

ひび割れが発生した合成桁 RC 床版の力学特性に関する解析的研究

宇都宮大学 学生員 坂口淳一, 正会員 中島章典, 鈴木康夫

1. はじめに

連続合成桁橋の中間支点部周辺など、合成桁断面に負の曲げモーメントが作用する場合には、RC 床版に引張軸力が作用するため、床版コンクリートのひび割れが予想される。床版コンクリートに許容できないひび割れが発生すると、ひび割れから浸入する雨水などによって鋼材の腐食が引き起こされるため、床版の耐久性の低下が懸念される。

近年、負曲げ領域の RC 床版の設計において、施工の省力化やコスト削減の観点でひび割れ制御設計¹⁾が取り入れられつつある。ひび割れ制御設計とは、床版に発生するひび割れの幅が定められた許容ひび割れ幅を超えないように設計することで、床版の耐久性を保证する設計手法である。したがって、ひび割れ制御設計では、予め RC 床版に発生するひび割れの幅をより正確に予測することが求められる。そのためには、引張軸力が作用し、ひび割れが発生した合成桁 RC 床版の力学特性を、より正確に把握することが重要である。

このような背景から、これまでに著者ら²⁾は、引張軸力が作用する合成桁 RC 床版の力学特性を 2 次元の剛体ばねモデルによる離散化数値解析により検討してきた。数値解析においては、RC 床版中の鉄筋とコンクリート間の付着作用を考慮して解析モデルを構築することで、ひび割れの発生に伴う鉄筋のひずみ挙動の再現を試みている。本研究では、これまでの解析モデル²⁾に用いてきた RC 床版構成要素の構成則に修正を加えることで、ひび割れを生じた RC 床版の力学的挙動の再現性をより高めることを試みた。

本文では、まず、数値解析に先立って行った合成桁試験体の負曲げ載荷試験³⁾の概要と結果について簡単に報告する。次に、本研究で行った数値解析の概要として、モデル化手法や主要な構成則などを説明し、最後に、負曲げ載荷試験の結果と解析結果を比較することで、構築した数値解析法の再現性を確認する。

2. 合成桁試験体の負曲げ載荷試験の概要

数値解析に先立って、全長 3m の合成桁模型試験体を製作して負曲げ載荷試験を行った³⁾。載荷試験では、引張軸力作用下における、RC 床版のひび割れの進展を観察するとともに、RC 床版内の鉄筋のひずみ挙動を重点的に測定した。ここでは、スタッド及びスターラップの橋軸方向の配置間隔や、鉄筋比が異なる試験体を 6 体製作した。本文では、その中で標準的な試験体であ

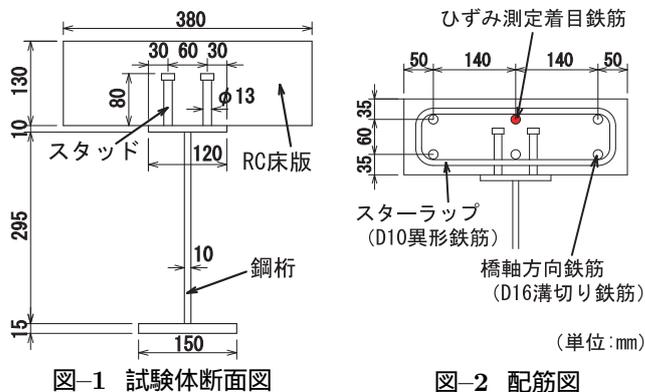


図-1 試験体断面図

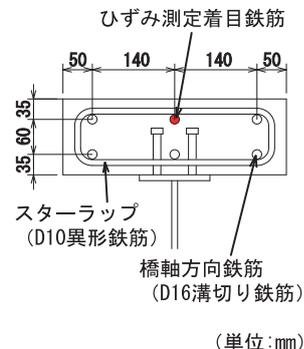


図-2 配筋図

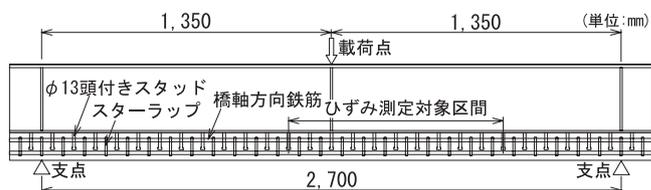


図-3 試験体側面図 (載荷時)

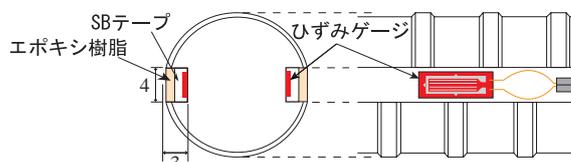


図-4 溝切り鉄筋

る、鉄筋比 2.0%、スタッド及びスターラップの配置間隔が 100mm の試験体の概要と試験結果を示す。

載荷試験に用いた試験体の断面図と配筋図を、図-1 と図-2 に示す。試験体の床版と鋼桁は、図-1 に示すように鋼桁上フランジに 2 列に溶植された頭付きスタッドによって結合されている。また、橋軸方向の鉄筋は、図-2 に示すように 2 段 3 列に計 6 本配置されている。

試験体の載荷試験時の側面図を図-3 に示す。図に示すように、載荷時には試験体を上下反転して支点間距離が 2.7m となるように単純支持し、試験体中央部に静的荷重を載荷した。

載荷試験での測定項目は、橋軸方向鉄筋のひずみ、試験体中央位置のたわみなどである。橋軸方向鉄筋のひずみは、図-2 に赤く記した上段中央の鉄筋に着目して、ひずみゲージを密な間隔で貼り付けて詳細な測定を行った。その測定対象区間は、図-3 の試験体中央を基準に左側を - 側、右側を + 側と定義すると、- 200mm から + 800mm までの計 1000mm 区間であり、その区間に

Key Words: 合成桁, 中間支点部, 鉄筋のひずみ挙動, ひび割れ, 付着

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6208

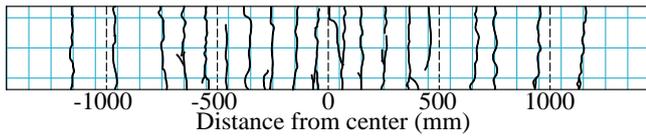


図-5 床版表面のひび割れ発生状況 (荷重 300kN 時)

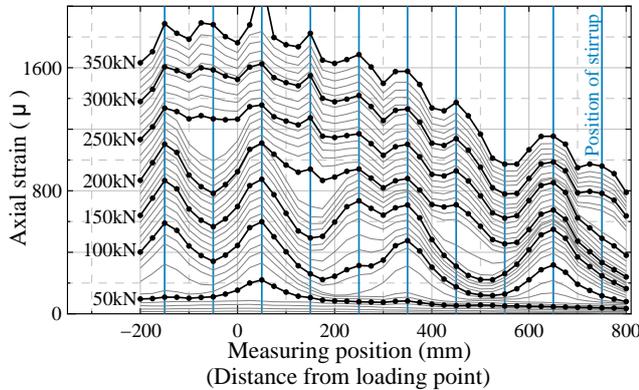


図-6 橋軸方向鉄筋のひずみ分布

ひずみゲージを 25mm 間隔で鉄筋上下面に貼付けることで鉄筋のひずみを測定した。なお、鉄筋のひずみを密な間隔で測定するために、橋軸方向鉄筋には図-4 に示すような、異形鉄筋のリブを切削加工した溝切り鉄筋⁴⁾を用いた。

3. 合成桁試験体の負曲げ載荷試験の結果

図-5 に、橋軸方向鉄筋に降伏が見られる直前である荷重 300kN 時の床版表面のひび割れ図を示す。参考として、図中に床版内の鉄筋の配置位置を青の実線で示した。図からわかるように、床版コンクリートのひび割れは、スターラップの近傍で、橋軸直角方向に床版を横断して発生している。

載荷試験から得られた鉄筋のひずみ挙動の例として、載荷開始から鉄筋の一部に降伏が見られる荷重段階までの範囲の、荷重 10kN ごとの鉄筋のひずみ分布を図-6 に示す。図に示したひずみの分布曲線は、荷重 50kN ごとの黒の実線で、それ以外はグレーの実線で描いた。図中で、縦軸は鉄筋のひずみを、横軸はひずみの測定位置を試験体中央からの距離によって表している。また参考として、図中にスターラップの配置位置を青の実線で示した。

図に示したひずみ分布の特徴として、コンクリートにひび割れが発生した位置で、鉄筋のひずみは極大値を示している。これは、ひび割れが発生した断面において床版に作用する引張軸力は鉄筋のみで負担されるためである。したがって、新たにひび割れが発生すると、例えば図-6 の 50mm 位置周辺の荷重 40 ~ 60kN のように、ひび割れ周辺の鉄筋のひずみは急激に増加し、ひび割れ位置に新たな極大値を示す。そして、ひび割れが床版を貫通、すなわち、ひび割れ位置の断面の状態が図-7 に示す状態 I から II へ遷移し終えると、図-6 の 50mm 位置周辺の荷重 60kN 以降のように、ひび割れ位置周辺で

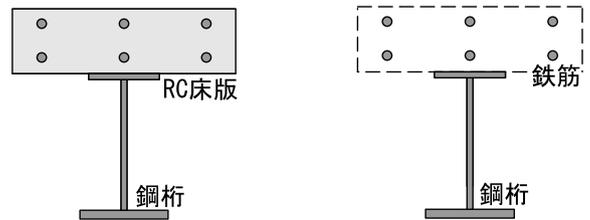


図-7-a 状態 I (全断面) 図-7-b 状態 II (鋼断面)

図-7 断面状態の定義

のひずみの急激な増加は終了し、荷重増加 10kN ごとに対応するひずみの増分は再びほぼ一定となる。

本章で示したように、数値解析に先立って行った合成桁試験体の負曲げ載荷試験では、床版内の橋軸方向鉄筋のひずみを密な間隔で測定することで、ひび割れの発生に伴う鉄筋のひずみ分布の変化を詳細に確認した。

4. 剛体ばねモデルによる合成桁の弾塑性解析

本研究では、コンクリートのひび割れや異種材料間の応力伝達を数値解析によって表現するために、不連続な非線形現象を再現することに適している剛体ばねモデルを用いて合成桁のモデル化を行った。剛体ばねモデルとは、離散化極限解析用の物理モデルの一種で、要素自体を剛体であると仮定し、要素境界に分布したばねの仕事を用いてエネルギーを評価するモデルである。すなわち、解析の対象とする部材を任意の剛体に分割し、その剛体間が長さの無視できるばね系によって連結されていると考え、外力が加えられた際に、ばね系に蓄えられるエネルギーを評価する手法である。

図-8 に、合成桁解析モデルのばね要素の構成を示す。図に示すように、合成桁解析モデルは、コンクリート、鉄筋、鉄筋とコンクリート間の付着、鋼桁、ずれ止め⁵⁾の 5 種類のばね要素で構成される。ここでは、この中で引張軸力作用下の RC 部材の挙動を再現するのに重要な、鉄筋ばね要素の軸ばね、コンクリートばね要素の軸ばね及び鉄筋とコンクリート間の付着ばね要素の水平ばねの 3 つのばねについて説明する。

図-8 に示すように、橋軸方向鉄筋は上段と下段の 2 層にモデル化した。そして、2 層にモデル化した橋軸方向鉄筋それぞれについて、鉄筋のばね要素を剛体間に配置した。鉄筋の直応力と直ひずみの関係を表す鉄筋ばね要素の軸ばね構成則は、図-9 に示すような完全弾塑性型とした。

コンクリートばね要素の軸ばねは、コンクリート断面を高さ方向に 30 分割し、30 本設けている。その引張領域での構成則は、矩形断面を有するコンクリート供試体の直接引張試験の結果⁵⁾を参考に、図-10 に示すように引張強度までをトリリニアで表現した。また、引張強度到達後はひび割れの発生により破断面が形成されるため、軸方向に応力を伝達しないものとし、図中の D 点のように応力をゼロとした。なお、図中の A ~ C 点の応力とひずみは、コンクリートの引張強度 f_{ct} と割線弾

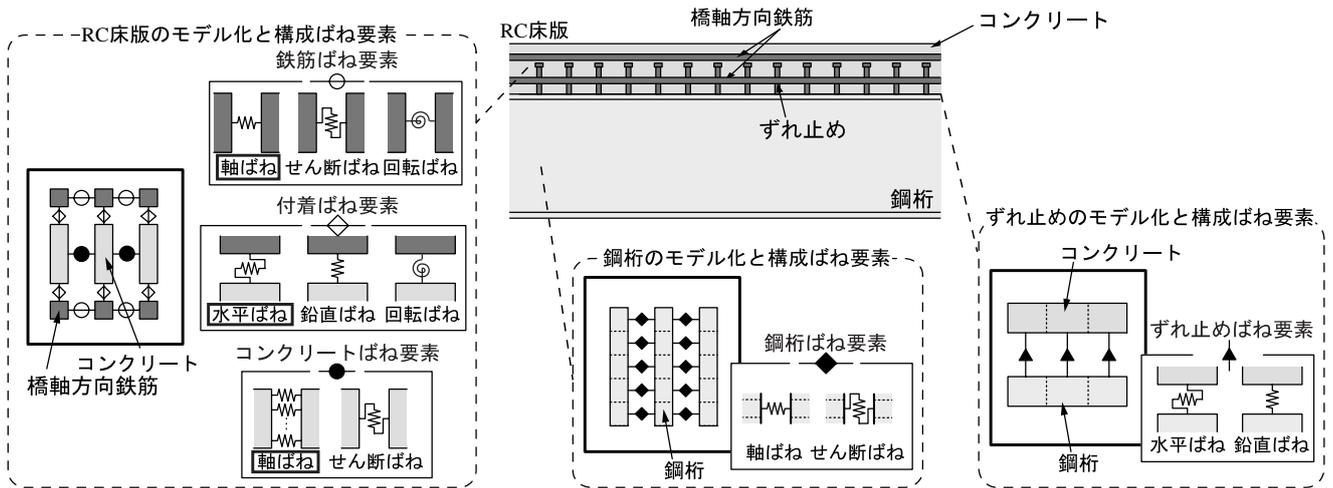


図-8 合成桁解析モデルのばね要素と各ばね要素のばね構成

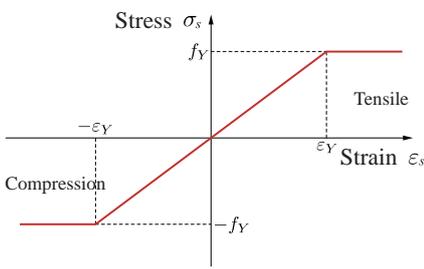


図-9 鉄筋ばね要素の軸ばね構成則

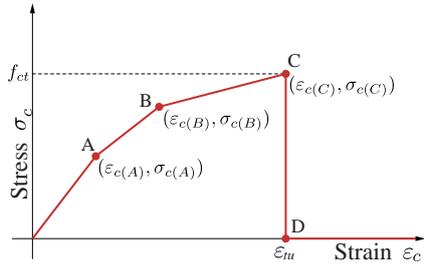


図-10 コンクリートばね要素の軸ばね構成則 (引張領域)

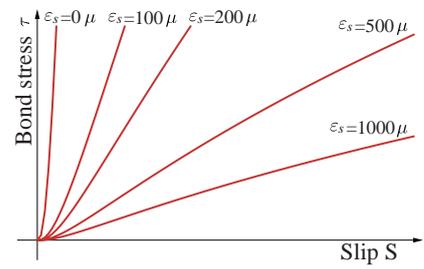


図-11 付着ばね要素の水平ばね構成則

性係数 E_c をもとに次のように定めた .

$$\sigma_{c(A)} = 0.5f_{ct} , \varepsilon_{c(A)} = 0.5f_{ct}/E_c \quad (1-a)$$

$$\sigma_{c(B)} = 0.8f_{ct} , \varepsilon_{c(B)} = 1.0f_{ct}/E_c \quad (1-b)$$

$$\sigma_{c(C)} = 1.0f_{ct} , \varepsilon_{c(C)} = 2.0f_{ct}/E_c = \varepsilon_{tu} \quad (1-c)$$

鉄筋とコンクリート間の付着ばね要素の水平ばねは、鉄筋とコンクリート間の付着応力とすべりの関係を表すばねである。本研究ではその構成則として、島ら⁶⁾が提案する、境界条件(すべりと鉄筋ひずみ)がいかなる場合に対しても適用可能な付着-すべり-鉄筋ひずみ関係式を用いることとした。この付着応力-すべり-鉄筋ひずみ関係式は、付着応力 τ (N/mm²)、すべり S (mm)、鉄筋のひずみ ε_s 、コンクリートの圧縮強度 f'_c (N/mm²)、鉄筋径 D (mm) を用いて、次のように記述される。

$$\tau(\varepsilon_s, S) = f'_c \cdot 0.73 \frac{(\ln(1 + 5000S/D))^3}{1 + \varepsilon_s \times 10^5} \quad (2)$$

図-11 に、式 (2) から得られる、幾つかの鉄筋ひずみレベルに対応する付着応力-すべり関係を描いた。図からわかるように、鉄筋とコンクリート間に作用するの付着応力 τ は、その位置における鉄筋のひずみ ε_s と、鉄筋とコンクリート間のずれ量 S によって決定される。また、式 (2) は、鉄筋の応力あるいは剛性と無関係に成り立つことから、鉄筋降伏後に対しても適用できる⁷⁾。

本解析モデルを用いて、合成桁負曲げ載荷試験のシミュレーションを行う際には、その対称性を利用し、片

方の支点から載荷点までの片側半分についてモデル化した。すなわち、合成桁解析モデルの片方の端部に、回転方向と水平方向の拘束を与え、もう一方の側の支点位置で、鉛直方向に拘束を与えることで、合成桁負曲げ載荷試験をモデル化した。このとき、各節点座標は各剛体の重心位置とし、橋軸方向の節点間距離は 12.5mm とした。よって、負曲げ載荷試験の解析モデルは、全節点数は 485 点、全ばね要素数は 842 要素である。また、前述のように、合成桁の負曲げ載荷試験の結果において、スターラップの配置位置にひび割れが発生する傾向が見られた。そこで解析モデルでは、スターラップ配置位置で、コンクリート断面に 30 本配置した軸ばねのうち、これを 2 本取除くことで、スターラップを配置することによる欠陥を考慮することとした。

5. 負曲げ載荷試験結果と数値解析結果の比較

3 章で述べた合成桁の負曲げ載荷試験の結果と、これに対応する数値解析結果を比較することで、数値解析の再現性を確認する。ここでは、たわみ挙動と鉄筋のひずみ分布の 2 つについて比較を行う。

まず、載荷試験及び数値解析から得られた荷重-中央たわみ曲線を図-12 に示す。図から、それぞれの荷重-たわみ曲線は、特に荷重の小さな段階において良く一致していることがわかる。載荷試験と数値解析の荷重-たわみ曲線に共通して、たわみの増分が荷重の増加に伴い大きくなっている。これは、RC 床版のひび割れの増

加によって、はりとしての剛性が低下するためと考えられる。ただし、荷重 200kN 以降で数値解析に比べて載荷試験のたわみが大きいのは、載荷試験のひび割れの発生本数が数値解析に比べて多く、剛性の低下が大きかったためと考えられる。

図-13 に、載荷試験及び数値解析から得られた荷重 100, 200, 300kN 時における橋軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。3 章で述べたように、鉄筋のひずみ分布の凸な形状となっている位置で、コンクリートにひび割れが発生している。実験結果と解析結果を比較すると、載荷試験に比べて数値解析で、発生しているひび割れの本数が少ないことがわかる。この要因として、載荷試験の試験体においてはコンクリートの乾燥収縮によって、載荷試験前の段階でコンクリートには引張応力が発生していたことが挙げられる。したがって、載荷試験では、この乾燥収縮に起因するコンクリートの引張応力によって、より多くのひび割れが比較的早い段階で発生したと考えられる。

また図-13 で、例えば 50mm や 150mm のなど、載荷試験と数値解析で同じ位置にコンクリートのひび割れが発生している位置での鉄筋のひずみの大きさを比較すると、概ね一致していることがわかる。しかし、ひび割れ位置近傍での鉄筋のひずみ分布の形状を見ると、解析結果では鋭く尖っているのに対して、載荷試験結果では丸みを帯びた形状をしている。このように、ひび割れ近傍での分布形状に差異が生じた要因として、載荷試験の試験体のような、実際の鉄筋コンクリートでは、ひび割れ位置近傍で鉄筋とコンクリート間の付着効果は低下する現象が起こるのに対して、数値解析ではこの現象が考慮されていないことが考えられる。

以上の比較結果から、鉄筋とコンクリート間の付着を考慮した解析モデルによって、RC 床版のひび割れに伴う鉄筋のひずみ分布の変化や、曲げ剛性の変化を再現できることが確認された。また、載荷試験と数値解析から得られた鉄筋のひずみ分布の比較から、コンクリートの乾燥収縮によって発生する初期応力や、ひび割れ位置近傍での付着効果の低下を数値解析モデルに取り込むことで、数値解析による再現性が向上する可能性のあることがわかった。

6. おわりに

本研究では、引張軸力が作用する合成桁 RC 床版の力学特性について、RC 床版内の鉄筋とコンクリート間の付着作用を考慮した数値解析モデルを用いて検討している。本研究の解析モデルにおいては、RC 床版内の鉄筋とコンクリート間の付着作用をも表現することで、ひび割れが発生した RC 床版内の鉄筋からコンクリートへの軸力分担をも再現している。数値解析の結果、ひび割れの発生に伴う鉄筋のひずみ分布の変化を概ね再現することができた。

今後の課題としては、コンクリートの乾燥収縮によって発生する引張応力の影響や、ひび割れ近傍での付着

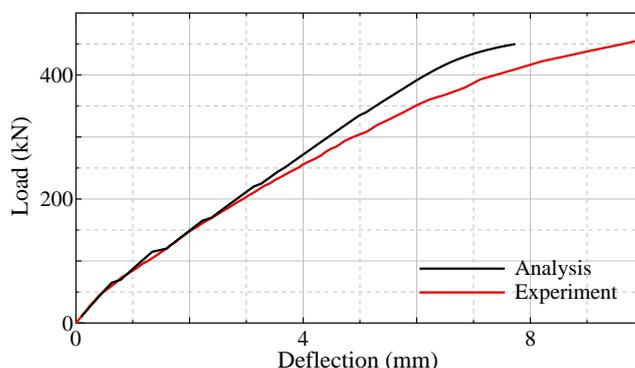


図-12 荷重 - 中央たわみ曲線

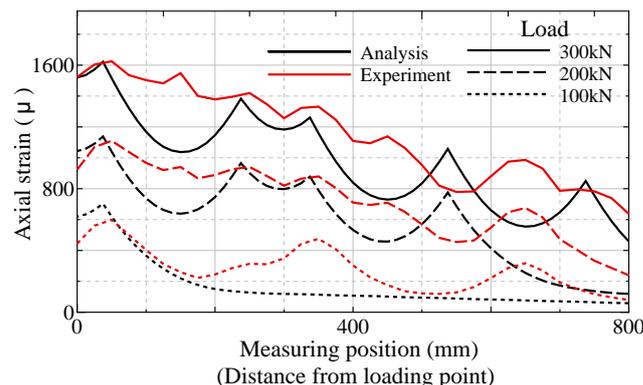


図-13 橋軸方向鉄筋のひずみ分布

効果の低下を解析モデルに取り入れることで、数値解析によるシミュレーションの精度を高めることが挙げられる。また、構築した解析モデルを用いて、ひび割れ間隔や鉄筋比などをパラメータとしてシミュレーションを行うことで、これらのパラメータが引張軸力作用下の RC 床版の力学特性、特に、鉄筋からコンクリートへの軸力分担へ及ぼす影響について検討する。

参考文献

- 1) 中園明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋吉宏, 秋山洋, 佐々木保隆: PC 床版を有する鋼連続合成 2 主桁橋の設計法 (上) - 連続合成桁における中間支座位部の設計 -, 橋梁と基礎, Vol.36, No.2, pp.27-35, 2002.2.
- 2) 藤本大輔, 坂口淳一, 中島章典, 鈴木康夫: RC 床版内の鉄筋・コンクリート間の付着を考慮した合成桁の負曲げ挙動に関する解析, 第 34 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), I-012, 2007.3.
- 3) 坂口淳一, 中島章典, 鈴木康夫: ひび割れを生じた合成桁 RC 床版の鉄筋ひずみ挙動に着目した実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, 2008.3 (掲載予定).
- 4) 佐藤良一, 氏家 勲, 鈴木雅博, 北条泰秀: 鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.27-41, 1999.
- 5) 上田 稔, 長谷部宣男, 佐藤正俊, 奥田宏明: コンクリートの引張破壊メカニズムと引張強度の破壊力学的研究, 土木学会論文集, No.466/V-19, pp.69-78, 1993.5.
- 6) 島 弘, 岡村 甫, 周 礼良: 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, 土木学会論文集, 第 378 号 /V-6, pp.165-174, 1987.2.
- 7) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: 異形鉄筋の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.