

論文 RC ディープビームの寸法効果に関する解析的検討

内田 悟史^{*1}・幸左 賢二^{*2}・西岡 勉^{*3}・小林 寛^{*4}

要旨：せん断スパン比(a/d)が 1.5 のディープビーム部材におけるせん断応力の寸法効果を明らかにするため、有効高さ(300mm~1400mm)をパラメータとした実験および FEM 解析を実施した。また、ストラットに作用するひずみ分布を詳細に測定した結果、供試体寸法の増加に伴いストラット幅が減少し、せん断負担領域が減少するため、寸法効果が生じることを確認した。

キーワード：ディープビーム, せん断破壊, 寸法効果, FEM 解析

1. はじめに

近年における RC 構造物は、新材料の開発や施工技術の発達と共に大型化する傾向にあり、寸法効果の有無によりせん断耐力が大きく異なることが指摘されている。ここで、せん断スパン比(以下、a/d)が 2.5 以上の RC 梁部材ではこれまで多くの実験の結果、せん断耐力算定式に寸法効果の影響が考慮されている。

一方、a/d が 2.5 以下のディープビーム部材では、ストラットタイ構造が形成されることにより、コンクリートのせん断耐力が増加することや、せん断補強鉄筋の効果は a/d が 2.5 以上の RC 梁部材と同様のトラス理論では評価出来ないことが指摘されている。よって、ディープビーム部材のせん断耐力算定に、a/d=2.5 以上の RC 梁部材式を用いることは困難であり、ディープビームの寸法効果の確認および発生メカニズムの解明が必要である。

著者らは a/d が 1.0 以下と 1.0~2.5 の場合ではせん断抵抗メカニズムが異なることを明らかにしている¹⁾が、1.0~2.5 の範囲の寸法効果については現在まで明らかにされていない。そこで本研究では a/d が 1.0 から 2.5 の内、代表例として実構造物で最も使用例が多く、かつ中間的な値である a/d=1.5 を代表に挙げ、有効高さ d を実験

室レベルの 300mm から実大寸法である 1400mm に変化させた実験および FEM 解析を実施した。また、コンクリート内部のひずみ等の測定結果を用いてディープビームの寸法効果の発生原因について検討した。

2. 載荷実験

2.1 実験概要

実験供試体の諸元を表-1 に示す。せん断スパン比 a/d は 1.5 と一定とし、せん断補強筋を配置しない場合の寸法効果を評価するため、有効高 d (300mm~1400mm)をパラメータとした計 15 体の実験を行った。また、d=300~800mm の供試体に

表-1 実験供試体諸元

供試体名	有効高さ d [mm]	主鉄筋比 P _t [%]	圧縮強度 f _c [N/mm ²]	主鉄筋降伏強度 f _{sy} [N/mm ²]	最大荷重 P _{max} [kN]
B-10.1	300	2.02	37.0	387.3	390 (1)
B-10.1R		2.02	42.3	387.3	650 (2)
B-10	400	2.02	29.2	376.0	616 (1)
B-10R		2.02	23.0	376.0	706 (2)
B-10R2		2.02	37.0	376.0	781 (1)
B-10.2		2.02	37.0	376.0	760 (1)
B-10.2R	500	2.02	42.3	376.0	1519 (2)
B-10.3	600	2.11	37.8	388.0	1960 (2)
B-10.3R		2.11	31.2	388.0	1787 (2)
B-10.3R2		2.11	37.0	388.0	1125 (1)
B-13	800	2.07	31.6	398.1	2985 (2)
B-13R		2.07	24.0	398.3	2257 (2)
B-14	1000	1.99	31.0	401.8	4028 (2)
B-15	1200	1.99	27.0	401.8	5390 (2)
B-16	1400	2.05	27.3	393.9	6019 (2)

*最大荷重P_{max}の()は破壊パターン

*1 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D (正会員)

*3 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 工博 (正会員)

*4 阪神高速道路株式会社 情報システム管理室 工修 (正会員)

においては供試体寸法が小さく、せん断強度に差異が生じることが考えられるため、同一寸法で2体もしくは3体の実験を行った。コンクリートの弾性係数は平均で 26.2 kN/mm^2 であり、主鉄筋比(約 2.0%)については全供試体で一定としている。

図-1 に計測器および配筋状況を示す。図に示すように、ストラットのコンクリート中にはアクリルバーを埋め込み、それにひずみゲージを配置することによってストラット内のコンクリートひずみを測定した。アクリルひずみの配置はストラット幅が計測できるように、ストラット方向と垂直に並べて設置している。本供試体はせん断補強筋を配置しない場合について検討しているが、せん断補強筋位置における鉄筋ひずみの測定を目的として、ダミー鉄筋を配置している。また、寸法効果に荷重板幅および支承板幅 r の影響が生じないように、 r/d は 0.25 と一定とした。

2.2 実験結果

代表例として B-10 ($d=400\text{mm}$)、B-15 ($d=1200\text{mm}$) 供試体の実験結果を示す。図-2 に実験の最大荷重時におけるひび割れ図を示す。両供試体共に荷重荷重に伴いストラット付近にせん断ひび割れが発生したが、最大荷重時には、(a)に示すように荷重板下が局部圧壊するものと、(b)に示すようにストラットに割裂ひび割れが生じるものがみられた。他の 13 体についても同様に 2 つの破壊性状がみられる結果となった。そこでこれ

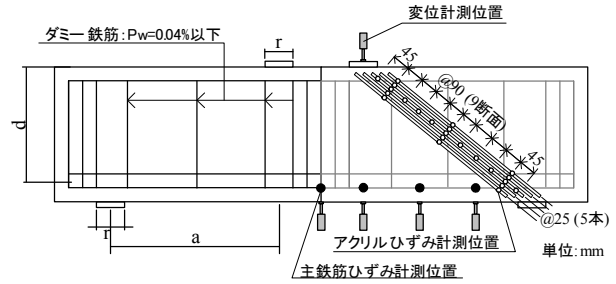
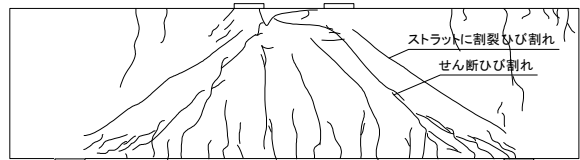


図-1 計測器および配筋図 ($d=400\text{mm}$)



(a) B-10 (781kN 時)



(b) B-15 (5390kN 時)

図-2 ひび割れ進展図

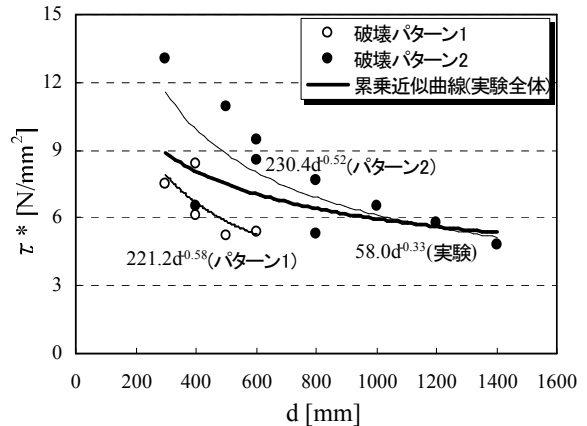
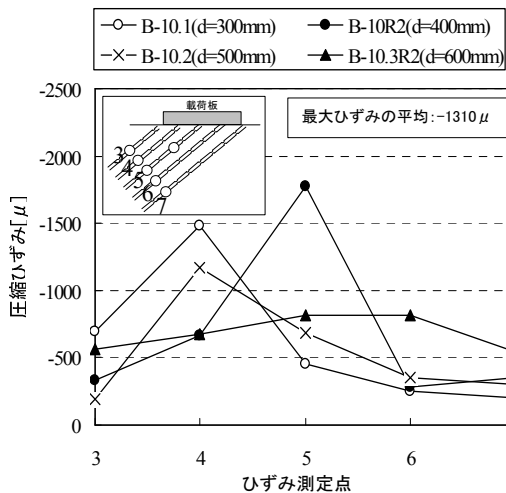
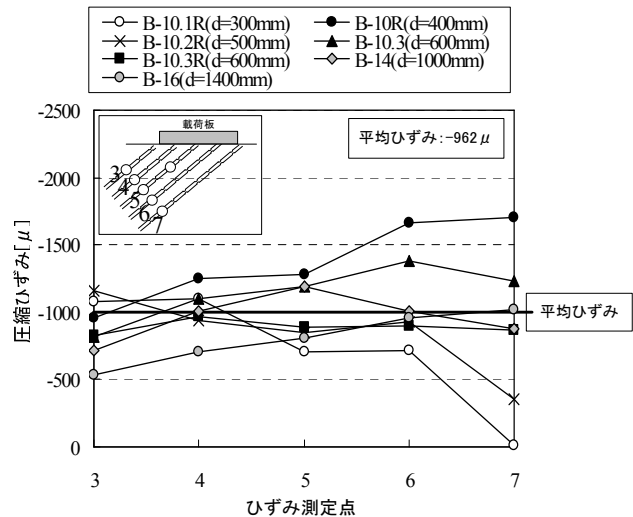


図-3 せん断応力-有効高さ関係



(a) 破壊パターン 1



(b) 破壊パターン 2

図-4 荷重板下のひずみ分布図(実験)

より前者を破壊パターン1, 後者を破壊パターン2とし, 2つに分類して実験結果および考察を示す。図-3 に実験のせん断応力-有効高さ関係を示す。せん断応力は各供試体のコンクリート圧縮強度の影響を受けることから, 式(1)により補正を行った。

$$\tau^* = P/bd \left(\frac{f'_{ck}}{f'_{AVE}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここに, τ^* : 圧縮強度の影響を補正した平均せん断応力, f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度, f'_{AVE} : 全供試体 f'_{ck} の平均値

図より全実験結果では, せん断応力 τ^* が $d^{-1/3}$ に比例して減少する寸法効果が確認された。図には, 各破壊パターンに分類してせん断応力を示している。破壊パターン1は $d^{-0.58}$, 破壊パターン2は $d^{-0.52}$ に比例して減少する点では概ね同様の減少傾向であるが, 応力については破壊パターン1がパターン2と比較して小さくなる結果となった。

図-4 に各破壊パターンのひずみ分布図を示す。ここで, 測定断面は破壊パターン1において局部圧壊が生じた荷重板下のストラット断面である。図より(a)破壊パターン1では, B-10R2の測定点5やB-10.1の測定点4のように, 他の測定点と比較すると3倍以上のひずみが分布する測定点がみられた。また, 各供試体で最も進展したひずみを平均すると, -1310μ であった。一方, (b)破壊パターン2の供試体では, 各測定点でのひずみ量の差異は 500μ 程度であり, 平均

的にひずみが分布している。そこで, 断面の平均ひずみを算出すると -962μ であった。以上の結果から, 後述する FEM 解析では終局状態を以下のように定義した。

(a) 破壊パターン1: ストラット断面で他の断面に比べて突出したひずみが発生し, かつひずみが -1310μ に達した場合。

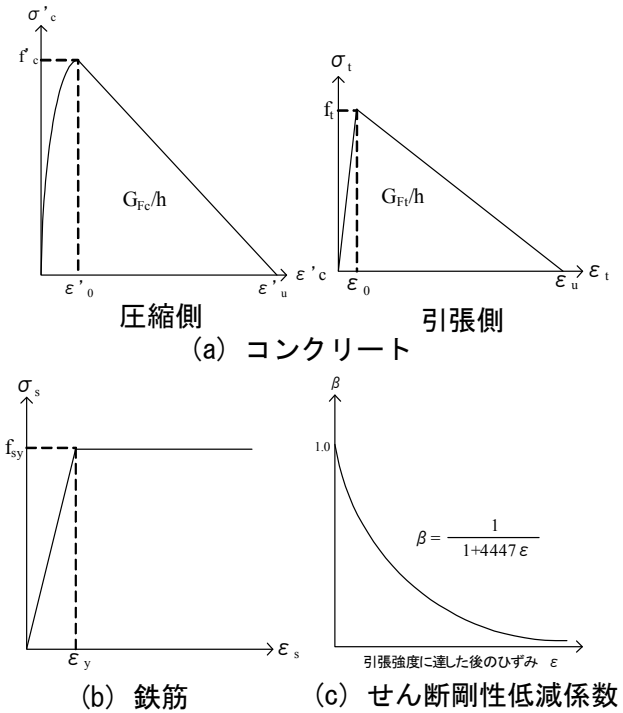
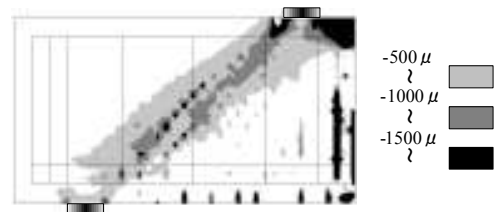
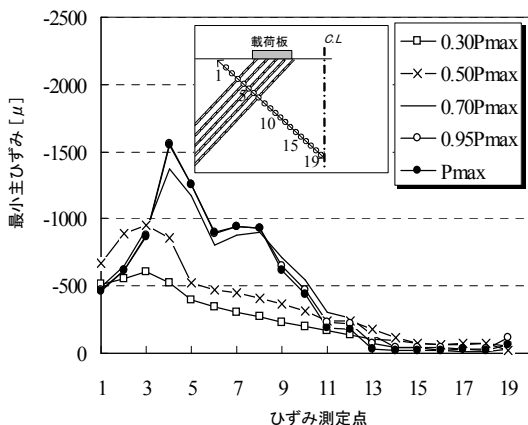


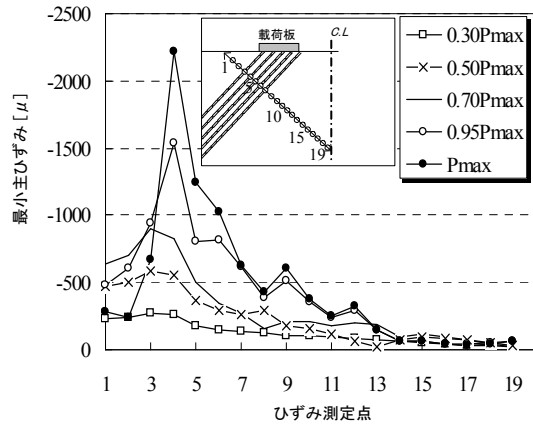
図-5 各種材料のモデル



B-10(d=400mm)供試体
図-6 最小主ひずみ分布図 (P_{max} 時)



(a) B-10(d=400mm)供試体



(b) B-15(d=1200mm)供試体

図-7 荷重板下のひずみ進展図(解析)

(b) 破壊パターン2：突出したひずみの発生がなく、ストラット断面で進展したひずみの平均値が -962μ に達した場合。

3. FEM 解析

3.1 解析概要

実験同様に寸法効果の評価のため、弾塑性 FEM 解析を実施した。検討パラメータは実験と同様に有効高とし、 $d=300\text{mm}$ から 1200mm まで全 7 体の解析を実施した。また、解析には固定多方向ひび割れモデルを用いた。

図-5(a)にコンクリートの応力-ひずみモデルを示す。ここで、圧縮・引張側共に破壊エネルギー G_F を導入し、 G_{Fc} は 50N/mm 、 G_{Ft} は $10(d_{\max})^{1/3}(f'_{ck})^{1/3}$ によって算出した。なお、等価長さ h には \sqrt{A} (A :要素面積)を用いている²⁾。コンクリートの二軸圧縮状態における降伏および破壊基準は、二軸圧縮強度を $1.16f'_c(f'_c$: 一軸圧縮強度)として、内部摩擦角を $\phi=10^\circ$ 、粘着力を $C=0.42f'_c$ と設定した Drucker-Prager の条件を用いた。鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用い、鉄筋とコンクリートは完全付着としている。図-5(b)に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。完全弾塑性型の bi-liner モデルとした。図-5(c)にひび割れ発生後のせん断伝達係数 β と、ひずみの関係を示す。ここでは、最大主ひずみに直角方向のせん断弾性係数 G を、せん断伝達係数 β を乗じることにより低減させている³⁾。

3.2 解析結果

ここでは B-10($d=400\text{mm}$)を代表例として解析結果を示す。図-6 に解析で算出された最大荷重時における最小主ひずみ分布図を示す。図よりストラット部には -1000μ を超える圧縮ひずみが見られ、圧縮ストラットが形成されていることが確認できる。しかし、曲げ圧縮区間で -1500μ を超えるより大きな最小主ひずみが発生していることから、ストラット部の圧縮破壊パターンとはなっていないことがわかる。

図-7 に解析における荷重板下の最小主ひずみ進展を示す。小型・大型供試体の代表例とし

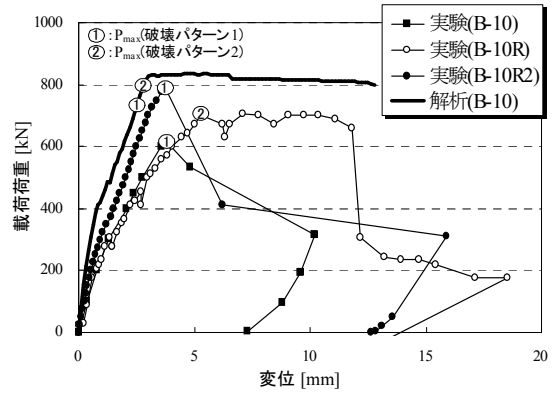
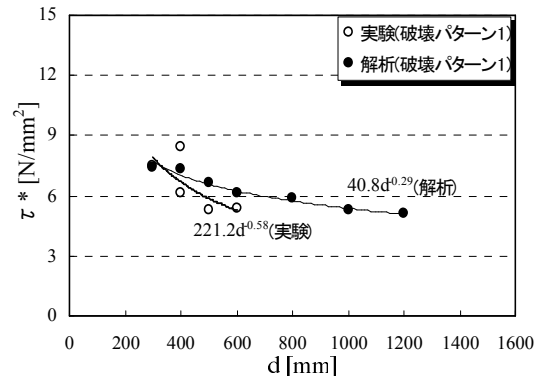
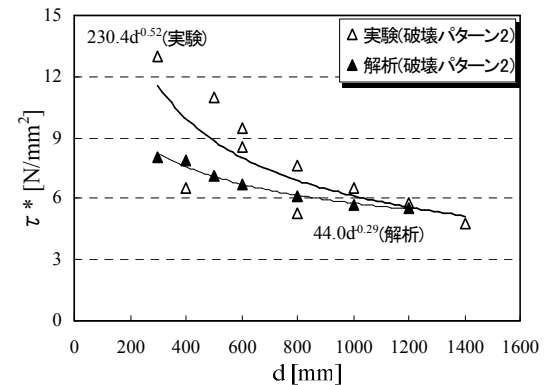


図-8 荷重-変位関係 (B-10)



(a) 破壊パターン1の比較



(b) 破壊パターン2の比較

図-9 実験と解析のせん断応力比較

て B-10($d=400\text{mm}$)と B-15($d=1200\text{mm}$)を比較した。両供試体共に測定点 4 において、ひずみが最も進展し、図-4 に示す破壊パターン1のひずみ性状と類似する結果となった。また、B-15 供試体では、B-10 供試体と比較して、 $0.95P_{\max}$ 時から P_{\max} 時にかけて測定点 4 においてひずみが局所的に進展する傾向がみられた。よって、大型供試体では局所的にひずみが進展する傾向にあると考えられる。

図-8 に実験、解析の荷重-変位関係を示す。図中に示す解析結果の最大荷重は、実験結果で

得られた各破壊パターンの終局定義を用いて算出したものである。解析結果は剛性が実験結果と比較してやや大きくなり、変形が生じにくい結果となった。パターン1で破壊した実験結果(B-10R2, B-10)は同一供試体にも関わらず最大荷重に差異がみられたが、解析において破壊パターン1で定義された終局荷重は、これらを平均的に評価することができている。一方、パターン2で定義された解析の終局荷重についても同様に実験結果の最大荷重を評価することができている。

図-9に各破壊パターンにおける実験、解析のせん断応力-有効高さ係数を示す。両破壊パターンにおいて、解析結果のせん断応力は約 $d^{-0.3}$ に比例して減少する結果となった。次に、(a)破壊パターン1の解析値は、実験値との減少傾向は異なるものの、せん断応力については実験値との対応はよい結果となった。一方、(b)破壊パターン2では、実験の近似曲線と比較すると解析値はやや低下する結果となった。これは、解析で実験より低めの設計鉄筋強度を用いており、せん断ひび割れ等の進展が遅れたためと考えられる。

4. せん断負担機構に関する考察

実験および解析結果より、ディープビームはストラットが圧縮破壊することにより終局に至り、また供試体寸法によってストラットのひずみ進展が異なることが確認された。そこで、ストラットのひずみ性状を用いてディープビームのせん断負担機構について検討する。著者らはアクリルひずみを用いてコンクリートのせん断負担分(V_c)を算出することで、せん断補強筋を配置していない $a/d=1.5$ のディープビーム供試体は最大荷重時に V_c のみでせん断力を負担していることを明らかにしている¹⁾。図-10より作用力と抵抗断面力の釣合いから式(2)が成立する。

$$W_p = P / (\tau_{mean} \cdot b \cdot \sin \alpha) \quad (2)$$

式(2)より τ_{mean} を算出することで W_p が求まる。そこで、最大荷重時におけるストラットの平均

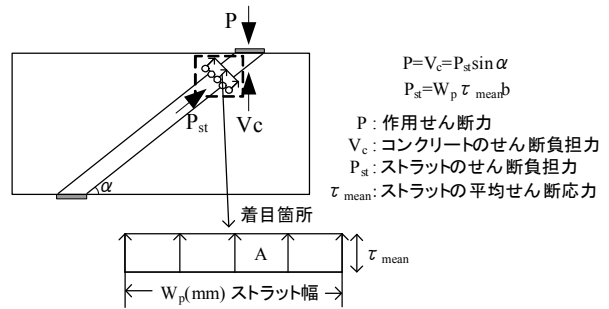


図-10 ストラットのせん断負担模式図

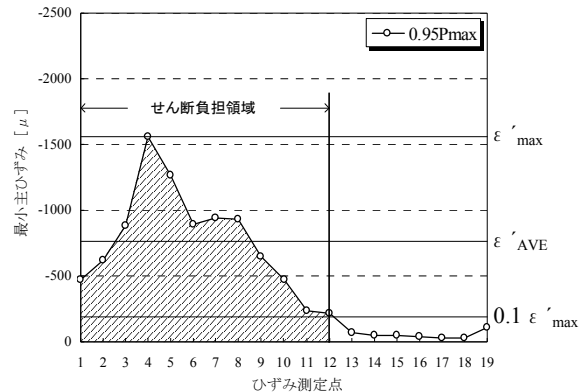


図-11 平均作用せん断力 τ_{mean} の定義

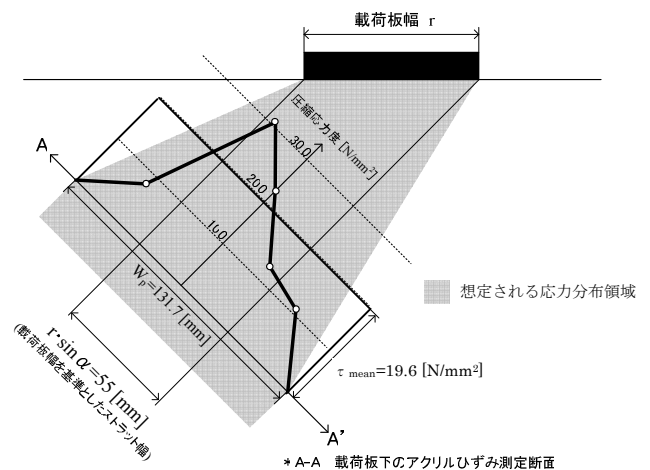


図-12 圧縮応力度分布図(B-10.2 供試体)

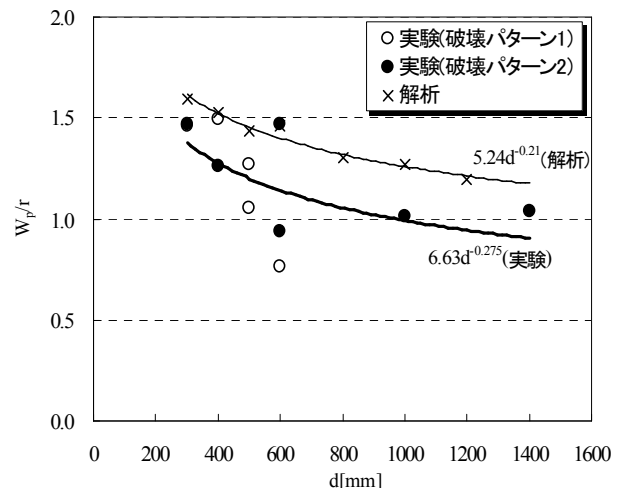


図-13 ストラット幅-有効高さ関係

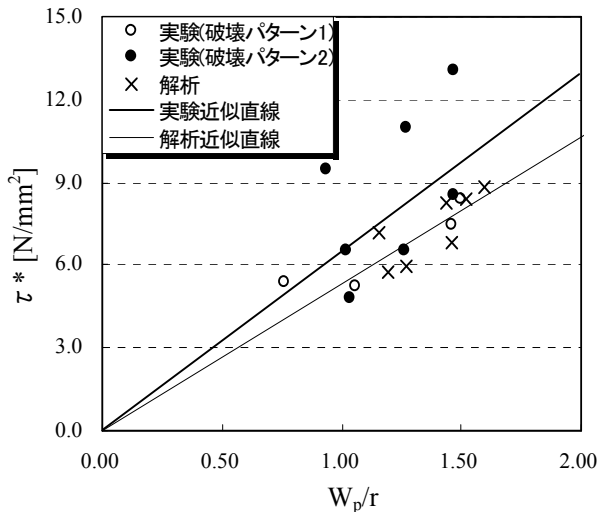


図-14 せん断応力-ストラット幅関係

ひずみから τ_{mean} を算出した。実験では載荷板下に設置したアクリルひずみ 5 点の平均ひずみから応力を算出し τ_{mean} とした。次に、図-11 に解析における τ_{mean} の定義方法を示す。図よりストラットの端部ではひずみの値が 0 に収束する。そこで、ストラットひずみの最大値 $\varepsilon'_{\text{max}}$ の 1 割以上の領域が主としてせん断力に負担するせん断負担領域と仮定した。このせん断負担領域内の平均ひずみ $\varepsilon'_{\text{AVE}}$ から応力を算出し、 τ_{mean} とした。解析値の最大荷重は 2 つの破壊パターンで定義したが、ここでは図-9 において実験値と対応が整合した破壊パターン 1 の最大荷重を用いている。

図-12 に実験供試体の代表例として B-10.2 供試体で算出された τ_{mean} 、 W_p を示す。図より τ_{mean} は 19.6N/mm^2 となった。また、 τ_{mean} を用いて算出された W_p は 131.7mm であり、載荷板幅 r を基準としたストラット幅 55mm と比較すると、実際の応力分布領域は約 2.4 倍増加している。同様の手法により W_p と寸法の相関に着目した検討を行った。

図-13 にストラット幅 W_p と有効高さ関係を示す。ここで、 W_p は供試体寸法の違いを考慮して比較する必要がある。そこで、 W_p を各供試体の載荷板幅 r で除すことで無次元化し、載荷板幅に対する相対的な応力分布幅として比較した。図より実験および解析共に有効高さの増加に伴い W_p/r が減少することが確認できる。以上より、

寸法の増加に伴い応力分布領域が減少することから、ストラットのせん断負担領域が減少するといえる。そこで、ストラット幅とせん断応力の相関について検討した。

図-14 に実験および解析から算出されたせん断応力 τ^* とストラット幅 W_p/r の関係を示す。また、図には各算出結果の直線近似曲線を示している。図より、実験および解析共に W_p/r が減少するとともに τ^* も減少する傾向にある。つまり、ストラット幅が減少し、せん断負担領域が減少するため、寸法効果が生じたと考えられる。

5. まとめ

RC ディープビームの寸法効果に着目した実験的検討および FEM 解析を用いた検討により以下の知見が得られた。

- (1) ディープビームを対象とした実験および FEM 解析の結果、実験および解析共に寸法効果が確認された。
- (2) 実験結果では 2 つの破壊性状がみられ、解析的に各破壊パターンを定義した結果、実験を概ね評価することができた。
- (3) ストラットのひずみ性状および FEM 解析より、有効高の増加に伴いストラット幅が減少することが確認された。また、ストラット幅の減少により寸法効果が生じていると考えられる。

参考文献

- 1) 脇山知美, 幸左賢二, 西岡勉, 小林寛: ディープビームが破壊性状に及ぼす影響評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp. 1015-1020, 2005.6
- 2) 山谷敬, 中村光, 足立正信, 檜貝勇: 破壊エネルギーを考慮した有限要素法解析における要素形状の検討, コンクリート工学年次論文, Vol.19, No.2, 1997.
- 3) Rots J.G.: Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988.