

論 文

[1076] コンクリートの直接引張強度の寸法効果に関する研究

佐藤 正俊^{*1}・上田 桧^{*2}・長谷部宣男^{*3}・近藤 久雄^{*4}

1. まえがき

コンクリートの強度には、供試体の寸法が大きくなると強度が小さくなる、いわゆる寸法効果が存在することは、よく知られている[1], [2]。しかし、この寸法効果の理由については、必ずしも明らかになっていない。そこで、本研究は、コンクリートの破壊や強度において、基礎的かつ重要である、一軸引張荷重下におけるプレーンコンクリートの強度の寸法効果の理由について、明らかにすることを目的とするものである。

寸法効果を説明する手法として、①確率・統計理論による手法、②引張軟化特性を用いる破壊力学的手法、③乾燥収縮や水和熱が理由と考える手法、④供試体の応力分布の差異が理由とする手法が挙げられている[2]。これらのうち②については、最近いくつかの成果が認められる[3], [4], [5]。これは、コンクリートの破壊を特徴付けるフラクチャープロセスゾーンの形成を、引張軟化特性という形でとり込んでいるためであろう。しかし、本研究で対象とする直接引張強度の場合、それを求める直接引張試験は、引張軟化特性が求められている試験とも位置付けられるが、直接引張強度の寸法効果が実験結果として明らかに存在する[6], [7]。③に関して、乾燥収縮や水和熱が、寸法効果の程度に影響を与えると考えられるが、この影響がないか小さい場合でも寸法効果は存在するようである[4], [8]。また④については、直接引張試験には、曲げ試験[3]や割裂試験[8]と異なり、供試体の大小による応力分布の差異ではなく、一様な応力状態である。以上の点から推察するに、コンクリートには、材料固有の破壊メカニズムに起因して寸法効果があり、荷重条件や粗骨材の大きさ、水セメント比等のコンクリートの配合、乾燥収縮や水和熱、応力分布など様々な要因が、その程度に影響を与えていると思われる。

著者らは、コンクリートを粗骨材とモルタルの複合体としてとらえ、一軸引張荷重下における引張強度に到る破壊メカニズムを、破壊力学的に考察した[9]。本研究は、この破壊メカニズムに基づき、直接引張試験を行い得られた、2種類の大きさの供試体の応力一ひずみ曲線（以下、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線と略す）や破断面の観察結果を用いて、直接引張強度の寸法効果の理由について考察する。コンクリートの破壊を、コンクリートの内部破壊である粗骨材とモルタルの界面はく離や、モルタルクラックに対して定義される、破壊力学における応力特異性値をもとに考える。破壊メカニズムに基づく破壊力学的考察が、寸法効果の理由を明確にすると考えられる。

2. 引張破壊メカニズムと $\sigma - \varepsilon$ 曲線

図-1に、直接引張試験を行って得られる $\sigma - \varepsilon$ 曲線の例を示す。破断面外平均はほとんど直線で、弾性変形である。これに対し、破断面平均はある荷重レベルより緩やかに傾き始め、ピークに近い荷重レベルで横に大きく流れ、引張破壊は局所的である。この破断面の $\sigma - \varepsilon$ 曲線における、コンクリートの引張破壊メカニズムは、以下のとおりである[9]。大体、引張荷重作用方

* 1 中部電力㈱ 電力技術研究所 地盤・構造グループ、工修（正会員）

* 2 中部電力㈱ 電力技術研究所 地盤・構造グループ、工博（正会員）

* 3 名古屋工業大学教授 社会開発工学科、工博

* 4 中部電力㈱ 電力技術研究所 地盤・構造グループ長

向と直交する面に面する粗骨材界面に引張応力が発生する。骨材の大きさ、形状、ブリッジによる空隙などにより、引張応力の集中が生じ易い、最も不利な粗骨材の界面に、最初にはく離が発生する。このため、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線が直線性を失い始める【A点】。その後、荷重の増加とともに、いくつかの粗骨材界面にはく離が発生し、それらが互いに干渉し合いながら、はく離の進展と増加をもたらし、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線の傾きが徐々に緩くなる。そして、粗骨材界面のはく離先端が、そこから発生しようとするクラックの破壊靭性値（モルタルの破壊靭性値）に達すると、モルタルクラックが発生し【B点】、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線が横に流れ始める。そして、発生したクラックと、既に存在している粗骨材界面のはく離からのクラックの発生、成長、これらのクラックとはく離の連結、またいくつかのクラックは粗骨材界面に向け接近する。最後に、クラック先端が粗骨材の破壊靭性値に達して、粗骨材の破断が連鎖反応的に生じ、供試体が破断する【C点：引張強度】。なお、【A点】は $\sigma - \varepsilon$ 曲線が初期の直線部から離れる位置として求められる。【B点】は、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線が横に流れ始め、その前後で傾きが変化することや、またモルタルクラックの発生により自由面が形成されるため、その直上及び直下の位置のひずみが減少することが観察される[9]ことから、その位置が決定できる。【C点】は $\sigma - \varepsilon$ 曲線の最終点である。

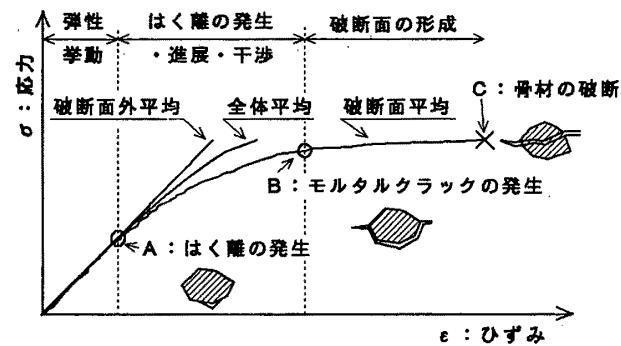
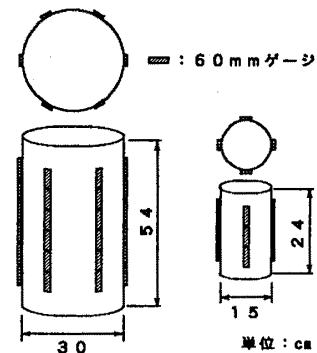
図-1 $\sigma - \varepsilon$ 曲線と破壊の進行

図-2 ゲージ位置

表-1 コンクリートの配合

3. 直接引張試験

3. 1 試験概要

試験方法は、鋼板及び供試体断面が一様な、鋼板接着方式で

最 大 粗骨材 寸 法 (mm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)							
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				
						40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	合 計	
40	46	43.6	157	338	783	537	317	170	1024	

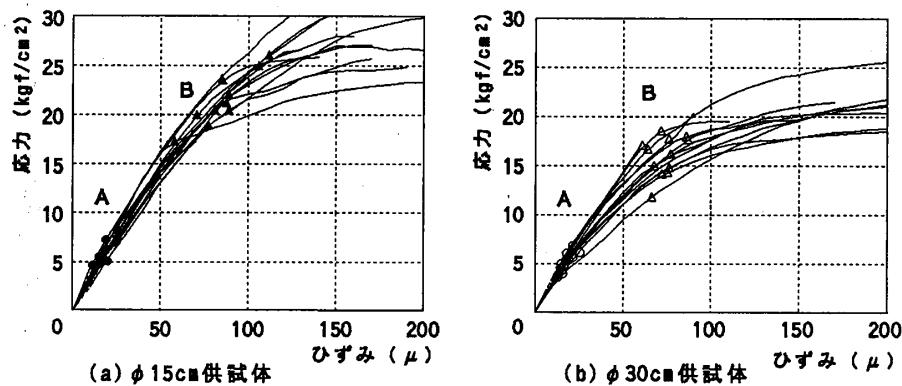
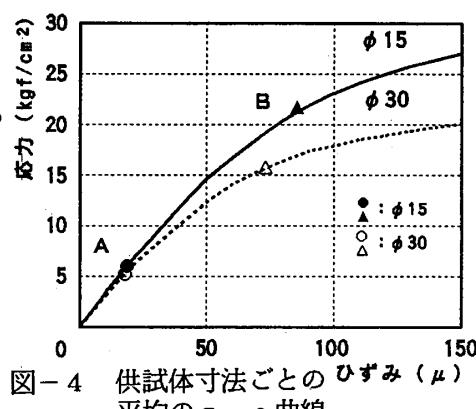
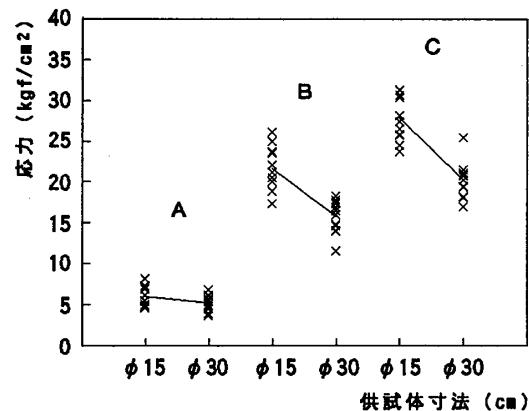
ある[10]（写真-1参照）。既往の直接引張試験は、供試体直径10~15cm程度以下、最大粗骨材寸法（Gmax）20mm程度以下のものがほとんどである。これに対し、本試験では、粗骨材に起因する破壊の観察を容易にすること、粗骨材の大きさの範囲を広くし、粗骨材の大きさの違いによる、破壊状況の違いを観察しやすくすることなどを考慮して、Gmax40mmの大きな粗骨材を含む、 $\phi 15 \times H24$, $\phi 30 \times H54$ cmの供試体（以下、 $\phi 15$ 、 $\phi 30$ と略す）を用いて試験を実施した。破断面での破壊をとらえるために、60mmゲージを図-2に示すように、供試体全面に配置した。荷重は単調に増加させた。測定は、サンプリング速度が0.002sec/1ゲージの高速ひずみ測定器を用いた。 $\sigma - \varepsilon$ 曲線の変化を詳細にとらえるため、応力レベルで約 0.13kgf/cm²ごとに1回、ひずみを測定した。供試体の配合、試験条件を表-1, 2に示す。供試体は水中養生とし、試験実施約7日前から気中にて、供試体の端面切断[10]、ゲージの接着を行い、試験実施2日前に鋼板を接着した。試験結果にばらつきが存在する中で、寸法効果に関する考察が可能となるよう、 $\phi 15$, $\phi 30$ ともそれぞれ12体づつ試験を行った。

表-2 試験条件

供試体数	各 12 体
材 令	91日
荷重速度	0.06kgf/cm²/sec (割裂試験相当)

3. 2 試験結果
各供試体の破断面平均の $\sigma - \varepsilon$ 曲線を $\phi 15, \phi 30$ に対し、それぞれ図-3(a), (b)に示す(ただし、 $\phi 15$ は測定不良1体を除く11体)。図には、個々の $\sigma - \varepsilon$ 曲線に対し図-1のA, B点を、 $\phi 15$ に対しては●印と▲印で、 $\phi 30$ に対しては○印と△印で示している。このA, B点の応力は破断面のゲージの中で最初にA, B点が現れた時の応力である。

図-3(a), (b)それぞれに対し、全ての $\sigma - \varepsilon$ 曲線を平均したものを、図-4に示す。図には、A(●, ○印), B点(▲, △印)の平均も示す。図-5に、各供試体のA, B, C点の応力を、 $\phi 15, \phi 30$ で比較して×印で示す。そして、A, B, C点ごとに $\phi 15$ の平均と、 $\phi 30$ の平均を直線で結んでいる。表-3には、この平均値の $\phi 15$ と $\phi 30$ の比をまとめて示す。以上の結果には、 $\phi 15$ と $\phi 30$ で明らかに差異が認められる。以下では、これらの結果を用いながら、2章で述べた破壊メカニズムに基づき、寸法効果について考察する。なお、供試体の破断位置は、供試体の全範囲にばらついている。供試体破断状況と破断面の例を、写真-1, 2に示す。

図-3 各供試体の破断面平均の $\sigma - \varepsilon$ 曲線図-4 供試体寸法ごとのひずみ(μ)平均の $\sigma - \varepsilon$ 曲線図-5 $\sigma - \varepsilon$ 曲線における各点の応力表-3 $\sigma - \varepsilon$ 曲線における各点の平均応力

供試体	A点応力 (kgf/cm²)	B点応力 (kgf/cm²)	C点応力 (kgf/cm²)
$\phi 15$	6.0	21.7	27.8
$\phi 30$	5.2	15.8	20.2
$\phi 15$	1.15	1.37	1.38
$\phi 30$			

4. 寸法効果に関する考察

4. 1 粗骨材界面の最初のはく離発生【A点】

$\phi 30$ に対する、 $\phi 15$ の平均応力の比は1.15であり、あまり差がない(表-3)。また、結果のばらつきは、 $\phi 15, \phi 30$ とも同程度である(図-5)。はく離は、粗骨材界面の引張応力の集中により発生する。八田ら[11]は2個の円形や楕円形の弾性介在物の、著者ら[12]は、く形剛体介在物の干渉問題において、介在物の離間距離が介在物の大きさ程度以上では、介在物界面の引張応力の大きさに、ほとんど影響がないことを示している。介在物が母材より硬い場合、引張応力が集中するのは、引張荷重作用方向と直交する面に面する介在物界面なので、他の介在物の影響が小さいと考えられる。この解析結果より、供試体断面が大きいと、断面に多くの粗骨材が存在するが、個々の粗骨材界面に発生する引張応力に差はなく、そのためA点の応力はほぼ同じであると考えられる。

なお、 $\phi 30$ の方が $\phi 15$ より体積が8倍大きく、形状や、ブリージングなどの空隙等により、引張応力が集中し易い粗骨材が存在する確率が高いため、 $\phi 30$ のA点の応力が、やや小さくなっていると思われる。

4. 2 はく離の干渉と進展【A～B点】

最初のはく離発生【A点】後、いくつかの粗骨材界面にはく離が発生し、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線は徐々に緩やかになるが、その程度は $\phi 15$ に比べ $\phi 30$ の方が大きい(図-3, 4)。即ち、同じ応力レベルで比較すると、 $\phi 30$ の方がひずみが大きく、荷重増加とともに、 $\phi 30$ の方が $\phi 15$ より徐々により大きなひずみを生じ、ひずみ量の差も大きくなっている。このことは、同じ応力レベルでは $\phi 30$ の方が、同一面積あたりに発生しているはく離面積が大きく、荷重増加とともに、 $\phi 15$ に比べはく離面積がより大きくなり、破壊が速く進行していることを示している。

以下に、 $\phi 30$ の方が破壊が速く進行する理由について考察する。図-6は、一直線上に等間隔に並ぶ等長き裂(N 個)の中央部のき裂の応力拡大係数(K_1)である(図-6の説明図参照)[13]。縦軸は無次元化した応力拡大係数 F_A 、横軸はき裂数の逆数 $(1/N)$ で、離間距離に関するパラメータ $- (2a/d)$ ごとに示している。 $2a/d$ が大きい程離間距離が小さい。単一のき裂の場合 $F_A = 1.0$ である。図-6より、 $2a/d=0.1$ より大きくなると、き裂数により応力拡大係数に差が認められ、その大きさ $(2a)$ の10倍程度の離間距離(d)を持つき裂には、干渉があることが分かる。実際のコンクリートでは、はく離は、大きさが概ね粗骨材の大きさまでで、不均一なものであるが、破断面付近の粗骨材界面に発生する。ある程度以上の数と大きさのはく離が発生すると、はく離の干渉があらわれ始める。 $\phi 30$ は、 $\phi 15$ に対し4倍の断面積を有し、平均的には4倍の粗骨材が断面に存在する。このため、 $\phi 30$ の方が低い応力レベルではく離の干渉があらわれ始める。 $\phi 30$ は、荷重増加とともに、はく離の進展と、はく離の発生していない粗骨材界面の引張応力の集中をもたらし、新たなはく離が発生する。図-6より、はく離の数が多い程($1/N$ が小さい程)はく離の離間距離が小さい程($2a/d$ が大きい程)応力拡大係数は大きい。また、それらに対する



写真-1 供試体破断状況

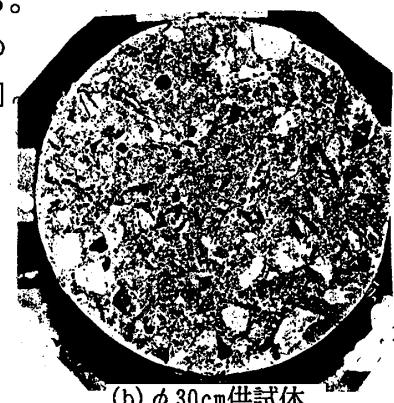


写真-2 破断面の状況

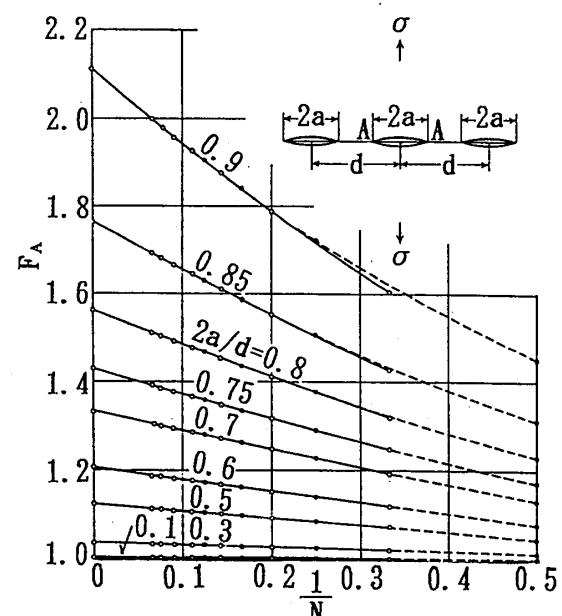


図-6 一直線上の等長・等間隔き裂群の無次元化した応力拡大係数 F_A とき裂数 N の関係[13]
 $F_A = K_1 / (\sigma \sqrt{\pi a})$

応力拡大係数の増大の程度も大きい。この結果は、はく離の増大と成長が、その干渉により、増えはく離の増大と成長をもたらすことを示している。のことから、同一応力レベルで、 $\phi 30$ と $\phi 15$ のはく離の発生状況を比較すると、次のようなになる。大きな粗骨材程、ブリージングによる空隙が大きいこと、また、ブリージングによる空隙がない場合でも形状が同一なら、大きい粗骨材の方が界面の引張応力が大きいことから、界面はく離は大きな粗骨材から順に発生し易い[9]。よって、概ね $\phi 30$ の方がより小さい粗骨材にもはく離が発生しており、同一面積あたりのはく離の数が多い。そして、厳密には粗骨材の形状等が影響するが、概ね同程度の大きさの粗骨材のはく離の大きさは、 $\phi 30$ の方が $\phi 15$ より大きい。

なお図-6は、同一直線上のき裂による一方向からの干渉であるが、実際の供試体においては、面的に存在するはく離の干渉であり、その干渉の程度は図-6のものより大きいと考えられる。

4.3 クラックの発生【B点】

B点の平均応力は $\phi 15$ の方が大きく、 $\phi 30$ に対する比は1.37である。

図-7に、B点の応力と破断面にあらわれた骨材のはく離面積比（断面積に対する比率）の関係を、 $\phi 30$ と $\phi 15$ に対して示す。図には回帰直線も示している。このはく離面積比は、供試体破断時のものである。粗骨材の界面はく離は、概ねブリージングの存在や、界面の引張応力の集中に起因して、大きい粗骨材から順に発生する。実際に破断面において、はく離せず破断し

ている粗骨材は、はく離面があらわれている粗骨材の大きさ程度以下である。よって、面積からみた場合、破断面にあらわれたはく離面の大部分は、A点からB点までに生じていると考えられる。図-7より、はく離面積比が大きい程、B点応力が小さいことがわかる。これは、はく離面積が大きい程、はく離の干渉の程度が大きいため、低い応力レベルで、はく離先端の応力特異性値がモルタルの破壊靭性値に達して、モルタルクラックが発生するからである。図-7で、 $\phi 30$ と $\phi 15$ で、はく離面積比が同じ場合は、同一面積あたりのはく離面積は同程度である。しかし、 $\phi 30$ のB点応力の方が小さくなっている。これは $\phi 30$ の方が断面積が大きく、はく離の数が多いので、それらの干渉の程度が大きく、はく離先端の応力特異性値が大きいためである。

4.4 破断面の形成と引張強度【B～C点】

最初のモルタルクラック発生【B点】後も応力增加がある（図-4）。これは、モルタルクラックが、はく離がないか小さい粗骨材に向かって進展、到達し、粗骨材を破断させるのに、荷重増加が必要なためである[9]。B点では、 $\phi 15$ 、 $\phi 30$ とともに、粗骨材界面はく離先端の応力特異性値は、モルタルの破壊靭性値に達し、破壊力学的に同じ状態にある。この状態から、荷重増加とともに、いくつかの粗骨材界面はく離先端から、モルタルクラックが発生、成長し、それらが干渉する。このため、A点以降のはく離の干渉と同様、B点以降も $\phi 30$ の方が干渉の程度が大きいため、破壊が速く進行し、 $\sigma - \varepsilon$ 曲線が $\phi 15$ に比べ、より緩やかになっている（図-4）。

$\phi 30$ と $\phi 15$ の引張強度【C点】の平均の比は1.38で、B点の平均応力の比とほぼ同じである。このことについて考察する。図-7ではく離面積比は $\phi 30$ 、 $\phi 15$ とも同程度の範囲にばらついており、その平均はそれぞれ19.5%と19.3%で、ほぼ同じである。はく離の発生は、概ね大きな粗

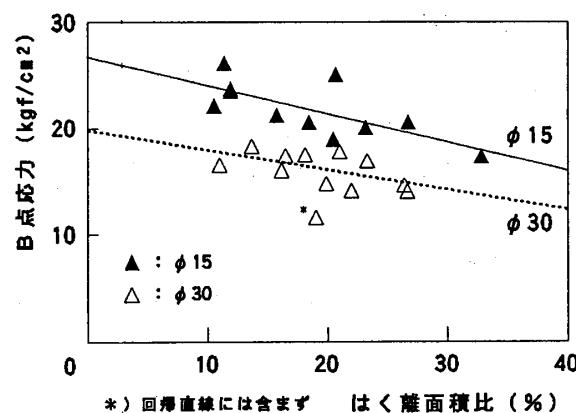


図-7 はく離面積比とB点応力の関係

骨材から生じる。さらにはく離の進展は、はく離が一旦進展するとある範囲を進展し、その後は荷重増加とともに安定的に進展し、徐々に進展しにくくなる[9]。荷重増加とともに、この様なはく離が断面に分布した状態になる。このため上述のとおり、はく離面積比に $\phi 30$ と $\phi 15$ で差異がないと考えられる。図-7の回帰直線からみると、はく離面積比にかかわらず $\phi 30$ と $\phi 15$ のB点の応力の比はそれ程変化しない。これは、断面のはく離の密度が変わっても、 $\phi 30$ と $\phi 15$ で干渉の程度の比には、あまり影響しないことを示している。一方、C点はクラック先端の応力特異性値が、粗骨材の破壊靭性値に達した状態であり、その応力レベルは、はく離やはく離から発生したクラックの干渉によって決定されている。上述したはく離の進展特性に加え、モルタルクラックは、はく離がないか小さい粗骨材の影響により、徐々に進展しにくくなる[9]。荷重増加とともに、この様なクラックが断面に分布した状態になる。このため、C点のはく離やモルタルクラックの面積比は、B点のはく離面積比と同様 $\phi 30$ と $\phi 15$ で比較した場合、同程度のばらつきと平均を有すると推察される。 $\phi 30$ と $\phi 15$ の平均の引張強度【C点】の比とB点の平均の応力の比が同程度になっているのは、のこととC点のはく離とモルタルクラックの密度は、B点のはく離の密度と同様に、 $\phi 30$ と $\phi 15$ で干渉の程度の比にあまり影響しないためであろうと考えられる。

5. 結論

- (1) 直接引張試験を行い、破断面の $\sigma - \varepsilon$ 曲線は供試体寸法により差異があり、寸法効果が存在することを示した。
- (2) 破断面での $\sigma - \varepsilon$ 曲線や破断面の観察結果を用い、コンクリートの引張破壊メカニズムに基づき、寸法効果の理由について破壊力学的に考察した。寸法効果は、粗骨材とモルタルの複合材料としてのコンクリートの破壊における、粗骨材界面はく離の干渉や、はく離先端から発生したモルタルクラックの干渉によってもたらされる。
- (3) コンクリートの種々の要因が、寸法効果の程度に及ぼす影響について、破壊メカニズムに基づいて考察することが、寸法効果をより明確にすると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，第5章，委員会報告，1990.
- 2) 塩屋俊幸・長谷川俊昭：コンクリート構造物の寸法効果，コンクリート工学，Vol.30, No.8, pp.5-15, 1992.
- 3) 内田裕市・六郷直哲・小柳治：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.442/V-16, pp.101-107, 1992.
- 4) Gustafsson, P.J. : Fracture Mechanics Studies of Nonyielding Materials Like Concrete - Modeling of Tensile Fracture and Applied Strength Analyses - , Report TVBM-1007, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1985.
- 5) 文献2)の参考文献参照
- 6) Kadlecak, V. and Spetla, Z: Effect of Size and Shape of Test Specimens on the Direct Tensile Strength of Concrete, BULLETIN RILEM, No.36, pp.175-184, 1967.
- 7) Xie, N. and Liu, W. : Determining Tensile Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test, ACI Materials Journal, pp.219-219, 1989.
- 8) 塩屋俊幸・長谷川俊昭・岡田武二：コンクリートのひびわれと寸法効果－大型コンクリート円柱供試体の割裂引張強度－，セメント・コンクリート，No.474, pp.6-20, 1986.
- 9) 上田稔・長谷部宣男・佐藤正俊・奥田宏明：コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究，土木学会論文集，No.466/V-19.
- 10) 佐藤正俊・上田稔・遠藤孝夫・長谷部宣男：コンクリートの大型供試体直接引張試験装置に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.549-554, 1992.
- 11) 八田正俊・村上敬宜・石田誠：2個の円形介在物の干渉における応力場，日本機械学会論文集，Vol.451, pp.990-1065, 1985.
- 12) 中根純：U形剛体介在物の干渉問題，名古屋工業大学卒業論文，1992.
- 13) 石田誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数 破壊力学と材料強度講座 2, 培風館, pp.188, 1976.