

論文 三軸圧縮試験を利用した若材齢コンクリートの力学的性質に関する研究

林 肇奎*¹ 前田孝一*² 村上雅也*³

要旨: 本研究は、三軸圧縮試験を利用した若材齢コンクリートの力学的な性質を求めることを目的として、まず、引張応力域における Coulomb の降伏条件を再検討し、粘着力と内部摩擦角から引張強度を推定する手法を示す。次に、モルタル試験体を用いて、材齢と側圧をパラメータにした三軸圧縮試験を行い、それらの要因が若材齢コンクリートの力学的な性質に及ぼす影響を検討し、三軸圧縮試験から推定される引張強度と通常の直接引張試験や割裂試験、曲げ試験から得られる引張強度の値とを実験的に比較検討したものである。結果として、三軸圧縮試験が有効であることが確かめられた。

キーワード: 三軸圧縮試験, Coulomb の降伏条件, 若材齢, 引張強度, ヤング率, 脆性度

1. はじめに

コンクリートの三軸圧縮試験に関する既往の研究は、硬化したコンクリートを対象にして、側圧を受けたコンクリートの圧縮強度を求めることを目的とするもの¹⁾、まだ固まらないコンクリートのレオロジー特性を明らかにすることを目的とするものがある²⁾。

コンクリートの材齢という点では、両者は、非常に極端で、ちょうど、両者間の、いわゆる若材齢コンクリートに対して行われた研究は非常に少ない。

三軸圧縮試験は、若材齢コンクリートの力学的性質を調べる上で、従来提案されている試験方法に比べ、次のような利点を持つ。第一に、まだ固まらない状態で供試体を作製し、その状態を保ったまま試験することができ、脱型する必要がない。第二に、一様な応力状態で試験できる。

そこで、筆者らは、三軸圧縮試験を利用した若材齢コンクリートの強度やヤング率といった力学的性質の測定の可能性を検討することを目的として、引張応力域における Coulomb の降伏条件を再検討し、粘着力と内部摩擦角から引張強度を推定する手法を示し、以下の点の検討

を試みた。

1) モルタル試験体を用いて、材齢と側圧をパラメータにした三軸圧縮試験から、それらの要因が若材齢コンクリートの力学的な性質に及ぼす影響を検討する。

2) 三軸圧縮試験から推定される引張強度と通常の直接引張試験や割裂試験、曲げ試験から得られる引張強度の値とを比較検討する。

2 三軸圧縮試験による引張強度の推定

2.1 三軸圧縮の原理³⁾

供試体の載荷時における応力状態は圧力室内の側圧を p 、ピストンから供試体に加わる荷重を Q とすると、

$$\text{水平方向: } \sigma_2 = \sigma_3 = p \quad (1)$$

$$\text{上下方向: } \sigma_1 = p + Q/A$$

ここに $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ最大、中間、最小主応力で、主応力差の最大値を圧縮強さという。 A は供試体の断面積である。ここで応力の符号は土質力学の慣用に従い、弾性学の定義と逆にする。

供試体内の任意の平面上の応力状態はモールの円によって表される。即ち、 σ_1 に直交する平面と角度 α をなす平面上の垂直応力 σ_{nn} とせん

*1 千葉大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員) *2 千葉大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員) *3 千葉大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

断応力 τ_{nl} は、釣り合い式から次のように求められる。

$$\sigma_{nn} = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (2)$$

$$\tau_{nl} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (3)$$

$$\therefore \left[\sigma_{nn} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right]^2 + \tau_{nl}^2 = \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right]^2 \quad (4)$$

Coulomb の降伏条件では、土の滑り破壊は、滑り面に作用するせん断応力が土の粘着力と摩擦力の和を超えた時に生じると考える。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

ここで、 τ : 滑り面のせん断応力、 C : 粘着力、 σ : 滑り面の垂直応力、 ϕ : 内部摩擦角

図-1 に式(4)のモールの円と式(5)の関係式を示す。図-1 から

$$\phi + \frac{\pi}{2} = 2\alpha \quad \text{より} \quad \alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}, \quad \beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

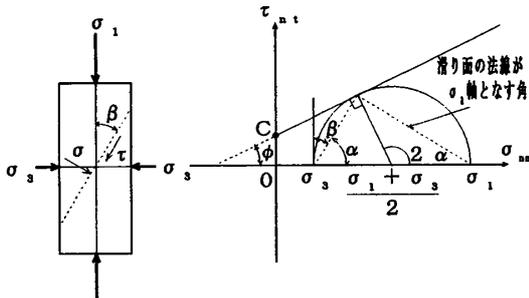


図-1 三軸圧縮試験とモールの円の関係

圧縮強さと側圧の関係が図-2 に示すような勾配 m_0 、縦軸切片 f_0 の直線となるとき、 ϕ と C は次の式で与えられる³⁾。

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{m_0}{2 + m_0} \right], \quad C = \frac{f_0}{2\sqrt{1 + m_0}} \quad (6)$$

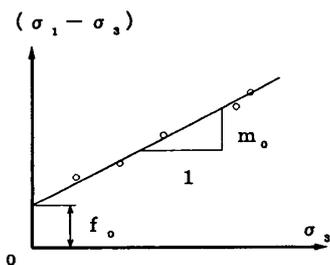


図-2 圧縮強さと側圧の関係

2. 2 引張域における Coulomb の降伏条件の検討

三軸圧縮試験から引張強度を推定するため、Coulomb の降伏条件を検討する。図-1 より次の式が導かれる。

$$\sin(\phi) = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{C \cot(\phi) + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}} \quad \text{から}$$

$$\sigma_1 \frac{1 - \sin(\phi)}{2C \cos(\phi)} - \sigma_3 \frac{1 + \sin(\phi)}{2C \cos(\phi)} = 1 \quad (7)$$

$$S_c = \frac{2C \cos(\phi)}{1 - \sin(\phi)}, \quad S_t = \frac{2C \cos(\phi)}{1 + \sin(\phi)} \quad \text{として}$$

$$\frac{\sigma_1}{S_c} - \frac{\sigma_3}{S_t} = 1 \quad (8)$$

式(5)の成り立つ条件として $\sigma \geq 0$ が必要で、

$$\sigma = \sigma_{nn} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \left[\frac{\pi}{2} - \phi \right] \geq 0$$

$$\sigma_1 \geq -\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (9)$$

ここで $m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{S_c}{S_t}$ とおけば $\sigma_1 \geq -m \sigma_3$ (10)

$\sigma \leq 0$ の場合、滑り破壊ではなく、分離破壊モードとなる。分離破壊の条件が最大引張応力によると仮定して、主応力で Coulomb の降伏条件を二軸主応力状態で、図-3 に示す。

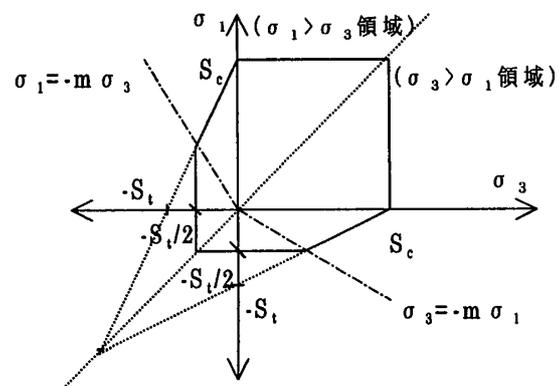


図-3 二軸主応力状態での Coulomb の破壊条件

図-3で、式(8)、(10)の交点から、 $\sigma_1 = S_c/2$
 $\sigma_3 = S_t/2$ つまり引張強度は $S_t/2$ で与えら
 れる。よって三軸圧縮試験から、粘着力 c と
 内部摩擦角 ϕ が求められれば、
 この降伏条件をモールの円を使って図-4に示
 す。

$$\text{圧縮強度: } S_c = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (11)$$

$$\text{引張強度: } S_t = \frac{S_c}{2} = \frac{C \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (12)$$

となり、強度比は

$$\frac{\text{引張強度}}{\text{圧縮強度}} = \frac{S_t}{S_c} = \frac{1 - \sin \phi}{2(1 + \sin \phi)} \quad (13)$$

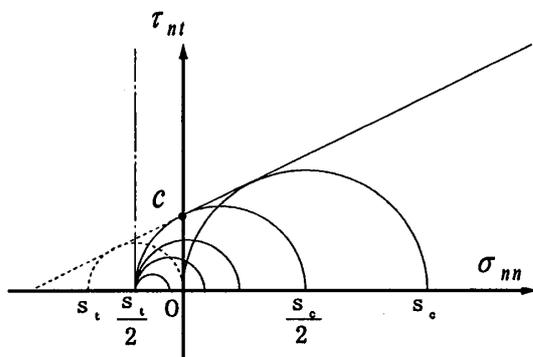


図-4 モールの円で示す三軸圧縮試験の降伏条件

3 実験方法と要因

3.1 試験方法

1) 三軸圧縮試験

土質工学で行われている土の三軸圧縮試験方法³⁾に従った。

試験条件は、間隙水圧をなくするために排水条件で圧密し、軸方向圧縮過程でも排水状態で試験を行った。セメントの水和によるポーラストーンの目詰まりを防ぐため供試体とポーラストーンの間には濾紙を挟んだ。ゴムスリーブは厚さ 0.2mm のものを使用した。モールドの径は 35mm で、供試体の高さは 85mm である。

試験の手順は、練り鉢で約 3 分間モルタルを練った後、モールドに試料を詰めて成形し、モールドをセットしたまま、恒温室(温度 20℃、湿度 65%)で所定の材齢まで養生した。所定

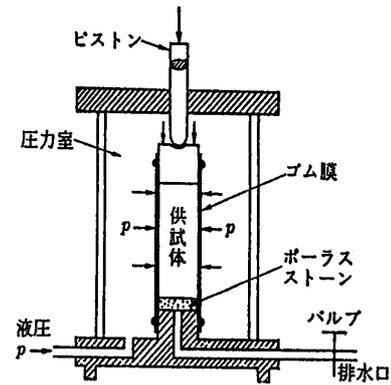


図-5 三軸圧縮試験機の主要部分

の材齢で、三軸圧縮試験装置を組み立て、側圧を加えた後、毎分約 3%の歪み速度で軸方向に載荷し、歪みが 10%を越えるまでの応力と歪みの値を計算機に取り込んだ。

図-5に試験機の概略を示す。

2) 割裂試験, 直接引張試験, 曲げ試験

曲げ試験以外の供試体寸法は、寸法効果を考慮して三軸圧縮強度試験と同様にした。また、養生も同様にゴムスリーブとモールドを挟んだ状態で、所定の材齢まで養生した。

割裂試験では、試験中の乾燥を防ぐためと、若材齢供試体の形状を保つためにゴムスリーブを挟んだ状態で、載荷した(図-6)。

割裂試験は、若材齢では非弾性的な性質を示すため、引張試験には適していないが、既往の研究では、割裂強度が約 0.051N/mm² までの報告例がある⁴⁾。予備実験で、直径 35mm の供試体の応力-歪み曲線(応力は JISA1113 の式に従って応力に換算した値、歪みは荷重方向の変位を直径で割った値)に発生するピークが複数生じることがあった。この理由は、供試体の径が小さいため載荷部分が降伏した後に、更に、荷重を負担したためと考え、直径 50mm の供試体で追加実験を行い、比較した(図-8)。

その結果、直径 35mm の供試体の応力-歪み曲線に発生する最初のピークと直径 50mm の供試体の最大応力とがほぼ一致することが確かめられた。そこで、直径 35mm の供試体の応力-歪

み曲線の最初のピークを破壊荷重とした。

直接引張試験は、横方向に圧縮力を加え摩擦で止める方法で行った。載荷は1トン万能形引張試験機（載荷速度 0.5mm/min）で行った(図-7)。直接引張試験の結果の値は治具と試験体の重さによる応力分を除いた値である。

曲げ試験は、セメント強度試験の方法に準拠して行った。

3.2 試験要因

試験要因と供試体寸法を表-1に示す。三軸圧縮試験は側圧 0, 0.05, 0.1, 0.2 N/mm²で行った。各試験の供試体数は各要因ごとに3個である。モルタルは、普通ポルトランドセメントモルタルで、水セメント比 50%, セメント：細骨材 = 1 : 2である。細骨材は標準砂を用いた。

表-1 試験要因と供試体寸法

実験種類	要因	供試体寸法
三軸圧縮試験	材齢 (0, 3, 6, 9, 12 時間)	φ 35*85mm
割裂試験	材齢 (0, 3, 6, 9, 12 時間)	φ 35*85mm
直接引張試験	材齢 (3, 6, 9, 12 時間)	φ 35*85mm
曲げ、 圧縮強度	材齢 (3, 6, 9, 12 時間)	40*40*160mm

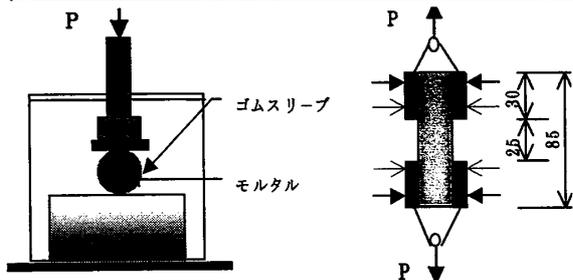


図-6 割裂試験

図-7 直接引張試験

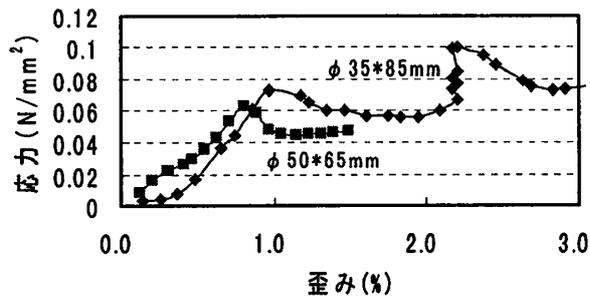


図-8 供試体 φ 35 と φ 50mm の割裂試験 (材齢 9 時間の場合)

4 実験結果と考察

4.1 三軸圧縮試験

図-9に、供試体の典型的な軸方向応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と歪みの関係を示す。曲線の形は、ピークを過ぎた後にほぼ一定の応力を保つようなタイプのひずみ軟化曲線である。この曲線の特徴づける値として、a)初期剛性、b)最大応力、c)最大応力時の歪み、d)残留応力の4つが考えられる。

まず、a)に関して、ヤング率を応力-歪み曲線から、最大応力の 1/3 の点と原点を結ぶ直線の勾配と定義する。d)に関して、土の三軸圧縮試験では、脆性度を $I_b = (\sigma_f - \sigma_r) / \sigma_f$ と定義している。ここで、 σ_f は最大応力、 σ_r は残留応力(歪みが 10%の時の値)を表す。

側圧をパラメータにした、ヤング率、最大応力、最大応力時の歪み、脆性度の関係を各材齢ごとに3個の供試体の平均値で図-10に示す。

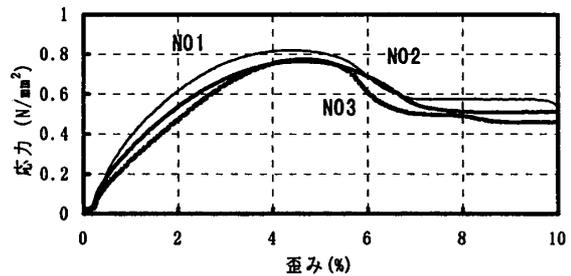
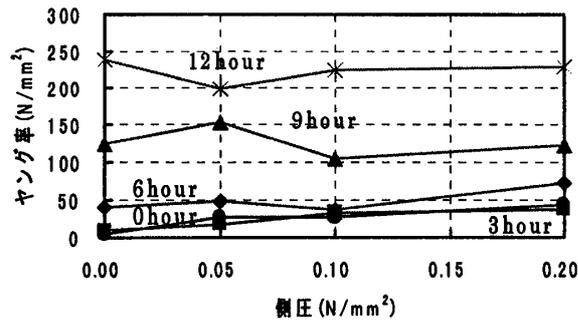


図-9 軸方向応力と歪みの関係 (材齢 6 時間、側圧 1.0)

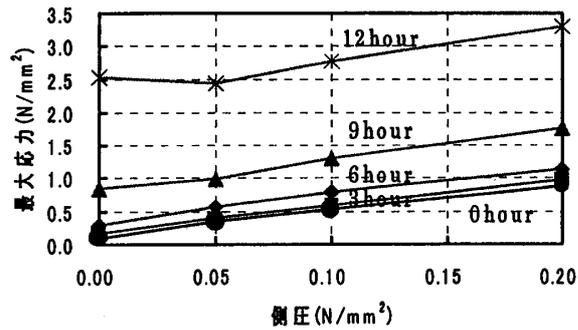
ヤング率と側圧の関係では、ヤング率の値にはあまり側圧の影響が見られなかった。

最大応力と側圧の関係では、右上がりの直線になった。最大応力時の歪みと側圧の関係では、側圧の増加につれて歪みが多少増加する傾向が見られた。脆性度と側圧の関係では、側圧の増加につれて脆性度が小さくなった。

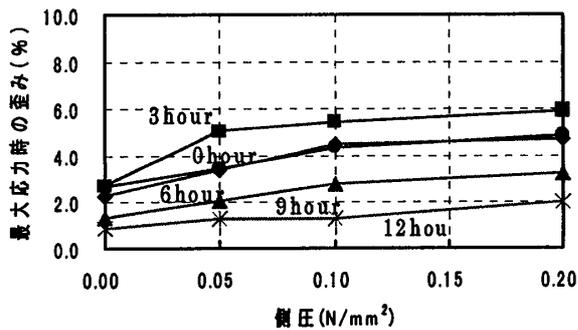
材齢をパラメータにした、3軸定数(内部摩擦角、粘着力)、脆性度、および、ヤング率の関係を表-2と図-11に示す。3軸定数は側圧と圧縮強さのデータの回帰直線から、勾配とy切片を求め、式(6)に代入して求めた。



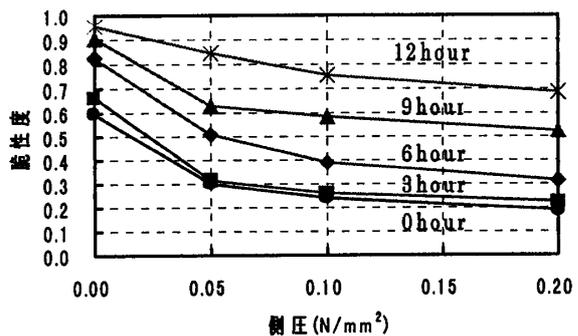
a) ヤング率と側圧の関係



b) 最大応力と側圧の関係



c) 最大応力時の歪みと側圧の関係

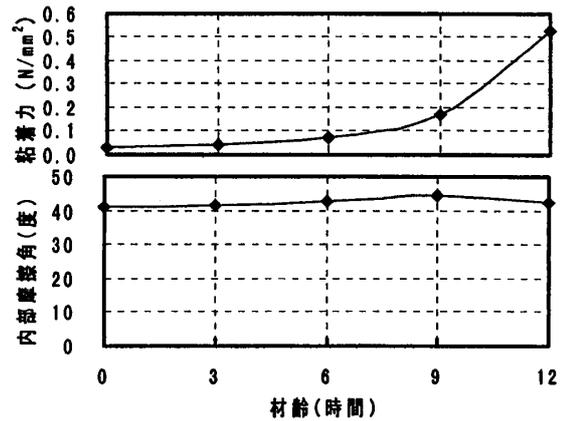


d) 脆性度と側圧の関係

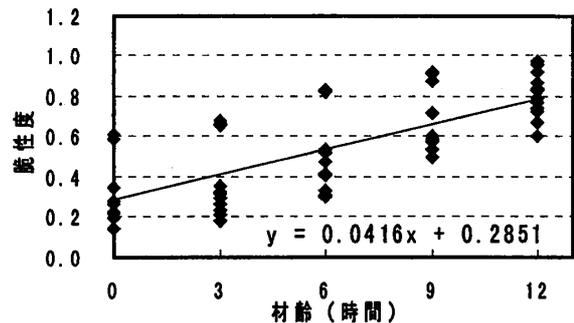
図一10 供試体の側圧とパラメータの関係

粘着力は材齢とともに増大する傾向が見られるが、内部摩擦角は材齢によらず、ほぼ42度で一定であった。

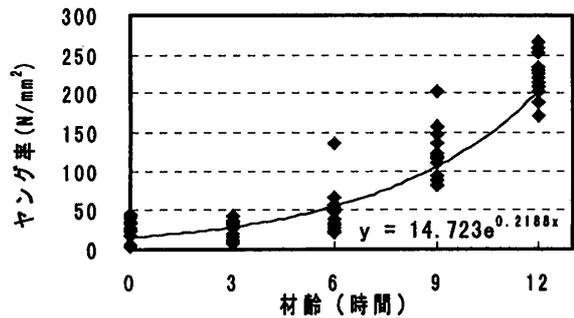
脆性度は材齢と共に直線的に増加し、ヤング率は指数的に増加した。



a) 内部摩擦角、粘着力と材齢の関係



b) 脆性度と材齢の関係



c) ヤング率と材齢の関係

図一11 材齢とパラメータの関係

表一2 三軸圧縮試験の試験結果

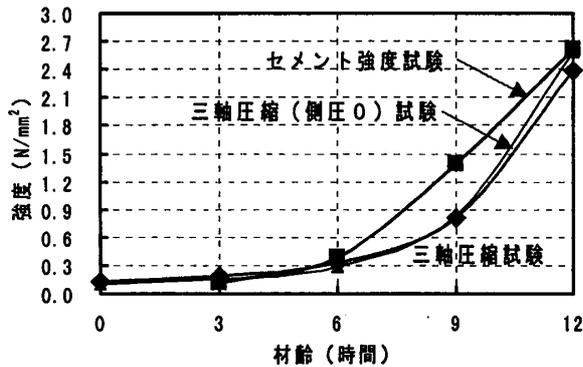
材齢 (時間)	y切片 (f_0)	傾き (m_0)	内部摩擦 (角度)	粘着力 (N/mm^2)
0	0.12	3.86	41.2	0.028
3	0.18	3.96	41.6	0.041
6	0.33	4.19	42.6	0.073
9	0.81	4.74	44.7	0.169
12	2.39	4.18	42.6	0.525

4.2 割裂試験, 直接引張試験, 曲げ試験 実験結果を表一3と図一12に示す。

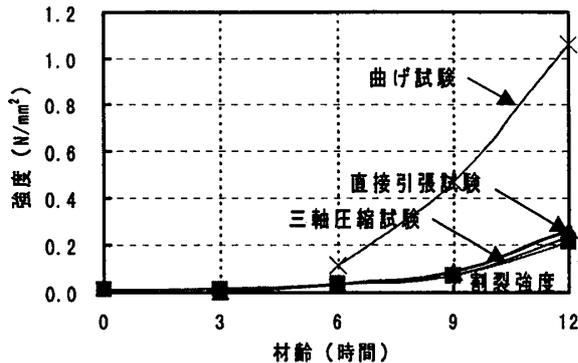
表一3と図一12から、割裂強度は三軸圧縮試験から推定した引張強度と一致し、笠井らの

表一三 各種試験方法による強度値

材齢 (時間)	三軸圧縮試験		セメント強度試験		割裂試験	直接引張
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	強度 (N/mm ²)	強度 (N/mm ²)
0	0.12	0.013	—	—	0.012	—
3	0.19	0.019	0.12	—	0.014	0.002
6	0.33	0.032	0.39	0.115	0.034	0.036
9	0.81	0.071	1.40	0.469	0.066	0.086
12	2.39	0.231	2.62	1.065	0.208	0.264



a) 圧縮強度の比較



b) 引張強度の比較

図一12 各種試験方法による強度の比較

若材齢における直接引張強度のデータ⁹⁾とほぼ一致している。

直接引張試験結果は、三軸圧縮試験で予測される値より多少大きくなった。この理由は、直接引張り試験の場合、測定完了までに約5分間を要し、その間の表面乾燥がモルタルの強度に影響したものと考えられる。

曲げ引張強度の値が他の引張強度試験結果とくらべ、大きな値を示しているが、このことは、セメント強度試験⁹⁾等でも圧縮強度と引張強度との比率が材齢とともに増大する傾向を示すことで一般的に知られているが、理由は良く分からない。

5. 結論

今回実験した材齢12時間以内の範囲で、以下のことが明らかになった。

1) 三軸圧縮試験の結果から得られる内部摩擦角は、材齢の影響が著しく小さく、ほぼ42度である。また、粘着力の値は材齢とともに著しく増大する。

2) 側圧が最大応力に及ぼす影響は、ほぼ直線的に増大する。また、側圧がヤング率の値に及ぼす影響は小さいが、脆性度に及ぼす影響は大きく、側圧の増大に伴い脆性度が低下する傾向が見られる。

3) 引張応力状態において修正したCoulombの降伏条件から予測される引張強度と圧縮強度の比率は約1/10であり、また、割裂強度や直接引張強度とよく一致する。

4) 曲げ引張強度と圧縮強度の比は約1/3であり、若材齢では曲げ引張強度が直接引張強度に比べ著しく高くなる傾向がある。

参考文献

- 1) N.J.Gardner: "Triaxial Behavior of Concrete", ACI, Vol.66, pp.136-146, No.2, 1969.2
- 2) 越川茂雄ほか: フレッシュコンクリートの三軸圧縮試験方法に関する研究, 土木学会フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1986
- 3) 土質工学会編: 土質試験法, 第6章, 1979.1
- 4) Commission 42-CEA, RILEM: Properties of Concrete at Early Ages (State-of-the-Art Report), Materials and structures, Vol.14, No.84, pp.399-450, Nov-Dec.1981
- 5) 笠井芳夫: コンクリートの初期引張強度に関する研究, コンクリートジャーナル, Vol.7, No.7, pp.1-10, 昭44.7
- 6) 社団法人セメント協会: セメント共同試験報告(95-OC) pp.18, 1995.3