

論文 剛体 - バネモデルによる鉄筋継手部の応力伝達機構に関する研究

岩田 道春*1・山本 佳士*2・黒田 一郎*3・古屋 信明*4

要旨: 本研究では、離散型解析手法の1つである剛体 - バネモデルを用いて、曲げモーメントを受ける鉄筋継手部の応力伝達機構について検討した。対象は、鋼材突出長さを極力短くするという観点から提案された真円形状のループ継手である。比較対象として従来工法の重ね継手についても解析し、その結果、それぞれの継手部周辺におけるひずみ分布の違い、応力伝達機構の違いなどある程度明確にすることができた。

キーワード: RBSM, 重ね継手, ループ継手, 応力伝達機構

1. はじめに

施工性や耐久性向上に効果があるプレキャスト（以下、PCa）部材工法を用いた場合の課題の一つが接合方法であるが、重ね継手を使用することが多い。しかし、PCa部材側から現場打ち側への鉄筋突出長が長くなるため、これを可能な限り短くすることが望まれる。その方策の一つがループ継手の採用である。ループ継手は最初は楕円形状で提案されて、ドイツのDIN1045¹⁾が設計基準として整備され、国内でも高速道路のPCa床版の設計に採用されてきている^{2), 3)}。ループ継手では鉄筋曲線部から継手内部のコンクリート（以下、コア部）に作用する支圧力があるため、DIN1045の規定よりも、また重ね継手よりも、継手長を短くできるとされている⁴⁾。

一方、筆者らは真円形状のループ継手を提案し、重ね継手に比べて耐荷力・変形性能の上で遜色のないことを実験的に確認している^{5), 6)}。そこで、真円形状ループ継手についても鉄筋やコンクリートのひずみ分布、鉄筋のすべり分布の把握などを通じて、鉄筋応力の伝達メカニズムを考察することが必要であると考え、今回の解析的研究を行った。

継手を有するRC部材は、構造上、弱点部を有するため、ひび割れの集中が起こるなど通常のRC部材と比較して不連続な挙動が顕著になる。そこで、本研究では解析手法として不連続挙動の再現を得意とする剛体 - バネモデル（以下、RBSM）を用いた。また、ループ継手は180度に曲げ加工された2本の鉄筋が重なりあうという形状をしているため、代表的断面における2次元解析では不十分であり、3次元解析を行った。

研究手順としてはまず、継手はあるもののコンクリートは一体打ちされた梁部材について載荷実験を行い、耐荷性能を比較した。その後RBSMによる解析を行い、解析が実験を再現することを確認し、応力伝達機構を検討

した。

2. ループ継手・重ね継手供試体の載荷実験

2.1 供試体と載荷方法

図-1に本実験で用いたRC梁供試体の概要図を示す。供試体の寸法は150mm×150mm×1200mmで、主鉄筋にD10（SD295）を、スターラップにはD6（SD295）を100mm間隔で配置した。ループ継手の場合、梁の上縁側に定着部を有するがこれを梁端部までそのまま伸ばしたため、複鉄筋のように見える。それに合わせて、重ね継手供試体でも圧縮鉄筋を配置してある。引張鉄筋の鉄筋比は両者ともに0.73%である。コンクリートの圧縮強度は、ループ継手、重ね継手の順に37.5MPa、26.3MPa、また鉄筋の降伏強度および弾性係数は、339MPaおよび 1.82×10^5 MPaであった。

ループ継手は、1本の鉄筋を直径110mmで折返してU字形にし、折返した部分を重ね合わせて、直径110mmのループを形成した。コア部には、コンクリートに作用する支圧力を分散させるため、補強用の挿し筋（D10）を梁軸直角方向に4本配置した。比較対象の重ね継手供試体では、継手長を250mm（鉄筋直径の25倍、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の規定では最小20倍）に設定した。

実験要領をループ継手を例にして図-2に示す。載荷点間隔200mm、載荷スパン1000mmで継手中心と載荷中心が一致するように、2対称一方向載荷を行った。荷重は載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、変位は載荷点で測定した。

2.3 実験結果

図-3に各供試体の荷重 - 変位関係を示す。ループ継手、重ね継手ともに、鉄筋がまず降伏し、ついで上縁コンクリートが圧壊して荷重が低下するまでの間、ほぼ同

*1 防衛大学校 理工学研究科地球環境科学専攻（正会員）

*2 防衛大学校 建設環境工学科 助教 工修（正会員）

*3 防衛大学校 建設環境工学科 准教授 工博（正会員）

*4 防衛大学校 建設環境工学科 教授 工博（正会員）

じ荷重 - 変位関係をたどった。このことから、本研究で用いたループ継手は、重ね継手と同等の曲げ耐荷能力を有していると言える。

図-4 にひび割れ性状図を示す。ループ継手供試体のひび割れは載荷点付近に多く、またループ鉄筋外周に沿って成長するかわりに、ループ内部には顕著なひび割れは発生しなかった。重ね継手供試体では、ひび割れは支間方向に分散せず、重ね継手の両端部近傍に集中する傾向を示した。この理由としては、そこで主筋量が倍半分に激変していることがあげられる。

3.解析手法

3.1 コンクリートのモデル化

本研究では、ボロノイ分割を用いたランダムな要素形状を用いた3次元RBSMにより解析した。RBSMを用いることで、ひび割れの進展やそれに伴う部材の非線形挙動を簡便に表現でき^{8), 9)}、3次元解析をすることによって、ループ継手のような立体的構造を評価できる。また、ボロノイ分割を導入することにより、ひび割れの発生と進展の要素分割依存性は改善される。

RBSMでは図-5に示すように、変位場として各要素内の任意点に6自由度の3次元剛体変位を仮定し、隣接する要素境界面(ボロノイ面)上の任意の評価点に垂直バネおよびせん断バネを配置する。さらに、回転バネを設けることもあるが、回転バネの非線形特性を同定するのは困難である。そこで本研究では、図-6に示すように、境界面を境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、各三角形の重心に垂直バネとせん断バネを設けた。一つのボロノイ面に対して複数の評価点を設けることにより、回転バネがなくても、隣接する要素間の相対回転変位に対する非線形抵抗特性をモデル化することができる。その上で、RBSMにより離散化された剛性方程式を解き、材料の構成モデルに従って非線形解析を行う。

コンクリートの材料特性は、垂直バネおよびせん断バネに、それぞれ引張-圧縮挙動およびせん断すべり挙動をモデル化することで表現した。垂直バネの構成モデルを図-7に示す。図中 E は弾性係数、 f_t は引張強度および G_f は破壊エネルギーである。引張領域では、垂直応力が引張強度 f_t に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギー G_f によって軟化勾配を変化させる1/4モデルに従って応力を低減させた。圧縮領域では垂直バネは弾性とし、破壊は生じないものとした。せん断バネについては、図-8に示すモルクーロン型の破壊基準を設定した。図中の c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。バネが破壊基準に達した後は、せん断ひずみが10%になるまで線形的に軟化するものと仮定した。

解析で使用した材料パラメータ(表-1)は、RBSMを用いて、RC梁の解析モデル(図-11)における最小要素寸法と同様の要素寸法を有する円柱供試体の一軸圧縮および一軸引張解析を行い、解析により得られる応答値と実験で用いたコンクリートの材料特性値が概ね一致するようキャリブレーションにより決定した値であ

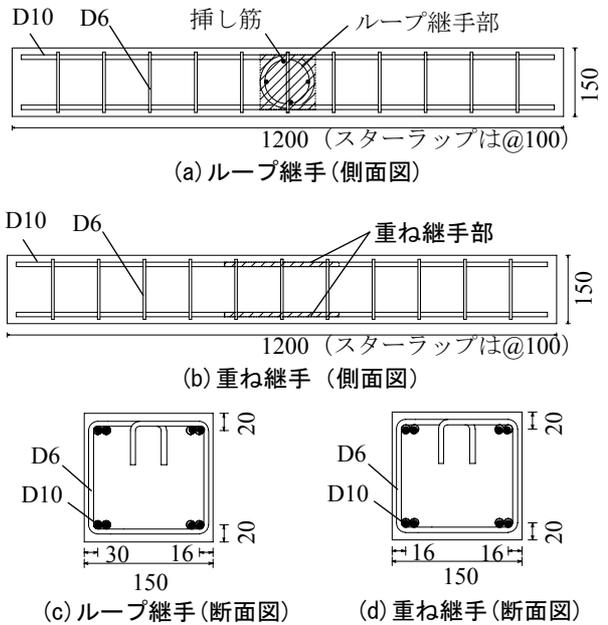


図-1 供試体概要図(mm)

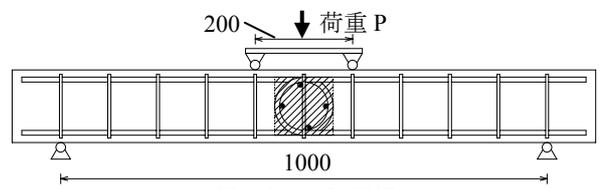


図-2 実験要領

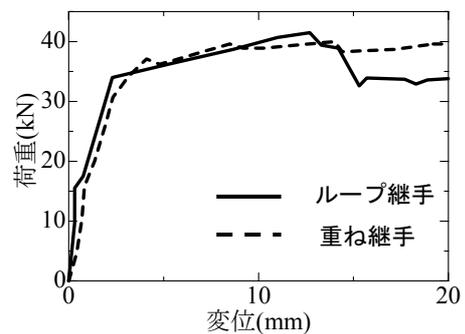


図-3 荷重 - 変位関係

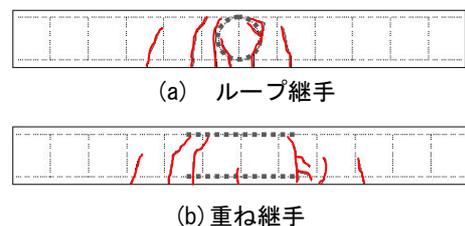


図-4 ひび割れ性状図(実験)

る。キャリブレーションの対象とした材料特性値は、ヤング係数、圧縮強度および引張強度である。なお、実験時には、一軸圧縮試験しか行っていないため、ヤング係数および引張強度は、圧縮強度をもとに土木学会コンクリート構性能照査編⁷⁾を参考に算定した。また、Bolanderら¹⁰⁾はボロノイ分割を用いたRBSMでポアソン効果を表現するためには、せん断バネの弾性係数 G を垂直バネの弾性係数 E より小さく設定する必要があることを指摘している。本研究では、この知見を参考に G/E を0.25と仮定した上で上記のキャリブレーション解析を行っている。

3.2 鉄筋のモデル化

鉄筋のモデル化にはSaitoらによって開発された離散鉄筋要素を用いた¹¹⁾。図-9に示すように、鉄筋は一連の梁要素としてモデル化され、剛体要素を通る梁要素の中心に配置したリンク要素を介してコンクリート剛体要素に結合される。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-すべり関係には図-10で表されるCEB¹²⁾のモデルコードを用いた。対象実験では、せ

ん断補強筋を配置しており、また、付着すべりによる割裂ひび割れも観察されなかったため、図中のパラメータは、拘束・付着条件の良いコンクリートに対する値を用いた。なお、CEBの非拘束・付着条件の良い場合、あるいは付着応力-すべり関係が線形を保ち、その勾配を十分大きくした条件でも解析を行ったが、ほとんど同一の荷重-変位関係が得られたため、図-13には示していない。

3.3 解析モデル

図-11にRC梁のボロノイ分割図を示す。ボロノイ分割における要素寸法は、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。最小要素寸法は約5mm、最大要素寸法は約40mmとしている。図-12に鉄筋挿入図をループ継手を例にして示す。

4. ループ継手・重ね継手に対する解析結果

4.1 荷重-変位関係およびひび割れ性状

図-13に荷重-変位関係を示す。実線が解析結果、破線が実験結果である。ループ継手・重ね継手ともに概ね実験を再現していることが分かる。

図-14に、ループ継手は図-13(a)上のB点、重ね継手は図-13(b)上のE点におけるひび割れ性状図を示す。

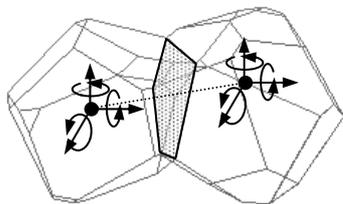


図-5 剛体要素の自由度

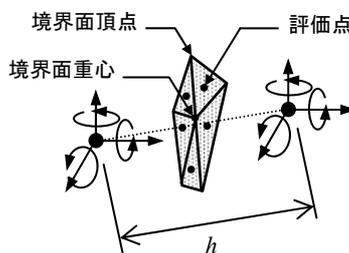


図-6 要素境界面上の評価点

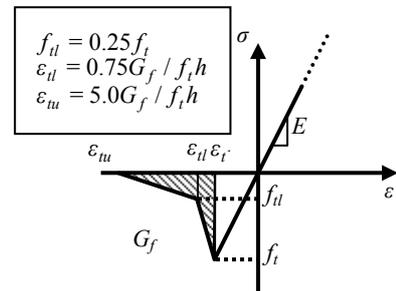


図-7 垂直バネの構成モデル

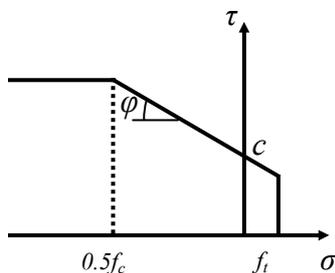


図-8 せん断バネの破壊基準

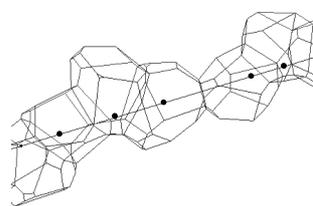


図-9 離散鉄筋モデル

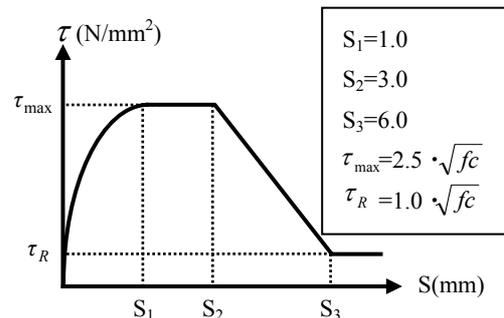


図-10 付着応力-すべりモデル¹²⁾

表-1 コンクリートの材料パラメータ

	弾性係数		圧縮強度 f_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (degree)	破壊エネルギー G_f (N/m)
	垂直バネ E (MPa)	せん断バネ G (MPa)					
ループ継手	48.1	12.0	37.5	2.25	5.25	37	0.091
重ね継手	46.5	11.6	26.3	1.70	3.68	37	0.081

図中に描かれた線は、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範囲である。これらは、図-4をよく再現していると言える。

4.2 鉄筋のすべりおよびひずみ分布

図-13 上に示した A~C, D~F それぞれの荷重段階における鉄筋のすべりおよびひずみ分布を図-18 に示す。左側がループ継手、右側が重ね継手である。(b), (c) の横軸の要素番号は主筋を構成する鉄筋要素番号であり、(a) に示してある。すべりは全ての鉄筋要素について表示しているが、ひずみは継手部を構成する鉄筋要素のみ (a) 上の太線区間) 表示している。すべりは、鉄筋要素がコンクリート要素に対し、図-18 (a) に示した S2 方向へ滑ると正の値、S1 方向へ滑ると負の値になる。ひずみは正の値が引張、負の値が圧縮を表している。

図-18 (b) から、ループ継手では鉄筋要素番号 10 付近 (コア部端部) ですべりが正から負に転じており、この位置にひび割れが生じていることが分かる。そしてこれ以降の鉄筋要素は最大で約 0.3mm の S1 方向へのすべりを有し、要素番号 45 付近 (ループ鉄筋上部の曲線から直線になる位置) ですべりが 0 になっている。つまり、要素番号 45 付近までの付着力は、すべりに比例して大きくなる領域 (図-10 の付着強度以前) であること、さらにひび割れない圧縮ひずみ場 (4.3 で述べる) における付着であるから、鉄筋の付着応力はより効果的に発揮されることになる¹³⁾。

重ね継手では、要素番号 10 付近 (重ね継手部端部) まですべり分布が波打っており、この位置でひび割れが複数入っていることが分かる。またこの鉄筋は全体としては S1 方向に滑ろうとしているが、継手中心にひび割れが入ったため (図-14 (b)), そこでのすべりは小さくになっている。継手内部でのすべりは、概観するとループ継手の場合より小さく、それに見合う付着応力も小さいはずである。

ひずみ分布を示す図-18 (c) では、ループ継手では B, C 段階で要素番号 18 (継手端部から鉄筋径の約 5.8 倍の位置) まで鉄筋の降伏点 (約 2000μ) を超えているが、それ以降のひずみは、コンクリートに応力が伝達されていくこと、鉄筋が圧縮ひずみを有するコンクリート領域に入っていくことから、急速に低下していくことがわかる。一方、重ね継手は要素番号 12 (継手端部から鉄筋径の約 6.5 倍の位置) まで降伏点を超えていて、それ以降のひずみ低下はループ継手に比べると緩やかである。

4.3 コンクリートのひずみ分布

図-19 に、図-13 上に示した A~C, D~F それぞれの荷重段階における、継手部でのコンクリートの梁軸方向ひずみ分布を示す。ひずみの算出場所は同図の供試体図中における点線部であり、主鉄筋が挿入された断面の

3つの高さ ($y=100, 75, 50\text{mm}$ 。y は梁下縁からの距離) である。

図-19 (a) に示すループ継手で特徴的なことは、コア部では、梁全体の曲げ変形 (上側で圧縮、下側で引張) と逆のひずみ分布を呈することである。すなわち継手部全体で概観すると、 $y=100$ で 100μ 前後の引張が、 $y=50$ ではおおよそ $200\sim 400\mu$ の圧縮ひずみが発生している。また、 $y=50$ の $x=-40\text{mm}$ 付近で大きな圧縮ひずみが生じ

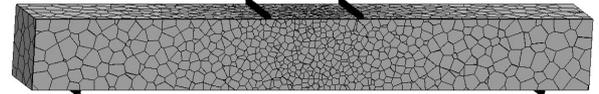


図-11 ポロノイ分割図

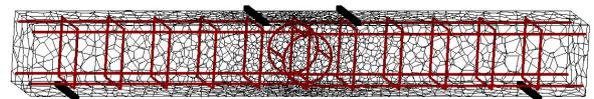
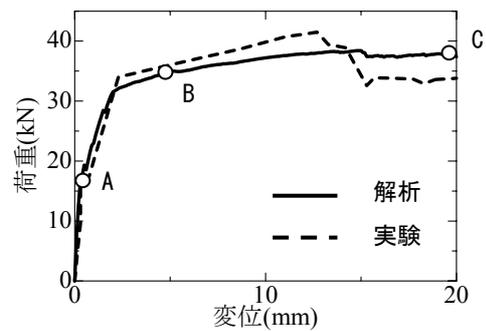
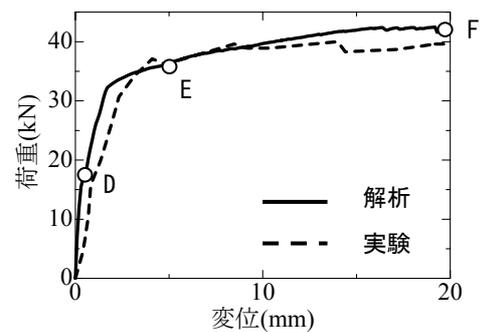


図-12 鉄筋挿入図 (ループ継手)

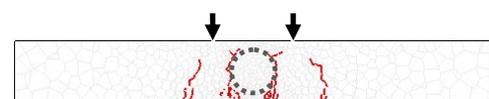


(a) ループ継手

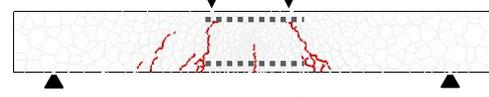


(b) 重ね継手

図-13 荷重 - 変位関係 (解析)



(a) ループ継手



(b) 重ね継手

図-14 ひび割れ性状図 (解析)

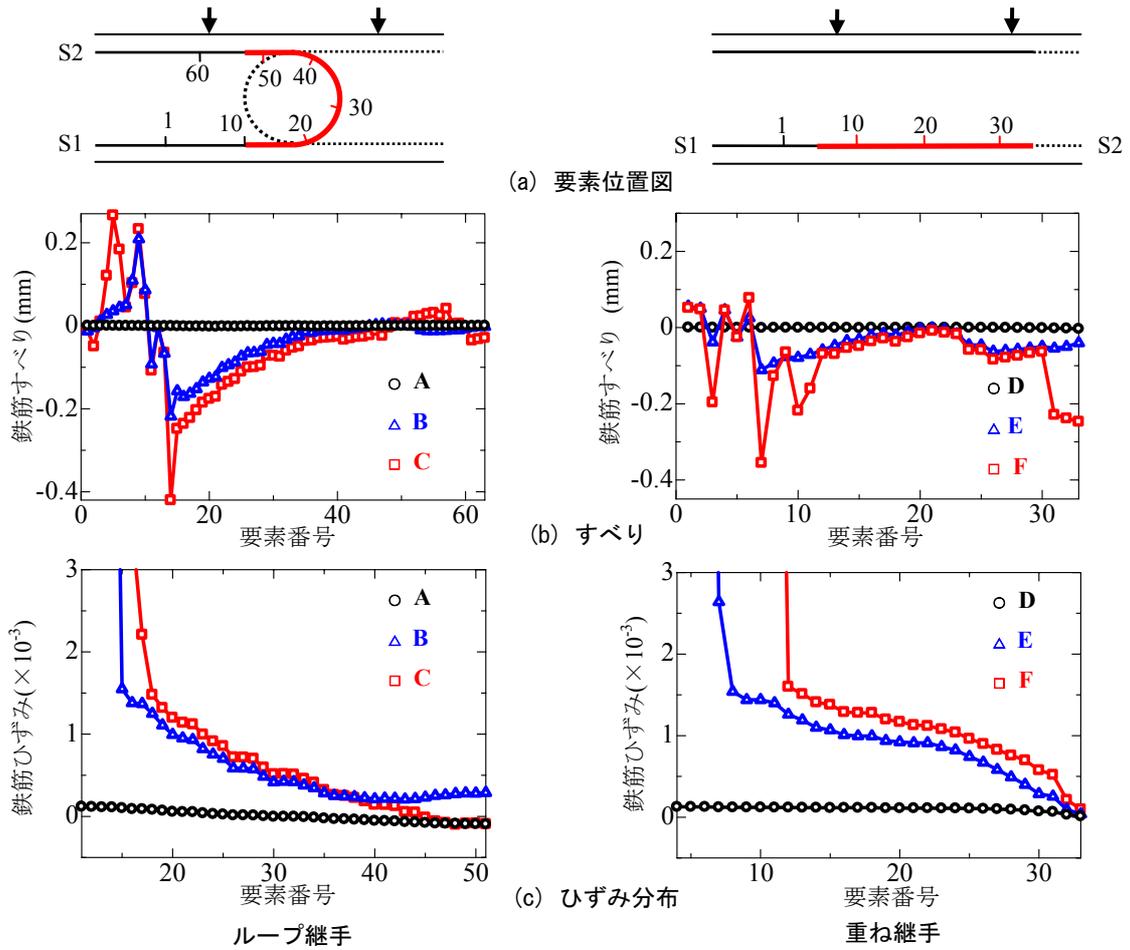


図-18 鉄筋のすべり・ひずみの分布

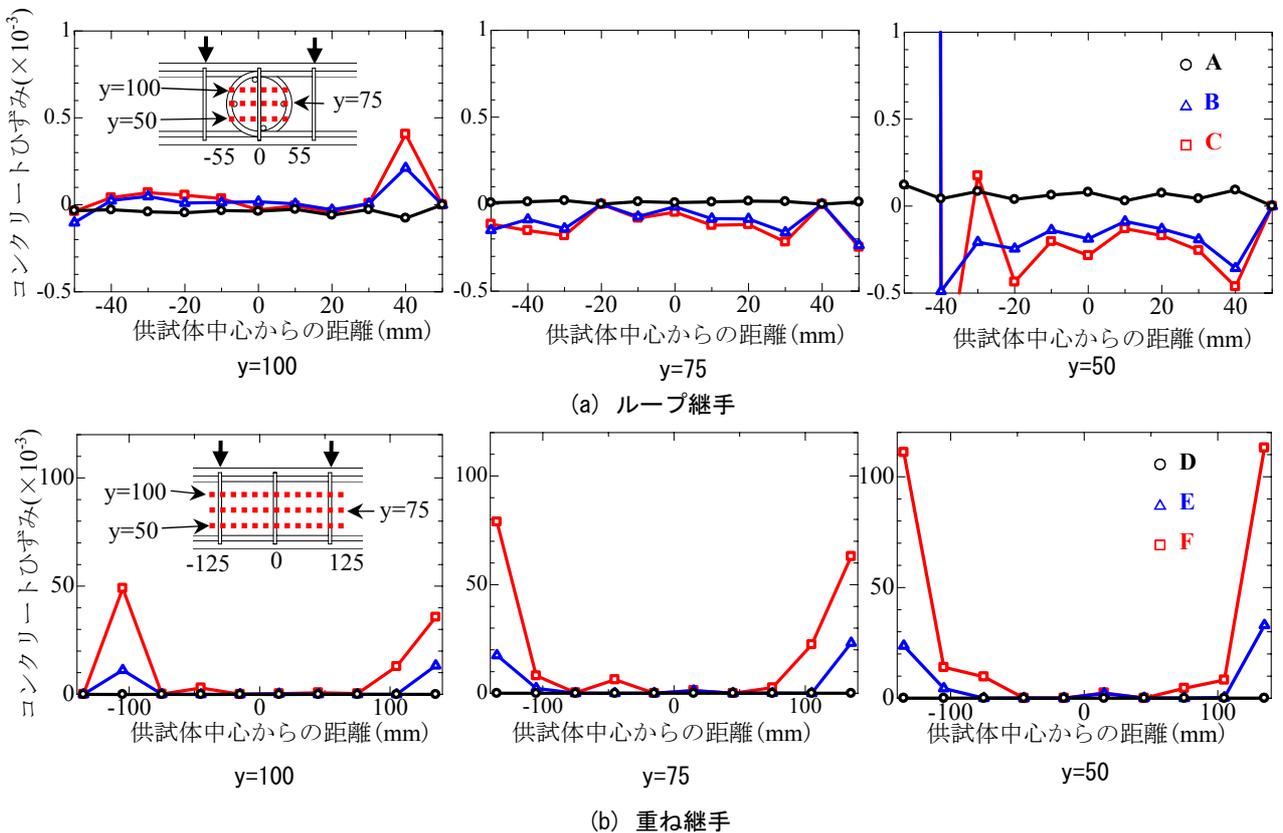


図-19 コンクリートのひずみ分布

ているが、この最大値は約 1200 μ なのでコンクリートは塑性域には達していない。

図—19 (b)には重ね継手でのひずみ分布を示す。両端 ($\pm 100\text{mm}$ 以遠)の大きな引張ひずみは、継手端部に生じたひび割れによるものであり、さらに荷重段階が進むほど、下側断面に梁全体の曲げ変形による引張ひずみ区間が広がっていることがわかる。

以上の結果から、ループ継手では下縁側に大きな圧縮力が働いてコア部にひび割れが発生することを抑制しており、これはループ継手の有利な点になっていると考えられる。

5. 結論

- (1) 耐荷性能を比較するため、一体打ちのループ継手および重ね継手を有する RC 供試体の静的曲げ実験を行った。その結果、本研究で用いたループ継手は重ね継手と同等の曲げ耐荷性状を発揮しうることが確かめられた。
- (2) (1)の実験について RBSM による解析を行った。その結果、荷重 - 変位関係および破壊性状から、本研究で用いたモデルは実験を概ね再現することを確認した。
- (3) 解析により、継手部における鉄筋すべり分布、ひずみ分布およびコンクリートひずみ分布を調べた。その結果、ループ継手では、鉄筋軸に沿って鉄筋のすべりおよびひずみが急速に低下しており、効果的にコンクリートに応力が伝達されていることをうかがわせた。また、ループ継手のコア部には圧縮ひずみが生じていて、ひび割れ発生を抑制し、さらには付着応力を高めていると推察された。これらのことから、ループ継手は短い継手長で相手側鉄筋に応力を伝え得る構造となっている、と考えられる。

参考文献

- 1) DIN1045, pp.133-148, Juli 1988
- 2) 中井博, 川口昌宏, 柳沼善明, 阪野雅則, 鍵和田功, プレキャスト RC 床版ループ鉄筋重ね継手の強度, および疲労に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.41A, pp1069-1076, 1995.3

- 3) 成田信之ほか, 鋼橋の未来, pp.101~104, 技報堂出版, 1998.10
- 4) 中村定明, 三浦尚: RC ループ継手の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.774, V-65, pp.17-26, 2004.11
- 5) 丹羽徳高, 黒田一郎, 古屋信明, 松葉美晴: 曲げモーメントを受けるプレキャスト・現場打ちコンクリート接合部材の力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.823-828, 2003.7
- 6) 丹羽徳高, 黒田一郎, 古屋信明, 岡村勝栄: プレキャスト・現場打ちコンクリート接合部に用いる鉄筋継手方法の実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.99-108, 2003.5
- 7) 土木学会, コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002
- 8) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T.: Analytical Study on influence of Mortar-Aggregate Interface Character on Concrete Strength by RBSM, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.2, pp.151-156, 2004
- 9) 鈴木孝典, 斉藤 成彦, 檜貝 勇: メソスケール解析によるコンクリートの圧縮破壊性状の予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.169-174, 2005
- 10) J.E. Bolander, K. Moriizumi, M. Kunieda, M. Yip : Rigid-Body-Spring Network modeling of cement-based composites, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, eds. R. de Borst, J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot and J.G.M. van Mier, A.A. Balkema Publishers pp. 773-780. , 2001,
- 11) Saito, S., Hikosaka, H. : Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring networks with random geometry, JSCE, No.627, V-44, pp.289-303, 1999
- 12) Comité Euro-International du Béton *CEB-FIP Model Code 1990 First Draft*. CEB, Paris, 1990
- 13) 長友克寛, 角徹三, 松原三郎: 横方向応力作用下における異形鉄筋の付着強度に関する研究, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.225-234, 1992.8