

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560564

研究課題名 (和文) 超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面が
柱部材の復元力特性に及ぼす影響研究課題名 (英文) EFFECT OF SMOOTH CRACKS OF ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETE
UPON HYSTERESIS CHARACTERISTICS OF RC COLUMNS

研究代表者

篠原 保二 (SHINOHARA YASUJI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授

研究者番号：50196408

研究成果の概要：

圧縮強度が 100 N/mm^2 を超える超高強度コンクリートは粗骨材を貫通するひび割れが発生し、ひび割れ面は平滑になり、ひび割れ間のせん断力伝達能力が低下する。本研究では、超高強度コンクリート柱部材のせん断力-部材角履歴曲線の非対称性に関して、ひび割れ面の挙動とせん断伝達特性に基づいて、その現象のメカニズムを実験的、解析的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：超高強度コンクリート，ひび割れ面性状，せん断伝達特性，復元力特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、都市部を中心に、多くの超高層集合住宅が建設されている。これらの集合住宅は、強風時や常時微動に対する剛性や遮音性が要求され、また経済的であるなどの理由から、RC造で建てられることが多い。さらに、最近の超高層集合住宅には、長期の耐久性とともに、世代を超えての利用を可能とするフリープランのニーズによって、柱の断面を小さくし、柱の間隔を大きくすることが要求されている。そこで、大きな軸力を支えることになる下層階の柱に、高強度コンクリートの使用は必要不可欠であり、今後も更なる高強度化が進むと思われる。

(2) 前記した超高層集合住宅の下層階では、

日本建築学会および日本建築センターの計算基準・指針の適用範囲外である設計基準強度が 60 N/mm^2 を超えるコンクリートも採用されており、これらの超高強度コンクリートを使用した場合の構造設計は、「鉄筋コンクリート造建物の超軽量・超高層化技術の開発、通称 New RC 総プロ (1988～1993年)」の研究成果や柱部材実験等によって構造性能を確認しながら行われている。しかしながら、New RC 総プロの最終成果では、高強度コンクリートを用いた RC 部材の復元力特性を定めるにあたって、耐力、剛性、変形に関する十分な結論に至らなかった項目があり、現在においてもいくつかの問題点が指摘されている。

2. 研究の目的

120N/mm²の超高強度コンクリートを用いた短柱の耐震性能実験において、せん断ひび割れ発生荷重および最大荷重が負側荷重時では正側荷重時の70%程度まで低下することが指摘されている(図1参照)。それ故、例えば正側荷重側で保有水平耐力を確保しても、負側荷重側で確保できず、結果的に期待した構造性能を発揮できない可能性がある。この要因のひとつと考えられているのは、図2に示すコンクリート強度によるひび割れ面の相違である。コンクリートはセメントペースト、細骨材および粗骨材からなる複合材料である。図2に示すように普通強度コンクリートの場合、ひび割れはセメントペーストおよびセメントペーストと粗骨材の界面において発生するが、圧縮強度が100N/mm²を超える超高強度コンクリートになると粗骨材を貫通するひび割れが発生する。粗骨材が破断するとひび割れ面は平滑になり、ひび割れ間のせん断力伝達能力が低下することになる。ひび割れ面におけるせん断力の伝達は、せん断ひび割れ発生後の鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響は大きく、特に、降伏時変形や繰返し履歴特性に及ぼす影響が大きい。本研究

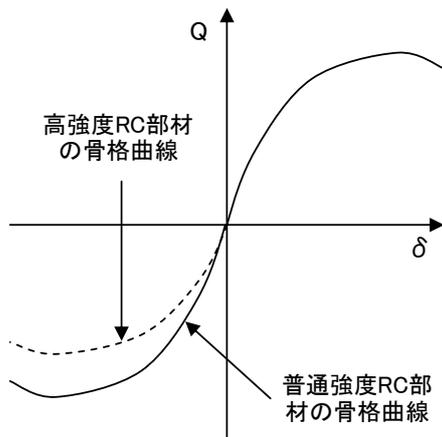


図1 高強度コンクリート柱の荷重-部材角関係

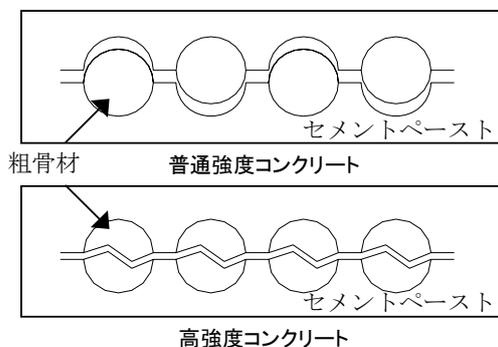


図2 コンクリート強度によるひび割れ性状

課題では超高強度コンクリートを使用した柱部材の問題点から、せん断力-部材角履歴曲線において正側と負側の骨格曲線が異なる包絡線を示す現象を取り上げ、ひび割れ面のせん断ひび割れ挙動とせん断伝達特性に基づいて、その現象のメカニズムを実験的、解析的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ひび割れ面に各種せん断伝達特性を組み込んだ簡易モデルによる予備解析

超高強度コンクリートではひび割れが骨材を貫通し、より平滑なひび割れ面を形成するために、骨材のかみ合い効果が低減し、部材としての一体性が損なわれることがその要因であると考えられる。そこで簡便なモデル解析によって、ひび割れ面形状の平滑度によるせん断伝達特性の相違および補強筋による拘束効果が部材のせん断伝達メカニズムに及ぼす影響について検討し、柱部材の実験パラメータの基礎資料とする。主な検討項目は、せん断力に対して開く膨張ひび割れとして、既往の実験との適合性の良い李・前川モデルを使用し、最大骨材寸法によってひび割れ面の平滑度を模擬できるか検討する。せん断力に対して閉じるひび割れ面には、Mohr-Coulomb 摩擦モデルを使用し、せん断伝達特性に及ぼす内部摩擦角および膨張角の影響を検討する。X字型せん断ひび割れ発生後の試験体を想定して、李・前川モデルとMohr-Coulomb 摩擦モデルの両者を組み込んだ解析を行い、その相互作用および一体性について検討する。軸力の導入がひび割れ界面の挙動、主筋およびせん断補強筋に及ぼす影響について検討する。

(2) 軸力を導入した超高強度コンクリート柱部材の曲げせん断実験

既往の実験および(1)の予備解析より、超高強度コンクリート柱部材の曲げせん断実験の履歴ループにおいて正負が非対称となる不安定な挙動は、ひび割れ面性状、せん断補強筋量および軸力比の影響を受ける。そこで本実験では履歴ループの非対称性が顕著になる軸力比が約0.3のせん断破壊型試験体を中心に計画する。試験体は断面(200×250mm)、主筋量3.6%(8-D16, $\sigma_y=1000\text{ N/mm}^2$)、せん断スパン比1.2を共通とし、コンクリート強度、せん断補強筋量、軸力比をパラメータとして、柱部材のせん断ひび割れ挙動およびせん断伝達特性に与える影響を検討する。本実験の特徴は、高強度コンクリート柱部材のひび割れ分布やひび割れ幅などの損傷過程が部材の耐力に及ぼす影響を対象とするため、ひび割れの進展挙動だけでなく、ひび割れ幅およびひび割れ面におけるすべり変位をデジタル顕微鏡によって詳細に測定することにある。したがって、せん断ひび割れ

発生後も安定した計測ができるように、高強度補強筋の使用を原則としているが、一部、せん断補強筋の降伏後のひび割れ挙動も検討項目とした。本実験で使用する試験体 14 体のせん断補強筋径と間隔を下表に示す。

強度 Fc120				Fc30
軸力比	0.1	0.2	0.28	0.28
せん断補強筋比(%)	0.26		φ3.5@75	
	0.39	φ5@100	φ5@100	φ5@100 φ5L@100
	0.52		φ5@75	
	0.65		φ5@60 φ5L@60	
	0.78	φ7@100		φ7@100

注)せん断補強筋径の L は、降伏を許容する

(3) FEM 解析によるひび割れ面の形状に基づく摩擦係数の検討

高強度コンクリート柱部材の曲げせん断実験において正負の履歴ループが非対称となる要因として、正載荷で生じたせん断ひび割れが負載荷ですべり、部材としての一体性が損なわれていることが考えられる。この負載荷におけるすべりは、主にひび割れ面の形状およびひび割れ面の拘束に影響される。そこでひび割れ面における骨材のかみ合い作用とせん断摩擦を考慮した有限要素法解析を行い、超高強度コンクリートを使用した RC 柱部材の平滑なひび割れ面の摩擦係数について考察する。

4. 研究成果

(1) ひび割れ面の形状に基づく摩擦係数

平滑なコンクリート面の摩擦係数については、型枠に接した面をひび割れ面として行ったサーボ制御による 2 軸加力試験結果を参考にした。垂直圧縮力 $P_v = -20, -40, -60, -100\text{kN}$ を一定に保持した場合のせん断力とすべり変位の関係(図 3)から分かるように、平

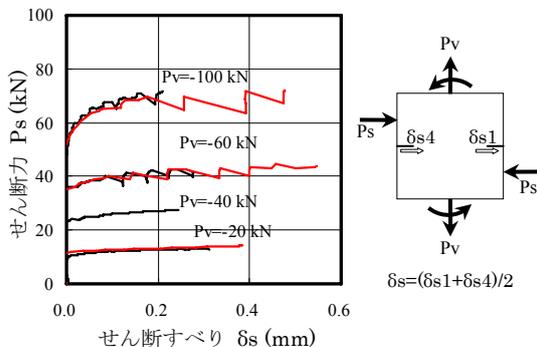


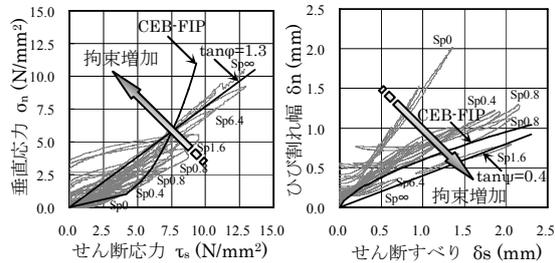
図 3 一定垂直力下のせん断力とせん断すべり

滑なコンクリートの摩擦係数(せん断力/垂直圧縮力)は、垂直圧縮力が小さい場合(-30kN 以下)は 0.5、垂直圧縮力が大きくなると 0.6 程度になった。また、CEB-FIP では平滑なひび割れ面の摩擦係数を 0.4 (摩擦に不利な要素を考慮した場合は 0.6) としている。本研究ではこれらを勘案して、平滑なひび割れ面に対する摩擦係数を 0.5、膨張係数を 0 と設定した。

普通コンクリート強度のひび割れ面におけるせん断挙動は、ひび割れ面に対する垂直拘束に大きく依存することが示されており、摩擦係数、膨張係数もその垂直拘束の影響を受ける。図 4 に垂直拘束をパラメータとして行ったせん断実験結果から、(1)垂直応力とせん断応力の関係、(2)垂直変位とせん断変位の関係を示す。図中の Sp に続く数値は垂直拘束の鉄筋量(%)である。垂直拘束が大きくなると、垂直応力に対するせん断応力の比(摩擦係数)および膨張係数(垂直変位/せん断変位)は小さくなっている。同図には CEB-FIP による(1)式と(2)式の関係($f_c = 34\text{N/mm}^2$)も示しているが、CEB-FIP 式はせん断応力が 5.0N/mm^2 を超えると摩擦係数が急減すること、また膨張係数は鉄筋量 0.8%の垂直拘束に相当することが分かる。

$$\tau_{cr} = \tau_s = 0.4 f_c^{2/3} \sigma_n^{1/3} \quad (1)$$

$$\delta_n = 0.6 \delta_s^{2/3} \quad (2)$$



(1) 垂直力-せん断応力関係 (2) ひび割れ幅-すべり関係

図 4 各種拘束条件下におけるひび割れ挙動

本研究では鉄筋量 1%以上の比較的高い拘束を対象とすること、また鉄筋量とひび割れ性状がひび割れ面の応力伝達機構に及ぼす影響を個別に検討することを目的としていることから、摩擦係数を $\tan\phi = 1.3$ 、膨張係数を $\tan\psi = 0.4$ として統一した。さらに、骨材を貫通する高強度コンクリートのひび割れ面に対しては、平滑なコンクリート面と普通強度コンクリートの中間値を採用し、摩擦係数を $\tan\phi = 0.9$ 、膨張係数を $\tan\psi = 0.2$ と設定した。

(2) ひび割れ面に各種せん断伝達特性を組み込んだ簡易モデルによる解析

① 膨張ひび割れ面における力学的挙動

図 5 に膨張ひび割れ解析モデル、図 6 せん

断力-水平変位関係、図7に変形性状を示す。

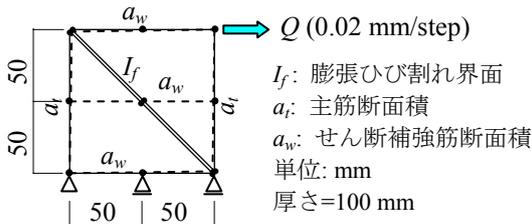


図5 膨張ひび割れモデルと補強筋

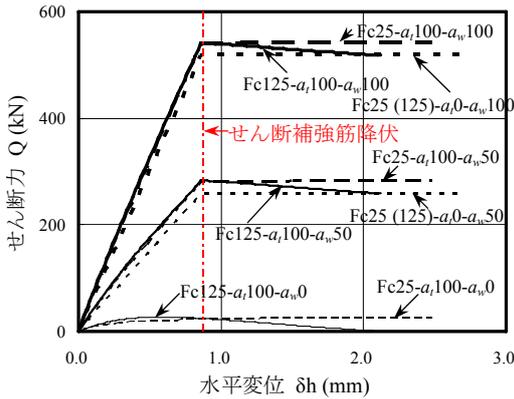


図6 せん断力-水平変位関係

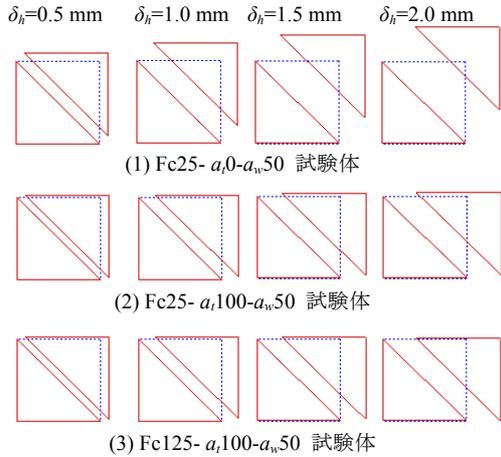


図7 膨張ひび割れの変形性状 $\delta_h=0.5$ - 2.0 mm

【結】主筋による鉛直方向の拘束力のない試験体 ($a_t=0$) では、水平変位と同程度鉛直方向に変位し、ひび割れ面にかみ合い作用は生じず、せん断補強筋がせん断力を負担した。 $a_t=100$ mm²の主筋が存在すると、鉛直方向変位が抑制され、かみ合い作用が生じた。普通強度を想定した最大骨材径が大きい場合 (Fc25)、鉛直変位は一貫して増加しているが、超高強度を想定した最大骨材径が小さい場合 (Fc125)、水平変位が 0.5 mm を超えると接触面積が小さくなり、かみ合い作用が低下し、鉛直変位は増加から減少へ転じた。

② 摩擦ひび割れ面における力学的挙動

図8に摩擦ひび割れ解析モデル、図9に変形性状を示す。

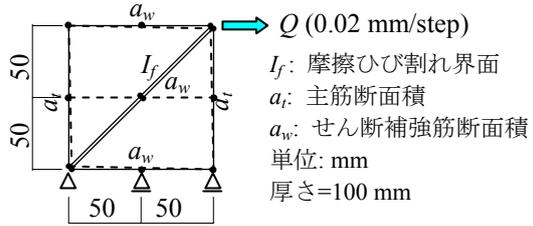


図8 摩擦ひび割れモデルと補強筋

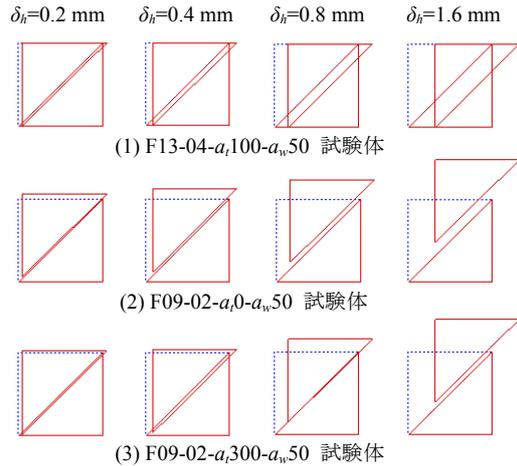


図9 摩擦ひび割れの変形性状 $\delta_h=0.2$ - 1.6 mm

【結】普通強度の摩擦係数 1.3 を想定した F13-04 試験体は、ひび割れ面にすべりを生じず、水平方向に強制変位を与えることになり、ひび割れ面には大きな応力が発生した。これに対し、超高強度の摩擦係数 0.9 を想定した F09-02 試験体は、ひび割れ面にすべりが生じ、主筋による拘束がなければひび割れ面に応力が発生せず、膨張係数 0.2 の場合、ひび割れ面上を $\delta_v/\delta_h=1.5$ で変形した。主筋による拘束が存在すると、ひび割れ面には応力が発生し、ひび割れ面を幾分押し付けながら変位するが、主筋降伏後、拘束圧が一定になると、主筋のない場合と同じ勾配でひび割れは膨張に転じた。

③ 膨張および摩擦の組合せひび割れ面における力学的挙動

図10に解析モデル、図11に変形性状を示す。

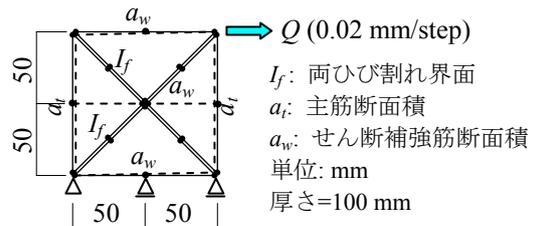


図10 膨張・摩擦ひび割れモデルと補強筋

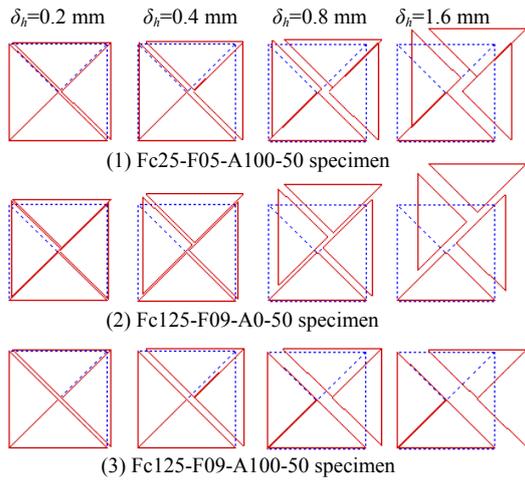


図 11 膨張および摩擦ひび割れの変形状

【結】 平滑なひび割れ面を想定した摩擦係数 0.5 の F05 試験体は摩擦面ですべりを生じ、コンクリート強度によらずほぼ同様な挙動を示した。また摩擦面のすべり変位が大きくなり一体性が損なわれると、中央のせん断補強筋が引張から圧縮側へ移行するため、有効に機能しなくなり、剛性、耐力とも大幅に低下した。Fc125-F09-A0-50 試験体は摩擦面ですべりを生じる上に、0.2 の膨張係数のため、鉛直変位が最も大きくなった。主筋が存在する Fc125-F09-A100-50 試験体、摩擦面に拘束力が働くため、すべりはほとんど生じなかった。すべりを生じない試験体の変形状は膨張ひび割れのみを考慮した解析結果①と同様な挙動を示した。摩擦ひび割れ面の応力は、膨張ひび割れの挙動が支配的になるため、②の摩擦界面のみ有する試験体より大幅に低下した。これに対し、摩擦界面ですべりが生じる場合 (F05)、膨張ひび割れ面の応力は、摩擦すべりにより膨張ひび割れ幅が抑えられるため、①の膨張ひび割れのみ有する試験体より大きな応力が伝達可能になった。

(3) 軸力を導入した超高強度コンクリート柱部材の曲げせん断実験

① せん断力-部材角関係

せん断補強筋比の小さい (0.38%) 高強度コンクリート柱の正負の Q-R 関係を図 12 に示

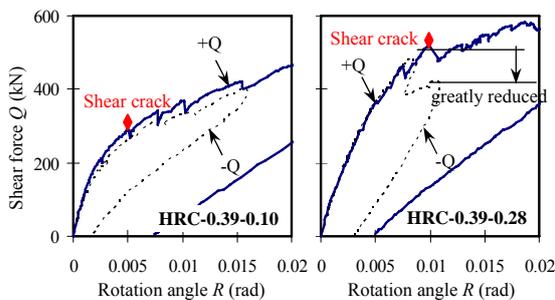


図 12 正負のせん断力-部材角関係

す。0.28 の高軸力比の試験体 (右図) は、せん断ひび割れ発生後の負荷荷サイクルで耐力が 2 割強低下した。

② ひび割れ挙動

図 13 に、実験で得られたひび割れ挙動を拡大して示す。軸力比が高いほど、せん断補強筋量が少ないほど、せん断ずれは大きくなり、正負の耐力差が大きくなった。補強筋量を増やすと、すべりは抑制できるが、補強筋が降伏するとすべりは増大する。

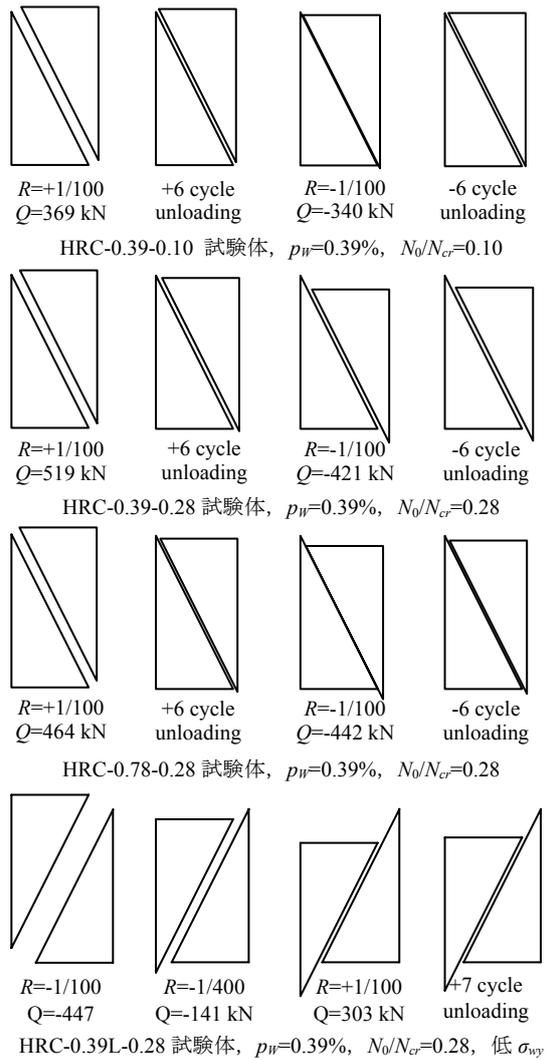


図 13 ひび割れ挙動拡大図

③ FEM 解析によるひび割れ面の摩擦係数

摩擦係数を 0.9 (F0.9) からすべりを許容しない無限大 (F∞) までの数ケース解析した FEM によるせん断力-部材角関係を、実験より得られた正方向包絡線および負方向包絡線と共に図 14 に示す。せん断ひび割れが発生するまで正負の包絡線はほぼ同じであり、摩擦面のすべりを許容しない F∞ の解析結果と近い挙動を示している。ひび割れ

発生後、すべりの増大と共に剛性は低下する。高軸力でせん断補強筋量が少ない場合、「閉じて挙動するひび割れ」のせん断ずれは、摩擦係数に大きく依存し、高強度コンクリートのひび割れ面の摩擦係数は 0.9 から 1.1 程度である。

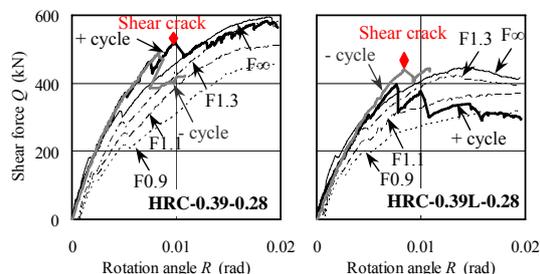


図 14 ひび割れ面の摩擦係数と Q-R 関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ①久保田透, 篠原保二, 林静雄: 超高強度コンクリートの平滑なひび割れ面が柱部材の復元力特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, 607~612, (2008), 査読有
- ②大浜設志, 中村佳史, 篠原保二, 林静雄: 鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ幅制御によるせん断力の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, 157~162, (2008), 査読有
- ③Y. Shinohara: Improvement of Durability of RC column by Transverse Prestressing, Durability of Building Materials & Components 11, A. Nil Türkeri, at al. (eds), Cenkler Matbaacılık Tic. Ltd., 379-387, (2008), 査読有
- ④篠原保二: 鉄筋コンクリートのせん断ひび割れ面における応力伝達機構, 日本建築学会構造系論文集, No. 620, pp. 109~116, (2007), 査読有
- ⑤篠原保二, 齊藤弘幸, 林静雄: 超高強度コンクリート部材の平滑なひび割れ面におけるせん断伝達メカニズム, 日本建築学会構造系論文集, No. 618, pp. 183~190, (2007), 査読有
- ⑥大浜設志, 矢野秀樹, 林静雄, 篠原保二: 軸力を変動要因とした RC 柱の損傷過程におけるせん断力の評価に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, 163~168, (2007), 査読有
- ⑦Y. Shinohara and H. Watanabe: The effects of transverse prestressing on shear and

bond behaviors of R/C columns, Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Design, Assessment and Retrofitting of RC Structures - Carpinteri, at al. (eds), Taylor & Francis, 919-927, (2007), 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Y. Shinohara: Effect of Transverse Prestressing on Shear Behaviors of High-Strength Concrete Columns, 14th World Conference on Earthquake Engineering, (2008.10.13), Beijing
- ② 篠原保二, 久保田透, 林静雄: 超高強度コンクリート柱のせん断ひび割れ挙動, 日本建築学会, (2008.9.20), 広島大学
- ③原彰吾, 大浜設志, 篠原保二, 林静雄: 鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ幅制御による許容できる入力せん断力の評価に関する研究, 日本建築学会, (2008.9.18), 広島大学
- ④ Y. Shinohara: Effect of Active Confinement on Shear Crack Behaviors of High-Strength Concrete Columns Prestressed Laterally, Fifth International Conference on Urban Earthquake Engineering, (2008.3.4), Tokyo

[図書] (計 1 件)

日本建築学会編集 (分担): 丸善株式会社, コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用, (2008), 161-172

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 保二 (SHINOHARA YASUJI)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授
研究者番号: 5 0 1 9 6 4 0 8

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし