

論文 高炉セメントを用いた若材齢コンクリートの引張強度とヤング係数

河本 健三*1・河野 博幸*2・三村 陽一*3・吉武 勇*4

要旨：高炉セメントはマスコンクリートの材料対策として、多くの土木構造物に使用されているが、これを用いたコンクリートにおいても初期ひび割れの発生がしばしば指摘されている。本研究は、割裂引張強度実験および一軸引張実験により、高炉セメントを用いた若材齢コンクリートの引張強度や引張ヤング係数を求めたものである。その結果、引張強度やヤング係数に関する既往の推定式を用いる場合、ひび割れ発生に対し危険側に評価する可能性がみられた。

キーワード：高炉セメント，引張強度，引張ヤング係数

1. はじめに

高炉セメントはマスコンクリートの材料対策として、多くの土木構造物に使用されている。しかしながら、これを用いたコンクリートにおいて、初期ひび割れの発生がしばしば指摘されている。初期ひび割れの制御・防止は、コンクリート構造物の耐久性向上に必要不可欠な命題である。したがって、コンクリートに作用する引張応力や、ひび割れ発生の可能性などを施工の事前に推定し、対策を施すことが重要となる。特に若材齢期におけるコンクリートは、強度が未だ充分に発現していないため、ひび割れに対する抵抗性が比較的低い。

コンクリートのひび割れは、引張強度を引張応力が越える際に生じるものであり、初期ひび割れ(幅)を精度よく推定するためには、若材齢コンクリートの引張強度および引張応力の評価が必要となる。一般的にコンクリートの圧縮強度は、セメント水比(C/W)と比例関係にあるとして $f_c' = a + b \cdot C/W$ という式で表されている。しかしながら、ひび割れ発生に直接関与する引張強度は、圧縮強度との関係式を介した推定がなされているにすぎない。コンクリートの引張

強度と材料物性値との直接的な関係式は、ほとんど提案されていないのが実状である。

また、コンクリートのヤング係数も、一般に圧縮強度との関係式¹⁾により推定されている。さらに、引張応力の推定に直接関与する引張ヤング係数は、比較的容易に求めることができる圧縮ヤング係数と同等とされているのが実状である。しかしながら、コンクリートはセメントペーストや細・粗骨材などから形成される複合材料であるため、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数は、必ずしも同等とは限らないものと推察される。

そこで本研究では、高炉セメントを用いたコンクリートの引張強度および引張ヤング係数の経時変化を求めるべく、割裂引張強度実験と一

表-1 使用材料

種類	材料名	(表乾)密度
セメント C	高炉セメント B 種	3.04g/cm ³
水 W	上水道水	—
細骨材 S1	海砂	2.56g/cm ³
細骨材 S2	砕砂	2.66g/cm ³
粗骨材 G1	碎石 1505	2.73g/cm ³
粗骨材 G2	碎石 2015	2.74g/cm ³
混和剤 Ad	AE 減水剤	1.08g/cm ³

*1 (株)日本ピーエス 修(工) (正会員)

*2 山口小野田レミコン(株) 小野田工場長 (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科設計工学専攻 修(工) (正会員)

*4 山口大学大学院 理工学研究科助教授 博(工) (正会員)

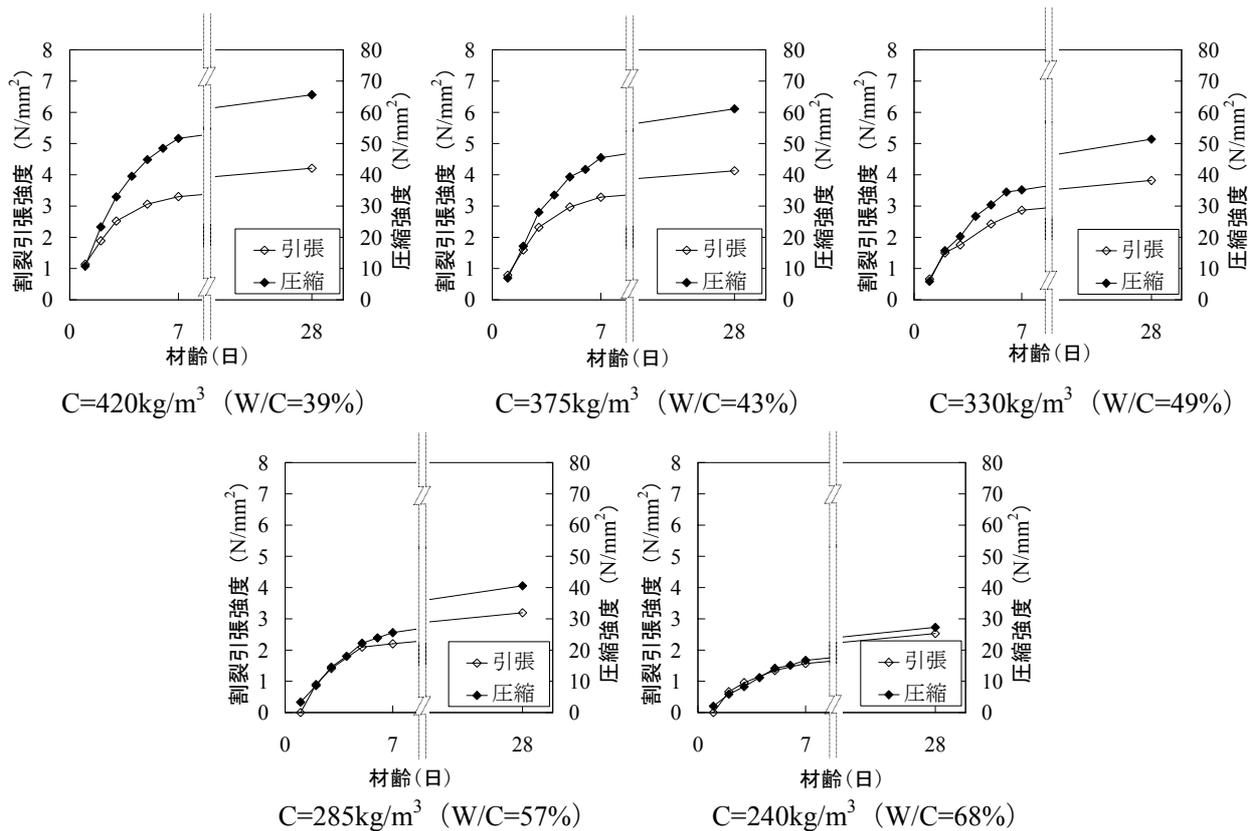


図-1 各配合における割裂引張強度・圧縮強度の経時変化

軸引張実験を行った。

2. 割裂引張強度

2.1 実験項目

本研究に用いた使用材料を表-1に示す。本研究では、表-2に示す配合条件のように、単位水量(W)を一定として、単位セメント量(C)を240~420kg/m³とした5水準のコンクリートを作製した。なお、この実験ではφ100×200mmの円柱供試体を用いた。

本研究における引張強度は、割裂引張強度試験(JIS A 1113)に準じ、材齢1,2,3,5,7,28日において供試体5体ずつ実験を行い、その最大・最小値を除く3体の平均値から求めた。また比較用として、各材齢における圧縮強度を、圧縮強度試験(JIS A 1109)に基づき、各材齢3本の供試体の平均値から求めた。なお、供試体は20℃の室内で作製し、材齢1日で脱型後、標準水中養生を施した。

表-2 配合条件 (kg/m³)

W/C	C	W	細骨材		粗骨材		混和剤
			S1	S2	G1	G2	Ad
39%	420	163	482	321	476	475	2.10
43%	375		498	332	482	482	2.03
49%	330		517	344	486	486	1.82
57%	285		542	362	484	484	1.62
68%	240		594	396	459	459	1.56

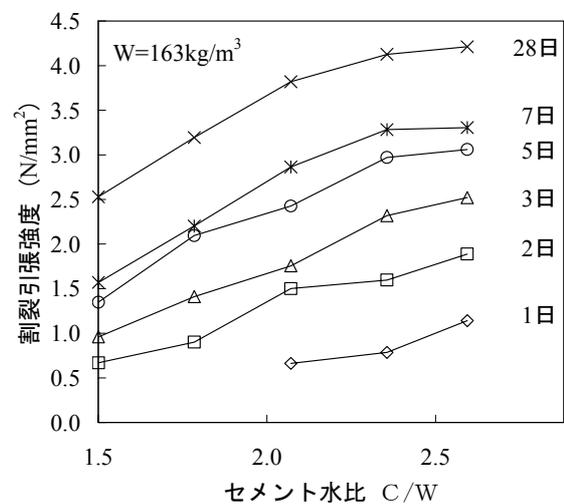


図-2 割裂引張強度-セメント水比

2.2 引張強度と圧縮強度の比較

各単位セメント量における割裂引張強度と圧縮強度の経時変化を図-1に示す。図-1より、材齢が進行するとともに、割裂引張強度と圧縮強度の差が大きくなっていることがわかる。このような傾向は、単位セメント量が多いほど顕著である。これは、引張強度と圧縮強度では強度発現特性が異なることを示している。このことは、若材齢コンクリートの引張強度が圧縮強度との関係式によって一義的に定まらないことを示している。したがって、より合理的な配合設計を行うためには、材料物性や配合から引張強度を評価できる推定式を求める必要があると考えられる。

2.3 引張強度に対するC/Wの影響

引張強度とセメント水比(C/W)の関係を図-2に示す。図-2より、セメント水比(C/W)の増加とともに、圧縮強度と同様に引張強度も増加する傾向にある。しかしながら、その増加傾向は徐々に緩やかになり、 $f_t' = a + b \cdot C/W$ で表される圧縮強度のような比例関係にはならない。

2.4 既往の推定式との比較

高炉セメントを用いた若材齢コンクリートの割裂引張強度の実験結果とコンクリート標準示方書^{1),2)}(以下、RC示方書)に示される式を用いた推定値との比較を行った(図-3参照)。なお、評価に用いた推定式を式(1)、(2)に示す。

$$f_t'(t) = 0.44 \sqrt{f_c'(t)} \quad (1)$$

$$f_t' = 0.23 f_c'^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 f_t' : 引張強度(N/mm²)、 f_c' : 圧縮強度(N/mm²)、 t : 有効材齢(日)を表す。

式(1)は、温度応力解析などに用いられ、材齢の進行に伴う強度発現が考慮されたものであり、若材齢期における推定精度を重視している。一方、式(2)は、十分に水和したコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係を表したものである。

図-3に示すように、式(1)による推定値と実験値の比(実験値/推定値)は、材齢7日までほとんどが1を下回っている。したがって、一般

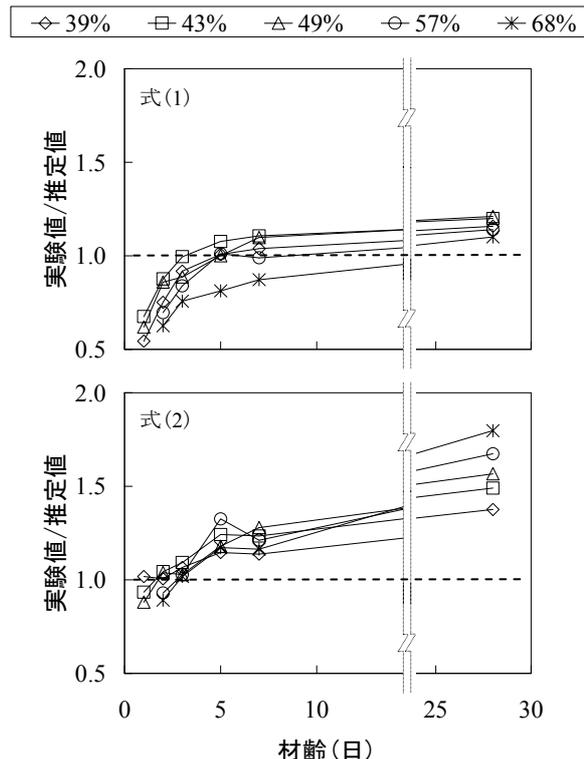


図-3 各推定式との比較

に(有効)材齢5日程度以降において生じる初期ひび割れを予測する場合、式(1)の有用性が窺えるが、材齢5日程度以内において式(1)の推定値が、引張強度を過大評価している可能性を留意する必要がある。また、式(2)を用いた引張強度の推定では、材齢1~3日において一部過大評価しているものの、式(1)に比べると安全側の指標となっている。しかしながら、式(1)、式(2)ともに材齢5日程度以内における推定精度が充分とはいえず、合理的な設計を行うには、セメント種類や配合に加え、材齢を考慮できる引張強度推定式が必要と考えられる。

3. 引張ヤング係数³⁾

3.1 実験条件

本研究では、引張ヤング係数を求めるため、一軸引張実験を行った。本実験では、図-4に示すドッグボーン供試体を用いた。ドッグボーン供試体における引張応力作用部の寸法は、 $\phi 75 \times 120$ mmである。供試体内部にはエポキシ樹脂により保護コーティングを施した電気抵抗式ひずみゲージ(図-5)を埋設した。ここで、

エポキシ樹脂のヤング係数は 2.8kN/mm^2 とコンクリートのヤング係数に比して極めて小さいことから、エポキシ樹脂によるひずみゲージのコーティングが、計測するひずみにおよぼす影響は小さいと考えられる。

本研究におけるコンクリートの配合(設計基準強度 24N/mm^2)を表-3に示す。供試体作製に使用した材料は、高炉セメントB種(密度 3.05g/cm^3)、海砂(表乾密度 2.60g/cm^3)、および砕石1505(表乾密度 2.71g/cm^3)である。さらにAE減水剤(密度 1.08g/cm^3)をセメント質量の1%として添加した。

3.2 実験項目

コンクリートのヤング係数の経時変化は、コンクリート中のモルタル(セメントペースト)のヤング係数の経時変化に起因するものである。そこで本研究では、コンクリート中におけるモルタルマトリックスのヤング係数の経時変化を求めるため、コンクリート供試体に加えモルタル供試体も作製し、引張ヤング係数を求めた。モルタル供試体には、表-3に示す配合のコンクリートを作製した後、ウェットスクリーニングを施したモルタルを使用した。

また、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の比較を行うため、円柱供試体(コンクリート： $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、モルタル： $\phi 50 \times 100\text{mm}$)も併せて作製し、圧縮ヤング係数を求めた。引張ヤング係数は各2体、圧縮ヤング係数は各3体の実験結果の平均値から求めた。いずれの実験も材齢2,3,7日にて行った。なお、各供試体は打設後、ただちに恒温槽(20°C)で養生した。

3.3 実験方法

本研究の一軸引張実験では、図-6に示す2重レバー式の荷荷装置を用い、モルタルおよびコンクリートの引張ヤング係数を求めた。

本研究における荷荷は、ひずみ制御にて行い、クリープなどの非弾性ひずみの影響を小さくするため、荷荷・除荷を繰り返しながら、ひずみ 10×10^{-6} を目安に増加させた。なお、荷荷・除荷のサイクルは、同一のひずみレベルにて2

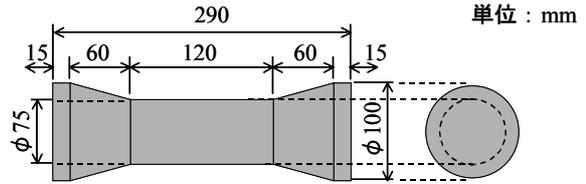


図-4 ドッグボーン供試体概略図

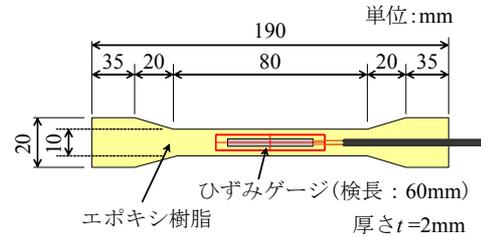


図-5 エポキシ樹脂保護ひずみゲージ

表-3 配合条件

水セメント比 W/C		57%
細骨材率 s/a		46.2%
単位量 (kg/m^3)	水 W	165
	セメント C	290
	細骨材 S	812
	粗骨材 G	1030
混和剤 Ad		2.9

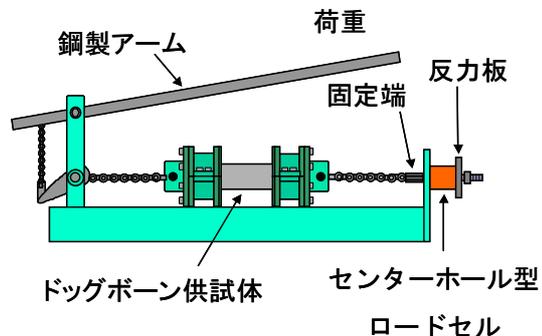


図-6 2重レバー式荷荷装置

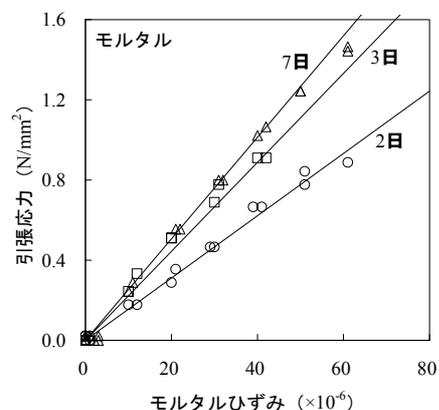


図-7 引張応力-ひずみ関係(モルタル)

回ずつ行った。非弾性ひずみの影響を小さくするため、前述の載荷方法としたことから、本研究における引張ヤング係数は、各サイクルの除荷前後における引張応力-ひずみ関係の傾きを求め、その平均とした。また、比較用として求めた圧縮ヤング係数は、JIS A 1149 に規定される、最大応力の 1/3 の点とひずみ 50×10^{-6} の点を結ぶ割線ヤング係数である。

3.4 引張応力-ひずみ関係

材齢 2,3,7 日におけるモルタルの引張応力-ひずみ関係の一例を図-7 に示す。図-7 より、モルタルの引張応力-ひずみ関係は、概ね線形関係にあり、材齢が進行するにつれて回帰直線の傾き(引張ヤング係数)が大きくなっていることがわかる。また、いずれの実験においても除荷時の残留ひずみはほとんど生じず、線形弾性的なひずみ挙動を示した。コンクリートの引張応力-ひずみ関係も、ひずみの増加にともない引張ヤング係数が若干小さくなる傾向にあったが、モルタル同様に線形弾性的なひずみ挙動を示した。

3.5 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数

引張および圧縮ヤング係数の実験結果を表-4 に示す。また、材齢 7 日のヤング係数に対する各材齢 X 日(2,3,7 日)における引張ヤング係数の比を図-8 に示す。

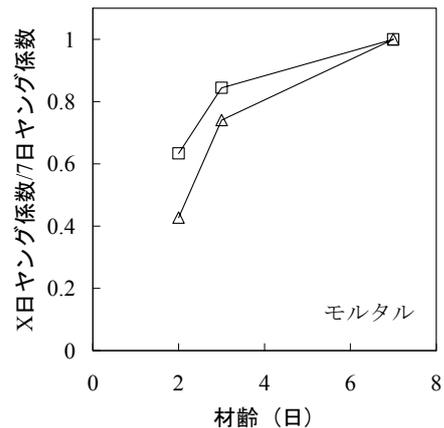
図-8 a) より、モルタルでは材齢 2 日において、圧縮ヤング係数に比べ引張ヤング係数の発現が早いことがわかる。また、図-8 b) より、コンクリートにおいてもモルタルほど顕著な傾向ではないが、引張ヤング係数の発現が、圧縮ヤング係数に比べて早いことがわかる。

圧縮ヤング係数に対する引張ヤング係数の比を図-9 に示す。図-9 より、材齢 7 日では引張ヤング係数と圧縮ヤング係数が同程度であることがわかる。しかしながら、材齢が早期であるほど圧縮ヤング係数に比べ引張ヤング係数が大きくなる傾向にある。また、このような傾向はモルタルにおいて顕著である。本実験で作製したコンクリート中におけるモルタル

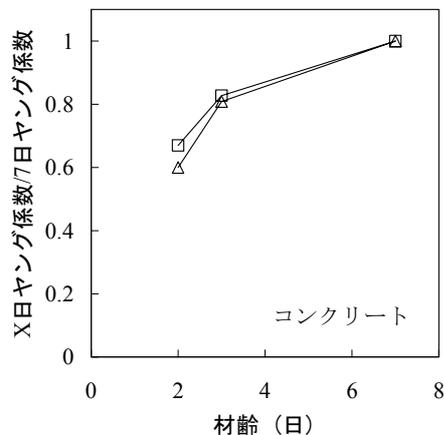
表-4 ヤング係数実験結果

材齢 (日)		ヤング係数 (kN/mm ²)					
		2		3		7	
モルタル	引張	15.5	10.4	20.7	18.9	24.5	20.4
	圧縮	10.4		18.1		24.5	
コンクリート	引張	16.8	12.4	20.7	14.4	25.0	19.5
	圧縮	14.8		20.0		24.7	

△ 圧縮ヤング係数 □ 引張ヤング係数



a) モルタル



b) コンクリート

図-8 材齢 7 日に対するヤング係数比

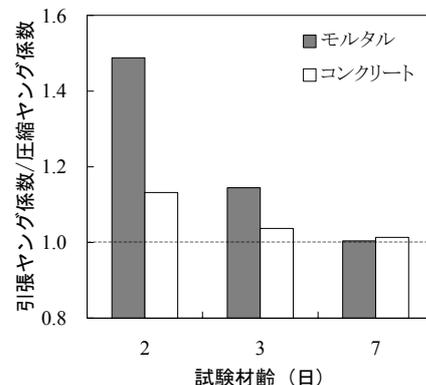


図-9 引張ヤング係数/圧縮ヤング係数

の容積率は60%程度であり、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の差異が、モルタル単身に比べ小さくなったと考えられる。

3.6 推定式との比較

ここで、RC示方書¹⁾に示される、圧縮強度をパラメータとしたヤング係数推定式を式(3)に示す。但し、クリープ等を考慮した低減係数を除いて式(3)に示している。

$$E(t) = 4700\sqrt{f_c'(t)} \quad (3)$$

ここで、 $E(t)$ ：材齢 t 日におけるヤング係数 (N/mm^2)、 $f_c'(t)$ ：材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm^2) を表す。

式(3)によるヤング係数の推定値に対する実験値(実験値/推定値)の材齢変化を図-10に示す。図-10より、圧縮ヤング係数に比べ引張ヤング係数では、実験値/推定値が大きく、特に材齢が早期であるほど、その傾向が著しい。これは、引張ヤング係数が圧縮ヤング係数に比べ発現が早いからである。このことは、ひずみにヤング係数を乗じて引張応力を算定する場合、実際に生じる引張応力を過小評価する可能性も考えられ、ひび割れ発生に対して危険側の評価を行う可能性を示している。

4. まとめ

本研究では、高炉セメントを用いた若材齢コンクリートの引張強度と引張ヤング係数を求めるため、主に材齢を実験パラメータとした割裂引張強度実験および一軸引張実験を行った。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 単位セメント量が多いほど材齢進行に応じて割裂引張強度と圧縮強度の差が大きくなる。
- (2) RC示方書[施工編]の推定式では、若材齢期において引張強度を過大評価する可能性が認められた。
- (3) 引張ヤング係数は、圧縮ヤング係数に比べて発現が早く、特にモルタルにおいてその

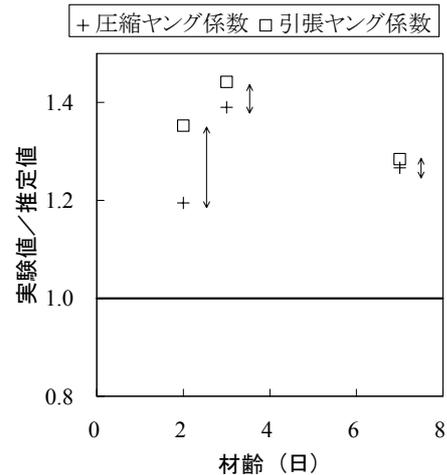


図-10 推定値に対する実験値(実験値/推定値)

傾向が著しい。

- (4) 圧縮ヤング係数に立脚した、RC示方書[施工編]の推定式では、引張応力を過小評価する可能性がある。

本稿は、高炉セメントを使用したコンクリートの強度およびヤング係数の経時変化について、主に報告したものである。セメントなどの使用材料、配合条件および材齢などをパラメータとした引張強度・引張ヤング係数の推定式を構築するためには、さらなる実験結果の集積が必要である。

【参考文献】

- 1) (社)土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3.
- 2) (社)土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002.3.
- 3) 三村陽一，吉武 勇，河野博幸，浜田純夫：若材齢コンクリートの引張ヤング係数に関する実験的検討，マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム，pp.1-6，2005.8.