

論文 高強度コンクリートの材料特性および破壊エネルギーに関する研究

松元 香保里^{*1}・藤田 学^{*2}・高木 康宏^{*3}・河上 浩司^{*3}

要旨：圧縮強度 $35 \sim 145 \text{N/mm}^2$ のコンクリートに関する材料試験および破壊エネルギー試験を行った。その結果、圧縮強度と引張強度またはヤング係数の関係は、従来の提案式でも評価できることが確認された。破壊エネルギーと圧縮強度の相関は、圧縮強度 80N/mm^2 を境に相違が認められたが、特性長さは普通強度から高強度まで圧縮強度と良い相関を示した。また、曲げ強度は内田らの推定式と良い整合を示した。

キーワード：高強度コンクリート、破壊エネルギー、特性長さ

1. はじめに

前報¹⁾では、破壊エネルギーを用いて圧縮強度 $36 \sim 100 \text{N/mm}^2$ のせん断補強筋のない RC はり部材の斜めひび割れ発生時の公称せん断応力度（以下、せん断強度）の寸法効果に関する検討を行った。その結果、せん断強度 τ_c と引張強度 f_t の比 τ_c/f_t と、有効高さ d と Hillerborg らにより提案されている特性長さ l_{ch} ²⁾ の比 d/l_{ch} は高い相関を示し、せん断強度の寸法効果の評価における破壊力学の適用の有効性が確認された。

しかしながら、圧縮強度 100N/mm^2 を超える超高強度コンクリート³⁾の材料特性、とりわけ破壊エネルギーに関するデータは皆無に等しい。超高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果を検討するにあたり、その材料特性を十分に把握することは不可欠である。特に、超高強度コンクリートの材料特性は、粗骨材強度など材料の影響を大きく受けると考えられ、より精度良くその特性を把握するためには、同一機関による同一条件下での実験が好ましいと考えられる。よって、圧縮強度 $35 \sim 145 \text{N/mm}^2$ をパラメータとした材料試験および破壊エネルギー試験を実施し、圧縮強度と各種材料特性の関係について調べた。

2. 試験概要

本研究では、破壊エネルギー試験および、材料試験として圧縮強度試験、割裂引張強度試験、および静弾性係数試験を実施した。破壊エネルギー試験は、(社)日本コンクリート工学協会「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会」により提案された「ブレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」⁴⁾（以下、試験法案）に準じて実施した。

2.1 試験水準

本試験は圧縮強度をパラメータとして行った。試験は2つのシリーズから成る。Series-A は普通強度から高強度のコンクリートを対象としている。試験ケースの L, M, U は圧縮強度のパラメータを示し、各ケースの配合強度は 36, 60, 100N/mm^2 である。Series-B は高強度から超高強度のコンクリートを対象とし、各ケースの配合強度は 80, 100, 120, 140, 160N/mm^2 である。異なるケースでも、同一配合のコンクリートは同一バッチとした。試験水準を表-1 に示す。

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-2 に示す。高強度および超高強度コンクリートの製造には、シリカフュームおよび高性能 AE 減水剤を用いた。超高強度コンクリートが中心となる Series-B では、水和発熱

*1 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 住友建設(株) 技術研究所主任研究員 工修 (正会員)

*3 住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

表-1 試験水準とコンクリートの配合

Series	CASE	養生条件	配合強度 (N/mm ²)	スランブ値 (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
								水 W	B		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 × B (%)	消泡剤 × B (%)
									セメント C	シリカフューム SF				
A	L-36	気中	36	7.5	3.7	565	47.9	162	287	0	881	962	1.1	0.009
	L-36-S	水中	36											
	M-60	気中	60	8.5	2.2	35.0	46.1	165	472	0	804	944	1.3	0.0
	M-60-S	水中	60											
	U-100	気中	100	4.5	2.3	21.0	42.2	160	686	76	667	917	1.6	0.0
	U-100-S	水中	100											
B	H-80	水中	80	50.0	1.2	30.0	52.8	150	450	50	907	842	1.2	0.015
	H-100	水中	100	64.0	2.1	25.0	50.4	150	540	60	824	842	1.4	0.012
	H-120	水中	120	61.0	2.0	20.0	46.3	150	675	75	699	842	1.7	0.012
	H-140	水中	140	69.0	1.4	16.7	41.5	150	810	90	575	842	2.1	0.012
	H-160	水中	160	58.5	1.8	14.3	35.7	150	945	105	450	842	2.4	0.012

注) Series-B のスランブ値はフロー値を表す。

表-2 使用材料

材 料	Series-A	Series-B
セメント	普通ポルトランドセメント	低熱ポルトランドセメント
細 骨 材	川砂 表乾比重：2.62 吸水率：1.65%	川砂 表乾比重：2.58 吸水率：2.68%
粗 骨 材	碎石 表乾比重：2.63 吸水率：1.59%	碎石 表乾比重：2.67 吸水率：0.97%

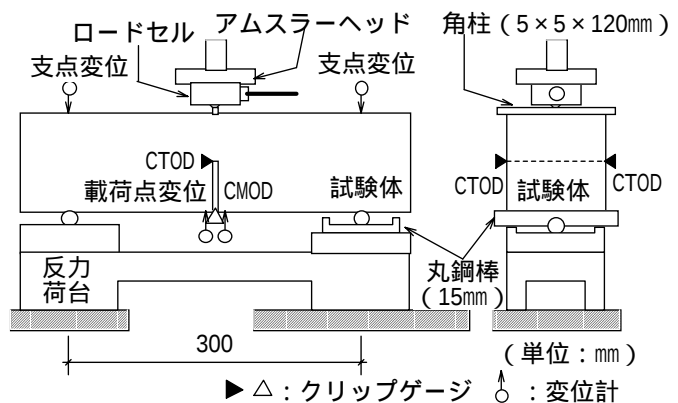


図-1 載荷装置および計測位置

を抑制するため低熱ポルトランドセメントを使用した。各ケースの配合を表-1 に示す。

2.3 破壊エネルギー試験方法⁴⁾

本試験は切欠きはりの3点曲げ試験により荷重-ひび割れ開口変位および破壊エネルギーを求めるものである。試験時の材齢は28日、各ケースの試験体数は5以上である。

(1) 試験体

試験法案に準拠し、試験体寸法は100mm x 100mm x 400mm、試験体中央の切欠き深さは50mmとした。切欠き幅は約4mmであった。

(2) 試験方法

本試験は載荷スパン300mmとし、294kNアムスラーで手動による荷重制御で実施した。載荷装置は両支点下にローラーを配置し、水平方向に可動な構造とすると共に、支点の一方は試験体の軸方向にも回転できる構造とした。

計測項目は載荷荷重、ひび割れ開口変位 (CMOD)、切欠き先端開口変位 (CTOD)、載

荷点および支点の鉛直変位とした。載荷装置および計測位置を図-1 に示す。

(3) 破壊エネルギーの評価方法

破壊エネルギー G_f は次式により求めた⁴⁾。

$$G_f = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75(S/L \cdot m_1 + 2m_2) \cdot CMOD_c$$

ここに、 W_0 ：破断までの荷重-CMOD 曲線下の面積、 W_1 ：試験体自重と載荷治具がなす仕事、 A_{lig} ：リガメント面積、 m_1 ：試験体重量、 S ：載荷スパン、 L ：試験体の全長、 m_2 ：試験体に載る治具の重量、 $CMOD_c$ ：破断時のひび割れ開口変位、とする。

また、特性長さ l_{ch} は次式より求めた²⁾。

$$l_{ch} = E_c \cdot G_f / f_t^2 \quad (2)$$

ここに、 E_c ：ヤング係数、 f_t ：引張強度、とする。

表-3 コンクリートの力学特性

CASE		圧縮強度 f'_c	引張強度 f_t	ヤング係数 E_c	ポアソン比 ν
		N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	—
A	L-36	35.1	2.87	29.0	0.175
	L-36-S	43.0	3.90	30.0	0.189
	M-60	50.2	4.19	32.1	0.182
	M-60-S	88.0	5.09	31.1	0.223
	U-100	85.6	5.47	37.2	0.182
	U-100-S	101.0	7.06	40.9	0.208
B	H-80	91.9	5.61	39.6	0.221
	H-100	102.4	6.68	40.7	0.216
	H-120	127.8	7.07	42.9	0.224
	H-140	138.9	8.52	47.1	0.225
	H-160	145.8	7.13	47.0	0.204

3. 材料特性

破壊エネルギー試験時(材齢 28 日)におけるコンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。著者らが実施した既往の材料試験結果¹⁾を追加し、超高強度コンクリートの材料特性について検討した。なお、既往の試験の使用材料は Series-A に、その配合は $f'_c < 50\text{N/mm}^2$ では L-36, $50\text{N/mm}^2 < f'_c < 70\text{N/mm}^2$ では M-60, $f'_c \geq 70\text{N/mm}^2$ では U-100 に一致し、養生条件は気中養生である。

3.1 引張強度

圧縮強度と引張強度の関係を図-2 に示す。図中には、コンクリート標準示方書[設計編]⁵⁾(以下、示方書)の式を示した。示方書では、圧縮強度 80N/mm^2 程度の高強度コンクリートに対しても式は適用可能であることが記されている。図-2 によれば、圧縮強度 100N/mm^2 以上では引張強度はほぼ頭打ちとなる傾向が認められるものの、圧縮強度 145N/mm^2 以下のコンクリートに関しても示方書式で概ね評価できた。

3.2 ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-3 に示す。図中には、高強度コンクリート設計施工指針(案)⁶⁾(以下、高強度指針)の標準値、および以下の既往の提案式を示した。友澤らの式⁷⁾

$$E_c = 9.2 \cdot (100 f'_c / 9.8)^{0.3} \cdot (\gamma / 1000)^2 \cdot 9.8 / 100$$

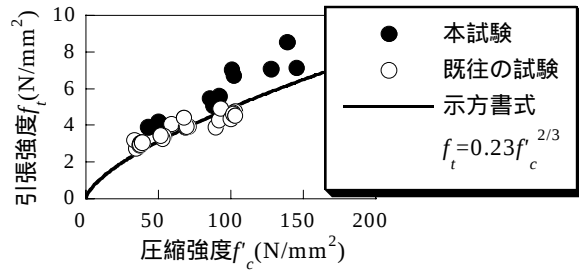


図-2 圧縮強度と引張強度の関係

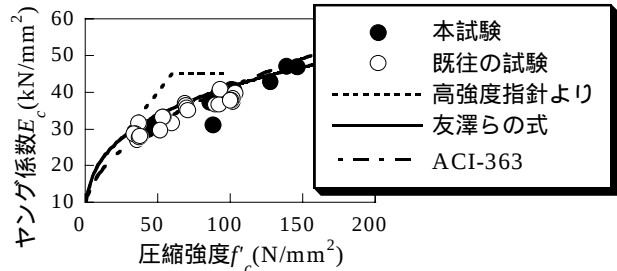


図-3 圧縮強度とヤング係数

ACI-363⁸⁾

$$E_c = (10.6 \sqrt{100 f'_c / 9.8} + 70.3) \cdot (\gamma / 2346)^{1.5} \cdot 9.8 / 100$$

ここに、 γ ：コンクリートの密度 ($=2400\text{kg/m}^3$) とした。

図-3 より、本研究の範囲内では、高強度指針の標準値は圧縮強度 40N/mm^2 を超える場合にはヤング係数を過大評価し、一方、友澤らの式および ACI-363 の提案式は、普通強度から超高強度のコンクリートまで、ヤング係数を比較的精度良く推定できた。

以上より、限られた材料およびデータの範囲内ではあるが、超高強度コンクリートの力学特性は、既往の規準式や提案式を適切に選択することで評価可能であることが確認された。

4. 破壊エネルギー試験結果

4.1 荷重-CMOD 曲線

試験結果例として荷重-CMOD 曲線を図-4 に示す。図-4 より、圧縮強度の増大に伴い最大荷重以降の荷重低下の勾配は大きくなる傾向が認められる。これを定量的に評価するため、圧縮強度とひびわれ開口変位の関係を図-5 に示した。荷重低下域における最大荷重の $1/2$, $1/3$,

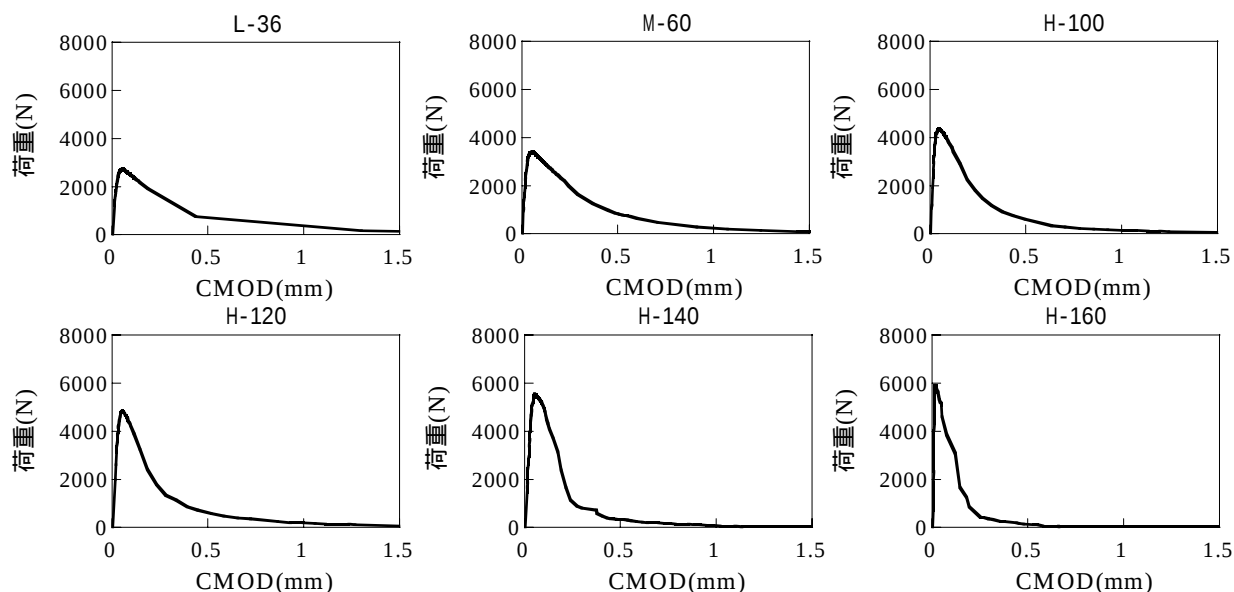


図-4 荷重-CMOD 曲線

1/4 のひびわれ開口変位について，各ケースの平均値を示している．これより，圧縮強度が高いケースほど各荷重レベルにおけるひびわれ開口変位は小さく，荷重レベル間のひびわれ開口変位の差も小さい．すなわち，ひびわれの開口が進行しないうちに荷重は急激に低下し，脆性的な破壊に至るといえる．また，破壊後の試験体破断面の観察から，L-36 のケースでは粗骨材の破壊はほとんどなかったが，圧縮強度の増大に伴い粗骨材の破壊する確率が高くなる傾向が認められた．特に，H-120 以上の圧縮強度を有するケースでは，破断面のほとんどの粗骨材に破壊が認められた．即ち，圧縮強度が高いほど脆性的な破壊性状を示す傾向にあった．

4.2 破壊エネルギーと特性長さ

式(1),(2)より破壊エネルギーおよび特性長さを求めた．各ケースの平均値をそのケースにおける試験結果とし，これらの一覧を表-4 に，圧縮強度と破壊エネルギーの関係を図-6 に，圧縮強度と特性長さの関係を図-7 に示す．

図-6 中の破線および一点鎖線は，CEB-FIP モデルコード 90⁹⁾で示されている粗骨材の最大寸法 d_{max} と圧縮強度による破壊エネルギーの関係式を表している．ただし，この関係式の適用範囲は圧縮強度 80N/mm^2 以下とされている．図-6 から明らかなように，試験結果は CEB-FIP の関

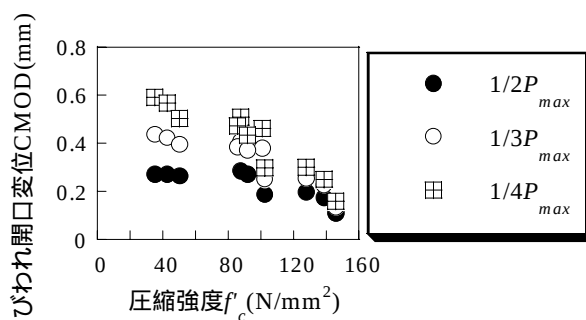


図-5 圧縮強度とひびわれ開口変位の関係

係式とあまり一致しない．試験結果の破壊エネルギーと圧縮強度の関係は，圧縮強度 80N/mm^2 を境に大きく変化している．すなわち，圧縮強度 80N/mm^2 以下では圧縮強度の増大に伴い破壊エネルギーは増加するのに対し， 80N/mm^2 を超える範囲では，圧縮強度の増大に伴い破壊エネルギーは減少している．破壊エネルギーと圧縮強度の関係におけるこの変化点は，CEB-FIP の関係式の適用限界と一致を見せる．

一方，圧縮強度と特性長さの関係は上記と異なる傾向を呈した．圧縮強度と特性長さの関係を図-7 に示す．特性長さは圧縮強度の増大に伴い減少し，普通強度から超高強度領域のコンクリートまで同様の相関を有した．図-7 の破線は，全ケースに対応する以下の回帰式を示す．

$$l_{ch} = 30700 f'_c{}^{-1.1} \quad (3)$$

表-4 破壊エネルギー試験結果

CASE	$G_f(\text{N/mm})$	$l_{ch}(\text{mm})$
A	L-36	0.188
	L-36-S	0.196
	M-60	0.200
	M-60-S	0.201
	U-100	0.218
	U-100-S	0.183
B	H-80	0.201
	H-100	0.170
	H-120	0.184
	H-140	0.174
	H-160	0.125

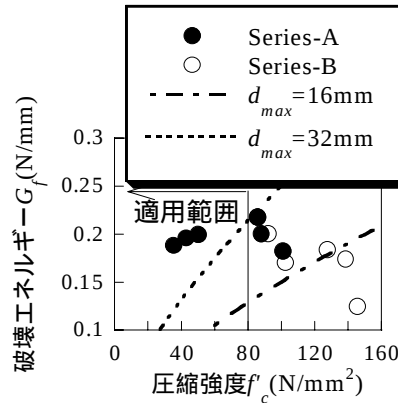


図-6 圧縮強度と破壊エネルギーの関係

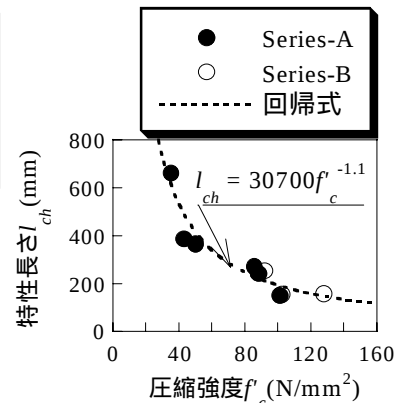


図-7 圧縮強度と特性長さの関係

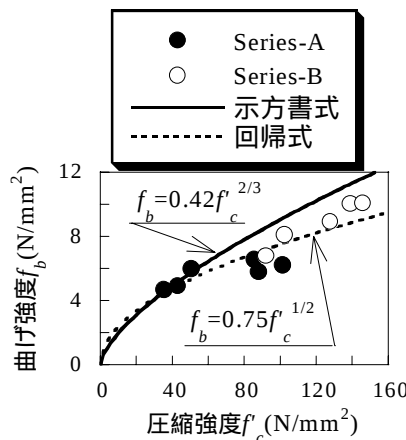


図-8 圧縮強度と曲げ強度の関係

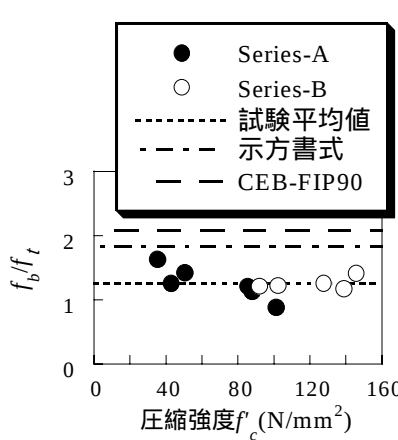


図-9 圧縮強度と f_b/f_t の関係

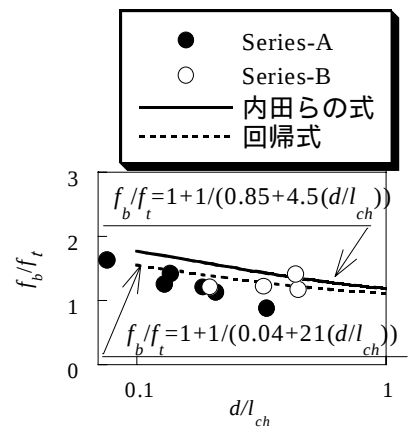


図-10 曲げ強度の推定式との比較

この相関係数は 0.96 と非常に高い。コンクリートの力学特性を破壊力学により検討する場合、特性長さは圧縮強度と一意的な関係で表すことができ、さらに相関性も高く、非常に有効なパラメータとなりうると考えられる。

4.3 曲げ強度の評価

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-8 に示す。図中には示方書の圧縮強度と曲げ強度の関係式⁵⁾を実線で記した。示方書が対象とする普通強度コンクリートでは試験値と示方書式は良く一致している。しかし、圧縮強度 80N/mm^2 を超える高強度コンクリートの曲げ強度に対して、示方書式は過大評価となった。なお、図中には高強度コンクリートを含む全データを対象とした回帰式を破線で記した。データ数は 11 と少ないが、相関係数は 0.9 と非常に高い相関を示した。

圧縮強度と曲げ強度と引張強度の比 f_b/f_t の関

係を図-9 に示す。試験値は $f_b/f_t=1.26$ のほぼ一定値を示す。一方、圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係がともに示方書の式で評価できると仮定すると、 f_b/f_t は以下の一定値となる。

$$\frac{f_b}{f_t} = \frac{0.42 f'_c^{2/3}}{0.23 f'_c^{2/3}} = 1.83$$

試験値はこの値に比べて小さい。この原因として、曲げ強度には寸法依存性があり、示方書式ではこれが考慮されていないことが考えられる。

一方、図-9 には次式の CEB-FIP モデルコード 90⁹⁾による値を記した。

$$\frac{f_b}{f_t} = \frac{1+1.5(d/d_0)^{0.7}}{1.5(d/d_0)^{0.7}} = 2.08 \quad (4)$$

ここに、 d :はりの高さ(=50mm)、 d_0 :100mm、とする。この式は寸法効果が考慮されているものの、試験値はこれに対しても小さい結果を与え

た．式(4)は簡便ではあるが，はりの高さしか考慮されていない．そこで，より精度の高い曲げ強度の推定式といわれる以下の内田らの式¹⁰⁾と比較を行う．

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(d/l_{ch})} \quad (5)$$

$$; (d/l_{ch}) \geq 0.1$$

式(5)との比較を図-10 に示す．図中の破線は式(5)に従い係数を決定した回帰式を表す．なお，試験値の評価における特性長さには，本研究の結果を適用した．式(5)は示方書および CEB-FIP モデルコード 90 の関係式に比べると，普通強度から超高強度領域のコンクリートまで，試験値との整合性が非常に高い．このことは，曲げ強度を始めとする引張応力下における強度の寸法効果を検討する上で，特性長さは有効なパラメータとなることを示していると考えられる．

5. まとめ

圧縮強度 35～145N/mm² のコンクリートを対象として材料試験および破壊エネルギー試験を行い，高強度コンクリートの材料力学特性について検討した．本研究の範囲内から得られた知見を以下にまとめる．

- (1) 普通強度から超高強度のコンクリートまで，引張強度はコンクリート標準示方書〔設計編〕の式により評価でき，ヤング係数は友澤らの提案式，および ACI-363 の提案式により評価できた．
- (2) 破壊エネルギーは，圧縮強度 80N/mm² 以下の範囲では圧縮強度の増大に伴い増加するが，圧縮強度 80N/mm² を超える範囲では圧縮強度の増大に伴い減少した．
- (3) 特性長さは，普通強度から超高強度のコンクリートまで，圧縮強度の増大に伴い減少した．
- (4) 曲げ強度は，内田らの推定式により普通強度から超高強度のコンクリートまで比較的精度良く評価できた．
- (5) 曲げ強度を始めとする引張応力下におけ

る強度の寸法効果を検討する上で，特性長さは有効なパラメータとなり得る．

今後はこれらデータおよび知見を，せん断補強筋のない RC はりを対象とした公称せん断応力度の寸法効果の検討に反映させたいと考えている．

参考文献

- 1) 藤田学ほか：RC 梁のせん断強度の寸法効果に及ぼす破壊エネルギーの影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23, No.3, pp.751-756, 2001.
- 2) Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, ACI Structural Journal, May-June, pp.286-294, 1988.
- 3) 池田尚治ほか：高強度コンクリートを用いた部材の特性，コンクリート工学，Vol.32, No.7, 1994.7
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，pp.401-405, 2001.
- 5) (社)土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，1996.
- 6) (社)土木学会：高強度コンクリート設計施工指針(案)，コンクリート・ライブラリー第 47 号，1980.
- 7) 友澤史紀ほか：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査，日本建築学会学術講演概要集，pp.497-498, 1990.
- 8) ACI Committee 363 : State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Manual of Concrete Practice 1999, Part1, 1999.
- 9) CEB-FIP : Model Code 1990 , Bulletin D'Information No.213/214, Lausanne
- 10) 内田裕市ほか：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No.422, V-16, pp.101-107, 1992.