

論文 若材齢時における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究

—瀬賢一<sup>\*1</sup>・川口 徹<sup>\*2</sup>

**要旨:** 高強度コンクリート(設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>級)の若材齢時における力学的性質について、セメントの種類、水セメント比、養生温度をパラメータとして実験的に検討し、以下のことを明らかにした。(1)高強度コンクリートの若材齢時における圧縮強度は、養生温度20℃以上では、普通強度のコンクリートと同様にスリップフォーム工法に十分適用可能な強度発現を示す。(2)夏季においては、高ピーライト系セメントを使用することにより、水セメント比30%程度で設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>を確保できる。(3)若材齢時の圧縮強度と引張強度は、セメントの種類、水セメント比、養生温度に影響されず相関性が高い。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 若材齢, 力学的性質, 圧縮強度, 引張強度

1. はじめに

設計基準強度(以下Fc)60~80N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートが鉄筋コンクリート造やCFT構造による超高層建物だけでなく、種々のコンクリート構造物への適用が検討されてきている。その一つとして、スリップフォーム工法により連続的に建設される搭状コンクリート構造物がある。超高層タワーや直径の大きなサイロ等の建設においては、高強度コンクリートの使用が十分予想される。この場合、長期強度だけでなく、若材齢時におけるコンクリートの圧縮強度やせん断強度など力学的性質の把握が重要である。しかし高強度コンクリートの若材齢時、特に材齢1日未満における物性については、十分なデータが有るとは言い難い<sup>1)~3)</sup>。このため、本論文では、Fc60 N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートのスリップフォーム工法への適用性を目的とし、水セメント比25~35%のコンクリートについて凝結性状、若材齢強度発現性状について実験的に検討・考察した。

2. 実験の概要

2.1 実験の組合せ

実験要因は、表-1に示すようにセメント2

表-1 実験要因

要因	摘要	水準数
セメント	普通(N) 高ピーライト(L)	2
水セメント比	25%, 30%, 35%	3
養育気温度	10℃, 20℃, 30℃, 35℃	4

表-2 実験の組合せ

No.	セメント		水セメント比(%)			養育気温度(℃)				記号
	N	L	25	30	35	10	20	30	35	
1	○		○			○				N25-10
2	○			○		○				N30-10
3	○			○			○			N30-20
4	○			○				○		N30-30
5	○			○					○	N30-35
6	○				○		○			N35-20
7		○	○				○			L25-20
8		○		○			○			L30-20
9		○		○				○		L30-30
10		○		○					○	L30-35
11		○			○		○			L35-20

種類(普通セメント, 高ピーライト系セメント), 水セメント比3水準(25%, 30%, 35%), 養生温度4水準(10℃, 20℃, 30℃, 35℃)をパラメータとした。各要因の組合せは、表-2に示す11通りとした。また表中の記号は、(1)セメント種別(2)水セメント比(3)養生温度の順で表示した。高ピーライト系セメント(L)は、普通セメ

\*1 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室主任研究員 工修(正会員)

\*2 同建築第二研究室室長 工博(正会員)

ント(N)に比べ、低温下では凝結の始発、終結がかなり遅くなることが予想されたので、養生温度10℃における試験は行わなかった。

## 2.2 使用材料および調査

使用材料は、セメント(C)として普通ポルトランドセメント、高ビーライトセメント、細骨材(S)として木更津産山砂、粗骨材(G)として青梅産碎石を使用した。セメントおよび骨材の品質を表-3、4に示す。混和剤は、カルボキシル基含有ポリエーテル系高性能AE減水剤(SP)を使用した。

コンクリートの調査条件は、目標スランプフロー値60±10cm、目標空気量2.5±1.0%とした。なお、練り上がり温度は、各養生温度の±2℃とした。各養生温度におけるスランプフローの調整は、高性能AE減水剤の添加量を適宜調整して行った。コンクリートの調査を表-5に示す。

## 2.3 測定項目・測定方法

測定項目は、フレッシュコンクリートの性質(スランプフロー、空気量、単位容積質量、温度)、プロクター貫入抵抗による凝結試験、圧縮強度、引張強度およびヤング係数とした。測定方法は、JISおよび土木学会規準等に準じた。測定は、圧縮強度が加水から4時間後、引張強度が6時間後から行った。強度用試験体は、表-6に示すように採取した。また材齢1日までの若材齢圧縮強度試験には、φ75×150mm試験体を使用し、他の強度試験には、φ100×200mm試験体を使用した。若材齢圧縮強度試験は、試験体を試験開始材齢の約20分前に焼石膏でキャッピングを行い、若材齢強度試験機(最大荷重1ton)により実施した。

## 2.4 試験体の製作および養生方法

コンクリートの混練り、養生および試験は、各養生温度のもとで実施した。なお各強度用試験体は、材齢2日まで各養生温度のもとで気中養生とし、その後各養生とした。封かん養生試験体は、各養生温度の基で材齢7日まで養生し、以降恒温恒湿室(20±3℃、60±5%R.H.)で養

表-3 セメントの品質

種別	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	鉱物組成 (%)			
			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
N	3.16	3320	52	24	9	9
L	3.20	4250	35	47	3	8

表-4 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産山砂	2.62	2.49	1.76
G	青梅産碎石	2.65	6.61	0.78

表-5 コンクリートの調査

C	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
N	25	45	170	680	684	856
	30	45	175	581	715	895
	35	45	175	500	746	933
L	25	45	170	680	697	868
	30	45	175	581	731	905
	35	45	175	500	760	943

表-6 試験体の養生および試験材齢

測定項目	測定時期	養生	試験材齢
圧縮強度	若材齢	気中	加水後4時間後から2時間ごと
	材齢1日以後	気中	材齢1,2,3,7日
		封かん標準水中	材齢7,28,56,91日
引張強度	若材齢	気中	加水後6時間後から6時間ごと
	材齢1日以後	気中	材齢1,2,3,7日
		封かん	材齢28,56,91日
ヤング係数	材齢1日以後	気中	材齢1,2,3,7日

生した。また水中養生試験体は、材齢2日以降養生水槽(水温20℃±1℃)にて養生した。

## 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

フレッシュコンクリートの性質を表-7に示す。目標スランプフロー、目標空気量を概ね満足するコンクリートを得ることができた。高性能AE減水剤の添加量は、練り上がり温度30、35℃では、Lセメントが多く、練り上がり温度20℃で

表-7 フレッシュ性状

記号	SP 添加量 (%)	スラン プ 70- (cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリ ット 温度 (°C)
N25-10	2.3	50×53	1.8	2410	11.0
N30-10	1.2	63×65	2.5	2387	10.5
N30-20	1.2	52×57	2.4	2385	21.0
N30-30	0.9	56×56	1.7	2394	30.0
N30-35	0.9	61×61	3.2	2378	33.5
N35-20	1.0	60×60	2.6	2351	20.0
L25-20	1.4	54×52	3.2	2383	21.0
L30-20	1.0	55×56	2.9	2341	21.5
L30-30	1.05	55×54	2.9	2371	31.0
L30-35	1.1	55×54	2.2	2388	33.5
L35-20	0.8	51×51	3.2	2324	20.0

はNセメントが多くなった。特にN25-10は、スランプフロー値を確保するために、2.3% (セメント質量比)の添加量を必要とした。

### 3.2 凝結性状

凝結時間試験結果を図-1に示す。主としてW/C=30%について実施したところ、養生温度10°Cでは、加水から11.5~12.5時間後、養生温度20°Cでは6~7時間後、養生温度30°Cでは5~5.5時間後に始発となった。N、Lセメント共に養生温度が高いほど始発、終結が早くなり、始発から終結までの時間も短いことがわかる。またNセメントに比べて、Lセメントを使用した場合は、事前の予想通り養生温度30°Cでは、約30分、養生温度20°Cでは、40分程度始発が遅くなった。養生温度10°Cにおいては、高性能AE減水剤の添加量が多いことも原因の一つと考えられるが、Nセメントでも加水から11時間以降に始発となっており、このままでは冬季におけるスリップフォームの施工にはあまり適さない。高強度コンクリートを冬季に使用する場合は、コンクリートの練り上がり温度および養生温度の確保が必要となる。

### 3.3 若材齢圧縮強度

加水から24時間以内における若材齢圧縮強度の試験結果を図-2~4に示す。この結果から概ね養生温度の高いものほど強度発現が早く、その後の強度増加も大きいことがわかる。また

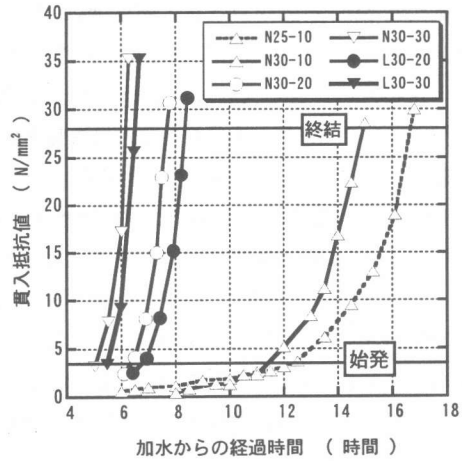


図-1 凝結時間試験結果

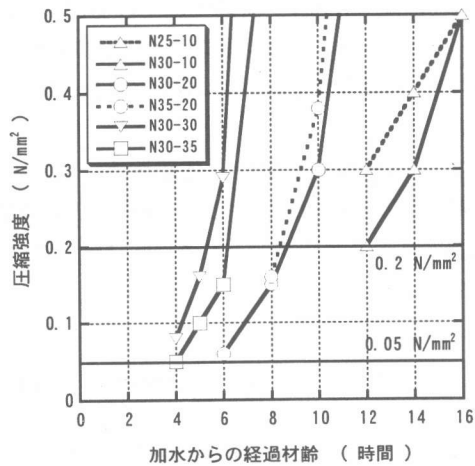


図-2 若材齢圧縮強度 (Nセメント)

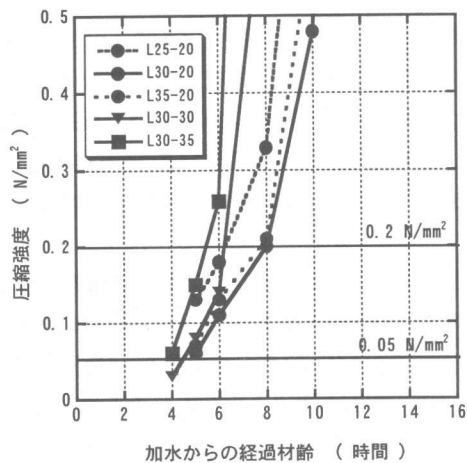


図-3 若材齢圧縮強度 (Lセメント)

加水から24時間後における圧縮強度は、N、Lセメント共に養生温度20℃以上において水セメント比の低い場合が大きな値を示した。またN、Lセメントの相違による若材齢における強度発現の差は、小さいことがわかった。スリップフォーム工法における型枠の脱型は、圧縮強度として0.05～0.2N/mm<sup>2</sup>の範囲で行われることが多い。W/C=25～35%の高強度コンクリートでも養生温度20℃以上においては、加水から4～8時間で脱型可能な強度に達するので、普通強度のコンクリートと同様にスリップフォーム工法に十分適用できるものと思われる。

なお養生温度10℃のN25-10およびN30-10は、圧縮強度としては、加水から8～12時間後にスリップフォームの脱型可能な強度に達するが、これでは型枠上昇速度がかなり制限されることになる。

### 3.4 積算養生温度と圧縮強度

積算温度と材齢1日までの圧縮強度との関係を図-5～6に示す。ここで示す積算温度は、次式(1)より求めた。

$$\text{積算温度 } (\text{℃} \cdot \text{T}) = \sum_0^t (\theta + 10) \Delta t \quad \text{式(1)}$$

ここに、t:加水からの養生時間(時間)

$\theta$ :  $\Delta t$ 時間中の養生温度(℃)

図-5は、W/C=30%における積算温度と圧縮強度0.5N/mm<sup>2</sup>までの関係を示す。この範囲では、セメントの種類、養生温度が異なっても積算温度により概ね圧縮強度を推定でき、積算温度150～180(℃・T)で0.05N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を得ることができることがわかった。

図-6は、養生温度20℃における積算温度と圧縮強度の関係を示す。水セメント比が低いものほど強度発現がよいことがわかる。また同一水セメント比では、Nセメントの方が若干強度発現がよいことがわかる。また圧縮強度2～15N/mm<sup>2</sup>程度までは、積算温度に比例して強度の増進が認められた。

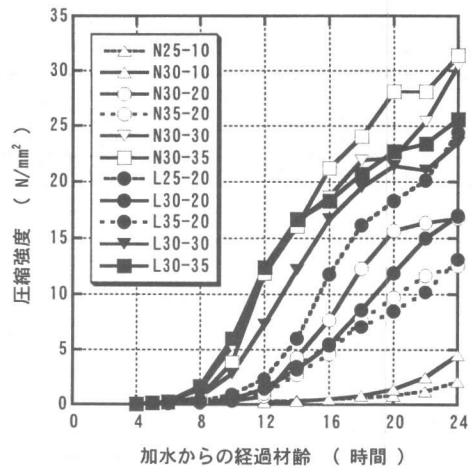


図-4 若材齢圧縮強度

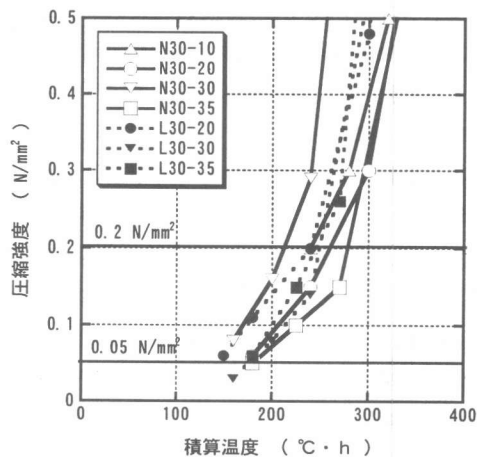


図-5 積算温度と圧縮強度

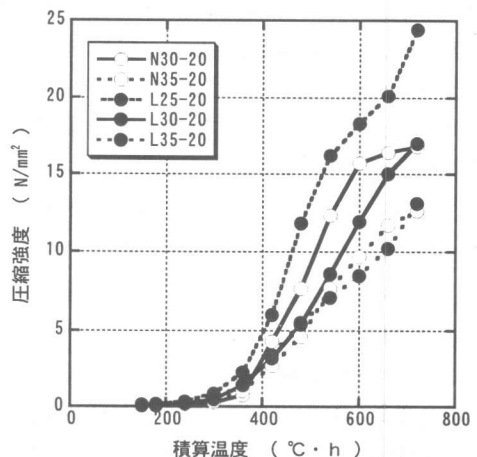


図-6 積算温度と圧縮強度(20℃)

### 3.5 若材齢引張強度

加水から24時間までの引張強度試験結果を図-7に示す。加水から8時間後、養生温度の高いものから引張強度の強度発現が確認された。また養生温度20℃においては、水セメント比の低いものほど24時間後の引張強度が大きくなった。

構造物が施工中に大きな地震を受けても施工の安全を確保するためには、脱型時に1N/mm<sup>2</sup>以上のせん断強度を必要とする場合もある。若材齢時におけるせん断強度と引張強度の関係は明確ではないが、引張強度と等しいと仮定した場合、1N/mm<sup>2</sup>の引張強度を得るために、養生温度30℃以上では、加水から10～12時間、養生温度20℃では14～18時間、また養生温度10℃では、1日以上必要となる。この結果から、万一大きな地震に遭遇しても施工の安全を確保するためには、若材齢時の圧縮強度よりもせん断強度(ここでは引張強度)にもとづいて型枠の長さ、上昇速度を検討する必要があるとされている。

加水から24時間までの圧縮強度と引張強度の関係を図-8に示す。圧縮強度と引張強度の相関性は高く、セメントの種類、水セメント比、養生温度に影響されないことがわかった。このため、若材齢における圧縮強度から引張強度の推定が可能であることがわかった。

### 3.6 ヤング係数

各養生温度のもとで気中養生した試験体の材齢1日から7日までの圧縮強度とヤング係数の関係を図-9に示す。ヤング係数は、セメントの種類、水セメント比、養生温度の相違に影響を受けることなく、圧縮強度の増加に伴い増加した。New RC式<sup>4)</sup>に比べ全体的に若干低い値を示した。

### 3.7 長期強度

標準水中養生した試験体の材齢7日から91日における圧縮強度試験結果を図-10に示す。NセメントとLセメントを比較すると、同一条件において材齢28日までは、Nセメントを使用した割合が高く、材齢28日以降においては、Lセメント使用の割合の方が高い圧縮強度を示した。Nセメント使用の場合は、養生温度が高いものほ

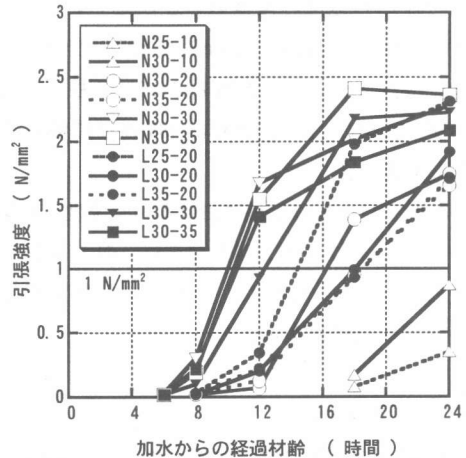


図-7 若材齢引張強度

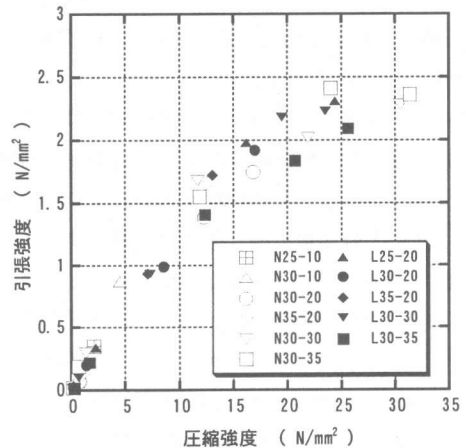


図-8 圧縮強度と引張強度

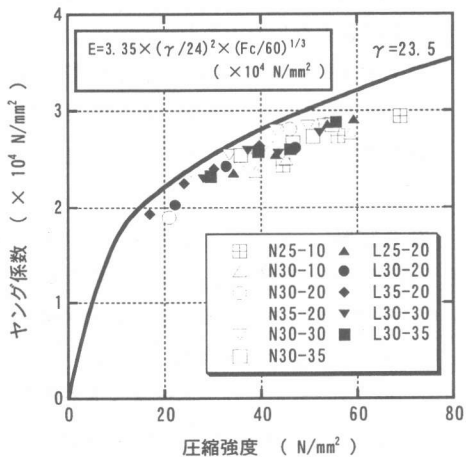


図-9 圧縮強度とヤング係数

ど材齢28日以降の強度の伸びが悪い。この結果から、夏季打設の場合、 $F_c 60 \text{ N/mm}^2$ を確保するためには、Lセメントでは $W/C=30\%$ でも可能であるが、Nセメントでは $W/C=30\%$ 以下に設定する必要がある。

材齢7日から91日における引張強度試験結果を図-11に示す。引張強度は、Nセメントでは材齢28日まで、Lセメントでは材齢91日まで強度の増加が認められた。

#### 4. まとめ

$F_c 60 \text{ N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートのスリップフォーム工法への適用性を目的とし、水セメント比25~35%のコンクリートについて凝結性状、若材齢強度発現性状について実験的に検討し、以下のことがわかった。

- (1) 高強度コンクリートの若材齢時における圧縮強度は、養生温度 $20^\circ\text{C}$ 以上では、普通強度のコンクリートと同様にスリップフォーム工法に十分適用可能な強度発現を示す。
- (2) 夏季においては、普通セメントでは長期強度の伸びが悪い。しかし高ビーライト系セメントを使用すれば、水セメント比30%程度で設計基準強度 $60 \text{ N/mm}^2$ を確保できる。
- (3) 施工中に大きな地震を受けても施工の安全を確保するには、若材齢時の圧縮強度よりもせん断強度にもとづいて型枠の長さ、上昇速度を検討する必要がある。
- (4) 若材齢時の圧縮強度と引張強度は、セメントの種類、水セメント比、養生温度に影響されず相関性が高い。

#### 参考文献

- 1) 一瀬賢一他：若材齢時における高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文報告集，13-1，pp. 225～230，1991
- 2) 中川好正他：ポルトランドセメントを使用したコンクリートの初期強度予測，コンクリート工

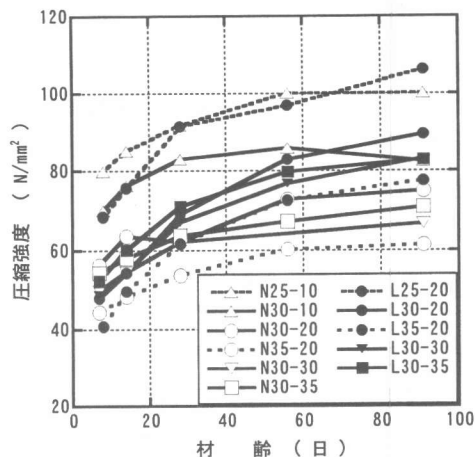


図-10 圧縮強度

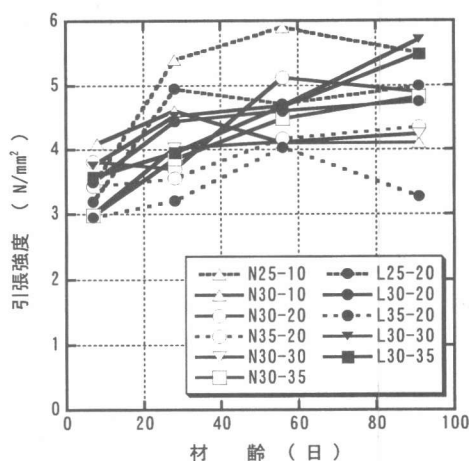


図-11 引張強度

学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 507-512，1996

- 3) 橋田 浩他：CEB-FIPモデルを改良した高強度コンクリート構造部材の力学特性発現モデル，日本建築学会構造系論文集 第513号，pp. 9-14，1998. 11
- 4) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」報告書，1993. 10