

論文 プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素の複合効果

中野 克彦^{*1}・原田 佳政^{*2}・酒井 栄典^{*2}・松崎 育弘^{*3}

要旨: 本研究は、プレキャスト RC 部材接合面に存在するせん断抵抗要素を明確にし、個々の構成則（復元力）の変形適合を考慮した累加方法を示すことを目的としている。接合筋のダボ抵抗、シヤキーの直接せん断抵抗および摩擦抵抗を取り上げ、個々の抵抗要素を組み合わせた要因で実験を行い、個々の構成則およびズレ変形を考慮した耐力累加により実験結果を評価できることを示した。

キーワード: PCa 接合面、接合筋のダボ抵抗、シヤキーの直接せん断抵抗、軸力、摩擦抵抗

1. はじめに

現状では、プレキャスト RC（以下、PCa）部材を組み込んで構築された構造物についての構造性能の確保は、その構造物がすべて現場打ちにより施工されてきた構造物を想定し、設計された諸外力に対して、その応答が各部の挙動でほとんど同等であることを期待するような観点、すなわち「一体打ちと同等」という評価基準が示されている。したがって、PCa 部材接合面は、種々の方法による粗面仕上げ、または、シヤキー、接合筋等を設けることで一体性を確保しているのが一般的であり、実務的な構造実験において一体打ち部材と同等の構造性能であることを確認することに焦点が絞られている。

一方、接合部の設計式としては、「壁式 PCa 造設計規準」¹⁾に示されており、シヤキーの耐力と接合筋のせん断摩擦効果の累加により評価している。今までに数多く提案されている接合部のせん断抵抗力評価式においても、これらの抵抗要素の破壊荷重をベースにそれぞれの耐力を累加する方法が提案されている。さらに、接合筋のせん断摩擦効果は降伏強度に摩擦係数および減減係数を乗じて与えられており、1960 年代に Mast 等によって提案されたせん断摩擦理論の仮説に基づいた耐力法²⁾を引用している。

これらの係数は各々の実験から決められている。

従来の性能確認実験による検証手法では、PCa 接合部の仕様が限定され、建物ごとに類似の構造実験が数多く実施されるだけで、接合部ディテールを決定できる設計法は確立しない。したがって、個々の性能確認実験を行うことなく、接合部の応力伝達機構に立脚し、理論的モデルによって設計法を体系化する必要があると考える。本研究は、構成則（復元力）の異なる複数のせん断抵抗要素の累加法、特に摩擦抵抗要素を含めた方法を実験により検証することを目的とする。

2. PCa 部材接合面の抵抗要素の累加方法

PCa 部材接合面のせん断抵抗要素を、1) 接合筋のダボ抵抗 (Q_{dwl})、2) シヤキー耐力 (Q_{sky})、3) 圧縮軸力下の摩擦抵抗 (Q_{fic})、接合面の状態による付着抵抗 (Q_{adh}) と考える。これらの抵抗要素のせん断力伝達機構は、シヤキーおよび付着のように微小なズレ変形で強度を発揮するが脆性的に破壊する特性を有する場合と、接合筋のように数ミリのズレ変形が生じて強度を発揮する場合、さらに摩擦のようにズレ変形には関係なく軸方向力に対して一定値を示す場合があり、単純な強度累加はできないと考える。

*1 東京理科大学助手 工学部建築学科（正会員）

*2 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻

*3 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

Q_{dwl} と Q_{sky} の累加は、各々の構成則を提案し、ズレ変形を適合させた耐力累加により複合効果を評価している^{3),4)}。この評価方法は、接合面に軸方向力が生じる場合についても、同様に、適用可能である。なお、付着抵抗に関しては多種多様な方法があり、その不確実性のために除外するが、設計的には余剰耐力として考える。

3. 実験概要

3.1 試験体

図-1 に試験体形状一例、表-1 に試験体要因一覧、表-2 に使用したコンクリートおよび接合筋の材料試験結果を示す。

試験体は幅 860mm (切欠部分を除く)、厚さ 225mm の接合面 (面積: $A_j=193500 \text{ mm}^2$) を有している。要因は接合面のせん断抵抗要素の種類および接合面に生じる軸力である。せん断抵抗要素は、1) 圧縮軸力下の摩擦抵抗、2) 接合筋のダボ抵抗、3) シヤキーの直接せん断抵抗とし、表-1 に示した組合せにより複合効果を調べた。

接合筋は溝切り加工を施した D22 ネジ節鉄筋 (断面積: 367 mm^2) 2 本であり、接合面の中央部より両側に 210mm の位置に、接合面に直角に設けた。シヤキーは、高さ 30mm、幅 240mm の支圧型であり、接合面の中央部に 1 個設けた。コンクリートは、接合面の型枠に鋼板を用いて、最初に下部、5 日後に上部を平打ちで打設した。接合面の処理は、上部コンクリート打設直前に、グリースを均一に 0.5mm 程度の厚さで塗布することにより、接合面の付着抵抗をできるだけ除去する処理を施した。

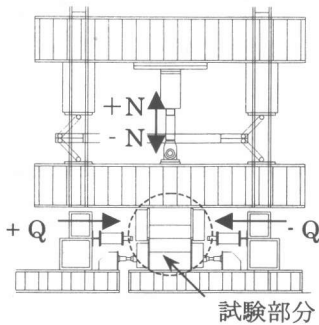


図-2 加力装置図

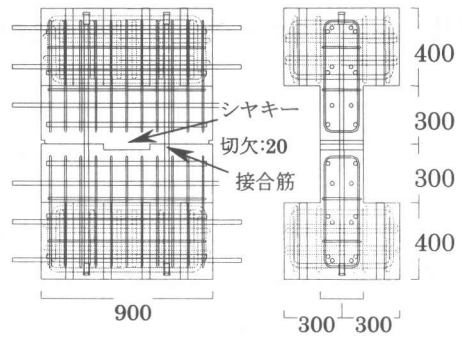


図-1 試験体形状 (単位:mm)

表-1 試験体要因一覧

No.	軸力 (kN)	接合面せん断抵抗要素		
		摩擦抵抗	ダボ抵抗 ^{*3}	シヤキー
RF01	変動 ^{*1}	○	×	×
RF02	0	×	×	○
RF03	1500	○	×	○
RF04	0	×	○	×
RF05	1500	○	○	×
RF06	-220	×	○	×
RF07	-220 ^{*2}	×	○	×
RF08	0	×	○	○
RF09	1500	○	○	○
RF10	-220	×	○	○

*1) 250kN~2000kN で 250kN 間隔の 8 段階

*2) 正加力は -220kN, 負加力は 100, 750, 1500kN

*3) RF07 の接合筋は SD685 材, その他は SD345 材

表-2 材料試験結果一覧

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²) ^{*1}
上部	31.1	2.79	28.1
下部	66.7	3.77	35.0
平均	48.9	3.28	31.6
接合筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SD345	380	592	180
SD685	735	897	198

*1) 圧縮強度の 1/3 強度時の割線剛性

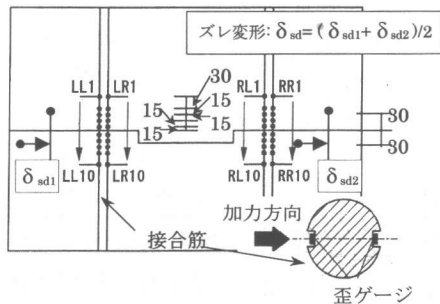


図-3 測定装置図

3.2 実験方法

図-2に加力装置，図-3に測定位置を示す。加力は上下スタブが平行になるように一定軸力(N)を保ち，上部コンクリート部分に直接せん断力(Q)を与える正負交番繰返し载荷とした。加力の制御は変位制御とし，変位 δ_{sd} は上下スタブ間の相対変位とした。加力履歴は $\delta_{sd}=3\text{mm}$ ， 6mm および 9mm で繰り返した。

4. 実験結果

4.1 圧縮軸力下の摩擦抵抗

RF01のせん断抵抗要素は圧縮軸力下の摩擦抵抗であり，8段階の軸力レベル(N=250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000 kN)で実験した。図-4にN=500, 1500kN時のQ- δ_{sd} 関係を示す。全ての軸力レベルにおいて，摩擦抵抗は δ_{sd} に関係なく一定の値を維持し，その値は軸力レベルで異なる結果が得られた。

4.2 シヤキー

せん断抵抗要素がシヤキーであるRF02(N=0 kN)，RF03(N=1500kN)のQ- δ_{sd} 関係を図-5に，破壊状況を写真-1に示す。RF03のせん断抵抗要素はシヤキーと摩擦抵抗である。両試験体の復元力特性は，シヤキー支圧部のコンクリートの圧縮およびシヤキー隅角部より発生したせん断ひび割れ等により剛性が低下し，シヤキー支圧部の圧壊により最大耐力に至っている。シヤキーの圧壊現象が観察されるまでの剛性は，コンクリートの圧縮性状に影響されると考えられる。最大耐力以降の復元力特性は，支圧型のシヤキーであるために抵抗力を維持する傾向がみられるが，シヤキー隅角部より発生したせん断ひび割れが，正負繰返しにより繋がり，急激な耐力低下を示す現象がRF03でみられた。

4.3 ダボ抵抗

せん断抵抗要素が接合筋であるRF04(N=0kN)，RF05(N=1500kN)，RF06(N=-220kN)のQ- δ_{sd} 関係および包絡線を図-6に示す。

摩擦抵抗は圧縮軸力時に生じるため，RF04，RF06のせん断抵抗要素はダボ抵抗のみである。

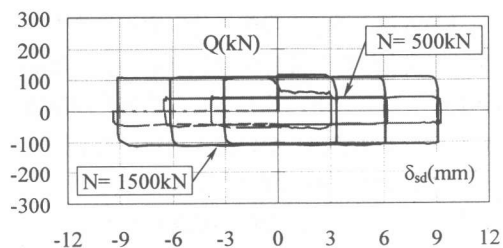


図-4 Q - δ_{sd} 関係 (摩擦抵抗)

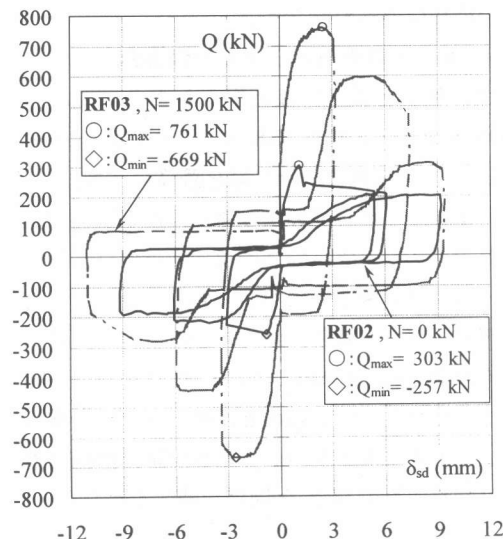


図-5 Q - δ_{sd} 関係 (シヤキー)

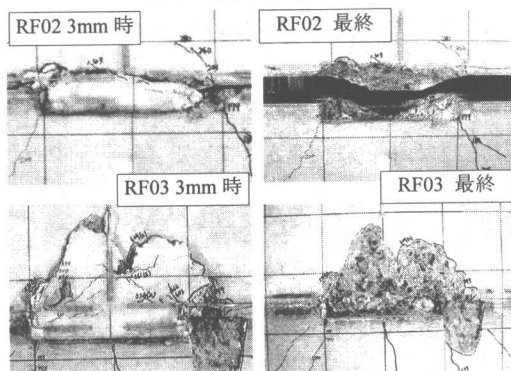


写真-1 シヤキーの破壊状況

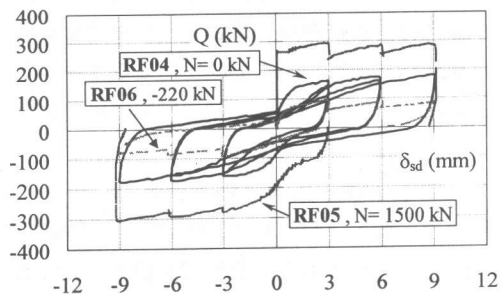


図-6 Q - δ_{sd} 関係 (接合筋のダボ抵抗)

RF04, RF06 は、 δ_{sd} の増加に伴い徐々に剛性が低下し、接合筋の局部降伏（接合筋のある断面が全塑性モーメントに達した時と定義）以降は抵抗力があまり増加しない復元力特性をもっている。RF05 は $Q=260\text{kN}$ までズレが生じず、ズレが生じるとともに接合筋が局部降伏したため、RF04, RF06 でみられた局部降伏までの剛性低下の様相はみられなかった。

4.4 ダボ抵抗とシヤキーの複合

せん断抵抗要素が接合筋とシヤキーである RF08 ($N=0\text{kN}$), RF09 ($N=1500\text{kN}$), RF10 ($N=-220\text{kN}$) の $Q-\delta_{sd}$ 関係および包絡線を図-7 に示す。RF09 はシヤキー、接合筋および摩擦抵抗がせん断抵抗要素である。各試験体の復元力特性は、シヤキーのみの試験体と類似しており、シヤキー支圧部の圧壊により最大耐力に至っている。引張軸力の RF10 試験体は、2cycle 時にシヤキー隅角部より発生した正負のせん断ひび割れが繋がりシヤ・オフ破壊を示し、それ以降は抵抗要素が接合筋のみの RF06 と同様な特性を示した。

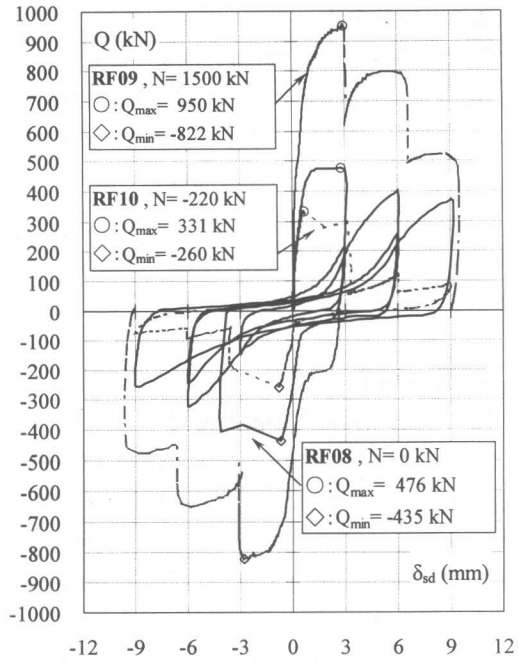


図-7 Q - δ_{sd} 関係（接合筋とシヤキー）

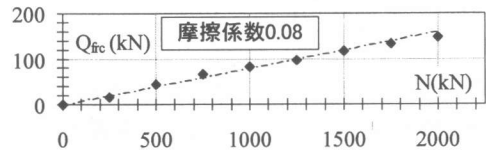


図-8 摩擦抵抗と軸力の関係

5. せん断抵抗要素の累加方法

本実験結果では、 $\delta_{sd}=1\text{mm}$ 程度で接合筋の局部降伏およびシヤキーの圧壊が生じていることから、 $\delta_{sd}=1\text{mm}$ 程度がシヤキーおよび接合筋の持つ能力が十分に発揮されているズレ変形であると考えられる。そこで、ズレ変形が $1\sim 3\text{mm}$ での異なる抵抗要素の複合効果を考察する。

5.1 摩擦抵抗力と軸力効果

図-8 に接合面に生じる軸力 (N) と摩擦抵抗力 (Q_{fr}) の関係を示す。 Q_{fr} は接合面でズレが生じ始める時のせん断力である。これより、接合面に付着抵抗が無い場合（グリースを塗布した場合）の摩擦係数は 0.08 であることがわかる。 Q_{fr} は δ_{sd} に関係なく軸力に摩擦係数を乗じることにより評価できる。

5.2 シヤキー耐力と軸力効果

シヤキー耐力 (Q_{sky}) は、RF02 で 303kN 、RF03 で 761kN であり、支圧部面積で除した支圧強度の上部コンクリート強度に対する比は、

1.6 倍 (RF02), 3.9 倍 (RF03) である。同様に、RF03 の Q_{sky} から Q_{fr} を除いた値は 3.3 倍となり、シヤキーに生じる圧縮応力によりシヤキーの耐力が上昇していることがわかる。

5.3 シヤキーとダボ抵抗の累加

シヤキー耐力と接合筋のダボ抵抗力の累加は、各抵抗要素の変形を適合させる必要がある。

(1) 接合筋のダボ抵抗機構 接合筋のダボ抵抗機構を図-9 に示すモデルで検討する。上下コンクリートの各接合筋は、せん断力 (q) によりコンクリート内で変形を生じてコンクリート反力を受ける。この単位長さあたりの反力を $p_s(x)$ とし、式 (1) で表す。ここで、上下コンクリート内の各水平反力係数 k_c が深さ方向に一定であると仮定すると、各接合筋の曲げ変形に対する基本方程式は式 (2) により与えられ、接合筋の回転角 θ_x 、曲げモーメント M_x 、せん

断力 Q_x は式 (3) で求められる。

$$p_s(x) = k_c \cdot B \cdot y \quad (1)$$

$$E_s I_s \frac{d^4 y}{dx^4} + k_c \cdot B \cdot y = 0 \quad (2)$$

$$\theta_x = -\frac{dy}{dx}, M_x = -E_s I_s \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right), Q_x = -E_s I_s \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right) \quad (3)$$

ここに、 x : 接合面からの深さ(mm), y : 深さ x での接合筋の変位(mm), E_s : 接合筋のヤング係数 (N/mm^2), I_s : 接合筋の断面 2 次モーメント (mm^4), $p_s(x)$: 深さ方向 x での単位長さあたりの水平コンクリート反力 (N/mm), B : 接合筋径 (mm), k_c : 上下コンクリートの各水平反力係数 (N/mm^3)

$$[k_c = \kappa \cdot (y_0)^3 / \sigma_B, \kappa = 4.2],$$

σ_B : 上下コンクリートの各圧縮強度 (N/mm^2),

y_0 : 接合面における上下コンクリートの各接合筋のズレ変形 (mm)

式 (2) は、弾性支承梁の方程式であるが、 k_c を実験結果より定義し、ズレ変形の非線形性を表現した。接合面では、絶対値が等しく反対方向のせん断力が生じているため、相対変位が生じるが回転は生じない。したがって、接合面ではせん断力 Q_x だけで曲げモーメント M_x は作用していない。また、式 (2) において、 $k_c \cdot B$ および $E_s I_s$ を一定として理論解を求めると、上下コンクリート内の各接合筋の局部降伏点までの接合面でのズレ変位 δ_{sd} は式 (4) となり、最大曲げモーメント M_{max} は式 (5) となる。

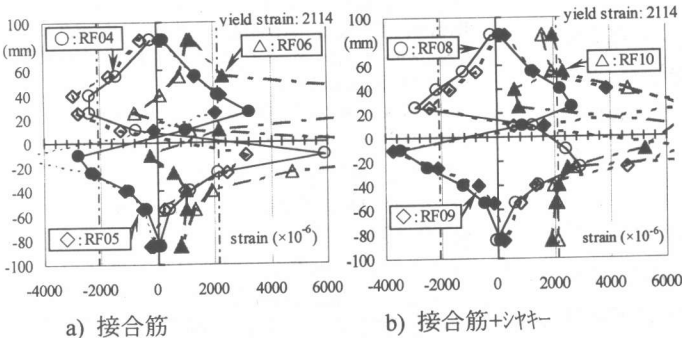


図-10 接合筋の歪分布

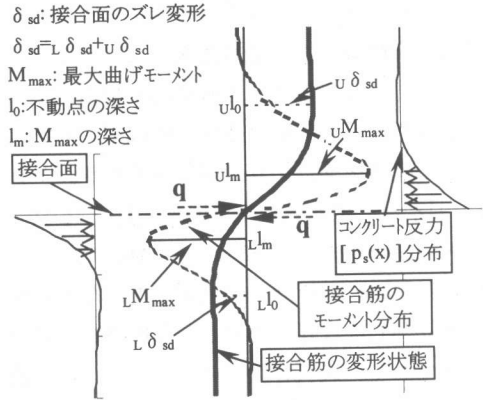


図-9 接合筋のダボ抵抗機構

$$\delta_{sd} = \frac{q}{2E_s \cdot I_s \cdot \beta} \quad (4)$$

$$M_{max} = -\frac{q}{\beta} e^{-\frac{\pi}{4}} \cdot \sin \frac{\pi}{4} = -0.3224 \frac{q}{\beta} \quad (5)$$

ここに、同式の β は式 (6) の値である。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_c \cdot B}{4E_s \cdot I_s}} \quad (6)$$

(2) ダボ抵抗の復元力 図-10 は、せん断抵抗要素が接合筋である試験体およびシヤキーと接合筋である試験体の $\delta_{sd} = 1mm$ 時の接合筋の歪分布であり、図-11 は図-10 に示した歪分布を 2 回積分することにより求めた接合筋の変形状態である。また、図-11 中に図-9 で示したダボ抵抗機構により求めた計算値を示す。

同一 δ_{sd} 時の接合筋の歪分布は、シヤキーの有無による差はなく、軸力の違いによる差は軸方向歪であり曲げによる歪分布は同様な分布を

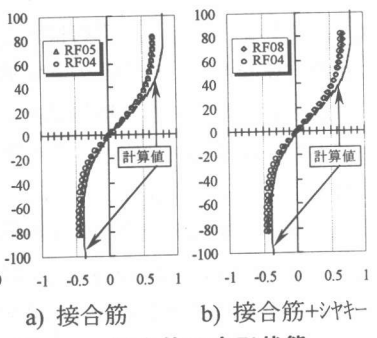


図-11 接合筋の変形状態

示している。また、接合筋の変形状態における計算値と実験値は良い適合性を示している。

これらから、シヤキーの有無および軸力レベルに関係なく、接合筋の変形状態は図-9 で示したダボ抵抗機構により説明できる事がわかる。

図-12 は、接合筋のダボ抵抗 (q_{dwl}) と接合面のズレ変形 ($\delta_{sd}=0\sim 3\text{mm}$) の関係である。実験値は RF04 と RF05 の接合筋 1 本あたりの挙動であり、RF05 は 5.1 で示した摩擦抵抗を除いた結果である。式 (4) ~ (6) を用いた計算値は接合筋のダボ抵抗の復元力を妥当に評価していることがわかる。また、接合筋の最大ダボ抵抗力は、最大曲げモーメントが生じる接合筋の断面が局部降伏点に達した時の接合筋に生じるせん断力である。図-11 に示した局部降伏点は、接合筋の断面における全塑性モーメントを接合筋の材料試験結果を用いて断面解析により求めた値である。

(3) シヤキーの復元力 図-13 は、シヤキーの耐力 (q_{sky}) と接合面のズレ変形 ($\delta_{sd}=0\sim 3\text{mm}$) の関係である。実験値は 5.1 で示した摩擦抵抗、および、5.3 で示したダボ抵抗を除いた値である。同一軸力レベルにおけるシヤキー抵抗の復元力は等しい性状を示している。

以上のことから、接合面のせん断力抵抗機構は、ズレ変形を考慮したダボ抵抗とシヤキー抵抗、および、軸力を考慮した摩擦抵抗を累加することにより評価できることが確認できた。

6. まとめ

(1) プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断抵抗要素として接合筋のダボ抵抗、シヤキーの直接せん断抵抗、摩擦抵抗および付着抵抗と定義し、付着抵抗を除く個々の抵抗要素の負担力を定量的に把握した。

(2) 異なる構成則を持つせん断抵抗要素の累加方法は、接合面に軸力が生じる場合にも、個々の構成則の変形適合を考慮した累加方法で評価できることを確認した。

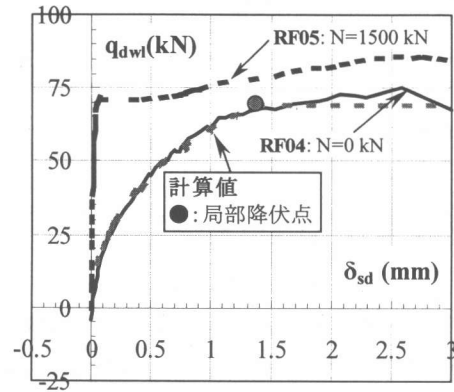


図-12 $q_{dwl} - \delta_{sd}$ 関係の実験値と計算値の比較

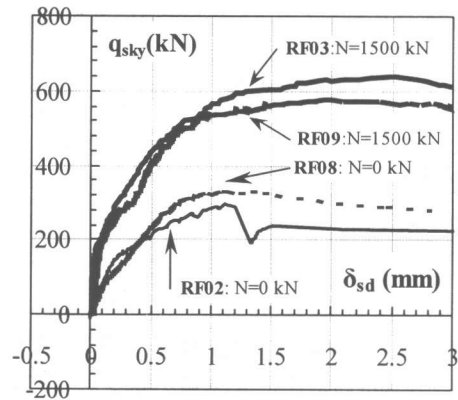


図-13 $q_{sky} - \delta_{sd}$ 関係

謝辞 本研究にあたり、大木建設技術研究所および日本カイザーの皆様にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説、1982
- 2) Robert F.Mast: Auxiliary Reinforcement in Concrete Connections, ACI, Vol.94, No.ST6, pp. 1485~1504, 1968.6
- 3) 大淵英夫, 鈴木基晴, 南尚吾, 中野克彦, 松崎育弘：ずれ変形を考慮したプレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する研究, AIJ 構造系論文報告集, 第 491 号, pp.97~104, 1997.1
- 4) 鈴木基晴, 松崎育弘, 中野克彦, 南尚吾：プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断力の伝達に関する実験的研究, JCI 年次論文報告集, 18-2, pp.1199~1204, 1996.6