

鉄筋コンクリート部材のせん断破壊にみられる 寸法効果に関する一考察

寺井 雅和

A Study of Size Effect on Shear Failure of RC Members

Masakazu TERAJ

Abstract

In most structural members, strength tends to decrease as the member size increases. This phenomenon is known as size effect. Many experiments investigating the impact of scale effects on concrete structures have already been conducted. However, since few laboratories have the capacity to test large-scale specimens, few experimental investigations have tested near full-scale RC members. The major explanation for the occurrence of size effect in shear failure of RC beams concentrated on the role of aggregate interlock affected between crack surfaces. So, it is important to take the maximum size and the grading of coarse aggregate appropriate into account for the size effect of RC beam. The influence of aggregate size and grading on concrete properties is analyzed in this report. If the aggregate size is changed, the aggregate grading change and the fracture phenomenon and properties of beams change, also. As a result of experiment, the following thing may be clear. There is no significant size effect depending on the aggregate grading and the maximum aggregate size, but it is shown that the load at which shear crack occurs is influenced by the effective beam depth.

Keywords: Size Effect, RC Beams, Maximum Aggregate Size, Shear Failure, Aggregate grading

1. はじめに

コンクリート部材のせん断挙動にみられる寸法効果は、古くから知られ、多くの研究者らによってその現象の解明が行われてきた。せん断補強筋のない鉄筋コンクリート（以下、RC）はり部材のせん断強度は、有効高さ d が大きくなると次第に減少することが、これまで国内外の数多くの実験で確認されている。このような寸法効果が生じる影響要因については様々な角度から検証され、材料欠陥の確率分布、エネルギーの変換機構、引張軟化、乾燥収縮など複数考えられているが、コンクリートは、不均質性のために現象の把握が困難であり、個々の要因の定量的な評価や相互の関係は十分に検証されているとは言えない。

寸法効果を引き起こす原因の一つとして、ひびわれ表面間における骨材のかみあわせ作用の減少が説明されている。部材寸法が大きくなると相対的に骨材寸法が小さ

くなるため、見かけ上寸法効果が現れるとするものである。骨材寸法が大きくなると、強度が低下する理由として、骨材が大きくなると骨材の表面積が減少するため、ペーストと骨材の界面における応力が増大すると説明しているものや、界面付着が弱く欠陥となりやすいとしているものがあるが、現象の把握や定量的な評価はできていない¹⁾。

既往のせん断強度に及ぼす寸法効果に関する実験が数多く行われてきたが、そこで使用されている粗骨材の最大寸法は 5~25mm が多く、30mm を超えるものは極めて数が少ない。また、Basant & Hsu ら²⁾が骨材の最大寸法をパラメータとしたせん断強度の算定式を提案しているが、ここで使用されているのは最大寸法だけで、粒径分布や粗粒率などの評価は含まれていない。そこで、本研究では粗骨材の寸法や粒度分布の違いによって寸法効果が起こる原因を探る目的で、粗骨材の最大寸法 (10,

表 1 試験体諸元

| Specimen | Depth (mm) | Shear Span (mm) | Shear Span Ratio | Reinforcement | | Maximum Aggregate Size (mm) | Concrete Strength (N/mm ²) | Tensile Strength (N/mm ²) | |
|----------|------------|-----------------|------------------|---------------|-------|-----------------------------|--|---------------------------------------|------|
| | | | | Bars | Pt(%) | | | | |
| S10 | 161 | 322 | 2.0 | 4-D13 | 2.8 | 10 | 37.9 | 2.42 | |
| S20 | | | | | | 20 | | | |
| S40 | | | | | | 40 | | | |
| M10 | 322 | 644 | | 4-D19 | | 2.8 | 10 | 45.3 | 2.71 |
| M20 | | | | | | | 20 | | |
| M40 | | | | | | | 40 | | |
| L10 | 644 | 1288 | | 4-D25 | | 2.8 | 10 | 31.9 | 3.35 |
| L20 | | | | | | | 20 | | |
| L40 | | | | | | | 40 | | |

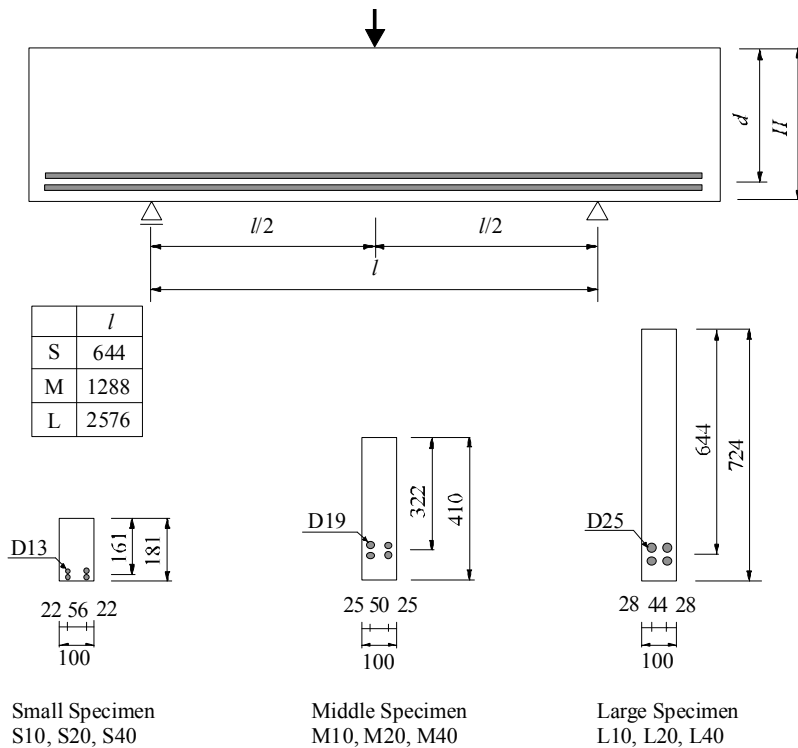


図 1 試験体形状 (単位:mm)



写真 1 試験装置

20, 40mm) と試験体の有効高さ (161, 322, 644mm) をパラメータとした RC 梁部材の曲げせん断実験を行った。

2. 試験体の概要及び実験方法

2.1. 試験体

各試験体の諸元及び寸法をそれぞれ、表 1 及び図 1 に示す。実験要因は、粗骨材最大寸法が 3 ケース (10, 20, 40mm) と試験体の有効高さが 3 ケース (161, 322, 644mm) あり、それぞれの掛け合わせで 1 体ずつ、合計 9 体の試験体を制作した。共通因子として、せん断スパン比 (a/d) が 2.0, 引張鉄筋比 (p_w) が 2.8%, はり幅が 100mm として試験体を設計した。

2.2. 使用材料

コンクリートの目標強度は 30N/mm^2 とし、表 2 に示す配合条件で制作した。セメントは、普通ポルトランドセメント、混和剤には AE 減水剤を使用した。本実験で焦点を当てている粗骨材であるが、砕石を用い、最大寸法 (G_{max}) を 10, 20, 40mm の 3 種類とし、表 3 に示す粒度分布としている。いずれの骨材も、JASS 5 で標準粒度とされている領域に入るように実験室内でブレンドしたものを使用した。細骨材は、表 3 の下段に示すものを全ての試験体に共通で使用した。

コンクリートの荷重試験時の圧縮強度、割裂強度、弾性係数及び単位容積質量を表 4 に示す。配合が異なり、練り混ぜ時期が異なるので、コンクリート種別ごとに強

表2 コンクリートの配合

| Maximum Aggregate Size | Design Strength (N/mm ²) | Slump (cm) | Water Cement Ratio W/C (%) | Fine Aggregate Content s/a (%) | Air (%) | Unit Weight (kg/m ³) | | | | |
|------------------------|--------------------------------------|------------|----------------------------|--------------------------------|---------|----------------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------|
| | | | | | | Water W | Cement C | Fine Aggregate S | Coarse Aggregate G | Mixture Agent |
| G _{max} 10 | 30.0 | 8 | 54.0 | 49.0 | 8.0 | 174 | 324 | 809 | 868 | 3.24 |
| G _{max} 20 | 30.0 | 8 | 53.3 | 44.6 | 4.0 | 184 | 345 | 783 | 1056 | 3.45 |
| G _{max} 40 | 30.0 | 8 | 54.0 | 39.0 | 4.5 | 154 | 287 | 711 | 1146 | 2.87 |

表3 実験に使用した骨材の粒度分布と粗粒率（上；粗骨材，下；細骨材）

| sieve size(mm) | passing sieve weight (%) | | | | | | | | Fineness Modulus |
|----------------------------|--------------------------|----|------|------|------|------|-----|------|------------------|
| | 40 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | | |
| G _{max} 40 | 95 | 75 | 63.5 | 52.5 | 38.5 | 20 | 2.5 | 7.30 | |
| gravel G _{max} 20 | | | | 95 | 66.5 | 37.5 | 2.5 | 6.65 | |
| G _{max} 10 | | | | | | 95 | 0 | 6.05 | |

| sieve size(mm) | passing sieve weight (%) | | | | | | | | Fineness Modulus |
|----------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------------------|
| | 10 | 5 | 2.5 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | | |
| sand | 100 | 100 | 95 | 70 | 42 | 22 | 10 | 2.61 | |

表4 コンクリートの材料強度

| Maximum Aggregate Size | Compressive Strength (N/mm ²) | Splitting Tensile Strength (N/mm ²) | Young's Modulus (×10 ⁴ N/mm ²) | Density (×10 ³ kg/m ³) | Time (Days) |
|------------------------|---|---|---|---|-------------|
| G _{max} 10 | 37.9 | 2.84 | 3.10 | 2.39 | 25 |
| G _{max} 20 | 45.3 | 2.71 | 3.20 | 2.40 | 25 |
| G _{max} 40 | 31.9 | 3.35 | 2.83 | 2.38 | 25 |

表5 引張鉄筋の材料強度

| | Yield Strength (N/mm ²) | Tensile Strength (N/mm ²) | Young's Modulus (×10 ⁵ N/mm ²) | Elongation (%) |
|-----|-------------------------------------|---------------------------------------|---|----------------|
| D13 | 412 | 539 | 1.76 | 23 |
| D19 | 387 | 561 | 1.77 | 22 |
| D25 | 378 | 548 | 1.83 | 21 |

度にばらつきがあるが、単位容積質量には大きな差はなかった。なお、載荷スケジュールの関係で、全ての実験は材齢25日目で行っている。引張鉄筋には、SD295を使用し、その材料特性を径ごとに表5に示す。

2.3. 載荷方法及び計測

試験体の載荷は、最大容量5000kNの万能試験機を使用し（写真1）、単純梁形式で梁中央1点に力を加える3点載荷とした。載荷荷重、梁のたわみを計測するほかに、破壊性状についてひびわれを目視で観察、記録した。

3. 実験結果

3.1. コンクリート強度の寸法効果

RC 梁部材の実験で使用したコンクリートで、断面寸法が異なる円柱供試体を製作し、圧縮強度と割裂強度に関する寸法効果についても確認した。供試体は、断面径50, 100, 150mmの鋼製型枠により、表2, 3に示す3種

類の粒度分布により複数の供試体を製作した。供試体は、試験材齢28日目まで水中で養生した。

圧縮強度と割裂強度の実験結果を、図2にまとめて示す。圧縮強度については、ばらつきがあるものの、寸法効果は見られなかった。また、最大骨材寸法が大きくなると、圧縮強度は低下する傾向は見られた。一方、割裂強度は、最大骨材寸法による違いがほとんど無かったものの、寸法による強度低下は見られた。しかし、φ100mmとφ150mmでは、ほとんど強度が変わらず、下限値があるように見られる。

以上の結果は、既往の研究³⁾で知られた事象であり、本実験で追認したに過ぎない。

3.2. 梁部材のひびわれ性状および破壊性状

本実験では、せん断スパン比2.0であり、ディープビームに近いプロポーシオンになっている。そのため、多くの試験体で、せん断スパン内に斜めひびわれが発生し

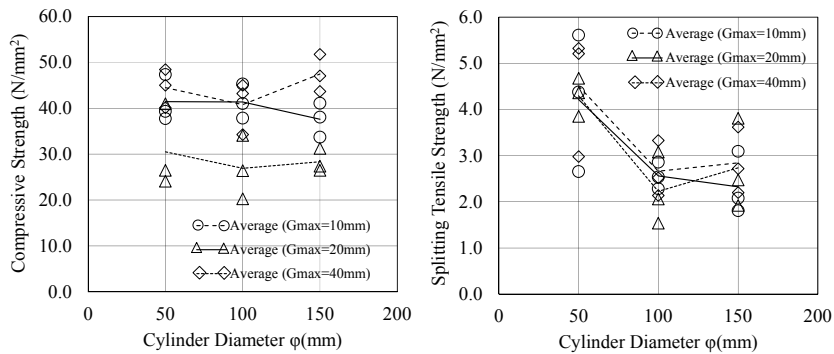


図2 コンクリート強度（左；圧縮強度，右；割裂強度）

表6 実験結果と計算値の比較

| Specimen | Maximum aggregate size | Specimen Size | effective depth (mm) | V_{cr} (kN) | V_u (kN) | V_u/V_{cr} | Shear strength (Exp.) | eq.(1) (Cal.) | Exp/Cal | Failure mode |
|----------|------------------------|---------------|----------------------|---------------|------------|--------------|-----------------------|---------------|---------|-------------------|
| S10 | G _{max} 10 | Small | 166 | 44.0 | 46.4 | 1.06 | 2.88 | 2.70 | 1.07 | Diagonal Shear |
| M10 | | Middle | 322 | 70.1 | 78.1 | 1.11 | 2.43 | 2.30 | 1.05 | Shear Bond |
| L10 | | Large | 644 | 105.0 | 120.9 | 1.15 | 1.88 | 1.80 | 1.04 | Shear Bond |
| S20 | G _{max} 20 | Small | 166 | 32.2 | 43.6 | 1.35 | 2.71 | 3.00 | 0.90 | Shear Compression |
| M20 | | Middle | 322 | 58.8 | 75.1 | 1.28 | 2.33 | 2.70 | 0.86 | Diagonal Shear |
| L20 | | Large | 644 | 96.6 | 166.8 | 1.73 | 2.59 | 2.30 | 1.13 | Shear Compression |
| S40 | G _{max} 40 | Small | 166 | 32.4 | 42.1 | 1.30 | 2.61 | 3.20 | 0.82 | Diagonal Shear |
| M40 | | Middle | 322 | 59.9 | 130.3 | 2.17 | 4.05 | 3.00 | 1.35 | Shear Compression |
| L40 | | Large | 644 | 86.9 | 161.0 | 1.85 | 2.50 | 2.70 | 0.93 | Shear Bond |

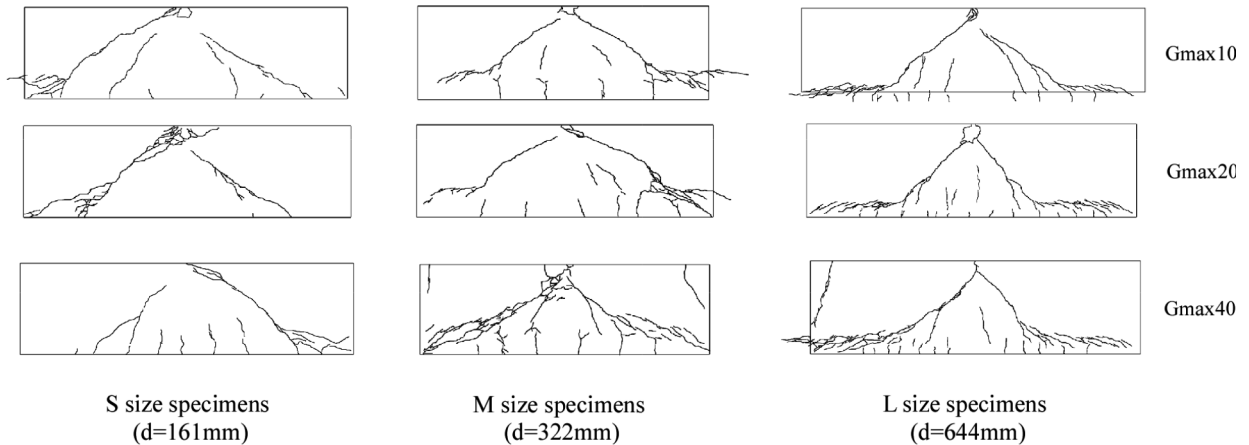


図3 最終ひびわれ発生状況

た後も、タイドアーチ的な釣り合い機構が形成され耐力が上昇する推移を見せている。本実験で評価するせん断ひびわれ強度は、せん断スパン内に発生した斜めひびわれが発生した時点の荷重値をもとに算出する。せん断ひびわれ強度を、実験値として表6に示す。

図3に、各試験体の終局時における支点間（せん断スパン内）におけるひびわれ発生状況を示す。ひびわれは、はじめに試験体下縁に曲げひびわれが発生した。しかし、小型試験体では曲げひびわれ発生前に、せん断ひびわれが先行するものがあった（S10, S20）。その後、せん断ス

パン内に斜め引張ひびわれが、曲げひびわれとは無関係に発生し、載荷点と支点方向へ進展した。しかし、一部の試験体では、曲げひびわれがせん断ひびわれに進展したのも見られた（例えば、M10）。斜めひびわれの角度は、小型試験体では、載荷点と支点を結ぶ線状に沿っているが、部材寸法が大きくなるにつれて角度が急になった。そのため、中型・大型試験体では、斜めひびわれが引張主筋と交わる位置から主筋沿いに進展し、大型試験体では、付着割裂を引き起こした。

最終破壊モードを表6に示すが、付着割裂破壊をした

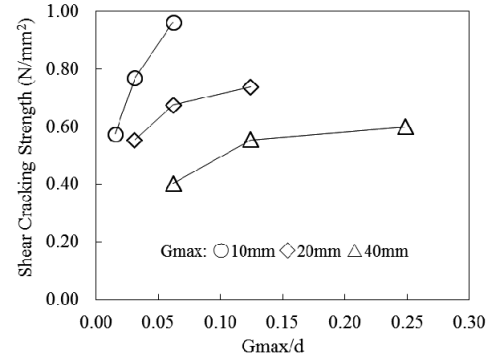
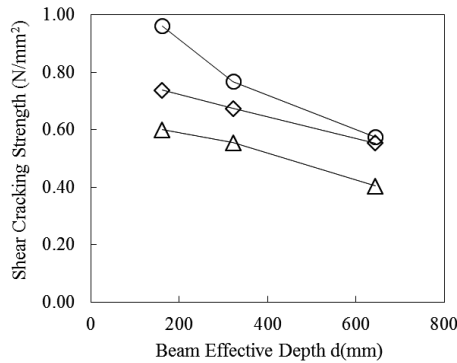


図4 はりの有効高さとしせん断ひびわれ強度の関係 図5 最大骨材寸法／有効高さとしせん断ひびわれ強度の関係

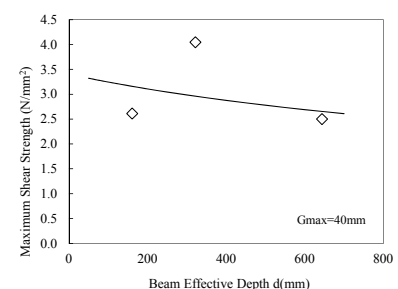
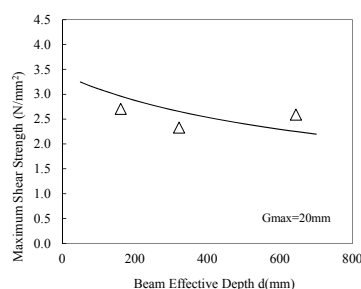
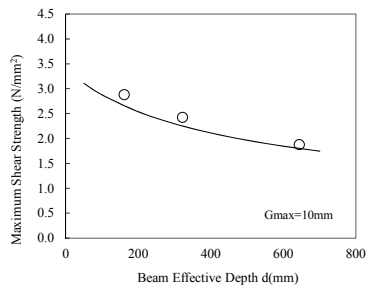


図6 はりの有効高さとし最大せん断強度の関係（最大粗骨材寸法別）

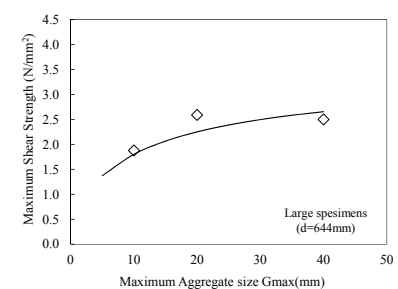
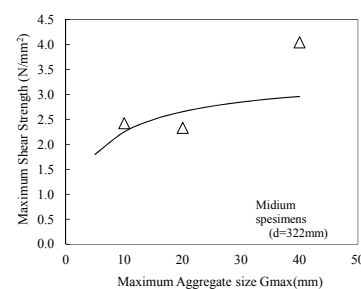
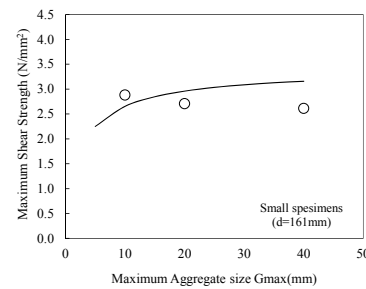


図7 最大骨材寸法とし最大せん断強度の関係（試験体寸法別）

ものが3体、タイドアーチが形成されたが引張鉄筋比が2.8%と大きかったために、圧縮側コンクリートが圧壊したものが3体、そして3体は斜めひびわれが上縁と下縁に到達する斜張力破壊によるとみられる。

3.3. 梁部材のせん断ひびわれ強度の評価

図4に、はりの有効高さとしせん断ひびわれ強度の関係を示す。縦軸のひびわれ強度は、コンクリート強度の違いを補正した値としてプロットしている。この図から、部材寸法が大きくなるに従って強度が低下する寸法効果が確認できる。また、粗骨材寸法が大きい方がより強度が低い傾向も見られた。このような傾向は、従来の研究で見られる寸法効果と同じ性質を再現できている。

図5には、横軸を“最大骨材寸法とし有効高さの比 G_{max}/d ”でプロットした関係を示す。本論はじめに述べたように、寸法効果が現れる原因の一つが部材寸法とし粗骨材との相対的な寸法の比率によるものと説明されてい

る研究が多いので、 G_{max}/d で検証すると実験結果を定量的に評価できる。 G_{max}/d が小さくなると部材寸法に対し粗骨材寸法が小さくなるため、見かけ上寸法効果が見られるが（すなわち、強度低下が見られる）、図5からその傾向が確認できる。

次に、パラメータ毎に実験結果を評価してみる。実験結果を評価するために、既往の評価式により計算値と求める。せん断ひびわれ強度の計算は、最大粗骨材寸法がパラメータとなっている Bazant & Kim⁴⁾による次式(1)で行った。

$$\tau_c = \frac{10p_w^{1/3}}{\left\{1 + \frac{a}{25d_a}\right\}^{1/2}} \left[\sqrt{f'_c} + 3000 \sqrt{\left\{\frac{p_w}{(a/d)^5}\right\}} \right] \quad (1)$$

ここに、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (psi)

a/d : せん断スパン比 (=2.0)
 d : 有効高さ (in)
 a : せん断スパン (in)
 p_w : 引張鉄筋比 (=0.028)
 d_a : 最大骨材寸法 (=0.39, 0.79, 1.58in)

図6に、せん断ひびわれ強度を試験体の有効高さ別に区分して示す。図中の実線は、式(1)による計算値である。およそ計算値と実験値は近い値を示しており、部材寸法が大きくなると強度が低下する寸法効果の傾向は適切に現れていると言える。

図7に、試験体寸法別に最大骨材寸法でプロットした結果を示す。本実験で行った $G_{max}=10$ から 40mm の範囲では、明瞭な違いは見られなかった。Walraven ら⁹⁾が指摘しているように、短スパンの部材では圧縮ストラット(束)により強度抵抗を発現するため、せん断ひびわれは引張強度(割裂強度)に依存しない。本論の図2でも確認されたように、圧縮強度には寸法効果が現れないことが知られており、短スパンの本実験では明瞭な寸法効果が表れない原因の一つと考えられる。

4. まとめ

せん断補強筋のない鉄筋梁のせん断ひびわれ発生強度に見られる寸法効果について実験的に検討を行った。粗骨材の最大寸法(10, 20, 40mm)に合わせて有効高さ(161, 322, 644mm)を比例させた9体の試験体についてせん断破壊実験を行った。さらに、既往のせん断ひびわれ強度算定式の適用性について検討した。本研究から得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 最大骨材による寸法効果の影響は見られなかった。ショートビームでは、割裂強度の影響がほとんどなく、圧縮強度の影響を強く受けるが、材料試験の通り寸法効果はないので、部材の応答にも寸法効果は見られなかった。
- 2) 既往のせん断ひびわれ強度算定式との適用性が良かった。

本実験で寸法効果は確認できたものの、コンクリートの不均質性と粒度分布の検討が困難なため、骨材粒径に起因する定量的な評価はできなかった。したがって、今後は粗骨材の粒度分布を定量化し、強度評価を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 畑中重光, 岸圭介, 山田和夫, 谷川恭雄: 骨材の粒度分布を考慮したコンクリート強度の寸法効果予測式, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.481-484, 1995.6
- 2) Bazant, Z. P, and Hsu-Huei, S., "Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups", *ACI Materials Journal*, July.-Aug., pp.259-272, 1987.
- 3) ・ 本章: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990.
- 4) Bazant, Z. P, and Kim, J-K.: Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beam, *Journal of ACI*, Sept.-Oct., pp.456-468, 1984.
- 5) Walraven, J. C. and Lehwalter, N., "Size Effects in Short Beams Loaded in Shear", *ACI Structural Journal*, 91(5), pp.585-593, 1994.