

論文 大変形領域の交番荷重を受ける RC 橋脚のフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する実験的研究

小林 薫^{*1}・海原 卓也^{*2}・石橋忠良^{*3}

要旨 : RC 橋脚や柱部材の地震時変形性能を適切に評価するためには、く体部分の曲げやせん断による変形性状を把握するとともに、フーチングからの軸方向鉄筋拔出しに起因する回転による水平変位も精度よく把握する必要がある。

本研究は、RC 橋脚や柱部材の地震時変形性能評価の基礎となる軸方向鉄筋のフーチングからの拔出し量に着目し、RC 柱の試験体による交番載荷試験、島らによって提案された $\tau-s-\varepsilon$ 関係式による解析的検討から、部材塑性率 10 程度となるような大変形領域でのフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する検討を行ったものである。

キーワード : 拔出し, $\tau-s-\varepsilon$ 関係式, 交番載荷

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下「RC」という）橋脚や柱が、地震動の作用によって正負交番繰返し荷重を受ける場合、その変形挙動はく体部分の曲げおよびせん断による変形の他に、フーチングから軸方向鉄筋の拔出しに伴うく体部分の回転に起因した水平変位が生じる。軸方向鉄筋の拔出しに伴う水平変位は、全水平変位量に対して極めて大きくなるとの報告¹⁾もあり、RC 橋脚や柱の変形性能を適切に評価するためには、軸方向鉄筋のフーチングからの拔出しによる水平変位の評価方法を確立しておく必要があるものと思われる。

特に、1995 年の兵庫県南部地震による RC 構造物の被害を契機として、RC 構造物の耐震性能は降伏変位の 10 倍程度²⁾となる変形領域においても安定した耐荷特性となるような性能が要求されている。しかしながら、塑性率が 10 程度となるような大変形領域でのフーチングからの軸方向鉄筋の拔出し量算定法に関しては、研究例も少なく、未解明な部分も多い。

本研究は、RC 橋脚や柱の変形性能評価の基礎となるフーチングからの軸方向鉄筋の拔出し量に着目し、RC 柱の試験体による交番載荷試験、島らが提案した付着応力-すべり-ひずみ（以下「 $\tau-s-\varepsilon$ 」という）関係式³⁾に繰返し載荷に伴う付着劣化領域を考慮した解析的検討から、部材塑性率 10 程度となるような大変形領域でのフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する検討を行ったものである。

2. 交番試験概要

2.1 試験概要

(1) 試験体形状および諸元

試験体形状を図-1に、図-2に配筋図の例を示す。表-1に、試験体諸元を示す。試験体は、RC 部材の変形性能に影響を与える帯鉄筋量や耐力比 ($V_y \cdot a / M_u$ ここで、 V_y : せん断耐力, M_u : 曲げ耐力, a : せん断スパン) を主たるパラメータとし、既往の研究⁴⁾を参考にして決定した。

軸方向鉄筋の定着長は、鉄筋直径 (D) の 30

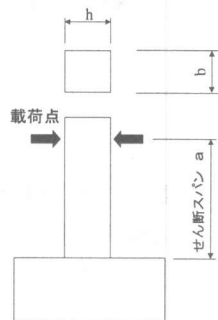
^{*1} 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター 主席 (正会員)

^{*2} 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター 課員 (正会員)

^{*3} 東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部構造技術センター 所長 工博 (正会員)

表—1 試驗体諸元表

試験体 NO	試験体の寸法				a/d	軸方向の鉄筋				帯鉄筋		平均軸方向 圧縮力 (N/mm ²)	試験値			
	b (mm)	h (mm)	有効 高さ d (mm)	せん 断ハ ン a (mm)		鉄筋 径	全数 (本)	鉄筋比 (%)	引張 鉄筋 本数 (本)	鉄筋 種別	帯鉄筋配置		鉄筋比 (%)	コンクリート 圧縮率 $\mu = \delta u / \delta y$	降伏 荷重 F _y (N)	最大 荷重 F _{max} (kN)
A1	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T3	D13-1@80	0.792	0.98	9.03	218.93	282.92
A2	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T3	D13-1@80	1.056	0.98	10.71	214.62	278.32
A3	400	400	360	1150	3.19	D16	16	1.986	5	T2	D13-1@70	0.905	0.49	12.43	143.47	203.93
A4	400	400	360	1150	3.19	D13	16	1.267	5	T1	D13-1@80	0.792	0.98	4.95	109.27	148.36
A5	400	400	360	1150	3.19	D13	16	1.267	5	T1	D13-1@140	0.453	0.98	8.85	114.07	145.30
A6	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T3	D13-1@50	1.267	0.98	13.02	222.36	307.29
A7	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T3	D13-1@80	1.056	0.98	10.89	209.62	309.17
A8	400	400	360	1150	3.19	D16	16	1.986	5	T2	D13-1@120	0.528	0.98	9.36	175.13	222.93
A9	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T3	D16-1@80	1.655	0.98	13.37	207.96	292.30
A10	400	700	680	1000	1.52	D19	16	1.842	5	T3	D13-1@60	1.056	0.98	10.73	444.83	640.83
A11	500	500	460	1150	2.50	D19	16	1.834	5	T3	D13-1@60	0.845	0.98	12.35	265.78	386.43
K1	400	400	360	1150	3.19	D19	16	2.865	5	T4	D13-1@80	1.056	0.98	12.20	208.74	274.40



圖—1 試驗體形狀

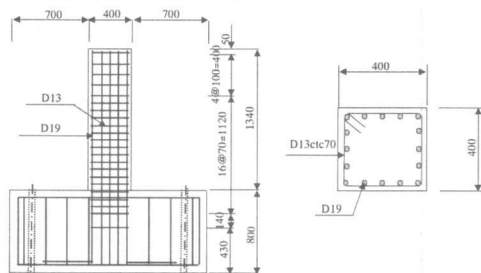
倍以上の長さをフーチング内に設け、さらに先端を直角フックとし、直角フックの余長も 20D 以上とし、軸方向鉄筋定着先端ですべりがないように十分な定着長を設けた。

(2) 計測概要

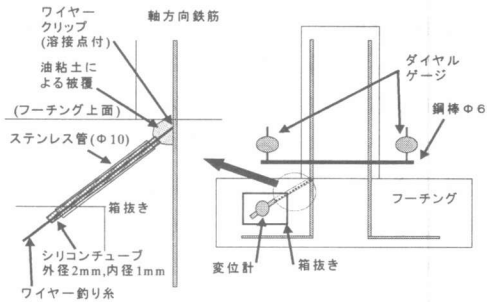
交差載荷試験時における各試験体の計測項目は、ワイヤーストレインゲージによる軸方向鉄筋・せん断補強鉄筋のひずみ、変位計によるフーチングからの各高さでの水平変位である。K1 試験体については、上述した測定項目とともにフーチングからの軸方向鉄筋拔出し量の直接計測を行っている。

測定方法は、あらかじめ設けたフーチング側面の箱抜き箇所に変位計を設置し、変位計と軸方向鉄筋はフーチング上面位置で相互にワイヤーで結び計測を行った。計測用ワイヤーは、 $\phi 10\text{mm}$ のステンレスパイプで防護し、パイプ内にはワイヤーとパイプ内面が接触しても摩擦による影響を極力排除するように、シリコンチューブをあらかじめステンレスパイプ内に挿入した。

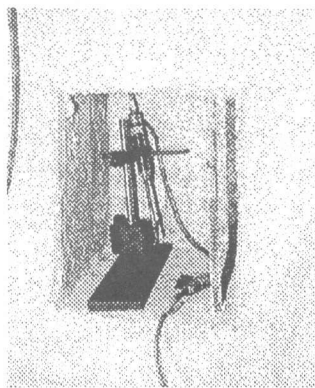
また、直接拔出し量測定用変位計のチェック用として、フーチング上面から高さ 5.0cm 位置にφ6mm の鋼棒を試験体を貫通させて設置し、鋼棒先端をダイヤゲージで計測する方法でも軸方向鉄筋のフーチングからの拔出し量を測定した。ダイヤルゲージによる鉄筋拔出し量の測定は、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋のはらみ出しが生じると測定値の信頼性が著しく低下することになるので、この方法での測定はほぼ試験体の最大荷重を保持している変位付近までは可能である。図



図—2 試験体配筋図の例



図—3 鉄筋拔出し量測定方法



写真—1 フーチング内変位計設置状況

ー3に、軸方向鉄筋の拔出し量の測定方法の略図を示す。写真-1に、フーチング箱抜き箇所を設置した変位計の状況を示す。

(3) 交番載荷試験概要

図-4に、交番載荷試験状況を示す。交番載荷試験は、試験体のフーチング部をPC 鋼棒で床に固定し、軸力用鉛直ジャッキで所定の軸方向力を導入し、試験体柱頭部付近を載荷点として静的に正負交番載荷を行った。

交番載荷試験時の試験体の降伏変位 δ_y は、鉄筋ひずみ計測位置において、軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみとなった時点の載荷点位置の水平変位量とした。なお、このときの軸方向鉄筋ひずみのモニター位置は、軸方向鉄筋のワイヤーストレインゲージの位置から K1 試験体ではフーチング上面位置、その他の試験体ではフーチング上面から体側の高さ 50mm 位置、あるいはフーチング内 50mm 位置とした。

載荷方法は、降伏変位 (δ_y) までは荷重制御により、それ以降の載荷は δ_y の整数倍の水平変位を変位制御で載荷した。

2. 2 試験結果

(1) 荷重—変位関係

図-5に、交番載荷試験から得られた荷重-変位曲線の例として、K1 試験体での試験結果を示す。試験体の変形性能は、荷重-変位曲線の包絡線において、降伏変位時の荷重を下回らない最大水平変位を終局変位 δ_u とし、 δ_u を δ_y で除したじん性率として評価した。表-1に、試験結果を示す。

(2) フーチングからの鉄筋拔出量測定結果

K1 試験体におけるフーチング内の変位計による鉄筋拔出量測定結果を図-6に示す。図-6は、X 軸に載荷点の水平変位を降伏時の水平変位で除した部材塑性率とし、Y 軸はそれぞれ変位計での鉄筋拔出量と載荷荷重を表わしている。この図から、載荷荷重を保持している状態では、載荷点水平変位が大きくなると、フーチングからの鉄筋拔出量はほぼ線形的に増加する傾向を示すが、載荷荷重が低下し始めると鉄筋拔出量も小さくなることわかる。

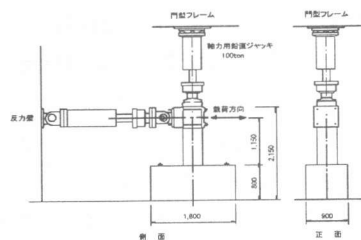


図-4 交番載荷試験状況

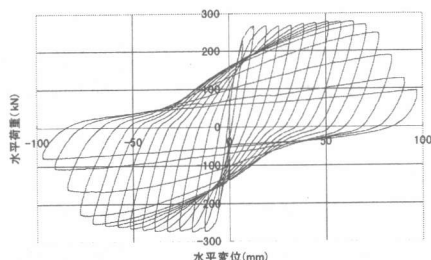


図-5 荷重—変位曲線の例(K1 試験体)

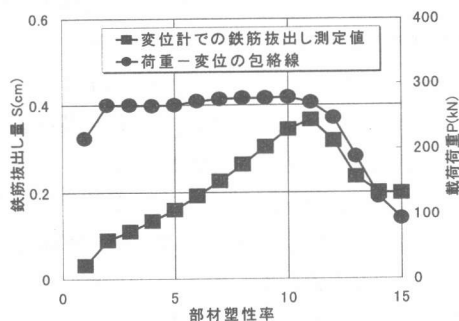


図-6 K1 試験体での鉄筋拔出量測定結果

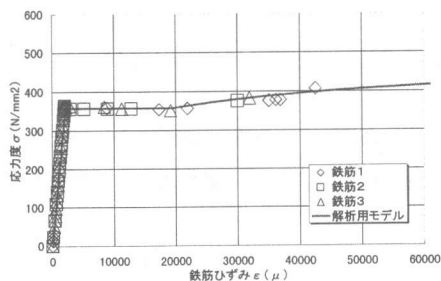


図-7 T1 鉄筋 σ — ϵ 曲線

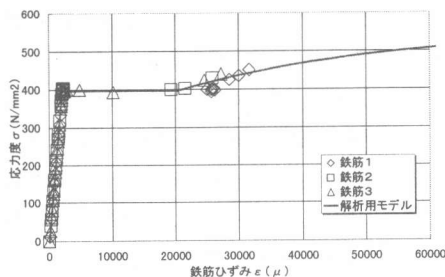


図-8 T2 鉄筋 σ — ϵ 曲線

3. 軸方向鉄筋の拔出量に関する検討

(1) τ - s - ε 関係式による検討方法の概要

軸方向鉄筋のフーチングからの拔出量は、鉄筋先端に直角フックが設けられ十分な定着長となっていることから、鉄筋先端でのすべりは生じないので、鉄筋に沿った各位置のひずみ ε を定着先端からフーチング上面まで積分した値となる。

フーチング内の軸方向鉄筋のひずみは、鉄筋とコンクリートの付着力によりフーチング内部へ入るに従って減少する。したがって、軸方向鉄筋の拔出量は、以下の手順で解析的に求めることができる。

フーチング上面位置での拔出量を仮定し、フーチング上面から内部に向かって付着力、鉄筋応力減少量、鉄筋ひずみを計算する。鉄筋ひずみ量の積分値を先に仮定した拔出量から減じてゆき、鉄筋先端でのすべり量が0に近似するまでフーチング上面位置の拔出量の仮定を修正し繰り返し計算によって鉄筋拔出量を求めることができる。

ここで必要となるのが鉄筋とコンクリートの付着力と鉄筋のすべりとの関係であるが、本検討では、式(1)の島らが提案した τ - s - ε 関係式³⁾を用いることとした。なお、式(1)は、鉄筋降伏以降においても成立することが確認されている⁵⁾。

$$\tau / f'c = 0.73 (\ln(1+5s)) / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (1)$$

ここで、 $s=1000 \cdot S/D$ 、 τ : 付着応力、 $f'c$: コンクリート強度、 S : すべり量、 D : 鉄筋径、 ε : ひずみ

鉄筋降伏以降のフーチングからの鉄筋拔出量の算定には、降伏ひずみ以降の材料特性が重要となる。このため、解析に用いた軸方向鉄筋の応力-ひずみ曲線は、ひずみ硬化領域を含めてモデル化を行った。鉄筋の応力-ひずみ曲線のモデル化は、鉄筋の引張試験から求まる応力-ひずみ曲線に一致するように島らの研究⁵⁾を参考にして定めた。図-7～図-10に、各試験体の鉄筋種別毎に、解析に用いた鉄筋の応力-ひずみ曲線を示す。

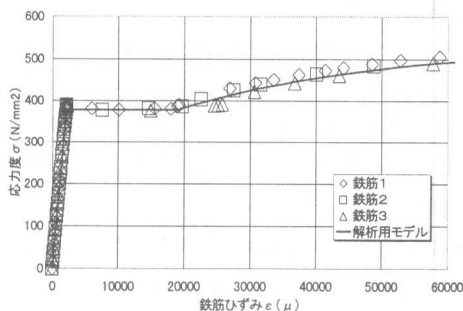


図-9 T3 鉄筋 σ - ε 曲線

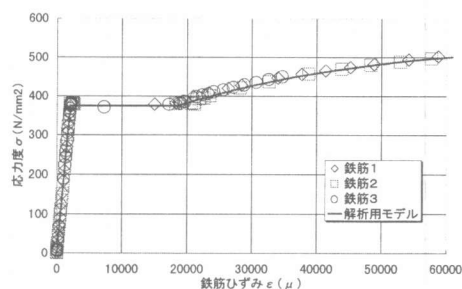


図-10 T4 鉄筋 σ - ε 曲線

(2) K1 試験体における鉄筋拔出量測定結果に対する検討結果

式(1)で示される τ - s - ε 関係式は、付着劣化のない理想的な片引き試験の結果から求められている。しかしながら、試験体には、正負の交番荷重が繰り返し載荷される。このため、式(1)をそのまま用いるとフーチングからの鉄筋拔出量を過小評価する恐れがある。

本検討では、K1 試験体のフーチング箱抜き箇所内に設置した変位計による直接拔出量測定結果と一致するように付着応力の劣化領域を考慮することとし、この領域をトライアルで定めた。検討結果を図-11に示す。図-11は、フーチング上面から鉄筋径の3倍の区間(3D区間)の付着応力をフーチング上面位置で0となるように直線的に低減した付着劣化領域を考慮して解析を行ったものであるが、解析結果はほぼ測定結果と一致した。ダイヤルゲージによる測定結果は、9δy程度までしか計測することができなかったが、フー

チング箱抜き箇所内の変位計による直接拔出量測定結果とほぼ一致していることから、フーチング内の変位計での測定結果は十分信用できるものと思われる。なお、ダイヤルゲージでの測定結果には、フーチング上面から測定用鋼棒設置位置の高さまでに生じるく体部分の伸び量が加算された測定値となっている。このため、この区間の鉄筋ひずみの平均値を計測結果から求めダイヤルゲージの測定値を補正した。なお、解析結果は、フーチング内の軸方向鉄筋のひずみ分布についても実測結果を比較的精度よく表現していた。図-12に、軸方向鉄筋のひずみ分布の検討結果の例を示す。

4. 部材塑性率が 10 程度となるときの変位時のフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する検討

K1 試験体と同様な解析手法を用いて、他の試験体への適用を試みた。解析的に定めたフーチング内の鉄筋ひずみ分布については、フーチング内 50mm 位置で、測定値が記録されている鉄筋ひずみ値に着目して解析を行うと、表-1 で示した K1 試験体以外でも鉄筋ひずみの測定値を比較的精度よく説明できることを確認した。このことから、フーチングからの鉄筋拔出し量は、解析的に定めたフーチング内の鉄筋ひずみ分布の積分値として定めることが可能となる。

部材塑性率が 10 程度となるような大変形領域のフーチングからの鉄筋拔出し量を把握するためには、フーチング上面位置での鉄筋ひずみ値を定める必要がある。しかしながら、軸方向鉄筋のひずみは、通常ワイヤーストレインゲージを鉄筋に貼り付けて測定が行われるため、交番荷重を受ける試験体では、試験体基部に損傷が集中するため鉄筋ひずみが荷重途中段階で測定不能となる場合が多い。

今回、直接拔出し量の測定を行った K1 試験体では、ワイヤーストレインゲージのリード線の余長を十分にすることで終局変位付近まで安定して鉄筋ひずみ値を測定することができ、部材塑性率が 10 を超え、終局変位付近での鉄筋ひずみの測定値は約 35000 μ ～ 約 43000 μ であった。

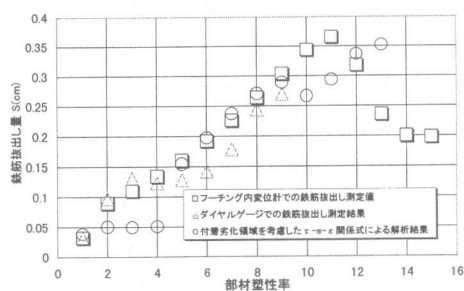


図-11 直接拔出し量測定結果と解析結果

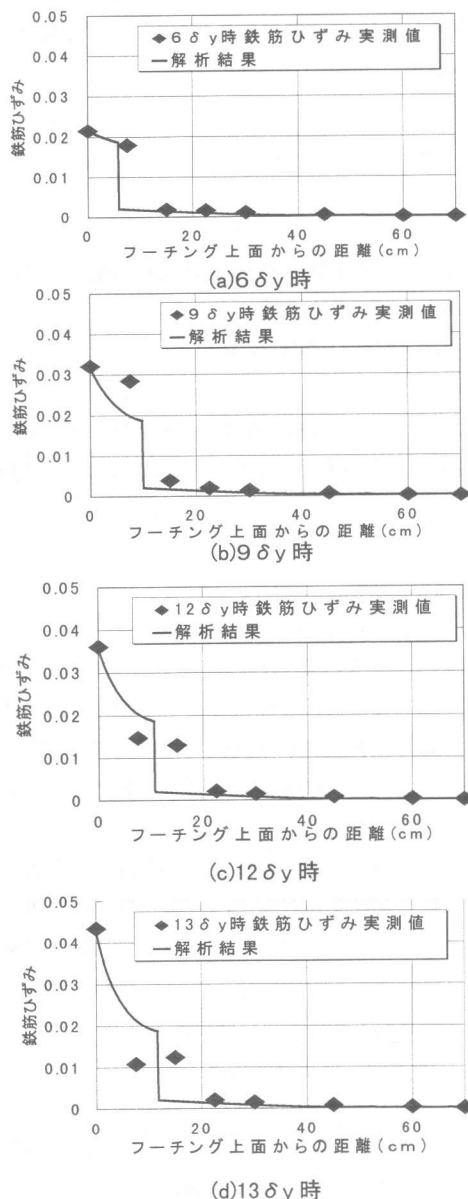


図-12 フーチング内の鉄筋ひずみ分布の検討結果の例(K1 試験体での検討結果)

そこで、本検討では、部材塑性率 10 程度が終局変位となる RC 部材のフーチング上面位置での軸方向鉄筋のひずみを 40000μ と仮定して解析的に各試験体のフーチングからの鉄筋拔出量の検討を行った。検討結果を図-13 に示す。なお、図-13 は、鉄筋拔出量を無次元すべり⁶⁾として表わしている。無次元すべりは、島らの鉄筋ひずみ-すべりモデル⁶⁾で提案されているもので、鉄筋拔出量 S を鉄筋径、コンクリート強度の影響を考慮して無次元化したもので式(2)で定義されている。

$$S = S/D \cdot K_{fc} \quad (2)$$

ここで、

S : フーチング上面位置での鉄筋拔出量, D : 鉄筋

径, $K_{fc} = (f'_c/20)^{2/3}$

f'_c : コンクリート強度 (N/mm^2)

図-13 から、部材塑性率が 10 程度の変位時におけるフーチングからの鉄筋拔出量は、各試験体の無次元すべりの平均値で 0.18 となった。

5. まとめ

以下に、本検討結果をまとめる。

- (1) フーチングからの鉄筋拔出量の測定結果は、載荷荷重を保持している変位においては、載荷点の水平変位にほぼ比例して大きくなるが、載荷荷重が低下し始めると鉄筋拔出量も小さくなる。
- (2) フーチングからの軸方向鉄筋拔出量は、島らが提案した $\tau-s-\varepsilon$ 関係式に繰り返し載荷に伴う付着劣化領域を $3D$ (D : 鉄筋径) とすることによって、実測値を精度よく評価することが可能である。
- (3) 部材塑性率が 10 程度となるときにフーチング上面位置の鉄筋ひずみ値を 40000μ と仮定すると、フーチングからの鉄筋拔出量は無次元すべりの平均値で 0.18 となった。

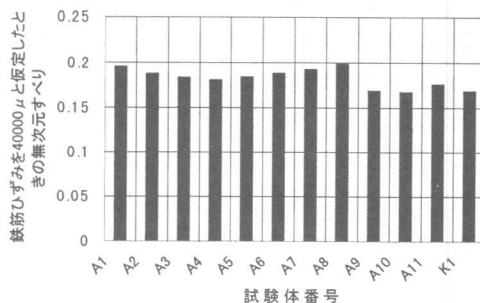


図-13 鉄筋ひずみを 40000μ としたときの無次元すべり

【参考文献】

- 1) 太田実：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 292 号, pp65-74, 1979. 12
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（耐震設計編）, 平成 8 年制定
- 3) 島弘・周礼良・岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文報告集, 第 378 号, pp165-174, 1987. 2
- 4) 石橋忠良, 吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集, 第 390 号/V-8, pp57-66, 1988 年 2 月
- 5) 島弘・周礼良・岡村甫：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp. 213-220, 1987. 2
- 6) Sima, H., Chou, L. and Okamura, H. : Micro and macro models for bond behavior in reinforced concrete, journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo (B), Vol139, No. 2, 1987