

論文 アンカー筋のみで接合した RC 板の曲げ載荷試験

小谷 美佐^{*1}・小林 将志^{*2}・小原 和宏^{*3}

要旨：アンカー筋のみで接合した RC 板に対し、接合に用いるアンカー筋の本数や径、鉄筋量を変化させて曲げ載荷試験を行った。RC 板の接合条件により異なるひび割れ性状（接合部やスラブ表面）について整理した。部材接合部に回転バネの要素を導入したフレームモデルで部材変形が計算できることを確認した上で、アンカー筋の拔出し特性から、変形特性を評価できることを確認した。

キーワード：アンカー筋, RC 板接合, 曲げ載荷試験, 鉄筋の拔出し

1. はじめに

2 枚の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 板と記す）を接合する方法として、ループ継手による接合やプレストレスによる接合（PD 鋼線）があるが、接合部の構造が簡素になるような例えば断面中央にアンカー鉄筋のみが配置されている RC 板の研究はあまりなされていない。既往の研究においてもマッシュなコンクリートに対するあと施工アンカー鉄筋の付着応力の検討¹⁾はなされているものの、床版のような薄肉の断面に配置されるアンカー筋については引抜耐力について検討された実績²⁾がある程度である。そこで本実験は、数本のアンカー鉄筋のみで接合された高強度 RC 板の静的曲げ載荷試験を行うことで荷重－変位関係や接合部の損傷状況を検証し、モデル化を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

まず、試験体を製作する手順として、接合する RC 板の一方に接合用アンカー鉄筋を配置した状態でコンクリートを打設する。その後もう一方に材齢の異なる RC 板を打設する。こうして製作した本実験の試験体（基準：M01）の形状及び配筋状況を図-1 に示す。接合に用いるアンカー鉄筋の定着

長は、既往のあと施工によるアンカーの設計事例²⁾等を参考とし、鉄筋径 ϕ の 15 倍の長さとした。

全試験体に対して、接合用アンカー鉄筋方向に D10 を 150mm ピッチで、接合直角方向に D13 を 175mm ピッチで上下 2 段に配筋してある。各試験体の主たるパラメータをアンカー鉄筋の鉄筋径、設置ピッチ及び鉄筋量としているが、その各諸量を表-1 に示す。各試験体製作時に材料試験を行っており、それぞれコンクリート圧縮強度 f'_{ck} は 47.6~59.3N/mm²、接合用アンカー鉄筋（SD345）の降伏強度 f_{sy} は 353~375N/mm²、鉄筋降伏ひずみは 2011~2115 μ である。それらの試験体は、試験体 M01 を基準として、接合部のアンカー筋の鉄筋量が半分、もしくは 2 倍程度となるように各々鉄筋径および本数を変化させ決定したものである。アンカー鉄筋を複数配筋する試験体については、RC 板

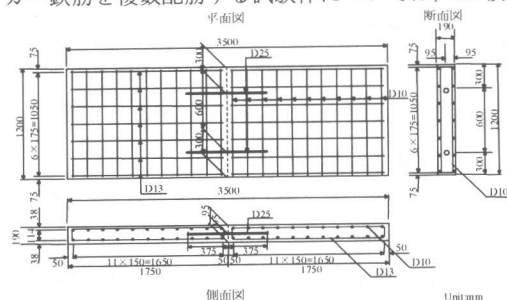


図-1 試験体形状・配筋(M01)

* 1 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所 工事管理室 正会員

* 2 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所 工事管理室 正会員

* 3 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 正会員

の中央部に幅方向のピッチが均等になるよう配筋した。

表-1 試験体パラメータ:アンカー鉄筋(SD345)

呼び名	径			本数	ピッチ (mm)	量		
	D16	D25	D35			半分	基準	2倍
M01		●		2	600		●	
M02		○		1	—	○		
M03		○		4	320			○
M04	○			5	240		○	
M05			○	1	—		○	
M06			○	2	600			○

(定着長:15φ)

2.2 荷重方法

本実験の荷重方法は図-2 に示すような荷重装置を用い 200kN ジャッキによる静的 2 点荷重で行った。アンカー鉄筋の中央ひずみが降伏ひずみ(材料試験値)に達するまでは荷重制御にて、降伏後は変位制御にて単純曲げ荷重試験を行った。

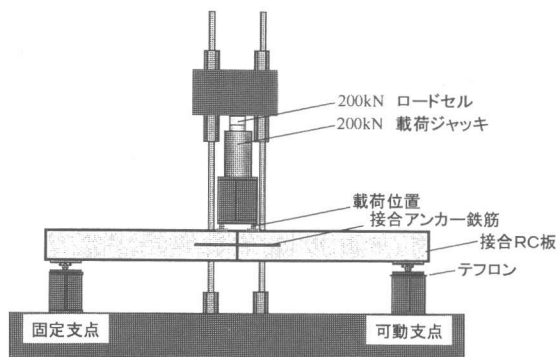


図-2 荷重方法図

荷重実験時の試験体は、固定端を鋼製のヒンジ構造支承とし、可動端には鋼製のヒンジ支承の下にテフロン板を敷くことでローラーヒンジとした。

3. 計測項目

本試験における計測項目は以下の通りである。計測機器の設置状況を図-3 に示す。

- ・ロードセル: 荷重荷重 (kN)
- ・ダイヤルゲージ (RC 板圧縮側接合部): 鉛直変位 (mm)
- ・変位計 (RC 板引張側接合部): 曲げ荷重による RC 板接合部下面の変位量 (開き) (mm)
- ・鉄筋ひずみゲージ: アンカー鉄筋ひずみ (μ) (接合部から 150mm ピッチ)
- ・コンクリートひずみゲージ: コンクリートひずみ (μ) (RC 板圧縮側接合部)

- ・糸式変位計: スラブ内アンカー鉄筋端部拔出し量 (mm)

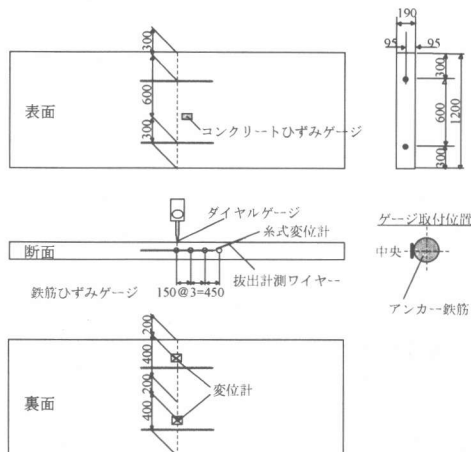


図-3 計測機器の取付位置

4. 結果

4.1 荷重-変位関係

図-4 に各試験体の荷重-変位(ダイヤルゲージ測定値) 曲線を示す。表-1 に示した各パラメータと比較すると、鉄筋径や本数に関係なく鉄筋量が基準ケース M01 と同程度とした M04, M05 と基準ケースに比べ鉄筋量が半分程度とした M02, そして 2 倍程度の M03, M06 はそれぞれ同じ傾向を示し、曲げ耐力は接合部のアンカー鉄筋量にほぼ比例していることの確認が出来た。

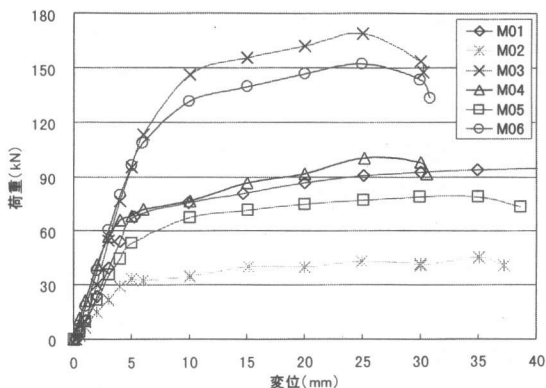


図-4 荷重-変位関係

4.2 RC 板破壊性状

単調荷重していく過程で、RC 板に発生するひび割れや損傷状況を視覚的にも把握するよう目視による観測を行った。全体の傾向として、RC 板に曲

げひび割れは発生せず、載荷に伴い RC 板接合部の引張側から鉛直ひび割れが徐々に進行する。そして、鉄筋降伏を迎えた後に水平ひび割れが生じる傾向が見うけられた（写真-1, 2 参照）。鉛直ひび割れが RC 板の中央部まで発達する荷重レベルは、M03 や M04 等鉄筋ピッチが小さい試験体では 25kN 付近で発生したが、ピッチが大きい他の試験体では 10kN に満たないレベルであった。

各試験終了時の接合部の損傷状況を写真-2, 3 に、各試験終了時の RC 板の損傷状況上面（圧縮側）を写真-4 に、下面（引張側）の様子を写真-5 に示す。写真-2, 4 のように鉄筋径 D25 を用いた試験体では、鉛直ひび割れが増大し圧縮側のコンクリートに水平ひび割れが生じた後、RC 板圧縮側の圧壊に至った。RC 板のひび割れ幅も大きい。それに比べ、写真-3, 5 のように鉄筋径 D35 のような太径のアンカー鉄筋を用いたケースでは、RC 板の破壊状況が異なる。太径を用いた場合には、上・下両面にアンカー鉄筋に沿ったひび割れが発生し、引張側となる下面にはアンカー鉄筋接合部を中心とした半円を描く環状ひび割れが確認できた。M06 のように、鉄筋降伏前から鉄筋に沿った割裂ひび割れや環状ひび割れが発生するケースもあった。

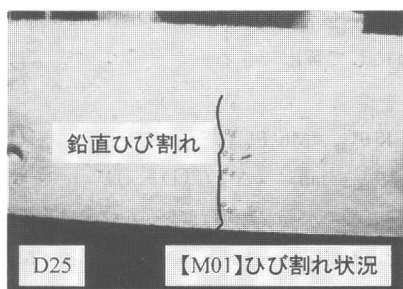


写真-1

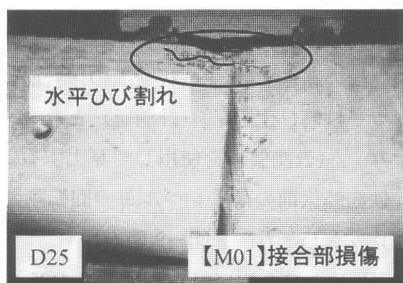


写真-2

しかし、アンカー鉄筋に沿った割裂ひび割れ以外にはいずれの損傷状況を見ても、RC 板下面のひび割れには曲げひび割れは確認されず、接合部のみに損傷が集中することがわかった。

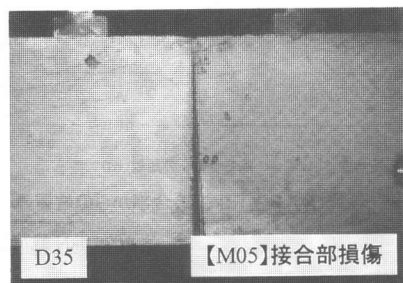


写真-3

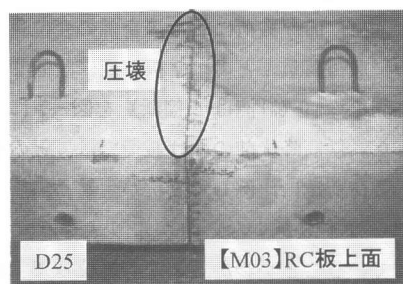


写真-4

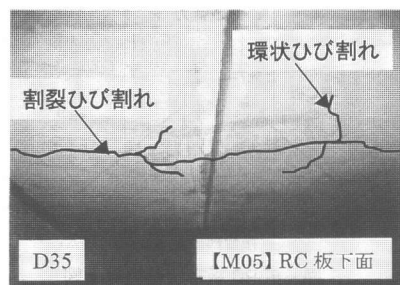


写真-5

4.3 鉄筋ひずみ分布

図-5 に 29.4kN 載荷時の各試験体におけるスラブ接合部からの距離に対する鉄筋ひずみをプロットしたグラフを示す。どの試験体も接合部から離れるに従い、鉄筋ひずみは減少する傾向にあり、糸式変位計で計測していたアンカー鉄筋端部の拔出量は、これらの荷重レベル（鉄筋降伏に至る前段階）においては計測されなかった。

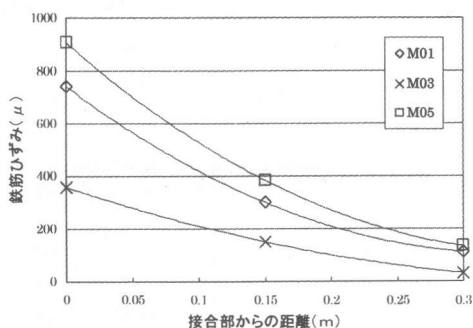


図-5 鉄筋ひずみとRC板接合部からの位置

(29.4kN 載荷時)

4.4 RC板接合部の抜出し量

RC板接合部の抜出しについては、図-6に示すように、曲げ載荷による接合部の変位量で評価する。載荷荷重ごとのRC板下面に設置した変位計計測平均値（計測は2箇所）を図-7にプロットした。鉄筋降伏前の曲げ載荷では、どのケースでも載荷荷重に比例して変位が生じ、鉄筋量が同じならば本数が少ない方がより大きな変位が発生していることがわかる。この変位量でRC板接合部を評価することができると考えられる。

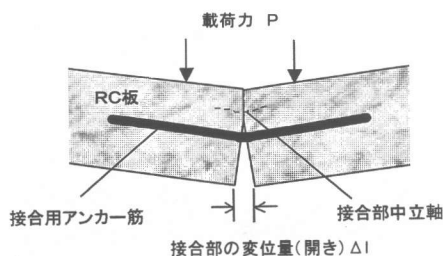


図-6 RC板接合部の概念図

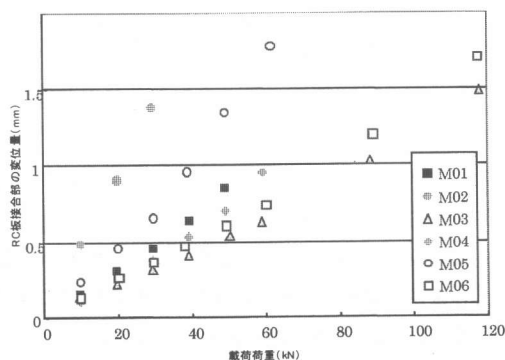


図-7 鉄筋降伏前の載荷荷重と接合部変位量(開き)

5. 接合部のモデル化と回転剛性 $K\theta$

以上の実験結果からわかるように、接合用アンカー鉄筋が降伏するまでの曲げ載荷によるRC板の損傷は、曲げひび割れがRC板中央部の引張側全体に生じるのではなく、接合部にのみ集中して発生している。また、そのアンカー筋の抜出し特性から、本研究ではRC板を梁要素、部材接合部に回転バネの要素を導入したフレームモデル(図-8)で部材変形を評価することを考えることとした。

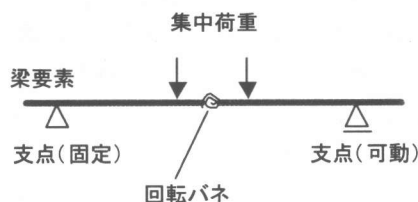


図-8 回転バネを導入した線形モデル

そこで、接合部を回転剛性 $K\theta$ と仮定し、2通りの方法で算出したので以下に説明する。

5.1 実験値から算出される剛性 $K\theta_{exp}$

鉛直力を作用させてもRC板自体には曲げひび割れが発生しないことから、変位計計測値を、RC板接合部下面の変位量(開き)(図-6参照)であると仮定して、曲げ載荷によるRC板の変形を評価すると、接合部の回転バネの剛性 $K\theta_{exp}$ は以下のようにして算出できる。

$$K\theta_{exp} = Mn / \theta_{exp} \quad (1)$$

$$\theta_{exp} = \tan^{-1} (\Delta l / (D - x)) \quad (2)$$

ここで、 Mn : 載荷荷重レベルにおける接合部における曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、 Δl : 接合部の変位量 (mm)、 D : 断面高さ (mm)、 x : 中立軸の高さ (mm)

中立軸の高さ x は、RC板断面の接合面に生じるアンカー鉄筋ひずみ ε_s (計測値) とコンクリートひずみ ε_c (計測値) を使用して算出することとした。鉄筋降伏前の荷重レベル毎の回転剛性 $K\theta_{exp}$ をプロットしたものを図-9、図-10に示す。

図-9は、接合用アンカー鉄筋にD25を用いて鉄筋量が異なる試験体(1, 2, 4倍)の $K\theta_{exp}$

図-10 は、鉄筋量がほぼ同じであるが鉄筋径の異なる試験体の $K\theta_{exp}$ の結果である。

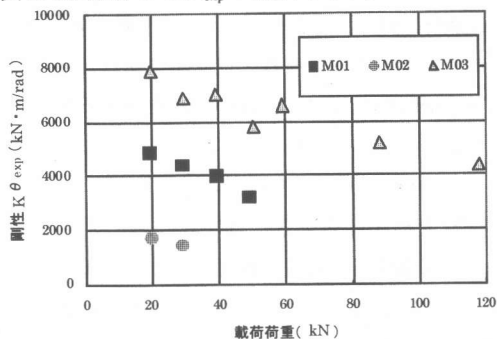


図-9 鉄筋降伏前の載荷荷重と剛性 $K\theta_{exp}$
(D25 の場合)

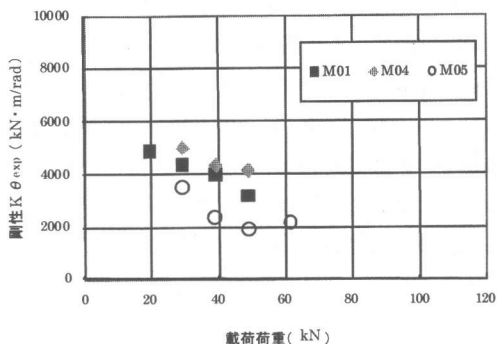


図-10 鉄筋降伏前の載荷荷重と剛性 $K\theta_{exp}$
(鉄筋量がほぼ同じ場合)

どの試験体も載荷荷重レベルが高くなるにつれ、剛性が小さくなり変形しやすい状態に変わっていくことが確認できる。中でも、鉄筋量が少ないケース (M02) の剛性は小さく、細径のアンカー鉄筋を使用した M04 のように RC 板幅方向に複数本配置されている場合剛性は大きい。

5.2 線形骨組解析から算出される剛性 $K\theta_{model}$

図-7 に示した骨組モデルに対し、実際使用した試験体の部材試験から得られた強度や、RC 板の断面剛性を梁要素部材の断面諸元として、RC 板接合部には回転方向に回転剛性 $K\theta_{model}$ を可動パラメータとして定義した。この骨組モデルを用いて、載荷荷重レベル毎に 2 点集中載荷した場合の骨組計算を行い、実験で計測した RC 板上の変位 (mm) と比較することで、モデル化によるそれぞれの回転剛性 $K\theta_{model}$ を算出した。

実験値から得られる $K\theta_{exp}$ と骨組モデルから得られる $K\theta_{model}$ との関係を図-11 に示す。これらは非常に良い相関が得られ、RC 板を梁要素、部材接合部を回転バネ要素と定義したモデル化は、曲げ載荷による接合部変形の実現象をよく再現できていることが確認できる。

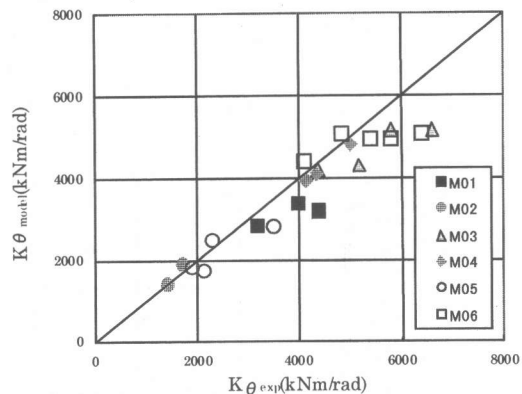


図-11 $K\theta_{exp}$ - $K\theta_{model}$

5.3 鉄筋のすべり量から算出される剛性 $K\theta_{cal}$

上述の $K\theta_{model}$ は、RC 板接合部下面の変位量を計測値から採用しており、完全な解析とはいえない。

そこで、ここでは接合面の変位量を鉄筋の拔出量を解析的に算出することで、完全な解析モデルを構築できることを検証した。

島らの研究⁴によると、鉄筋の定着部に向かい、その傾向は埋め込み深さ (定着長) と鉄筋径の関数で表されるとある。この式を参照し、本モデルの適用範囲である鉄筋降伏に至るまでの無次元拔出量 s は式 (3) のように示される。

$$s = \varepsilon_s (2 + 3500 \varepsilon_s) \quad (3)$$

ここで、 s : 鉄筋ひずみによる無次元拔出量、

ε_s : 各載荷荷重レベルにおける鉄筋ひずみ

また、フーチング上面位置での拔出量 S は無次元すべり s を用いると式 (4) のように示される。

$$S = s \cdot D \cdot K_{fc} \quad (4)$$

ここで、 S : フーチング上面位置での鉄筋拔出量 (mm)、 D : 鉄筋径 (mm)、 $K_{fc} = (f'_{ck}/20)^{2/3}$ 、

f'_{ck} : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

また、載荷荷重レベルごとに、平面保持の仮定より、部材断面緒元、コンクリート圧縮強度、鉄筋降伏応力から逆解析的に中立軸 x (cm)、鉄筋ひ

ずみ ε_s (μ) を算出し、その中立軸から鉄筋配置位置までの距離 ($d-x$) に対する鉄筋拔出量 S の関係を曲率 θ に置き換えると仮定すると以下の式にて剛性 $K\theta_{cal}$ が求まる。

$$K\theta_{cal} = Mn / \theta_{cal} \quad (5)$$

$$\theta_{cal} = 2S / (d-x) \quad (6)$$

実験値からの $K\theta_{exp}$ と解析 (すべり量) からの $K\theta_{cal}$ との関係を図-12 に示す。

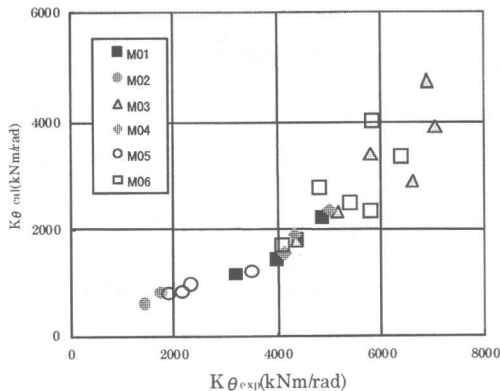


図-12 $K\theta_{exp} - K\theta_{cal}$

実験値の $K\theta_{exp}$ が大きくなると、解析による $K\theta_{cal}$ も大きくなる単調増加の関係を示し、値としては $K\theta_{exp}$ の 0.3~0.5 程度の比率となった。但しこれらの値には、写真-2 からも確認できるように、実験時は加力点と支承部は拘束されていないこと、また本実験の対象範囲が降伏前の荷重の小さい範囲であるため、変位を拘束するような事象はないものと考えられる。そして、 $K\theta_{cal}$ の傾向からは鉄筋径及び配筋量による差は見られなかった。このことから、曲げを受ける部材において、上記のような式を適用する際には、圧縮力の影響で、拔出量を低減することで、本モデルのような場合においても適用することができることがわかった。

6. まとめ

本実験の範囲において、以下のような結果が得られた。

(1) 部材の損傷状況

RC 板をアンカー筋のみで接合した試験体に曲

げ载荷をすると接合部周辺に損傷が集中して発生する。また、アンカー筋に、太径 (D35) を使用した試験体 (M05, M06) では、部材下面にアンカー筋に沿った割裂ひび割れと環状ひび割れが発生し、部材上面には割裂ひび割れのみが発生するものの、耐力低下にはつながらない。

(2) 回転剛性パネの算出方法の妥当性

部材変形を計算する際はフレームモデルと考え、鉄筋降伏前の範囲で载荷による接合面の変位量 (開き) を中立軸からの曲率 θ と仮定した回転剛性 $K\theta$ として算出することで部材変形を再現できると考えられる。

(3) モデル化の可能性の可否

RC 板内部で生じる各载荷荷重レベルにおける鉄筋ひずみから RC 板全体のすべり量 S を算出 (式 (3), 式 (4) 参照) し、中立軸から鉄筋配置位置までの距離 ($d-x$) に対するすべり量 S を曲率 θ として式 (1) 同様、回転剛性 $K\theta$ を計算すると 0.3~0.5 程度実際の値より低減された値として算出される。

【参考文献】

- 1) 島 弘・周礼良・岡村甫: マッシュなコンクリートに埋めこまれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第 378 号, pp165-174, 1987. 2
- 2) 小谷美佐・小林将志: 高強度 RC 板におけるあと施工アンカー引抜耐力試験, 第 55 回土木学会年次講演会 V-569, 2000. 9
- 3) 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, pp. 213-220, 1987. 2
- 4) 申 鉉穆・前川宏一・岡村甫: 繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力解析, コンクリート構造物のじん性とその評価法に関する研究, 土木学会論文集, II - pp. 45-56, 1988. 3
- 5) 石橋忠良・小林薫・海原卓也: 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量算定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 648/V-47, 43-54, 2000. 5