鉄筋-コンクリート間の付着を考慮した合成桁負曲げ挙動の数値解析

北武コンサルタント(株)　正会員　○ 坂口 淳一
宇都宮大学　正会員　中島 章典，鈴木 康夫

１．はじめに

合成桁が負曲げを受けた場合，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問題となる．そのため，設計段階でひび割れ幅を予測し，照査することが求められている．このとき，床版コンクリートのひび割れ幅を精度良く予測するためには，床版内の鉄筋のひずみ挙動を正確に把握する必要がある．

そのような観点で著者らは，ひび割れの進展や床版内の鉄筋のひずみ挙動などの基礎的データの収集を目的に，合成桁の静的負曲げ載荷試験を行ってきた[1)]．

さらに著者らは，合成桁の負曲げ挙動を再現するための，2 次元の剛体ばねモデルによる数値解析モデル(以後、本解析モデルと呼ぶ)を構築した．本稿では，本解析モデルの概要を示すとともに，先述の静的負曲げ載荷試験結果と本解析モデルによる数値解析結果との比較検討結果について報告する．

２．静的負曲げ載荷試験の概要

静的負曲げ載荷試験[1)]に用いた試験体は全長 3m の合成桁模型である．試験体は，スタッド及びスターラップの橋軸方向の配置間隔や，鉄筋比をパラメータとし，6 体製作した．本稿ではその中から，鉄筋比 2.0%，スタッド及びスターラップの配置間隔がそれぞれ 100mm，200mm の試験体に対応した数値解析の結果を示す．

載荷試験に用いた試験体の断面図と配筋図を，それぞれ**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．

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 2.7m で単純支持し，試験体中央部に静的荷重を載荷することで試験体に負曲げを加えた．

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．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，その区間にひずみゲージを 25mm 間隔で貼付けた．

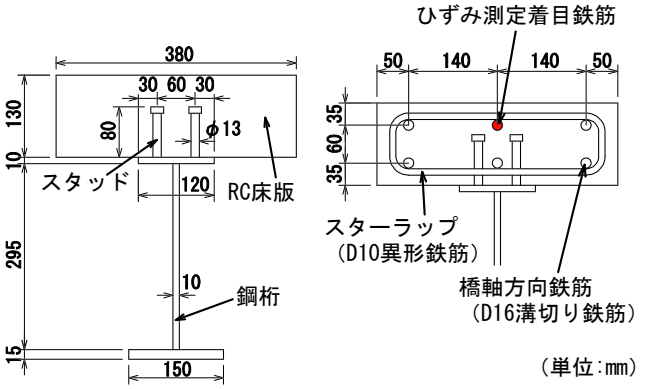

図-1　試験体断面図

図-2　床版配筋図

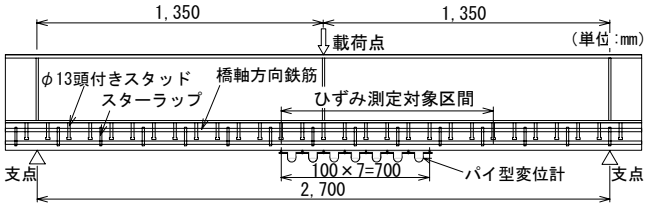

図-3　試験体側面図(載荷試験時)

３．合成桁の数値解析モデルの概要

本解析モデルは，床版コンクリートのひび割れを離散的に表現するとともに，床版内の鉄筋とコンクリート間の付着作用を考慮することで，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．そこで，モデル化には，コンクリートのひび割れのような不連続な非線形現象や異種材料間の応力伝達を再現することに適している剛体ばねモデルを採用した．モデル化に用いたばねは，鉄筋，コンクリート，鋼桁，鉄筋とコンクリート間の付着及び鋼桁と床版間のずれ止めの 5 種類である．本稿では， RC 床版の挙動を再現するのに重要な，鉄筋，コンクリート及び鉄筋とコンクリート間の付着の 3 つのばね要素について説明する．

鉄筋は負曲げ載荷試験を再現するために，上段と下段の 2 層にモデル化した．そして，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の構成則は，**図-4** に示す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[2)]を参考に，**図-5** のように，引張強度までをトリリニアで表現した．そして，引張強度到達後はひび割れの発生により，図中の D 点のよ

キーワード　合成桁，中間支点部，鉄筋のひずみ挙動，付着，数値解析
〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2　宇都宮大学大学院工学研究科 学際先端システム学専攻　Tel.028-689-6208

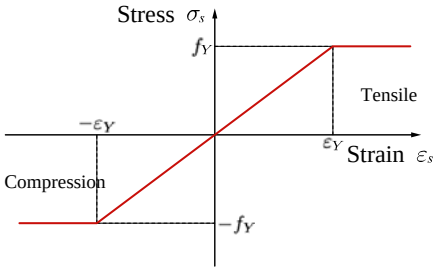

図-4 鉄筋ばね要素-軸ばね構成則

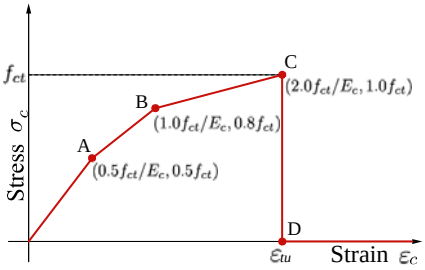

図-5 コンクリートばね要素-軸ばね構成則(引張領域)

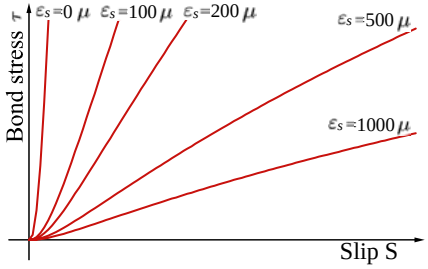

図-6 付着ばね要素-水平ばね構成則

うに軸方向に応力を伝達しないものとした.

鉄筋とコンクリート間の付着応力とすべり量の関係を表す，付着ばね要素の水平ばねの構成則には，島ら[3]が提案する，付着-すべり-鉄筋ひずみ関係式を採用した．この付着応力-すべり-鉄筋ひずみ関係式は，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であり，付着応力τ(N/mm^2), すべり量S(mm), 鉄筋のひずみε_s，コンクリートの圧縮強度f'_c (N/mm^2), 鉄筋径D(mm)を用いて，次のように記述される.

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

図-6 に示したように，式 (1)によると，付着応力-すべり量関係は, その位置における鉄筋のひずみε_sに応じて定まる．ただし，床版コンクリートのひび割れ位置近傍では，付着効果が低下することが知られている．これを考慮するために，本解析モデルでは，ひび割れ位置から鉄筋径の 5 倍の範囲について，式(1)に，付着効果を低減するための係数($\gamma \leqq 1.0$)を適用した.

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，載荷点から片方の支点までの片側半分についてモデル化した．このとき，節点の座標は各剛体の重心位置とし，橋軸方向の節点間距離を 12.5mm とした．また，載荷試験で，スターラップ配置位置にひび割れが発生する傾向が見られたことから，本解析モデルでは，スターラップの位置に相当するコンクリート断面で，高さ方向に 30 本配置した軸ばねのうち 4 本を取除くことで, これによる影響を考慮した.

4．負曲げ載荷試験結果と数値解析結果の比較

本節では，負曲げ載荷試験結果と，これに対応した数値解析結果を比較する.

実験及び解析から得られた載荷点位置での荷重-中央たわみ関係を図-7に示す．図-7より，解析から得られた荷重-たわみ関係は，実験結果と比較的良く一致していることがわかる．したがって，本解析モデルは，載荷初期段階の床版コンクリートのひび割れ発生に伴う断面剛性の低下をある程度再現できていると言える.

実験及び数値解析から得られた荷重50kNから100kNごとの橋軸方向鉄筋のひずみ分布を図-8に示す．鉄筋のひずみ分布が凸になっている位置で，コンクリートにひび割れが発生している．図から，解析から得られた鉄筋のひずみ分布は，実験結果を概ね再現できることがわかる．このことから，本解析モデルの付着作用

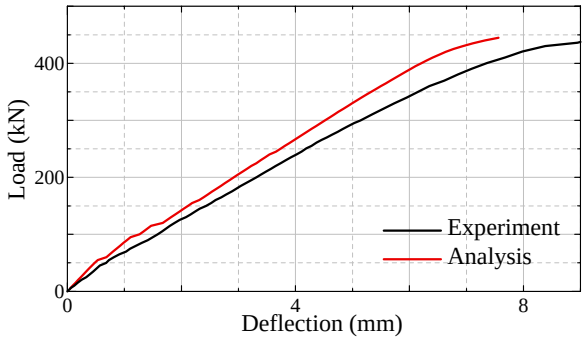

図-7 荷重-たわみ曲線(載荷点位置)

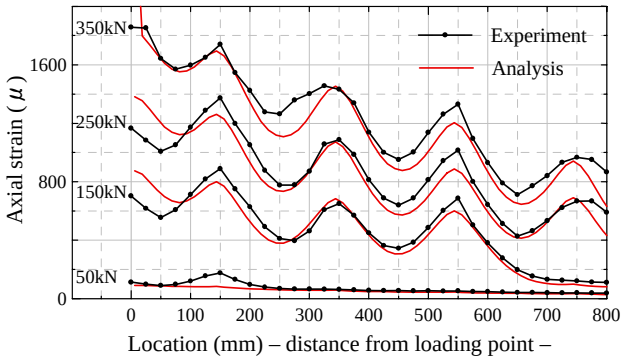

図-8 橋軸方向鉄筋のひずみ分布

のモデル化が有効であることが確認できる.

5．おわりに

本稿では，著者らが構築した合成桁負曲げ挙動を再現するための数値解析モデルの概要を説明し，実験結果と比較することでその有効性を示した．また，付着作用を適切に数値解析モデルに取り入れることで，ひび割れが生じたRC床版内の鉄筋のひずみ分布を数値解析的に再現できることを示した.

参考文献

1) 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

2) 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

3) 島 弘，岡村 甫，周 礼良：マッシブ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