

論文

[1090] 超高強度コンクリートの性質に関する研究

正会員 ○依田彰彦（足利工業大学工学部）

正会員 横室 隆（足利工業大学工学部）

1. はじめに

シアトルの Two Union Square ビルのコンクリート柱に 19000 psi の圧縮強度（材令56日）を打込んだと報告されている〔1〕。本研究は我が国において現時点で入手できる材料を用いたコンクリートを実験室において作った場合、圧縮強度はどの程度まで高いものが得られ、また、その圧縮強度に対応する他の性質は、どの程度であるかを知るために実施したものである。

2. 使用材料

a. セメント

- 普通ポルトランドセメント（セメント協会品、記号N） K_{28} 417kgf/cm²
- 低アルカリ形普通ポルトランドセメント（O社製品、記号NL） K_{28} 410kgf/cm²
- 早強ポルトランドセメント（O社製品、記号H） K_{28} 460kgf/cm²
- 中庸熟ポルトランドセメント（O社製品、記号M） K_{28} 331kgf/cm²
- 白色ポルトランドセメント（O社製品、記号W） K_{28} 408kgf/cm²
- 耐硫酸塩ポルトランドセメント（O社製品、記号SR） K_{28} 330kgf/cm²
- 高炉セメントA種（Y社製品、記号BA） K_{28} 428kgf/cm²
- 高炉セメントB種（Y社製品、記号BB） K_{28} 409kgf/cm²
- 高炉セメントC種（Y社製品、記号BC） K_{28} 390kgf/cm²
- フライアッシュセメントA種（O社製品、記号FA） K_{28} 389kgf/cm²
- フライアッシュセメントB種（O社製品、記号FB） K_{28} 350kgf/cm²
- シリカセメントA種（C社製品、記号SA） K_{28} 373kgf/cm²

表 1 使用セメントの主な品質

種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結 (h-m)		安定性	化 学 成 分 (%)			
			始発	終結		MgO	SO ₃	ig.loss	R ₂ O
N	3.17	3380	2-51	3-52	良	1.7	2.3	0.7	0.7
NL	3.16	3290	2-30	3-35	良	1.4	2.1	0.8	0.6
H	3.12	4290	2-26	3-34	良	1.5	2.5	0.8	0.6
M	3.22	3290	3-30	5-27	良	1.4	1.8	0.6	0.6
W	3.07	3670	2-29	3-43	良	0.6	3.0	2.6	0.5
SR	3.19	3360	3-30	4-35	良	0.6	1.2	0.6	0.5
BA	3.10	3670	2-30	3-40	良	2.9	2.0	0.9	0.6
BB	3.03	3770	3-00	4-20	良	3.4	2.1	0.9	0.5
BC	2.99	3850	4-30	5-45	良	4.5	2.0	0.9	0.4
FA	3.06	3290	3-15	4-30	良	1.3	1.7	0.9	0.6
FB	2.95	3310	3-30	4-48	良	1.0	1.8	1.0	0.6
SA	3.12	3430	2-35	3-45	良	1.2	1.9	0.6	—

b. 骨材

- 川砂（鬼怒川産）
- 川砂利（鬼怒川産）
- 石灰岩質碎石（Y O社製品、葛生産）
- 硬砂岩質碎石（O K社製品、青梅産）
- 花崗岩質碎石（H I社製品、稲田産）

c. 水

足利工業大学自家用水

d. 混和材

- シリカフューム（S Y O社製品、記号SF、ブレン150000cm²/g）

- 高炉スラグ微粉末（D社製品、記号BFS、ブレン8000cm²/g）

- 無水せっこう（Y O O社製品、記号G）

e. 化学混和剤

低単位水量及び低水結合材比にするために主成分がアニオン型特殊高分子活性剤の高性能減水剤（K社製品）を使用した。

f. 鉄筋

- D19（T O社製品）

表 2 使用骨材の主な品質

種 類	絶乾 比重	吸水率 (%)	単 位 容 重 (kg/l)	粗粒率 又は最 大寸法 (mm)	破砕値 (%)	ふるいを通るものの重量百分率 (%)									
						ふるいの呼び寸法 (mm)									
						25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
川 砂	2.51	2.46	1.76	2.79	—	—	—	—	—	99	84	68	46	18	6
川 砂 利	2.54	2.26	1.72	20	13.9	100	91	52	27	5	0	—	—	—	—
石灰岩質碎石	2.68	0.63	1.63	20	21.1	100	96	77	22	0	—	—	—	—	—
硬砂岩質碎石	2.64	1.92	1.59	20	12.1	100	92	62	30	2	0	—	—	—	—
花崗岩質碎石	2.63	0.70	1.58	20	10.3	100	100	100	49	3	0	—	—	—	—

表 3 使用水質

色	度	0
濁	度	0
水素イオン濃度 (pH)		6.7
蒸 発 残 留 物		163.2ppm
塩 素 イ オン		12.9ppm
過マンガン酸カリウム消費量		0.3ppm

g. 使用材料の品質

表 1～3 に示す。すべて JASS 5 の品質規定値を満足している。

3. 実験計画

3. 1 実験項目

a. スランブ JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験方法) により測定した。

b. 空気量 JIS A 1128 (まだ固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)) により測定した。

c. 圧縮強度 JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) によった。なお、供試体は直径 10cm で標準養生した。また、圧縮試験機は S I 社製電子管式万能試験機 (容量 100 トン及び 200 トンの 2 基) を用いた。

d. ヤング係数 JIS 原案 (コンクリートの静弾性係数試験方法) により、コンプレッソメーターを用いて歪を測定し、最大荷重の 1/3 における点のヤング係数を求めた。

e. 引張強度 JIS A 1113 (コンクリートの引張強度試験方法) によった。なお、供試体は直径 10cm で標準養生した。

f. 曲げ強度 JIS A 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) によった。なお、供試体は 10 × 10 × 40cm で標準養生した。

g. 鉄筋との付着強度 ASTM C 234 (Standard Method of Test for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel) に準じた。なお、供試体は 15 × 15 × 15cm でその中心部に D19 を埋込み、標準養生した。

h. 凍結融解作用に対する抵抗性 ASTM C 290 (Standard Method of Test for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing in Water) によった。なお、供試体は 10 × 10 × 40cm を用いた。

i. 長さ変化率 10 × 10 × 40cm の供試体を用い、温度 20℃、湿度 60% の雰囲気中で JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ試験方法) のコンパレーター法で長さを測定し、その変化率を算出した。

j. 重量変化率 長さの測定時に併せて 0.1g まで測定できる直示天秤を用いて重量を測定し、その変化率を算出した。

k. 中性化深さ 直径 10cm の供試体を用い、温度 40℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 10% の CO₂ 促進槽へ材料 28 日から 6 カ月間放置した後、上記 c. に示した試験機によってその供試体を割裂し、その割裂面に対してフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して紫赤色にならなかった部分が中性化したものと判断し、20 点の深さをノギスを用いて測定し、最後に平均することにした。

l. ポロシチー 直径 10cm の中性化前の供試体について水銀圧入式ポロシメーターを用いて 37.5 ～ 750000 Å のポーアを測定し、Total Pore Volume (T.P.V) を算出した。

m. 吸水率 上記 l. の供試体について JIS A 1110 (粗骨材の比重及び吸水率試験方法) に準じ、

上記 j. に示す直示天秤を用いて吸水量を測定し、その率を算出した。

n. 耐薬品性 直径10cmの供試体を用い、材令28日から2%塩酸、5%硫酸、10%芒硝の各溶液中へ3カ月間浸し、同一期間の水中養生の圧縮強度と比較した。なお、温度は20℃。

o. 耐熱性 直径10cmの供試体を用い、材令28日から110℃、200℃の各恒温乾燥器の中へ3カ月間入れ、同一期間の20℃水中養生の圧縮強度及びヤング係数と比較した。

3. 2 その他の条件

コンクリートはJIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）、及びJIS A 1138（試験室におけるコンクリートの作り方）によってコンクリートを練り混ぜ、供試体を作った。なお、骨材は表乾状態にして用い、ミキサは容量100ℓ立式強制攪拌ミキサ、コンクリート供試体の締固めは内部振動機を、それぞれ用いた。

4. 実験結果と検討

実験は大きく2つに分けて実施した。その結果を図1～4及び表4～8に示し、以下に検討する。

4. 1 【実験1】市販されている12種類のセメントと石灰岩質砕石及び高性能減水剤を用い、W/C 25%、スランプ18cm前後のコンクリートにおいて次のようなことが明確となった（表4及び図1）。

a. 低水セメント比なので圧縮強度は、いずれのセメントコンクリートとも大きい、セメント種類によって発現状況は異なり、その傾向は通常のW/C（50～65%）の範囲のものと似ている。

b. 圧縮強度の増進によって他の性質、例えばヤング係数、引張・曲げ・鉄筋との付着の各強度は大きくなるが、その増進の割合は圧縮強度が高いほど小さい。

表 4 主な実験結果（その1）（石灰岩質砕石使用、W/C25%, S/a41±1%）

セ メ ン ト	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	ヤング係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	引張 ^{*1} 強度 比	曲げ ^{*1} 強度 比	付着 ^{*1} 強度 比	T.P.V ^{*2} (ml/g)	長さ変化率 (×10 ⁻⁴)	重量変化率 (%)	相対動弾性係数 (%)		
				材 令 (日)					乾 燥 期 間 (日)		凍結融解サイクル		
				28	28	28	28	28	91	91	124	197	300
N	18.0	1.1	143	4.7	0.07	0.16	0.13	29.6	-2.65	-0.49	100	99	98
N L	19.0	1.4	143	4.7	0.06	0.13	0.15	32.1	-3.72	-0.60	100	98	96
H	18.0	1.0	141	5.0	0.07	0.14	0.13	29.7	-1.75	-0.36	100	99	98
M	18.0	1.3	146	4.5	0.08	0.13	0.15	35.8	-2.57	-0.94	100	99	98
W	18.0	1.3	138	4.7	0.09	0.15	0.13	31.0	-2.25	-0.68	100	98	97
S R	18.5	1.2	144	4.3	0.08	0.14	0.15	38.2	-2.87	-0.76	99	98	97
B A	17.5	1.5	140	4.5	0.09	0.15	0.15	29.0	-1.77	-0.60	100	99	98
B B	17.0	1.2	137	4.5	0.08	0.14	0.17	27.3	-3.05	-0.74	100	98	96
B C	17.0	1.5	135	4.4	0.08	0.17	0.17	25.5	-3.22	-0.77	100	96	95
F A	17.0	1.3	139	4.5	0.07	0.15	0.14	35.6	-2.98	-0.59	100	99	98
F B	19.0	1.4	134	4.3	0.09	0.18	0.20	33.8	-2.65	-0.64	100	99	97
S A	17.5	1.3	141	4.5	0.07	0.14	0.14	36.7	-1.95	-0.52	100	99	99

[注] *1 同一材令の圧縮強度に対する比を示す。 *2 供試体(10φ)の端部のボロシチーを示す。

c. T.P.Vは、いずれのセメントコンクリートとも著しく小さく、長さ（収縮）・重量（減少）の変化率もかなり小さい。これは低単位水量に起因している。また、相対動弾性係数（300サイクル）も、ほとんど低下していない。

4. 2 【実験2】上記4. 1の結果を見て12種類のセメントの差は強度発現に傾向が認められるだけであったが、本格的な実験としてセメントはNを用いて行った。その結果は次の通り。

a. 先ずセメントペーストの圧縮強度はW/A *3 25%が671kgf/cm²、40%が621kgf/cm²で前者が高く、ヤング係数、T.P.V、吸水率も前者の方が良好な結果を得た（表5）。

b. 次に粗骨材をかえたコンクリートでは総合的に判断すると石灰岩質砕石がよい（表6）。

c. Nと石灰岩質砕石を用い、さらにB F S、S F、Gの混和材も内割添加して実験した（図2～3及び表7～8）。その傾向は①～④の通り。

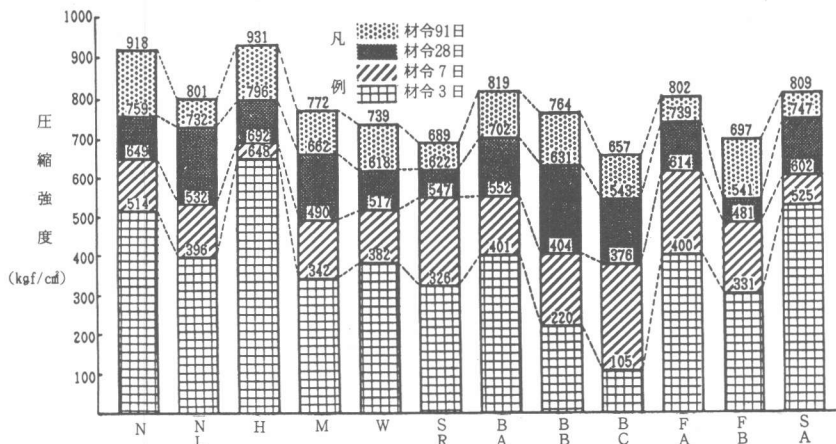


図 1 12種類のセメントを用いたコンクリート強度の発現状況（石灰岩質砕石使用）

- ① 圧縮強度は材料の組合せによっては材令7日で800kgf/cm²、28日で1100kgf/cm²、56日で1300kgf/cm²、91日で1450kgf/cm²、182日で1500kgf/cm²程度が得られる。この場合の標準偏差は、25.4~30.9kgf/cm²、変動係数は3.3~5.5%で、通常のW/Cの範囲のものと同程度であるといえよう。また、超高強度は短期材令ほど著しく高く、長期材令になると強度増進の割合は緩慢になる。

表 5 セメントペーストの主な結果（材令28日）

セメント	W ^{*3} / A (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	T.P.V (mm/g)		吸水率(%)
				中心	端部	
N	25	671	2.6	37.0	31.4	5.3
N	40	621	2.1	51.7	43.5	9.1

[注] ^{*3} W/Aとは水結合材比(W/(C+BFS+SF))・(重量%)を示す。この場合の結合材の割合はCが70、BFSが20、SFが10である。

表 6 粗骨材をかえたコンクリートの主な結果 (S/a 37±2%)

セ メ ン ト	粗 骨 材	W*3 ／ A (%)	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)				ヤング係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	引張強度比		T.P.V*2 (mm/g)	長さ変化率 (×10 ⁻⁴)	重量変化率 (%)			
						材 令 (日)								乾 燥 期 間 (日)				
						3	7	28	91	28	7	28	28	91	91			
N	川 砂 利	22	22.0	1.1	140	486	614	920	1130	4.1	0.06	0.05	28.6	-2.41	-0.70			
N	石灰岩質砕石	22	22.0	1.5	140	598	733	1077	1312	4.8	0.05	0.05	27.7	-1.49	-0.48			
N	硬砂岩質砕石	22	22.0	1.3	140	550	789	1080	1303	3.6	0.06	0.04	34.5	-3.39	-0.56			
N	花崗岩質砕石	22	22.0	1.1	140	565	864	1161	1228	3.6	0.05	0.05	32.5	-2.69	-0.51			

[注] ^{*2} 供試体 (10φ) の端部のボロシマーを示す。 ^{*3} W/Aとは水結合材比 (W/(C+BFS+SF))・(重量%)を示す。この場合の結合材の割合はCが70、BFSが20、SFが10である。

- ② ヤング係数は圧縮強度が高くなるにつれ、大きくなり、圧縮強度とヤング係数との関係は日本建築学会RC構造計算規準で提唱している式に0.9倍すると本実験結果の97%は満足する。ちなみに圧縮強度1500kgf/cm²程度の場合、ヤング係数は 5.1×10^5 kgf/cm²程度である。

- ③ T.P.Vは低単位水量、低水結合材比のため小さく、そのポアーの多くは37.5~420Åに分布し、長さ(収縮)・重量(減少)の変化率は著しく小さく、10%のCO₂濃度で促進期間6ヵ月現在の中性化現象は全く認められていない。これは低水結合材比、組織の密実等に起因している。

- ④ 耐薬品性は1.02~0.83倍と比較的良好な結果を得たが、耐熱性は加熱温度が高いほど、また、圧縮強度よりヤング係数の方が不利であった(表8)。

d. 混和材BFS、SFは単独使用より両方組合せた方が効果が著しい(図4)。この場合、短期材令ではSFが、長期材令ではBFSが大きく影響する。

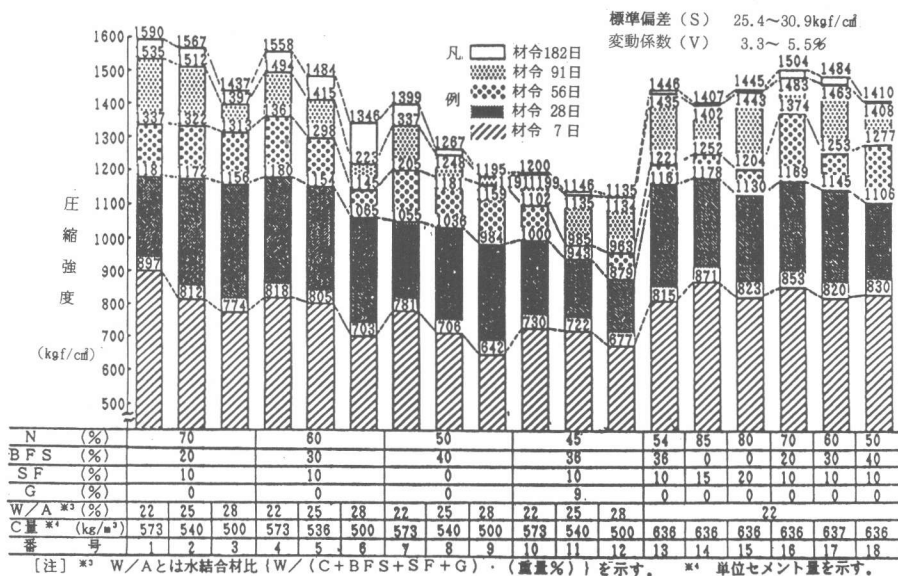


図 2 混和材を内割添加したコンクリート強度の発現状況 (石灰岩質砕石使用)

表 8 耐熱性実験結果 (川砂利使用, S/a 41 ± 1%)

番号	C:BFS:SF	W* ³ / A (%)	スラン プ (cm)	空気 量 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	水中養生3カ月 間の圧縮強度 (kgf/cm ²)	耐薬品性 (3カ月間)			耐熱性 (3カ月間)			
							圧縮強度比			圧縮強度比			
							2% HCl	5% H ₂ SO ₄	10% Na ₂ SO ₄	110℃	200℃	110℃	200℃
0	100-0-0	22	4.0	0.8	126	940 (20.7)	0.88 (24.3)	0.88 (18.9)	0.97 (25.6)	1.07 (53.2)	0.96 (58.0)	0.77	0.68
1	70-20-10	22	22.0	1.0	126	1080 (20.8)	0.83 (35.2)	0.94 (35.1)	0.99 (21.4)	1.06 (45.5)	0.89 (52.9)	0.66	0.50
14	85-0-15	22	22.0	0.9	140	1219 (20.4)	0.88 (34.8)	0.92 (26.7)	1.02 (23.6)	0.88 (54.6)	0.78 (59.7)	0.65	0.42
15	80-0-20	22	22.0	1.2	140	1178 (20.1)	0.84 (20.4)	0.99 (24.3)	0.99 (25.5)	0.86 (44.1)	0.75 (50.5)	0.57	0.43

[注] *³ W/Aとは水結合材比 (W/(C+BFS+SF))・(重量%)を示す。
() 内の数値は供試体端部のT.P.V(ml/g)を示す。

5. 結論

今回の実験研究から定量的なデータを得、結論として次のことがいえる。

- コンクリートの超高強度化を図るには低単位水量、低水結合材比にする必要上、良質な骨材や高性能減水剤の他に短期強度を高めるためにシリカフェームのような混和材と長期強度を高め、さらに強度を安定させるために高炉スラグ微粉末のような混和材を併用するといふ。

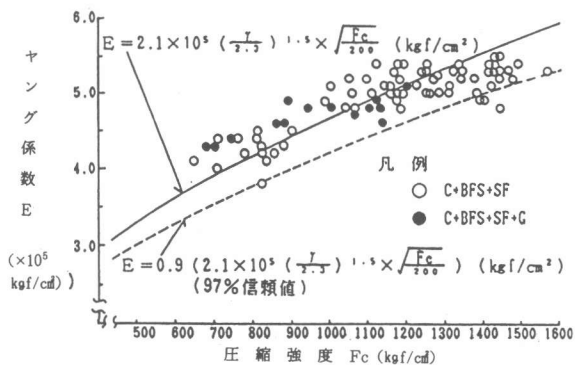


図 3 圧縮強度とヤング係数との関係

表 7 主な実験結果（その2）（石灰岩質砕石使用）

番 号	W ／ A (%)	ス ラン プ (cm)	空 気 量 (%)	S ／ a (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	T.P.V*2 (ml/g)		長　　さ　　変　　化　　率 (×10 ⁻⁴)			重　　量　　変　　化　　率 (%)			平均中性化 深　　(　mm　)
						材　令　(日)		乾　　燥　　期　　間　　(日)			促進期間			6カ月
						28	91	28	91	182	28	91	182	
1	22	22.0	1.6	41	126	40.2	29.5	-1.19	-1.28	-1.37	-0.38	-0.44	-0.52	0
2	25	22.0	1.5	42	135	28.6	23.6	-1.12	-1.44	-1.53	-0.53	-0.61	-0.69	0
3	28	22.0	1.5	43	140	39.8	33.5	-1.11	-1.16	-1.18	-0.64	-0.73	-0.79	0
4	22	22.0	1.4	41	126	44.7	32.0	-1.20	-1.28	-1.34	-0.49	-0.55	-0.63	0
5	25	22.0	1.4	42	135	43.8	26.6	-1.03	-1.19	-1.24	-0.54	-0.63	-0.72	0
6	28	22.0	1.1	43	140	38.7	37.1	-0.92	-1.24	-1.32	-0.70	-0.79	-0.89	0
7	22	22.0	0.6	41	126	41.7	19.9	-1.27	-1.98	-2.28	-0.53	-0.64	-0.73	0
8	25	22.0	0.5	42	135	40.2	23.5	-1.06	-1.87	-2.04	-0.48	-0.61	-0.74	0
9	28	22.0	0.7	43	140	30.3	22.8	-1.64	-2.70	-3.03	-0.50	-0.66	-0.76	0
10	22	4.0	1.5	41	126	34.8	26.7	-3.21	-3.88	-4.04	-0.30	-0.36	-0.40	0
11	25	4.0	1.3	42	135	39.1	32.7	-3.32	-3.67	-3.91	-0.25	-0.29	-0.40	0
12	28	6.5	1.1	43	140	39.2	33.9	-3.12	-3.20	-3.36	-0.26	-0.31	-0.42	0
13	22	22.0	1.5	39	140	41.4	37.2	-1.34	-2.19	-2.28	-0.53	-0.62	-0.67	0
14	22	22.0	0.9	39	140	39.1	30.0	-1.78	-2.87	-3.03	-0.32	-0.42	-0.44	0
15	22	22.0	1.4	39	140	33.4	32.6	-1.76	-2.72	-2.98	-0.33	-0.43	-0.46	0
16	22	22.0	1.3	39	140	43.2	19.9	-1.32	-2.40	-2.64	-0.35	-0.48	-0.49	0
17	22	22.0	1.3	39	140	31.5	21.3	-1.37	-2.40	-2.61	-0.36	-0.50	-0.52	0
18	22	22.0	1.3	39	140	37.7	18.6	-1.11	-2.12	-2.32	-0.45	-0.56	-0.61	0

[注] ^{*2} 供試体(10φ)の端部のポロシチーを示す。

^{*3} W/Aとは水結合材比(W/(C+BFS+SF+G))・(重量%)を示す。
この場合の結合材の割合はCが70、BFSが20、SFが10である。

b. 超高強度コンクリートの組織はT.

P.Vが小さく密実なので、長さ・重量
の変化率は小さく、その上、中性化深
さ、凍結融解作用に対する抵抗性、耐
薬品性等の性質が有利となる。

(謝辞) 本実験には本学卒業生笠原英夫・
柳本和年両君の協力を得た。ここに付記
して謝意を表する。

(文献)

[1] K.A. GODFREY JR ; CONCRETE
STRENGTH RECORD JUMPS 36%,
CIVIL ENGINEERING, Oct 1987

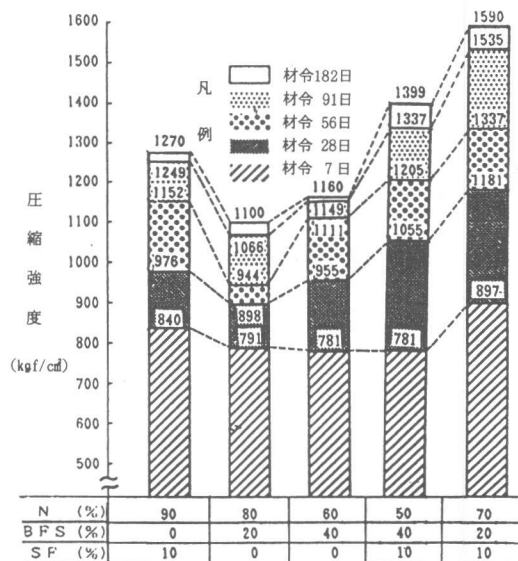


図 4 BFSとSFの効果
W/(C+BFS+SF) 22%、石灰岩質砕石使用)