

コンクリートの初期性状に関する研究 (その3)

——圧縮強度、静弾性係数、せん断強度について——

野 中 稔
奥 村 忠 彦

§ 1. 緒言

スリップフォーム工法は、打込まれたコンクリートが数時間で脱型する方法をとっている。この数時間で脱型されることがこの工法の最大の特徴であり、工期の短縮など利点を多くもつものである¹⁾。しかし、打込まれたコンクリートは、建築学会標準仕様書—鉄筋コンクリート工事—のコンクリートの養生の項 (5.7.6) に「打込み後24時間は、その上を歩行してはならない。その後も重い工具や材料を置いたりなどして、硬化中のコンクリートに有害な衝撃をあたえないようにする。」また型わくの取りはずしの項 (5.8.8) に「せき板はコンクリートの初期硬化が終り、容易に損傷を受けない強度に達したのち取りはずす (壁、柱、はり側の場合は50kg/cm²、スラブ下、はり下では基準強度の50%)」ということが明記されている。このことは、土木学会コンクリート標準示方書にも明記されている。ところが、スリップフォーム工法では工法の性質上、打込まれたコンクリートが数時間で脱型され、施工中は種々の応力を受けている。滑揚するにしたがい壁厚や直径が変化しない構築物では脱型されたコンクリートに応力を受けることは少ないが角錐形や円錐形のような構築物では壁厚や壁の傾斜などが変化し、特に傾斜が緩い場合には、上部装置の荷重が若材令のコンクリートに加わる場合が多くなる。

従来、コンクリートの若材令の性状について、多くの研究がされてきたが、その主なものは圧縮強度の経時変化に関するものがほとんどで^{2), 4), 5), 6)}、引張強度、曲げ強度に関する研究⁷⁾がわずかにある。せん断強度に関する研究は皆無である。しかし、練りませ後数時間の範囲でコンクリートのレオロジーの性質を試験して、せん断降伏値、粘着力について報告している研究^{8), 9), 10)}はあるが、それも数時間以降の材令に関する研究はない。

本報告は、若材令中にせん断応力に加わる場合に、そのコンクリートがどのような性状を示すかを知るためのもので、その性状によってどのような施工計画をたて

ばよいか、また施工中にどのような管理をすればよいかを知るためのものである。

コンクリートは時間が経過するにしたがい、物理的性状として、流動状態、凝結過程、硬化状態と変化し、それを同一の試験方法で性質をとらえることは不可能である。そこで、本報告では圧縮強度、静弾性係数およびせん断強度の性状をとらえる最適方法はどの試験方法がよいかの予備試験をしてから、本実験に入った。本実験ではスリップフォーム工法に用いられるコンクリートを対象としたので、同工法でよく使われる標準的な調合2種類について、温度を実用的な範囲で、10、20、30℃に変えて試験をした。これらの試験結果に基づいて、圧縮強度、静弾性係数およびせん断強度の経時変化、調合の影響、温度の影響とそれぞれの相関について考察した。

§ 2. コンクリートの初期性状に関する既往の研究

コンクリートの初期性状に関する研究は今日までに数多く行なわれてきたが、それらの研究は次の4グループに大別できる。

- 1) レオロジー定数に関する研究
- 2) 水和反応に関する研究 (水和にともなう収縮、凝結過程など)
- 3) 強度に関する研究 (圧縮強度、引張強度、曲げ強度、付着強度、強度発現速度など)
- 4) 変形に関する研究 (静弾性係数、応力とひずみの関係、許容変形量など)

本研究は若材令コンクリートの物性を定量化し、これを設計に応用することが目的であるので、3) 強度、4) 変形に関する研究にとくに着目した。

2.1 強度に関する研究

野中ら^{3), 4)}は、スリップフォーム工法の施工方法を検

討するために、温度（20℃，20→30℃），練りおき時間（0，30分），加圧力（0，0.5kg/cm²），水セメント比（50，60％），単位セメント量（300，350kg/m³），フライアッシュ混入量（0，60kg/m³），細骨材率（37，42％），締固め（なし，あり）を変動要因として，材令4時間から28日までの圧縮強度試験を行ない，次のような結論を得ている。

- 1) 材令4～12時間の範囲では単位水量が圧縮強度に及ぼす影響が大きく，1日以後は水セメント比の影響が大きい。
- 2) 材令1日以内の若材令では温度の寄与率がとくに大きい。

Saul¹⁰⁾は蒸気養生したコンクリートに関する実験を行なって，時間温度の積（℃-hours，Maturity（熟成度）と呼んだ）と圧縮強度との間に相関があることを明らかにした。その後，Bergströmは温度が-10℃以上であればセメントは水和反応すると考えて，Saulの熟成度を $t(T+10)$ （ t ：材令， T ：温度，days×℃）という概念に発展させ， $t(T+10)$ と圧縮強度は良好な相関関係があることを示した。

洪¹²⁾は，寒中コンクリートの施工基準を確立するために圧縮強度の発現速度について研究し，Saul-Bergströmが提案した $t(T+10)$ （days×℃，°D・Dと呼ぶ）によって整理できることを確かめている。

笠井^{9)，13)}は，コンクリートの初期性状について広範囲に研究を行なっている。引張強度，圧縮強度の経時変化について調査，材料，温度などを変えて多くの実験を行ない，とくに圧縮強度に関して次の推定式を提案している。

$$F_c = 0.01 \times f_c \times F_{1440} \quad \dots\dots(1)$$

ここに， F_c ：初期圧縮強度（kg/cm²）
 F_{1440} ： $T^\circ T=1440$ （20℃養生，材令3日に相当）における圧縮強度（kg/cm²）
 f_c ： $a[T^\circ T]^n = a[T(t+\alpha)]^n$
 T ：加水後の経過時間（hr.）
 t ：平均養生温度（℃）
 α ： $|t-20|/m$

α, m, n ：実験定数， $t < 20^\circ \text{C} \dots m = 5$
 $t \geq 20^\circ \text{C} \dots m = 2$

この推定式は，温度と時間を $T^\circ T = T(t+\alpha)$ という概念に発展させた点と， F_{1440} すなわち，20℃養生，材令3日に相当する圧縮強度を基準とした点に特徴がある。

強度の発現速度に関する研究は，上述したように温度と時間の積，すなわち熟成度に基づいたものの他に，セメントの水和反応に基づいた研究もある。たとえば，川

越¹⁴⁾は圧縮強度の経時変化を次式で，

$$F_c = F_\infty (1 - e^{-aT}) \quad \dots\dots(2)$$

ここに， F_∞ ：最終強度（kg/cm²）

また，佐藤および川田¹⁵⁾は次式を提案している。

$$F_c = F_\infty (1 - e^{-aT^n}) \quad \dots\dots(3)$$

2.2 変形に関する研究

笠井¹⁶⁾らは，初期材令における圧縮応力度とひずみ度との関係について広範な実験を行ない，コンクリートの初期性状について検討を行なうとともに，静弾性係数の経時変化も明らかにしている。

森永⁸⁾は，10cm立方の供試体にコンクリートを打込み，初期材令でこの供試体にせん断変形を加えて養生し，材令7日で圧縮強度試験を行なっている。その結果，せん断変形量，せん断降伏値，ペーストの体積濃度が大きいほど，せん断変形を加えたことによる圧縮強度低下率が大きいことを明らかにし，低下率を一定値以下にするために許容できる変形量があることを示している。

したがって，施工中における若材令のコンクリートについて検討する場合，強度のみならず変形量の大きさが重要であることが明らかになったが，本研究では若材令に変形を受けたことによる悪影響に関しては検討しなかった。

§ 3. 要因分析

§ 2.に示した既往の研究を調査した結果，若材令のコンクリートの性質に及ぼす影響は温度，単位水量，水セメント比が大きいことが示された。

スリップフォーム工法による施工時の検討を行なう場合，設計基準強度が変わることによって調査が相違し，施工時の気温が大幅に相違するために，調査，温度がコンクリートの初期性状に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

したがって，本研究における要因は温度と調査（単位

実験の 記号	要 因	
	温 度 (℃)	単位セメント 量 (kg/m ³)
A-10	10	350
A-20	20	350
A-30	30	350
B-20	20	300

表—1 試験の要因と水準

項 目	比 重	比表面積 (ブレン方法) (cm^2/g)	凝 結					安定性 (煮沸方法)	酸化マグ ネシウム (%)	三 酸 化 イ オ ウ (%)
			室 温 ($^{\circ}\text{C}$)	湿 度 (%)	水 量 (%)	始 発 (時一分)	終 結 (時一分)			
アサノセメント	3.16	3100	20.4	91	27.4	2—32	3—49	良	1.2	2.2
JIS R 5210 (1973)	—	2500以上	20 $\pm$ 3	80以上	—	1—00以後	10—00以内	良	5.0以下	3.0以下
項 目	強熱減量 (%)	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kg/cm^2)			圧 縮 強 さ (kg/cm^2)			養生温度($^{\circ}\text{C}$)	
			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日	室 温	水 温
アサノセメント	0.5	252	31.9	46.0	70.8	129	217	409	20.4	20.2
JIS R 5210	3.0以下	—	—	—	—	70以上	150以上	300以上	20 $\pm$ 3	

表—2 セメントの試験成績表

調 合	設定温度 ($^{\circ}\text{C}$)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位水量 W (kg/m^3)	単 位 量 (kg/m^3)		
							セメント C	細 骨 材 S	粗 骨 材 G
A	10	10 $\pm$ 2	5 $\pm$ 1.5	44.0	43.0	154	350	786	1041
	20				41.0	154	350	749	1078
	30				39.0	154	350	713	1114
B	20			51.0	42.0	154	300	803	1065

注) 混和剤混入量はセメント重量の0.25%を標準とし、所要のスランブ、空気量が求まるよう各温度ごとに試的に決定した。

表—3 調合表

セメント量)とし、スリップフォーム工法による施工例を参考にして水準を定め、表—1に示す4シリーズについて実験を行なった。

なお、要因を少なくするために、単位水量は一定とした。

§ 4. 試験方法

4.1 使用材料

セメントは日本セメント(株)埼玉工場製の普通ポルトランドセメントを用いた。試験成績は表—2に示す。これは JIS R 5210に合格している。

細骨材は鬼怒川産川砂で、比重2.61、吸水率2.32%、粗粒率2.40、洗い試験1.77%、単位体積重量 1640 kg/m^3 であり、JASS 5に示されている I 級細骨材に相当する砂であった。

粗骨材も鬼怒川産川砂利で25mmふるいを100%通過するものを用いた。比重2.61、吸水率1.66%、粗粒率6.83、洗い試験0.5%、単位体積重量1730 kg/m^3 であり、JASS 5に示されている I 級粗骨材に相当する砂利であった。

減水剤は日曹マスタービルダーズ(株)製ボゾリス

No.5 L を、セメント重量の0.25%を標準として用いた。練りませ水は東京都上水道水とした。

4.2 調合

コンクリートの調合は§ 3.に示したように単位水量を一定($W=154\text{kg}/\text{m}^3$)とし、単位セメント量を300、350 kg/m^3 の2種類に変えて、スランブが10 $\pm$ 2cmとなるように試的に定めた。その結果、表—3に示す調合とした。

4.3 品質管理試験方法

コンクリートの練りませは石川島コーリング製強制かくはん式ミキサ(かくはん容量100ℓ、回転数55rpm)を使用し、全材料投入後3分間練りませた。練り上がり温度の調節は、主として練りませ水の温度によって行なった。

スランブ試験は JIS A 1101、空気量試験は JIS A 1128(空気室圧力方法)に準じて行なった。

コンクリートの凝結硬化速度を把握し、パッチ間のコンクリートの品質の変動を検討するために、プロクター貫入抵抗試験を ASTM C 403 に準じて行なった¹⁷⁾。

4.4 圧縮強度試験方法

供試体は、直径10cm、高さ20cmの円柱形型わくを用いて JIS A 1132 に準じて作製した。

キャッピングは、材令1日以内では試験開始30分前に石こうを用いて行ない、材令2日以後の供試体は1日目に早強ボルトランドセメントを用いて行なった。

養生は打込み時の温度と同温度で行ない、材令2日目に脱型し、以後試験材令まで同温度の水中で養生した。

圧縮強度試験は予想強度によって2t、30t、200tの万能試験機を使用し、JIS A 1108 に準じて行なった。荷重速度は、3分以内に試験が終了するように定め、表一4のとおりとした。

静弾性係数は、材令18時間以内では上下の載荷板の間に設置したダイヤルゲージから求め、材令1日以後はワイヤーストレインゲージを供試体表面にはりつけ、ASTM C 469—65 に準じて求めた。

§ 5. せん断強度試験方法

コンクリートのせん断強度試験方法として規準化されている方法はなく、提案されている諸方法もそれぞれ長所・短所がある。また、若材令のコンクリートのせん断強度の経時変化に関する研究は、森永⁸⁾によるベーン試験から求めたせん断降伏値の経時変化(材令5時間まで)と、Olsen⁹⁾、奥村¹⁷⁾らによる三軸圧縮強度試験から求めた粘着力の経時変化(材令1日以内)を試験した研究程度である。

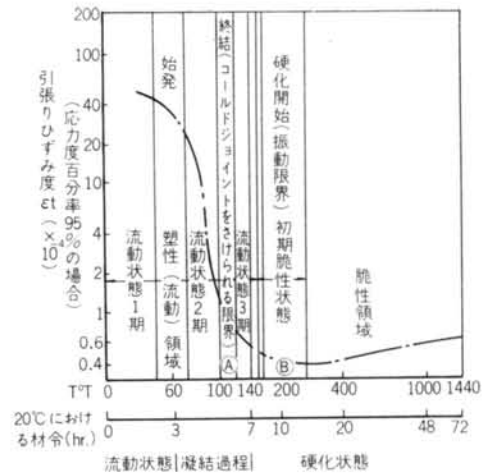
本研究は、若材令から材令28日までのせん断強度の経時変化を求めることが目的であるので、そのせん断強度試験方法の選定をまず行なった。

せん断強度試験方法を選定する場合、材令によってコンクリート供試体の取扱いが異なり、その試験方法も相違すると考えられるので、コンクリートの状態を図一1に示す3段階に分類した。

- ・流動状態——0～3時間程度($T^{\circ}T \leq 60$)——型わくを取りはずすと容易に形がくずれる。
- ・凝結過程——3～7時間程度($60 < T^{\circ}T \leq 140$)——自立はするが、取扱いがむづかしい。
- ・硬化状態——7時間程度以後($140 < T^{\circ}T$)——硬化

強 (kg/cm ²)	～0.5	0.5～1.0	1.0～1.5	1.5～5	5～10	10～50	50～100	100～200	200～
目標荷重速度 (kg/cm ² /sec.)	0.002	0.004	0.007	0.01	0.04	0.1	0.3～0.5	1.0～1.5	(JIS 2～3 A 1108)

表一4 圧縮強度試験の荷重速度



図一1 コンクリートの凝結・硬化過程¹⁸⁾

したコンクリートとして取扱い可能。

笠井¹⁸⁾は20℃養生で材令3時間程度はプロクター貫入抵抗 $P = 1 \text{ kg/cm}^2$ で、コンクリートの凝結始発時間、材令7時間程度は $P = 35 \text{ kg/cm}^2$ で、一般的に振動限界といわれていることを報告している。これらの2材令はコンクリートの凝結性が大きく変化する点と考えられる。

5.1 せん断強度試験方法の比較

コンクリートの状態を3段階に分類したが、これらの各段階におけるせん断強度試験方法として次の方法が考えられる。

- 1) 流動状態の場合：ベーン試験⁸⁾ (回転粘度計による試験)
- 2) 流動状態から硬化状態まで 全範囲：三軸圧縮試験^{9), 17)}、一面せん断試験¹⁹⁾
- 3) 凝結過程および硬化状態の場合：二面せん断試験²⁰⁾、マトック式せん断試験²¹⁾ (略称)、大野式せん断試験²⁰⁾、ルーマニア式せん断試験

本研究はせん断強度の経時変化を試験することが目的であるので、試験方法としては比較的短時間に、取扱いが容易で、精度の高い方法が望ましい。これらのことを考慮して、上記の各試験方法について予備実験を行なった結果、コンクリートの各状態によって次のような試験方法が良好であることが明らかになった。

- ・流動状態………三軸圧縮強度試験

- ・凝結過程………二面せん断試験
- ・硬化状態………ルーマニア式せん断試験

したがって、せん断強度試験は上記の3種類の方法を併用することとし、少なくとも1材令で各試験方法を重複して用いることとした。

5.2 せん断強度試験方法

(1)三軸圧縮強度試験方法

供試体の作製は、直径10cm、高さ20cmの両開き円柱形型わくの内側にゴムスリーブをはりつけ、底板を取付けた後に、圧縮強度試験用供試体の場合と同様に JIS A 1132 に準じて行なった。

試験材令の約15分前に、図-2 に示すような三軸圧縮強度試験機に供試体をセットした。側圧 (σ_3) は水圧で加え、載荷方法はひずみ制御とし、非圧密・非排水(UU)試験とした。

三軸圧縮強度試験ではひずみ速度、最大ひずみ、側圧が重要な因子であるので、これらについて予備実験を行なった。予備実験の結果、さらに既往の研究¹⁷⁾を参考にしてひずみ速度は1%/min.、最大ひずみは16%、側圧は0.1~2.0kg/cm²で試験材令によって変えることとした。

三軸圧縮強度試験では各側圧ごとに最大主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) の経時変化が求まるので、材令ごとにモールの応力円を描き包絡線を引くと、縦軸の切片から粘着力、すなわちせん断強度を求めることができる。

(2)二面せん断試験方法

供試体は幅15cm、長さ40cm、高さ10cmとした。

二面せん断試験は図-3 に示すように高さ15cmとし、載荷幅は10cmとした。

試験材令の約20分前に載荷面をキャッピングした。

載荷速度は、圧縮強度試験と同様に試験が3分以内に終了するように定め、表-5 のとおりとした。

(3)ルーマニア式せん断試験方法

供試体の寸法は二面せん断試験の場合と同じにした。しかし、せん断面に切欠きを設けてせん断破壊しやすいようにした点、載荷点上で曲げ破壊しないように補強筋を入れた点が異なる。

せん断試験は図-4 に示すような方法で行なった。

キャッピングおよび載荷速度は(2)と同様にした。

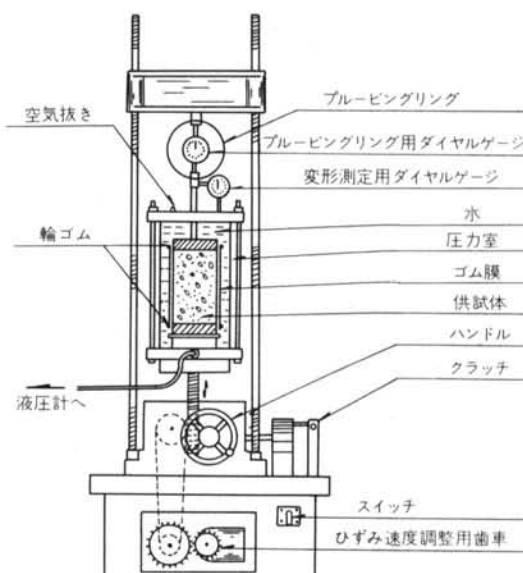


図-2 三軸圧縮強度試験装置

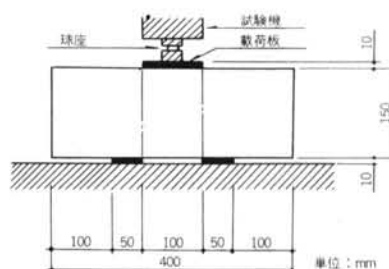


図-3 二面せん断試験方法

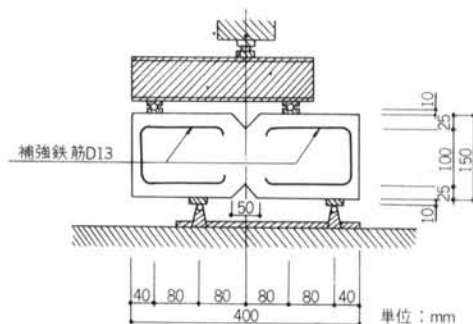


図-4 ルーマニア式せん断試験方法

強 (kg/cm ²) 度	~0.2	0.2~0.5	0.5~1.5	1.5~5	5~10	10~15	15~
目標荷重速度 (kg/cm ² /sec.)	0.001	0.003	0.008	0.04	0.07	0.1	0.15~0.25

表-5 せん断強度試験の荷重速度

§ 6. 品質管理試験結果

温度および調合（単位セメント量）を変動要因として表一1に示す4シリーズの実験を行ない、各シリーズとも最低9パッチ練りまぜた。各パッチごとに行なったスランプ、空気量、練り上がり温度の試験結果は表一6に示すようであり、いずれも設定範囲の中に入っていた。練り上がり温度も設定温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内であった。

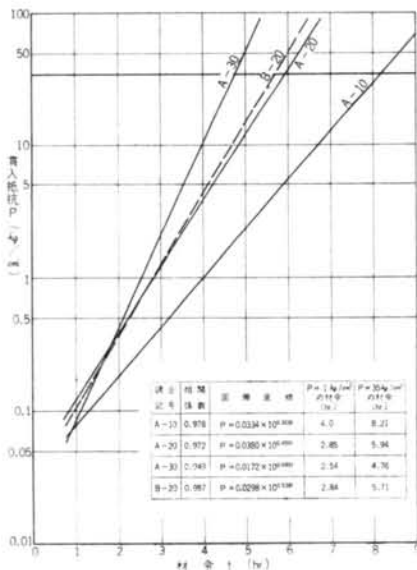
ブロッカー貫入抵抗試験結果は図一5に示す。貫入抵抗の経時変化は片対数グラフで直線で表わされ、かつ、相関係数も大きいことが確かめられた¹⁷⁾。温度の影響は大きい、調合の影響はほとんど認められなかった。A、B調合とも単位水量を $154\text{kg}/\text{m}^3$ と一定にしたので、若材令におけるコンクリートの性状に大差が生じなかったものと考えられる。

§ 7. 圧縮強度について

7.1 圧縮強度の経時変化について

表一1に示した4シリーズについて圧縮強度試験を行なった結果を図一6、7に示す。いずれのシリーズでも圧縮強度の経時変化を両対数グラフで示すと、圧縮強度が $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度まで(20℃養生で材令15時間、 $T^{\circ}\text{T}$ は300に相当)は直線で、それ以後は曲線的に圧縮強度が増大する傾向が認められる。

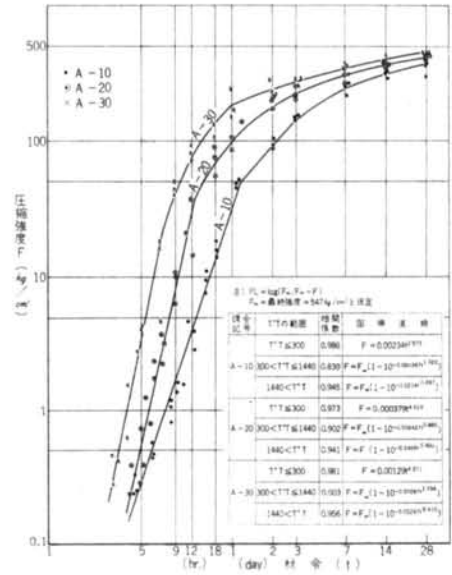
笠井⁶⁾も初期材令の間は両対数グラフを用いれば圧縮



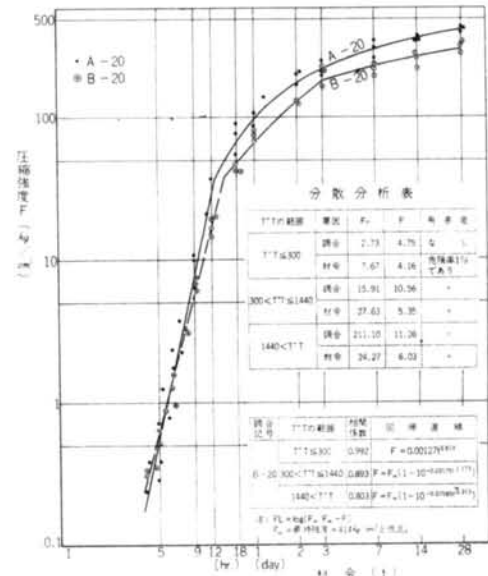
図一5 ブロッカー貫入抵抗の経時変化

調合	設定温度 ($^{\circ}\text{C}$)	スランプ(cm)		空気量(%)		練り上がり温度($^{\circ}\text{C}$)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A	10	10.4	0.65	4.8	0.49	10.8	0.82
	20	10.3	1.10	6.1	1.01	20.0	1.93
	30	10.1	1.13	3.1	0.50	29.2	1.03
B	20	9.9	1.09	4.8	0.66	19.0	1.32

表一6 品質管理試験結果



図一6 圧縮強度の経時変化 (A調合の場合)



図一7 調合が圧縮強度の経時変化に及ぼす影響

強度と材令との関係は直線的であることを示している。

佐藤・川田¹⁵⁾は硬化したコンクリートの圧縮強度の経時変化について研究を行ない、§ 2. に示したように水和反応速度の観点から式(3)を提案している。

$$F_t = F_{\infty}(1 - e^{-at^n})$$

この式は、材令(t)の経過にともなってコンクリートの最終強度(F_{∞})に漸近することを意味している。また、式(3)を変形すると、両対数グラフで $\log(F_{\infty}/F_{\infty} - F)$ と材令(t)が直線関係にある。

本実験結果のうち、 $T^{\circ}T > 300$ の範囲で式(3)を適用すると図-8のように、 $T^{\circ}T = 1440$ (20℃養生で材令3日に相当)程度を境として2本の直線で表わされることが明らかになった。

そこで、 $T^{\circ}T \leq 300$ は両対数グラフで直線、 $T^{\circ}T > 300$ は式(3)が適用(ただし $T^{\circ}T = 1440$ を境として2本の曲線)できるとして、それぞれ圧縮強度と材令の相関係数、回帰直線を求めると図-6、7である。いずれのシリーズの場合でも、圧縮強度と材令の間にきわめて高い相関関係が認められるので、上述した式が適用できるものと考えられる。

7.2 調合が圧縮強度の経時変化に及ぼす影響

A調合は単位セメント量が350kg/m³、B調合は300kg/m³で、単位水量はいずれも154kg/m³である。圧縮強度の経時変化は図-7に示すようであり、材令28日の圧縮強度は、

A調合：421kg/cm²(標準偏差18.2kg/cm²)

B調合：319kg/cm²(標準偏差28.9kg/cm²)

で、A調合は設計基準強度270kg/cm²、B調合は240kg/cm²程度のコンクリートに相当する。

図-7に示すように、圧縮強度の経時変化の傾向は調合によって相違するといえる。そこで、 $T^{\circ}T$ が300、1440を境として3つの材令の範囲に分けて、調合の影響を検討するために分散分析を行なった。その結果を図-7に示す。 $T^{\circ}T$ が300以下(20℃養生で材令15時間以内)の

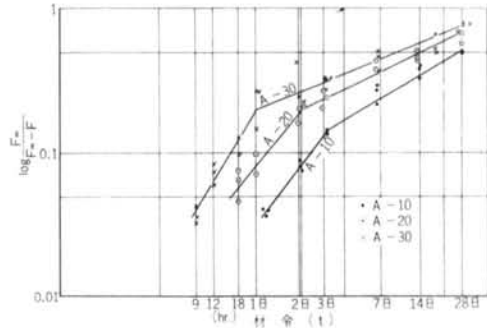


図-8 $\log(F_{\infty}/F_{\infty} - F)$ と材令との関係(A調合の場合)

初期材令では、単位セメント量の相違によって圧縮強度に有意差が認められなかった。しかし、 $T^{\circ}T$ が300以上の場合には有意差が示され、圧縮強度が水セメント比法則に支配されることが確かめられた。

本実験結果は§ 2. に示した野中^{3), 4)}らの実験結果と一致するものであって、初期材令(15時間程度以内)のコンクリートは単位セメント量が50kg/m³程度異なっても圧縮強度に及ぼす影響が小さいことを示すものである。

7.3 温度が圧縮強度の経時変化に及ぼす影響

A調合の場合、温度を10、20、30℃と3種類に変えて試験したが、図-6に示すように温度が圧縮強度に及ぼす影響はきわめて大きいのである。

強度の発現速度に関しては§ 2. に示したように、温度(T)と材令(t)の積(Maturity, 熟成度)をパラメータとして表わしている研究が多いが、その熟成度も次の2つの概念が提案されている。

$t(T+10)$ 方式 (Saul¹⁰⁾・Bergström¹¹⁾、洪¹²⁾)

$T^{\circ}T$ 方式 (笠井⁶⁾)

$$(t(T+\alpha) : \alpha = |T-20|/m)$$

$t(T+10)$ 方式は蒸気養生したコンクリートの強度発現速度に関する研究から生まれ、セメントは-10℃以上であれば水和反応をして硬化するとした考えである。一方、 $T^{\circ}T$ 方式は、 $t(T+10)$ 方式を拡張展開し、各温度

方 式	範 囲	相関係数	回 帰 直 線
$T^{\circ}T$	$T^{\circ}T \leq 300$	0.914	$F = 1.968 \times 10^{-7} \times T^{\circ}T^{3.313}$
	$300 < T^{\circ}T \leq 1440$	0.943	$F = F_{\infty}(1 - 10^{-7.816 \times 10^{-6} \times T^{\circ}T^{1.232}})$
	$1440 < T^{\circ}T$	0.949	$F = F_{\infty}(1 - 10^{-0.0117 T^{\circ}T^{0.417}})$
$t(T+10)=M$	$M \leq 450$	0.954	$F = 3.0 \times (10^{-9} \times M)^{3.812}$
	$450 < M \leq 2000$	0.823	$F = F_{\infty}(1 - 10^{-4.436 \times 10^{-6} \times M^{1.455}})$
	$2000 < M$	0.945	$F = F_{\infty}(1 - 10^{-0.0261 M^{0.313}})$

注) $FL = \log(F_{\infty}/F_{\infty} - F)$, F_{∞} = 最終強度 = 547kg/cm²

表-7 圧縮強度と $t(T+10)$ および $T^{\circ}T$ との相関関係(A調合の場合)

によって強度発現に対する寄与率が異なると考えたものであり、実験的にその寄与率を定めている。

本研究結果を上述した2方式で整理し、相関係数を求めた結果、表—7に示すように、初期材令の $T^{\circ}T \leq 300$ の範囲では $t(T+10)$ 方式の方が相関係数が大きい、全体的には $T^{\circ}T$ 方式の方が相関係数が大きいことが示された。

したがって、本研究では温度と時間のパラメーターとして $T^{\circ}T$ 方式を採用することにする。

A調合における圧縮強度と $T^{\circ}T$ との関係は図—9に示すようで、その関係式は表—7に示すとおりである。

B調合は20℃の場合しか試験していないが、圧縮強度と $T^{\circ}T$ との関係を次に示す。

$$T^{\circ}T \leq 300 \quad F = 1.40 \times 10^{-8} \times T^{\circ}T^{3.813}$$

$$300 < T^{\circ}T \leq 1440 \quad F = F_{\infty}(1 - 10^{-5.248 \times 10^{-5} \times T^{\circ}T^{1.172}})$$

$$1440 < T^{\circ}T \quad F = F_{\infty}(1 - 10^{-0.0297 \times T^{\circ}T^{0.313}})$$

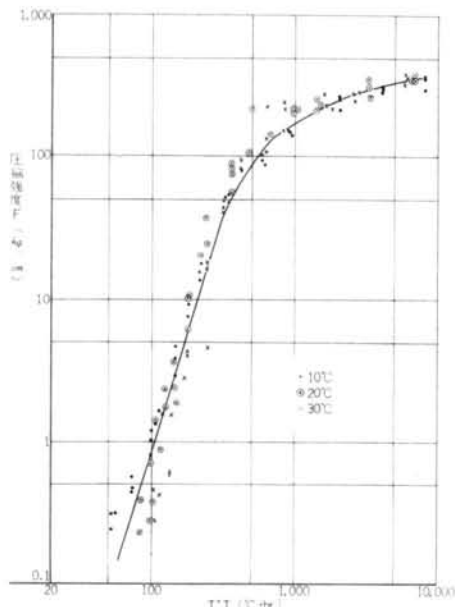
(注) $FL = \log(F_{\infty}/F_{\infty} - F)$, F_{∞} = 最終強度 = 414 kg/cm²

以上の結果から、実用的な温度の範囲内において、任意温度、任意材令の圧縮強度を推定することができる。

§ 8. 静弾性係数について

8.1 圧縮応力とひずみの関係

若材令コンクリートは硬化したコンクリートに比べて



図—9 圧縮強度と $T^{\circ}T$ との関係 (A調合の場合)

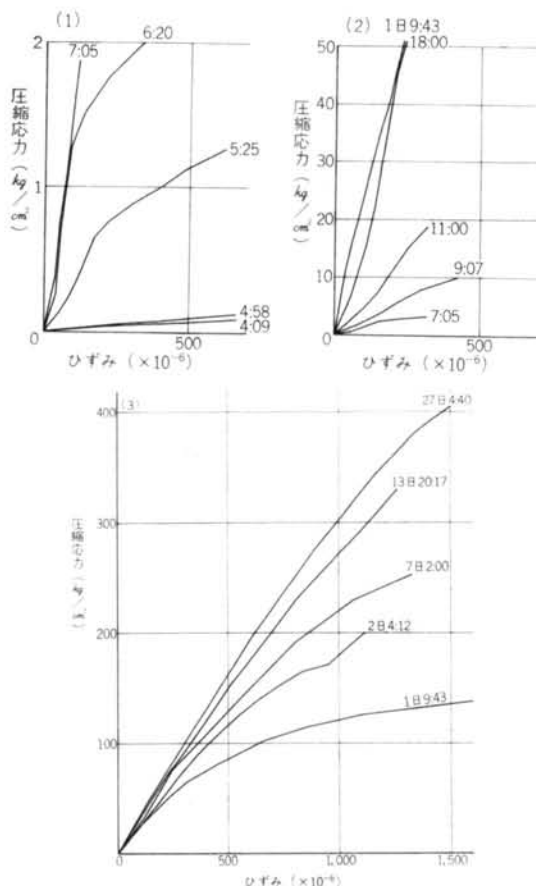
変形が大きく、破壊のメカニズムも異なる。若材令の間は、圧縮応力がある程度以上になると供試体中央部がふくらむとともに縦ひびわれが入り、さらに応力が増大すると粗骨材とモルタルの付着面がすべり、コンクリートがばらばらに崩れて破壊に至る。

代表的な圧縮応力とひずみの関係は図—10に示すようであって、材令によって著しく異なる。これらの関係を1枚のグラフに示すと、4時間程度の若材令は横軸に、材令28日は縦軸になるくらい異なる。

圧縮応力とひずみの関係は終局時まで直線ではなく、一般的には曲線である。しかし、圧縮強度の50%以下では直線的とみなせるので、初期の接線勾配を求めて、これを静弾性係数と定義した。

8.2 静弾性係数の経時変化について

静弾性係数の経時変化は圧縮強度の場合と同様な傾向を示した。変曲点も全く同様で、 $T^{\circ}T = 300, 1440$ であった。 $T^{\circ}T = 300$ に相当する静弾性係数は約50000 kg/cm



図—10 圧縮応力とひずみの関係の典型例 (A—20の場合)

であり、これ以下の場合が両対数グラフで直線を示すことがわかった。

8.3 調合が静弾性係数に及ぼす影響

調合が静弾性係数に及ぼす影響も圧縮強度の場合とかなり類似しているが、 $T^{\circ}T=1440$ (20℃養生で材令3日)までは調合による有意差が認められなかった。しかし、 $T^{\circ}T > 1440$ では静弾性係数に有意差が認められ、水セメント比の小さい調合の方が静弾性係数が大きい傾向を示した。

8.4 温度が静弾性係数に及ぼす影響

温度が静弾性係数に及ぼす影響は圧縮強度の場合と同様に大きい。A調合の場合の静弾性係数と $T^{\circ}T$ との関係を図-11に示す。これは、圧縮強度の場合よりばらつきが大きい。図-11に示した相関係数も圧縮強度の場合より小さいが、いずれも0.7以上あり相関関係は認められる。

したがってA調合における静弾性係数は図-11に示した $T^{\circ}T$ との関係式によって推定できると考えられる。

B調合の静弾性係数と $T^{\circ}T$ との関係式は次のようである。

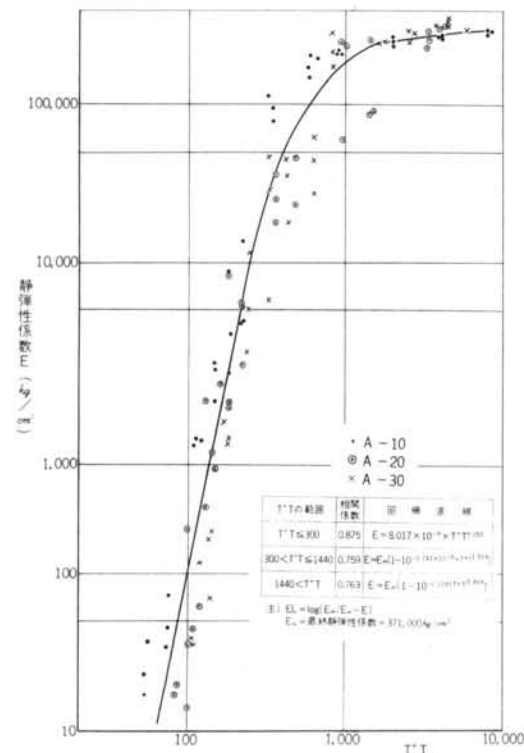


図-11 静弾性係数と $T^{\circ}T$ との関係 (A調合の場合)

$$T^{\circ}T \leq 300 \quad E = 1.932 \times 10^{-8} \times T^{\circ}T^{4.87}$$

$$300 < T^{\circ}T \leq 1440 \quad E = E_{\infty} (1 - 10^{-1.042 \times 10^{-8} \times T^{\circ}T^{2.54}})$$

$$1440 < T^{\circ}T \quad E = E_{\infty} (1 - 10^{-0.0537 \times T^{\circ}T^{0.285}})$$

(注) $EL = \log(E_{\infty}/E_{\infty} - E)$, E_{∞} = 最終静弾性係数 = 326,000 kg/cm²

8.5 静弾性係数と圧縮強度との関係

圧縮強度および静弾性係数の経時変化は同様な傾向を示したので、両者の関係を求めると図-12に示すことができる。すなわち、両対数グラフで圧縮強度が 5 kg/cm² の点を変曲点として2本の直線で示されることが明らかになった。相関係数を求めると、きわめて良好な相関関係を示した。

圧縮強度が 5 kg/cm² の $T^{\circ}T$ は図-9より172に相当する。 $T^{\circ}T$ は20℃養生で8～9時間であり、ブローカー貫入抵抗は35 kg/cm²以上でコンクリートは硬化状態に入ったところである。上述した傾向は、コンクリートが硬化状態に入ると、圧縮強度の増加に比べて静弾性係数の増加割合が小さいことを示すものである。

したがって、静弾性係数は圧縮強度と良好な相関関係を示し、A調合の場合は図-12に示した関係式によって圧縮強度から静弾性係数が推定できることが示された。

B調合の場合の関係式を次に示す。

$$F \leq 5 \text{ kg/cm}^2 \quad E = 180.3 \times F^{1.401}$$

$$F > 5 \text{ kg/cm}^2 \quad E = 196.3 \times F^{1.306}$$

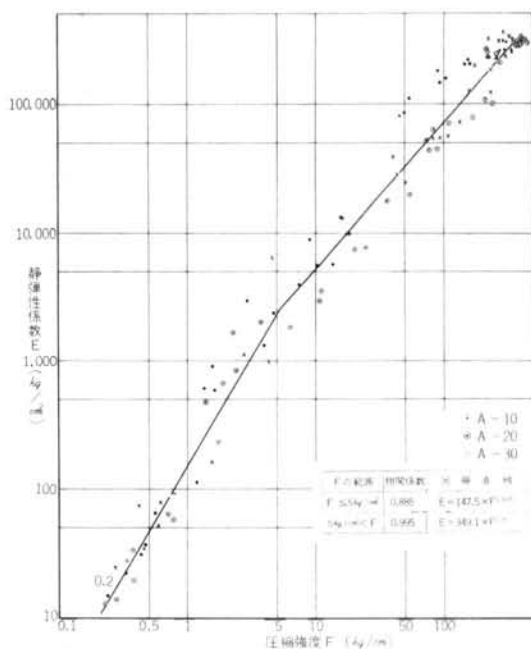


図-12 静弾性係数と圧縮強度との関係 (A調合の場合)

§ 9. せん断強度について

9.1 せん断強度の経時変化について

§ 5. に示したように、せん断強度は次の3方法によって試験した。

流動状態…… $T^{\circ}T \leq 60$ ……三軸圧縮強度試験

凝結過程…… $60 < T^{\circ}T \leq 140$ ……二面せん断試験

硬化状態…… $140 < T^{\circ}T$ ……ルーマニア式せん断試験

まず、三軸圧縮強度試験から求めた粘着力、すなわちせん断強度の経時変化は図-13に示すように、ブロック一貫入抵抗の場合と同様、片対数グラフで直線的である。

次に、上述した3試験方法によって求めたせん断強度

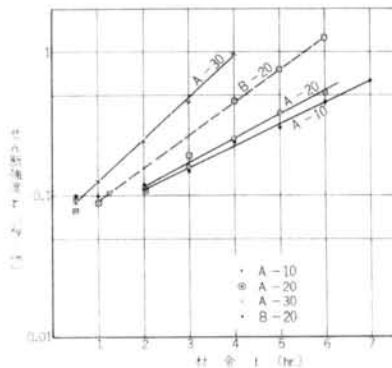


図-13 三軸圧縮強度試験から求めたせん断強度の経時変化

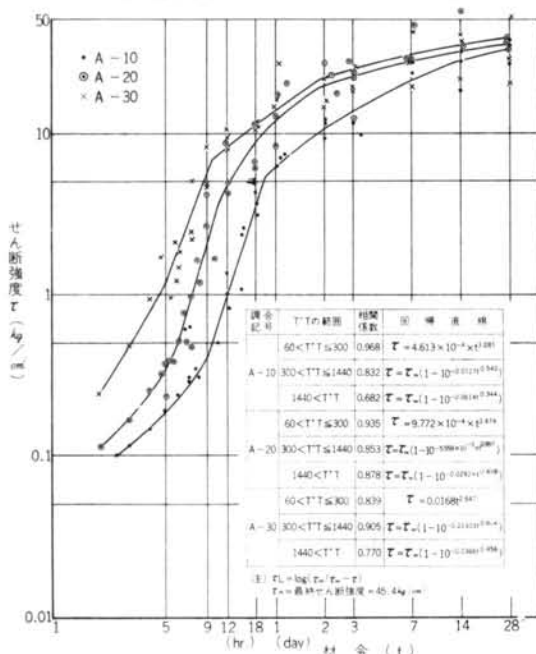


図-14 せん断強度の経時変化 (A調査の場合)

の経時変化を図-14, 15に示す。コンクリートの硬化状態によって試験を変えたが、求められたせん断強度には連続性が認められた。さらに、せん断強度の経時変化は $T^{\circ}T > 60$ の場合、圧縮強度と同様な傾向が認められた。

圧縮強度の場合と同様に $T^{\circ}T$ の各範囲ごとに相関係数、回帰直線を求めると図-14, 15に示すことができ、全体的には良好な相関を示した。

材令28日におけるせん断強度と圧縮強度の比を表-8に示す。せん断強度は圧縮強度の約 $1/11$ であり、平均的な値であると思われる。

調査記号	圧縮強度 F (kg/cm²)	せん断強度 τ (kg/cm²)	$\frac{\tau}{F}$
A-10	377	33.0	$\frac{1}{11.4}$
A-20	421	36.3	$\frac{1}{11.6}$
A-30	456	41.3	$\frac{1}{11.0}$
B-20	319	30.3	$\frac{1}{10.5}$
平均	—	—	$\frac{1}{11.1}$

表-8 材令28日におけるせん断強度と圧縮強度の比較

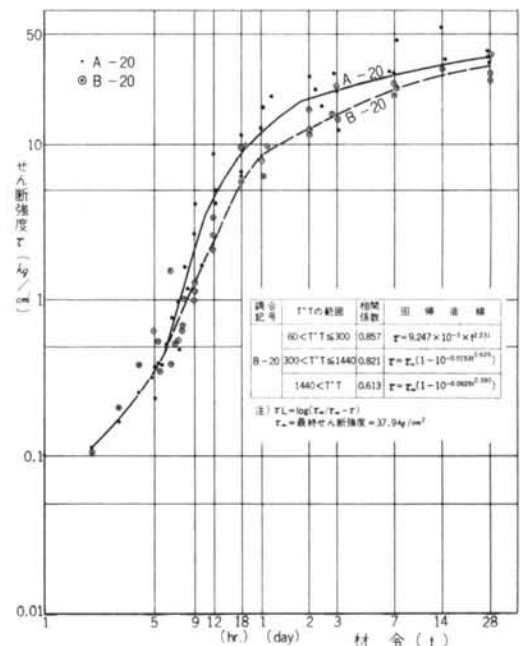


図-15 調査がせん断強度の経時変化に及ぼす影響

9.2 調合がせん断強度の経時変化に及ぼす影響

A, B調合におけるせん断強度を比較すると図—15に示すようで、材令7時間($T^{\circ}T=140$)以内ではあまり差が認められず、 $T^{\circ}T>140$ について分散分析を行なうと、若材令の間から有意差が認められた。

9.3 温度がせん断強度の経時変化に及ぼす影響

せん断強度と $T^{\circ}T$ との関係を求めると図—16に示すようで、圧縮強度と同様に良好な相関関係が認められる。すなわち、A調合の場合には図—16に示したせん断強度と $T^{\circ}T$ との関係式によってせん断強度を推定することができることが示された。

B調合のせん断強度と $T^{\circ}T$ との関係を次に示す。

$$140 < T^{\circ}T \leq 300 \quad \tau = 1.164 \times 10^{-5} \times T^{\circ}T^{2.229}$$

$$300 < T^{\circ}T \leq 1440 \quad \tau = \tau_{\infty}(1 - 10^{-2.328 \times 10^{-3} \times T^{\circ}T^{0.628}})$$

$$1440 < T^{\circ}T \quad \tau = \tau_{\infty}(1 - 10^{-0.01945 \times T^{\circ}T^{0.390}})$$

(注) $\tau L = \log(\tau_{\infty}/\tau_{\infty} - \tau)$, $\tau_{\infty} = 37.9 \text{ kg/cm}^2$

9.4 せん断強度とプロクター貫入抵抗の関係

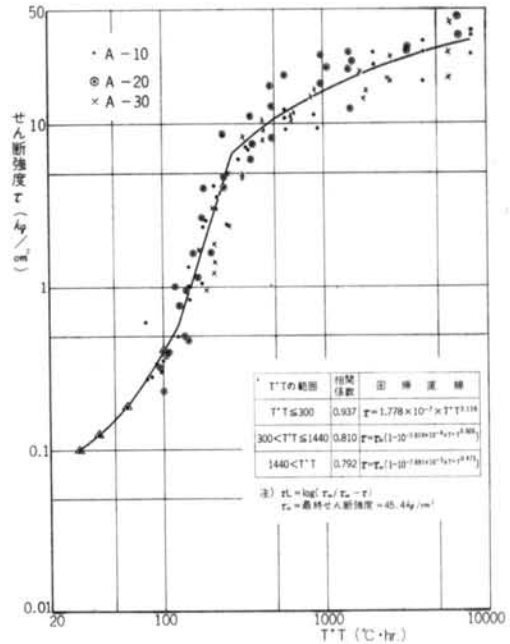
三軸圧縮強度試験からもとめた粘着力、すなわちせん断強度とプロクター貫入抵抗の経時変化はいずれも片対数グラフで直線になるので、次にこれらの関係を求めた。両対数グラフにこれらの関係を示すと図—17のようであり、良好な相関関係が認められる。注入モルタル¹⁷⁾の粘着力とプロクター貫入抵抗との関係についても同様な報告がなされている。すなわち、プロクター貫入抵抗試験を行なえば、初期材令($P=35 \text{ kg/cm}^2$ 程度以下、硬化状態に達するまで)におけるせん断強度を推定することができることが示された。

9.5 せん断強度と圧縮強度との関係

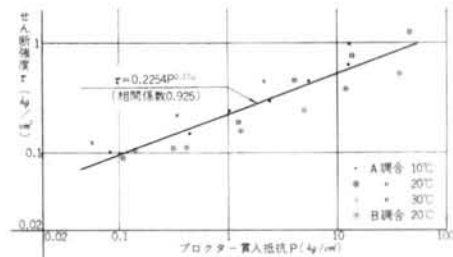
せん断強度の経時変化は圧縮強度の経時変化と同様な傾向を示しているので、両者の関係について検討を行なった。

両対数グラフの縦軸にせん断強度、横軸に圧縮強度を示すと図—18が得られた。この図よりみると、良好な相関を示し、直線的な関係がわかる。

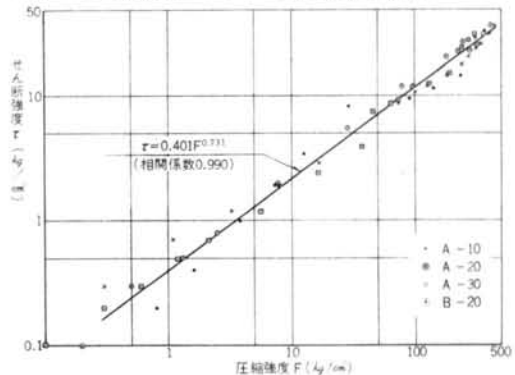
また、この直線的な関係は、調合が異なっても大差がないこともわかった。このことは、スリップフォーム工法で使用する実用的な調合の範囲では、せん断強度と圧縮強度の関係は同一と考えてよいと思われる。図—18に示したように、圧縮強度よりせん断強度が推定できることが明らかになった。



図—16 せん断強度と $T^{\circ}T$ との関係 (A調合の場合)



図—17 せん断強度とプロクター貫入抵抗との関係



図—18 せん断強度と圧縮強度との関係

§ 10. 結論

スリップフォーム工法で施工する場合の施工計画、および施工中の若材令のコンクリートの管理手法がいかにあるべきかを目的として、若材令から十分に硬化するまでのコンクリートの圧縮強度、静弾性係数およびせん断強度を試験した。以上の実験結果より、次のことがいえるものとする。

- 1) せん断強度試験方法として、20℃養生で3時間程度までは三軸圧縮強度試験、3～7時間程度は二面せん断試験、7時間以後はルーマニア式せん断試験を採用するといふ。

これらの試験によって求められたせん断強度は、経時的に連続性が認められる。

- 2) 三軸圧縮強度試験によるせん断強度（粘着力）の経時変化は、片対数グラフで直線、すなわち指数関数的である。コンクリートが流動状態にある初期材令（ $P=35\text{kg/cm}^2$ ）以内のせん断強度は、ブロッカー貫入抵抗と良好な相関関係を示す。

$$\tau = 0.2254 P^{0.370} \quad \dots\dots(4)$$

（相関係数0.925）

施工中、ブロッカー貫入抵抗試験を行えば、初期材令のせん断強度を推定することができる。

- 3) コンクリートの硬化が凝結過程に入った以後、圧縮強度、静弾性係数、せん断強度の経時変化は、20℃養生で15時間（笠井⁶⁾提案の $T^\circ T=300$ ）を変曲点として傾向が異なる。すなわち、 $T^\circ T \leq 300$ の範囲では両対数グラフで直線、 $T^\circ T > 300$ の範囲は水和反応に基づいた佐藤・川田の提案式¹⁵⁾、

$$F_c = F_\infty (1 - e^{-at^n})$$

によって近似できる。また、 $T^\circ T=1440$ を変曲点とし

て係数が異なる。

- 4) 温度と時間のパラメーターとして熟成度 $t(T+10)$ 、 $T^\circ T$ が提案されているが、10～30℃の実用的な温度の範囲で実験した本研究の場合は、 $T^\circ T$ の方が相関関係が良好であった。
- 5) 圧縮強度、静弾性係数、せん断強度と $T^\circ T$ の関係は良好な相関を示すので、これらの関係式を用いることによって任意温度、任意材令の各性状が推定できる。
- 6) 静弾性係数、およびせん断強度と圧縮強度との関係は次のように表わされる。

$$F \leq 5\text{kg/cm}^2 \quad E = 147.5 F^{1.695} \quad \dots\dots(5)$$

$$F > 5\text{kg/cm}^2 \quad E = 349.1 F^{1.160} \quad \dots\dots(6)$$

$$\tau = 0.401 F^{0.731} \quad \dots\dots(7)$$

- 7) 材令12時間程度以内では、単位水量を一定として、単位セメント量を変えても、圧縮強度、静弾性係数、せん断強度は大差なく、野中^{3), 4)}らの実験結果が確かめられた。

しかし、12時間以後は水セメント比法則が適用されるようである。

- 8) 本試験結果は、スリップフォーム工法の施工中の検討を行なう場合に重要な資料となると思われるが、コンクリートの初期性状についてはさらに未解明の部分が多いので、今後も研究をする必要がある。

以上によって、現在未解明な部分が明らかとなり、当社開発のもので、塔状構造物を施工する「シミズフレックスリップシステム」の今後の施工計画や、施工中のコンクリート管理に役立つものと思われる。

本研究を行なうにあたって、当社研究所森永繁氏、三根直人氏、小島啓治氏および当社土木設計部黒田正信氏の助言および協力に対し謝意を表する。

＜参考文献＞

- 1) 日本建築学会：“コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説；9節9.5” 1976.2
- 2) 渡辺・横田・塩谷・市之瀬：“フレックスリップ工法による超高煙突施工時の振動性状” 清水建設研究所報 第27号 1976.10
- 3) 野中・曾田・新見：“コンクリートの初期性状に関する研究(その1)” 清水建設研究所報 第13号 1969.4
- 4) 野中・小山：“コンクリートの初期性状に関する研究(その2)” 清水建設研究所報 第14号 1969.10
- 5) 木沢・棚橋：“コンクリートの初期性状に関する研究” 日本建築学会論文報告集 第66号 1960.10
- 6) 笠井芳夫：“コンクリートの初期圧縮強度推定方法” 日本建築学会論文報告集 第141号 1967.11
- 7) 笠井・横山・平賀：“コンクリートの初期圧縮・曲げ・引張強度について” 日本建築学会論文報告集号外 1965.9
- 8) 森永繁：“硬化過程に変形を受けたコンクリートの硬化後の強度” 日本建築学会大会学術講演梗概集 1973.10
- 9) R. H. Olsen: “Lateral Pressures of Concrete on Formwork” 1968.5
- 10) A. G. A. Saul: “Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure” Magazine of Concrete Research 1951.3

- 11) Sven G. Bergström: "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete" Magazine of Concrete Research 1953. 12
- 12) 洪悦郎: "寒中に施工したコンクリートの強度推定について" 日本建築学会論文報告集 第59号 1958. 6
- 13) 笠井芳夫: "先に提案したコンクリートの初期圧縮強度推定方法の適用性について" 日本建築学会論文報告集 第163号 1969. 9
- 14) 川越邦雄: "蒸気養生におけるコンクリートの強度発現および熱応力" セメント技術年報 1967年
- 15) 佐藤・川田: "ポルトランドセメントの水和熱およびモルタル強度などを計算する新しい公式の提案" セメント・コンクリート 1960. 12
- 16) 笠井・横山: "コンクリートの初期材令における圧縮応力度とひずみ度との関係" コンクリート・ジャーナル Vol. 9, No. 2 1971. 2
- 17) 奥村・武川・金沢: "若材令における注入モルタルのせん断特性について" コンクリート工学 Vol. 14, No. 11 1976. 11
- 18) 笠井芳夫: "コンクリートの凝結・硬化に関する一考察" セメント技術年報 1969年
- 19) Tassios: "Plasticity and Cohesiveness of Fresh Concrete" RILEM Seminar on Fresh Concrete 1973. 3
- 20) 国分正胤編: "土木材料実験" 技報堂 1972年
- 21) A. H. Mattock, W. K. Li & T. C. Wang: "Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete" Journal of PCI Vol. 21, No. 1 1976. 1

