

論文 コンクリートの直接引張強度とその寸法効果

狩野敏也*¹・河野広隆*²・渡辺博志*³

要旨: コンクリートの引張強度に関する寸法効果について明確にするため、断面寸法・切欠きの有無及び深さを変化させた角柱供試体の直接引張試験を実施した。また、仮想ひび割れモデルを適用した解析を実施し、実験結果との比較検討を行った。この結果、供試体寸法が小さい時は、切欠きの効果及び寸法効果が明確とはならないこと、切欠きのある場合の寸法効果は供試体寸法によって異なり、一律に断面寸法のべき乗では表現し得ないことを明らかにした。

キーワード: 引張強度, 直接引張強度試験, 寸法効果, 破壊力学, フラクチャー・プロセス

1. はじめに

マスコンクリート構造物のひび割れ危険度の評価、大型構造物のせん断強度の算定など、引張応力を対象とした安全性の照査を適切に実施するには、コンクリートの引張強度を適切に把握する必要がある。コンクリートの引張強度は、通常 $\phi 15\text{cm}$ の円柱供試体を用いた割裂試験に基づいて定められることが多い。ところが、コンクリートの引張強度には寸法効果が存在することが指摘されており、大型構造物の引張強度を小型供試体の試験結果で代用することに疑問が生じている。本研究は、コンクリートの引張強度に関する寸法効果を明らかにするために、コンクリートに一樣な引張応力が作用する直接引張試験を実施するとともに、破壊力学的なアプローチにより試験結果の説明が可能であるかどうか検討を行った。

2. 実験方法

2. 1 概要

コンクリートの引張強度を求める場合、理想的には一樣な引張応力の作用する直接引張試験を行うことが望ましいが、供試体への引張力の伝達が難しく、試験結果の安定性・再現性などが問題となり、実際にはあまり実施されることはない。

一方、コンクリートの引張強度の寸法効果を論じる場合、供試体に発生する応力は極力単純化した方が試験結果の解析は容易

であると考えられる。割裂試験による場合には、載荷点近傍で大きな圧縮応力が働いて局所的な降伏が生じるため、割裂面に作用する引張応力の分布が複雑となり、寸法効果の解析に当たっては非常に困難を伴うことが予想される。

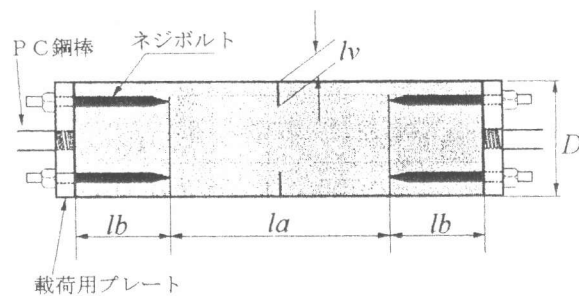


図-1 直接引張試験用供試体

* 1 秩父小野田(株)中央研究所(熊谷)セメント・コンクリート研究所 技術センター (正会員)

* 2 建設省土木研究所 材料施工部 コンクリート研究室室長、工修 (正会員)

* 3 建設省土木研究所 材料施工部 コンクリート研究室主任研究員、工修 (正会員)

このような理由から、ここでは直接引張試験を採用し、割裂試験は単に比較用とすることとした。

2. 2 実験条件

(1) 荷重方法

ここで採用した直接引張試験方法は、文献〔1〕を参考に、角柱供試体内に先端を尖らせたボルトをあらかじめ設置し、このボルトを、端部に設置した鋼板を介して引っ張ることにより引張力を導入するものである。(図-1)

荷重方法は、端部プレートにネジ結合したP C鋼棒を油圧式万能試験機と連結し、これにより引張力を作用させる方法とした。荷重速度は、割裂試験と同じ応力速度(毎分0.4MPa~0.5MPa)となるように調節し、破断まで一定の応力速度を保つこととした。

(2) 供試体寸法

正方形断面角柱供試体の寸法は、大(L)、中(M)、小(S)の3種類とし、それぞれ切欠きの有無及び深さを変化させた。表-1に供試体の寸法及び供試体本数を示す。

(3) 用いたコンクリートの配合

コンクリートの配合は表-2に示す通りであり、普通ポルトランドセメントを用いた呼び強度21のレディーミクストコンクリートを使用した。なお、バッチ間のばらつきがないように、1バッチ(単一バッチ)から供試体を作製した。

表-1 供試体の寸法及び本数

記号	la(cm)	lb(cm)	lv(cm)	D(cm)	供試体本数
S-0	10	15	0	10	15
S-1	10	15	1	10	5
S-2	10	15	2	10	6
S-3	10	15	3	10	6
M-0	10	15	0	20	12
M-1	10	15	1	20	6
M-2	10	15	2	20	6
L-0	10	25	0	30	15
L-1	10	25	1	30	6
L-3	10	25	3	30	6

表-2 コンクリートの配合

呼び強度	スランプ cm	空気量 %	Gmax mm	W/C %	s/a %	W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³
21	8	4	20	60	48.1	171	285	874	943

(4) その他の試験項目

圧縮強度試験及び割裂試験を行った。また、割裂試験では寸法効果の存在を確認するために、直径を10cm、20cm、30cmと変えた試験(供試体の長さは直径と同じとした)を行った。

3. 実験結果

3. 1 割裂強度及び圧縮強度の試験結果

表-3に、割裂強度及び圧縮強度の試験結果を示す。また、図-2には、割裂強度の結果を供試体の直径との関係で示した。これによれば、割裂強度のばらつきのため必ずしも明確なことは

断定できないが、供試体の直径が20 cmから30cmになると強度低下が見られ、寸法効果が認められた。

表-3 割裂強度及び圧縮強度の試験結果

圧縮強度 (MPa)	割裂強度(MPa)			試験材齢
	φ 10cm	φ 20cm	φ 30cm	
29*1	2.74*1	2.69*1	2.51*1	28日
32*1	3.01*2	2.81*2	2.56*1	45日

注) 上記表中*1を記したものは、3本の供試体の平均値、*2を記したものは、6本の供試体の平均値である。

3.2 直接引張強度の寸法効果
角柱供試体の断面寸法と直接引張強度との関係について、切欠きを設けない場合を図-3に、設けた場合を図-4に示す。後者の引張強度は、引張力を破断面の面積 $D(D-2l_v)$ で除して求められる見かけの平均強度で表すこととし、ここでは、断面の欠損率が20%で同一なS-1、M-2、L-3供試体の結果を用いた。なお、切欠きを設けた供試体はいずれも切欠き部で破断していた。

この結果によれば、切欠きを設けない場合には引張強度の低下は見られず、寸法効果が明確とはならなかった。一方、切欠きを設けた場合には、 $D-2l_v$ (リガメント長さ) が8 cmから16 cmになってもほとんど引張強度の低下は見られなかったものの、16 cmから24 cmになると明確な強度低下が認められ、寸法効果が存在していることが明らかとなった。このように、直接引張強度の寸法効果は、切欠きを設けた場合と設けない場合では同様でない可能性があると考えられる。

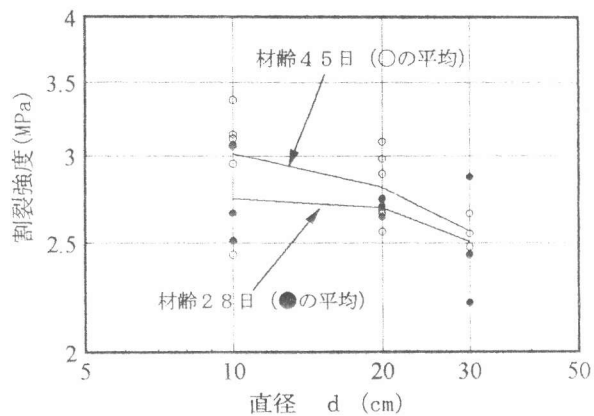


図-2 割裂強度の寸法効果

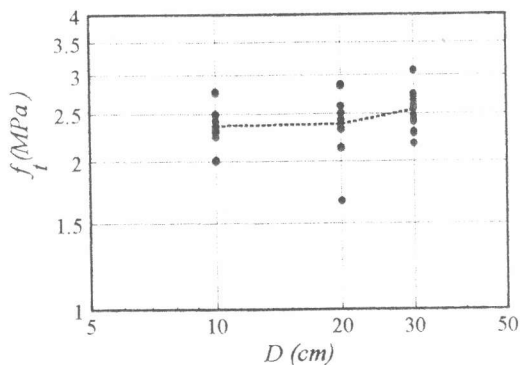


図-3 直接引張強度の寸法効果 (切欠き無し)

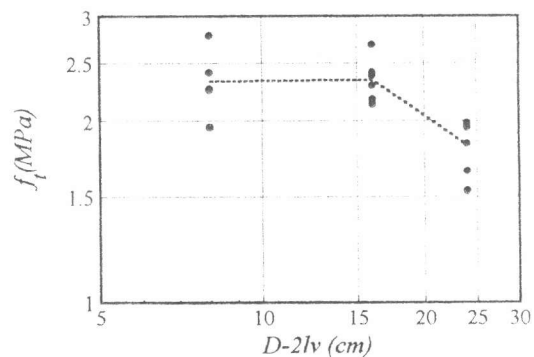


図-4 直接引張強度の寸法効果 (切欠き有り)

3.3 切欠きの影響

切欠きの大きさが異なると、切欠き先端付近の応力の集中度が変わるため引張強度が異なる可

能性がある。そこで、切欠きの効果に関して S、M、L シリーズそれぞれについてまとめた結果を図-5～図-7に示す。

これらの結果から、S及びMシリーズの供試体には切欠きによる応力集中の影響がほとんど認められないことがわかる。一方、Lシリーズの供試体は切欠きの影響が明確に現れており、切欠きの深さが大きくなるにつれて引張強度が低下する傾向が認められる。ただし切欠きの効果は、切欠きの無いものに1cmの深さの切欠きが付いた場合と、1cmの切欠きが3cmになった場合とでは異なり、前者の効果の方が著しい。

ここで、切欠きの影響を線形破壊力学的にとらえるならば、両端切欠き付き供試体の、引張応力場におけるモードIの応力拡大係数 K_I は、次式で与えられる。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot l_v} F(2l_v/D)$$

供試体の破壊強度が一律に応力拡大係数で規定されると仮定するならば、この式によると、引張強度は切欠き長さの平方根で低下するはずである。これに近い傾向は、Lシリーズの供試体には見られるものの、他のシリーズの供試体には認められない。すなわち、ここで扱った程度の大きさの供試体では、切欠きの効果を線形破壊力学的に取り扱うことは不可能であるものと考えられる。

4. 仮想ひび割れモデルを用いた切欠き付き供試体の引張強度の解析

4.1 解析の概要

ここでは、仮想ひび割れモデルを適用し、切欠き付き供試体の引張強度を解析により求め、切欠きの影響・寸法効果について若干の考察を加えた。解析方法は文献[2]を参考とし、2次元境界要素法を使用し、要素は3節点2次要素を用いた。図-8に、使用したひび割れ軟化曲線の形状を示す。図中の f_t の値は2.5MPaで一定とした。コンクリートのヤング係数は、Mシリーズの切欠きの無い供試体にひずみゲージを張り付け、測定された引張ひずみと平均応力の関係から算出されたヤング係数を用いることとし、ポアソン比は0.16とした。なお、軟化曲線を規定する式中の α の値は、表-4に示す4通りの値を設定した。この値は、大きくなるほどひび割れ軟

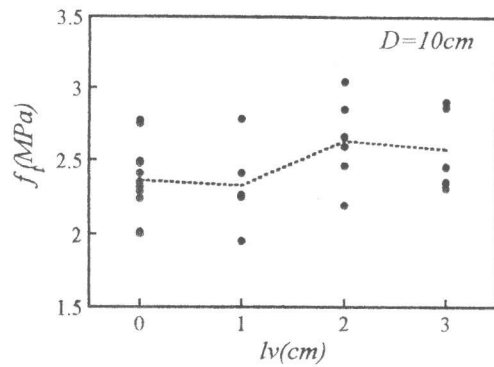


図-5 切欠きの影響 (S 供試体)

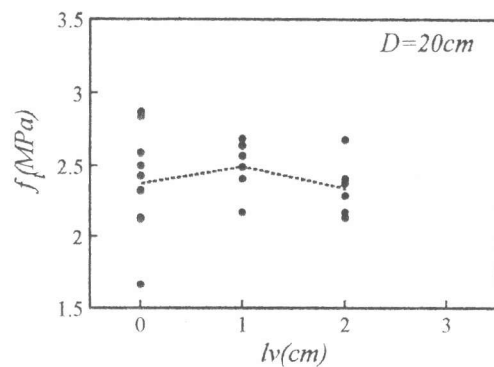


図-6 切欠きの影響 (M 供試体)

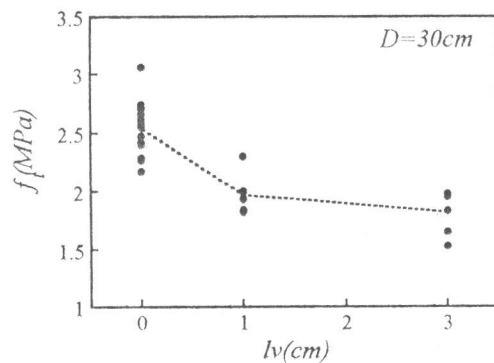


図-7 切欠きの影響 (L 供試体)

化曲線の勾配が急になることを表している。以降に示す解析結果の折れ線については、 α の値と表-4のように対応させた。

4.2 切欠きの影響に関する検討

上記の方法に従って、解析によって評価された切欠きの影響について、実験値との比較検討を行った結果を図-9～図-11に示す。なお、図中の縦軸は、引張強度の値を切欠きの無い場合の引張強度の値で除して求められた強度比によって表した。

Sシリーズの場合には、破断面の幅が小さいために、 α の値を大きくしてもほとんど引張強度が低下しないとの解析結果が得られた。小さな寸法の供試体では、解析によって得られた切欠きの効果に比べて引張試験結果のばらつきの方がはるかに大きかったために、切欠きの効果は認められなかったものと考えられる。解析結果を全体的に眺めてみると、供試体断面が大きくなるにつれて切欠きの効果が顕著となっており、Lシリーズに相当する場合には、 α の値に応じて得られる引張強度に大きな差を生じている。

実験結果を解析結果と比較すると、 α の値が2000～4000(1/cm)辺りの解析結果に相当していると言える。

以上の結果を総合すると、供試体寸法が約20cm以下の場合には、リガメント長さが破壊進展領域（フラクチャープロセスゾーン）と同等以下であるために、切欠きの効果が明瞭とならなかったものと考えられる。

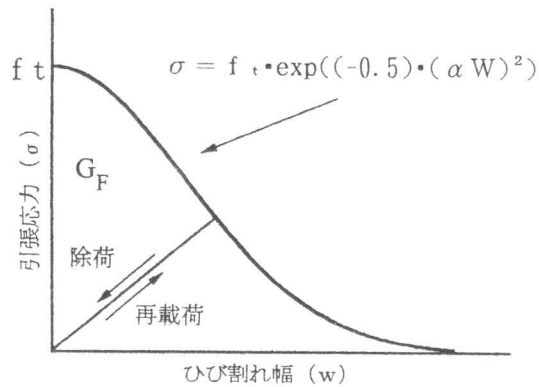


図-8 ひび割れ軟化曲線

表-4 図-9以降の解析結果と α の対応

図中の曲線番号	α 値 (1/cm)
(1)	500
(2)	1,000
(3)	2,000
(4)	4,000

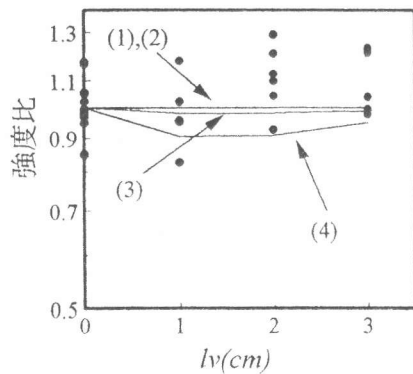


図-9 切欠きの効果の比較 (Sシリーズ)

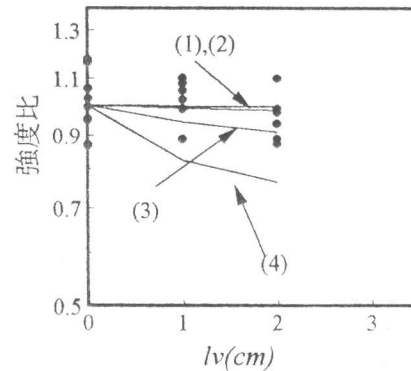


図-10 切欠きの効果の比較 (Mシリーズ)

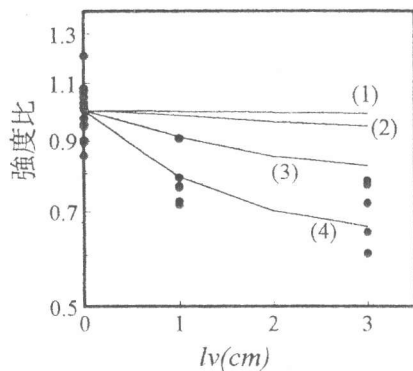


図-11 切欠きの効果の比較 (Lシリーズ)

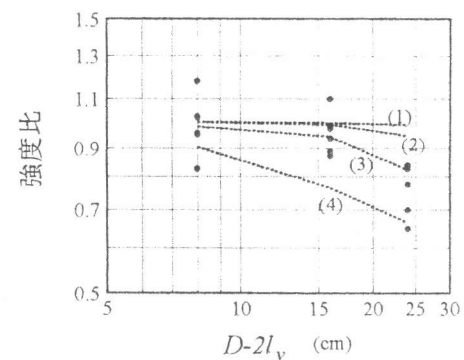


図-12 寸法効果の比較

4. 3 寸法効果に関する検討

図-12に、断面の欠損率を20%と一定とした場合の、寸法効果の解析結果と実験結果を比較したものを示す。この結果から、今回の実験結果はひび割れ軟化曲線を規定するパラメータとして $\alpha = 2000 \sim 4000 (1/cm)$ 程度に相当していることがわかる。切欠きの効果に関する解析結果と同様に、解析上はリガメント長さが20cm以下の場合には寸法効果が小さくなっていて、試験結果と同様の傾向を示していた。すなわち、寸法が小さい場合には、破断面の応力状態が塑性状態であると仮定して得られる引張強度に漸近するのに対し、寸法が大きくなるにつれて、割裂試験で得られた寸法効果の試験結果に見られる傾向に近くなるといった興味深い結果となった。

5. まとめ

以上の、切欠きの効果及び切欠き付き供試体の寸法効果に関する検討結果を総合すると、仮想ひび割れモデルを用いた解析により、寸法効果を検討することが可能であることが明らかとなった。また、応力集中に起因する見かけの平均強度の寸法効果は、破壊時に供試体に発生するフラクチャープロセスゾーンの大きさと、リガメント長さの大きさに応じて変化するものであり、一律に断面寸法のべき乗では表現することができないと言える。特に、破断面に生じるフラクチャープロセスゾーンに比較してリガメント長さが同等以下の場合には、破断面のほぼ全域が塑性状態に近い形で破壊するため、寸法の増加にともなう強度低下が現れにくいものと考えられる。

なお、今回の試験では、切欠きを設けない供試体の直接引張強度には寸法効果が認められなかったが、この理由として、切欠き付きの供試体がすべて切欠き部で破壊したことから類推すると、切欠きの無い供試体に生じていた応力集中の度合いが小さかったことが原因と考えられる。切欠きの無い、すなわちマクロ的に見て応力集中が生じない供試体の寸法効果については、著しく現れている実験結果 [3] と、あまり明瞭ではない実験結果 [4] が報告されていて、一定の結論が得られていないのが現状である。直接引張強度には、供試体の縦横比が影響するとともに、偏心の影響も存在することが知られおり、応力集中がない場合の引張強度の寸法効果については、今後追加検討を行っていく予定である

参考文献

- 1) 吉本彰、長谷川博、兼行啓治、白上博明：純引張試験用コンクリート供試体に関する研究、セメント技術年報32、pp. 231-234、1978
- 2) (社)日本コンクリート工学協会 コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、pp. 55-65、1990. 3. 30
- 3) たとえば、上田稔、佐藤正俊、長谷部宣男、奥田宏明：コンクリートの直接引張強度に関する寸法効果の破壊力学的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 69-74、1994
- 4) V. Kadlecěk and Z. Spetla : Effect of size and shape of test specimens on the direct tensile strength of concrete, Bulletin RILEM, No. 36, pp. 175-184, Sept. 1967