

論文

[1036] 高強度コンクリートの基本特性と構造体強度について

正会員 上西 隆 (奥村組技術研究所)  
 正会員 〇林 芳尚 (奥村組技術研究所)

1. はじめに

高性能AE減水剤の開発により水セメント比が30%程度の高強度コンクリートの場所打ちが可能になってきた。また、ワーカビリティの改善や強度増進を目的として微粉末混和材を利用して、さらに高強度なコンクリートの実用化を目指した研究も行われている。

本研究では、微粉末混和材を使用した高強度コンクリートにおいて、混和材の種類や混入率がフレッシュ時や硬化後の性状に及ぼす影響について検討するとともに、高強度コンクリートの場所打ちでの実用化を目指した実験を行ってきた。

本報では、このうち室内実験で得られた微粉末混和材を使用した高強度コンクリートの諸性状および設計基準強度  $600\text{kgf/cm}^2$  を場所打ちに適用した実大施工実験結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

室内実験で使用した混和材はシリカフェーム (以下SFと略記)、高炉スラグ微粉末 (以下BSと略記) の2種類とし、実大施工実験ではセメント単味 (以下PLと略記) とした。実験の要因と水準を表-1に示す。

2.2 使用材料、調合および練り混ぜ

使用材料のうち、細骨材には海砂と砕砂の混合砂を用いた。使用材料の一覧を表-2に示す。調合は単位水量を  $160\text{kg/m}^3$  とし、スランプが  $22\text{cm}$  ( $\pm 1.5\text{cm}$ )、空気量が  $3\%$  ( $\pm 1\%$ ) となるように高性能AE減水剤の使用量を定めた。調合を表-3に示す。

練り混ぜ方法は、細骨材、セメント、混和材を空練りした後モルタルを先練りする方法を採用した。

表-1 要因と水準

実験要因	水準	
	水結合材比 (W/B)	室内
	実大	30% (セメント単味)
混和材の種類	シリカフェーム 高炉スラグ微粉末	
混和材混入率 (内割り)	SF=5%, 10%, 20% BS=20%, 40%, 60%	

表-2 使用材料

材料	品質
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材 (max=2.5mm)	室内実験: 香川県室木沖産海砂 : 兵庫県西島産砕砂 実大実験: 香川県室木沖産海砂 : 兵庫県赤穂産砕砂 海砂と砕砂を容積比 7:3 で混合
粗骨材 (max=20mm)	室内実験: 兵庫県西島産砕石 実大実験: 兵庫県赤穂産砕石
混和剤	[水結合材比30%以上] アルキルアリルスルホン酸 および活性持続ポリマーの複合物 [水結合材比25%] ポリカルボン酸エーテル系の複合物
混和材	シリカフェーム (顆粒タイプ) 比表面積約 $200,000\text{cm}^2/\text{g}$ 平均粒径 $0.15\mu\text{m}$ 高炉スラグ微粉末 比表面積 $6,060\text{cm}^2/\text{g}$

表-3 調合

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kgf/m}^3$ )			
			水量	結合材	細骨材	粗骨材
室内	50	46.8	175	350	816	950
	35	41.2		457	709	1036
	30	38.7	160	533	642	1041
	25	36.2		640	570	1026
実大	30	39.7	160	533	652	1018

### 2.3 試験項目と試験方法

室内実験での試験項目と試験方法を表-4に示す。試験は、JIS、JIS原案によって実施した。

### 2.4 試験体の形状と打込み方法

実大施工実験での試験体は図-1に示すように、柱、梁で構成された1スパンのラーメン架構のものである。柱の打込み方法は、梁下まで4層に分けて打込みそのつど締固める層打設と、梁下まで連続して締固めながら打込む連続打設の2方法を実施した。レミコン工場から実験場まではアジテータ車で運搬し、ポンプ車で打込んだ。

## 3. 室内実験結果

### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

#### (1) 高性能AE減水剤の使用量

W/Bと高性能AE減水剤の使用量の関係を図-2に示す。PL、SF混入、BS混入ともにW/Bが小さくなるにつれて、高性能AE減水剤の使用量が増加した。これは、W/B=25~35%では同一水量としたため、W/Bが小さくなるにつれて単位結合材が増加しスランプが低下するが、これを同一スランプにするために結合材をより分散させる必要があるからと考えられる。なおW/B=25%では高性能AE減水剤の種類の違いにより、他の、W/Bとは異なった傾向であった。

また、W/B=30%では、SF混入率が増加するにつれて使用量が増加するが、BS混入の場合は、PLとはほぼ同程度の使用量であった。

#### (2) L形およびBOX形フロー速度

高強度コンクリートの粘性を評価する一方法として

図-3に示すL形およびBOX形フロー試験を実施した。

W/Bと各フロー速度の関係を図-4に示す。

L形、BOX形フロー速度ともW/Bが小さくなるにつれて小さくなる傾向を示している。W/Bが小さくなるにつれてペーストの粘性が高くなるため、同じスランプでもフロー速度は小さくなっている。

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
凝結試験	JIS A 6204
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS 原案
付着試験	JIS 原案
乾燥収縮	JIS A 1129
圧縮クリープ	JIS 原案

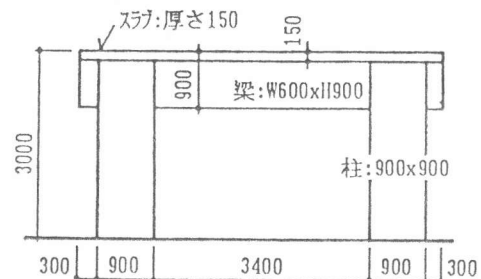


図-1 実大施工実験の試験体

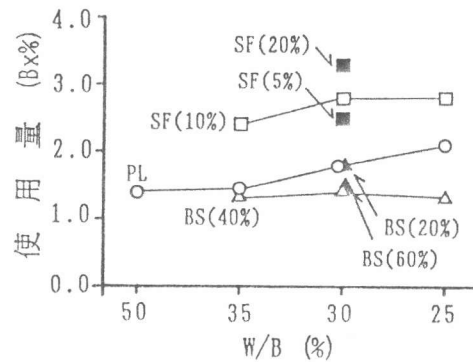
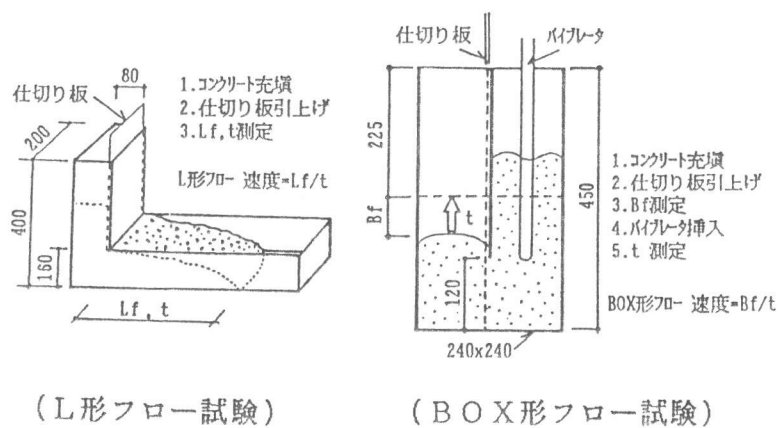


図-2 W/Bと高性能AE減水剤使用量の関係



(L形フロー試験)

(BOX形フロー試験)

図-3 L形およびBOX形フロー試験

混和材を混入した場合には、PLと比べてフロー速度が大きくなり粘性の低下がみられる。BS混入の場合はL形、BOX形フロー速度とも大きくなるが、SF混入の場合はBOX形フロー速度が大きくなっている。

混和材の混入率と各フロー速度の関係を図-5に示す。L形、BOX形フロー速度とも、SFおよびBSの混入率が大きい範囲で大きくなる傾向にある。

### (3) 凝結時間

PLの場合のW/Bと凝結時間の関係を図-6に示す。凝結の始発、終結時間は標準期、夏期ともにW/Bが小さくなるにつれて遅くなった。これは、高性能AE減水剤の使用量が増加しているためと考えられる。なお、W/B=25%では高性能AE減水剤の種類の違いにより、他のW/Bとは異なった凝結性状を示している。

夏期の始発、終結時間は標準期より早くになっている。これは、夏期の方が練り上がりの温度が約12°C、養生温度が約10°C高いため、セメントの水和反応が速くなった影響と考えられる。

## 3. 2 硬化コンクリートの性状

### (1) 圧縮強度

W/B=30%での混和材混入率と圧縮強度の関係を図-7に示す。SF混入の場合は粒径が小さく、ポズラン反応性もあるため、コンクリートの組織が緻密になり強度が増大すると思われる[1]。今回の実験では混入率20%まではPLより強度は大きく、材令91日で20%程度強度の増進がみられる。また、SFの混入率が15%程度で最も強度が大きくなるとの報告もあるが、今回の混入率の範囲ではあまり差は見られなかった[1]。

BSを混入した場合は一般に初期強度は低いですが潜在水硬性のため、長期ではPLと同程度の強度発現がみられる[2]。今回の実験においては、材令7日ではPL以下の強度を、材令28日では混入率40%以下のものがPL

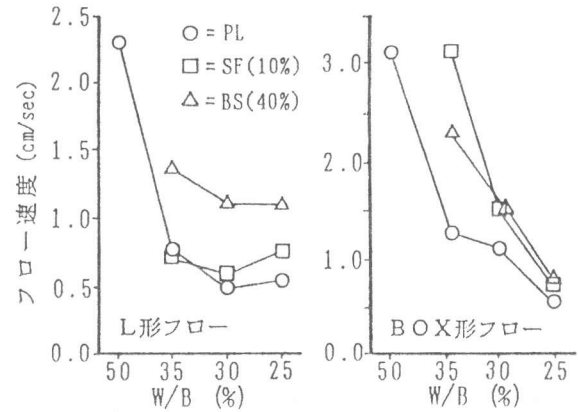


図-4 W/Bとフロー速度の関係

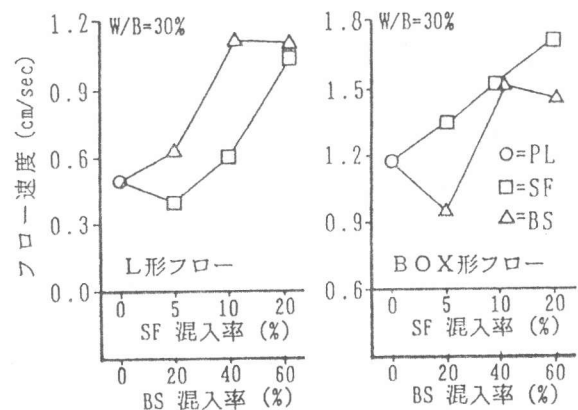


図-5 混和材混入率とフロー速度の関係

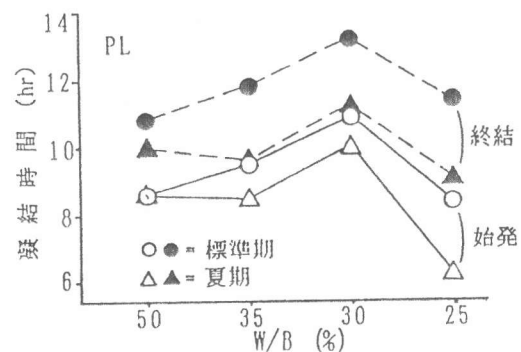


図-6 W/Bと凝結時間の関係

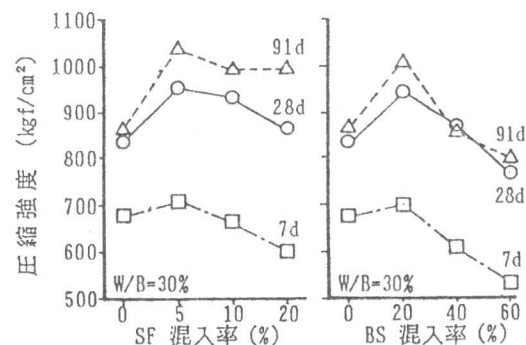


図-7 混和材混入率と圧縮強度の関係

以上の強度を示している。しかし、混入率40%以上では材令28日と91日ではほぼ同程度の強度であり、長期材令での伸びが見られなかった。

### (2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8に示す。両者の間には相関関係が認められ、静弾性係数の値は日本建築学会のRC規準式より小さく、ACI式よりやや大きい。静弾性係数はW/Bによる影響が有意であり、混和材の種類や混入率による差はみられなかった。

### (3) 付着強度

PLの場合のW/Bと鉄筋方向を要因とした分散分析の結果を図-9に示す。

初期付着強度（自由端滑り量0.05mm時）、割裂付着強度（コンクリート破壊時）ともにW/Bによる影響が有意であり、W/Bが小さくなるにつれて付着強度は大きくなる。初期付着強度はW/B=50%~25%にわたって増加しているが、割裂付着強度はW/B=35%~25%では顕著な差は無い。

鉄筋方向による影響は有意ではないが、低強度の場合と同様に、縦筋、横下端筋、横上端筋の順で小さくなっている。

混和材の種類による違いは、SF混入の場合がPLやBS混入の場合と比べてやや大きい付着強度を示したが、顕著な差ではなかった。

### (4) 乾燥収縮

乾燥材令35週での単位ペースト量当りの収縮率と重量減少率について、W/Bと混和材の種類を要因とした分散分析の結果を図-10に示す。単位ペースト量当りの収縮率、重量減少率ともW/Bによる影響が有意であり、W/Bが小さくなるにつれて小さくなった。

単位ペースト量当りの重量変化率に対する単位ペースト量当りの収縮率の関係を図-11に示す。同図での1週から35週間の直線の傾きは、W/Bが小さいほど大きく、同じ重量変化率に対しては収縮ひずみは大きくなる。これは、W/Bが小さいほど同一逸散水量に対しては大きな毛細管張力が発生したと考えられる。しかし、同一材令ではW/Bが小さいほど逸散水量が少なく、また、圧縮

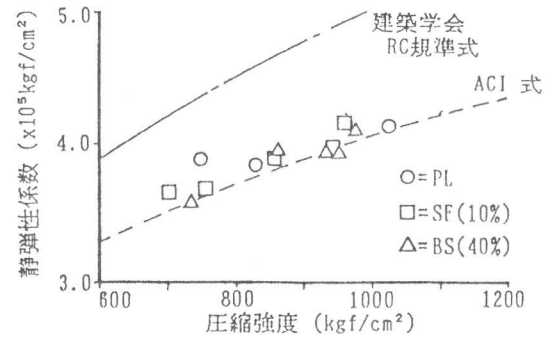


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

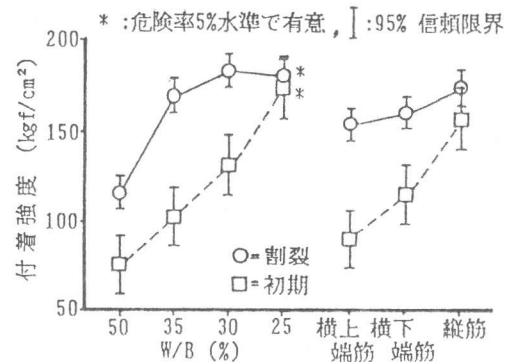


図-9 付着強度の分散分析結果

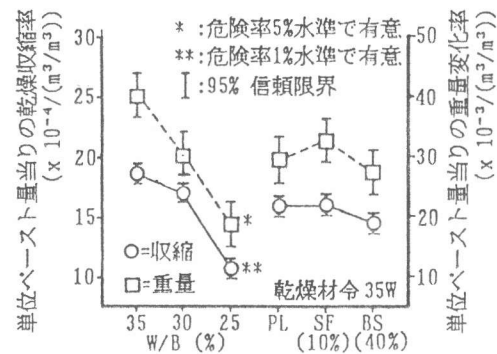


図-10 乾燥収縮の分散分析結果

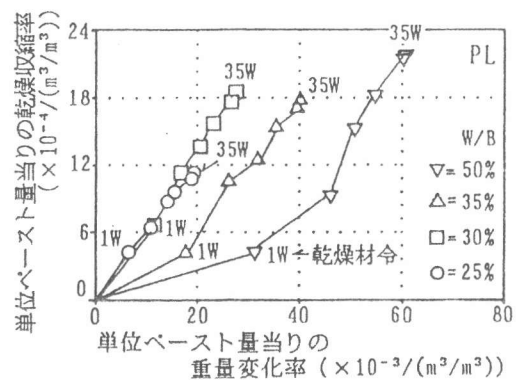


図-11 重量変化率と収縮率の関係

強度が大きいため変形はしにくく、W/Bが小さいほど収縮ひずみは小さくなったと考えられる[3]。

混和材を混入した場合は、重量変化率と収縮率の関係や強度にPLとあまり差がなかったため、収縮率にも差が見られなかったと思われる。

#### (5) 圧縮クリープ

材令半年までの単位ペースト量当りの単位クリープひずみの変化を図-12に示す。材令半年でのPLの単位ペースト量当りの単位クリープひずみはW/B=30%の方がW/B=50%に比べて約40%とかなり小さい。W/B=30%の場合の混和材の種類の違いをみると、BS40%混入とSF10%混入はほぼ同等の値であるがPLと比べると約30%小さい。

### 4 実大施工実験結果

#### 4.1 フレッシュコンクリートの性状

スランプ、スランプフロー、空気量の試験結果を図-13に示す。スランプはポンプの筒先においても（出荷後約40分）出荷時の値と同程度であり、スランプの低下は見られなかった。スランプは約26cmと大きいですが、粘性が高く分離はしていない。スランプフローは時間の経過とともに小さくなっているが、ポンプ圧送、打込みとも支障なく行えた。

空気量については、一般に通常のコンクリートではポンプ圧送後に減少することが多いが、高強度コンクリートの場合はポンプ圧送後に増加したとの報告もあり、今回の実験でも同様な傾向を示した[4]。

#### 4.2 硬化コンクリートの性状

##### (1) コンクリートの温度履歴

コンクリート打設終了からのコンクリート温度履歴を図-14に示す。

最高温度は柱の中央部で、約24時間後に58°Cを示した。その後、約1週間ではほぼ外気温まで低下した。

##### (2) 圧縮強度

柱から縦方向に抜き取ったコア供試体の、材令28日における圧縮強度分布を図-15に示す。

コアの圧縮強度は平均で701 kgf/cm<sup>2</sup>（標準偏差41kgf/cm<sup>2</sup>）であり、高さ方向の差もあまり無く、ばらつきも小さかった。また、打込み方法の違いによる差もみられなかった。

各管理用供試体とコア供試体の圧縮強度の関係を図-16に示す。管理用供試体では、養生方法の違いや、ポンプ圧送前後による圧縮強度の差はみられなかった。また、コア供試体の圧縮強度は、現場水中養生および現場封緘養生供試体の90%程度の値であり、材令28日から91日の間での

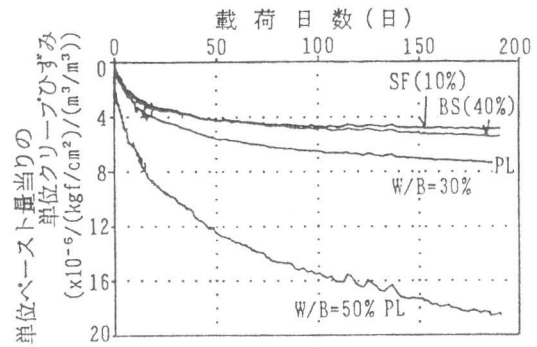


図-12 単位クリープの経時変化

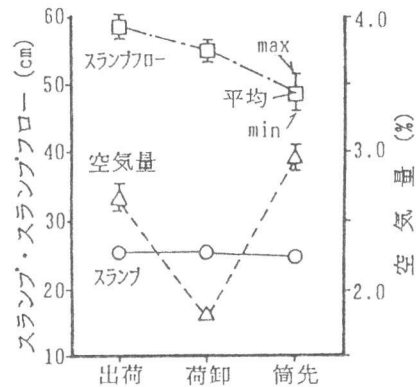


図-13 フレッシュコンクリートの試験結果

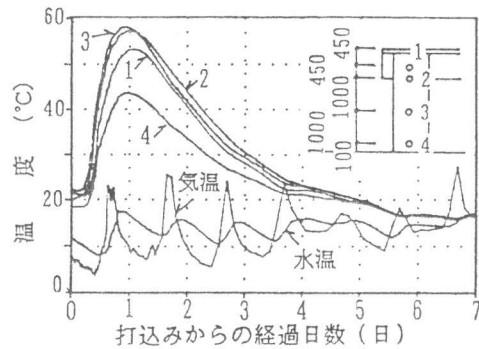


図-14 コンクリートの温度履歴

強度の伸びはほとんどみられなかった。

現場水中養生および現場封緘養生供試体の強度は材令とともに漸増するが、初期に高温履歴を受ける構造体の長期強度の伸びはあまり期待できないといわれており、高強度コンクリートの場合の構造体強度の管理方法については、在来の方法では管理値が危険側となるおそれがあり、今後検討の必要がある[5]。

### 5. まとめ

室内実験、実大施工実験の結果以下のことが明らかになった。

- 1) 高性能AE減水剤を使用することで海砂および砕砂を使用した場合でも、W/B=25%程度までのコンクリートの練混ぜは可能である。ただし、W/B が小さくなるほど高性能AE減水剤の使用量は増加する。
- 2) W/B が小さいほど粘性は大きくなるが、微粉末混和材を使用することにより粘性が低下する。
- 3) SFを混入することにより圧縮強度は大きくなり、混入率20%までの範囲で、材令91日においてPLより20%程度強度の増進がみられた。しかし、BSを混入した場合は、混入率が大きくなると長期での強度の伸びがみられず、材令91日においてもPLの強度を下回った。静弾性係数は混和材の有無にかかわらずACI式とほぼ同程度の値である。
- 4) 付着強度はW/B が小さくなるほど増加するが微粉末混和材の影響はあまりみられない。高強度コンクリートにおいても、横上端筋の付着強度は縦筋や横下端筋に比べて低い。
- 5) 材令35週での単位ペースト量当りの収縮率および重量減少率とも、W/B が小さくなるにつれて小さくなるが、微粉末混和材の影響はあまり見られない。
- 6) 材令半年での高強度コンクリートの単位ペースト量当りの単位クリープひずみは、通常のコンクリートに比べて小さい。また、微粉末混和材の混入によりさらに小さくなる。
- 7) W/B=30%の高強度コンクリートは粘性が高いため分離も起こさず、ポンプ車による打込みが可能であり、高強度で均質な構造体を得られた。なお、構造体強度の管理方法については今後検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 米倉亜州夫：シリカフェーム，コンクリート工学，Vol.26，No.4，pp.19-24，1984.4
- 2) 国府勝郎：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.26，No.4，pp.25-31，1984.4
- 3) 長滝重義ほか：高強度コンクリートの乾燥収縮およびクリープの特性，コンクリート工学，Vol.20，No.4，pp.75-87，1982.4
- 4) 児玉和巳ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.567-568，1990.10
- 5) 飯島真人ほか：設計基準強度600kgf/cm<sup>2</sup>を目標とした構造体強度の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.545-546，1989.10

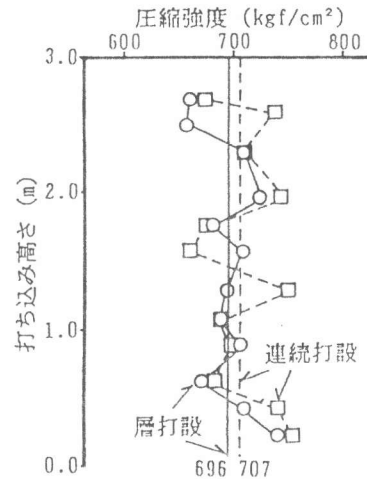


図-15 コア供試体の圧縮強度分布

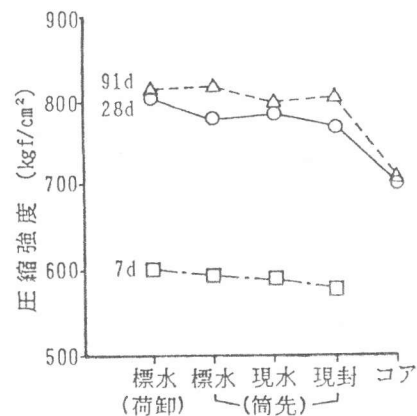


図-16 養生方法と圧縮強度の関係