

論文

[1082] 超高強度連壁コンクリートの基礎的性質

正会員○青木 茂 (大林組技術研究所)

正会員 近松竜一 (大林組技術研究所)

正会員 芳賀孝成 (大林組技術研究所)

1. まえがき

大深度構造物が増加する中で、地下連続壁コンクリート（連壁コンクリートと略記する）も高強度化の傾向がある[1]。今後、さらに構造物の規模が大型化することによって、配合強度で1000kgf/cm²程度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。現在、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、連壁コンクリートでは、トレミー内や掘削溝内での流動性の確保や、水和熱の増大を抑制することなどが重要な課題となる。しかし、超高強度領域において低発熱セメントと微粉末材料を組み合わせた場合のコンクリートの諸性状を調査した報告は少ない。そこで、本研究では低発熱セメントと微粉末材料を用いた超高強度連壁コンクリートの流動性や壁体コンクリートの品質と密接な関係がある断熱温度上昇量、各種強度特性、透水係数などについて基礎的研究を行った。

2. 実験概要

2. 1 材料

使用したセメントの種類と物性を表-1に示す。低発熱セメントを主体に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、低発熱セメントを用いたコンクリートの各種性質を従来の連壁コンクリートの性質と比較するために用いたものである。

超微粉末材料には非造粒のシリカフェーム（SF）を用いた。シリカフェームの主な物性は、平均粒径 0.15 μm, 真比重 2.2, 比表面積 200,000cm²/g である。使用した骨材の種類と物性を表-2に示す。混和剤は、ポリカルボン酸を主成分とし、標準添加率の異なる2銘柄の高性能AE減水剤（SPAと略記する）を用いた。

2. 2 配合

配合の組合せを表-3に示す。シリカ

表-1 セメントの種類と物性

記号	種別	比重	成分割合(%)		ブレン (cm ³ /g)	凝結		圧縮強さ (kgf/cm ²)		
			高炉スラグ	フライアッシュ		始発 (h-m)	終結 (h-m)	7d	28d	91d
SC	低発熱2成分	2.96	75	—	5760	4-00	5-45	283	423	503
SFC	低発熱3成分	2.86	65	15	5210	5-45	7-10	218	338	413
NP	普通	3.15	—	—	3460	2-26	3-28	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 配合の組合せ

セメントの種類	SC(2成分), SFC(3成分)					NP
水結合材比 W/C+SF(%)	28	25			22, 20	25
SFの置換率 (C+SF)×%	10	0	5	10	15	10

フュームの置換率は結合材量の内割で10%を基本とし、低発熱セメントを用いた水結合材比が25%の配合については0~15%まで4水準とした。

表-4に配合を示す。表-4には、配合の組合せの内、シリカフューム置換率が0%および10%のものを示した。各配合とも単位水量を一定とし、練上り直後のスランプフローが60cm程度となるように高性能AE減水剤により調整した。空気量は2%を目標値とした。

各種試験はJISの方法に基づいて行い、スランプフローの経時変化は静置状態で測定した。

なお、コンクリートの各種性状を考察する上で、大型橋梁下部工の地下連続壁に適用した高強度コンクリート（高強度連壁コンクリートと略記する）の実験結果を実績値として用いた。高強度連壁コンクリートの配合仕様は、配合強度を560 kgf/cm²とし、3成分系の低発熱セメント（高炉スラグ40%,フライアッシュ20%）を用いて水セメント比を33%としたスランプ24cmの流動化コンクリートである [1]。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

(1) 流動性

シリカフュームの置換率と高性能AE減水剤の添加率の関係を図-1に示す。低発熱セメントの種類にかかわらずシリカフュームの置換率が大きくなるに従い高性能AE減水剤の添加率が增大することが認められる。また、シリカフュームの置換率を同一とした場合、フライアッシュを混入した3成分系のセメント（SFC）を用いた配合の方が、2成分系のセメント（SC）を用いたものより高性能AE減水剤の添加率は小さい。これは、フライアッシュによる流動性向上効果に起因するものと考えられる。

スランプフローの経時変化を図-2に示す。シリカフュームの置換率を10%とした場合、低発

表-4 配合

No.	セメントの種類	W/C+SF (%)	SF/C+SF (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤	
					W	C	SF	S	G	銘柄	(C+SF)×%
①	SC	25	0	40	150	600	—	658	996	A	0.9
②						540	60	650	988	B	1.45
③		10	39	675		75	582	917	A	2.0	
④				B		4.35					
⑤				600		—	650	986	A	0.75	
⑥	SFC	25	0	40	540	60	650	988	B	3.5	
⑦					675	75	571	906	A	1.6	
⑧		10	39	540	60	663	1004	B	3.5		
⑨				A	1.8						
⑩				NP	25	40	540	60	663	1004	A

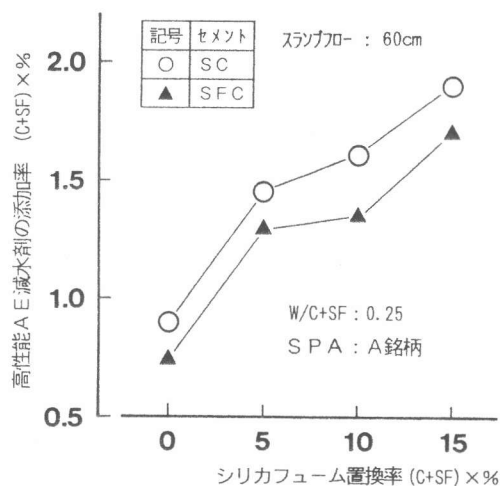


図-1 シリカフュームの置換率と減水剤の添加率の関係

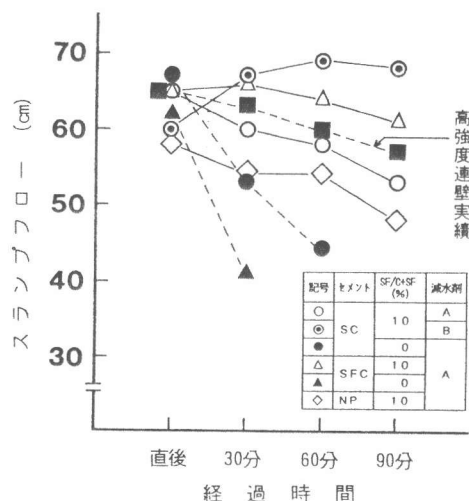


図-2 スランプフローの経時変化

熱コンクリートのスランブフローの経時低下量は高強度連壁コンクリートの実績値と比較して同等か小さい傾向にあることが認められる。これに対し、シリカフェームを混和しない場合には、練上り後60分でのスランブフローは40cm程度まで低下し、流動性の経時低下が大きい。これらの結果より、極めて低水セメント比のコンクリートをトレミー打設に供するためには、

シリカフェームの置換により流動性の保持を図ることが一方策と思われる。なお、シリカフェームの置換による流動性向上効果は主にその粒子形状（球形）に起因するものと思われる。

図-3にシリカフェームの置換率とコンクリートの流下時間との関係を示す。コンクリートの流下時間とは図-4に示す形状寸法のロートをを用いて、ロート内のコンクリートが排出し終わるまでの時間を測定したものである。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[2]であり、トレミー内のコンクリートの流下性状は、その粘性と密接な関係にあると考えられ、特にトレミー打設の場合の施工性を評価する上で有用であると思われる。図-3より、低発熱セメントの種類にかかわらず、シリカフェームの置換率が10%の場合において流下時間が最も小さくなることが認められる。なお、3成分系のセメントを用いた配合の方が2成分系のセメントを用いたものよりシリカフェームの置換率にかかわらず流下時間は小さくなっており、フライアッシュの流動性向上効果が認められる。

流下時間の経時変化を図-5に示す。低発熱セメントを用い、かつシリカフェームを10%置換した場合の流下時間の経時変化は、高強度連壁コンクリートの実績値と比較してほぼ同等であるといえる。特に、3成分系のセメント（SFC）を用いた場合には、練上り後90分でも流下時間は高強度連壁コンクリートの実績値より小さく、2成分系のセメント（SC）を用いた場合でも45分経過までは同様な結果が得られた。これに対し、シリカフェームを混和した配合でも普通セ

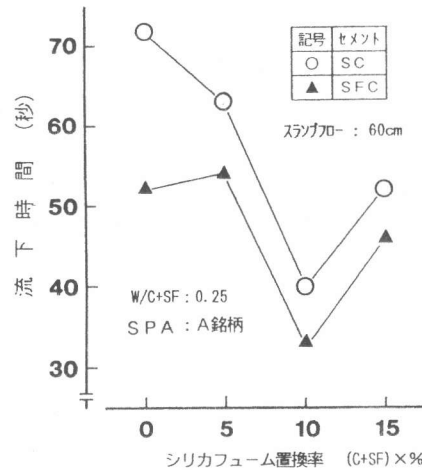


図-3 シリカフェームの置換率と流下時間の関係

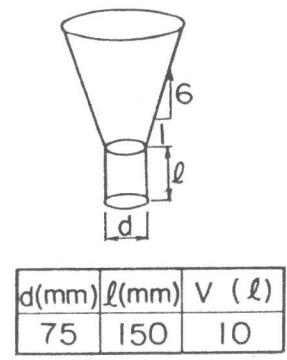


図-4 大型ロートの形状寸法

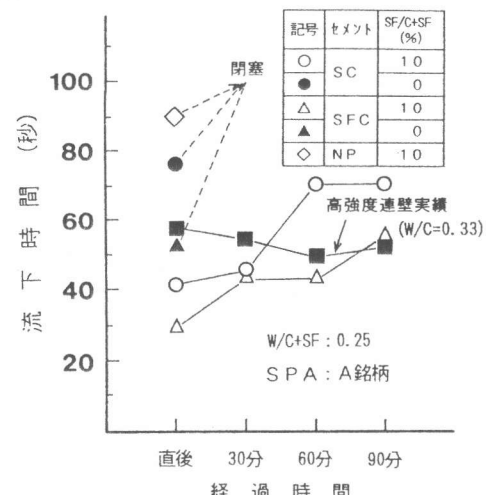


図-5 流下時間の経時変化

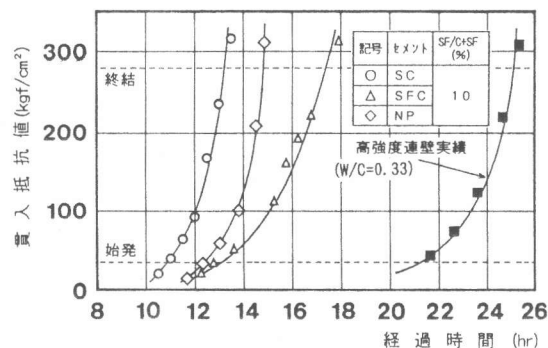


図-6 凝結性状

メント (NP) を用いた場合や、低発熱セメントを用いた配合でもシリカフュームを混和しない場合には流下時間の経時変化が大きく、30分経過後においてロート内で閉塞が生じた。これらの結果より、低発熱セメント、シリカフュームおよび高性能AE減水剤を効果的に組合せた配合のコンクリートは、低水セメント比であっても、粘性によるトレミー内での閉塞や流下時間の増大を抑制することができ、トレミー打設時の施工性は十分確保できるものと考えられる。

(2) 凝結性状

図-6に各種コンクリートの凝結試験結果を示す。凝結の始発および終結とも、2成分系のセメント (SC), NP, 3成分系のセメント (SFC) の順で長くなっている。3成分系のセメント (SFC) の凝結時間が長いのは、フライアッシュの混入による影響であると考えられる。

なお、各種コンクリートとも高強度連壁の実績値に比べて、始発、終結とも7時間以上短くなっているが、これはコンクリート打設後の溝壁の安定において有利と思われる。

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

各種コンクリートの圧縮強度と材令の関係を図-7に示す。材令91日での圧縮強度は水結合材比が25%の場合で約 800 kgf/cm², 20%の場合で約1000kgf/cm² を示した。セメントの種類が同一の場合、水結合材比が25%のものより20%の方が、材令28日までの強度増加割合が若干大きいことが認められる。なお、28日以後の発現強度については、高性能AE減水剤の銘柄の違いで大きな差は認められない。

図-8に、シリカフュームの置換率と圧縮強度比の関係を示す。圧縮強度比とは、各低発熱セメントを用いた配合でシリカフュームを混和しない場合の材令91日強度と、シリカフュームを所定量混和した場合の強度との比である。材令91日に着目すると、2成分系のセメント (SC) を用いた場合にはシリカフュームを 5%~15%置換することにより強度増加が図られることが認められる。これは、シリカフュームによる空隙充填効果によるものと思われる。また、3成分系のセ

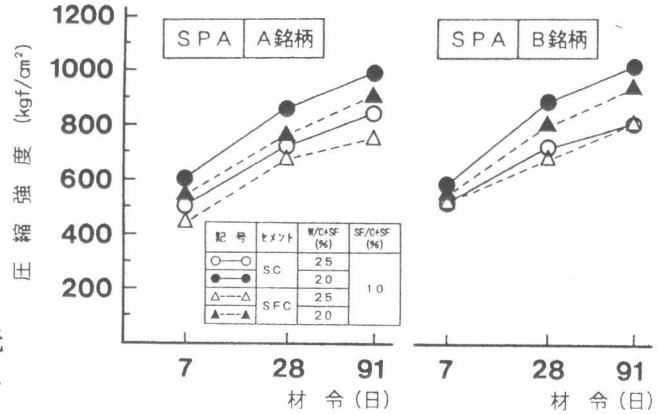


図-7 圧縮強度と材令の関係

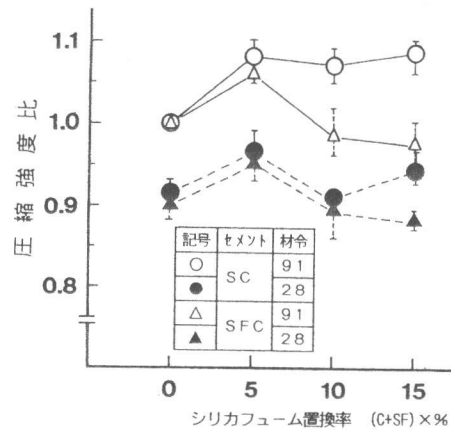


図-8 シリカフュームの置換率と圧縮強度比の関係

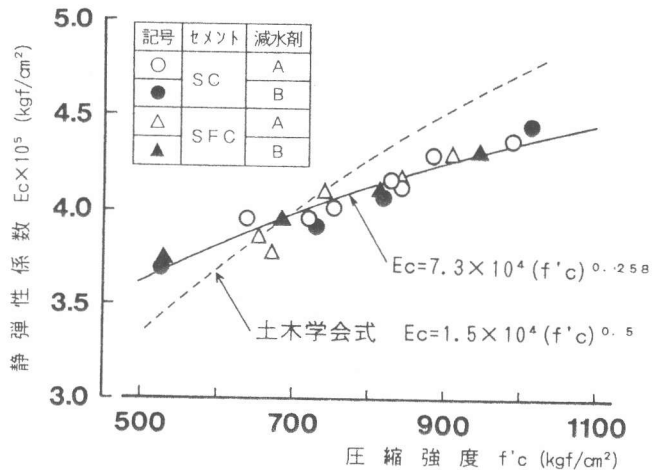


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

メント（SFC）を用いた場合には、シリカフュームの置換が5%の場合に強度の増加が生じ、10%以上においては強度低下が認められた。なお、シリカフュームの効果的な置換は強度増加だけでなく、前述した流動性向上効果も含めて総合的に判断する必要があると思われる。

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-9に示す。静弾性係数と圧縮強度の関係においては、低発熱セメントの種類や高性能AE減水剤の銘柄の違いで大きな差はないように思われる。なお、圧縮強度が700kgf/cm²~1000kgf/cm²の範囲では、圧縮強度の増大に伴う静弾性係数の増加割合は、土木学会式に比べて小さいことが認められる。

(2) 引張強度および曲げ強度

引張強度と圧縮強度の関係を図-10に示す。引張強度は直径15cm×高さ15cmの供試体による割裂引張試験の結果である。引張強度と圧縮強度の関係式は、2成分系と3成分系のセメントを用いたコンクリートをまとめて近似したものである。圧縮強度が500kgf/cm²~900kgf/cm²の領域では、圧縮強度の増大に伴う引張強度の増加割合は土木学会式と近似式で大きな差は認められない。

図-11に曲げ強度と圧縮強度の関係を示す。曲げ強度と圧縮強度の関係式は、2成分系と3成分系のセメントを用いたコンクリートをまとめて近似したものである。

(3) 透水係数

透水試験の結果を表-5に、セメント種類での拡散係数の比較を図-12に示す。透水試験は直径15cm、高さ15cmの供試体を用いて、水圧をP=20kgf/cm²とし、48時間加圧によるインプット法により行った。なお、水結合材比を50%とした配合は、RC示方書に規定される連壁コンクリートの最小単位セメント量を用いたものである。図-12より、セメントの種類にかかわらず、水結合材比を低下させることにより、コンクリートの拡散係数を小さくできることが認められる。また、表-5にみられるように、低発熱セメントを用いた配合でも、シリカフュームを混和し、水結合材比を25%としたコンクリートは、透水係数が従来のNPを用いた普通強度の連壁コンクリートの配合と比べて1/7~1/8である。これは、超

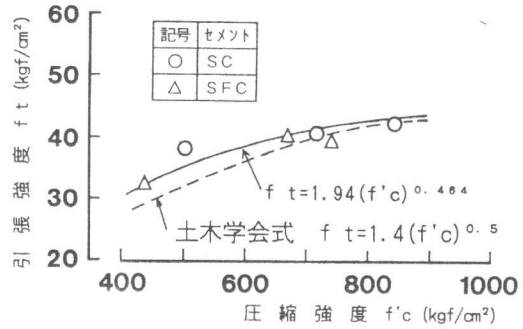


図-10 引張強度と圧縮強度の関係

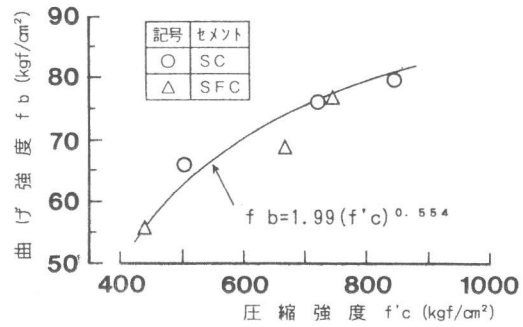


図-11 曲げ強度と圧縮強度の関係

表-5 透水試験結果

セメントの種類	W/C+SF (%)	単位量(kg/m ³)		拡散係数 β (cm ² /sec)	透水係数 k (cm/sec)
		C	SF		
NP	50	350	—	2.8×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻¹⁰
	25	540	60	1.4×10 ⁻⁵	1.5×10 ⁻¹¹
SC	50	350	—	1.6×10 ⁻⁴	1.6×10 ⁻¹⁰
	25	600	—	3.4×10 ⁻⁵	3.7×10 ⁻¹¹
SFC	50	350	—	1.9×10 ⁻³	2.9×10 ⁻⁹
		600	—	9.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻¹⁰
	25	540	60	4.2×10 ⁻⁵	4.6×10 ⁻¹¹

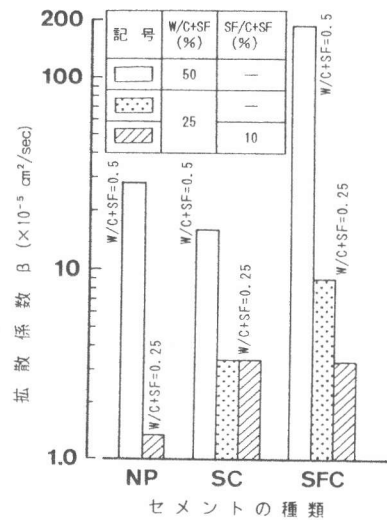


図-12 コンクリートの拡散係数

高強度連壁コンクリートを大深度構造物の止水壁に適用する際に有利になるものと考えられる。

(4) 断熱温度上昇

断熱温度上昇試験結果を表-6に、断熱温度上昇量と材令の関係を図-13に示す。これらの結果より、低発熱セメントを用いた水結合材比が25%の配合のコンクリートは、普通セメントを用いた場合より17℃~24℃程度K値を低減でき、また、発熱速度も小さくできることが認められる。特に、3成分系のセメント(SFC)を用いた場合、フライアッシュ混入による温度上昇量の低減効果が大い。なお、低発熱セメントを用いた水結合材比25%の配合の断熱温度上昇量は、連壁コンクリートとして実績の多い普通セメントを用いた水セメント比50%の配合のものより小さい結果となった。これは、超高強度連壁コンクリートの壁体の品質について、実績と比較しても遜色なく、むしろ良好な結果が得られる一因を示唆するものとする。

表-6 断熱温度上昇試験結果

セメントの種類	W/C+SF (%)	単位置量(kg/m ³)		解析結果	
		C	SF	K(°C)	α
NP	50	350	—	59.09	0.96
	25	540	60	62.53	1.36
SC	50	350	—	30.26	0.88
	25	540	60	45.10	0.62
SFC	50	350	—	29.61	0.76
	25	540	60	38.65	0.60

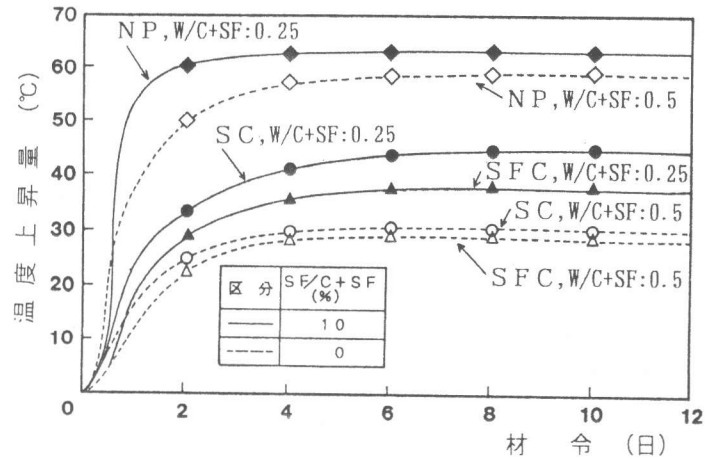


図-13 断熱温度上昇量と材令の関係

4. まとめ

連壁コンクリートの超高強度化に関する基礎的研究の結果、以下の事項が確認できた。

- ①低結合材比でかつ結合材量の大きいコンクリートでも、低発熱セメントやシリカフェームおよび高性能AE減水剤を効果的に組合せることにより、トレミー打設に供することが可能である。
- ②低発熱セメントを多量に用いた配合でも、凝結時間は従来の高強度連壁コンクリートのものよりはやく、コンクリートの打設直後の溝壁の安定には有利である。
- ③高炉スラグ混入量の多い低発熱セメントを用いた場合でも材令91日の圧縮強度で1000kgf/cm²程度の連壁コンクリートを製造できる。
- ④低水結合材比であっても、低発熱セメントを用いることにより、断熱温度上昇量を大巾に低減することができ、また、拡散係数も小さく、止水性能の向上が図られる。

今後は、他種の微粉末材料や高性能AE減水剤を用いた場合や、練上り温度、養生温度を変えた場合などについてさらに検討を行う予定である。

〈参考文献〉

- 1) 加島 聡 ほか：明石海峡大橋アンカレイジにおける低発熱型高強度コンクリートによる地下連続壁の施工，コンクリート工学，Vol. 29, No. 4, 1991
- 2) 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