(cal/g)	
			高炉 スラグ	フライ アッシュ		7d	28d	91d	7d	28d
低発熱 2成分	SC	2.96	75	—	5,760	283	423	503	49.2	53.1
低発熱 3成分	SFC	2.86	65	15	5,210	218	338	413	41.7	45.8
普通 ポルトランド	NP	3.15	—	—	3,460	262	414	—	—	—

表-2 骨材の種類と物性

区分	種類	産地	岩質	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M)
細骨材	山砂	木更津	—	5	2.62	2.07	2.58
粗骨材	碎石	青梅	硬質砂岩	20	2.65	0.78	6.82

表-3 鉱物質微粉末の種類と物性

区分	略号	比重	物性
シリカフューム	Sf	2.20	比表面積：200,000cm ² /g, 非造粒 平均粒径：0.15μm, SiO ₂ ：93%
岩石 微粉末	石粉	Lf	比表面積：3,920, 5,470, 7,350cm ² /g 75μm通過：70%以上, CaCO ₃ ：90%以上
	珪石 微粉	Qf	比表面積：3,980 cm ² /g 166μm通過：90%以上, SiO ₂ ：93%以上

*1 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 副主任研究員（正会員）

*2 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員，工修（正会員）

*3 株式会社大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員，工博（正会員）

岩石微粉末のうち、石灰石粉（Lf, 石粉と略記）は舗装用フィラーとして通常用いられている比表面積4000cm²/g クラスのものを基本に、5000cm²/g, 7000cm²/g の3種類とした。珪石微粉（Qf）はチャート層のSi₂O₂高品位部を採掘し、ミルにより微粉碎したものであり、比表面積4000cm²/g クラスのものとした。シリカフェーム（Sf）は低結合材比領域でのコンクリートの主に流動性向上を図る目的で使用した。

混和剤には、ポリカルボン酸を主成分とする高性能A E減水剤を用いた。

2.2 配合

配合の組み合わせを表-4に示す。シリカフェームの結合材量（P）に対する置換率は流動性の向上を考慮し、既往の調査結果[2]より10%とした。

岩石微粉末は、石粉、珪石微粉とも細骨材に置換した。なお、水結合材比が20%の場合において石粉の置換量と比表面積を変え、これらがコンクリートの各種性状に及ぼす影響を調査した。

配合条件は、スランプフローについては60cmを目標とし、空気量は2±1.0%とした。

配合を表-5に示す。単位水量は一定とし、所定のスランプフローになるように高性能A E減水剤の添加率で調整した。混練は強制2軸ミキサーを用い、練り混ぜ時間は水結合材比が25%の場合で3分、水結合材比が20%の場合で4分とした。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) 高性能A E減水剤の添加率

高性能A E減水剤の添加率は表-5に示すように、低発熱セメントの種類にかかわらず水結合材比が大きくなるに従い増大する。石粉と珪石微粉を混入した場合を同一置換量で比較すると珪石微粉の場合の方が高性能A E減水剤の添加率が大きく、特に水結合材比が20%の場合の添加率は4%となり、多量添加の領域を呈している。石粉を混入した場合と珪石微粉を混入した場合での高性能A E減水剤の添加率の違いは、その粒子形状の違い（珪石微粉は石粉より比較的角ばっている）に起因するものと思われる。

図-1に石粉の置換量と高性能A E減水剤の添加率との関係を示す。石粉の置換量が大きくな

表-4 配合の組み合わせ

セメントの種類	S C, S F C		N P
水結合材比 W/P(%)	25	20	25
Sfの置換率 Sf/P(%)	10		
岩石微粉末の細骨材置換量 (kg/m ³)	Lf	0,100, 0,50,100,150	0,100
	Qf	0,100	—
岩石微粉末の比表面積 (cm ² /g)	Lf	4000,5000,7000	4000
	Qf	4000	—

P : C + S f の総量

表-5 配合

セメントの種類	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							S P A (P×%)
			W	C	Sf	S	Lf	Qf	G	
S C	25	40	150	540	60		650		988	1.45
							553	100	988	1.80
							546	100	985	2.20
	20	39		675	75		582		917	2.00
							479	100	913	3.20
							478	100	913	4.00
S F C	25	40	150	540	60		650		988	1.35
							548	100	975	1.60
							541	100	972	2.20
	20	39		675	75		571		906	1.60
							469	100	903	3.80
							468	100	903	4.20
N P	25	40	150	540	60		663		1004	1.80
							566	100	1004	2.50

Lf, Qf : 比表面積 4000 cm²/g

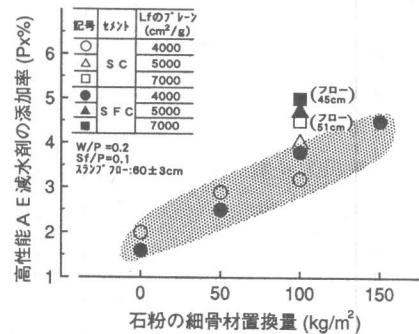


図-1 石粉の細骨材置換量と高性能A E減水剤の添加率の関係

るに従い高性能 A E 減水剤の添加率が增大する傾向が認められる。これは、石粉表面への減水剤の吸着、石粉の置換量増大に伴うコンクリートの粘性増加などの影響によるものと思われる。

(2) 大型ロートでの流下時間

図-2 に岩石微粉末の置換量とコンクリート用大型ロート (図-3) で測定した流下時間の関係を示す。この試験法は、コンクリートの粘性を含む流動性を評価するものとして考案されたものである [3]。なお、トレミーホップおよびその下部トレミー管とロートとは、その形状が相似しており、連壁コンクリートのトレミー内流下性状を把握するうえで有用と考えた。図-2 より、岩石微粉末の置換量の増加に伴い、流下時間が増大する傾向が認められる。これは、コンクリートの粘性増加によるものと思われる。なお、石粉と珪石微粉を用いた場合での流下時間の差は水結合材比が 25% と 20% の場合で相反する結果となった。

図-4 に石粉の比表面積と流下時間の関係を示す。比表面積が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ と $5000\text{cm}^2/\text{g}$ での流下時間を比較すると、測定値に 10 秒程度の変動はあるもののその平均値は $5000\text{cm}^2/\text{g}$ を用いた場合のほうが小さい傾向が認められる。

なお、 $7000\text{cm}^2/\text{g}$ のものを用いた場合のスランブフローは若干小さいが、このような富配合のコンクリートではスランブフローの大小による流下時間への影響は少ないものと想定すると、図-4 の結果より、石粉を混入した場合のコンクリートの流下時間すなわち粘性が小さくなる比表面積のことが推察できる。

図-5 に微粉末容積と流下時間の関係を示す。ここで微粉末容積とはセメント、シリカフュームおよび岩石微粉末の総容積である。微粉末容積の増大に伴い粘性が増加し、総じて流下時間が大きくなる結果となった。特に、微粉末容積が $250\text{g}/\text{m}^3$ 以上となる領域 (水結合材比が 20%) においてこの傾向が認められる。連壁コンクリートの粘性とトレミー施工性とは密接な関係にあり、流下時間で 10 秒~50 秒のものが実績としてある。トレミ管の径や本数を適切に選定することによ

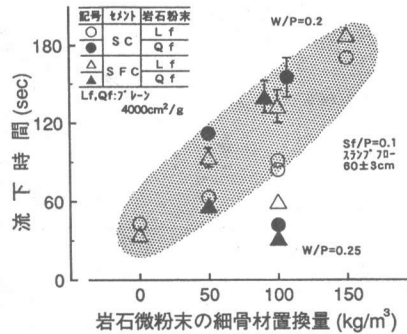


図-2 岩石微粉末の細骨材置換量と流下時間の関係



d(mm)	l(mm)	V (ℓ)
75	150	10

図-3 大型ロートの形状寸法

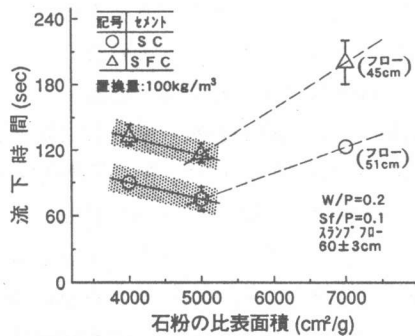


図-4 石粉の比表面積と流下時間の関係

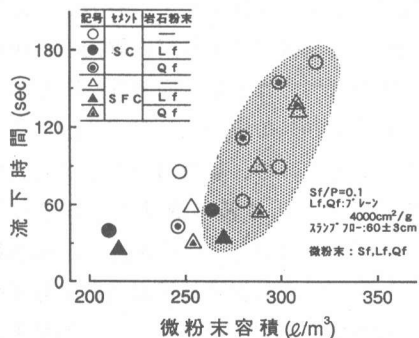


図-5 微粉末容積と流下時間の関係

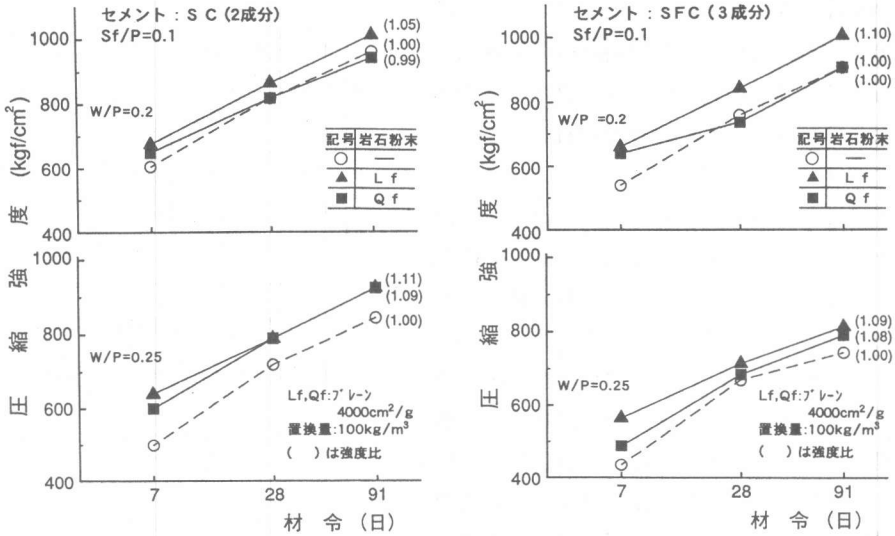


図-6 岩石微粉末混入コンクリートの圧縮強度と材令の関係

り、80秒程度のものは打設に供することが可能と思われる。従って、図-5より、低水結合材比であっても結合材を含む微粉末の組合わせと微粉末容積を適当に選定することにより、トレミー打設に適した流下時間に調整できるものとする。

3.2 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度および静弾性係数

石粉あるいは珪石微粉を細骨材に置換したコンクリートの圧縮強度と材令の関係を図-6に示す。石粉を細骨材に100 kg/m³置換した場合、この様な富配合のコンクリートであっても、石粉を置換しないものに比べて材令7日から強度増加を示し、材令91日においては10%程度の強度増加が認められる。これは石粉によるセメント粒子の分散効果とフィラー効果によるものとする。

なお、珪石微粉を細骨材に置換した場合、水結合材比が25%では石粉と同様な傾向を示すが、水結合材比が20%の場合には材令7日で強度の増加がみられるものの、材令91日では無混入の場合と同等か、これより若干低下する結果となった。

この原因の一つとして、高性能AE減水剤の多量添加(表-5参照)の影響が考えられる。

図-7に石粉の細骨材置換量と圧縮強度の関係を示す。置換量が増大するに従い圧縮強度が大きくなる傾向が認められる。石粉無混入の場合に対する強度の増加割合は、置換量にかかわらず材令7日で顕著であり、置換量150kg/m³の場合には、2成分系の低発熱セメントを使用したときに約15%、3成分系のセメントを用いた場合に約25%となった。

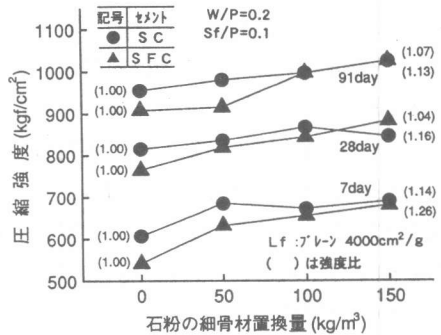


図-7 石粉の細骨材置換量と圧縮強度の関係

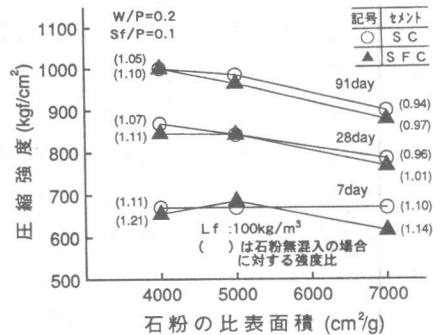


図-8 石粉の比表面積と圧縮強度の関係

図-8に石粉の比表面積と圧縮強度の関係を示す。比表面積が大きくなるに従い、圧縮強度は低下する傾向が認められる。比表面積が7000cm²/gの石粉を細骨材に置換した場合、材令91日における圧縮強度は石粉無混入のものより約5%程度の強度低下を示した。これは、高性能AE減水剤の多量添加(図-1参照)の影響と思われる。

図-9に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。静弾性係数はコンプレッソメータにより測定したものである。岩石微粉末無混入のコンクリートの静弾性係数は図中に示した関係式で近似できる[2]のに対し、石粉あるいは珪石微粉を細骨材に置換した場合の圧縮強度に対する静弾性係数の値は変動が大きく、また同一圧縮強度に対する静弾性係数の値も無混入のものに比べて小さい傾向が認められる。

(2) 引張強度および曲げ強度

図-10に引張強度と圧縮強度の関係を示す。引張強度は直径15cm、高さ15cmの円柱供試体を用いて割裂試験により測定したものである。岩石微粉末無混入のコンクリートの引張強度と圧縮強度の関係は図中に示した関係式で近似できる[2]のに対し、石粉あるいは珪石微粉を細骨材に置換した場合の圧縮強度に対する引張強度の値は変動が大きい。なお、これらの岩石微粉末を混入した場合、圧縮強度が900kgf/cm²~1000kgf/cm²の範囲における引張強度の圧縮強度比は、1/20~1/25となった。

図-11に曲げ強度と圧縮強度の関係を示す。石粉あるいは珪石微粉を細骨材に置換したコンクリートの曲げ強度は、圧縮強度が700kgf/cm²~900kgf/cm²の範囲においては無混入のものより大きくなる傾向を示した。なお、岩石微粉末を混入したコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係式は石粉と珪石微粉混入の場合とをまとめて近似したものである。

(3) 断熱温度上昇特性

表-6に断熱温度上昇試験結果を示す。低発熱セメント(SC, SFC)を用いたコンクリートは、普通セメント(NP)を用いた場合より17℃

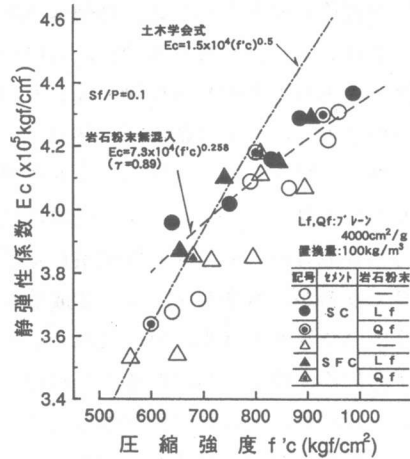


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

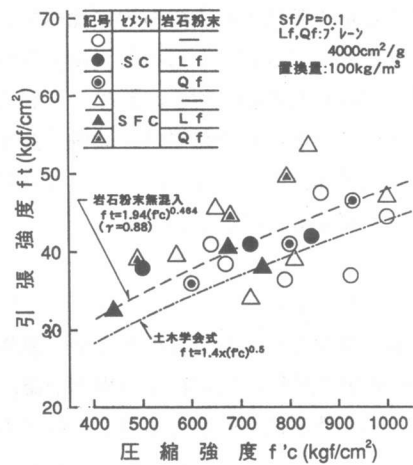


図-10 引張強度と圧縮強度の関係

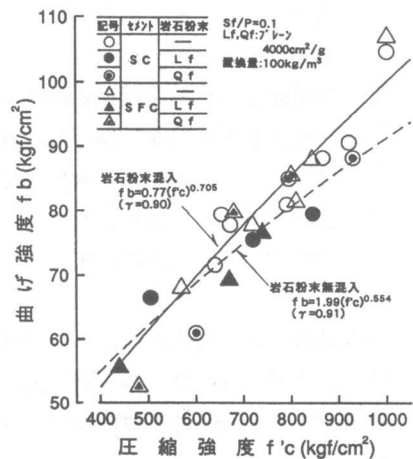


図-11 曲げ強度と圧縮強度の関係

～24℃程度K値を低減でき、発熱速度係数も小さくできることが認められる[2]。石粉を細骨材に置換した場合、そのK値は無混入のものに比べ、2成分系および3成分系の低発熱セメントを用いた場合で2℃～5℃、普通セメントを用いた場合で6℃の低減が認められ、また発熱速度係数については3成分系のセメントを使用した場合で若干大きくなるが、普通セメント、2成分系のセメントを用いた場合では小さい。これらより、石粉が化学的に不活性の範疇にあることが推察できる。

図-12に石粉を細骨材に置換したコンクリートの断熱温度上昇量と材令91日での圧縮強度との比率を示す。セメントの種類にかかわらず、石粉を混入したものは無混入のものに比べて、その比率は小さい。これは、石粉の混入により圧縮強度の増加が図られるのに対し、K値の上昇を抑制できるためである。この結果は、連壁コンクリートの壁体の超高強度化と品質向上における石粉の有用性を示唆するものと思われる。

表-6 断熱温度上昇試験結果

記号	セメントの種類	単位置量 (kg/m ³)		石粉の細骨材置換量 (kg/m ³)	解析結果	
		C	S F		K(℃)	α
N-1	N P	540	60	—	62.53	1.36
N-2					56.32	1.16
S-1	S C	540	60	—	45.10	0.62
S-2					100	40.31
F-1	S F C	540	60	—	38.56	0.60
F-2					100	36.35

W/P:0.25, 石粉, Q F; 比表面積4000 cm²/g

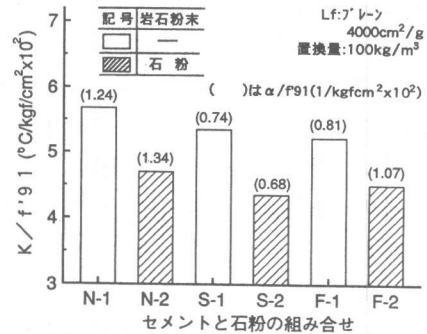


図-12 石粉混入コンクリートにおける断熱温度上昇量の圧縮強度比

4. あとがき

連壁コンクリートを対象として、鉱物質微粉末、特に岩石微粉末を用いた超高強度化に関する基礎研究の結果、主に以下の事項が確認できた。

- ① 低水結合剤比の領域においても、石粉を細骨材に適当量置換したコンクリートは、無混入のものに比べて材令の長期に渡り、10%程度の強度増加が図られる。
- ② 低水結合剤比の領域において、珪石微粉を細骨材に適当量置換したコンクリートは、初期材令では無混入のものに比べて10%程度の強度増加が図られるが、長期材令での強度増加は小さい。
- ③ 石粉あるいは珪石微粉を細骨材に置換したコンクリートは、無混入のものに比べてその粘性は増加するが、結合材を含む微粉末容積を適当に選定することにより、トレミー管による打設に適した流動性に調整できる。
- ④ 石粉を細骨材に置換したコンクリートは、無混入のものに比べてその断熱温度上昇量は同等か小さく、強度増加を考慮すると連壁コンクリートの超高強度化に有用である。

参考文献

- [1] 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートのウォーカビリチーにおよぼす効果に関する基礎研究、土木学会論文集、Vol.84、pp.98-118、1962
- [2] 青木茂ほか：超高強度連壁コンクリートの基礎的性質、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、1992
- [3] 近松竜一ほか：高流動コンクリートの流動性評価方法（大型ロート試験の提案）、セメントコンクリート、No.530、Apr、1991