

論文 正負交番荷重を受ける RC 柱のせん断ひび割れ幅

大高 正裕^{*1}・林 和彦^{*2}・椿 龍哉^{*3}

要旨：本研究では、RC 柱に発生するせん断ひび割れ幅を実験的に調べた。軸力と帯鉄筋量をパラメータとした小型 RC 柱供試体の正負交番載荷実験を行い、せん断ひび割れ幅を計測した。実験結果からせん断ひび割れ幅とせん断力の関係を求め、既往の算定式との比較検討を行った。その結果、軸力と帯鉄筋量がせん断ひび割れ幅に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：せん断ひび割れ幅、せん断力、帯鉄筋量、軸力

1. はじめに

せん断ひび割れが構造物に生じた場合、その後の使用性、耐久性、および補強、補修の要否に関する検討方法が必要である。この検討においてはせん断ひび割れ幅が重要な要因になると考えられるがコンクリート標準示方書¹⁾にもせん断ひび割れ幅の記述は少ない。そこで、本研究では RC 柱を対象とした供試体を作製して正負交番荷重を与え、せん断ひび割れ幅を調べた。柱部材のため、柱に作用する軸力の大きさと帯鉄筋量をパラメータとした。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

供試体の形状寸法を図-1に、諸元とコンクリートの力学特性を表-1に、鋼材の力学特性を表-2に示す。

供試体は、せん断スパンと柱断面高さとの比が3、フーチング部分は1300×400×600mmのものを各種1体ずつ作製した。柱部分の軸方向鉄筋にはD13(SD345)を24本用い、鉄筋比を3.38%とした。また、帯鉄筋にはD6(SD295A)を用い、100mm間隔の配筋(帯鉄筋比0.21%、以下H10)と50mm間隔の配筋(帯鉄筋比0.42%、以下H05)とした。

コンクリートには柱部分では呼び強度21MPa、フーチング部分では呼び強度27MPaのレディーミクストコンクリートを用いた。ともに早強ポ

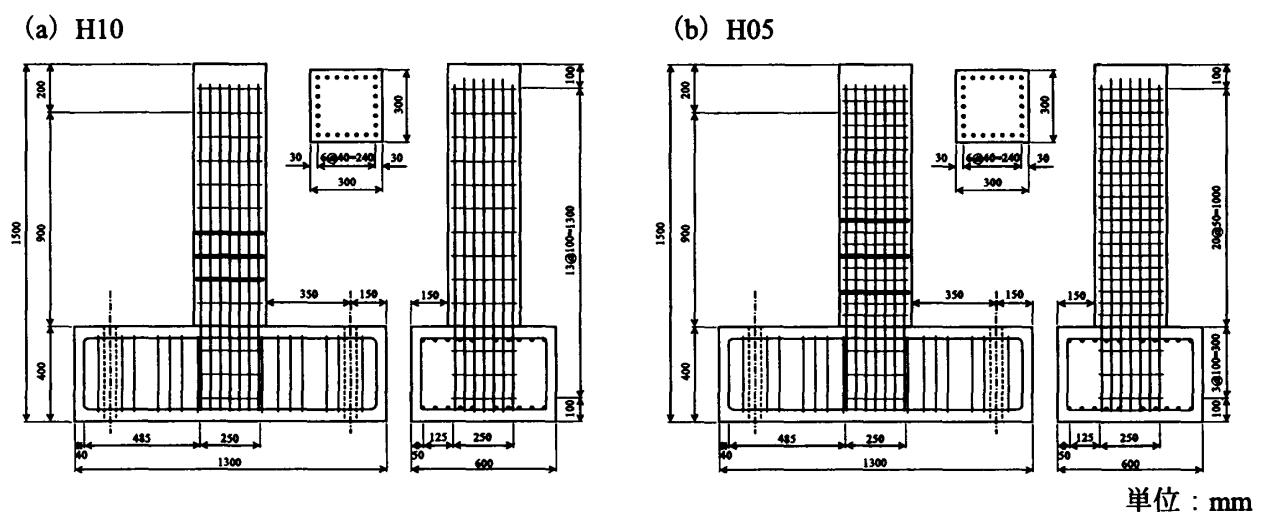


図-1 供試体形状寸法

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻(正会員)

*2 横浜国立大学大学院 工学研究院 助手 修(工)(正会員)

*3 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 Ph.D(正会員)

表－１ 供試体諸元・力学特性

No.	供試体名	軸応力 (MPa)	断面寸法 (mm)×(mm)	有効高さ (mm)	軸方向鉄筋 (径)×(本)	軸方向鉄筋比 (%)	帯鉄筋 (径)×(間隔)	帯鉄筋比 (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	降伏荷重 (kN)	最大せん断力 (kN)
1	H10-N0	0.0	300×300	270	D13×24	3.38	D6-100mm	0.21	32.2	2.47	27.3	0.189	160	184
2	H10-N2	2.0							32.3	2.71			160	182
3	H10-N4	4.0							30.0	2.83			180	194
4	H05-N0	0.0					D6-50mm	0.42	30.9	2.57	28.1	0.185	140	164
5	H05-N2	2.0							30.8	2.74			160	186
6	H05-N4	4.0							30.2	2.79			180	207

※供試体名の付け方 [H10：帯鉄筋間隔 100mm, H05：帯鉄筋間隔 50mm] - [N 軸応力度 (MPa)]

表－２ 鋼材の力学特性

呼び名	規格	弾性係数 (GPa)	降伏点 (MPa)	降伏ひずみ (μ)
D13	SD345	188	391	2080
D6	SD295A	192	336*	1778

* 永久伸び 0.2% に対してオフセット法で算出した値
ルトランドセメントを用い、目標スランプは 8cm、粗骨材の最大寸法は 20mm である。

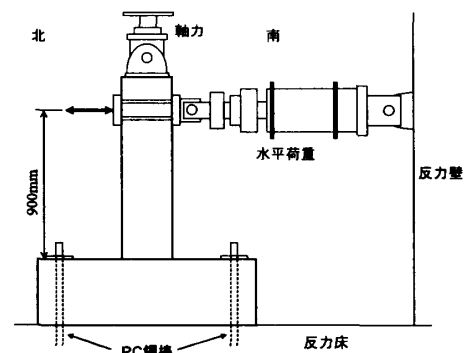
供試体のコンクリートはフーチング部を 2 層に分けて打ち込み、1 日養生した後、柱との接合部のレイタンス除去を行い、柱部分を 4 層に分けて打ち込んだ。また、打込み時には各層毎に棒状バイブレーターを用いて十分な締固めを行った。

2.2 載荷方法

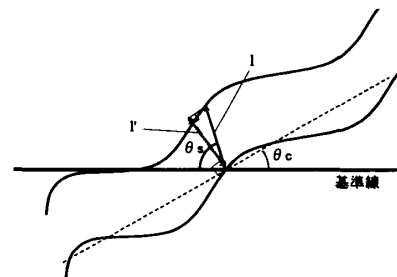
載荷には図－２に示す 2 本のアクチュエーターを使用し、柱頭部に一定の軸圧縮力を載荷しながら水平力を作用させた。水平載荷の繰返しは、各管理荷重（変位）で正負 1 回ずつ行い、軸方向鉄筋の降伏までは 120kN まで 40kN ずつ漸増、それ以降は 20kN ずつ漸増させた。軸方向鉄筋の降伏後は、変位制御で回転角 1/200rad（水平変位 4.5mm）ずつ 7/200rad まで増大させた。軸圧縮力の大きさは平均軸圧縮応力度が 0.0MPa、2.0MPa、4.0MPa の 3 種類である。

2.3 計測方法

各供試体ともに基部より 2B 区間（B は柱断面幅）までの全ての帯鉄筋の中央部の表裏にゲージ長 2mm のひずみゲージを貼り付けた。H05 シリーズは B（300mm）と 1.5B（450mm）、0.5B（150mm）、H10 シリーズには B（300mm）と 400mm、200mm の部分の帯鉄筋（図－１中の太



図－２ 載荷装置



図－３ ひび割れ幅補正方法

線位置）に中央から 55mm 間隔で計 5 ケ所の表裏にひずみゲージを貼り付けた。また、軸方向鉄筋については南北向き側面の中央の引張鉄筋基部にひずみゲージを貼り付けた。

ひび割れの観察には、CCD 方式のマイクロスコープ（最大倍率 175 倍）を用いた。せん断ひび割れの計測は、帯鉄筋にひずみゲージを 5 ケ所貼り付けた高さの線を通るひび割れに対して各載荷サイクルの載荷時、除荷時に行った。また、せん断ひび割れ幅としては、ひび割れ発生前の対応点間の距離を計測した。それらの値を、ひび割れ上の代表点のずれの角度 θ_s で補正し、ひび割れ方向 θ_c に垂直となる線分の長さをせん断ひび割れ幅とした。その補正方法を図－３に

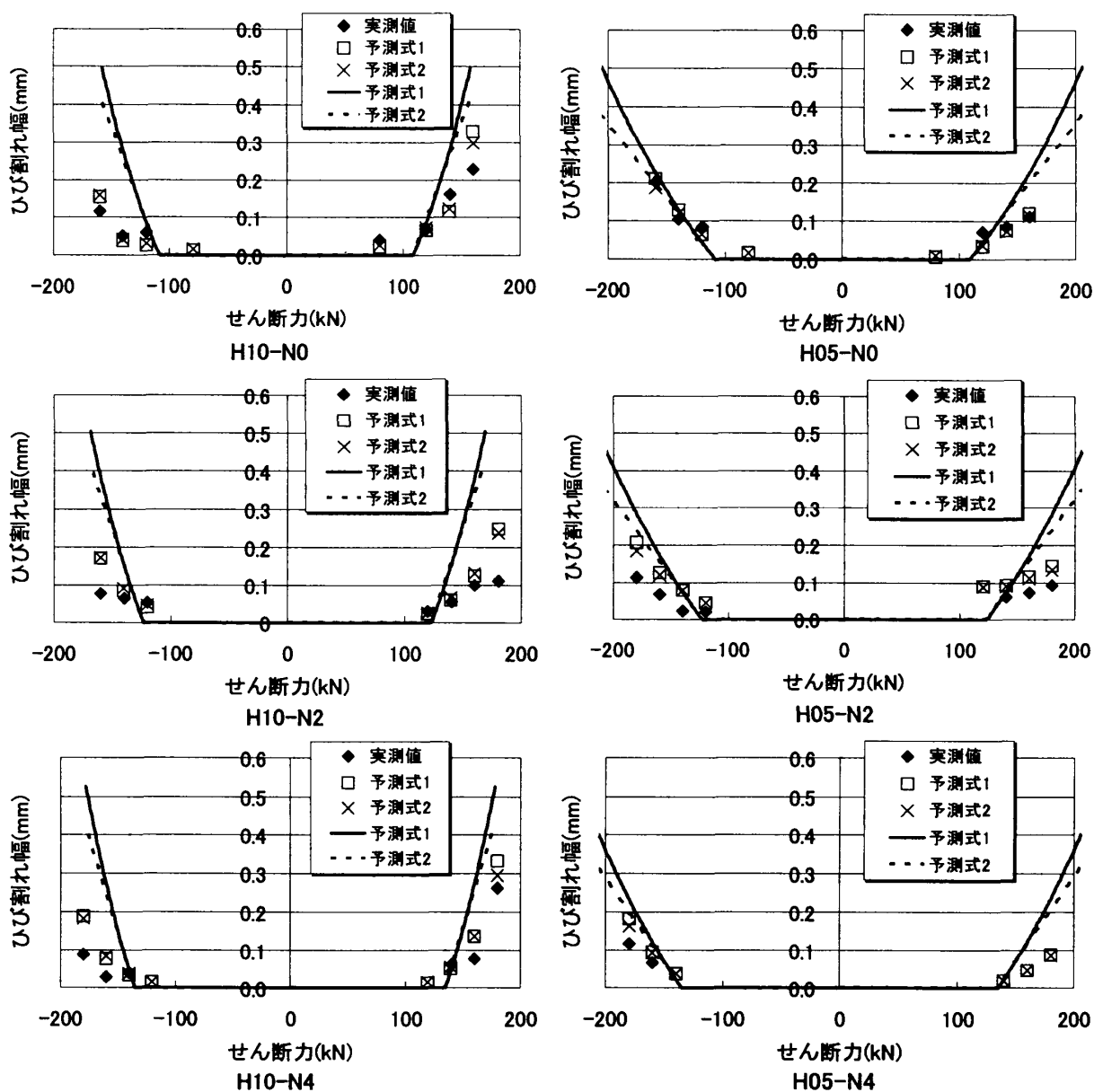


図-4 荷重時せん断ひび割れ幅

示す。

また、ひび割れ計測をした高さの水平方向に200mm 間隔で標点を付け（柱中央から各々100mm の位置）、その距離をノギスで計測した。

表-3 実験結果

No.	供試体名	せん断ひび割れ発生荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
1	H10-N0	80	160	166
2	H10-N2	120	160	182
3	H10-N4	120	180	194
4	H05-N0	80	140	164
5	H05-N2	120	160	186
6	H05-N4	140	180	207

3. 実験結果および考察

荷重実験の結果を表-3 に示す。

現在提案されているせん断ひび割れ幅算定式は荷重時の梁を対象としており、軸力が考慮されていないが、それらの式の柱への適用性を確認するために本実験で計測したデータと算定式の計算値を比較した。検討した式は、上田らの予測式²⁾ (以下, 予測式1)と CEB-FIP Model Code 1990 の予測式³⁾ (以下, 予測式2) である。これらの式は両式ともにせん断補強筋のひずみよりせん断ひび割れ幅を算出する式となっている。式の概略を以下に示す。

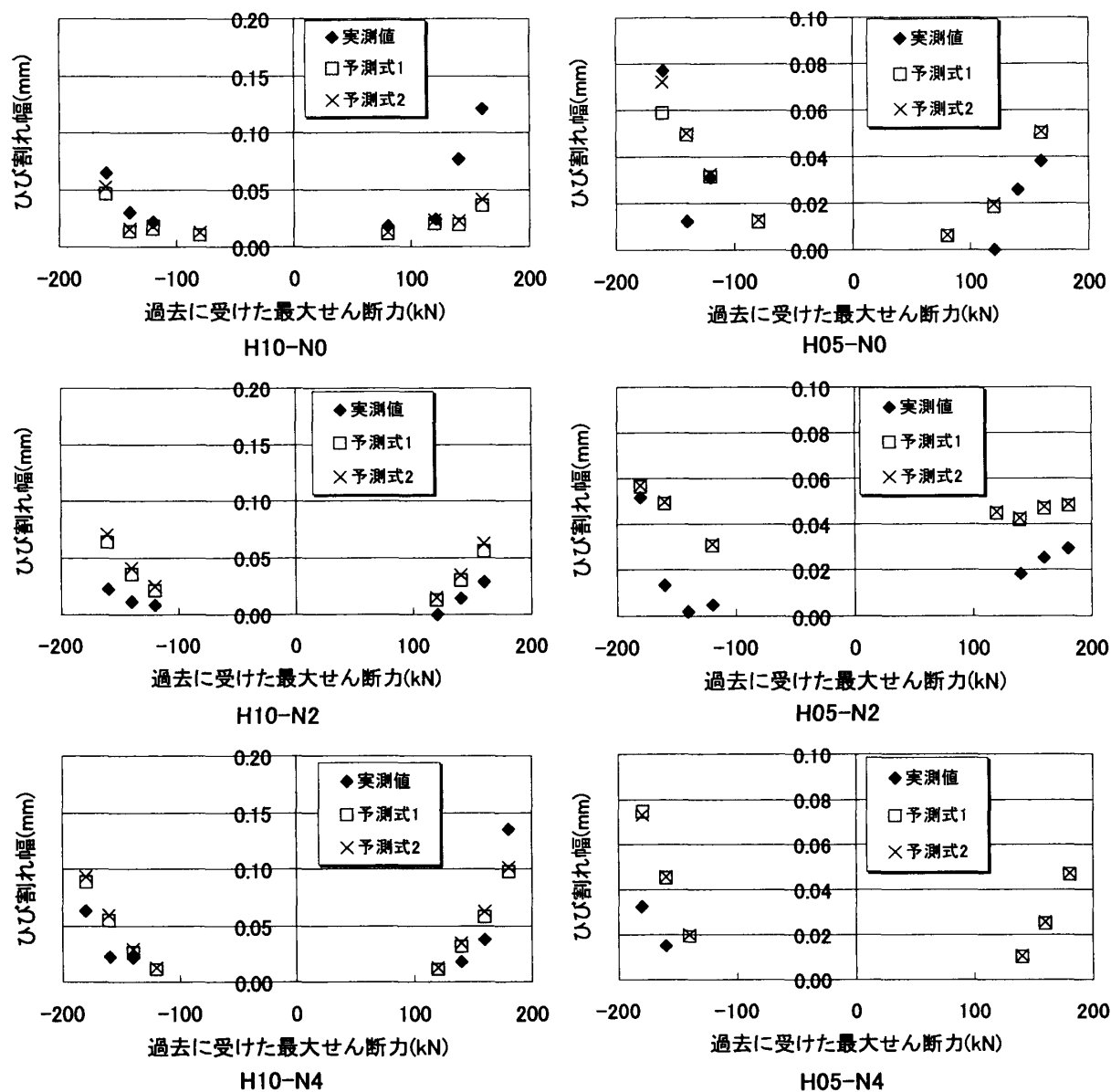


図-5 除荷時せん断ひび割れ幅

$$w = w(\varepsilon_{wpd}); \varepsilon_{wpd} = \sigma_{wpd} / E_s; \sigma_{wpd} = \sigma_{wpd}(V) \quad (1)$$

ここに、 w ：せん断ひび割れ幅、 ε_{wpd} ：せん断補強筋ひずみ、 σ_{wpd} ：せん断補強筋応力度、 E_s ：せん断補強筋のヤング係数、 V ：せん断力である。

また、軸方向鉄筋の降伏後は、計算上はせん断力一定でせん断ひび割れ幅が増加する結果となり、既往の算定式をそのまま使用することができない。したがって、本研究では軸方向鉄筋降伏の前後で分けて考察した。

1本の帯鉄筋に5ヶ所貼り付けたひずみゲージは、両端の値のばらつきが大きく、中央の3ヶ所の平均をその補強筋のひずみとした。

3.1 軸方向鉄筋降伏前

(1) 載荷時のせん断ひび割れ幅

せん断ひび割れ幅とせん断力の関係を図-4に示す。ここで、実測値は、各せん断力毎に計測されたひび割れ幅の平均値を表す。また、予測式を用いてせん断力から計算した結果（線表示）と計測された帯鉄筋のひずみから計算した結果（マーカー表示）も示す。せん断力より計算したときのコンクリートのせん断耐力計算には二羽らの式⁴⁾を用いた。予測式1と2はひび割れ幅が小さい時はよく一致しているが、大きくなるにしたがい予測式1の方が上回る傾向があ

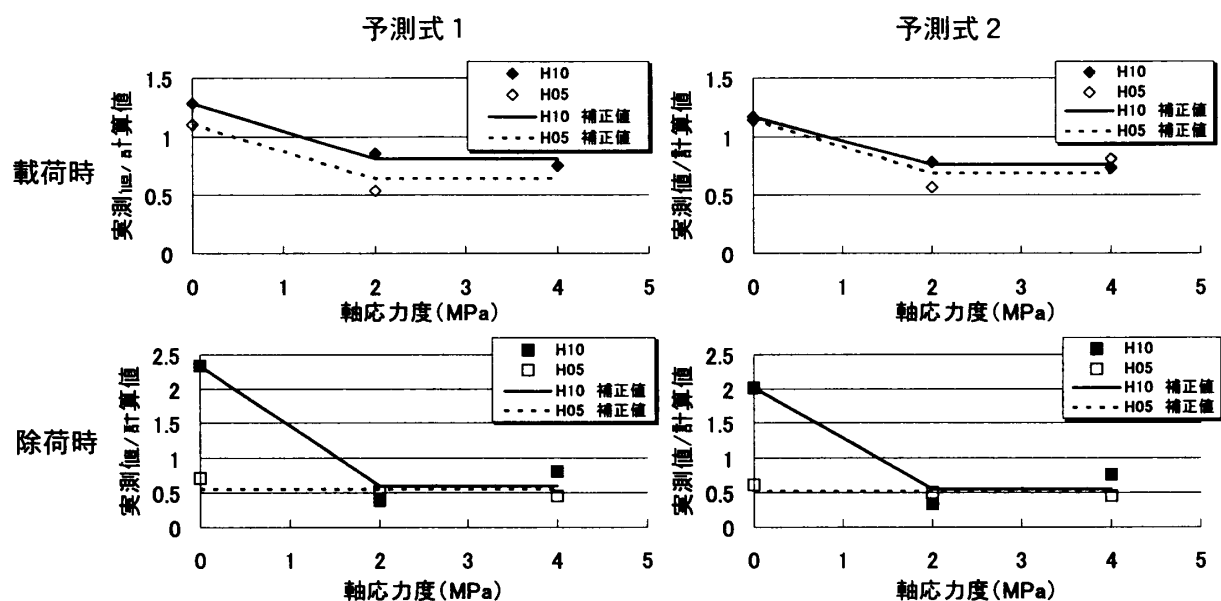


図-6 実測値と計算値の比較

った。なお、同じ高さで計測されたせん断ひび割れの平均幅は、計測した3点の高さでほぼ同じ値となった。軸応力度が0MPaの時にはその平均幅と計算値もよく一致している。また、軸力が作用すると実測値が計算値を下回る傾向があるという結果が得られた。

(2) 除荷時のせん断ひび割れ幅

除荷後の残留ひび割れ幅と除荷する前の最大せん断力との関係を図-5に示す。また、除荷後の帯鉄筋のひずみから、予測式1, 2を除荷時にも適用して計算したひび割れ幅も示す。除荷後も載荷時と同様に平均幅を示している。除荷後はH10-N0を除いて、実測値が計算値を下回る傾向が見られた。

(3) 実測値と計算値の比較

図-6に実測値と計算値の比較を示す。これは計測した全てのひび割れ幅に対して実測値を計算値で除し、供試体ごとに平均を取ったもの

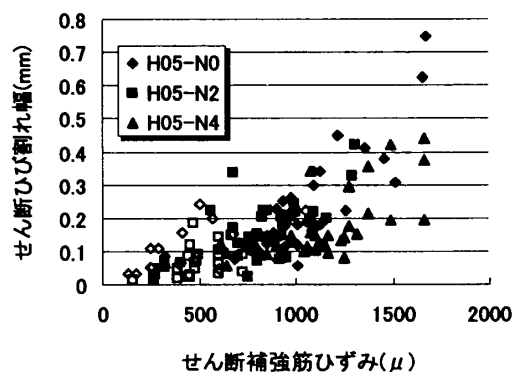


図-7 せん断補強筋ひずみ-せん断ひび割れ幅関係

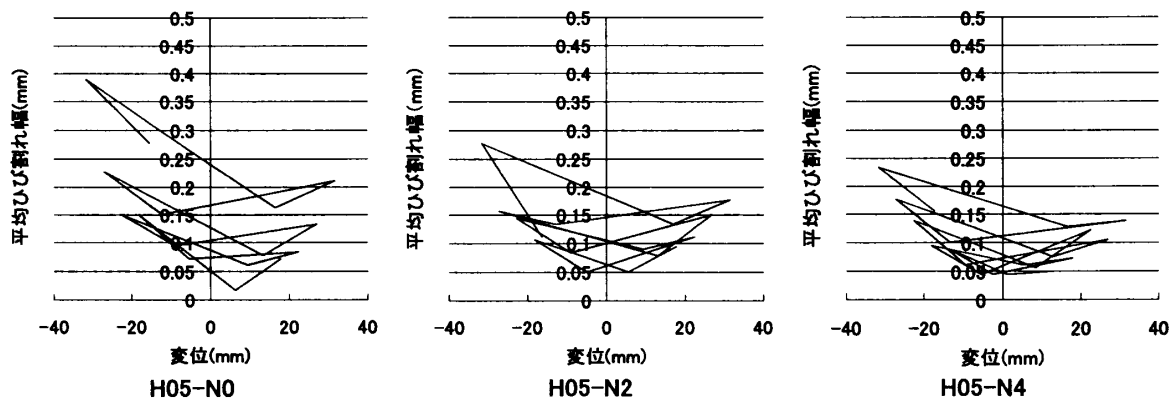


図-8 平均ひび割れ幅-変位関係

である。載荷時の軸応力度 0MPa の供試体では予測式は両者ともに近い値を示している。しかし、軸力が作用すると全ての供試体で実測値は計算値を下回る結果となった。しかし、 2MPa 以上の平均軸応力度では大きな差は見られなかった。除荷時には、H10-N0 供試体で大幅に計算値を上回った他は、ほぼ一定の値を示した。

これより軸力が構造物に作用している場合や除荷時には、現在提案されているせん断ひび割れ幅予測式による値は補正する必要がある、図-6 に示したバイリニアの関係 (H05 の除荷時は一定値) をその補正值として求めた。

3.2 軸方向鉄筋降伏後

軸方向鉄筋の降伏後は、せん断力がほとんど増加しないまません断ひび割れ幅が増える挙動を示す。以下では H10 シリーズの供試体は軸方向鉄筋の降伏直後に帯鉄筋も降伏したため、H05 シリーズのみを対象とする。

図-7 にせん断補強筋ひずみとせん断ひび割れ幅の関係を示す。軸力が大きい供試体の方が、同じひずみの時にせん断ひび割れ幅が小さいという傾向があることがわかる。これは、軸方向鉄筋の降伏に関係なく軸力の影響を受けるということを示している (図中の白抜きのマーカーは軸方向鉄筋降伏前のデータである)。また、図-8 はノギスで計測した値から平均ひび割れ幅を計算したものである。標点間増加距離を水平方向の総ひび割れ幅と考え、標点間の平均ひび割れ本数が 3 本として、距離の増分をひび割れ本数で除した値を平均せん断ひび割れ幅とした。なお、せん断ひび割れ幅を標点間距離を計測して検討した例としては文献 5)~7) がある。図-8 より軸方向鉄筋が降伏した後、載荷点変位に比例してひび割れ幅が増加し、また軸力が大きい供試体ほどせん断ひび割れ幅は小さいことがわかる。

4. 結論

正負交番荷重が作用する RC 柱のせん断ひび割れ幅を、作用する軸力の大きさと、帯鉄筋量

をパラメータとして実験的に調べた。本研究で得られた結論は次のようにまとめられる。

- (1) 軸力が作用する状態ではせん断ひび割れ幅は増加しにくくなり、既往の予測式による載荷時の値を補正することが必要である。
- (2) 除荷時の残留せん断ひび割れ幅は、既往の予測式による値に補正係数を乗じることで求めることができる。
- (3) 帯鉄筋量はせん断ひび割れ幅の増加に大きく影響を与える。しかし、載荷時の鉄筋位置における帯鉄筋のひずみとせん断ひび割れ幅の関係には帯鉄筋量は影響しないことが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 2) Hussein, M.H, Sabry, A.F, Ueda, T: Displacements at Shear Crack in Beams with Shear Reinforcement under Static and Fatigue Loadings, Proc. of JSCE, No.433/V-15, pp.215-222, 1991
- 3) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Chapter 15, Thomas Telford, 1993
- 4) 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 はりのせん断強度の再評価，土木学会論文集，第 372 号/V-5, pp.167-176, 1986 年 8 月
- 5) 松石長之，川西泰一郎，久田祐司，渡邊史夫：鉄筋コンクリート造梁のせん断ひび割れ幅制御に関する研究 (その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国)，pp.909-910, 1999 年 9 月
- 6) 柳瀬圭児，大野義照，李振宝，南宏明：鉄筋コンクリートのせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, pp.343-348, 2002
- 7) 柳瀬圭児，大野義照，中川隆夫：RC および PRC 梁のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.433-438, 2003