

# 高強度コンクリートを用いた RCはりのせん断強度と寸法効果

藤田学<sup>1</sup>・佐藤良一<sup>2</sup>・松元香保里<sup>3</sup>・高木康宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 住友建設株式会社 技術研究所 (〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

<sup>2</sup>正会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山14-1)

<sup>3</sup>正会員 住友建設株式会社 技術研究所 (〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川1726)

高強度コンクリートを用いたRCはりの斜めひび割れ発生時の公称せん断応力度(以下、せん断強度)と寸法効果を明らかにするため、圧縮強度36~100N/mm<sup>2</sup>、有効高さ250~1000mm、せん断スパン比2~5としたせん断補強筋のないRCはりのせん断強度を実験的に検討した。その結果、寸法効果は普通強度コンクリートのそれよりも大きいことを確認した。さらに破壊力学的アプローチに基づき、コンクリート引張強度で正規化したせん断強度は、特性長さに対する有効高さの比の-1/2乗に比例することを確認した。これらに基づき、圧縮強度80~125N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートに対して、寸法効果は有効高さの-1/2乗に比例するとした新しいRCはりのせん断強度算定式を提案した。

**Key Words :** high strength concrete, size effect, shear strength, fracture mechanics

## 1. はじめに

近年、コンクリートの高強度化が進み、既に土木学会コンクリート標準示方書では、コンクリート設計基準強度 $f_{ck}=80\text{N/mm}^2$ レベルのコンクリートが組み込まれている。工場製品では、高強度コンクリートは大規模コンクリート橋梁などのプレキャスト部材において既に数多くの適用事例がある。耐久性に優れ、部材断面の縮小化が可能である高強度コンクリートは、性能照査型設計が取り入れられたこれからの設計体系の中で、構造物の高機能化やコスト縮減などに寄与できる可能性を有しており、今後その適用範囲は広がっていくと考えられる。しかしながら、高強度コンクリートの特徴を活かした部材の設計を行うためには、材料および力学特性の把握に加えて、破壊形態や耐力に関する特性を十分に把握しておく必要がある。特に、せん断強度に関しては、高強度コンクリートの領域における破壊メカニズムおよび寸法効果は不明であり、その解明と算定式の確立が強く求められている。

せん断補強筋のないRCはり部材のせん断強度の算定については、これまで国内外において、実験結果に基づく経験則あるいは破壊エネルギー特性に着目した研究などがある。国内では、土木学会コンクリート標準示方書に算定式<sup>1)</sup>(以下、JSCE式)が示されている。このJSCE式は、既往の実験結果に関する分析・帰帰により得られた二羽らの提案式<sup>2)</sup>に基づいており、圧縮強度、部材寸法、引張鉄筋比および軸力の影響とともに、寸法効果を

有効高さの-1/4乗で考慮している。しかしながら、上記の提案式における検討対象データは、圧縮強度が比較的低い範囲に限られていることから、JSCE式の適用範囲は $f_{ck} \leq 80\text{N/mm}^2$ とされている。これに対しHillerborgらは、普通強度コンクリートはりのせん断強度の寸法効果について、破壊力学的手法によるFEM解析から、有効高さ $d$ と特性長さ $l_{ch}$ を用いて $d/l_{ch}$ の-1/4乗を提案している<sup>3)</sup>。

一方、高強度コンクリートに関するせん断強度の寸法効果は、近年研究が進められているもののデータの蓄積は少ない。今後さらに高強度コンクリートを実構造物に適用するためには、高強度コンクリートにおけるせん断強度の寸法効果を明確にし、これに基づく設計式が必要となる。これまで著者らは、RCはり部材のせん断破壊特性におよぼす部材寸法ならびにコンクリート強度の影響を明らかにすることを目的として、コンクリート圧縮強度、有効高さ $d$ 、およびせん断スパン $a$ と有効高さ $d$ の比(以下、せん断スパン比 $a/d$ )をパラメータとしたせん断補強筋のないRC単純はり部材のせん断実験を実施してきた<sup>4)5)</sup>。これら実験結果より、高強度コンクリートのせん断破壊の特徴として、普通強度コンクリートの場合に比べてひび割れの局所化が著しく、さらにその進展は早く、より脆性的な破壊となることが確認された。ひび割れの局所化は、コンクリートの軟化特性に起因することから、斜めひび割れ発生時における公称せん断応力度(以下、せん断強度)の寸法効果に関して破壊力学による検討を行い、高強度コンクリートにおけるせん断強度の算定式の提案とその検証を行った。

表-1 せん断補強筋のないRCはり部材のせん断強度に関する主な規準式および提案式

|                              | 規準式および提案式  | 適用範囲   |
|------------------------------|--|--|
| JSCE (1996) <sup>1)</sup>    | $\tau_c = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p_w} \cdot \sqrt[3]{1000/d}$ (1)   | $0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \leq 0.72 \text{N/mm}^2$<br>$f'_c \leq 80 \text{N/mm}^2$ |
| ACI (1999) <sup>7)</sup>     | $\tau_c = 1.9 \cdot \sqrt{f'_c} + 2500 p_w \cdot V_u \cdot d / M_u$ (2)<br>$d$ : (in), $f'_c$ : (psi)<br>$V_u$ : 断面での設計せん断力<br>$M_u$ : 断面での $V_u$ 時の設計モーメント                        | $\tau_c \leq (3.5 \sqrt{f'_c})$ (psi)<br>$\sqrt{f'_c} \leq 100 \text{psi}$         |
| CEB-FIP (1993) <sup>8)</sup> | $\tau_c = 0.12 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p_w} \cdot (1 + \sqrt{200/d})$ (3)  | $f'_c \leq 50 \text{N/mm}^2$   |
| 二羽ら <sup>2)</sup>            | $\tau_c = 0.2 \cdot \sqrt[3]{f'_c} \cdot \sqrt[3]{100 p_w} \cdot \sqrt[3]{1000/d} \cdot [0.75 + 1.4/(a/d)]$ (4)  | —  |
| Bazant and Kim <sup>9)</sup> | $\tau_c = \frac{8 \cdot \sqrt[3]{p_w} \left( \sqrt{f'_c} + 3000 \sqrt{p_w / (a/d)^5} \right)}{\sqrt{1 + d / 25 d_a}}$ (5)<br>$\tau_c$ : (psi), $f'_c$ : (psi), $d_a$ : 骨材の最大寸法(mm) | —  |

## 2. 既往の研究と規準式

せん断補強筋のないRCはりのせん断強度算定式は、国内では土木学会、海外ではACI、CEB-FIPなどで規準化されている(表-1)。以下、これら規準式をそれぞれUSCE式、ACI式、およびCEB-FIP式と呼び、各記号は特に明記がない限り、 $\tau_c$ : 斜めひび割れ発生時のせん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_t$ : コンクリートの引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_c$ : コンクリートのヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)、 $d$ : 有効高さ(mm)、 $b$ : 桁幅(mm)、 $a$ : せん断スパン(mm)、 $p_w$ : 引張鉄筋比(=  $A_s / (b \cdot d)$ )、 $A_s$ : 引張側鋼材の断面積(mm<sup>2</sup>)、とする。

JSCE式、およびCEB-FIP式では、有効高さの増大に伴うせん断強度の減少、すなわち寸法効果を考慮しているが、ACI式ではこれを考慮していない。また、各規準式とも圧縮強度に上限を定め、適用範囲を限定している。

せん断強度算定式に関して、上記のほかにも多くの実験式や理論式が提案されている。例えば、二羽らは Okamura and Higai<sup>10)</sup>、井畔ら<sup>11)</sup>の研究に基づき、JSCE式の基礎となる式(4)を提案した<sup>2)</sup>。

一方、破壊力学的アプローチによるせん断強度の寸法効果に関する研究もある。Bazantらは非線形破壊力学に基づき式(5)を提案した<sup>9)</sup>。式(5)によれば、骨材の最大寸法を有効高さに比例させれば寸法効果は消滅する。しかし、これは骨材径を変化させた実験結果に反するようであるとの報告もなされている<sup>12)</sup>。Hillerborgらは、破壊力学的手法によるRCはりのFEM解析を行い、せん断強度と引張強度の比  $\tau_{df}$  と、有効高さと後述の特性長さ  $l_{ch}$  の比  $d/l_{ch}$  の関係からせん断強度の寸法効果を論じ、せん断強度は有効高さの-1/4乗に比例することと、せん断強度の寸法効果の説明における破壊力学の有効性を報告した<sup>3)</sup>。

これら既往の研究の比較より、せん断強度の寸法効果の評価にはいくつかの考え方があり、有効高さに対して、

式(1)、(4)では-1/4乗で、式(3)、(5)では-1/2乗で寸法効果を考慮していることが分かる。しかし、これら式のほとんどは、実験データの回帰分析結果に基づいているものの、評価対象となっているせん断実験の多くは、圧縮強度50N/mm<sup>2</sup>以下のコンクリートであり、規準式では適用範囲に上限値を設定している。なお、本論文中では、既往のせん断強度算定式の高強度コンクリートにおける予測精度を確認するため、取って圧縮強度に関する適用範囲の上限を無視して適用している。

## 3. 実験方法

実験水準を表-2に、試験体図を図-1に示す。実験ケースのL、M、Uは目標とした圧縮強度レベルを表し、Lシリーズは普通強度コンクリート(36N/mm<sup>2</sup>)、Uシリーズは高強度コンクリート(100N/mm<sup>2</sup>)、Mシリーズはこれらの中間(60N/mm<sup>2</sup>)とした。本実験では、L、M、Uの各強度シリーズにおいて、せん断スパン比を一定( $a/d=3$ )とし、有効高さを変化させて寸法効果に着目したシリーズと、有効高さを一一定( $d=500\text{mm}$ )とし、せん断スパン比の影響( $a/d=2\sim 5$ )に着目したシリーズを設定した。

コンクリートの配合を表-3に示す。高強度コンクリートの製造には、高性能AE減水剤およびシリカフュームを使用した。骨材の最大寸法  $G_{max}$  は、試験体寸法にかかわらず一定( $G_{max}=20\text{mm}$ )とした。引張鉄筋はSD345とし、その諸元は降伏強度388N/mm<sup>2</sup>、引張強度555N/mm<sup>2</sup>およびヤング係数196kN/mm<sup>2</sup>であった。各試験体の引張鉄筋比および鉄筋径の合計と桁幅の比(=  $\Sigma$ 鉄筋径/桁幅)はほぼ同値に設定した。引張鉄筋は端部に直角フックを設けて定着した。せん断補強筋は配置せず、桁端部のみ引張鉄筋の抜き防止のためにスターラップを配置した。

載荷は2点集中載荷の静的載荷とし、試験体が破壊に

表-2 実験水準および実験結果

| 目的         | 実験<br>ケース | L<br>mm | b<br>mm | a<br>mm | d<br>mm | a/d  | $p_w$<br>% | $f'_c$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_t$<br>N/mm <sup>2</sup> | $E_c$<br>kN/mm <sup>2</sup> | $\tau_c$<br>N/mm <sup>2</sup> | 破壊<br>形態 |
|------------|-----------|---------|---------|---------|---------|------|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------|
| 寸法効果       | L-25-3    | 2750    | 150     | 750     | 250     | 3    | 1.53       | 37.8                        | 3.05                       | 27.9                        | 1.15                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.48                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.50                          | 斜め       |
|            | L-50-3    | 4500    | 150     | 1500    | 500     | 3    | 1.53       | 37.4                        | 2.95                       | 27.8                        | 1.55                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.05                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.16                          | 斜め       |
|            | L-100-3   | 9000    | 350     | 3000    | 1000    | 3    | 1.36       | 35.7                        | 2.75                       | 27.1                        | 0.91                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 34.7                        | 2.71                       | 28.7                        | 0.85                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 33.7                        | 3.16                       | 28.7                        | 0.95                          | 斜め       |
|            | M-25-3    | 2750    | 150     | 750     | 250     | 3    | 1.53       | 68.8                        | 3.90                       | 37.0                        | 1.37                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.74                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.43                          | 斜め       |
|            | M-50-3    | 4500    | 150     | 1500    | 500     | 3    | 1.53       | 69.4                        | 3.92                       | 36.3                        | 1.16                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.44                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.51                          | 斜め       |
|            | M-100-3   | 9000    | 350     | 3000    | 1000    | 3    | 1.36       | 59.2                        | 4.05                       | 31.6                        | 0.90                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 53.7                        | 3.43                       | 33.2                        | 0.97                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 53.0                        | 3.28                       | 33.2                        | 0.97                          | 斜め       |
|            | U-25-3    | 2750    | 150     | 750     | 250     | 3    | 1.53       | 101                         | 4.47                       | 37.8                        | 1.07                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.50                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.25                          | 斜め       |
|            | U-50-3    | 4500    | 150     | 1500    | 500     | 3    | 1.53       | 102                         | 4.59                       | 37.5                        | 1.15                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.10                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.30                          | 斜め       |
| U-100-3    | 9000      | 350     | 3000    | 1000    | 3       | 1.36 | 103        | 4.75                        | 39.7                       | 0.80                        | 斜め                            |          |
|            |           |         |         |         |         |      | 89.8       | 3.92                        | 36.7                       | 0.75                        | 斜め                            |          |
|            |           |         |         |         |         |      | 92.1       | 4.28                        | 36.7                       | 0.80                        | 斜め                            |          |
| せん断スパン比の影響 | L-50-2    | 3500    | 150     | 1000    | 500     | 2    | 1.53       | 37.2                        | 2.92                       | 27.7                        | 1.33                          | 圧縮       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.30                          | 圧縮       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.39                          | 圧縮       |
|            | L-50-4    | 5500    | 150     | 2000    | 500     | 4    | 1.53       | 37.7                        | 3.03                       | 27.9                        | 0.94                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.13                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 36.4                        | 2.90                       | 31.6                        | 1.18                          | 斜め       |
|            | L-50-5    | 6500    | 150     | 2500    | 500     | 5    | 1.53       | 37.8                        | 3.04                       | 27.9                        | —                             | 曲げ       |
|            | M-50-2    | 3500    | 150     | 1000    | 500     | 2    | 1.53       | 69.3                        | 3.91                       | 36.5                        | 1.31                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.63                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.53                          | 圧縮       |
|            | M-50-4    | 5500    | 150     | 2000    | 500     | 4    | 1.53       | 69.8                        | 3.94                       | 35.8                        | 1.09                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | —                             | 曲げ       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 51.9                        | 3.46                       | 29.8                        | 1.21                          | 斜め       |
|            | M-50-5    | 6500    | 150     | 2500    | 500     | 5    | 1.53       | 70.4                        | 3.76                       | 35.1                        | —                             | 曲げ       |
|            | U-50-2    | 3500    | 150     | 1000    | 500     | 2    | 1.53       | 102                         | 4.67                       | 37.3                        | 1.41                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.26                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.38                          | 圧縮       |
|            | U-50-4    | 5500    | 150     | 2000    | 500     | 4    | 1.53       | 101                         | 4.43                       | 37.9                        | 0.97                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.05                          | 斜め       |
|            |           |         |         |         |         |      |            | 92.9                        | 4.91                       | 40.8                        | 1.12                          | 斜め       |
|            | U-50-5    | 6500    | 150     | 2500    | 500     | 5    | 1.53       | 100                         | 4.38                       | 37.9                        | —                             | 曲げ       |

注) コンクリート材料試験結果は実験時の値を表す。

$\tau_c$  は試験体および載荷装置の自重を考慮し、 $d=1000\text{mm}$  のケースは引張鉄筋比を  $p_w=1.53\%$  に換算して補正している。  
破壊形態の「斜め」は斜め引張破壊を、「圧縮」はせん断圧縮破壊を、「曲げ」は曲げ破壊を表す。

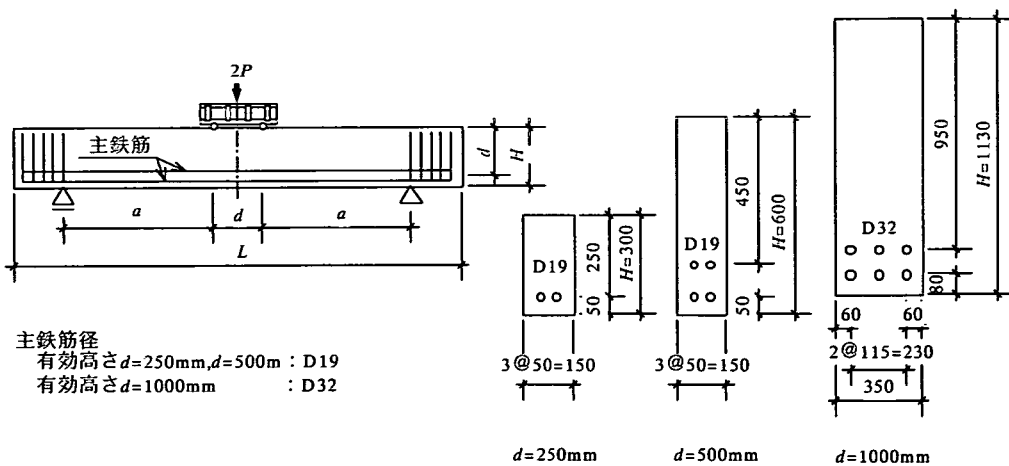


図-1 試験体図

(単位 : mm)

表-3 コンクリートの配合

| ケース | 配合強度<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 水結合材比<br>$W/B(\%)$ | 細骨材率<br>$s/a(\%)$ | 単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |          |               |            |            |                       |
|-----|------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|----------|---------------|------------|------------|-----------------------|
|     |                                    |                    |                   | 水 $W$                         | $B$      |               | 細骨材<br>$S$ | 粗骨材<br>$G$ | 混和剤<br>$\times C(\%)$ |
|     |                                    |                    |                   |                               | セメント $C$ | シリカフェューム $SF$ |            |            |                       |
| L   | 36                                 | 56.5               | 47.9              | 162                           | 287      | 0             | 864        | 966        | 1.1                   |
| M   | 60                                 | 35.0               | 46.1              | 165                           | 471      | 0             | 789        | 948        | 1.2                   |
| U   | 100                                | 21.0               | 42.2              | 160                           | 686      | 76            | 618        | 869        | 1.8                   |

至るまで荷重を単調増加させ、等モーメント区間長は常に有効高さに一致させた。試験体数はせん断スパン比5のケースのみ1体、その他のケースでは各3体の計48体とした。

#### 4. 各種要因の検討

実験結果を表-2に示す。斜め引張破壊およびせん断圧縮破壊をした試験体では、斜めひび割れ発生時において引張鉄筋は降伏ひずみに達していなかった。なお、同一条件であっても実験結果に一部ばらつきの大きいものがあるが、この理由については不明である。

本実験では、有効高さ1000mmのケースは試験体幅が異なるため引張鉄筋比が異なる。鈴木らの研究によれば、高強度コンクリートにおいても斜めひび割れ発生時のせん断強度は式(4)と同じく引張鉄筋比の1/3乗に比例する結果が得られている<sup>13)</sup>。これに基づき、有効高さ1000mmのケースでは実験で得られたせん断強度に引張鉄筋比に関する補正係数( $p_w/p_w$ )<sup>13)</sup>を乗じ、有効高さ250mmおよび500mmのケースの引張鉄筋比と同じ $p_w=1.53\%$ に換算して補正している。

##### (1) 主な規準式との比較

2章に示したJSCE式、CEB-FIP式およびACI式より算出

されるせん断強度と、表-2のせん断スパン比3に関する実験結果の比較を図-2に示す。図-2より、寸法効果を考慮しているJSCE式およびCEB-FIP式は、各規準式の圧縮強度に関する適用範囲内では、有効高さ1000mmのケースに対しても安全側の評価を与えている。一方、寸法効果を考慮していないACI式は、圧縮強度にかかわらず有効高さ1000mmのケースに対しては危険側の評価を与えている。

各規準式の圧縮強度に関する適用範囲外である圧縮強度 $90\sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートでは、JSCE式およびCEB-FIP式は、有効高さ1000mmのケースにおいてやや危険側の評価となっているが、その他のケースでは安全側の評価となっている。ACI式は、全ての有効高さで危険側の評価となり、有効高さが大きいケースほど規準式と実験結果の差が大きくなる傾向が認められる。いずれの規準式とも、有効高さの大きいケースほど実験結果との差が大きく、さらに危険側の評価となる傾向にあった。特に、寸法効果の考慮されていないACI式は、有効高さの大きなケースにおいて他の2式に比べて実験結果との差が著しい。

以上より、せん断強度を合理的に評価するためには寸法効果の適切な考慮が必要であること、さらに、高強度コンクリートを用いたRCIはりのせん断強度は、従来の規準式の適用の延長では適切に評価できないことが明らかとなった。

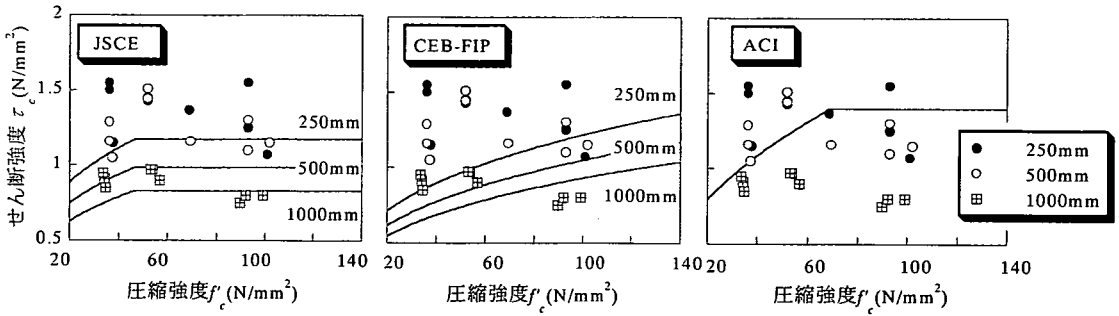


図-2 規準式と実験結果の比較

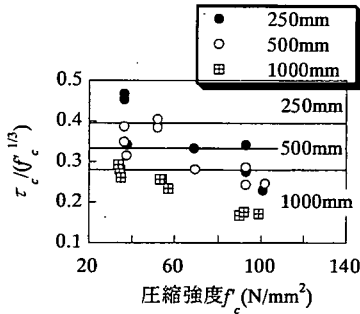


図-3 せん断強度と圧縮強度の関係

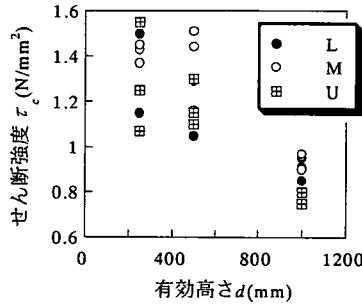


図-4 せん断強度と有効高さの関係

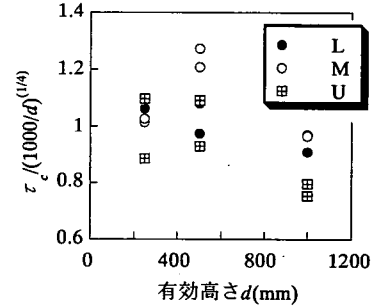


図-5 せん断強度における有効高さの影響

## (2) せん断強度におけるコンクリート強度の影響

式(4)より得られるせん断強度と表-2のせん断スパン比3に関する実験結果の比較を図-3に示す。せん断強度におよぼすコンクリート強度の影響を検討するため、縦軸は式(4)に従ってせん断強度  $\tau_c$  を  $f_c^{1/3}$  で除している。図中の実線は式(4)による各有効高さの計算結果であり、圧縮強度にかかわらず一定値で示される。ところが、実験結果はいずれの有効高さにおいても、 $\tau_c f_c^{1/3}$  の値は圧縮強度により変化し、圧縮強度  $80\text{N/mm}^2$  を超える範囲では、明らかに圧縮強度の増大に対してせん断強度は低下する傾向が認められる。これより、高強度コンクリートでは、せん断強度と圧縮強度の関係は普通強度コンクリートのそれとは異なることが考えられる。

## (3) せん断強度における有効高さの影響

表-2のせん断スパン比3に関する実験結果と有効高さの関係を図-4に示す。いずれの強度の試験体においても、有効高さが高いほどせん断強度は低下している。

式(4)では、寸法効果を有効高さの1/4乗で考慮している。これに基づき、表-2のせん断スパン比3に関する実験結果を有効高さの1/4乗で除した  $\tau_c / (1000/d)^{1/4}$  と有効高さの関係を図-5に示す。ここで、せん断強度は圧縮強度の影響を受けることから、せん断スパン比3の実験結果の内、各シリーズで同程度の圧縮強度とみなせるケースについて図中に示した。高強度コンクリートに相当するU

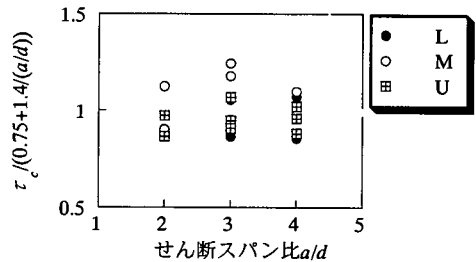


図-6 せん断スパン比がせん断強度におよぼす影響

シリーズでは、有効高さ1000mmにおける  $\tau_c / (1000/d)^{1/4}$  の値は、LおよびMシリーズに比べて顕著に低下している。すなわち、高強度コンクリートでは、有効高さの1/4乗よりも大きな寸法効果が存在する可能性が示された。

以上より、せん断強度の寸法効果は圧縮強度に依存し、高強度コンクリートでは、普通強度コンクリートに比べて寸法効果はより大きいことが確認された。

## (4) せん断強度とせん断スパン比の関係

式(4)では、せん断強度におけるせん断スパン比の影響は、 $(0.75 + 1.4/(a/d))$  の項で考慮されている。これに基づき、表-2の実験結果を  $(0.75 + 1.4/(a/d))$  で除し、せん断強度におよぼすせん断スパン比の影響について検討した。なお、検討対象データは、斜め引張破壊の形態を呈したものとした。せん断スパン比と  $\tau_c / (0.75 + 1.4/(a/d))$  の関係を図-6

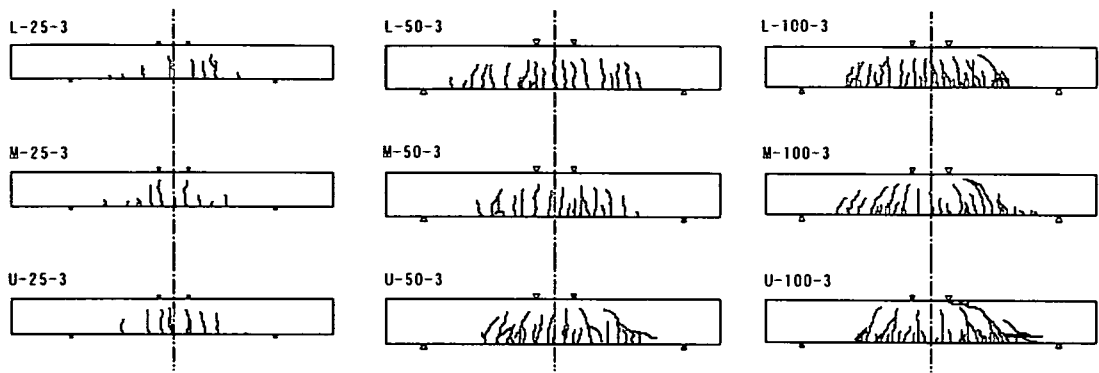


図-7 ひび割れ進展状況の比較 ( $\tau=0.80\text{N/mm}^2$ )

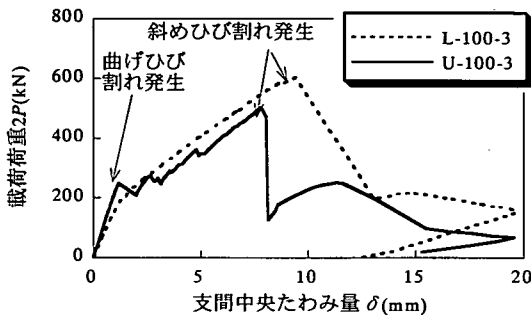


図-8 荷重-たわみ関係の比較

に示す。図-6より $\tau_j(0.75+1.4(a/d))$ はほぼ一定値であることから、せん断強度におけるせん断スパン比の影響は、圧縮強度にかかわらず式(4)のせん断スパン比の要因により評価可能と判断できる。

以上より、高強度コンクリートのせん断強度は、従来の標準式の適用の延長では、有効高さが大きくなると危険側の評価となる場合があること、さらに、その寸法効果は普通強度コンクリートに比べて大きくなることが確認された。また、せん断強度とせん断スパン比の関係は、圧縮強度に関係なくほぼ一定であることが分かった。

## 5. RCはりのせん断強度の破壊力学的検討

4章において、高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果は、普通強度コンクリートに比べて大きいことが明らかとなった。本章では、せん断強度の寸法効果について破壊力学による検討を行った。

### (1) ひび割れ性状とその局所化

圧縮強度および部材寸法によるひび割れ進展状況を比較するため、同一公称せん断応力度時における各実験ケースのひび割れ状況を図-7に示す。ここでは、実験ケー

スU-100-3のせん断破壊時におけるせん断強度を基準とし、ひび割れの進展状況を比較するため、縮尺を変えて同一スケールで表示している。各試験体の断面図心位置より圧縮側では、ひび割れの局所化が認められ、その傾向は有効高さが大きくなるほど、さらに高強度になるほど顕著に現れており、このひび割れの局所化の差が、せん断強度やその寸法効果に関与していると考えられる。

有効高さとしひび割れの局所化の関係では、有効高さに対する引張鉄筋の相対的な位置関係が要因の一つであり、有効高さが大きくなると引張鉄筋のひび割れ分散効果の影響範囲は相対的に小さくなるため、鉄筋から離れた位置ではひび割れの局所化が顕著になると推測される。なお、普通強度コンクリートを対象としたせん断補強筋のないRCはりの解析的研究として、ひび割れ以後も十分な引張応力の伝達を期待できる引張鉄筋周辺の領域と、急激な引張軟化を呈する無筋領域とに分割し、後者の領域に破壊力学による軟化を考慮した構成則を適用し、そのせん断強度の寸法効果を示したものもある<sup>14),15)</sup>。

一方、高強度コンクリートでは、フラクチャープロセスゾーン(以下、FPZ)の広がり普通強度コンクリートに比べて狭いとされている<sup>16)</sup>。FPZ以外の領域はほとんど線形弾性的に挙動するので、ひび割れ先端前方の領域に局所化されたFPZ近傍でエネルギーのほとんどが集中的に消費されるため<sup>17)</sup>、ひび割れの局所化がより顕著に現れると推測される。図-8は本実験のL-100-3とU-100-3の支間中央部における荷重-たわみ曲線を比較したものであり、最大荷重以後の荷重低下の差は、ひび割れの局所化の相違に起因するものと考えられる。また、両者の初期剛性の比は、コンクリートの材料試験より得られたヤング係数比とはほぼ一致することから、初期剛性の相違はヤング係数の相違によるものと考えられる。

FPZの進展は、コンクリートの引張軟化特性により局所化される<sup>17)</sup>。さらに、ひび割れの局所化はFPZの局所化に起因するものと考えられる。部材寸法が大きいほど、さ

表-4 破壊エネルギー試験結果

| ケース | 圧縮強度              | 引張強度              | ヤング係数              | 密度                | 破壊エネルギー | 特性長さ |
|-----|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------|------|
|     | $f'_c$            | $f_t$             | $E_c$              |                   |         |      |
|     | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | kN/mm <sup>2</sup> | g/cm <sup>3</sup> | N/mm    | mm   |
| L   | 35.1              | 2.87              | 29.0               | 2.28              | 0.188   | 661  |
| M   | 50.2              | 4.19              | 32.1               | 2.34              | 0.200   | 366  |
| U   | 85.6              | 5.47              | 37.2               | 2.40              | 0.218   | 271  |

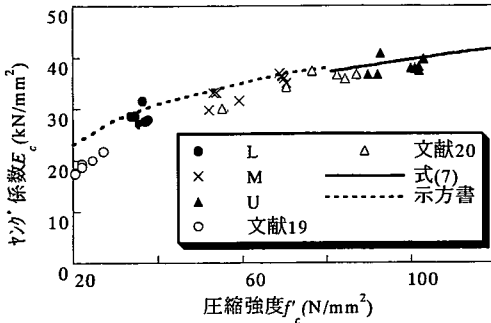


図-9 ヤング係数の推定値と試験結果の比較

らに圧縮強度が高いほど、ひび割れの局所化が顕著となることから、高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果に関するより合理的な評価およびせん断強度の算定に、コンクリートの引張軟化特性の考慮すなわち破壊力学の適用は有効と思われる。

面内せん断型のモードII型の破壊エネルギーに関する試験および評価方法は、いくつか提案されているが、破壊エネルギーの定義さえ明確にされていないのが現状である<sup>10)</sup>。一方、引張り型のモードI型の破壊エネルギーに関する試験および評価方法は、既に日本コンクリート工学協会の「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会」により、「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」(以下、試験法案)として立案されている<sup>10)</sup>。

著者らは、破壊に至ったひび割れ面の変形に関する詳細な計測より、斜めひび割れ面の「ずれ」よりも鉛直方向の「開き」の方が支配的であることを確認している<sup>9)</sup>。さらに、斜めひび割れの破壊特性をモードI型のひび割れ特性と等価とした解析が、せん断強度の寸法効果に関して、比較的よい結果を与えている報告もある<sup>10)</sup>。これらより、ここではモードI型の破壊エネルギーを適用し、せん断強度の寸法効果に関する検討を試みた。

(2) 破壊エネルギーの評価<sup>9)</sup>

本研究では、破壊エネルギーの評価を前述の試験法案に準じて行った。試験はせん断実験に対応させ、同一材料・配合となる表-3に示すL, M, Uの3種類のコンク

表-5 検討対象とした既往の研究データ

|      | 強度   | $d$ | $p_w$ | $f'_c$            | $f_t$             | $E_c$ (注1)         | $\tau_c$ (注2)     |      |
|------|------|-----|-------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------|
|      |      | mm  | %     | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | kN/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |      |
| 文献19 | L    | 300 | 1.23  | 24.8              | 2.29              | 20                 | 1.13              |      |
|      |      |     | 1.26  | 24.8              | 2.29              | 20                 | 1.00              |      |
|      | L    | 500 | 1.35  | 27.3              | 2.27              | 21.8               | 0.98              |      |
|      |      |     | 1.35  | 27.3              | 2.27              | 21.8               | 1.20              |      |
|      | L    | 950 | 1.22  | 20.7              | 1.87              | 17.6               | 0.70              |      |
|      |      |     | 1.22  | 20.6              | 2.00              | 17.4               | 0.77              |      |
| 文献20 | M    | 350 | 1.19  | 55.1              | 3.99              | 30.1               | 1.62              |      |
|      |      |     | 1.19  | 70.4              | 4.02              | 34.3               | 1.61              |      |
|      | U    | 350 | 1.19  | 82.5              | 4.02              | 36.7               | 1.75              |      |
|      |      |     | 0.76  | 84.3              | 4.71              | 35.9               | 1.31              |      |
|      | U    | 750 | 0.55  | 87.2              | 4.00              | 36.8               | 0.98              |      |
|      |      |     | 1.10  | 76.5              | 3.83              | 37.4               | 1.01              |      |
| 文献21 | L    | 150 | 2.65  | 32.4              | 2.75              | 28.7               | 1.52              |      |
|      |      |     | 2.65  | 32.4              | 2.75              | 28.7               | 1.47              |      |
|      | L    | 150 | 2.65  | 38.3              | 3.14              | 30.5               | 1.63              |      |
|      |      |     | 2.65  | 38.3              | 3.14              | 30.5               | 1.52              |      |
|      | M    | 150 | 2.65  | 48.6              | 3.47              | 32.7               | 1.64              |      |
|      |      |     | 2.65  | 48.6              | 3.47              | 32.7               | 1.79              |      |
|      | M    | 150 | 2.65  | 70.9              | 5.14              | 36.9               | 1.85              |      |
|      |      |     | 2.65  | 70.9              | 5.14              | 36.9               | 1.88              |      |
|      | U    | 150 | 2.65  | 83.4              | 5.52              | 37.5               | 2.12              |      |
|      |      |     | 2.65  | 83.4              | 5.52              | 37.5               | 2.36              |      |
|      | U    | 150 | 2.65  | 128               | 7.84              | 42.7               | 1.91              |      |
|      |      |     | 2.65  | 128               | 7.84              | 42.7               | 1.89              |      |
|      | U    | 225 | 2.55  | 125               | 7.82              | 42.3               | 1.63              |      |
|      |      |     | 2.55  | 125               | 7.82              | 42.3               | 1.54              |      |
|      | U    | 300 | 2.58  | 128               | 7.84              | 42.7               | 1.44              |      |
|      |      |     | 2.58  | 128               | 7.84              | 42.7               | 1.27              |      |
|      | 文献22 | U   | 150   | 1.27              | 90.6              | 4.91               | 43.2              | 2.01 |
|      |      |     |       | 1.23              | 95.5              | 5.36               | 43.2              | 1.44 |
| U    |      | 350 | 0.54  | 92.5              | 5.42              | 43.2               | 1.49              |      |
|      |      |     | 0.85  | 105               | 6.73              | 43.2               | 1.45              |      |
| U    |      | 550 | 1.06  | 107               | 6.08              | 43.2               | 1.22              |      |
|      |      |     | 0.89  | 108               | 6.73              | 43.2               | 1.01              |      |

注1) 文献21のヤング係数  $E_c$  のみ式(7)で算定している。

注2) せん断強度  $\tau_c$  は引張鉄筋比を換算した補正值である。

リートについて行った。

破壊エネルギー試験の結果を表-4に示す。これらの値は各ケース 5-8 体の平均値である。表中の特性長さは、上述の試験から得られた破壊エネルギー  $G_f$  を用い、Gustafsson および Hillerborg らによって提案された特性長さ  $l_{ch}$  は次式より求めた<sup>9)</sup>。

$$\begin{aligned}
 l_{ch} &= 1000 E_c \cdot G_f / f_t^2 \\
 &= G_f / (2 \cdot 1/2 \cdot f_t \cdot f_t / 1000 E_c) \\
 &= G_f / 2G_c
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

ここに、 $G_c$  : ひび割れ発生までに部材中に蓄積される単位体積あたりの弾性エネルギー、とする。特性長さは、一般にこの値が小さいほど脆性的な破壊となる。試験結果では、圧縮強度の増大に伴い特性長さは顕著に減少しており、圧縮強度が高いほど脆性的な破壊となることが理解される。一方、損傷が局所化すれば、損傷の進展に

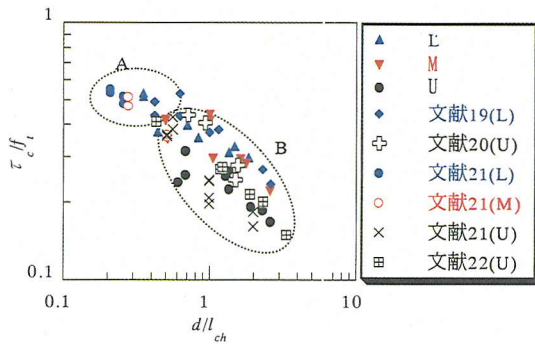


図-10  $d/l_{ch}$  と  $\tau_c/f_t$  の関係

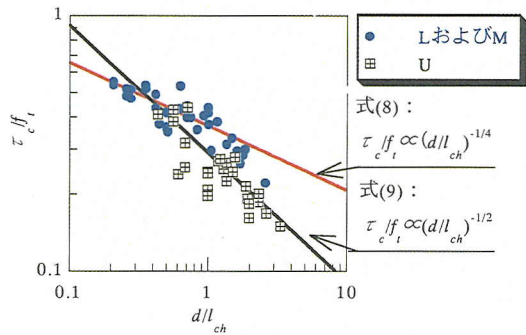


図-11 寸法効果の検討

表-6 寸法効果の検討に適用した破壊エネルギーと特性長さ

| 圧縮強度<br>$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 破壊エネルギー<br>$G_f$ (N/mm) | 特性長さ $l_{ch}$ (mm) |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------|
|                                     |                         | 表-2 および 4          |
| L                                   | ~45                     | 540~945            |
| M                                   | 45~80                   | 280~617            |
| U                                   | 80~                     | 151~521            |

に伴う解放エネルギー、すなわち破壊に要するエネルギーの総量は小さくなる。これは、コンクリートの高強度化に伴い特性長さが小さくなることと良い対応を示す。このことから、特性長さは損傷の局所化、すなわちひび割れの局所化傾向を定量評価できるため、せん断強度の寸法効果の評価において有効な指標となると考えた。

### (3) せん断強度算定式の誘導と検証

前節の結果に基づき、破壊エネルギー試験から得られた特性長さを用いて、せん断強度の寸法効果に関する検討を行い、せん断強度算定式の誘導を行う。

#### a) 破壊力学的アプローチによる寸法効果の検討

寸法効果の検討は、せん断スパン比3に関するデータを対象に行った。検討結果の精度を高めるため、本実験結果(データ数 27)に、同一せん断スパン比に関する34の既往の研究データ(表-5)を追加した。既往の研究データはいずれもせん断補強筋はなく、荷重は2点または1点集中荷重である。なお、表-5中のせん断強度 $\tau_c$ は、各データの引張鉄筋比が異なるため、式(4)に基づいて実験で得られたせん断強度に引張鉄筋に関する補正係数 $(p_{wd}/p_w)^{1/3}$ を乗じ、本実験の有効高さ250mmおよび500mmのケースの引張鉄筋比と同じ $p_{wd}=1.53\%$ に換算して補正した。

既往の研究データのうち明記されていないヤング係数については推定値を示した。その推定値は、 $f'_c \leq 80\text{N/mm}^2$ ではコンクリート標準示方書の値<sup>1)</sup>を線形補間し、 $f'_c > 80\text{N/mm}^2$ では式(7)の友澤らの式<sup>2)</sup>より求めた。

$$E_c = 9.2 \cdot (100 \cdot f'_c / 9.8)^{0.3} \cdot (\gamma / 1000)^2 \times 9.8 / 100 \quad (7)$$

ここに、コンクリートの密度 $\gamma$ は $2346\text{kg/m}^3$ とした<sup>20)</sup>。圧縮強度とヤング係数の関係について、本実験および既往の研究データと推定値の比較を図-9に示す。図-9より、実測値と推定値は概ね一致しており、ヤング係数の評価は妥当であると判断できる。

既往の研究データ(表-5)の破壊エネルギーは不明であるため、表-4の実測値を圧縮強度によって3段階に分けて適用し(表-6)、特性長さを求めた。

前述のように、Gustafsson および Hillerborg らは普通強度コンクリートのせん断強度の寸法効果について、 $\tau_c/f_t$  は  $d/l_{ch}$  の-1/4 乗に比例すると報告している<sup>3)</sup>。本研究では、せん断強度の寸法効果の要因と推測されたひび割れの局所化傾向について、定量評価が可能であった特性長さに着目し、本実験結果(表-2)、および既往の研究データ(表-5)のせん断強度の寸法効果に関して、このアプローチを適用して検討を行った。結果を図-10に示す。

図-10より、Gustafsson および Hillerborg らの研究と同じく、 $d/l_{ch}$  と  $\tau_c/f_t$  には相関関係が存在することが確認できる。低中強度コンクリート(L および M)に関するデータは、図-10中のA およびBの両グループに分布しているのに対し、高強度コンクリート(U)に関するデータはほとんどがBグループに属している。このことから、高強度コンクリートの寸法効果が、低中強度コンクリートのそれとは異なる傾向を示すことが理解できる。

図-11は、図-10と同じく $d/l_{ch}$  と  $\tau_c/f_t$  の相関関係を、低中強度コンクリート(L および M)と高強度コンクリート(U)に分けて示している。L および M と U の  $\tau_c/f_t$  と  $d/l_{ch}$  の相関に関する回帰分析結果は、それぞれ  $d/l_{ch}$  の-1/4 乗と-1/2 乗にほぼ比例した。そこで、前者は  $d/l_{ch}$  の-1/4 乗に、後者は-1/2 乗に比例すると仮定し、それぞれについて最小二乗法により関係式を求め、式(8)の関係は赤の実線で、式(9)の関係は黒の実線で図-11中に示した。

$$\tau_c / f_t \propto (d/l_{ch})^{-1/4} \quad (8)$$

$$\tau_c / f_t \propto (d/l_{ch})^{-1/2} \quad (9)$$



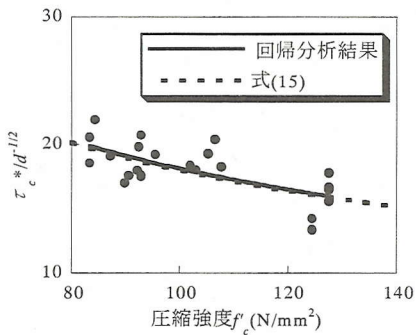


図-12 圧縮強度 $f'_c$ と定数 $n$ および $m$ の関係

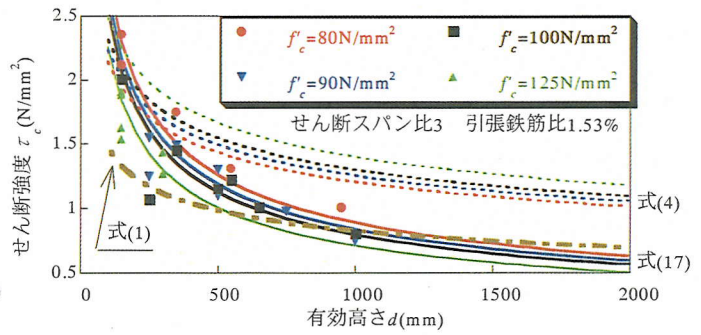


図-13 提案式と実験結果の比較

低中強度コンクリートに関する実験結果は式(8)の関係式で表され、これは JSCE 式にも導入されている既往の寸法効果則(有効高さの $1/4$  乗に比例)と一致することを示している。一方、高強度コンクリートの実験結果は、明らかに式(8)で表される相関と異なる傾向を示し、 $\tau_{df}$  は  $d/l_{ch}$  の $1/2$  乗、すなわちせん断強度は有効高さの $1/2$  乗に比例した。

以上、破壊力学を適用し、せん断強度の寸法効果に関する検討を行った。その結果、特性長さをを用いることにより、高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果に関して、式(9)の関係式で評価することができた。次項ではこの結果に基づき、高強度コンクリートにおけるせん断強度算定式の誘導と検証を行う。

#### b) 高強度コンクリートにおけるせん断強度算定式の誘導と検証

せん断強度を合理的に評価するためには寸法効果、ならびにせん断強度に影響を及ぼす諸要因の適切な設定が不可欠である。JSCE 式の基礎となった二羽らの式(4)は圧縮強度、引張鉄筋比、有効高さおよびせん断スパン比に関する要因の積から成り立ち、普通強度コンクリートでは実験結果と良く一致する結果が得られている<sup>2)</sup>。そこで、高強度コンクリートにおけるせん断強度算定式においても、同様に諸要因の考慮を各要因の積として評価することとした。

引張鉄筋比およびせん断スパン比の影響については、前述のように、高強度コンクリートのせん断強度における引張鉄筋比の要因は、式(4)で評価される普通強度コンクリートのそれと変わらないことが報告されている<sup>13)</sup>。また、せん断スパン比の影響については、せん断強度とせん断スパン比の関係は圧縮強度によらないこと、式(4)のせん断スパン比に関する要因で評価可能であることを4章4節において確認した。以上より、せん断強度 $\tau_c$ について引張鉄筋比およびせん断スパン比の影響を排除したせん断強度の補正值 $\tau_c^*$ は、以下の関係式で表せる。

$$\tau_c^* = \tau_c / \left\{ (100 p_w)^{1/3} \cdot (0.75 + 1.4/a/d) \right\} \quad (10)$$

次に、圧縮強度および有効高さの影響について検討する。前項の寸法効果の検討で使用したデータは、全てせん断スパン比3で一定であることから、これらのデータ間にはせん断スパン比の影響はない。また、引張鉄筋比の相違は補正してあるため、この影響はほとんどないと思われる。したがって、前項の検討データは、圧縮強度などに代表される材料特性値および有効高さにはほぼ支配されていると考えられる。有効高さの影響は寸法効果に他ならないので、前項の結果、すなわち式(9)が適用できる。ここで、CEB-FIP Model Code90<sup>9)</sup>では、破壊エネルギーをコンクリートの圧縮強度と骨材の最大寸法の関係として次式で与えている。

$$G_f = G_{f0} (f'_c / f'_{c0})^{0.7} \quad (11)$$

ただし、 $G_{f0}$ : 骨材の最大寸法に依存する破壊エネルギーの基本値、 $f'_{c0}$ :  $10\text{N/mm}^2$ 、 $f'_c \leq 80\text{N/mm}^2$ とされている。したがって、 $f'_c > 80\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを対象としている本研究は適用範囲外であるが、高強度コンクリートにおける破壊エネルギーも、圧縮強度に依存すると考え、ここでは高強度コンクリートの破壊エネルギーを次式で仮定した。

$$G_f \propto f'_c{}^{m_1} \quad (12)$$

ここに、 $m_1$ : 定数、とする。さらに、式(7)および式(12)より以下の関係が成り立つ。

$$E_c \cdot G_f \propto (f'_c)^{0.3} \cdot (f'_c)^{m_1} \propto f'_c{}^{m_2} \quad (13)$$

ここに、 $m_2$ : 定数、とする。これより式(9)は、式(6)および式(13)から、比例定数を $n$ とすれば、

$$\begin{aligned} \tau_c^* &= n \cdot f_t \cdot \left( d \cdot f_t^2 / E_c \cdot G_f \right)^{-1/2} \\ &= n \cdot f'_c{}^m \cdot d^{-1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

となり、 $\tau_c^*$ は圧縮強度と有効高さの関係式として表す

ことができる。ただし、 $m$ ：定数、とする。以上より、せん断強度は有効高さ、材料特性値としては圧縮強度を用いて評価可能となった。

次に、本実験結果(表-2)および既往の研究データ(表-5)のうち、高強度コンクリート( $f'_c > 80\text{N/mm}^2$ )に関する実験結果を用いて定数 $n$ および $m$ 、すなわち $\tau_c^*/d^{1/2}$ と $f'_c$ の関係を求める。 $\tau_c^*/d^{1/2}$ と $f'_c$ の関係を図-12に、回帰分析結果(図中実線)を以下に示す。

$$\tau_c^*/d^{-1/2} = 190f'_c{}^{-0.51} \quad (\text{相関係数 } 0.66)$$

さらに、上式を実用的な形として下式(15)で簡略化し、図-12に破線で示した。

$$\tau_c^*/d^{-1/2} = 180f'_c{}^{-1/2} \quad (\text{相関係数 } 0.66) \quad (15)$$

図-12より、式(15)は回帰分析結果とほぼ一致し、圧縮強度と $\tau_c^*/d^{1/2}$ の関係とも比較的良好な相関を示すことが分かる。よって、式(14)は次式で表せる。

$$\tau_c^* = 180f'_c{}^{-1/2} \cdot d^{-1/2} \quad (16)$$

式(16)から明らかなように、高強度コンクリートのせん断強度における材料特性の要因は、普通強度コンクリートのその $f'_c{}^{1/3}$ と異なり、 $f'_c{}^{-1/2}$ で評価された。

以上より、高強度コンクリート(圧縮強度  $80 < f'_c \leq 125\text{N/mm}^2$ )を対象としたせん断強度の提案式として次式を提案する。

$$\begin{aligned} \tau_c &= \tau_c^* \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (0.75 + 1.4/(a/d)) \\ &= 180f'_c{}^{-1/2} \cdot d^{-1/2} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (0.75 + 1.4/(a/d)) \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)の精度を検証するため、せん断スパン比3および引張鉄筋比1.53%とし、圧縮強度80,90,100,125N/mm<sup>2</sup>に相当する本実験結果(表-2)および既往の研究データ(表-5)と各圧縮強度におけるせん断強度の計算結果の比較を図-13に示す。なお、図-13には引張鉄筋比1.53%の実験結果、および引張鉄筋比1.53%に換算した補正値を示した。本図では、各圧縮強度において有効高さをパラメータとし、式(17)による計算結果を実線で、式(1)(JSCC式)および式(4)による計算結果を一点鎖線および破線で表している。図-13より、式(1)による計算結果は、圧縮強度が80~100N/mm<sup>2</sup>、有効高さが1000mm未満の範囲では概ね安全側ではあるが、特に有効高さが小さい場合、せん断強度を過小評価する傾向が認められ、逆に有効高さが大きくなるほど実験結果に対する安全率は小さくなる傾向が認められる。高強度コンクリートに対しても、式(1)の準用は適切な安全係数の設定により可能とは考えられるが、上記の傾向から一律な安全係数の設定は合理的ではなく、特に、部材寸法の大きな構造物への適用にあたっては十分な配慮が必要と思われる。一方、式(17)は実験結果を精度良く評価しているとともに、圧縮強度

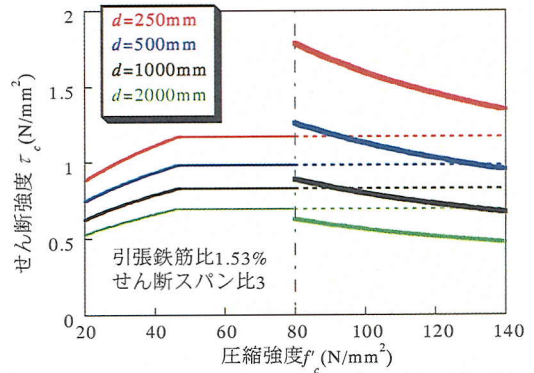


図-14 式(1)と式(17)の $f'_c=80\text{N/mm}^2$ における連続性

80~125N/mm<sup>2</sup>および有効高さ150~1000mmの範囲では同程度の精度をもって評価していることが分かる。したがって、式(17)は高強度コンクリートの寸法効果を妥当に評価しており、高強度コンクリートの長所を活かした合理的なせん断強度の算定が可能と思われる。なお、表-2および表-5の高強度コンクリートに関する実験結果のうち、せん断スパン比3の実験結果(データ数26)と式(1)および式(17)の計算結果の比は、前者は平均値1.27、変動係数17.5%、後者は平均値1.01、変動係数11.3%であった。また、同じく高強度コンクリートに関する実験結果のうち、せん断スパン比に関係なく斜め引張破壊をしたケース(データ数31)の実験結果と式(17)による計算結果の比は平均値1.01、変動係数10.7%であり、式(17)はせん断スパン比が異なる場合も同等の精度を有するといえる。しかしながら、式(17)は実験データに基づく実験式である。現段階では高強度コンクリートに関して、破壊エネルギー試験データおよび部材寸法が大きい範囲におけるせん断実験データは十分とはいえない。したがって、式(17)の設計への適用にあたっては安全係数を大きめに設定し、計算結果が安全側となるような配慮を施す必要があると考える。今後新たに蓄積されるデータに基づく再検討により、さらに式(17)の精度の向上を図っていきたい。

最後に、せん断強度と圧縮強度の関係における、現行の示方書式(式(1))と提案式(式(17))による計算結果の比較を示す。示方書式は適用範囲内( $f'_c \leq 80\text{N/mm}^2$ )を実線、これを超える範囲を破線とし、提案式は適用範囲( $f'_c > 80\text{N/mm}^2$ )について太線として図-14に示した。なお、ここでは引張鉄筋比1.53%、せん断スパン比3としている。図-14に示されるように、本論文で検証を行った有効高さ1000mm以下のせん断補強筋のないRCはりでは、適用範囲の境界となる圧縮強度80N/mm<sup>2</sup>において、提案式は示方書式よりも大きな値となる。しかし、両式による計算結果の差は有効高さが大きいほど小さく

なり、有効高さ1340mmでその関係は逆転し、提案式は示方書式よりも小さな値となる。したがって、検証範囲内では、現行の示方書式は安全側の値を与えるが、検証範囲を超える大きな寸法の場合、過大評価となる可能性も考えられる。これら算定式の連続性については今後の検討課題としたい。

## 6. 結論

本研究では、圧縮強度 $36\sim 100\text{N/mm}^2$ 、有効高さ $250\sim 1000\text{mm}$ 、せん断スパン比 $2\sim 5$ としたせん断補強筋のないRCはりのせん断実験を行い、せん断強度およびその寸法効果について検討を行った。さらに、既往の研究データを加え、破壊力学による寸法効果の検討に基づき、高強度コンクリートのせん断強度算定式の提案を試みた。本研究から得られた結論を以下に要約する。

- (1)せん断補強筋のないRCはりのせん断破壊では、有効高さが大きいほど、さらに圧縮強度が高くなるほどひび割れの局所化は顕著になり、寸法効果は大きく現れることを明らかにした。
- (2)破壊力学に基づく特性長さを用いて、せん断強度の寸法効果を検討した結果、低中強度コンクリートでは既往の研究成果と同じく、せん断強度は有効高さの $1/4$ 乗に比例した。一方、高強度コンクリートではせん断強度は有効高さの $1/2$ 乗に比例することが確認された。
- (3)高強度コンクリートのせん断強度における材料特性の要因は、普通強度コンクリートのその $f_c^{1/3}$ と異なり $f_c^{-1/2}$ で評価された。
- (4)圧縮強度 $80 < f_c \leq 125\text{N/mm}^2$ の実験結果に基づき、せん断補強筋のない高強度コンクリートRCはりのせん断強度算定式として式(17)を提案した。本式の予測精度は、圧縮強度 $80 < f_c \leq 125\text{N/mm}^2$ 、有効高さ1mまでの31の試験体に対し、実験結果との比は平均値1.01、変動係数10.7%でありかなり高いことを確認した。

## 7. おわりに

本研究はせん断補強筋のないRCはりを対象とし、高強度コンクリートのせん断強度に関する検討を行ったものである。一方、せん断補強筋のあるRCはりでは、高強度コンクリートは、普通強度コンクリートに比べて自己収縮が大きく、これに起因する内部応力および初期欠陥によりせん断強度が低下することが報告されている<sup>29)</sup>。なお、本研究は引張鉄筋比 $p_w=1.5\%$ 程度の高強度コンクリートRCはりを対象としたせん断実験結果に基づくものであり、引張鉄筋比の影響に関する詳細な検討は行って

いないため、引張鉄筋比の考慮は普通強度コンクリートを対象とした二羽らの研究に準じている。引張鉄筋は、高強度コンクリートの自己収縮によって生じる内部応力に影響を与える。今後は、高強度コンクリートを用いたRCはりにおける、せん断補強筋および引張鉄筋など内部拘束の影響に着目したせん断強度特性についても、さらに検討を加えることが必要と思われる。

## 参考文献

- 1) (社)土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕,1996.
- 2) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.
- 3) Gustafsson, P. J. and Hillerborg, A. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, *ACI Structural Journal*, May-June, pp.286-294, 1988.
- 4) 藤田学, 大館武彦, 安田有, 佐藤良一：高強度コンクリートはり部材の寸法効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, No.3, pp.349-354, 1998.
- 5) 藤田学, 大館武彦：鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力におけるコンクリート強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, vol.22, No.3, pp.955-960, 2000.
- 6) 藤田学, 大館武彦, 松元香保里：RCはりのせん断強度の寸法効果におよぼす破壊エネルギーの影響, コンクリート工学年次論文報告集, vol.23, No.3, pp.751-756, 2001.
- 7) American Concrete Institute : *ACI Manual of Concrete Practice Part 3*, 1999.
- 8) CEB-FIP : *Model Code 1990*, Comite Euro-International du Beton, Bulletin D'Information No.213/214, Lausanne
- 9) 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.
- 10) Okamura, H. and Higai, T. : Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, *Proc. of JSCE*, No.300, pp.131-141, August 1980.
- 11) 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉：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, 1980.
- 12) (社)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, 第一部, 1990.
- 13) 鈴木基行, 尾坂芳夫, 今福健一郎：せん断補強筋のない超高強度コンクリートはり部材のせん断特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.558-563, 1993.
- 14) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H. : Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, *J. Materials Conc. Struct., Pavement; JSCE*, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.
- 15) An, X. and Maekawa, K. : Numerical Simulation on Shear Failure

of RC Beams, *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-3*, pp.1419-1428, 1998.

- 16) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001.
- 17) (社) 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，1993.
- 18) 二羽淳一郎， Nasra ZAREEN， 田辺忠顕：破壊力学に基づくコンクリートはりのせん断強度寸法効果解析，土木学会論文集， No.508/V-26, pp.45-53, 1995.
- 19) 建設省土木研究所：大型RCはり供試体のせん断強度に関するデータ集，土木研究所資料第3426号，1996.
- 20) 建設省土木研究所：高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書－高強度コンクリートPCはり部材の曲げせん断強度に関する調査－，整理番号第122号，1995.
- 21) 松井祐一， 内田裕市， 六郷恵哲， 小柳治：超高強度コンクリートを用いたRCはり部材のせん断耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集， vol.17, No.2, pp.655-660, 1995.
- 22) 阿部祐規， 伊藤堅生， 松原一美， 鈴木基行：超高強度材料を用いたせん断補強筋のないRCはり部材のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集， vol.21, No.3, pp.181-186, 1999.
- 23) 友澤史紀， 野口貴文， 小野山貫造：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査，日本建築学会大会学術講演梗概集， pp.497-498, 1990.
- 24) 早川智浩， 藤田学， 三瀬あゆこ， 佐藤良一：高強度コンクリートの収縮がせん断補強筋のひずみ挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集， vol.22, No.3, pp.589-594, 2000.

(2001.10.1 受付)

## SIZE EFFECT ON SHEAR STRENGTH OF RC BEAMS USING HSC WITHOUT SHEAR REINFORCEMENT

Manabu FUJITA, Ryoichi SATO, Kaori MATSUMOTO and Yasuhiro TAKAKI

Shear strength of reinforced concrete(RC) beams without shear reinforcement is experimentally investigated, in which compressive strength and effective depth are adopted as major factors. The experiment shows that the size effect of high strength concrete(HSC) beams is more significant than that of normal strength concrete beams, and the nominal shear stress normalized by concrete tensile strength at diagonal cracking is proportional to the  $-1/2$  power of the ratio of effective depth to characteristic length. Based on this relationship a new empirical equation for calculating the shear strength of RC beams without shear reinforcement made of HSC with compressive strength of  $80\sim 125\text{N/mm}^2$  is proposed.