

[78] コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果

正会員 ○長谷川俊昭 (清水建設技術研究所)
 正会員 塩屋 俊幸 (清水建設技術研究所)
 正会員 岡田 武二 (清水建設技術研究所)

1. まえがき

せん断補強筋を用いていない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、有効高さが大きくなると次第に減少することが実験的研究¹⁾によって明らかにされている。これは一般に寸法効果と呼ばれているが、コンクリート強度そのものの寸法効果もその一因であるとの指摘がなされている。そこで本研究では直径300cm までの試験体を用いて割裂引張強度試験を行ない、コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果を検討した。

2. 実験概要

本実験では載荷試験機的能力などの理由により、直径 d と長さ l をパラメータとして表-1の試験体を選定した。図-1に示したように $d=300, 200\text{cm}$ の試験体は運搬用フックを取り付ける断面欠損部があるが、あらかじめ FEM 弾性解析でその影響がほとんどないことを確認している。コンクリートの示方配合を表-2に示す。試験体は材令19日まで湿布養生した後、試験材令(28~35日)までは気中養生とした。割裂引張強度試験は600tonアムスラー型試験機を用い JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準じて行なった。載荷中は、試験体のひずみなどを測定し、また数体の試験体については高速度16mm撮影機(1/500秒)を用いて巨視的な破壊の開始や伝播を観察した。

3. 実験結果及び考察

3-1 割裂引張強度の寸法効果

表-1に実験から得られた各試験体の割裂引張強度 $f_{tsp} = 2 P_{max} / \pi d l$ (ここで P_{max} は最大荷重)を示した。図-2は長さ $l=50\text{cm}$ の場合の f_{tsp} と直径 d の関係である。図-2より、割裂引張強度の直径 d による寸法効果は $d=50\text{cm}$ くらいまで認められるが、 $d=50\text{cm}$ 以上では d による寸法効果は認められない。また $d=10, 20, 50\text{cm}$ ($l=50\text{cm}$) の試験体の $\log_{10} d$ と $\log_{10} f_{tsp}$ について線形回帰分析を行なった結果、 $d \leq 50\text{cm}$ の f_{tsp} は d のほぼ $-1/3$ 乗に比例する寸法効果のあることがわかった。図-3は $d=100\text{cm}$ の場合の f_{tsp} と長さ l との関係であり試験体の長さ l による割裂引張強度の寸法効果は認められない。

このような d と l による寸法効果の特性は寸法効果に関する実験結果の考察に広く用いられている Weibull の理論式による強度の供試体容積依存性という観点からは十分に説明できないと思われる。和泉・三橋²⁾は、直接引張強度の寸法効果に関して確率過程理論を用い、引張破壊を完全ぜい性破壊と考えるよりむしろ、準微視的ひびわれの発生と伝播による供試体の破断という破壊過程としてモデル化した方が、寸法効果に関する実験結果をうまくシュミレートできると述べている。しかしながら、理論式に現れる容積パラメータや破壊過程を規定するパラメータを理論的に決定しているとはいえないようである。

3-2 破壊モード

図-4は、試験後、加圧板上に残された痕跡より測定した試験体の圧壊コーンの幅 b_c と直径 d の関係である。図-5には、コーン幅 b_c と長さ l の関係を示した。これらの図より直径が大きくなると

表-1 試験体及び実験結果

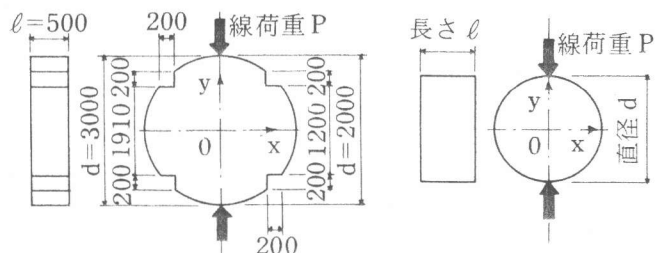
試験体	$d \times l$ (cm)	割裂引張強度 f_{tsp} (kgf/cm ²)	平均値 f_{tsp} (kgf/cm ²)
T-10-50-1	10×50	27.7	25.9
T-10-50-2		25.0	
T-10-50-3		25.0	
T-20-50-1	20×50	19.6	20.3
T-20-50-2		18.9	
T-20-50-3		22.3	
T-50-50-1	50×50	14.8	15.6
T-50-50-2		16.8	
T-50-50-3		15.3	
T-100-10-1	100×10	16.5	15.9
T-100-10-2		15.3	
T-100-10-3		16.0	
T-100-20-1	100×20	15.5	16.3
T-100-20-2		16.0	
T-100-20-3		17.4	
T-100-50-1	100×50	9.9*	16.2*
T-100-50-2		17.9	
T-100-50-3		14.5	
T-100-100-1	100×100	14.9	15.0
T-100-100-2		14.1	
T-100-100-3		16.0	
T-200-50	200×50	15.7	15.7
T-300-50	300×50	16.7	16.7

* T-100-50-1は偏心載荷のため、除外

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材 最大寸 法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	12	4	56	41.5	149	266	785	1123

材令28日標準養生圧縮強度 $\sigma_{cm} = 239 \text{ kgf/cm}^2$



(1) T-300-50, T-200-50 (2) その他の試験体

図-1 割裂引張強度試験体

d/bc は大きくなるが、長さによってコーン幅 bc は変わらないことがわかる。直径 d が大きくなるにつれて d/bc が大きくなるということは d が大きいと破壊時の荷重条件が線荷重に近いことを示しており、破壊時の試験体のひずみ・応力状態は d の大小により異なっている可能性があると思われる。

図-6は、T-300-50の実測ひずみ分布、及び弾性論により求めたひずみ分布³⁾である。 $P/P_{max} = 0.43$ の場合には $d/a = 30$ (ここで a は等分布荷重幅) の計算値が実測ひずみによく適合しているのに対し、 $P/P_{max} \approx 1.00$ の場合には、どの計算値も一致していない。このような傾向は町田の実験⁴⁾でも確認されているが、 $d = 15\text{cm}$ の試験体の実測ひずみ分布は、 $d/a = 15$ の計算値とよく一致していると町田は報告している。ゆえに、直径 d が異なると、弾性時でも荷重の分布幅 a が変わり、試験体の応力やひずみの分布状態、特に高圧縮-引張を受ける $y/d = 0.3 \sim 0.45$ の応力分布状態が変化し、これが割裂引張強度の寸法効果の一因となっていることも考えられ、実際、分布板を用いた場合の割裂引張強度が分布板の幅の増大に伴い増加するという実験事実は、このことと一致している。

図-7は、T-300-50の試験体について $P/P_{max} \approx 1.00$ の場合のひずみ実測値から算出した応力分布を示したものであり、図-6と同様に弾性解も図示されている。 $d = 15\text{cm}$ の割裂引張強度試験体では、ひびわれが試験体の中心軸より $0.1d \sim 0.15d$ 離れた部分 ($y_c/d = 0.1 \sim 0.15$ ここで y_c はひびわれ開始位置) で最初に生じると報告されている⁴⁾が、本実験のT-300-50の破壊時の高速度16mm撮影ではひびわれが $y_c/d = 0.3 \sim 0.35$ の位置で最初に生じていることが確認された。

図-7に示した破壊時の応力分布や、2軸応力下での破壊包絡線の特長から考えてもこのひびわれ開始位置 $y_c/d = 0.3 \sim 0.35$ は妥当性があると思われる。

このように割裂引張強度の寸法効果には、 d の大小により荷重分布幅が異なるので応力状態が変化し、最初にひびわれが発生する位置での破壊包絡線への応力経路が異なってくることによる影響が含まれていると考えられる。しかし図-4で示されているように、 $d = 10, 20\text{cm}$ については、 d/bc がほぼ8.5と同じであるのに寸法効果が存在している点などからも、上述した理由のみでは割裂引張強度の寸法効果は説明しきれないと思われる。

4. 寸法効果の解析的検討

3の考察より本実験での割裂引張強度の寸法効果には、かなり多くの要因が含まれていると考えられる。それらを定量的に把握するための手法としては、次のようなものが挙げられる。(1)確率・統計理論(確率過程理論)に基づく

手法 (2)破壊力学による手法 (3)3-2で述べたような応力分布や応力経路と破壊包絡線との関係から考察する手法 (4)乾燥収縮や水和熱による初期応力・ひずみが引張強度をみかけ上、増減させていると考える手法

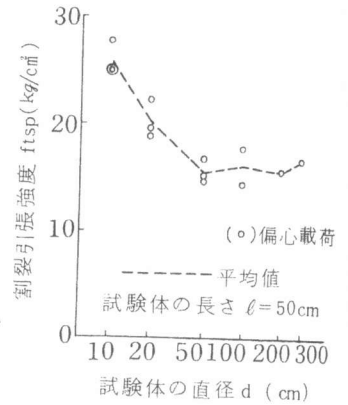


図-2 dと ft_{sp} の関係

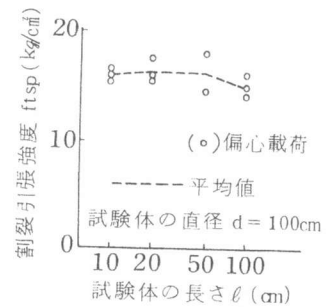


図-3 l と ft_{sp} の関係

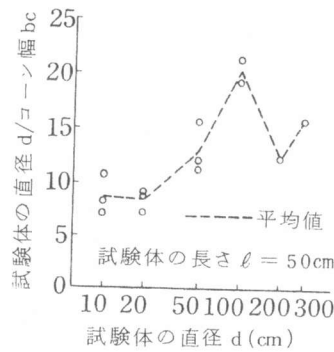


図-4 dと d/bc の関係

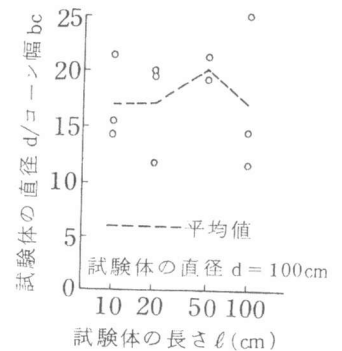


図-5 l と d/bc の関係

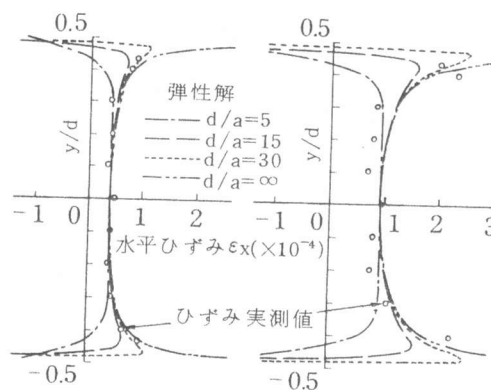


図-6 T-300-50のひずみ分布

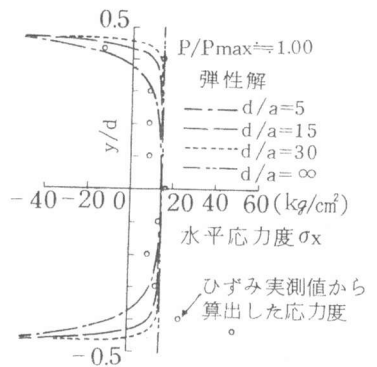


図-7 T-300-50の応力度分布

ここでは、FEMを用いた連続体解析が比較的容易と考えられる(2)の手法であるBažantらのモデル⁵⁾⁶⁾により、解析を試みた。

Bažantら⁵⁾はコンクリートのひびわれ破壊現象は、ひびわれ先端で生じる比較的大規模なfracture process zoneの伝播によってモデル化されうると考え、図-8(1)のようなマイクロクラック領域での構成則として、ひずみ軟化を有する1軸引張応力-ひずみ関係を与えている。そして、このzone内で消費される破壊エネルギー $G_f = W \omega_c$ が一定となるようにひずみ軟化係数 E_t やFEMでの要素幅(process zoneの幅) ω_c を変化させるモデルを提案しており、その非線形破壊力学モデルの極限的な場合は、以前に異なった方法で誘導された等価強度規準⁶⁾に一致する。すなわち等価強度規準は有限要素幅 ω_c が変化した場合、ひびわれの伝播に伴うエネルギー消費量を一定とするように①式の等価強度 f_{eq} を変化させるというものであり、本質的には線形破壊力学の K_{Ic} 破壊規準と同等のものである。

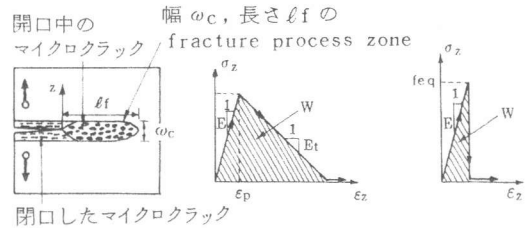
$$f_{eq} = \sqrt{2EG_f / \omega_c} \quad \text{①式}$$

本解析では、圧縮に対してChenの弾性-等方ひずみ硬化塑性モデル(3パラメータモデル)³⁾を、引張に対して前述した等価強度規準による弾性-ぜい性破壊モデルを仮定している。Bažantらのモデルは正方形の有限要素のみに適用できること等を考慮し、実験での円柱試験体を図-9のような立方体にモデル化した。解析で仮定したひずみ硬化係数 H 及び1軸圧縮試験での H の適合状況を図-10に示す。 G_f についてはBažantらの実験適合式(②式)を用い、またピーク引張応力度 f_t' については、二羽・前川の式⁷⁾により圧縮-引張応力下での2軸破壊包絡線の特徴を考慮した。

$$G_f = (2.72 + 0.0214f_t') f_t'^2 da / E \quad \text{②式}$$

ここで、 f_t' と E はpsi単位、 da (粗骨材最大寸法)はin.単位
解析ケースAではP-300Aの $f_{tsp} = 2P_{max} / \pi h \ell$ が本実験のT-300-50の $f_{tsp} = 16.7\text{kg}/\text{cm}^2$ と等しくなるような f_t' を求め、この f_t' ($= 13.5\text{kg}/\text{cm}^2$)を用いて、他のモデル供試体を解析した。解析ケースBでは中央断面付近での分割要素幅 ω_c がP-300Aのその1/2倍になる場合としてP-300Bのみを解析し、 ω_c が f_{tsp} に及ぼす影響を検討することとした。なお、荷重分布幅の影響については弾塑性体の接触問題などとも関係し、これを本解析で考慮することはかなりむずかしいため、モデル供試体へ負荷する強制変位 $\delta/2$ の幅 a と供試体の高さ h との比 h/a は解析ケースA、Bではほぼ同じにした。

図-11に解析より得られた寸法効果を示した。解析ケースAでの寸法効果は、 $d > 50\text{cm}$ で明らかに本実験結果と異なったものになったが、 f_{eq} の式そのものよりは、実験結果に近づいている。これは、主に f_t' に2軸特性を考慮したためであり、後述するように本実験での寸法効果の本質を十分に把握したものではないと思われる。また、中央断面付近での分割要素幅 ω_c が2:1であるP-300AとP-300Bでは f_{tsp} が同一値とならず、要素分割によってFEM解析の客観性が損なわれている。これは、本解析でひびわれの発生と伝播を同じ f_{eq} 規準で評価したためであり、割裂引張試験のように、最大耐力の直前にひびわれが発生し、急速にそのひびわれが伝播していく場合には、 f_{eq} 規準でひびわれ発生を評価すると大きな誤差をもたらすものと思われる。しかしFEM解析において、ひびわれの発生規準と伝播規準を別個に取り扱うのはかなり無理があり、仮に線形破壊力学の適用が妥当と思われる大型構造物に対しても、この f_{eq} 規準はこの点において充分なものではないであろう。非線形破壊力学モデルでは、このような不都合は生じないわけであり、process zone内での



(1) 非線形破壊力学モデル (2) 等価強度

図-8 Bažantらのモデル

表-3 解析モデル供試体

解析モデル供試体	h (cm)	b/h	h/a	h/ ω_c
P-10A	10	1.050	6.6	20
P-50A	50	1.050	6.6	20
P-200A	200	1.050	6.6	20
P-300A	300	1.050	6.6	20
P-300B	300	1.025	8.0	40

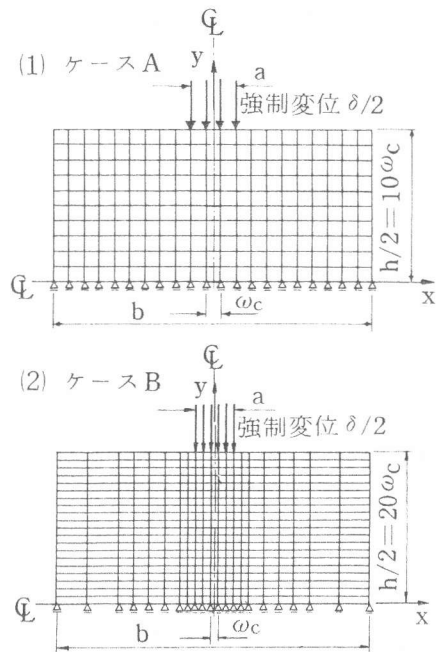


図-9 解析モデル供試体

$$H = 30E \left\{ \left(\frac{\tau_u - \tau_0}{\tau - \tau_0} \right)^2 + \left(\frac{\tau_u - \tau_0}{\tau - \tau_0} \right) - 1 \right\}$$

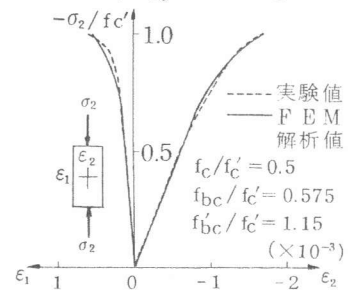


図-10 1軸圧縮試験

ものではないであろう。非線形破壊力学モデルでは、このような不都合は生じないわけであり、process zone内での

ひずみ軟化領域の破壊エネルギーを含めた形としてひびわれを発生させるという f_{eq} 規準にはやはり無理があると思われる。

図-12は、第1ひびわれ発生直後のP-10AとP-300Aの σ_x と f_{eq} の分布である。図-13には、第1ひびわれ発生要素の主応力経路が示されている。第1ひびわれ発生位置 y_c/h が供試体によ

て異なるのは、 ωc が小さく f_{eq} が大きい供試体つまり h の小さい供試体では破壊包絡線が拡大するため h の大きい供試体よりも高応力状態となり、 σ_2 の大きい位置つまり供試体の上部の要素で主応力経路が最初に破壊包絡線へ達するからだと思われる。この現象は3-2で述べた直径 d によるひびわれ開始位置の差異とまったく逆の傾向を示している。このように f_{eq} 規準のみかけ上破壊包絡線を拡大縮小するために、実際の応力状態と異なる場合が生じ、ひびわれ発生パターンもそれに左右される可能性があり、その意味においても不十分なものである。

図-14は、本実験の試験体の中心位置 $x=y=0$ でのひずみ実測値と本FEM解析値との比較を示したものである。数データを除いて ε_x 、 ε_y はFEM解析値とほぼ等しく、割裂引張試験体の中央部では上部の圧壊コーンの幅 b_c つまり荷重分布幅 a や直径 d によらず、ほぼ一定のひずみ・応力状態になっていると考えられる。それにもかかわらず直径によって割裂引張強度が変わるということは、3-2で述べたような応力分布の差異によって割裂引張強度が影響されていることを示している。

以上のように、 f_{eq} 規準を用いた解析によって本実験の寸法効果をひびわれの伝播過程として説明するだけでは不充分であると思われる。それは、やはり割裂引張強度がひびわれ伝播条件よりもむしろ応力分布に強く影響されるひびわれ発生条件に敏感であるためではないだろうか。

5. まとめ

(1)本実験の条件下では、直径 $d \leq 50\text{cm}$ で、 d のほぼ $1/3$ 乗に比例する割裂引張強度の寸法効果が認められたが、 $d > 50\text{cm}$ では寸法効果は認められなかった。また、長さ l による寸法効果は認められなかった。

(2)直径 d が異なると応力分布性状や破壊モードが変わるようであり、本実験の寸法効果には、この影響が含まれていると考えられる。

(3)Bažantらのモデルによる等価強度規準を用いた弾塑性解析では、寸法効果を解析的に充分把握することはできなかった。これは主に割裂引張強度がひびわれ伝播条件よりもむしろ応力分布に強く影響されるひびわれ発生条件に敏感であるためと思われるが、Bažantらのモデル化に起因するところもあると思われる。

(謝辞) 本解析のプログラムは前川宏一氏(長岡技術科学大学)によって開発された弾塑性FEMプログラムFEMN-COMC2を改良したものでありここに謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 例えば井埜・垣屋・野尻・秋山：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究，土木学会論文集，No.348/V-1，pp.175~184，1984年8月。
- 2) 和泉・三橋：確率過程理論に基づいたコンクリートの破壊理論 Part III，日本建築学会論文報告集，No.310，pp.1~9，1981年12月。
- 3) Chen, W.F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company, 1982.
- 4) 町田：コンクリートの圧裂試験に関する基礎研究，土木学会論文報告集，No.297，pp.99~112，1978年11月。
- 5) Bažant, Z.P., Oh, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete, Matériaux et Constructions, Vol.16, No.93, pp.155~177, 1983.
- 6) Bažant, Z.P., Cedolin, L.: Blunt crack band propagation in finite element analysis, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.105, No.EM2, pp.297~315, 1979.
- 7) 二羽・前川：コンクリートの破壊規準に対する一考察，土木学会第35回年次学術講演会講演要録集，V-138，pp.273~274，1980年9月。

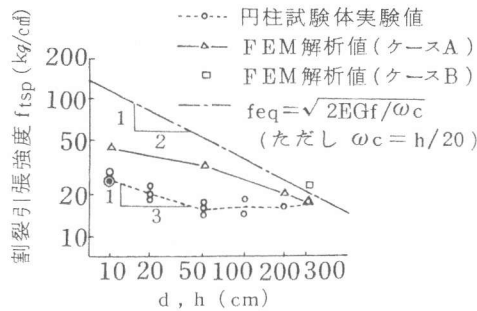


図-11 寸法効果の解析結果

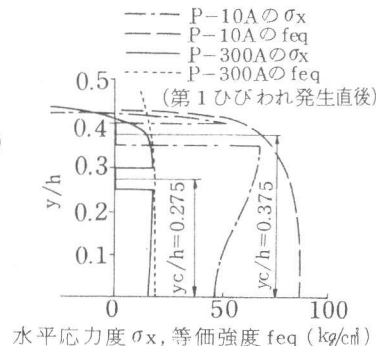


図-12 σ_x と f_{eq} の分布

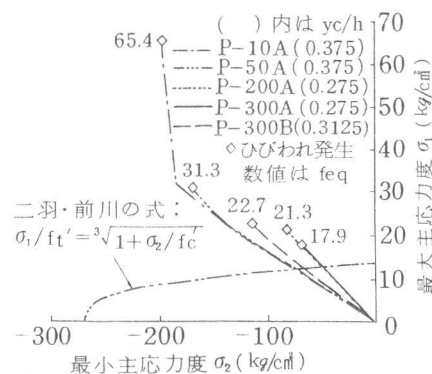


図-13 第1ひびわれ発生要素の主応力経路

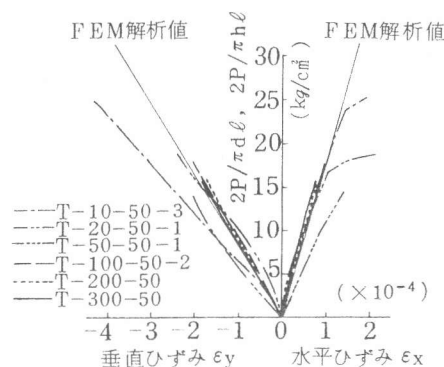


図-14 試験体中心のひずみ