

はり部材におけるループ継手の破壊性状に関する実験的研究

北海道大学大学院工学研究科 学生会員 工学士 ○ 早田 光孝
 北海道大学大学院工学研究科 正 会 員 博士(工学) 古内 仁
 ドーピー建設工業(株) 正 会 員 博士(工学) 今村 晃久
 ドーピー建設工業(株) 正 会 員 工学博士 角田與史雄

1. はじめに

鉄筋の継手としてループ状継手を用いれば、重ね継手長さを小さくできるという長所があり、プレキャスト部材の接合に比較的好く用いられている。ループ継手とは、ループ型に成形した鉄筋を重ねあわせて配置することにより、双方の鉄筋の力を伝達させるものである。このとき、ループ内のコンクリートには反力としての圧縮力が作用する。国内において、ループ継手に関する設計指針はなく、設計法が確立されていない。国外では、ドイツの DIN1085¹⁾ にループ継手の規定が設けられているが、ループとしての効果は考慮されておらず通常の半円形フック付きと同じ条件が適用されている。ループ継手はプレキャストスラブの継手としての実績が多いが、最近になって国内ではプレキャスト桁と現場打ちの桁の継手としてのループ継手を採用する事例がいくつか見られるようになった。またループ継手を打ち継目に配置することで、ループ内コンクリートに作用する腹圧力によって打ち継目のひび割れを抑制する効果が明らかにされつつある²⁾。このような背景を踏まえ、本研究では、はり部材で用いるループ継手の設計法を確立するための資料を得るため、ループの高さ、重ね長さ、鉄筋径を実験変数として、継手の破壊とその耐力を調べることとした。

2. 実験概要

ループ継手は、引張力を受ける部材においてループコア内部のコンクリートに圧縮応力が発生し引張応力を低減する効果がある。この効果に影響を与える主要因と考えられるループ継手の重ね長さ、ループ径と鉄筋径を選定し実験変数とした。既往の実験結果³⁾と併せて各供試体の実験変数を表1に示す。供試体の形状寸法は図1に示すとおりであるが、SP7

表1 実験変数

供試体名	ループ径 d_B (mm)	重ね長 L (mm)	鉄筋径 ϕ (mm)	部材高 h (mm)
SP1*	90	100	10	150
SP2*	90	200	10	150
SP3*	90	300	10	150
SP5	90	250	10	150
SP6	70	200	10	150
SP7	110	200	10	170
SP8	90	300	13	150

* 既往の実験結果

を除きすべて同一とし、高さ 150mm、幅 150mmの断面で全長 1500mmである。SP7 だけは、ループ径を大きくしたため断面高さは 170mmとした。供試体中央部にうち継ぎ目を設け、左右コンクリートの打ち込み

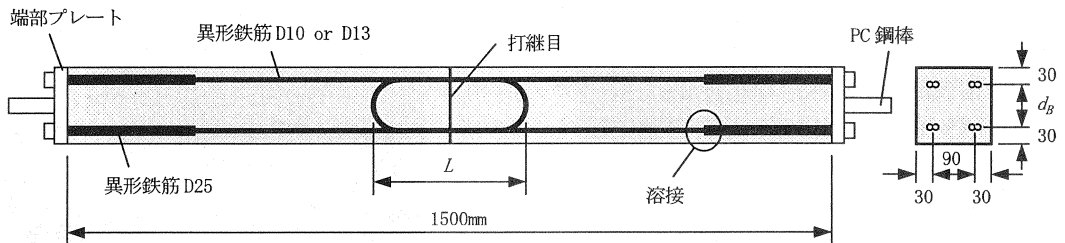


図1 供試体外観

を二回に分けて行った。左右の材齢差は1日とし、硬化遅延材を塗布して脱型後に洗い流し処理を行った。使用したコンクリートは、天然骨材(粗骨材の最大寸法は25mm)および早強ポルトランドセメントを材料として作製し、実験までに2週間の養生期間を設けることを基本とした。テスト区間の鉄筋にはSD295AのD10(実降伏強度355N/mm²)またはD13(同371N/mm²)の異形鉄筋を使用した。供試体端部ではD25鉄筋を連結して使用した。

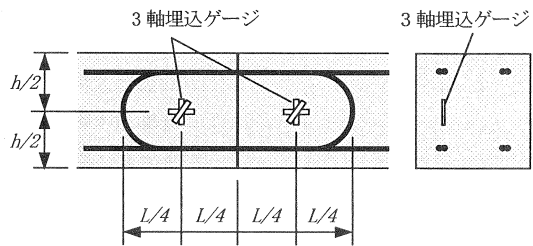


図2 ループ内部の3軸埋込ゲージ

連結の方法は、D25鉄筋に試験用鉄筋を埋め込み溶接し、この部分で破壊が生じないようにした。さらにD25鉄筋はナットで端部プレートに固定した。

ループ鉄筋内のコアコンクリートの応力状態を調べるため、図2に示すように検長30mmの3軸埋込型ゲージを2ヶ所に設置した。鉄筋には、打継目から部材端方向に向かって左右560mm区間において60mm間隔でひずみゲージを貼付した。また、鉄筋のループ部において、曲始点部にもひずみゲージを貼付した。

供試体は、一端を固定し、他端にセンターホールジャッキを取り付け、一軸の引張荷重が与えられた。荷重はロードセルを用いて計測した。

表2 実験結果

供試体名	d_b (mm)	L (mm)	ϕ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)		破壊荷重 (kN)	破壊形式
				先打ち部	後打ち部		
SP1	90	100	10	29.7	30.6	60	コンクリート圧壊
SP2	90	200	10	28.0	29.4	81	〃
SP3	90	300	10	31.7	28.4	93	鉄筋の降伏
SP5	90	250	10	22.1	23.1	85	コンクリート圧壊
SP6	70	200	10	22.1	23.1	80	〃
SP7	110	200	10	22.1	23.1	93	〃
SP8	90	300	13	22.1	23.1	125	〃

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状および破壊荷重

試験の結果を表2にまとめた。最終的な破壊モードは、SP3を除いた他の供試体はループ内のコアコンクリートの圧縮破壊であった。一例として、SP5の破壊状況を写真1に示す。SP5は、40kNでループ位置外側に最初のひび割れが発生し、荷重の増加とともにほぼ等間隔で複数本のひび割れが現れた。80kNで荷重が上がりにくくなり、84kNでループコア部の側面かぶりが外側に押し出されるように破壊に至った。SP3以外の他の供試体も基本的には同様の破壊である。SP3におけるひび割れ発生と伸展は、他の供試体と同様であったが打継目から外側15cm離れた位置のひび割れの幅が著しく増加し、最終的にはこの位置の鉄筋の降伏によって破壊に至っている。

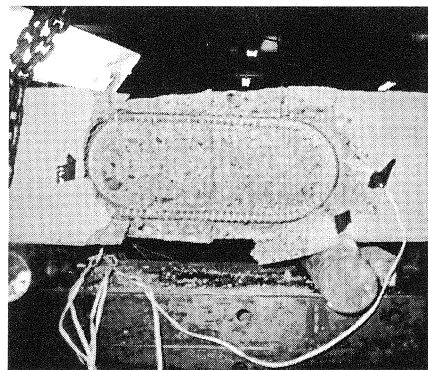


写真1 ループ継手部コンクリートの圧壊

ひび割れは、いずれの供試体も概ね等間隔に分散して発生しており、その間隔は140mm程度であった。これらのひび割れの中で開口幅が卓越してくるのは、ループ継手以外のところである。通常、打継目に引張力が作用すると、その部分のひび割れが卓越してくる場合が多いが、本供試体のようにループ継手を打継目に跨ぐように配置することで、打継目が弱点とならない効果が示されている。破壊荷重については、重ね長、ループ径および鉄筋径が大きくなると増加する傾向が示されたが、詳細については後述する。

3. 2 ループ内における腹圧力

レオンハルトは、鉄筋の定着および継手にループ形式を用いた場合、ループ内のコアコンクリートに作用する腹圧力に対して、許容値を与えて設計することを提案している⁴⁾。この場合、図3に示すようにループ鉄筋にはその両端にほぼ同じ引張力が作用することを前提としており、曲げ直径 d_B のループの内側に作用する腹圧力は近似的に次式で表している。

$$f_w = \frac{2 \cdot T}{d_B \cdot \phi} \quad (1)$$

ここに、 T : ループ両端の鉄筋の引張力

d_B : ループ径

ϕ : 鉄筋径

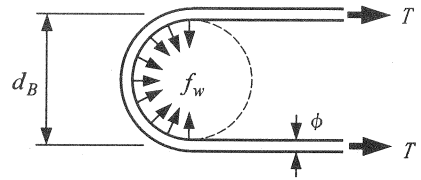


図3 ループ形式の腹圧力

すなわち、鉄筋に作用する引張力が、ループの高さと鉄筋の幅をもつコアコンクリートで抵抗しているという仮定に基づくものである。許容腹圧力は、コンクリートの圧縮強度およびループ面の相互間隔に関連づけられており、次式で表されている。

$$f_a = 0.3 \beta_{wN} \sqrt{\frac{e}{\phi}} \leq \beta_{wN} \quad (2)$$

ここに、 β_{wN} : 標準立方体圧縮強度

e : ループ面の相互間隔、もしくはコンクリート表面からループ面までの距離

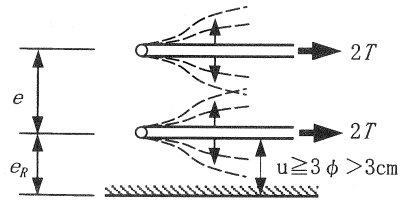


図4 横方向割裂力

また、レオンハルトは、ループ内側に線荷重のように作用する腹圧力が拡散することにより、ループ面に対し直角方向の割裂力を生じ縁端剥離の原因となることから(図4参照)、コンクリートのかぶり u を 3ϕ 以上もしくは3cm以上とすることを義務づけている。以下では、本実験供試体の腹圧力について考察を行う。

図5は、一例としてSP7におけるループ内コンクリートの主圧縮応力の変化を示したものである。主応力は、ループ内に配置された3軸埋込ゲージの実測値から弾性理論を用いて求めたが、その値が強度の1/3程度以下であるときを弾性挙動していると仮定した。また、図にはレオンハルト式による腹圧力も併せて示した。腹圧力の算定にあたっては、ループ曲がり部で実測されたひずみをもとに求められた鉄筋の引張力 T を式(1)に代入して求めた。なお、作用荷重が小さいときは、ループ鉄筋内のコンクリートに安定した圧縮力が作用していないため図から削除している。

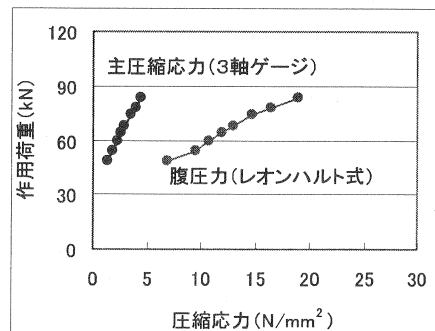


図5 ループ内コンクリート圧縮応力 (SP7)

この比較によると、実測の主圧縮応力に比べて腹圧力は見かけ上数倍の大きさとなっている。他の供試体についても同様の結果が得られており、実際には鉄筋径の数倍の大きさの幅をもつ面積で圧縮力に対して抵抗していると考えられる。そこで、式(1)における抵抗面積の幅を ϕ ではなく、 $k\phi$ に修正して書き換えることとする。

$$f_w = \frac{2 \cdot T}{d_B \cdot k \phi} \quad (3)$$

ここに、 k : 係数

k の値は、腹圧力を主圧縮応力で除してその平均値として各供試体ごとに求めた(表3参照)。ただし、SP2およびSP3は、埋込ゲージの測定不良により k を求めることはできなかった。ここでは、上式に示すようにコンクリートの抵抗断面の幅は鉄筋径 ϕ に比例すると仮定したが、その他の影響因子である L と d_B が k に与える影響については、図6および図7に示すように強い相関は見られない。したがって、圧縮力に対する抵抗断面の幅は ϕ のみによって決定づけられることとし、 k の値は全供試体の平均値4.316(図中の破線)を与えることとした。

3.3 破壊時の腹圧力

前節では、コンクリートが弾性挙動していると見なせる範囲で、ループ内のコンクリート抵抗面積を定義した。作用する引張力が終局に近づくとき非線形性を呈するようになり抵抗する断面も局所化し小さくなってくると考えられる。しかしながら、抵抗断面の大きさの変化を予測することは非常に困難であるので、ここでは弾性状態で定義された抵抗断面の幅 $k\phi$ を終局まで保持することとして検討を進める。継手断面における力のつり合いは、図8に示すように鉄筋の全引張力と腹圧力の和が外力(作用荷重)に一致する。継手断面の鉄筋8本(継手は2列)のうち4本の引張力が腹圧力と釣り合っていると仮定しているので、外力は残り4本の鉄筋の引張力と一致する。ここで、さらに8本の鉄筋が同じ大きさの引張力を負担していると仮定すれば、実測破壊荷重から鉄筋1本あたりの引張力を求めることができる。破壊時における腹圧力は、このようにして求めた鉄筋の引張力を式(3)に代入して算定した。得られた破壊時の腹圧力を表3に示す。その結果、破壊時の腹圧力は、8から13N/mm²程度の範囲に分散しておりコンクリート圧縮強度の26%から60%の大きさとなった。これは、コンクリートの

表3 kの試算結果

供試体名	d_B (mm)	L (mm)	ϕ (mm)	k	破壊時腹圧力 (N/mm ²)
SP1	90	100	10	3.45	7.723
SP5	90	250	10	5.63	10.94
SP6	70	200	10	4.14	13.24
SP7	110	200	10	4.54	9.794
SP8	90	300	13	3.82	12.38

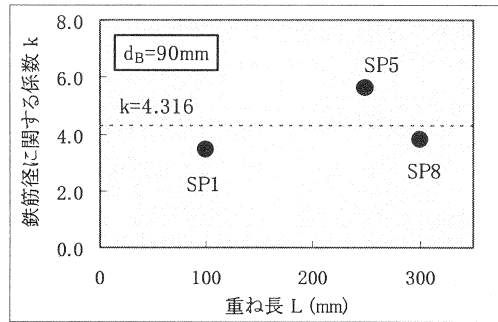


図6 重ね長Lとkの関係

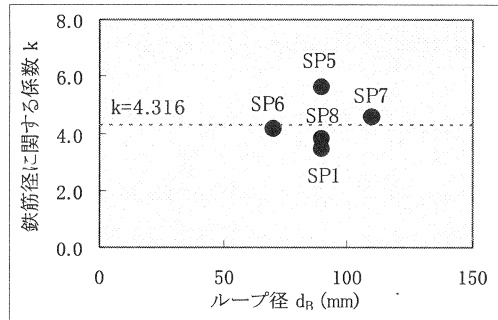


図7 ループ径 d_B とkの関係

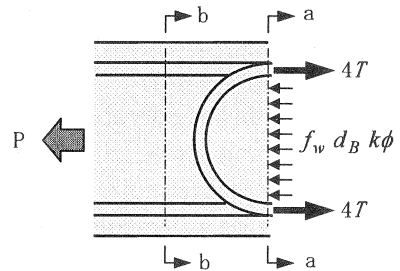


図8 ループ継手部の力のつり合い

抵抗面積の幅として弾性時のものを用いているため、実際の限界応力よりも小さく見積もっているものと思われる。

ここでは導かれた見かけ上の破壊時の腹圧力を限界腹圧力 f_{wu} と定義し、パラメータごとに比較した結果を図9から図11に示す。なお、図の縦軸は、限界腹圧力とコンクリートの圧縮強度との比をとり正規化した。これは、ループ内のコンクリートの破壊が支圧力によるものと考え、圧縮強度と直接関連づけるのが妥当であると判断したためである。先ず、図9に見られるように、重ね長 L は限界腹圧力に対して影響が強く、 L の増加に伴って f_{wu} は緩やかに増加する傾向がある。近似的には、 f_{wu} は L の0.70乗に比例する関係と見なすことができる。図10は鉄筋径 ϕ と f_{wu} の関係 (f_{wu} は L の影響を排除するため $L^{0.70}$ で除している) を示したものであるが、 ϕ が f_{wu} に与える影響は見られない。ループ径 d_B の影響については、図11に示すとおりであるが、 d_B が小さい方が f_{wu} は大きくなる傾向が示されている。両者を反比例に近い関係と見なし、近似式を導くと f_{wu} は d_B の-0.72乗に比例する関係が与えられる。したがって、限界腹圧力は次式のように定義することとした。

$$f_{wu} / f_c' = 0.286 \cdot L^{0.70} \cdot d_B^{-0.72} \quad (4)$$

ここに、 f_{wu} : 限界腹圧力 (N/mm²)

3.4 破壊荷重の検証

以上の考察から、ループ内のコンクリートが圧壊するときの鉄筋の引張力を定義することができる。鉄筋の引張力は、式(3)の腹圧力を限界腹圧力に置き換えて、次式のように表すことができる。

$$T_{bu} = \frac{f_{wu} \cdot d_B \cdot k\phi}{2} \quad (5)$$

ここに、 T_{bu} : ループ内のコンクリートが圧壊するときの鉄筋1本あたりの引張力

ここで、実測値が使われていないSP2およびSP3を含めて、各供試体の破壊荷重の検証を行うこととする。ただし、破壊荷重の推定には、ループ内のコンクリートが圧壊する場合には図8における断面a-aにおいて、鉄筋が降伏する場合には断面b-bにおいて破壊するものとし、いずれも破壊荷重が鉄筋4本分と釣り合うと仮定した。

図12は、重ね長に対する破壊荷重の試算結果を示したものである。図中の実線が、ループ内コンクリートの圧壊に対する破壊荷重で、点線が鉄筋降伏型の破壊荷重を表している。図に見られるように、コンクリート圧壊型の破壊荷重は、重ね長が大きくなるにつれて緩やかに増加する傾向が示され、SP3を除く供試体の実測値はほぼ計算値に沿って分布している。SP3は鉄

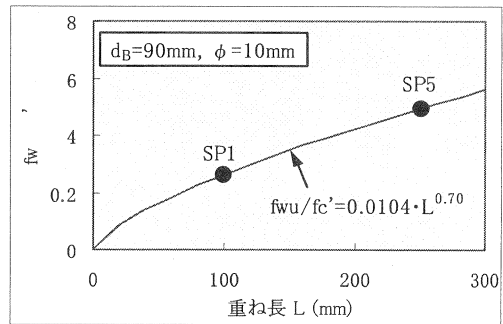


図9 限界腹圧力と重ね長の関係

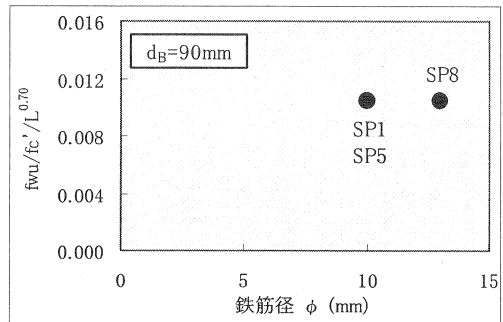


図10 限界腹圧力と鉄筋径の関係

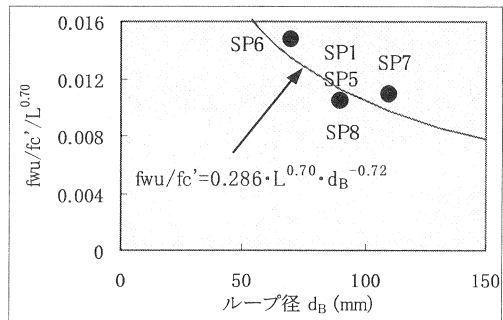


図11 限界腹圧力とループ径の関係

筋降伏型の破壊であるが、その耐力は計算上の鉄筋降伏耐力と一致している。この結果から、重ね長が小さい場合はコンクリートの圧壊により破壊し、ある程度以上の大きになると鉄筋降伏型の破壊に移行する。

図13は、ループ径に対する破壊荷重の試算結果を示したものである。ループ径が極端に小さい場合には耐力が小さく、ループ径がある程度の大きさでなければ破壊に対する抵抗が得られない。一方でループ径を大きくしていった場合には、重ね長が耐力に与えるほどの効果は期待できないようである。

図14は、鉄筋径に対する破壊荷重の試算結果を示したものである。上記2例に比べて、破壊荷重に対する鉄筋径の影響は大きく、両者は完全な線形の関係にある。ただし、降伏耐力は鉄筋径の二乗に比例するため、鉄筋径が小さいときは降伏先行の破壊であり、ある程度の大きさからコンクリート圧壊型の破壊に移行することとなる。SP3は、試算上においても降伏先行の破壊として得られている。

以上の試算から、本手法は全体的に良い推定値を与えることが確かめられた。しかしながら、実験変数の変動が小さい中での取りまとめであるので、変数（とくにループ径、鉄筋径）を広く変化させた実験を行う必要がある。

4. まとめ

本研究の実験から得られた知見を以下に列記する。

- 1) ループ径、重ね長および鉄筋径が大きくなるにつれて、ループ継手部コンクリートの破壊荷重は増加することが実験により確かめられた。
- 2) ループ継手部のコンクリートの破壊をループ内に作用する腹圧力に起因すると仮定し、レオンハルトのモデルの拡張を試みた。この場合、コアコンクリートの抵抗幅は鉄筋径の4倍程度であることが明らかとなった。
- 3) 本研究の実験の範囲内で限界腹圧力を定義し、ループ継手部コンクリートが破壊するときの耐力を推定する手法を提案した。

参考文献

- 1) DIN 1045 : Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung -, 1988
- 2) 今村晃久: PC中空床版橋の設計合理化とスプライスPC構造の実用化に関する研究, 北海道大学学位論文, 2001
- 3) 佐倉圭太郎: 打継目を有するRC及びPRC部材の力学特性に関する研究, 北海道大学修士論文, 2003
- 4) F. レオンハルト, E. メニッヒ: 鉄筋コンクリートの配筋, 鹿島出版会, 1985

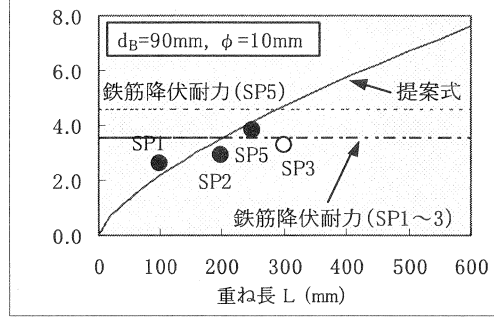


図12 破壊荷重と重ね長の関係

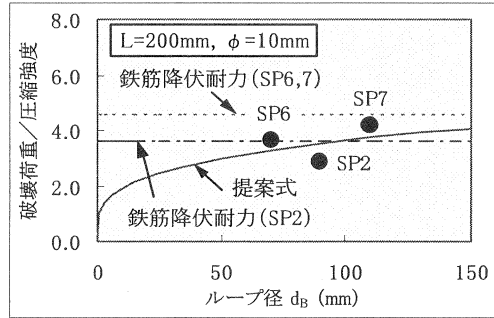


図13 破壊荷重とループ径の関係

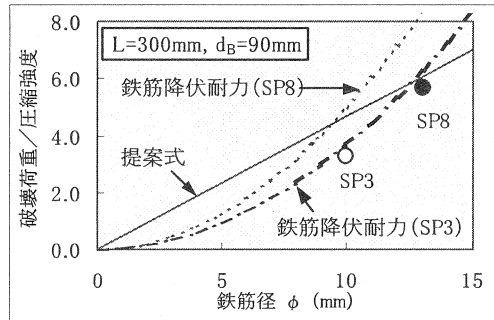


図14 破壊荷重と鉄筋径の関係