

論文

[2010] 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

上田 稔^{*1}・佐藤 正俊^{*2}・長谷部宣男^{*3}・奥田 宏明^{*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]。本研究は、コンクリートの破壊や強度に関して基礎的かつ重要なプレーンコンクリートの一軸引張荷重下における強度である、直接引張強度の寸法効果について研究する。直接引張強度の寸法効果に関する実験結果の例は極めて少なく、文献 [2] ~ [4] が見当たる程度である。いずれも供試体断面寸法が大きくなる程強度が低下する結果が得られている。割裂引張強度の寸法効果の実験結果 [5] [6] では、ある直径以上では強度が一定値に収束する、またはある直径から強度が逆に増大する傾向が見受けられる。しかし直接引張強度に対しては、このような結果は得られていない。これは [2] は、コンクリートの最大粗骨材粒径（以下 G_{max} と略す）30mm に比べて、円柱形の供試体直径（以下 ϕ と略す）が 5 ~ 15cm とその範囲が狭いことが考えられ、[3] [4] は 2 種類の供試体に対してしか試験が行われていない。また [2] の結果は寸法による強度の差が 1 割以下の範囲で、[3] [4] の結果に比べて寸法効果の程度が小さい。以上既往の直接引張強度の寸法効果に関する試験を勘案して、本研究では G_{max} を 20mm と小さくする一方、円柱形の供試体直径を ϕ 40cm までの 4 種類として直接引張試験を行う。

直接引張試験には、供試体断面の大小による応力分布の差異はなく、一様な応力状態である。この点からも、コンクリートを均質体とみなしての平均応力的な取り扱いでの寸法効果の説明は困難なものと思われる。また供試体内の内部欠陥の多少や、乾燥収縮、水和熱などが寸法効果の理由として上げられたりするが、まず強度がいかにか決定されているかを把握した上で、寸法効果の理由や様々な要因の寸法効果への影響を考察すべきと考える。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破壊メカニズムを破壊力学的に考察した [7]。ここで破壊力学的とは、コンクリートの内部破壊を破壊面の応力特異性値と破壊靱性値を念頭に考えるという意味である。本研究では、この破壊メカニズムに基づき、コンクリートの直接引張強度を破壊力学的にとらえた上で、寸法効果の理由とそれに関する特性について直接引張試験結果をもとに理論的に考察する。

2. 直接引張試験

試験方法は、剛板及び供試体断面が一様な、剛板接着方式である [8]。供試体は円柱形で ϕ 10, 15, 30, 40cm に対して試験を実施した。供試体内の応力状態が一様であるためには、 ϕ 10 で 6 cm、 ϕ 15 で 8 cm、 ϕ 30 で 16 cm、 ϕ 40 で 22 cm の厚さの剛板が必要である [8]。剛板をこの厚さとした場合、 ϕ 30 でその重さは約 100 kg となる。剛板を供試体に接着するときの作業性を考慮して、 ϕ 30 と ϕ 40 については剛板の厚さをそれぞれ 7 cm、10 cm とした。これにより供試体内の剛板に近い範囲は応力状態が一様でないが、供試体の高さは一様な応力状態の範囲がどの径の供試体に対しても 24 cm あるような高さとした、即ち ϕ 10 \times H 24 cm、 ϕ 15 \times H 24 cm、 ϕ 30 \times H 42 cm、 ϕ 40 \times H 48 cm である。なお、応力状態が一様でない範囲で供試体が破断した場合には、試験結果に含めないこ

* 1 中部電力(株) 電力技術研究所 地盤・構造グループ、工博 (正会員)

* 2 中部電力(株) 電力技術研究所 地盤・構造グループ、工修 (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(株) 電力技術研究所 土木建築担当部長

ととした。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

表-1 コンクリートの配合

最大粗骨材寸法 (mm)	水比 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
20	40	37.1	169	423	620	1099

前から気中にて、供試体の端面切断[8]、ゲージの接着を行い、試験実施2日前に剛板を接着した。試験体数は、供試体が小さくなると試験結果のばらつきが大きくなること及びφ30、φ40供試体については、上記のとおり試験結果に含めない場合があることが予想される点を考慮して、表-2に示す本数とした。

表-2 試験条件

供試体数	φ 10 cm 9体 φ 15 12体 φ 30 9体 φ 40 9体
材 令	10週
荷重速度	0.06kgf/cm ² /sec (割裂試験相当)

試験実施後、すべての供試体の破断面の観察を行った。コンクリートの破壊は粗骨材の界面はく離、粗骨材そのものの破断、モルタル部の破壊に分けられる。これらの面積(粗骨材については個々の面積)を、破断面の写真画像解析して求めた。

供試体寸法と直接引張強度の関係を図-1に示す。φ30とφ40についてはそれぞれ3体ずつ応力状態が一樣でない位置で破断したので、その結果を除いてある。供試体の破断位置は、供試体の全範囲にばらついている。強度は供試体寸法が大きくなる程低下し、φ30で収束している。この試験結果の考察は4.で述べる。

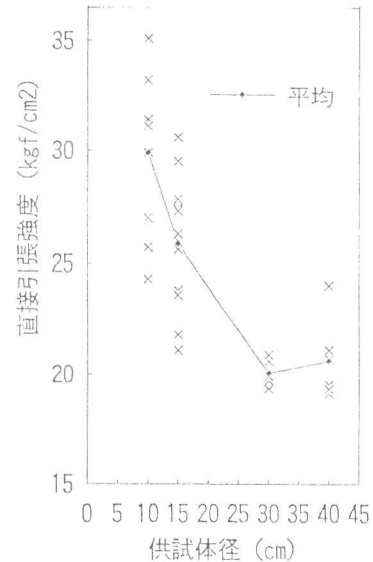


図-1 供試体断面直径と直接引張強度の関係

3. 引張破壊メカニズムと引張強度

図-2に、直接引張試験を行って得られるσ-ε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σ-ε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[7]。

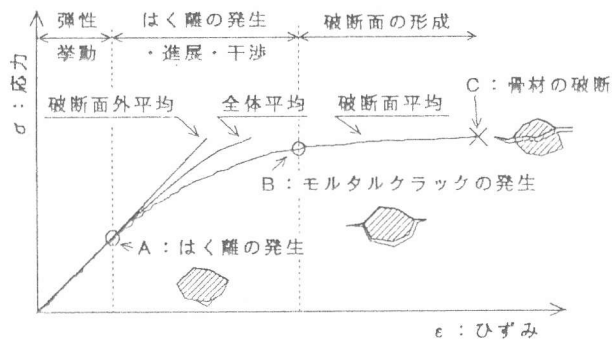


図-2 σ-ε曲線と破壊の進行

引張荷重作用方向と直交する面に面する粗骨材(以下骨材と略す)界面に引張応力が発生する。骨材の大きさ、形状、ブリージングによる空隙などにより、引張応力の集中が生じ易い、最も不利な骨材の界面に、最初にはく離が発生する。このため、σ-ε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す。σ-ε曲線の傾きが徐々に緩くなる。そして、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靱性値(モルタルの破壊靱性値)に達すると、モルタルクラック(モルタル部の破壊面、以下クラックと略す)が発生し[B点]、σ-ε曲線が横に流れ始める。

以下にモルタルクラック発生後について詳しく説明する。母材より硬いはく離を有する円形介在物にクラックが接近する場合、そのはく離がある大きさ以上になると、はく離が大きくなるにつれて一定荷重のもとでの、クラック先端の応力拡大係数(以下K値と略す)は大きくなる。ま

不安定で骨材を貫通してしまうことを示している。そのためこの影響を受けて、その時までには他の骨材に到達しているクラックや骨材に向かっているクラック先端のK値が連鎖反動的に大きくなり、いくつかの骨材の破断が生ずる。骨材の破断が始まると、骨材の破断部と既に形成された破面が連続し、極めて不安定な破壊となり、ただちに供試体は破断に到る。このことから骨材の破断が始まった時が、引張強度に対応している。

4. 直接引張強度の寸法効果の破壊力学的検討

4. 1 引張強度に達するときの内部破壊状態

上述したとおり、直接引張強度に達するときの内部破壊状態は、いくつかの骨材界面はく離から発生したクラックが連結する一方、はく離がないか小さい骨材をとり囲むようにクラックが接近、または骨材に到達した状態である。言い換えれば、非破壊部ははく離がないか小さい骨材とその周囲のモルタル部である。図-4は、個々の供試体の断面積に占める骨材のはく離と破断の面積比を、全供試体に対して示したものである。供試体径によって顕著な差は認められない。このことは、最終的に破断される骨材の分布状況が、供試体径によってあまり変わらないことを示している。これより、クラックは骨材の界面はく離から発生し広がること、さらに3. で述べたとおり、クラックははく離がないか小さい骨材をとり囲むように安定的に成長し、徐々に接近しにくくなるので、直接引張強度に達するときの内部破壊域（骨材界面はく離とモルタルクラック）の分布状況は、供試体径によってあまり変わらないと言える。

4. 2 クラックの干渉モデル

3. で述べたとおり、骨材に到達したクラック先端の応力特異性値が、骨材の破壊靱性値に達するときが強度である。骨材の破壊靱性値は材料固有の値である。一方クラック先端の応力特異性値は荷重の大きさと断面内に存在する内部破壊域によって決定される。

上述したとおり、供試体断面の大小によって内部破壊域の分布状況の差は小さい。よって寸法効果は、断面の大小による断面内に存在する内部破壊域の多少が、応力特異性値に影響を与えるためと考えられる。つまり大きい断面の方が小さい断面より内部破壊している総面積は大きく、そのことが応力特異性値を大きくしている。この点について考察するため、引張強度に達するときの内部破壊状態のモデルとして、無限弾性体中の一直線上に並ぶ等長、等間隔のクラックの干渉を考える（図-5の説明図）。このモデルでは、クラックがはく離やはく離から発生したクラックによる破壊部に、非クラック部がはく離がないか小さい骨材とその周囲のモルタル部である非破壊部に相当する。応力拡大係数の値は中央部のクラック（図-5の説明図のクラック端A）に対するものが最も大きい。図-5に中央部のクラック先端Aの応力拡大係数 K_A を無次元化した値 $F=K_A/(\sigma\sqrt{\pi a})$ [11]の逆数を示す。いま破壊靱性値を K_c とすると、 $K_A=K_c$ のときの応力 σ が引張強度 σ_t に相当するので、その時のFを F_c とおくと、 $\sigma_t=K_c/(F_c\sqrt{\pi a})$ である。よって $1/F$ 値が引張強度に対応する。横軸が、クラックの分布する範囲の長さLである（図-5の説明図）。実際のコンクリートに対して、クラックの分布する範囲の長さLは供試体の大きさに、1個のクラック長さ $2a$ は破壊部の平均的大きさに相当する。図-5には、配合の違いが寸法効果に及ぼす影響を考察するため、クラックの分布する範囲の長さLに対するクラック部（クラックの長さの合計）の比率を60%と80%に、1個のクラック長さ $2a$ を5~40mmと変えて結果を示している。なおこ

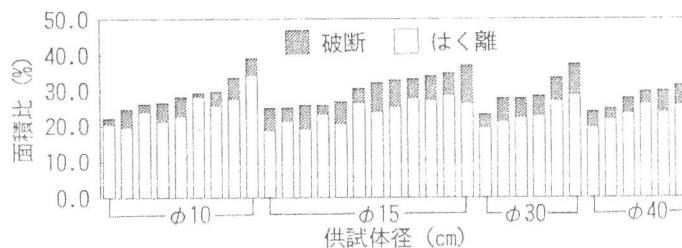


図-4 供試体ごとの破断面に占める骨材のはく離と破断の面積比

これらの値は上述したとおり、供試体断面寸法が異なっても配合が同じコンクリートでは差が小さい。

4. 3 寸法効果の理由に関する考察

図-5より $1/F$ 値は、クラックの分布する範囲が長くなるにつれて低下し、ある長さで一定値に収束している。これは、中央部のクラック先端の K_A 値に及ぼす周囲のクラックの影響が、中央部のクラックと離れる程弱くなり、ある距離以上離れるとその影響がほとんどなくなるためである。図-5の傾向は、図-1の直接引張強度の供試体寸法に対する傾向とよく似ている。実際のコンクリートにおいても、個々の破壊部の大きさや分布状況、クラックが到達している骨材の大きさなどが影響するが、周囲の破壊の影響を受けてクラック先端の応力特異性値が大きくなりやすい中央部で、骨材の破断が最初におきやすいと考えられる。

図-5の $1/F$ 値のクラックの分布する範囲の長さに対する変化量が、図-1の直接引張強度の供試体断面の大きさの違いによる変化量に比べて小さい。これは図-5のモデルが次元方向のクラックの干渉であるのに対して、実際のコンクリートでは断面内に存在する破壊部の面的な干渉であり、干渉の程度が大きいためと考えられる。以上より、強度を破壊力学的にとらえると、寸法効果は強度が決定される骨材の破断が始まる時の内部破壊域の多少が、それらの干渉により骨材（最初に破断が生じる骨材）に到達したクラック先端の応力特異性値の大きさに差をもたらすために生じる。

4. 4 寸法効果の特性に関する考察

図-1で供試体断面寸法が大きい程強度のばらつきが小さい。 $\phi 40$ の供試体の1体を除いて、 $\phi 30$ と $\phi 40$ 供試体の強度は、 3 kg/cm^2 以下のばらつきの範囲にある。この理由について考察する。実際のコンクリートでは強度が決定される時の内部破壊域の分布状況は一様でなく、供試体ごとに異なる。内部破壊域の分布状況は、供試体作成時に決められる破断面となる断面に分布する骨材の量、大きさ、分布状況に影響される。クラック先端の応力特異性値(K 値)は、供試体断面が小さい程、少ない内部破壊域の干渉によって決められる。そのため供試体断面が小さい程、内部破壊状況のばらつき、とくに最初に骨材の破断が生じる位置付近の破壊状況が、応力特異性値に及ぼす影響が大きい。逆に供試体断面が大きい程、応力特異性値は多くの内部破壊域の干渉によって決められるため、内部破壊状況のばらつきの影響が弱められる。以上から、供試体断面寸法が大きい程強度のばらつきが小さくなる。

図-5で $1/F$ 値はクラック長さ $2a$ が小さい程、クラックの分布する範囲の長さ L が短い長さで収束している。このことは実際のコンクリートでは G_{max} が小さい程、小さい供試体断面で強度が収束することを示していると考えられる。コンクリートの内部破壊は骨材の界面はく離からモル

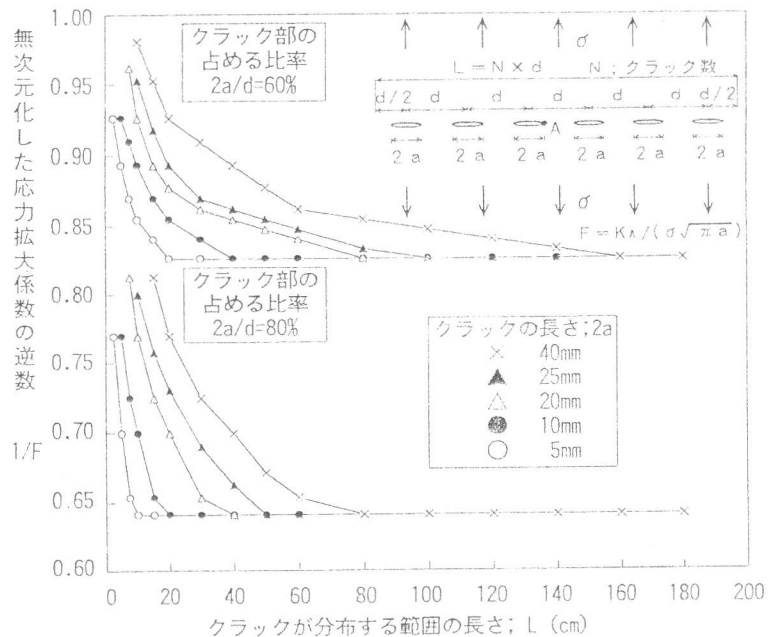


図-5 無限弾性体中の一直線上の等長等間隔クラック群の中央クラックAに対する無次元化した応力拡大係数の逆数とクラックの分布する範囲の長さの関係

タルクラックが発生してモルタル部の破壊が進行するので、骨材が大きい程個々の破壊部が大きくなるからである。次にクラック部の占める比率である $2a/d$ の違いに関して考察する。 $2a/d=60\%$ の場合の方が、 $2a/d=80\%$ の場合に比べて、クラックの分布する範囲の長さ L に対する $1/F$ 値の変化量が小さい一方、 $1/F$ 値が収束する L が大きくなっている。 $1/F$ 値が収束する L は、1個のクラック長さにかかわらず、 $2a/d=80\%$ の場合は1個のクラック長さの20倍、 $2a/d=60\%$ の場合は40倍である。以上のことは、内部破壊域の比率が小さい程、寸法効果の程度が小さくなる一方、強度が収束する供試体寸法が大きくなることを示している。実際のコンクリートでは、高強度コンクリートや富配合のコンクリート程、骨材界面はく離やモルタルの破壊靱性値が骨材のそれに比べて相対的に増大するため、内部破壊域の占める比率が小さくなり、上述の寸法効果特性を示すと考えられる。

5. 結論

- (1) 直接引張強度の寸法効果について、供試体が大きくなる程強度が低下するとともに、強度が収束する供試体寸法が存在すること、供試体寸法が小さい程強度のばらつきが大きいことを実験結果として示した。
- (2) 粗骨材とモルタルの複合体としてのコンクリートの破壊メカニズムに基づき、直接引張強度を破壊力学的に考察した。直接引張強度は、粗骨材に到達したクラック先端の応力特異性値が、粗骨材の破壊靱性値に達する瞬間の応力度である。そのときの応力特異性値の大きさは、粗骨材界面はく離やモルタルクラックの干渉によって決められる。したがって引張強度の寸法効果は、断面の大小による断面内の内部破壊域の多少がそれらの干渉により、応力特異性値の大きさに差をもたらすために生じる。
- (3) 強度が収束する供試体断面寸法が存在するのは、クラック先端の応力特異性値に影響を及ぼす干渉の範囲が存在するからである。
- (4) 供試体断面寸法が小さい程、強度のばらつきが大きい。この理由は、供試体断面寸法が小さい程、少ない内部破壊域の干渉によってクラック先端の応力特異性値が粗骨材の破壊靱性値に達するため、内部破壊状況のばらつきの影響が大きくなるためである。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，第3章，1993.
- 2) Kadlecik, 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.
- 3) Xie, N. and Liu, W.: Determining Tensile Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test. ACI Materials Journal, pp. 214-219, May-June 1989.
- 4) 佐藤正俊・上田稔・長谷部宣男・近藤久雄：コンクリートの直接引張強度の寸法効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp. 459-464, 1993.
- 5) 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.
- 6) Bazant, Z. P., Kazemi, M. T., Hasegawa, T. and Mazars, J.: Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests: Measurements and Fracture Analysis, ACI Materials Journal, pp. 325-332, May-June 1991.
- 7) 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, pp. 69-78, 1993.
- 8) 佐藤正俊・上田稔・速藤孝夫・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.
- 9) 中西博・北沢正敏・岩本正治・鈴木恵：複合材料における界面はく離とき裂の進展，日本機械学会論文集（A編），Vol. 47, pp. 990-997, 1981.
- 10) 石田誠・野口博司：円形介在物と任意き裂群を持つ無限体の面内荷重問題，日本機械学会論文集（A編），49巻，438号，pp. 147-155, 1983.
- 11) 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. 187, 1976.