

RBSM 解析によるループ継手構造を有する RC 梁の破壊挙動評価

防衛大学校 学生会員 ○岩田 道春 防衛大学校 正会員 山本 佳士
防衛大学校 正会員 黒田 一郎 防衛大学校 正会員 古屋 信明

1. はじめに

プレキャスト部材の接合方法の一つにループ継手がある。ループ継手は重ね継手よりも鉄筋突出長を抑えることができるため、近年では多くの適用例が見られる。ループ継手の設計基準としてはドイツの DIN1045¹⁾ があるが、ループ継手の耐荷機構を明確に反映させたものとは言えず²⁾、より合理的な設計基準あるいは照査法の確立が望まれる。ループ継手の合理的な設計基準の確立のためには、継手部の破壊機構を実験および解析によりの確に把握し評価することが重要である。そこで、本研究ではループ継手構造を有する RC 部材を対象として曲げ载荷実験を行うとともに、剛体バネモデル（以下、RBSM）を用いて解析を行い、解析により継手部の破壊挙動を評価することを試みた。

2. 実験概要

図-1 に実験供試体の概要図を示す。実験パラメータとして、配力鉄筋（ループ継手の重ね区間内部に働く支圧力を分散させるために配される補強筋）の有無を設定した。以降、配力鉄筋を配置しないケースを Case1、配置するケースを Case2（図-1）と呼ぶ。コンクリートの圧縮強度は 31.7 N/mm^2 であった。主鉄筋（ループ鉄筋）、配力鉄筋およびスターラップには、それぞれ D16, D10, D6（全て SD295）を用いた。ループ鉄筋曲げ直径は、コンクリート標準示方書の半円形フックの最小曲げ直径の規定を準用して鉄筋径の 4 倍以上とし、76 mm とした³⁾。ループ鉄筋間は 20 mm とし、供試体の寸法は $170 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1400 \text{ mm}$ とした。

実験要領を図-2 に示す。载荷点間隔 200 mm、载荷スパン 1200 mm の 2 点对称一方向载荷を行った。荷重は载荷治具とアムスラーの間に設置したロードセルによって測定し、変位は载荷点で測定した。

3. 実験結果および考察

(1) 荷重-変位関係

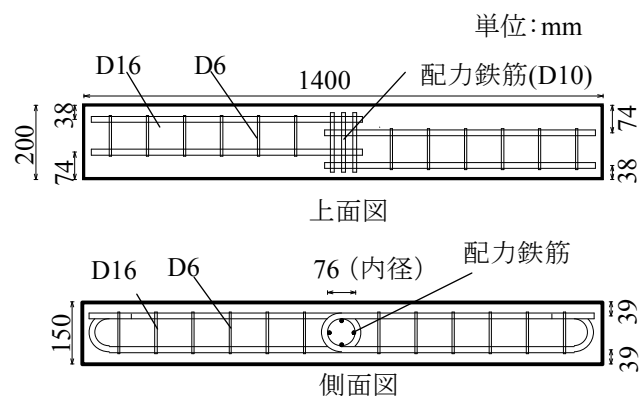


図-1 供試体概要図 (Case2)

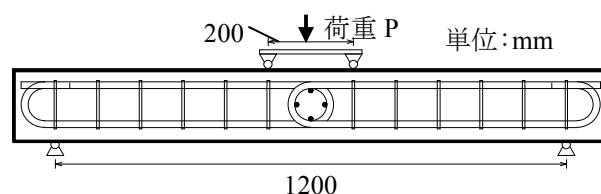


図-2 実験要領図

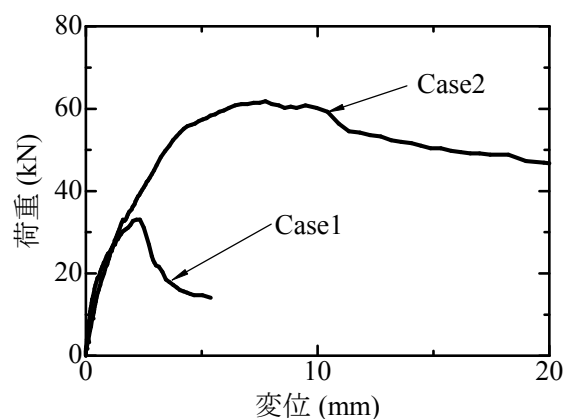


図-3 荷重変位関係

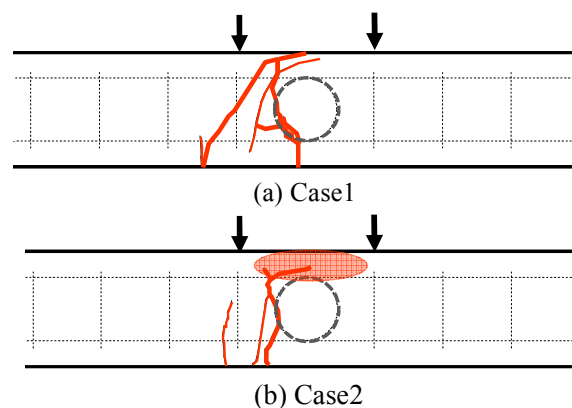


図-4 ひび割れ性状

キーワード ループ継手, 曲げ, 破壊挙動, RBSM

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 TEL 046-841-3810 E-mail: g46060@nda.ac.jp

図-3 に各供試体の荷重－変位関係を示す．配力鉄筋を配置していない Case1 では最大荷重に達すると急激に荷重が低下し、脆性的な挙動を示した．一方、配力鉄筋を配した Case2 では、Case1 と比較して最大荷重が 70%以上大きくなった．また、最大荷重以降は緩やかに荷重が低下し、延性的な挙動を示した．

(2) ひび割れ性状および破壊形態

図-4 に、載荷終了時におけるひび割れ図を示す．太線は最終的に局所化したひび割れを示しており、楕円は圧壊した部分を示している．Case1 では、発生した曲げひび割れがループ鉄筋曲線部に沿って進展した．その後、ひび割れは梁上縁部まで達し、最終的に継手部で分離した．写真-1 に実験終了後の供試体の様子を示す．写真から、ループ鉄筋間のコンクリートが破壊されたことによって梁が破断したことが確認できる．一方、Case2 では、Case1 と同様に、曲げひび割れがループ鉄筋曲線部に沿って進展する．しかしながら、ひび割れが供試体上縁部に達することはなく、梁上縁で圧壊が生じた．写真-2 に、載荷終了後 Case2 からはずり出した配力鉄筋の状態を示す．写真から、配力鉄筋に曲げ変形が生じていることが確認できる．これは、ループ鉄筋からコアコンクリートおよび配力鉄筋に作用する支圧力が 3 次元的に分布することに起因して、配力鉄筋に曲げモーメントが作用するためだと考える．

4. 解析手法

本研究では、Voronoi 分割 (図-5) を用いたランダムな要素形状を有する 3 次元 RBSM によりコンクリートをモデル化した．図-6 に示すように、各要素内の任意点 (本研究では要素重心) に 6 自由度の 3 次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する．積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する．コンクリートの材料特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動をモデル化することで表現した．本解析モデルではバネで連結された複数の剛体要素の相互作用で巨視的な材料応答を表現し、また、本来複相構造であるコンクリートを単相構造としてモデル化しているため、構成モデルおよび材料パラメータを実験から直接決定することは困難である．したがって、本解析モデルでは、既往の 1 軸引張、1 軸圧縮、静水圧圧縮および 3 軸圧縮実験を対象として解析を行い、解析により得られる応答値と、既往の実験で得られている応答を比較し、構成モデルおよび材料パラメータの組合わせを同定した．なお、構成モデルと材料パラメータの詳細は参考文献 4) を参照されたい．

鉄筋および鉄筋－コンクリート間の付着すべり挙動のモデル化には、Saito らによって開発された離散鉄筋要素を用いた⁵⁾．鉄筋は一連の梁要素としてモデル化され、リンク要素を介してコンクリート剛体要素



写真-1 載荷終了時の断面 (Case1)



写真-2 載荷後の挿し筋の状態

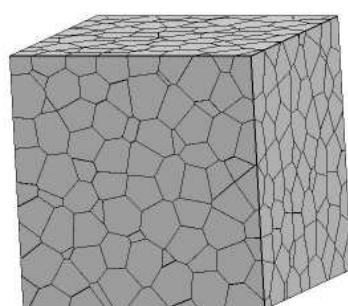


図-5 Voronoi 分割

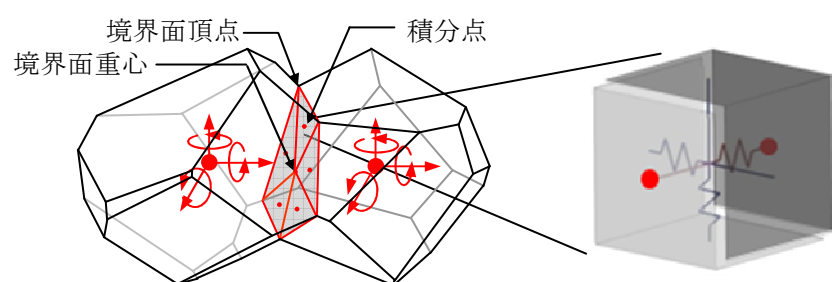


図-6 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

に結合される．リンク要素に非線形特性を導入することにより，鉄筋－コンクリート間の付着特性を表現することができる．鉄筋の構成モデルには，bilinear 型を用い，鉄筋－コンクリート間の付着応力－すべり関係には，澤部ら⁹⁾によって提案され RC 部材解析への適用性が確認されているモデルを用いた．

5. 解析モデル

図－7に解析モデルを示す．RC ループ継手では，継手区間の狭い領域でひび割れが生じることが実験で確認された．そのため，要素の平均寸法を等曲げ区間内は約 5 mm とし，等曲げ区間外は計算負荷を軽くするために外側になるほど大きくなるよう設定した．荷重は供試体上面載荷点に設置した 2 つの載荷板要素の一方を変位制御，片方を変位制御点に作用する荷重と等価な荷重が作用するよう制御して解析を行った．

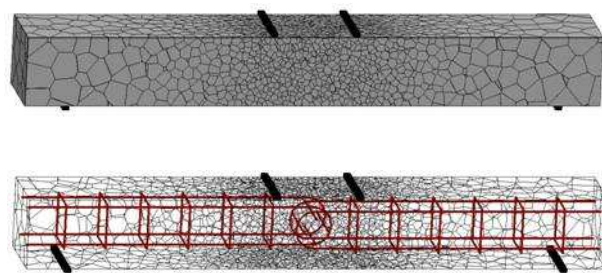
6. 解析結果

(1) 荷重－変位関係および破壊性状

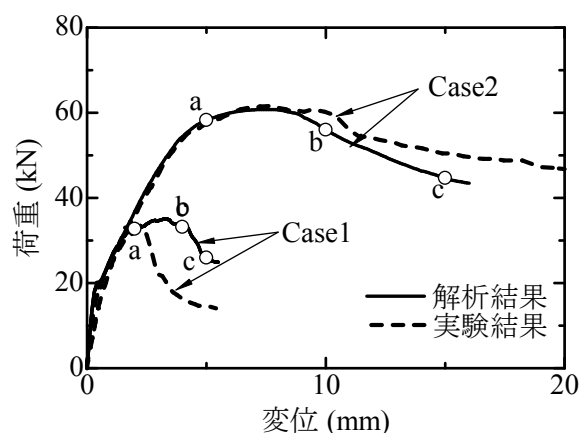
図－8に荷重－変位関係を示す．Case1 では変形性能を過大に評価しているものの，解析は配力鉄筋の有無による耐力の違いを良好に再現していることが分かる．図－9に図－8中の c 点における変形図を示す（変形倍率 10）．実験では，Case1 でループ鉄筋曲線部に沿ったひび割れが上縁部まで達し終局に至り（図－4(a)），Case2 では梁上縁部の圧壊により最大荷重を迎え耐力低下に至った（図－4(b)）が，解析はその性状を良好に再現していることがわかる．

図－10 および図－11 に，図－8中の a 点および b 点における供試体底面から供試体高さ 4 分の 1 の，鉛直軸に直行する断面のひび割れ図を示す．図中の実線は垂直バネが引張強度に達した後 $1/4f_t$ まで応力が低下した面であり，破線は鉄筋を示している．

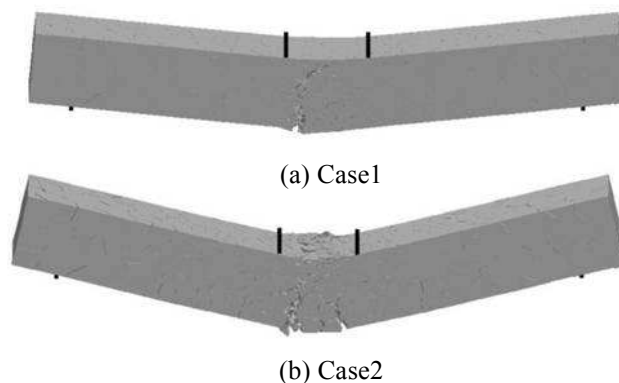
まず Case1 のひび割れ図に着目すると，最大荷重以前の a 点では，曲げひび割れがループ鉄筋の先端付近で生じている様子が確認できる．最大荷重以降の b 点では，実験で観察された 4 本のループ鉄筋先端部を結ぶひび割れが確認できる．一方，Case2 では最大荷重以降の b 点で，4 本のループ鉄筋の内，外側 2 本のループ鉄筋間にひび



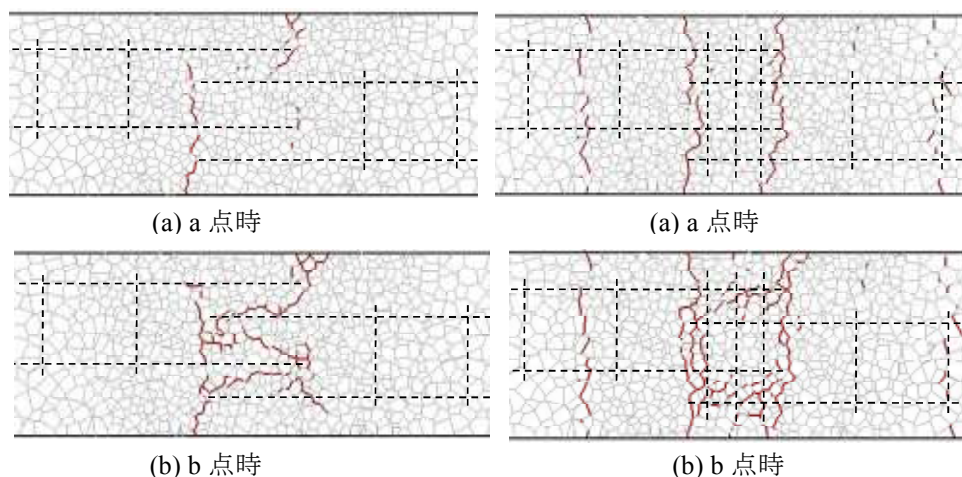
図－7 解析モデル



図－8 荷重－変位関係



図－9 変形性状 (c 点)



図－10 ひび割れ図 (Case1)

図－11 ひび割れ図 (Case2)

割れが生じているものの、内側 2 本の鉄筋間にはひび割れが生じていないことが確認できる。

(2) 配力鉄筋のモデル化の影響

実験では、配力鉄筋が継手部の耐荷性能および破壊性状に大きな影響を与えることを確認した。ここでは、前述の鉄筋を梁要素としてモデル化した解析に加えて、配力鉄筋だけをトラス要素としてモデル化した解析を行い、配力鉄筋のモデル化の違いが継手部の破壊性状に及ぼす影響について検証する。以降、配力鉄筋をトラス要素としてモデル化した解析を Case2-truss、梁要素としてモデル化した解析を Case2-beam と呼ぶ。図-12 に荷重-変位関係を示す。図中には Case1 およ

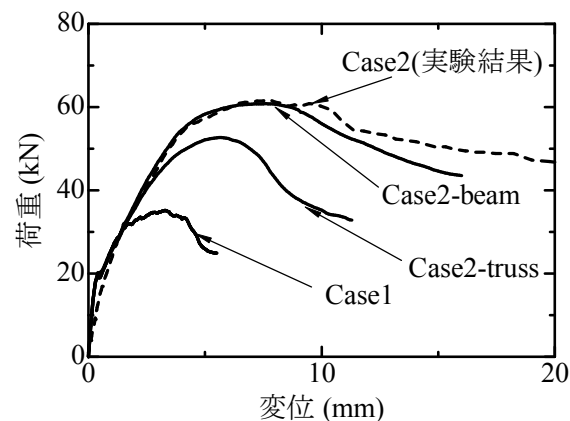


図-12 配力鉄筋モデルの影響

び Case2-beam の解析結果も併せて示す。まず、Case2-truss の解析結果に着目すると、実験の耐力および変形性能を過小評価していることが分かる。実験では、配力鉄筋に顕著な曲げ変形が見られたが、曲げに対して抵抗しないトラス要素では、配力鉄筋からコンクリートへの支圧力を適切に評価できず、実験結果から乖離したと考える。つづいて、Case1 と Case2-truss の解析結果を比較すると、配力鉄筋をトラス要素としてモデル化した場合でも、最大荷重は増加していることが確認できる。これは、配力鉄筋とコンクリートとの付着および配力鉄筋の軸方向の剛性が、コアコンクリートのひび割れの進展を抑制しているためであると考えられる。

7. 結論

ループ継手構造を有する RC 梁を対象に、配力鉄筋の有無をパラメータとした曲げ載荷実験を行った。続いて、実験を対象に RBSM で継手部の破壊挙動の解析を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 実験結果から、ループ継手に配力鉄筋を配すると、最大荷重が飛躍的に向上し、最大荷重到達後も脆性的な挙動から延性的な挙動へと破壊モードが変化した。載荷終了後にはつり出した配力鉄筋が大きく曲げ変形していたことから、配力鉄筋がループ鉄筋から受ける曲げモーメントに抵抗したことがうかがえた。

(2) 本解析手法を用いることで、耐力のみならず実験で観察されたひび割れ進展挙動や、配力鉄筋の有無により異なる破壊性状を良好に捉えることができた。

(3) 配力鉄筋をトラス要素としてモデル化すると、実験の耐力および変形性能を過小評価する。配力鉄筋がコンクリートに与える支圧力を適切に評価するためには、鉄筋を梁要素としてモデル化する必要がある。

参考文献

- 1) Deutsches Institut für Normung : Deutsche Industrie Normen, pp.133-148, 1988.7
- 2) F・レオンハルト, E・メニッヒ (著), 横道英雄 (監訳) : 鉄筋コンクリートの配筋, 鹿島出版会, pp.68-69, 1985
- 3) 土木学会, コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002
- 4) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明 : 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp. 612-630, 2008.
- 5) Saito, S. and Hikosaka, H. : Numerical analysis of reinforced concrete structures using spring network model, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, Japan Society of Civil Engineers, No.627 V-44, pp. 289-303, 1999.
- 6) 澤部純浩, 上田尚史, 中村光, 国枝稔 : セン断補強筋に鉄筋不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp. 444-461, 2006