

RC ループ継手の力学挙動に関する実験および解析

Analytical Test Studies on the Structural Behavior of Loop Splice Joints

中 村 定 明 ピーシー橋梁株式会社本社技術部 主任研究員 技術士（建設部門）

RC ループ継手は、プレキャストコンクリート床版の有効な接合システムの一つである。しかし、その構造特性および設計基準については、いまだ不明な点が多いのが現状である。その理由としては、RC ループ継手内部の挙動を直接測定した実験的な検討がこれまでほとんどなされなかったことによる。筆者は、この課題を解決するため、割裂ループ鉄筋を用いた引張試験を考案し、RC ループ継手に発生する支圧力を直接測定することに成功した。本研究では、三次元非線形 FEM 解析を実施し、割裂ループ鉄筋の試験結果との比較を行うことで、RC ループ継手内部にどのような現象が生じているかを解析的にも検証している。実験結果および数値解析結果は、RC ループ継手の重要な幾つかの挙動を明らかにした。

The RC loop splice joint is one of the most effective joint systems for precast concrete slab. However, the structural behavior and design criteria are not distinct. The tensile strength tests using reinforcing bars with buried strain gauges have been carried out. Through the experiment, important structural behaviors, such as steel strain distribution and bearing force, of the joint system were revealed. Moreover, in this study, 3D non-linear FEM analysis was conducted and compared with the experimental results. Some important factors to determine the structural behavior of the joint were identified through the analysis.

1. 緒 言

近年、車両の大型化や交通量の増大によって既設道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版と呼ぶ）の損傷事例が報告されている。損傷を受けた RC 床版の補修・補強工法の一つにプレキャスト床版による床版取換工法が考えられる。プレキャスト床版による取換工法は、施工中の車線に対して部分的な交通開放が可能で、場所打ち施工に比べて工期が短くできるなどの利点が多く、今後ますます増加していくことが予想される。プレキャスト床版では、床版構造の弱点となりやすい接合部を合理的に設計・施工することが重要になる。特に、プレキャスト床版間の接合は現場施工となり、交通開放を行いながらの施工では急速施工が要求される。この観点から、プレキャスト床版の接合部は、可能な限り小さくすることが望まれる。RC ループ継手（以下、ループ継手と呼ぶ）は、直線部の付着力と曲線部の支圧力で鉄筋からの引張力をコンクリートに伝えるため、一般の重ね継手より継手長さを短くすることができる。しかし、現状ではループ継手の合理的な設計に関する明確な規定はほとんどない。筆者は、ループ継手の合理的設計法を提案するため、半割りしたループ鉄筋内部にひずみゲージを貼付けた割裂ループ鉄筋を用いたループ継手供試体の引張試験から、ループ継手に作用する支圧力を求め、

重ね継手長さの影響についての検討を行った⁽¹⁾。

さらに、本稿ではループ継手部の力学的挙動を三次元非線形 FEM 解析を用いてシミュレーションした実験結果の検証と、今後パラメータ解析を実施するための解析モデルについて検討したことを述べる。

2. RC ループ継手の力学的挙動に関する実験的検討

2.1 概 要

海外におけるループ鉄筋の設計基準としては、ドイツの DIN1045 がある。この基準のなかで、ループ継手は重ね継手部分の付着力と曲線部分の支圧力の両方で鉄筋から伝達される引張力に抵抗するため、重ね継手長さを短くできると説明している。しかし、DIN1045 においても、この支圧力の大きさを規定する項目はなく、ループ鉄筋の重ね継手長さの項目に支圧力の有効性を認めていない⁽²⁾。ここでは、ループ継手の支圧力を直接求めるために、筆者が実施した割裂ループ鉄筋によるループ継手の引張試験結果について報告する。

2.2 実験方法

(1) 使用材料の力学的性質

試験供試体（以下、供試体と呼ぶ）に使用したコンクリートの圧縮強度の目標値は、載荷試験時で

40 N/mm²とした。第1表に載荷試験時(材齢5日)のコンクリートの強度試験結果を示す。

鉄筋はSD345とし、ループ鉄筋には呼び名D19、配力鉄筋には呼び名D16のものをを用いた。鉄筋の実断面積は、長さ重量を測定し断面積を計算によって求めた。割裂ループ鉄筋は、鉄筋内部に溝加工を施したため、実断面積は258.1 mm²であった。鉄筋の引張試験結果を第2表に、割裂ループ鉄筋とひずみゲージの貼付状況を第1図に示す。

(2) 試験要因

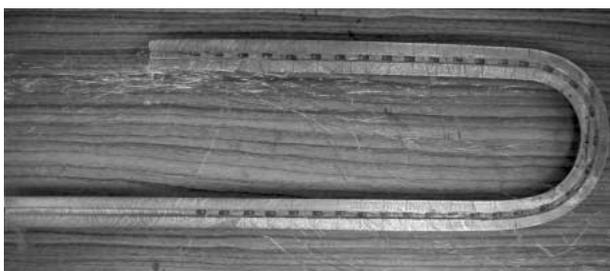
第3表に試験要因の組合せを示す。ループ継手の基本ケースとして、ループ継手はD19を4本、重ね継手長さ300 mm、継手間隔75 mm および配力鉄筋量

第1表 コンクリートの強度試験結果
Table 1 Results of hardened concrete

供試体数	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
18	—	2.89	29.5
36	44.0	—	—

第2表 鉄筋の引張試験結果
Table 2 Results of tensile test of reinforcement

呼び名	公称断面積 (mm ²)	実断面積 (mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D19	286.5	273.7	383.8	557.2	195
D16	198.6	191.4	387.3	561.8	194



第1図 割裂ループ鉄筋とひずみゲージ
Fig. 1 Loop type reinforcing bar with buried strain gauges

第3表 試験要因の組合せ
Table 3 Combination of experiment factor

ケース	供試体番号	重ね継手長さ a (mm)	継手間隔 b (mm)	配力鉄筋量 c
1	300-75-6	300	75	D16 - 6本
2	200-75-6	200	75	D16 - 6本
3	150-75-2	150	75	D16 - 2本

はD16を6本とした。ケース2は、重ね継手長さを200 mm、ケース3は重ね継手長さを150 mmとしたケースである。ただし、ケース3はループ内の重ね継手長さが短く、配力鉄筋を6本配置できないため、2本とした。

(3) 供試体

第2図に、基本ケースの供試体300-75-6の寸法を示す。供試体の厚さは床版をイメージし、ループ鉄筋の最小曲げ直径($d_{min} = 4, \phi = 80 \text{ mm}$, ϕ :鉄筋の公称直径)およびかぶり30 mmを確保するため180 mmとした。供試体端部からループ鉄筋端部までの距離は、鉄筋応力度140 N/mm²に対して、最大ひび割れ幅以上となるように定めた。この値は三浦、瀬本の研究結果⁽³⁾を参照し、鉄筋比4.1%の鉄筋コンクリート部材に対して計算したもので、280 mmとした。ほかの供試体については、重ね継手長さを変化させたが、ほかの条件は同一とした。

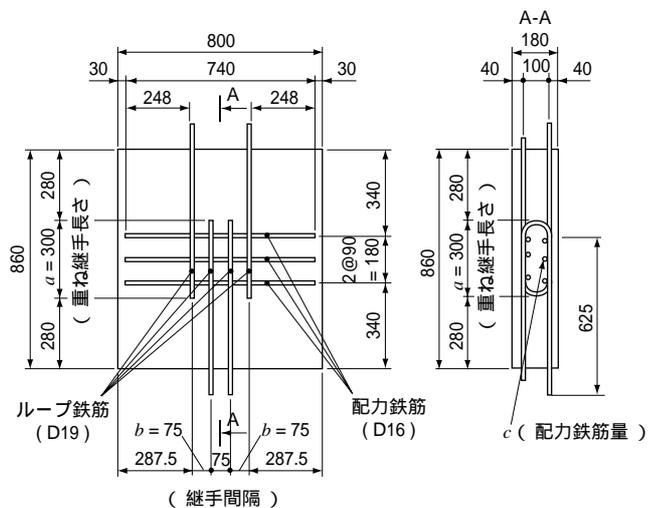
(4) 試験方法

載荷フレームおよび載荷装置を第3図に示す。載荷は載荷フレーム上端に設置した500 kN用セントホールジャッキを用い載荷ジグを介して、供試体端部のループ鉄筋を緊張して引張力を与えた。荷重ステップは5 kNとし、引張鉄筋が降伏強度に達するか、ループ継手のコンクリートがはく落して耐力低下を生じるまで漸増載荷を行った。

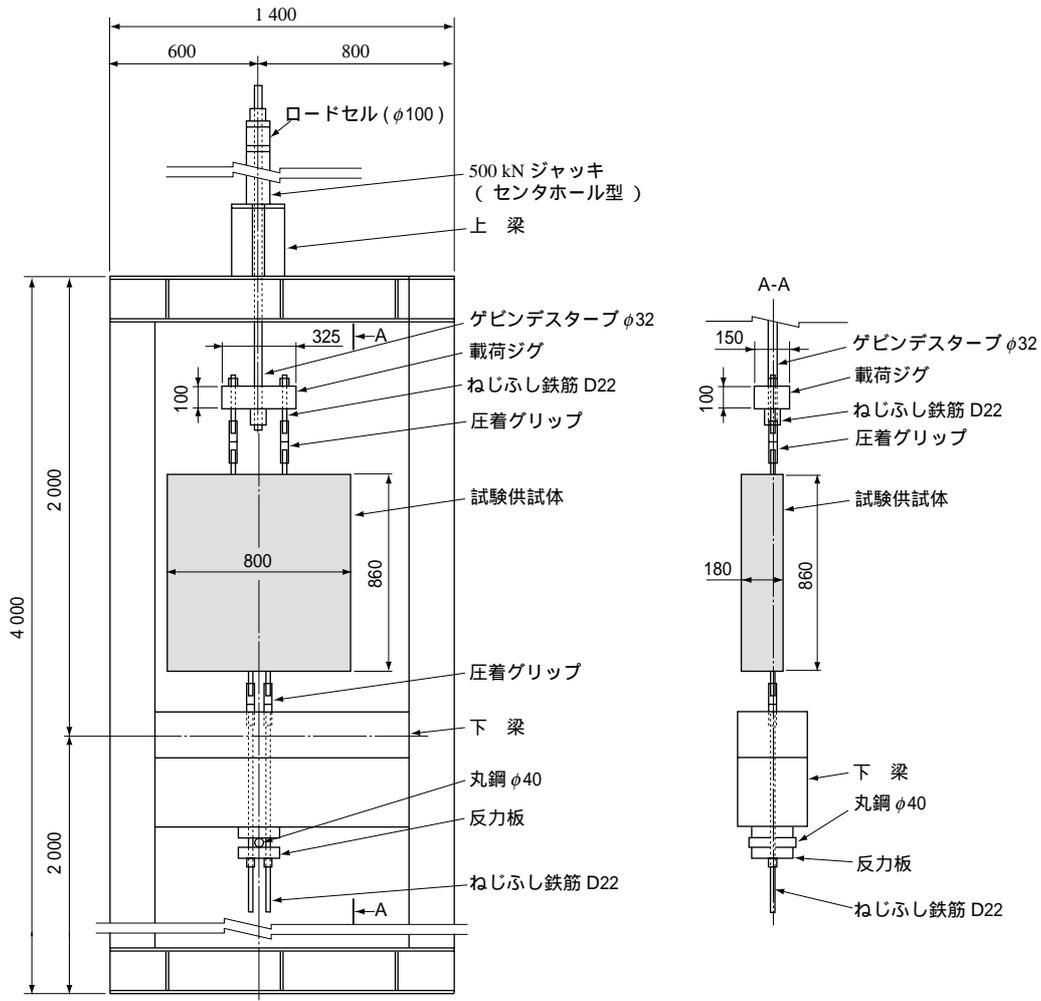
2.3 破壊形式および破壊荷重

(1) 破壊形式

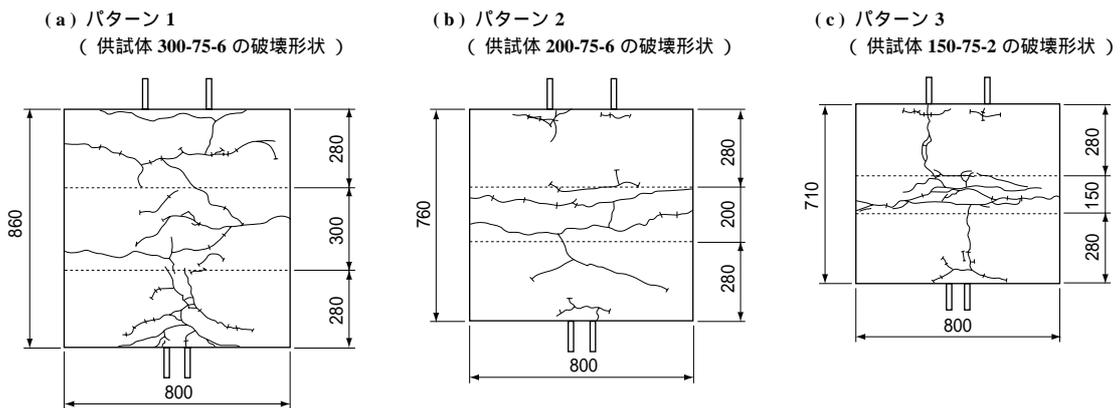
各供試体の破壊性状を第4図に、破壊荷重および破



第2図 供試体寸法(供試体300-75-6)(単位:mm)
Fig. 2 Dimensions of the specimen (Type 300-75-6) (unit: mm)



第3図 载荷フレームおよび载荷装置 (単位: mm)
 Fig. 3 Frame and devices for the loading test (unit: mm)



第4図 各供試体の破壊形状 (単位: mm)
 Fig. 4 Failure mode of the specimens (unit: mm)

壊形式を第4表に示す。破壊形状は、三つのパターンに分けられる。

パターン1は、供試体 300-75-6 のケース (第4図 - (a)) で、载荷荷重 165 kN でループ継手外側に水平方向のひび割れが発生した。その後、荷重の増加と

ともにひび割れ幅が増加するがループ継手の耐力は維持され、最終的に引張鉄筋が降伏に至るケースである。鉄筋の降伏直前のひび割れ幅は、約 0.5 mm であった。

パターン2は、供試体 200-75-6 のケース (第4図 - (b)) で、载荷荷重 150 kN でパターン1より明

第4表 破壊荷重および破壊形式
Table 4 Ultimate load and failure modes

供試体番号	破壊荷重		破壊形式
	1体目 (kN)	2体目 (kN)	
300-75-6	(177.4)	209.9	パターン1
200-75-6	(171.4)	195.4	パターン2
150-75-2	136.5	156.0	パターン3

(注) () は参考値を示す

らかに大きなひび割れ(幅1mm程度)が発生した。荷重増加によるひび割れ幅の増加速度もパターン1より大きい。ループ継手の耐力は維持され、最終的には引張鉄筋が降伏に至るケースである。鉄筋の降伏直前のひび割れ幅は1.4mmに達していた。

パターン3は、供試体150-75-2のケース(第4図(c))で、載荷荷重155kN(1体目は135kN)でループ継手内に、幅1.2mm以上のひび割れが発生し、その後荷重増加はなく、かぶりコンクリートがはく落して破壊に至った。

(2) 破壊荷重

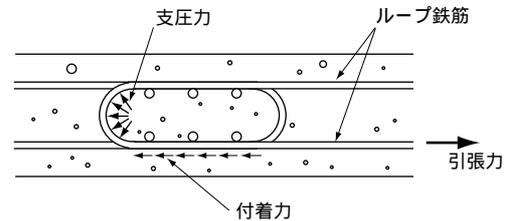
第4表に各供試体の破壊荷重を示す。表中の()は、供試体が破壊荷重に達する前に除荷したため参考値とした。計算上の降伏荷重は、第2表の鉄筋の引張試験結果から、 $P_y = \sigma_{sy} \times A_s \times 2 = 198 \text{ kN}$ である(σ_{sy} :鉄筋の降伏応力度, A_s :割裂ループ鉄筋の実断面積(258.1 mm²))。

重ね継手長さが300mmおよび200mmの供試体は、引張鉄筋が降伏応力に達したのに対し、重ね継手長さが150mmの供試体は引張鉄筋が降伏前にループ継手内のコンクリートが完全にはく離して破壊した。

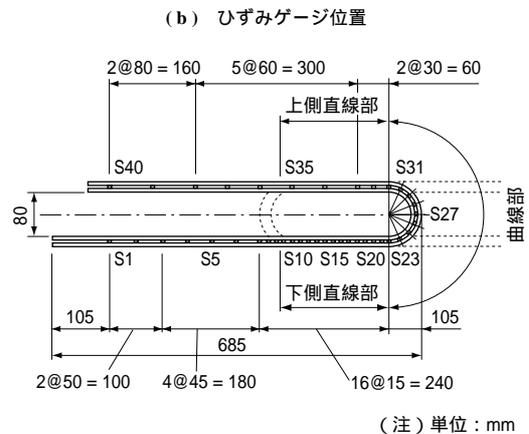
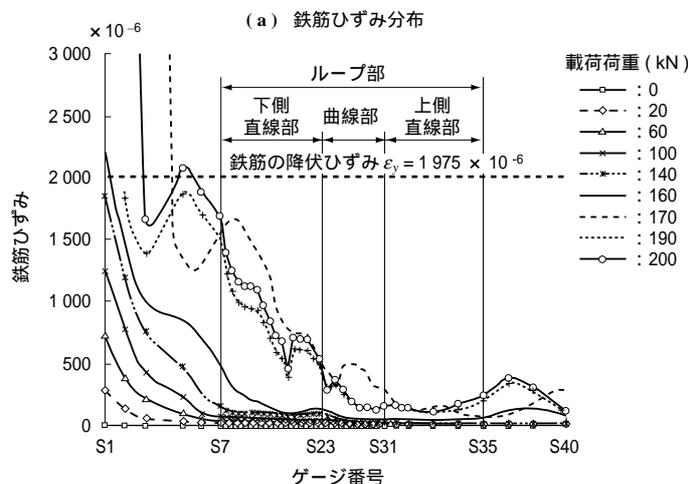
この理由としては、第5図に示すように、ループ継手に作用する力は、重ね継手部の付着力と曲線部の支圧力で、重ね継手長さが十分長い場合は付着力が大きい。そのため支圧力が小さい。しかし、重ね継手長さが短い場合は支圧力が大きくループ継手内部のコンクリートに応力集中が生じ、その箇所のコンクリートが圧壊して鉄筋の定着が不十分となり、破壊に至ると考えられる。したがって、本実験結果からは、継手長さ200mm以下の場合は、引張鉄筋の降伏前にループ継手部分が破壊に至ることも考えられ、設計的な配慮を必要とする。

2.4 鉄筋ひずみ分布

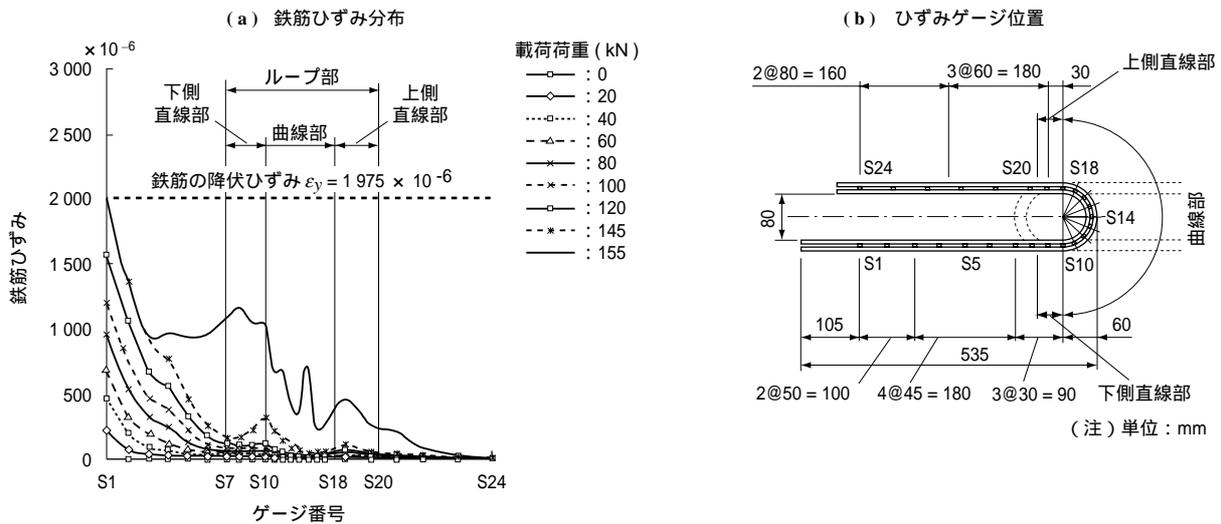
第6図および第7図に重ね継手長さ300mmと150mmの各荷重状態における割裂ループ鉄筋のひずみ分布を示す。これらの図から明らかなように、供試体300-75-6(第6図)は、載荷荷重200kNでも直線部の付着力によって曲線部曲げ上げ点での鉄筋ひずみは 500×10^{-6} 以下である。一方、供試体150-75-2(第7図)は、載荷荷重155kN時で、曲線部曲げ上げ点において 1000×10^{-6} 程度の鉄筋ひずみが計測された。これらから、明らかに重ね継手長さが短い場合、高い支圧力が発生することが確認された。



第5図 ループ継手の破壊機構
Fig. 5 Failure mechanism of RC loop splice



第6図 鉄筋ひずみ分布(供試体300-75-6)
Fig. 6 Strain distribution of reinforcement (specimen 300-75-6)



第 7 図 鉄筋ひずみ分布 (供試体 150-75-2)
 Fig. 7 Strain distribution of reinforcement (specimen 150-75-2)

2.5 支圧力の計算

割裂ループ鉄筋のひずみ分布から曲線部に作用する支圧力の算出式を次に示す .

$$P_b = (\varepsilon_{s1} + \varepsilon_{s2}) \times E_s \times A_s \times 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

P_b : ループ鉄筋 2 本当たりの支圧力で , 内側ループおよび外側ループの平均値 (kN)

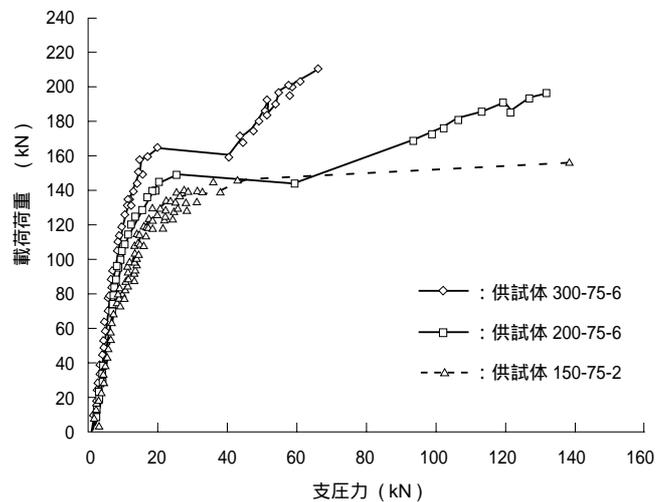
ε_{s1} : 曲線部の曲げ上げ位置での鉄筋ひずみの測定値で , 内側および外側ループ鉄筋の平均値 (第 6 図のゲージ番号 S23)

ε_{s2} : 曲線部の終点位置での鉄筋ひずみの測定値で , 内側および外側ループ鉄筋の平均値 (第 6 図のゲージ番号 S31)

E_s : 割裂ループ鉄筋のヤング係数 (kN/mm²)

A_s : 割裂ループ鉄筋の実断面積 (mm²)

第 8 図に (1) 式で求めた載荷荷重と支圧力との関係を示す . 各供試体とも 150 kN から 160 kN 付近で支圧力が急激に増加する . これは , 150 kN 付近でループ継手部にひび割れが生じたため , 曲線部の鉄筋応力度が増加し , 支圧力の増加が生じたと考えられる . ひび割れ発生後 , 重ね継手長さの短い供試体ほど支圧力の増加が大きく , 供試体 150-75-2 では , 載荷荷重約 160 kN に対して , 支圧力が 140 kN にも達している . 一方 , 供試体 300-75-6 では , 載荷荷重 210 kN に対して , 支圧力は約 70 kN であった . このように , 重ね継手長さが短い供試体では , ループ継手部



第 8 図 載荷荷重と支圧力の関係
 Fig. 8 Relationship between loading and bearing force at the RC loop reinforcement

のひび割れ発生とほぼ同時に支圧力によるコンクリートの応力集中による圧壊が生じ , 鉄筋の定着が不十分となったため破壊に至ったものと考えられる .

3. 三次元非線形 FEM 解析による数値解析

3.1 概要

ループ継手の力学的挙動を三次元非線形 FEM 解析を用いてシミュレーションし , 実験結果と比較することで解析モデルの検証および今後の課題について検討する .

3.2 解析モデル

3.2.1 解析条件

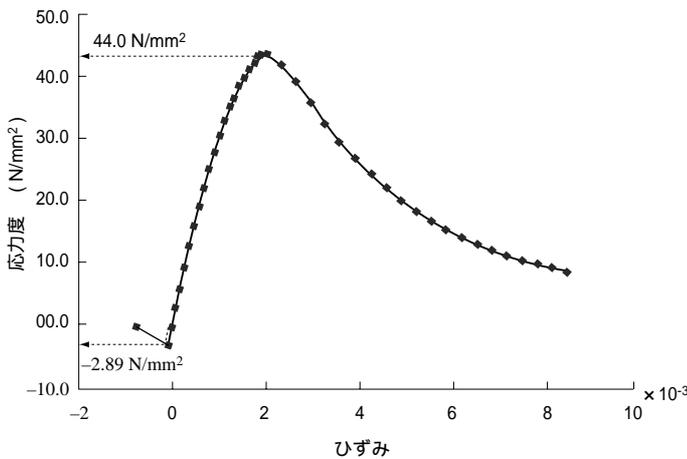
本解析では , 三次元非線形 FEM 解析プログラム「ADINA」を使用した . 主な解析条件を以下に示す .

- (1) コンクリート要素には 8 節点三次元ソリッド要素を使用する。
- (2) コンクリートの破壊条件に Kupfer モデルを使用する。
- (3) ひび割れモデルに分布ひび割れモデルを使用する。
- (4) コンクリートの 1 軸応力状態における応力ひずみ関係を第 9 図に示す。また、使用したコンクリートの特性値を以下に示す。

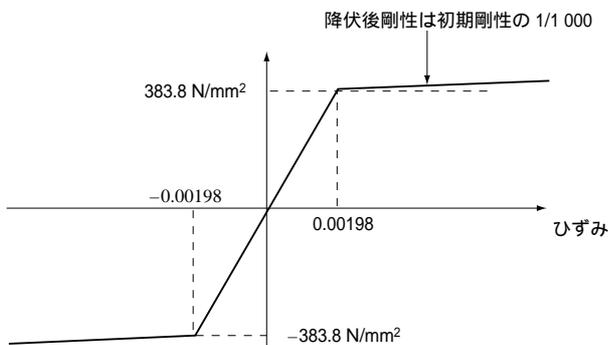
圧縮強度	$f'_{ck} = 44.0 \text{ N/mm}^2$
ヤング係数	$E_c = 29.5 \text{ kN/mm}^2$
引張強度	$f_t = 2.89 \text{ N/mm}^2$
ひび割れ時のひずみ	$\epsilon_t = 98 \times 10^{-6}$
引張軟化特性	$\epsilon_y \times 8.0 = 784 \times 10^{-6}$

- (5) 鉄筋の応力ひずみ関係を第 10 図に示す。また、使用した鉄筋の特性値を以下に示す。

引張強度	$f_t = 383.8 \text{ N/mm}^2$
ヤング係数	$E_c = 195.0 \text{ kN/mm}^2$
降伏時ひずみ	$\epsilon_y = 0.001975$
実断面積	$A = 258.1 \text{ mm}^2$



第 9 図 コンクリートの応力ひずみ関係
Fig. 9 Stress-strain relationship of concrete



第 10 図 鉄筋の応力ひずみ関係
Fig. 10 Stress-strain relationship of reinforcement

- (6) 鉄筋とコンクリートの付着特性は三浦、瀬本の研究成果⁽³⁾を参照して、第 11 図に示す関係を用いた。

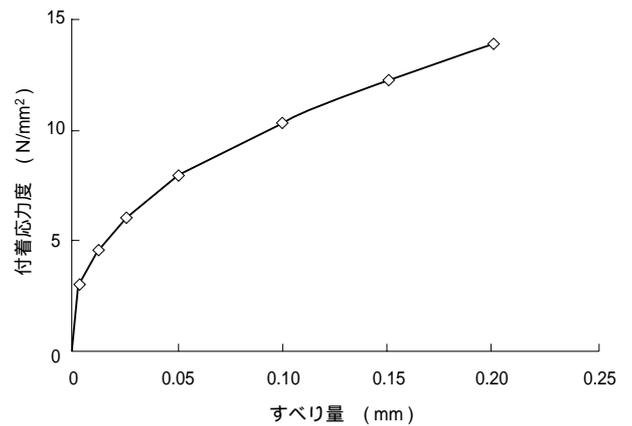
3.2.2 解析モデル図

第 12 図に代表的な供試体 300-75-6 の解析モデルを示す。解析モデルは、対象性を考慮して 1/2 モデルとした。外側ループ鉄筋の端部を固定し、内側ループ鉄筋に引張荷重を与えた。

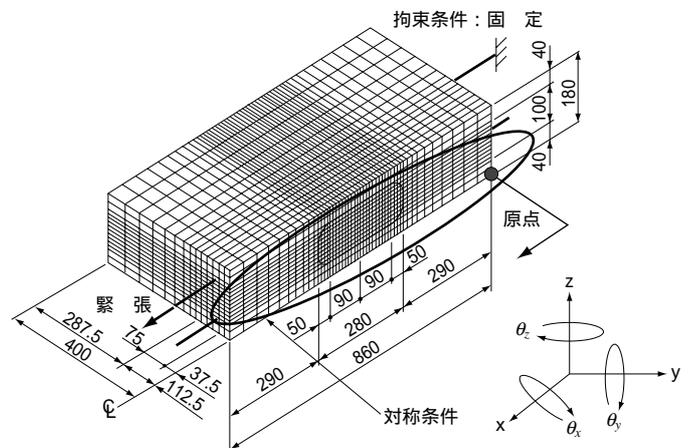
3.3 解析結果および考察

- (1) コンクリートひずみ分布

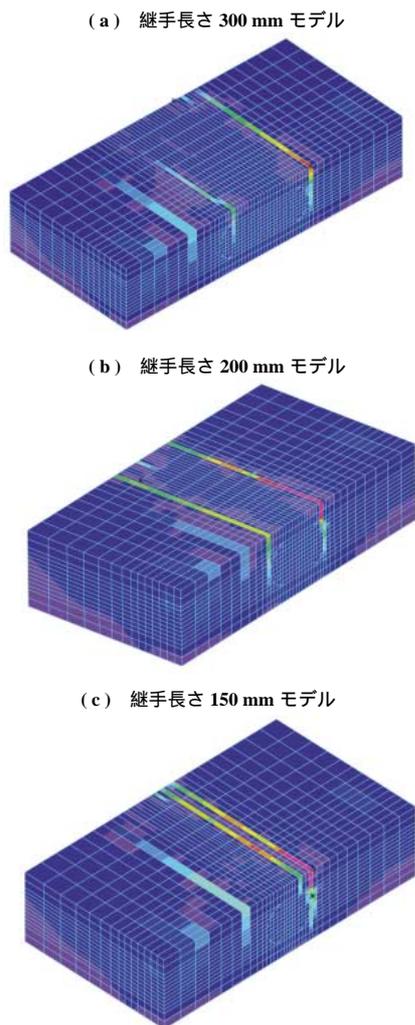
第 13 図に載荷荷重 220 kN 時での各供試体のコンクリート表面のひずみ分布を、第 14 図に各荷重状態でのコンクリート内部のひずみ分布を示す。ここで、コンクリート端部からの距離は、第 12 図に示す原点側のコンクリート端面からの水平距離を表す。第 13 図に見られるように、すべての供試体ともループ継手内に大きな引張ひずみが生じるが、重ね継手長さ 300 mm のモデル (第 13 図 - (a)) は重ね継手の端部に引張



第 11 図 鉄筋とコンクリートの付着特性
Fig. 11 Property of bond stress between reinforcement and concrete



第 12 図 解析モデル (継手長さ 300 mm モデル) (単位: mm)
Fig. 12 Analytical model of RC loop specimen (Specimen type with splice length of 300 mm) (unit: mm)



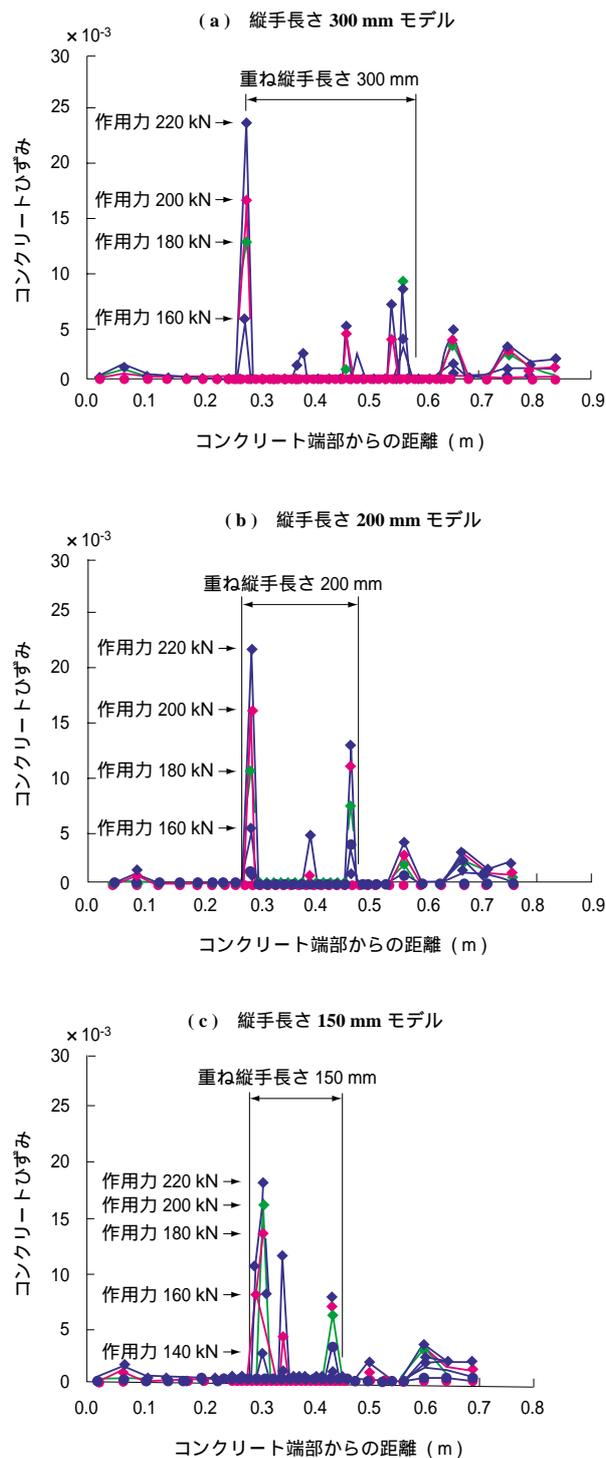
第 13 図 コンクリート表面のひずみ分布
Fig. 13 Strain distribution of surface of concrete

ひずみが集中しているのに対し、重ね継手長さ 150 mm のモデル (第 13 図 - (c)) はループ継手内部にも大きな引張ひずみが発生している。また、第 14 図に示されているように、ループ継手端部に発生する引張ひずみは、約 160 kN 付近で生じており、実験で確認されたひび割れ発生荷重と近い値であった。さらに、重ね継手長さが短いほど、同一荷重での引張ひずみの値は大きい。

第 15 図は、継手長さ 150 mm のループ継手内部のコンクリート内部のひずみ分布を示す。この図から、重ね継手長さが 150 mm では、曲線部の支圧力によるコンクリートの応力集中でコンクリートが局部的に圧縮ひずみに達していることが解析上からも確認された。

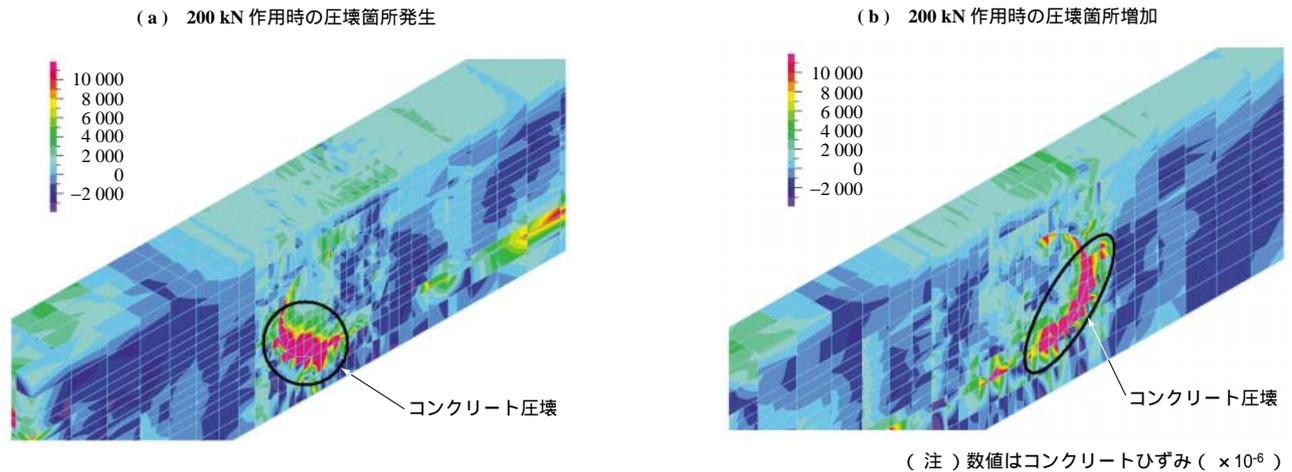
(2) 鉄筋のすべり量

ループ継手曲線部の応力集中によってコンクリートが圧縮強度に達するとループ鉄筋の定着が不十分となり、鉄筋のすべりが生じる。第 16 図に各荷重状態に

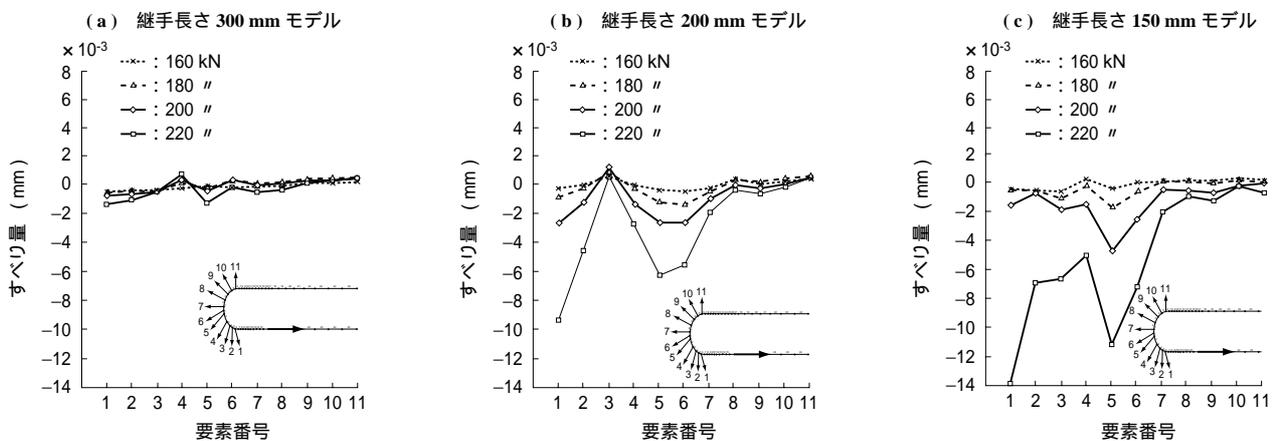


第 14 図 コンクリート内部のひずみ分布
Fig. 14 Strain distribution inside concrete

おけるループ鉄筋のすべり量を示す。この図から明らかのように、重ね継手長さが 300 mm の解析モデル (第 16 図 - (a)) では、曲線部にほとんどすべりが発生していないが、重ね継手長さが短くなる程すべり量が大きくなっている。このループ鉄筋のすべり量がループ継手の破壊荷重と密接に関連していると考えられるが、現状では、このすべり量とループ継手の破壊と



第 15 図 コンクリート内部のひずみ分布 (継手長さ150 mmモデル)
 Fig. 15 Strain distribution inside concrete (Specimen type with splice length of 150 mm)



第 16 図 ループ鉄筋のすべり量
 Fig. 16 Amount of slip at the loop reinforcement

の関係を定量的に求めるに至っていないため、今後の課題である。

3.4 実験値との比較

(1) ひび割れ発生荷重

第 14 図から、継手長さ 300 mm では作用力 160 kN で、継手長さ 150 mm では 140 kN で、ループ継手内のコンクリートに引張ひずみの発生が見られる。さらに、継手長さ 300 mm では作用力が 160 kN から 180 kN に増加する際に、大きなひずみの増加が見られる。ループ継手内のひび割れは、この荷重付近で入ったものと考えられる。同様に、継手長さ 200 mm では 160 kN から 180 kN、継手長さ 150 mm では 140 kN から 160 kN の間にひび割れ発生が考えられる。これは、第 6 図および第 7 図に示した実験結果から得られたひずみ分布と同様な結果を示しており、ひび割れ発生荷重については、FEM 解析は実験結果を比較的精度良

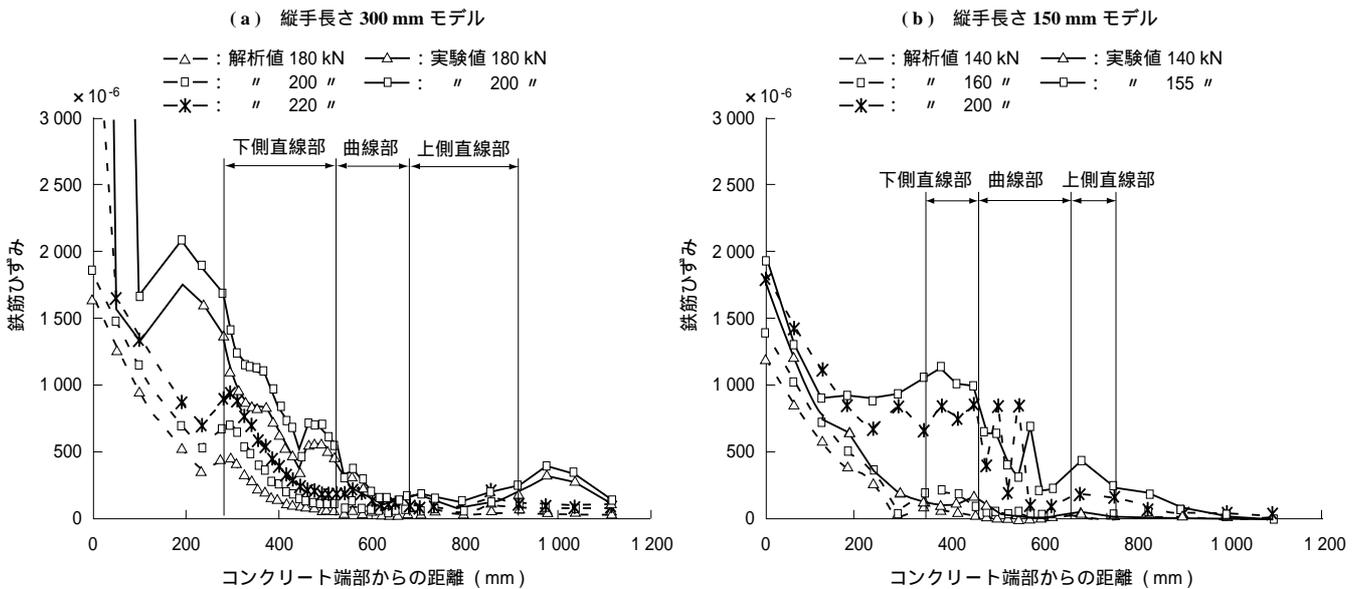
く表している。

(2) 破壊荷重および破壊性状について

今回の数値解析結果では、継手長さ 150 mm の場合も載荷荷重 200 kN で、引張鉄筋が降伏して破壊に至る結果となり、継手長さの違いによる破壊形式の変化を表現することができなかった。この原因については、まだ説明されておらず引き続き検討中である。さまざまな原因が考えられるが、今回の数値解析では、ひび割れ発生後の付着モデル ループ継手内のコンクリート圧壊後のモデル、については考慮しておらず、今後これらの要因による影響について検討する。

(3) 鉄筋ひずみについて

第 17 図に継手長さ 300 mm および 150 mm の実験値と解析値との鉄筋ひずみの比較を示す。これらの図から、実験値と解析値のひずみ分布は、ほぼ同様な傾向を示すものの、同一発生ひずみ状態での載荷荷重は、



第 17 図 実験値と解析値との鉄筋ひずみの比較
 Fig. 17 Comparison of strain of reinforcement between experiments and analyses

実験値の方が解析値より明らかに大きな値を示す．この原因として、先に述べたように現状の解析モデルは、ループ継手の終局状態に対して正確にモデル化ができていないためと考える．このため、コンクリートとループ継手との付着モデルを含めた検討が必要であり、これらについては今後の課題である．

4. 結 言

ループ継手の力学的挙動を明らかにすることを目的として、割裂ループ鉄筋を用いた実験的検討および三次元非線形 FEM 解析を用いて検討した．得られた知見を以下に示す．

- (1) ループ継手の破壊性状は、重ね継手長さによって異なる．重ね継手長さが 200 mm 以下では引張鉄筋の降伏より前にループ継手部の破壊が生じる可能性があるため、設計的な配慮が必要である．
- (2) 重ね継手長さの短いループ継手は、曲線部の支圧力が大きくなりコンクリートの圧壊によって、ループ継手の定着が不足し、破壊に至ることが分かった．継手長さ 150 mm の供試体では、支圧力が全荷重の 90 % 近くに至ることも分かった．
- (3) 解析結果は、継手長さが短いモデルでは、ループ継手内部にも大きなコンクリートひずみの発生がある

ことを示した．ひび割れ発生荷重の解析値は、ほぼ実験値に近い値であった．また、継手長さが 150 mm のモデルでは、継手内部のコンクリートが圧縮強度に達しており、この部分の鉄筋の定着が不十分となり破壊に至るモードをシミュレーションできた．継手長さが短いモデルでは、ループ継手曲線部で、大きなすべり量が認められた．今後、このすべり量と破壊との関係を定量的に定める必要があると考えられる．

- (4) 解析値と実験値との比較では、破壊性状および鉄筋ひずみ分布において、整合しない部分が認められる．今後、解析精度を向上させるため、誤差原因についてさらなる調査検討が必要である．

参 考 文 献

- (1) 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 投稿中 2004 年 8 月 (予定)
- (2) Fritz Leonhardt, Eduard Monnig, 横道英雄 (監訳): 鉄筋コンクリートの配筋 鹿島出版会 1985 年 4 月
- (3) 三浦 尚, 瀬本浩史: RC 及び SRC 部材に発生する最大ひび割れ幅に関する研究 コンクリート工学 年次論文報告集 1989 年 6 月 pp.165 - 170