

論文

[1036] 高強度コンクリートの物性に及ぼす各種要因の影響

正会員○橋 大介 (清水建設技術研究所)
 正会員 西田 朗 (清水建設技術研究所)
 正会員 今井 実 (清水建設技術研究所)
 正会員 鈴木忠彦 (清水建設技術研究所)

1. まえがき

近年、北米を中心に超高層鉄筋コンクリート建築物やプレストレストコンクリート橋に、部材断面の縮小や鉄筋量の低減を目的として、高強度コンクリートが頻繁に使用され、コンクリートの設計基準強度も1000kgf/cm² 程度にも達するようになってきた¹⁾。

日本においても高強度コンクリートの歴史は古く、吉田博士が加圧締め方法により標準水中養生した材令28日のコンクリートで圧縮強度1050kgf/cm² を得たのは昭和10年代のことである²⁾。その後、高性能減水剤の開発・発達に伴い、設計基準強度 600kgf/cm² 以上の高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート橋が昭和40年代後半に建設されるようになった。

建築物においても設計基準強度420 ~480 kgf/cm² 程度の高強度コンクリートを用いた高層鉄筋コンクリート建築物が出現し始め、都市部の土地事情とも相まって今後ますます建築物の超高層化に伴うコンクリートの高強度化が考えられる。さらに、シリカフェームのような新混和材料、高降伏点鋼材や新構造形式の開発・発展により高強度コンクリートの適用範囲は広がるものと予測される。

本研究は、このような状況に鑑み、圧縮強度1000kgf/cm² 程度の現場打ちコンクリートを対象として、使用材料の種類・組み合わせおよび調査条件がコンクリートのワーカビリティや圧縮強度等にどのような影響を及ぼすかを実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリート調査

使用材料は表-1に示すとおりである。セメントは普通、早強、超早強の3種類とし、混和材は外国産のシリカフェーム2種類(顆粒と微粉末)と高炉スラグ粉末とし、合計6種類の結合材を用いた。骨材は通常使用する川砂および碎石といった普通骨材に加え、破砕値(B.S.812)を尺度とする骨材の強さがコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を明らかにするために、特殊な骨材の組み合わせを

表-1 使用材料一覧表

使用材料	記号	種類	物性および成分	
結合材 CC	セメント C	NC	普通 比重=3.16,比表面積(ブレン)=3180cm ² /g	
		HC	早強 比重=3.14,比表面積(ブレン)=4340cm ² /g	
		UC	超早強 比重=3.13,比表面積(ブレン)=5890cm ² /g	
	混和材	DSF	顆粒シリカフェーム 比重=2.23,比表面積(BET)=149800cm ² /g,SiO ₂ 量=90.6%	
		PSF	微粉末シリカフェーム 比重=2.23,比表面積(BET)=161600cm ² /g,SiO ₂ 量=92.1%	
		BFS	高炉スラグ粉末 比重=2.90,比表面積(ブレン)=4120cm ² /g	
骨材	細骨材 S	KS	鬼怒川産川砂 表乾比重=2.58,吸水率=2.33%,粗粒率=2.47	
		AS	溶融アルミナ 表乾比重=3.92,吸水率=0.12%,粗粒率=2.43	
		ES	エメリー骨材 表乾比重=3.11,吸水率=1.84%,粗粒率=2.76	
		CS	人工セラミック骨材 表乾比重=2.23,吸水率=1.99%,粗粒率=2.80	
		粗骨材 G	OG	青梅産碎石(硬質砂岩) 最大寸法=20mm,表乾比重=2.67,吸水率=0.61%,粗粒率=6.60 実積率=58.4%,BS破砕値=13.4%
			MG	丸子産碎石(玄武岩) 最大寸法=20mm,表乾比重=2.74,吸水率=1.51%,粗粒率=6.77 実積率=61.3%,BS破砕値=9.3%
	AG		溶融アルミナ 最大寸法=25mm,表乾比重=3.95,吸水率=0.12%,粗粒率=6.68 実積率=63.2%,BS破砕値=5.7%	
	IG		鉄鉱石 最大寸法=25mm,表乾比重=4.86,吸水率=0.64%,粗粒率=6.73 実積率=61.4%,BS破砕値=8.2%	
	CG	人工セラミック骨材 最大寸法=15mm,表乾比重=2.29,吸水率=0.51%,粗粒率=6.65 実積率=60.6%,BS破砕値=18.8%		
	混和剤	-	高性能減水剤 比重=1.20,溶液濃度=40%,主成分=ポリアリル硫酸塩	
-		流動化剤 比重=1.175,溶液濃度=37%,主成分=ポリアリル硫酸塩		
水 W	-	水道水		

3種類選定した。また、混和剤はいずれもポリアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤とスランプロス低減型流動化剤を用いた。なお、実験は主として、普通セメント、シリカフェーム、普通骨材を用いた調査を中心に行った。

表-2 高強度コンクリートの調合の要因と水準

水結合材比 W/CC (%)	31, 28, 25, 22
シリカフェーム混入率(内割) SF/CC(%)	0, 5, 10, 15, 20, 25
高炉スラグ粉末混入率(内割) BFS/CC(%)	0, 35, 55, 70
単位結合材量 CC (kg/m ³)	450 ~ 675
セメントの種類	3種類 (表-1 参照)
混和材の種類	3種類 (表-1 参照)
骨材の種類 (粗骨材)	5種類 (表-1 参照)

高強度コンクリートの調合の要因と水準は表-2に示すとおりである。コンクリートはnon-AEコンクリートとし、スランプはベースで12cm、流動化後で23cmを目標とした。

2. 2 実験方法

練りまぜに使用したミキサは、容量 100ℓのパン型強制練りミキサである。練りまぜは、次に示す手順にしたがって行った。粗骨材、約半分の細骨材、結合材および残りの細骨材を順次投入し、空練り後、最後に高性能減水剤を溶かした水を投入し、2分間練りまぜてベースコンクリートを製造した。所定のフレッシュコンクリートの物性試験を終了した後、さらに流動化剤を添加して1分間練りまぜて流動化コンクリートとした。練り上がったコンクリートはベースコンクリートと同様の試験を行った後、以下に示すような試験を実施した。

(1) スランプの経時変化試験： 現場打ちコンクリートの場合、施工性確保の観点から、60～90分間程度良好なワーカビリティを保持できるコンクリートが望まれる。そこで、練り上がりから90分までのスランプの経時変化を測定し、良好なワーカビリティを保持できるかを検討した。なお、コンクリートは静止状態で練り置いた。

(2) 材料分離に対する抵抗性試験： 本調合のコンクリートは、富調合低水結合材比のコンクリートであり、粘性が極めて大きくなる。コンクリートポンプ車による施工を考慮した場合、建築工事標準仕様書 JASS5鉄筋コンクリート工事に規定されている高強度流動化コンクリートのスランプの最大値(18cm)以下での施工が困難のように考えられたので、目標スランプを23cmと定めた。そのため材料分離に対する抵抗性を確認しておく必要があった。試験方法は次のとおりである。コンクリートをφ15×30cmの型枠に詰め、振動台式振動機(振動数3000cpm、振幅1.1mm)で10、30、60および120秒の4水準で振動締固めを行った。約30分経過後、型枠上部のコンクリート約2ℓ、下部コンクリート約2ℓを採取してコンクリートの単位体積質量および単位粗骨材量の測定を行い、上部と下部の差をもって材料分離に対する抵抗性を評価した。

(3) 硬化コンクリートの物性試験： 試験項目は圧縮強度、弾性係数(φ10×20cm、1材令3本)および引張強度(φ15×20cm、1材令3本)とし、供試体は所定の材令まで標準水中養生し、各材令で適宜、試験を実施した。

3. 実験結果と考察

3. 1 フレッシュコンクリートの物性

(1) シリカフェームの混入が混和剤使用量に及ぼす影響： 図-1はシリカフェーム(顆粒)の混入率と同一スランプ(23cm)を得るための混和剤添加率(高性能減水剤と流動化剤の合計添加率)との関係を示したものである。同図によれば、水結合材比31%においては、シリカフェームの混入率が大きくなるにしたがって混和剤添加率も若干大きくなる傾向が認められた。しかし、水結合材比が低くなるにしたがってシリカフェームの混入により、混入率10%まで漸次、混和剤添加率が小さくなる傾向を示した。特に水結合材比22%の場合、シリカフェームを10%混入すると、無混入のものに比べ混和剤添加率は約50%程度となった。また、本調査の水結合材比の範

囲内では、シリカフェームの混入率がある限度（10%程度）を越えると混和剤添加率が增大する傾向も認められた。

図-2は2種類のシリカフェーム（顆粒と微粉末）を用いて、混和剤添加比率（シリカフェーム無混入時の混和剤添加率に対するシリカフェーム混入 [10%]時の混和剤添加率の比）を各水結合材比で比較したものである。いずれの水結合材比においても、微粉末シリカフェームを用いた方が顆粒に比べ、混和剤添加比率が小さくて済んだ。また、同図は先に述べたように、水結合材比が低くなるにしたがって、混和剤添加比率が小さくなる傾向を顕著に示している。この結果は既往の研究結果³⁾と異なった傾向を示している。すなわち、一般に、シリカフェームを用いた水結合材比が比較的高く単位水量が多いコンクリートでは、シリカフェームの混入ならびに混入率の増加に伴い、同一スランプを得るための単位水量（又は混和剤添加量）が増加することが認められており、これはセメントの粉末度が大きくなった場合にみられる性状と同じものと理解できる。一方、本調査のように富調合低水結合材比で水の絶対量が少ない場合においては、シリカフェームがセメント粒子間空隙に行きわたり、あたかも水のように作用し、流動性が大きくなったものと考えられる。

さらに、練りませ時の状態を目視観察すれば、水結合材比 25%程度以下の場合、シリカフェーム無混入、顆粒シリカフェーム混入、微粉末シリカフェーム混入の順に練りませ時間が少なくなるようであった。シリカフェーム無混入の場合、練りませ水投入後セメント粒子がいわゆるフロック状態を呈することにより、コンクリートが団塊状態を形成した後に均等に練りませられ、ベースコンクリートの練りませに3分程度以上を必要とした。顆粒シリカフェームの場合は若干同様の傾向が認められたが、微粉末シリカフェームの場合は練りませ水投入と同時に水が材料全体に行きわたり、団塊状態を形成することなしに練りませることができた。このことは、シリカフェームがセメントの分散に寄与するためと考えられ、前述の混和剤の使用量が少なくてすむということと一致するものである。

なお、セメントの種類に関しては、セメントの粉末度が大きくなるほど混和剤添加率も大きくなり、超早強セメントを用いた場合の増大は著しかった。一方、高炉スラグ粉末に関しては、混入率を大きくするほど混和剤の使用量が少なくなった。

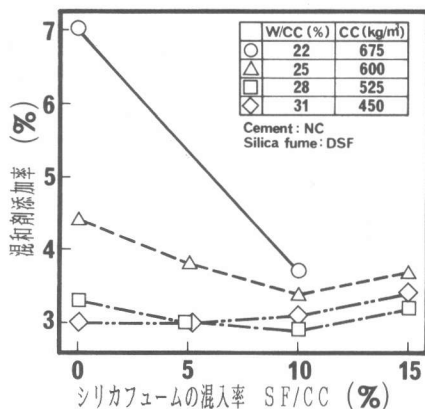


図-1 シリカフェームの混入率と混和剤添加率

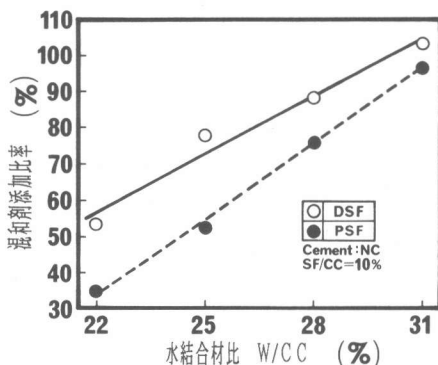


図-2 水結合材比と混和剤添加比率

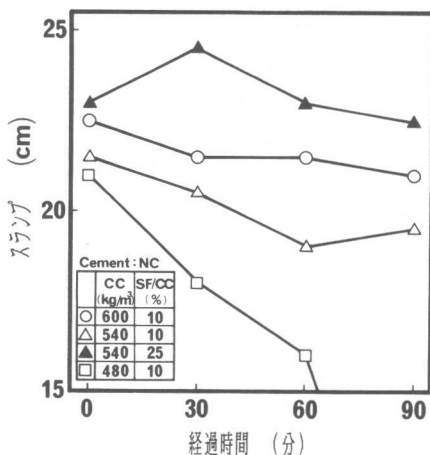


図-3 スランプの経時変化

(2) スランプの経時変化： 図-3は、水結合材比 25%で単位結合材量を変化させた調査でのスランプ経時変化の試験結果である。単位結合材量 600、540 kg/m³ の場合、流動化後90分経過したコンクリートのスランプロス量は 2cm程度であり、かなり長時間、ワーカビリチーの低下を抑えることができた。一方、単位結合材量480 kg/m³ の場合、流動化剤の使用量が他の3調査と同程度であったが、スランプロスは大きくなり、流動化後90分ではスランプ 8cmまで低下した。すなわち、流動化剤の種類（性能）や添加量はスランプロスに影響を及ぼす要因と考えられるが、単位結合材量を制限し単位水量を大幅に低減すると、スランプロスに著しい影響を及ぼすことが明らかとなった。

また、セメントの種類の違いによるスランプロスへの影響は、図-4に示すように殆ど見受けられず、流動化後90分におけるスランプロス量は 2cm程度以下であった。

(3) 材料分離に対する抵抗性： 実験は、水結合材比 25%のコンクリートと JASS5 に準拠した（スランプ 18cm以下）水結合材比 55%のコンクリートを用い、スランプの大きさを変化させて行った。材料分離に対する抵抗性を単位粗骨材量差を尺度として本実験方法で評価した場合、図-5に示す結果が得られた。すべての調査において振動締め時間10秒では、単位粗骨材量差は5%程度以下であり、粗骨材の分離の程度は少ないと言える。また水結合材比 25%の場合、スランプ25cm以上に大きくしてもコンクリートの材料分離に対する抵抗性は、水結合材比 55%でスランプ 8.5cmのコンクリートと遜色なく、同程度の結果になった。これは富調査低水結合材比で、かつシリカフュームを混入するため粘性が大きくなり、材料分離に対する抵抗性が増大したためと考えられる。

なお、海外では本調査のようなコンクリートをスランプ25cmで実施工した例もいくつか見受けられる⁴⁾⁵⁾。このようなケースでは、スランプ値の妥当性や流動化剤の過添加による凝結遅延等の観点から、スランプをワーカビリチーの尺度とするのではなく、スランプフロー値等で品質管理を行うといった配慮も必要となろう。

3. 2 硬化コンクリートの物性

(1) 圧縮強度： 普通セメントを用いシリカフューム無混入とした場合、水結合材比31~ 22%の範囲での圧縮強度は材令28日で 800~950 kgf/cm² 程度であった。

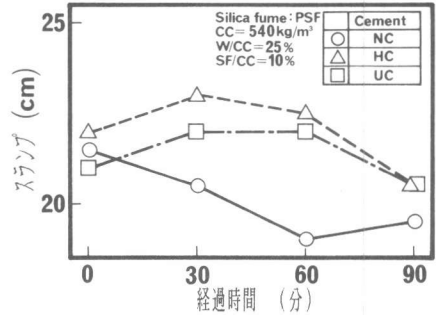


図-4 スランプの経時変化

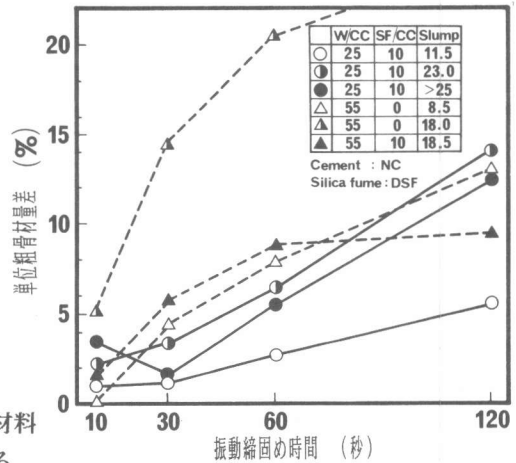


図-5 材料分離試験結果

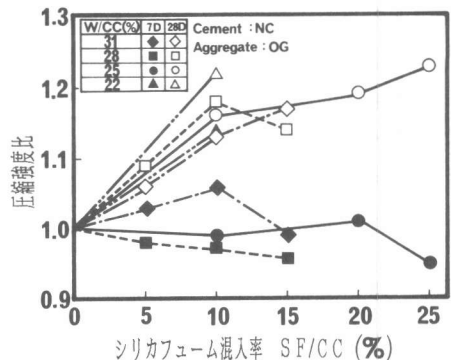


図-6 シリカフュームの混入率と圧縮強度比

図-6はシリカフェームの混入率を変化させて、シリカフェーム無混入時に対する圧縮強度の比を比較したものである。シリカフェームの混入によって材令7日ではいくぶん強度が小さくなるものも見受けられるが、材令28日になると6~23%程度の強度増加が認められる。この傾向は、シリカフェームの混入率の増加に伴い圧縮強度も増加するが、混入率10%程度までが伸びが顕著であった。

図-7は、粗骨材の種類の相違が圧縮強度に及ぼす影響をB.S.812に規定されている破砕値を尺度として示したものである。同図によれば、破砕値と圧縮強度の間には相関がみられ、粗骨材の破砕値が大きくなれば圧縮強度も小さくなるため、圧縮強度1000kgf/cm²以上の高強度コンクリートの製造においては骨材の選定は重要となろう。

図-8は、セメントの種類の相違が圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。早強セメントを用いた場合が各材令において最も圧縮強度が大きくなる傾向を示しており、シリカフェームの混入率25%のコンクリートの材令28日圧縮強度は1256kgf/cm²であった。また、材令28日の圧縮強度の変動係数は0.5~5.0%（平均2.2%）程度で、ばらつきは小さかった。したがって、実施工時においては各バッチ間の変動係数を小さくする品質管理が重要な課題になると考えられる。

次に、高炉スラグ粉末混入率と圧縮強度の関係は図-9に示すとおりになった。同図によれば、高炉スラグ粉末混入率55%においても材令56日で圧縮強度1015kgf/cm²が得られた。現在、設計基準強度は材令28日の圧縮強度を基準として管理しているが、基準となる材令が56日、91日と長期になれば、高炉スラグ粉末混入率を大きくしても、圧縮強度1000kgf/cm²以上が確保できると同時に、温度ひびわれ、アルカリ骨材反応等の抵抗性も向上すると考えられる。

なお、シリカフェームの種類（顆粒と微粉末）、粗骨材最大寸法（10mmと20mm）の相違が圧縮強度に及ぼす影響に関しては、本実験の範囲内では殆ど認められず、大差のない結果となった。

(2) 圧縮強度と引張強度および弾性係数との関係：

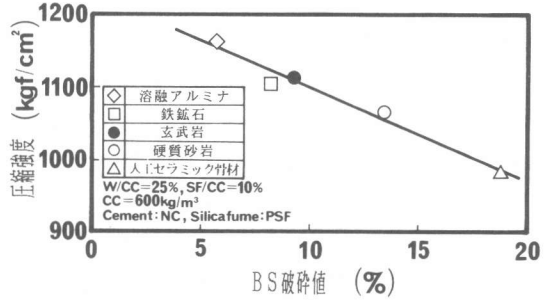


図-7 骨材の破砕値と圧縮強度

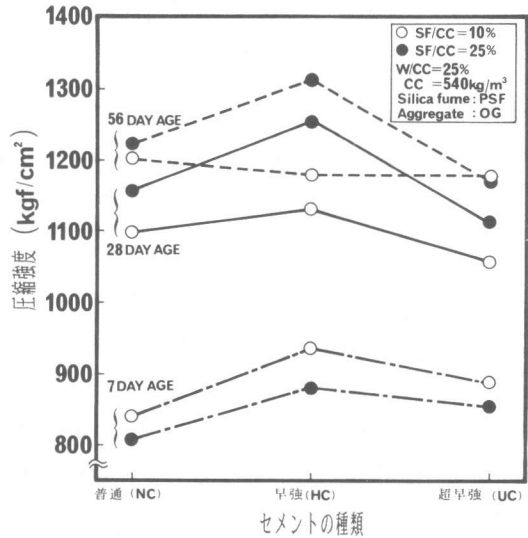


図-8 セメントの種類と圧縮強度

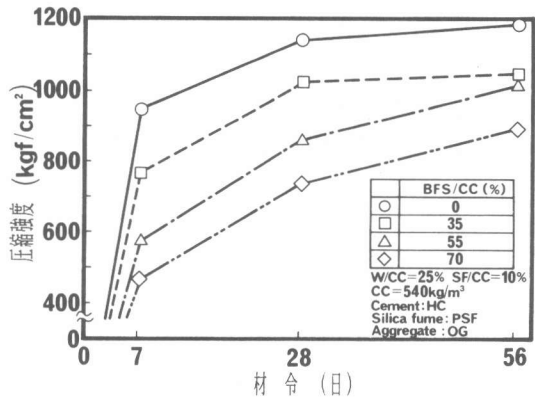


図-9 高炉スラグ粉末混入率と圧縮強度

図-10に圧縮強度と引張強度の関係を示す。引張強度は圧縮強度1000kgf/cm²で60kgf/cm²程度の値となった。圧縮強度800～1200kgf/cm²の範囲のコンクリートを対象として回帰式を算定すると、210～840kgf/cm²のコンクリートから求めたCarrasquilloらの実験式⁶⁾と極めて近似する結果となった。

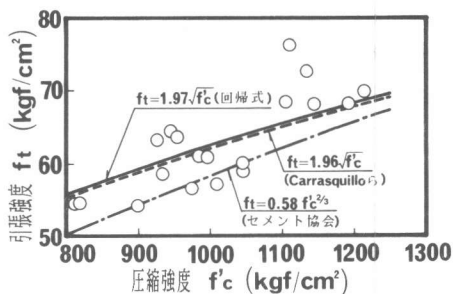


図-10 圧縮強度と引張強度

図-11に圧縮強度と弾性係数の関係を示す。弾性係数は圧縮強度1000kgf/cm²で40×10⁴kgf/cm²程度の値となった。実験で得られた回帰式は、Martinezらの実験式⁷⁾とよく一致する結果になった。一方、ACI-318に示されているコンクリートの単位体積質量(2440kg/m³)と圧縮強度より弾性係数を算定すると、かなり大きな値となり、過大評価する結果になる。

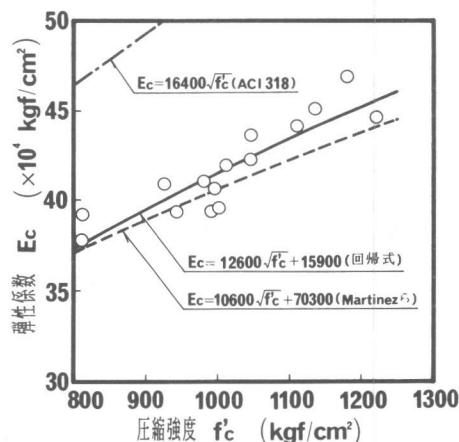


図-11 圧縮強度と弾性係数

なお、ポアソン比は0.22程度であった。

4. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると、以下に示すとおりである。

- (1) 高強度コンクリートにシリカフェームを使用すると、練りまぜを容易にし、混和剤の使用量を低減できる効果があり、この傾向は水結合材比が小さくなるほど顕著になる。
- (2) 流動化後90分経過したコンクリートのスランプロス量は2cm程度であり、かなり長時間、ワーカビリティの低下を抑えることができた。
- (3) シリカフェームを混入し富調合低水結合材比としたコンクリートは、施工性確保の観点から目標スランプを23cmとしても材料分離は極めて少ない。
- (4) 水結合材比25%程度で、材令28日圧縮強度1000kgf/cm²以上が確保できるとともに、ばらつきの小さいコンクリートを製造することができた。
- (5) シリカフェームに加えて高炉スラグ粉末を高混入率で使用したコンクリートにおいても、長期材令で圧縮強度1000kgf/cm²以上の高強度が得られ、各種物性の改善・向上を目的としての使用が充分考えられる。

今後は、乾燥収縮、クリープ、水和発熱、耐凍害性、耐火性等の諸物性や実施工時の施工性ならびに品質管理等に関して検討する予定である。

参考文献

- 1) Russell, H.G.: High Strength Concrete in North America, FIP notes, 1987/4, pp. 14~18
- 2) 吉田徳次郎: 最高強度コンクリートの製造に就いて、吉田徳次郎博士論文集、土木学会、1961、pp. 103~115
- 3) Malhotra, V.M., and Carette, G.G.: Silica Fume Concrete - Properties, Applications, and Limitations, Concrete International, ACI, Vol. 5, No. 5, May, 1983, pp. 40~46
- 4) Godfrey Jr., K.A.: Concrete Strength Record Jumps 36%, Civil Engineering, Oct., 1987, pp. 84~88
- 5) Holland, T.C., and Gutschow, R.A.: Erosion resistance with Silica-Fume Concrete, Concrete International, ACI, Vol. 9, No. 3, March, 1987, pp. 32~40
- 6) Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., and Slate, F.O.: Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads, ACI Journal, Proceedings, Vol. 78, No. 3, May-June, 1981, pp. 171~178
- 7) Martinez, S., Nilson, A.H., and Slate, F.O.: Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns, Research Report No. 82-10, Department of structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Aug., 1982