

論文 主筋の付着特性がせん断抵抗機構に及ぼす影響

小椋紀行^{*1}

要旨：RC部材のせん断抵抗機構は，シアスパン比の大きな場合，主筋の付着により影響を受けるとされている。本論文では，せん断破壊が先行するシアスパン比の小さいRC梁部材対象として主筋の付着および横補強筋比をパラメータとした有限要素法解析およびモード分解を行った。解析結果をもとにせん断抵抗機構の形成過程（アーチ機構・トラス機構・弾性応力分布の割合の変動）と主筋の付着の関係を検証した。

キーワード：付着，せん断抵抗機構，弾性応力分布

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のせん断破壊は，その脆性的な破壊性状により避けられるべき破壊とされている。現在までに，多くの実験および解析的研究¹⁾が行われ，実験結果をもとにした実験式や『鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針』²⁾(以下，指針と称する。)で用いられている理論式などが提案されている。何れの式もコンクリート強度，横補強筋比，配筋方法など様々な作用因子の影響を考慮しており，比較的精度よく耐力を推定することが可能である。

しかしながら，せん断破壊に至る過程(すなわち，せん断抵抗機構が形成されるまでの部材内部の応力変化)および破壊時のせん断抵抗機構に関する研究³⁾によれば，弾性応力状態が多く残存しており，せん断破壊に至るまでのひび割れ性状などがせん断耐力等に多大な影響を及ぼす可能性がある。比較的シアスパン比の大きなRC部材の場合，主筋の付着の影響により，曲げひび割れおよびせん断ひび割れの発生過程が異なり付着の作用しない場合に強靱なアーチ機構が形成されせん断耐力が向上するという研究⁴⁾⁻⁷⁾結果もある。つまり，主筋の付着特性がせん断破壊性状および耐力等に影響を及ぼす。

以上のような背景を踏まえ，本論文では，主筋の付着をパラメータとしたRC梁を対象として，有限要素法解析を行う。さらに，応力のモード分解法⁸⁾を用いてせん断破壊過程における応力分布の

変化について考察を行い，主筋の付着がどのようなメカニズムでせん断抵抗機構に影響を及ぼすかを検討する。

2. 解析対象

2.1 対象

図-1に示すような両端に剛体のスタブを有するRC梁(400×500×1000mm)を対象とした。紙面右側のスタブの回転を拘束し，材軸方向の変位を自由とした状態で，鉛直方向にのみの強制変形を加えた。コンクリートの材料特性は表-1に示す値を用いた。主筋はヤング率210GPaで4-D19とし，両固定端に定着されているものとし，せん断破壊が先行するように降伏しないものとした。横補強筋は，横補強筋比が0.6%以下では降伏するように降伏強度は210MPa，ヤング率210GPaとし，横補強筋間隔0で密に配筋されているものとした。

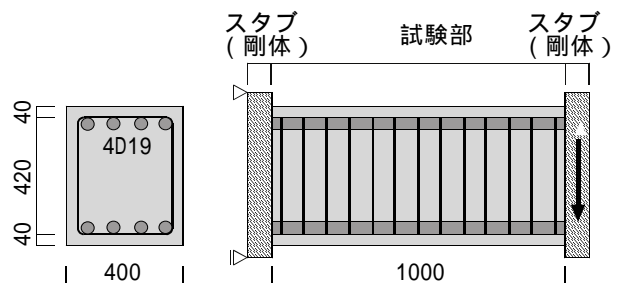


図-1 解析対象

表-1 材料特性(コンクリート)

圧縮強度	引張強度	ヤング率	G _F
(MPa)	(MPa)	(GPa)	(N/m)
20.0	2.0	27.3	49.3

*1 愛知産業大学 造形学部建築学科 講師 工博 (正会員)

2.2 パラメータ

付着の影響を考察するため、上端筋と下端筋をCEB-FIPコードに従う付着特性を有する主筋と付着を完全に除去した主筋の組み合わせを、付着のある主筋の本数を4パターン(0, 1, 2, 3, 4本)、横補強筋比 ρ_w を3パターン(0.0, 0.6, 1.2%)の計15パターン設定した。

3. 有限要素法解析

2次元有限要素解析コードATENA(version 2.0.2)⁹⁾を用いて平面応力解析を行う。

3.1 モデル化

ひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化は、下式の指数関数型ひび割れ開口則¹⁰⁾でモデル化した。

$$\frac{\sigma}{R_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp\left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1-1)$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_F}{R_t} \quad (1-2)$$

ここで、 w はひび割れ開口変位、 σ は引張応力度、 w_c は応力が完全に開放された時のひび割れ開口変位、 R_t は引張強度、 G_F は応力のないひび割れの単位面積を作り出すのに必要な破壊エネルギーである。また、式中の $c_1=3$ 、 $c_2=6.93$ である。

破壊条件としては、Kupferの破壊基準¹¹⁾を用いた。具体的には図-2に示すように、シリンダー強度 f_c と引張強度 f_t の20%の二軸応力状態(A)と一軸引張状態(B)を直線補間したものを引張破壊曲線とした。また圧縮応力がピークに達するまではCEB-FIPコード90に従い、ピーク後は直線的に低下するものとした。二軸応力下の非線形挙動は等価1軸則(歪方向に関連するヤング率を用いてポアソン比を除去した形の構成

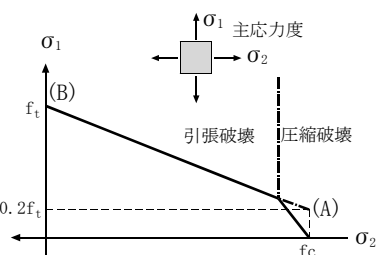


図-2 コンクリート破壊条件

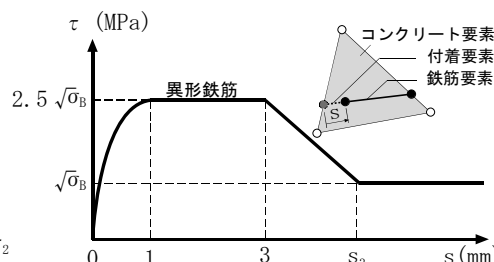


図-3 主筋の付着特性

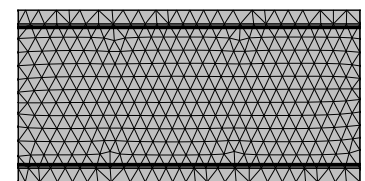


図-4 要素分割

則)に従うものとした。

解析結果のメッシュ依存性を低減するため、Bazantが提案したひび割れ帯モデルを設定した。ひび割れ帯は、コンクリートの破壊進行領域に対応する有限要素の内部で消散される破壊エネルギーを一定とし、その要素のひび割れ方向投影長さをひずみ算定に用いた。なお、ひび割れ発生は、任意要素における引張応力がコンクリートの引張強度に達した時と定義し、ひび割れ発生後はその要素内のひび割れ方向を固定し、ひび割れ方向を軸とした直交異方性を有し必ずしも主歪軸と一致しないものとした。このため、せん断応力が生ずるがひび割れコンクリートのせん断剛性はKolmar則により低減されるものとした。

主筋は完全弾塑性の図-3に示すように線材要素(2節点1次元要素)とした。両端節点は付着特性を有する付着要素を介してコンクリート要素の境界線と結合している。付着のある主筋の付着要素は同図-3に示すCEB-FIPコードに従う付着特性(図中の s_3 は節の間隔で本論文では15mmとした。)を有するものとした。なお、付着のある主筋と無い主筋の組み合わせを二次元モデルで再現するため、主筋の周長を変化させている。

横補強筋はコンクリート要素に連動し、横補強筋方向のみに作用するものとした。なお、本解析は2次元であるため、梁幅方向の補強領域はかぶり厚さを0とみなしている。

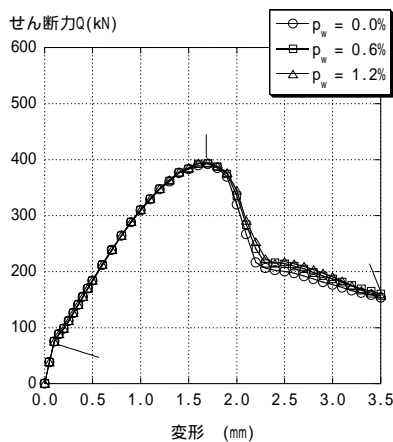
要素分割は、全ての位置でほぼ均等の寸法となり、かつ要素寸法の影響が少なくなるように、かぶり厚さをもとに最小寸法を定め、試行錯誤の結果、図-4に示すような要素分割とした。

3.2 解析結果

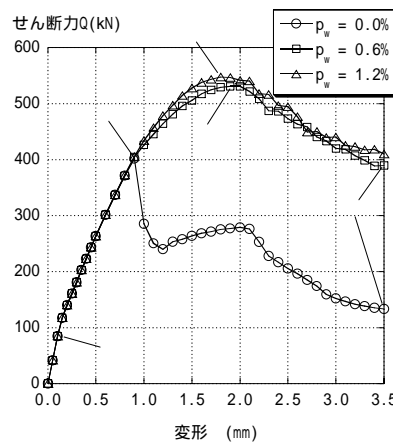
図 - 5 (a)に全ての主筋に付着のない場合,(b)に全ての主筋に付着のある場合のせん断力Qと変形 の関係を示す。また,せん断破壊時の下端筋の応力分布を図 - 6に,ひび割れ状態を図 - 7に示す。

図 - 5,図 - 7のように ($\epsilon = 0.2\text{mm}$ 程度)で,曲げひび割れが生ずるまでは,付着の有無および補強筋比にかかわらず同様の弾性挙動を示す。その後,剛性が低下するが,全ての主筋に付着の

ない場合は有る場合と比べて剛性の低下率が高い。さらに,その後の変形の増加に対しても,全ての主筋に付着のない場合,せん断破壊時 まで図 - 7のように部材中央部にせん断ひび割れが生じず,図中の丸点線で示す部分のコンクリートの応力が対角線状にながれ,その応力が破壊条件に達することで,曲げ抵抗機構が形成される前にせん断圧壊が生じている。また,部材中央部では横補強筋には応力が生じず,全ての横補強筋比でほぼ同一の挙動を示す。



(a) 全て付着無し



(b) 全て付着有り

図 - 5 せん断力Q - 変形 関係

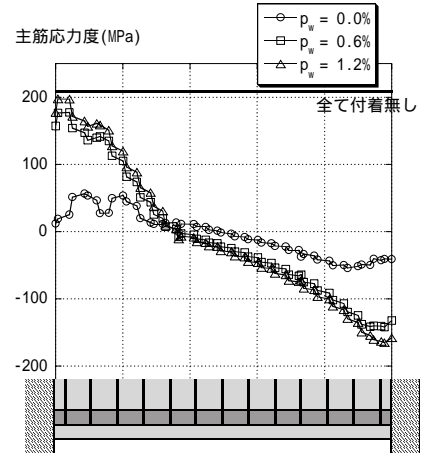
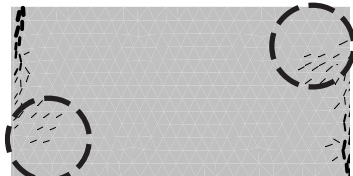
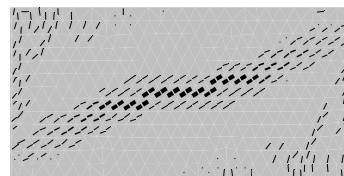


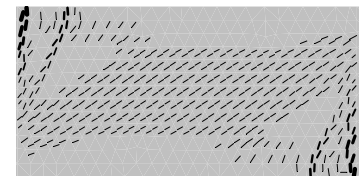
図 - 6 主筋の応力分布



(a) 全て付着無し, $p_w = 0.0\%$

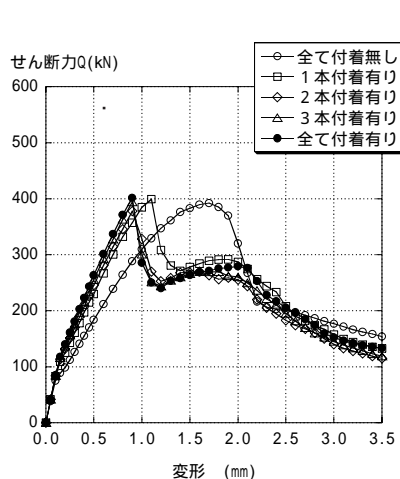


(b) 全て付着有り, $p_w = 0.0\%$

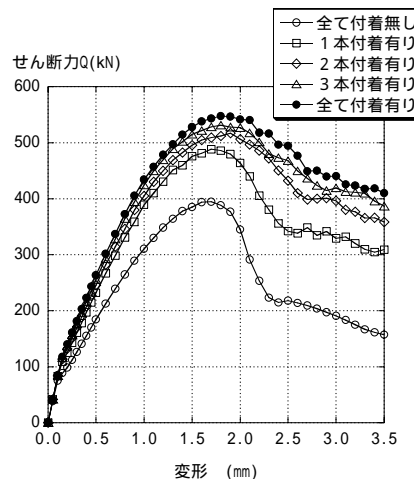


(c) 全て付着有り $p_w = 1.2\%$

図 - 7 ひび割れ図



(a) $p_w = 0.0\%$



(b) $p_w = 1.2\%$

図 - 8 せん断力Q - 変形 関係

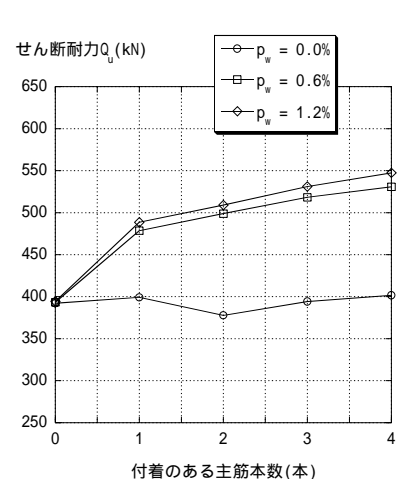


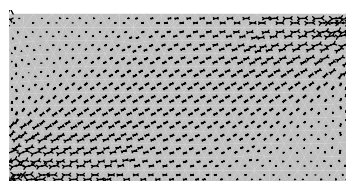
図 - 9 せん断耐力 Q_u と付着のある主筋の本数の関係

一方、全ての主筋に付着の有る場合は、変形の増加に伴いせん断ひび割れが発生し、横補強筋比 $p_w=0\%$ では部材対角線上のせん断ひび割れの卓越により急激な耐力低下により破壊に至る。また、横補強筋の増加に伴い図 - 6 のように主筋に生ずる引張力の勾配(つまり付着)が増加し、せん断ひび割れ発生後のせん断力が増大している。

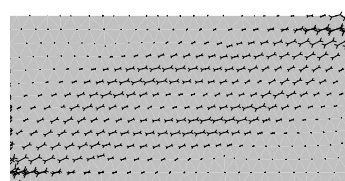
図 - 8 に付着の有る主筋本数を変化させた場合のせん断力と変形の間を、図 - 9 に最大せん断力と付着の有る主筋の本数の関係で示す。図のように横補強筋比によらず付着の有る主筋本数の増加に伴い、曲げひび割れ発生後の剛性が上昇し、図 - 10 に示すように対角線上に圧縮ストラットを形成する。また、横補強筋比が 0% の場合、付着の有る主筋の本数の増加に反して、最大せん断力時の変形が減少し、試験部全域に応力が分布した状態で破壊に至る。

以上のことから、本論文で対象とするようなシアスパン比の小さい場合、主筋の付着が少ないほど、曲げひび割れ発生後にせん断剛性は低下するが、せん断ひび割れの発生が抑制され、変形性能が上昇し、せん断圧壊に至る傾向がある。その結果、主筋に付着が無い場合、最大せん断力において横補強筋による効果がほとんどない。また、横補強筋比が小さい場合、最大せん断力において付着の影響はほとんど無い。

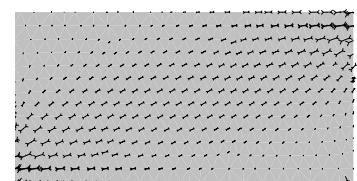
上記の傾向がせん断抵抗機構の形成に及ぼす影



(a) 全て付着無し, $p_w = 0.0\%$

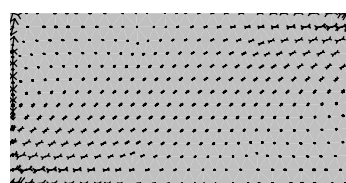


(b) 全て付着有り, $p_w = 0.0\%$

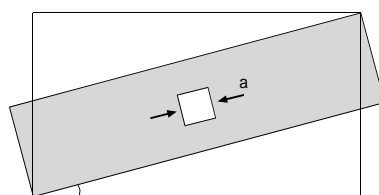


(c) 全て付着有り $p_w = 1.2\%$

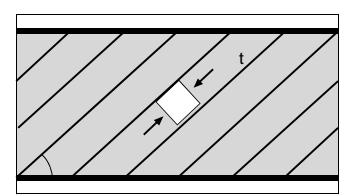
図 - 10 主応力分布



(a) 弾性モード



(b) アーチモード



(c) トラスモード

図 - 11 応力モード

響を定量的に把握するため、応力のモード分解を行い、せん断抵抗機構の形成過程を考察することとした。

4. モード分解

4.1 応力モードテンソルの仮定

図 - 11 に示すような弾性状態の応力分布、指針で仮定しているアーチ機構およびトラス機構を初期応力モードテンソルとし、以後、各々(a)弾性モード、(b)アーチモード、および(c)トラスモードと称する。

弾性モード e ___:

コンクリート、主筋および横補強筋を完全弾性の構成則を有するとし、前記の有限要素法解析と同じ支持条件で解析を行う。微小変形時の得られた応力分布を弾性モードとした。

アーチモード a ___:

アーチモードは(b)のように灰色部分では圧縮主応力 σ_a のみ存在し、それ以外では無応力状態とした。なお、 θ_a および主軸の角度 θ は指針の仮定と同様に次式(2)で算定した。

$$\sigma_a = v_0 \sigma_B - \frac{5p_w e \sigma_{wy}}{\lambda} \quad (2-1)$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{D^2 + L^2} - L}{D} \quad (2-2)$$

ここで、 v_0 は有効係数、 σ_B はコンクリート強度、 $p_w e$ は有効補強筋比、 σ_{wy} は横補強筋の信頼

強度である。

トラスモード

トラスモードは図のように主筋間の領域（灰色部分）で圧縮主応力 σ_t のみ存在し、それ以外の領域では無応力状態とした一様トラスモデルとした。なお、 σ_t および主軸の角度 ϕ は指針の仮定と同様に次式(3)で算定した。

$$\sigma_t = \frac{P_{we}\sigma_{wy}}{\lambda}(1 + \cot^2\phi) \quad (3-1)$$

$$\cot\phi \leq \sqrt{\frac{\lambda V_0\sigma_B}{P_{we}\sigma_{wy}} - 1} \quad (3-2)$$

ここで、 λ はトラス機構の有効係数である。

4.2 分解方法

モード分解はシュミットの直交化法，エネルギー原理を用いて，任意の応力分布を釣合条件を満たす複数の応力分布（モード）に次式(4)のように分解する方法である。

$$\underline{\sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_0 \cdot \underline{\sigma}_i \quad (4)$$

ここで、 $\underline{\sigma}$ は分解対象となる応力テンソル， λ_0 は係数， $\underline{\sigma}_i$ は応力モードテンソルである。

これにより，各変形段階での応力分布 $\underline{\sigma}$ は以下の式(5)のように分解できる。

$$\underline{\sigma} = \lambda_0 \cdot \underline{\sigma}_e + \lambda_a \cdot \underline{\sigma}_a + \lambda_t \cdot \underline{\sigma}_t \quad (5)$$

式中の添え字 e, a, および t は各々弾性，アーチ，およびトラスモードを示す。なお，本論文ではモード分解法に若干の修正を加え，アーチモードではコンクリートが圧縮破壊条件に達するまで，トラスモードではさらに横補強筋が降伏するか主筋の付着応力が付着強度に達するまでとし，それ以上の負担はしないという条件のもとで分解を行った。

4.3 解析結果

図 - 12 は各モードの負担せん断力と変形の関係であり，図 - 13 はせん断破壊時の各モードの負担せん断力と付着のある主筋本数の関係である。図中の塑性モードとはアーチモードとトラスモードの和であり，全モードは弾性モードを加えた3つのモードの和である。図 - 12 のように，全ての場合で全モードと解析値（有限要素解析により得られた値）がほぼ対応していること

から，本解析で仮定した弾性モード，アーチモード，およびトラスモードで応力分布を記述することが可能であると言える。

各モードの負担せん断力に関する傾向として，図 - 12 から以下のことが言える。

- 1) 曲げひび割れが発生する（ $\lambda = 0.2\text{mm}$ 程度）までは，せん断力に対する弾性モードの負担せん断力がほぼ100%を占める。その後，変形の増加に伴い弾性モードの負担せん断力，および塑性モード（横補強筋比が0.0%の場合はアーチモードのみ，それ以外ではアーチおよびトラスモード）の負担せん断力は増加する。このため，横補強筋比0.0%の場合，せん断破壊後に塑性化が進み，再度せん断力が上昇する現象が生ずる。
- 2) せん断力の負担割合では，弾性モードの負担割合は曲げひび割れ後は単調減少し，塑性モードの負担割合は単調増加している。さらに，せん断破壊後は弾性モードの負担せん断力は急激に減少する。

- 3) 付着のある主筋本数が増えるほど，同一変形時のアーチモードの負担せん断力は増加するが，せん断破壊時の変形が小さくなる。

この結果として，せん断破壊時において図 - 13 に示すように付着のある主筋本数が増加するほどアーチモードの負担分は減少し，弾性モードの負担せん断力は増加するが，横補強筋比が0.0%の場合，最大せん断力はほとんど変化しない。補強筋比が1.2%の場合，付着のある主筋の本数が増加するほど，トラスモードの負担せん断が増大するため，その分だけ最大せん断力が上昇する。

5. 結論

- 1) せん断を受ける梁の応力状態は，完全弾性を仮定した応力状態，指針のアーチ機構（コンクリートの圧縮力により伝達される機構），およびトラス機構（主筋の付着と横補強筋の引張力を介して伝達される機構）の和で概ね記述することが可能である。

- 2) 主筋の付着が小さい場合，トラス機構が形成

されないため、横補強筋はせん断挙動にほとんど影響しない。

3)横補強筋比の小さい場合,主筋の付着が小さくなるほど,曲げひび割れ発生後に剛性は低下するが,変形の増加によりせん断ひび割れの発生が抑制されるため,弾性状態が継続する一方でアーチ機構の発現が遅れる。このため,主筋の付着は最大せん断力へほとんど影響しない。

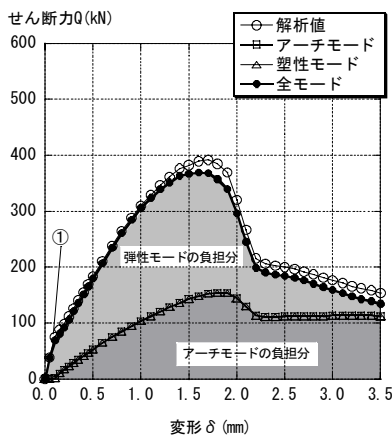
4)横補強筋比の大きい場合,トラス機構の分だけ最大せん断力が上昇する。

参考文献

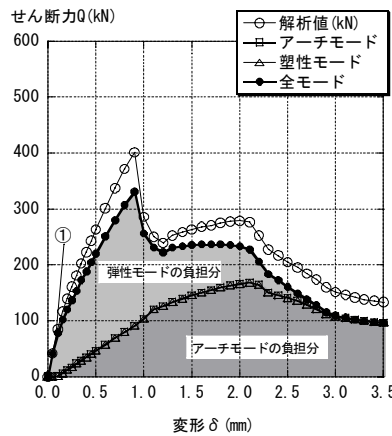
- 1) 瀧口克己ら：圧縮曲げせん断を受けるR/C柱端部の圧縮強度,日本建築学会構造系論文集,第496号,pp.141-148,1996
- 2) 日本建築学会：『鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針』第6章 柱および梁のせん断と付着に対する設計,日本建築学会,440 pp.,1999
- 3) 小椋紀行：「RC梁のせん断抵抗機構に関する考察」,日本コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No.2,

pp. 943-948, 2004.8

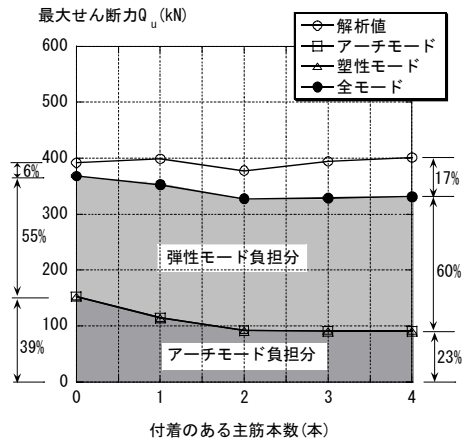
- 4) 小椋紀行：R/C梁のアーチ機構における付着の影響：日本建築学会学術講演梗概集C-2構造,pp. 453 - 454, 2000
- 5) 盧 永坤,矢代晴実ら：「鉄筋コンクリート単柱のせん断破壊における付着の影響に関する研究」,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.14, NO.2, pp. 267-272, 1992
- 6) 杉田清隆,睦好宏史ら：「鉄筋の付着を制御したRC部材の靱性に関する研究」,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, No. 2,pp. 1411-1416, 2003
- 7) 内堀洋紀,睦好宏史ら：「鉄筋の付着を制御したRC部材のせん断耐荷挙動に関する研究」,コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No. 2,pp. 1027-1032, 2004
- 8) 市之瀬敏勝ら：二次元応力のモード分解,日本建築学会構造系論文集,第487号,pp. 83-91, 1996
- 9) (株)計算力学研究センター：RC非線形解析専用プログラムATENA(version 2.0.1)
- 10) Shah S. P. et al: Fracture Mechanics of Concrete,552 pp., John Wiley and Sons, Inc., 1995
- 11) Kupfer, H. :Behavior of Concrete under Biaxial Stress,Journal ACI, Proc. Vol.66,No.8, pp.656-666, 1969.8.



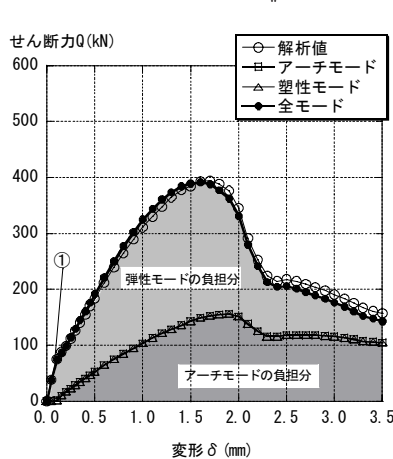
(a) 全て付着無し, $p_w=0.0\%$



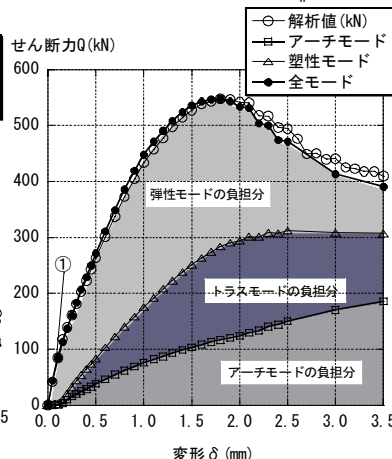
(b) 全て付着有り, $p_w=0.0\%$



(a) $p_w=0.0\%$

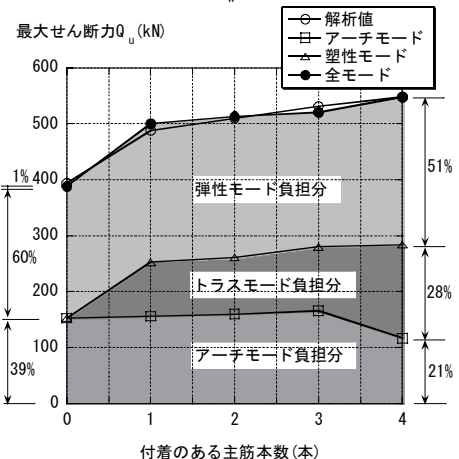


(c) 全て付着無し, $p_w=1.2\%$



(d) 全て付着有り, $p_w=1.2\%$

図 - 12 各モードの負担せん断力と変形の関係



(b) $p_w=1.2\%$

図 - 13 各モードの負担と付着の有る主筋本数の関係