

論文 曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の限界状態に関する実験的検討

桑野 仁成*1・吉田 英二*2・中村 英佑*3・千々和 伸浩*4

要旨：本論文では、曲げモーメントを受ける RC 部材の限界状態の検討を行うことを目的に、3 種類の鉄筋比で上下段に主鉄筋を配置した RC 部材を製作し、1 方向の繰返し載荷実験を実施した。曲げモーメントを受ける RC 部材の限界状態を表す指標として、部材の挙動が可逆性を有する限界の状態に対しては下段主鉄筋の降伏、部材の残留変位の急増に至らない限界の状態に対しては上段主鉄筋の降伏が該当した。また、コンクリートと鉄筋の付着や、鉄筋の端部の定着を確実にを行うことにより、圧縮側コンクリートが終局ひずみに到達するまで RC 部材の設計上の仮定を成立させ、耐荷力の喪失までに十分な安全余裕を保持できた。

キーワード：限界状態設計法、鉄筋コンクリート部材、曲げモーメント、残留変位、平面保持の仮定

1. はじめに

道路橋示方書^{1),2)}（以下、道示）は平成 29 年 7 月に改定され、設計体系が許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行した。この改定により、橋の耐荷性能は、橋が置かれる状況と橋が留まるべき状態を対比することにより照査する体系となり、橋の性能に基づいた合理的な設計が可能となった。橋を構成する部材の耐荷性能の照査の基準となる限界状態は、橋に求められる役割や機能を踏まえて表-1 のように定義されている。限界状態設計法へと移行したことで塑性化領域を活用した設計が可能になったが、上部構造に用いられることを想定した鉄筋コンクリート部材（以下、RC 部材）において、活荷重のような常時の作用に対する塑性化領域の応答を評価するための部材の状態や工学的な指標は示されていない。これらを明確にすることができれば、上部構造を構成する部材においても塑性化領域を活用した合理的な設計が可能になると考えられる。

道示では部材等の限界状態として、限界状態 1, 2, 3 の定義と力学的な解釈例が示されている（表-1）。これによると、上部構造を構成する部材においても塑性化領域を活用した設計を可能とするためには、限界状態 2 における部材の状態や工学的な指標を明らかにする必要がある。

道示では限界状態 2 の力学的な解釈例として、「組み合わせる状況に対して求める橋の機能に影響を与える残留変位や剛性低下に達しない限界の状態」という状態が示されている。海外では、車両の繰返し走行による床版の残留変位の累積が車両の走行に与える影響について検討しており³⁾、橋の機能において残留変位は重要な工学的な指標であると考えられる。また、それぞれの限界状態に至るまで断面力に対して想定する設計上の仮定を成立させる必要があり、設計上の仮定を成立させるための前提条件が定められている。曲げモーメントを受ける RC 部材の設計上の仮定は以下の通りである。

- (1) 維ひずみは中立軸からの距離に比例すること（平面保持の仮定が成立すること）。
- (2) コンクリートの引張強度は無視すること。

また、この設計上の仮定の前提条件として、以下を満足させることが求められている。

- (1) コンクリートと鉄筋の付着が確保されていること。
- (2) 鉄筋の端部がコンクリートに定着されていること。
- (3) ひび割れが集中することなく、分散すること。

そこで本論文では、活荷重の作用を想定した 1 方向の曲げモーメントを受ける RC 部材の繰返し載荷実験を実施し、曲げモーメントを受ける RC 部材の限界状態の検

表-1 部材等の限界状態の力学的な解釈例¹⁾

限界状態の種類	定義	力学的な解釈例
限界状態 1	部材等としての荷重を支持する能力が確保されている限界の状態	- 挙動等に可逆性を有するとみなせる限界の状態 - 部材機能を低下させる変位や振動程度に至らない限界の状態 - 橋の機能を低下させる変位や振動程度に部材が至らない限界の状態
限界状態 2	部材等としての荷重を支持する能力は低下しているもののあらかじめ想定する能力の範囲にある限界の状態	- 部材として最大強度点を超えず、かつ、十分な塑性変形が残存するとみなせる限界の状態 - 組み合わせる状況に対して求める橋の機能に影響を与える残留変位や剛性低下に達しない限界の状態
限界状態 3	これを超えると部材等としての荷重を支持する能力が完全に失われる限界の状態	- 部材として最大強度点を超えない状態 - 部材として変形性能を喪失しない限界の状態

*1 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員（正会員）

*2 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員 博士（工学）

*3 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員 博士（工学）

*4 東京科学大学 環境・社会理工学院 教授 博士（工学）（正会員）

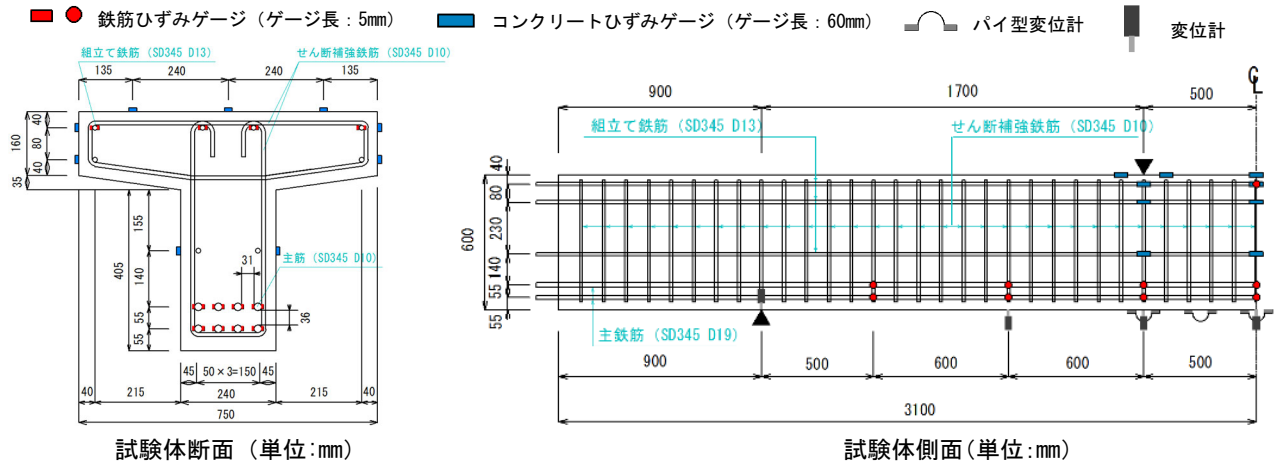


図-1 試験体の寸法図（試験体 M）

表-2 試験体の諸元

試験体名	主鉄筋	せん断補強鉄筋	p:鉄筋比 [*] (%)
試験体 L	D13	D10	0.77
試験体 M	D19	D10	1.75
試験体 H	D22	D13	2.37

※鉄筋比は $p = A_s / (b_w \cdot d)$ により算出

A_s : 主鉄筋の総断面積 (mm²), b_w : ウェブの厚さ (mm)

d : 有効高さ (mm)

表-3 鉄筋の材料試験結果

鉄筋 種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)
D10	389.3	544.5	181.2	2149
D13	380.2	533.4	184.2	2064
D19	384.6	562.0	192.5	1999
D22	371.0	552.8	188.9	1964

表-4 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
材齢 28 日	29.6	22.1
材齢 96 日 (載荷実験時)	29.5	20.9

討を行った。具体的には、曲げモーメントを受ける RC 部材の挙動の可逆性や剛性、残留変位に着目して限界状態を表す指標を検討するとともに、設計上の仮定やその前提条件の成立状況を確認した。

2. 実験方法

2.1 試験体の概要

試験体の諸元を表-2 に示す。また、試験体の代表例として試験体 M の寸法図を図-1 に示す。試験体は、鋼道路橋設計示方書⁴⁾に基づき設計された RC 単純 T 桁橋 (TL-20) の RC 主桁の 1/2 縮小モデルの 3 体とした。試験体のパラメータは鉄筋比とし、道示で定められている鉄筋比の上限 (釣合い鉄筋比の 75%)、下限 (最小鉄筋比) に加え、その中間を設定したうえで、それらに相当する鉄筋量を配置した。道示に基づき最小鉄筋比及び釣合い鉄筋比を算出した結果、最小鉄筋比は 0.5%、釣合い鉄筋比の上限、試験体 M (鉄筋比の中間)、試験体 L (鉄筋比



図-2 載荷実験の様子

の下限) と称す。

すべての試験体において、上段に 4 本、下段に 4 本の計 8 本の主鉄筋を配置した。以下、本論文では上段に配置した 4 本の主鉄筋を上段主鉄筋、下段に配置した 4 本の主鉄筋を下段主鉄筋と称す。また、すべての試験体において、せん断補強鉄筋を 100mm 間隔で配置した。なお、試験体 H は曲げ耐力が大きく、せん断破壊が生じる可能性があったため、せん断耐力に余裕を持たせるために他の試験体よりも直径の大きい D13 をせん断補強鉄筋として配置した。

試験体に使用した鉄筋及びコンクリートの材料試験結果を表-3、表-4 に示す。試験体には JIS A 5308 に適合したレディーミクストコンクリートを使用し、セメントの種類は普通ポルトランドセメント、コンクリートの呼び強度は 24N/mm² とした。

2.2 載荷方法

土木研究所構内の載荷試験装置を用いて載荷実験を実施した (図-2)。また、載荷試験装置は加力装置と分配桁がピン接合されている。載荷は、1 方向からの 2 点繰返し載荷とし、変位制御により実施した。両支点は回転及び並進を許容する境界条件とし、水平方向へ生じる剛体変位は試験体と支点板における水平摩擦で拘束した。載荷板には、厚さ 40mm、幅 200mm、支点板には厚さ

表-5 イベント一覧

(a) 試験体 L		(b) 試験体 M		(c) 試験体 H	
Step.	イベント名	Step.	イベント名	Step.	イベント名
1	曲げひび割れ発生	1	曲げひび割れ発生	1	曲げひび割れ発生
2	$\varepsilon_c' = 500\mu$	2	$\varepsilon_c' = 500\mu$	2	$\varepsilon_c' = 500\mu$
3	下段主鉄筋の降伏 ^{※1}	3	下段主鉄筋の降伏 ^{※1}	3	$\varepsilon_c' = 1075\mu$ ^{※3}
4	上段主鉄筋の降伏 ^{※1}	4	上段主鉄筋の降伏 ^{※1}	4	下段主鉄筋の降伏 ^{※1}
5	等曲げ区間内の主鉄筋の降伏 ^{※2}	5	等曲げ区間内の主鉄筋の降伏 ^{※2}	5	上段主鉄筋の降伏 ^{※1}
6	$\varepsilon_c' = 1075\mu$ ^{※3}	6	$\varepsilon_c' = 2000\mu$	6	等曲げ区間内の主鉄筋の降伏 ^{※2}
7	$\varepsilon_c' = 2000\mu$	7	$\varepsilon_c' = 2500\mu$	7	$\varepsilon_c' = 2000\mu$
8	$\varepsilon_c' = 2500\mu$			8	$\varepsilon_c' = 2500\mu$

※1 主鉄筋の降伏を判定基準とするイベントは、主鉄筋で測定したひずみの一か所が降伏ひずみに到達した時点をイベント到達とした。

※2 等曲げ区間の主鉄筋降伏のイベントは、等曲げ区間の主鉄筋で測定したすべてのひずみが降伏ひずみに到達した時点をイベント到達とした。

※3 ε_c' はコンクリートの圧縮ひずみを示す。また、 $\varepsilon_c' = 1075\mu$ は圧縮強度の 2/3 に到達した時のひずみである。コンクリート圧縮ひずみを判定基準とするイベントは試験体上面で測定したコンクリート圧縮ひずみの一か所が判定基準の値に到達した時点をイベント到達とした。

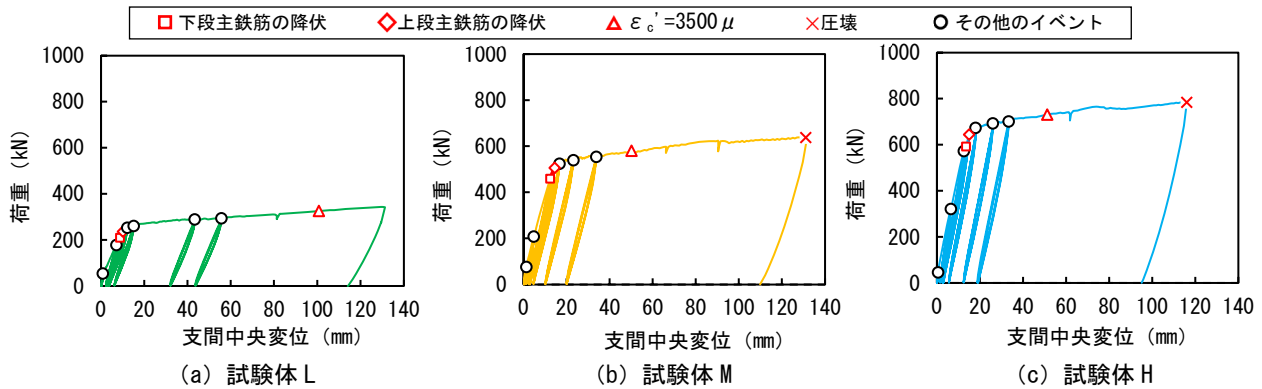


図-3 荷重変位関係

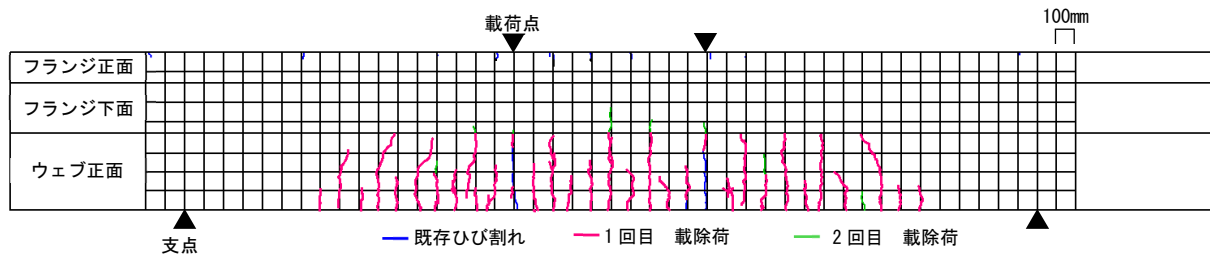


図-4 Step2におけるひび割れ図（試験体 L）

22mm、幅 200mm の鋼板を用いた。所定のイベントに到達した変位を目標とし、合計 3 回の載除荷を繰り返した。繰返し載荷実験の目標となるイベント一覧を表-5 に示す。ただし、試験体に配置された鉄筋比によってイベントの発生順序が前後するため、すべての試験体において同様の順序とはならなかった。また、試験体 M では、下段主鉄筋の降伏と $\varepsilon_c' = 1075\mu$ のイベント到達が同時であったため、 $\varepsilon_c' = 1075\mu$ のイベントを省略した。

すべてのイベントにおける繰返し載荷の終了後は、コンクリート上縁が圧壊するまで単調載荷を行った。なお、試験体 L では、変位が 130mm を超えたあたりから支点部における試験体の回転角に支点が追従できなくなり、剛体変位が生じる可能性があったため、圧壊まで載荷せずに実験を停止した。

2.3 測定方法

図-1 に示した変位計の測定位置及びひずみゲージの貼付位置において測定を行った。図-1 に示す測定位置は、

試験体中央に対して対称とした。変位計は各測定箇所 2 台を設置し、試験体 1 体あたり計 14 箇所 で変位の測定を行った。パイ型変位計は、曲げひび割れの発生以降に除荷した状態でひび割れを跨ぐようにして試験体へ取り付け、等曲げ区間の試験体下面の計 5 箇所 でひび割れ幅の測定を行った。鉄筋及びコンクリート表面に貼付したひずみゲージによりひずみの測定を行い、実験時にイベント（表-5）の到達の判定を行った。

3. 実験結果

3.1 荷重変位関係

繰返し載荷実験から得られた荷重変位関係を図-3 に示す。ここで、図-3 に示す $\varepsilon_c' = 3500\mu$ は道示で定められている圧縮側コンクリートの終局ひずみである。道示では、曲げモーメントを受ける RC 部材において、最外縁の引張側鉄筋が降伏強度に達した状態を限界状態 1、最外縁の圧縮側コンクリートが終局ひずみに達した状態を

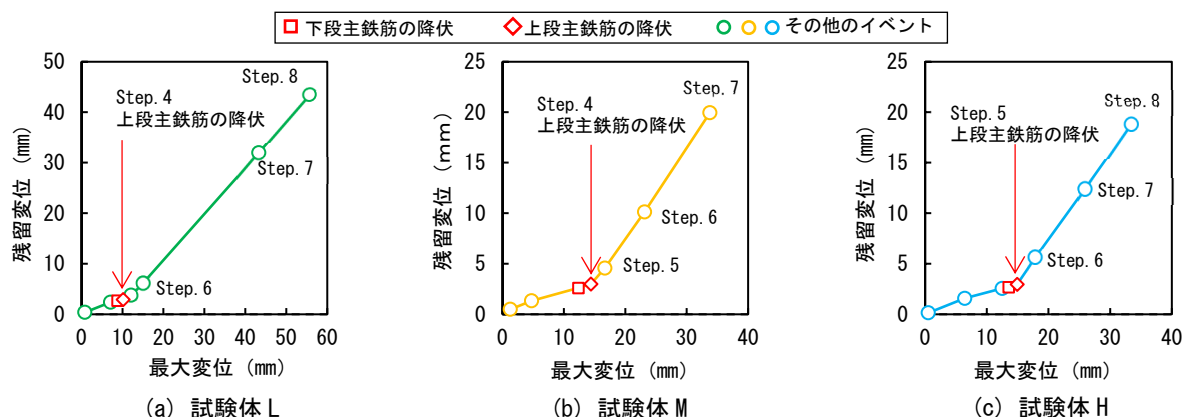


図-5 残留変位と最大変位の関係

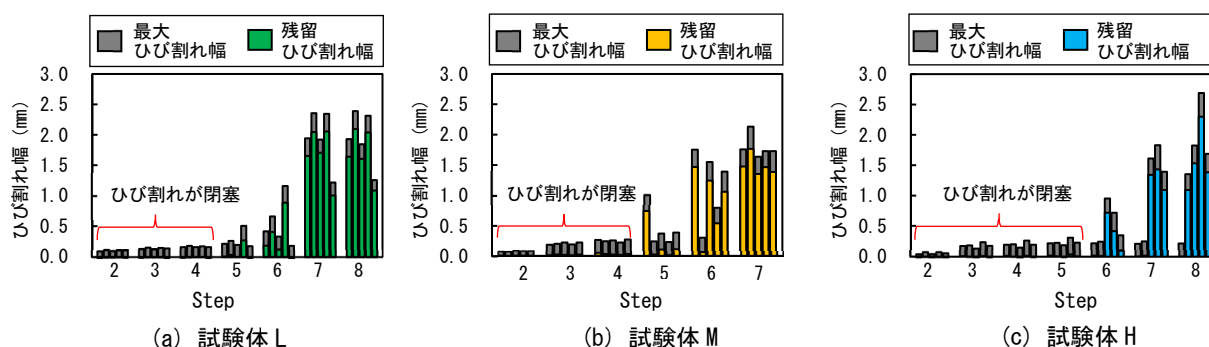


図-6 ひび割れ幅と各イベントの関係

限界状態 3 と定めている。すべての試験体において、下段主鉄筋の降伏までは、剛性の低下及び残留変位の増加が明確に現れることはなかった。また、各イベントにおける 3 回目の載荷においても 1 回目や 2 回と概ね同様の荷重変位曲線を辿った。

次に、ひび割れ本数が最も増加した試験体 L の Step2 におけるひび割れ図を図-4 に示す。1 回目の載荷及び除荷ではひび割れ本数の増加及びひび割れの進展がみられたが、2 回目と 3 回目の載荷及び除荷ではひび割れ本数の増加やひび割れの進展はみられなかった。下段主鉄筋の降伏前のひび割れ本数が増加する初期の載荷段階においても、繰返し載荷がひび割れの本数の増加やひび割れの進展に与える影響はほとんどみられず、他の試験体においても同様の傾向であった。

これらの結果から、すべての試験体において、下段主鉄筋の降伏までは、繰返し発生する曲げモーメントに対して RC 部材の挙動は可逆性及び再帰性を有していたと考えられる。一方、すべての試験体において、 $\varepsilon_c' = 3500\mu$ に到達しても耐力の急激な低下はみられなかった。上段主鉄筋及び下段主鉄筋の降伏後においても、繰返し発生する曲げモーメントに対する耐力を喪失するまでに十分な安全余裕を保持していることが分かった。

3.2 残留変位と最大変位

荷重変位関係から算出した各イベントにおける残留変位と最大変位の関係を図-5 に示す。ここで、縦軸に示

す残留変位は、各イベントにおける 3 回目の除荷後の支間中央変位であり、横軸に示す最大変位は各イベントにおける 3 回目の載荷で到達した支間中央変位の最大値である。すべての試験体において、最大変位の増加に伴い、残留変位が増加した。また、すべての試験体において、上段主鉄筋の降伏以降において残留変位が急増した。特に等曲げ区間内の主鉄筋の降伏以降では、残留変位が増加する割合が大きくなった。換言すると、上段主鉄筋の降伏までは、繰返し発生する曲げモーメントに対して残留変位は急増しなかった。これらのことから、本論文の実験結果の範囲では、1 方向の曲げモーメントを受ける RC 部材では、上段主鉄筋が降伏した状態が残留変位の急増に至らない限界の状態に該当すると考えられる。

3.3 ひび割れ幅

ひび割れ幅と各イベントの関係を図-6 に示す。ここで、ひび割れ幅は、曲げひび割れ発生以降に等曲げ区間に取り付けた 5 箇所のパイ型変位計による測定値である。また、図-6 に示す最大ひび割れ幅は各イベントの 1 回目の載荷において発生したひび割れ幅の最大値、残留ひび割れ幅は各イベントに到達後の 1 回目の除荷後のひび割れ幅である。すべての試験体において、上段主鉄筋の降伏までは各測点でしたひび割れ幅は同等の値を示し、除荷するとひび割れ幅が小さくなり、ひび割れが閉塞した。また、すべての試験体において、残留ひび割れは等曲げ区間内の主鉄筋降伏後に発生した。残留ひび割れの発生

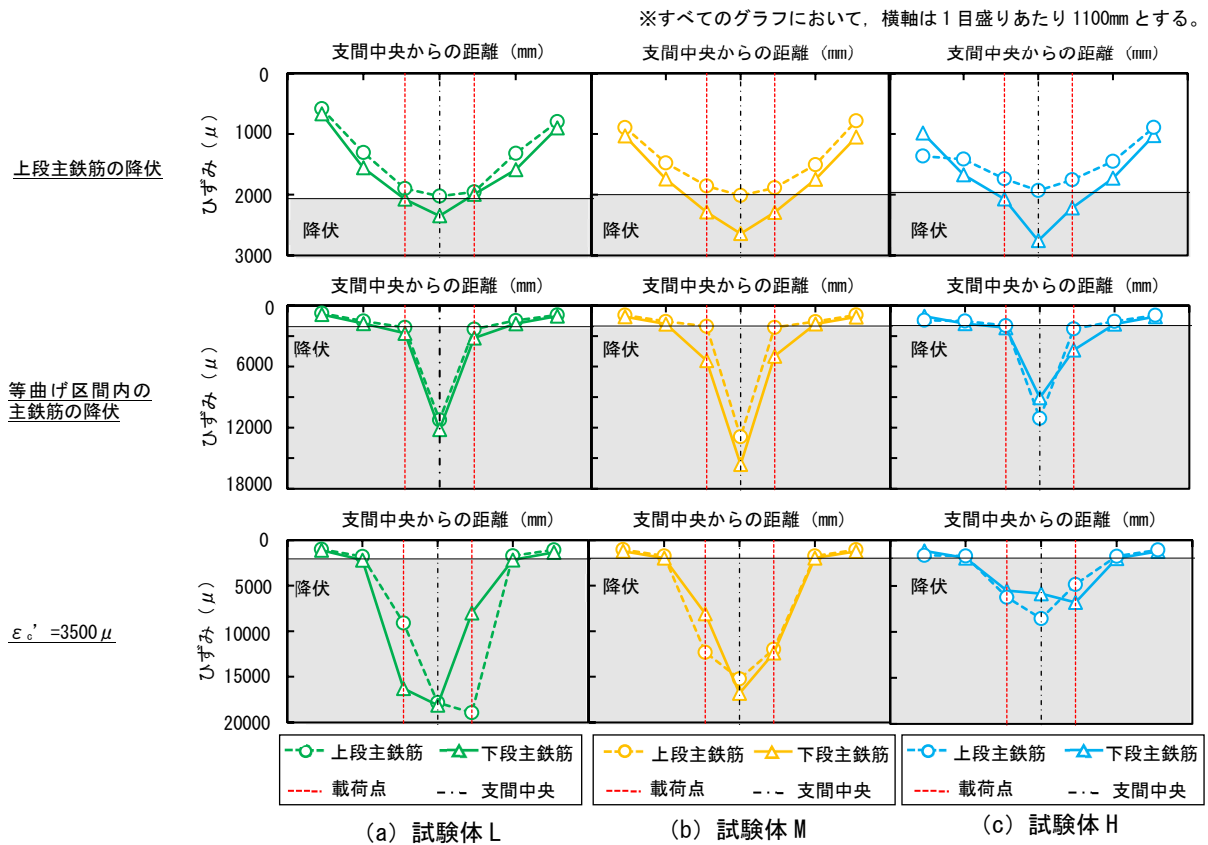


図-7 主鉄筋のひずみ分布

は、前述の残留変位が増加する割合が大きくなる現象と同様に、特に等曲げ区間内の主鉄筋の降伏後に明確に現れた。すなわち、両者とも上段主鉄筋の降伏までは明確にみられず、等曲げ区間内の主鉄筋の降伏で明確にみられた。

3.4 主鉄筋のひずみと変位の分布

すべての試験体における上段主鉄筋及び下段主鉄筋の部材長手方向のひずみ分布を図-7に示す。ここでは、上段主鉄筋の降伏、等曲げ区間内の主鉄筋の降伏、 $\varepsilon_c' = 3500 \mu$ に到達した時点の3種類の状態を代表して示す。また、主鉄筋のひずみは、上段主鉄筋及び下段主鉄筋の各4本のひずみの平均値である。すべての試験体において、上段主鉄筋の降伏までは、下段主鉄筋のひずみが上段主鉄筋よりも大きく、中立軸からの距離に比例した大小関係となる傾向にあった。次に、等曲げ区間内の主鉄筋が降伏すると、支間中央の主鉄筋のひずみが急増し、降伏ひずみを大きく上回った。その後の $\varepsilon_c' = 3500 \mu$ 到達時では、支間中央の主鉄筋のひずみだけではなく、载荷点直下の主鉄筋ひずみも急増し、主鉄筋の降伏領域が拡大した。上段主鉄筋の降伏後においても、コンクリートと鉄筋の付着が確保されたことによって引張応力が再分配され、主鉄筋の降伏領域が拡大したと考えられる。また、すべての試験体において、支点部から500mm中央側の測定点における主鉄筋のひずみは 1500μ 程度発生した。

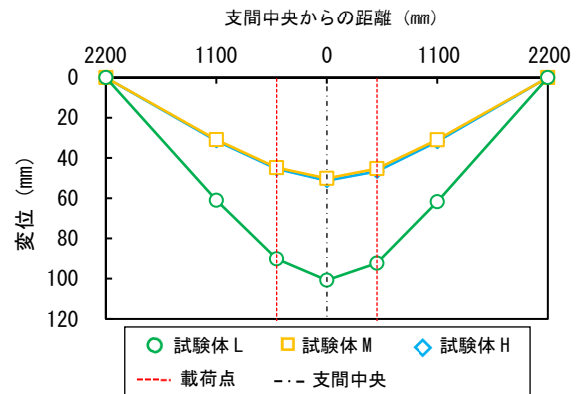


図-8 変位分布 ($\varepsilon_c' = 3500 \mu$ 到達時)

このことは、主鉄筋の端部がコンクリートに定着されていたことによるものと考えられる。

$\varepsilon_c' = 3500 \mu$ 到達時の試験体の変位分布を図-8に示す。 $\varepsilon_c' = 3500 \mu$ 到達時での変位分布において、すべての試験体で部材の左右対称に変位が生じていた。 $\varepsilon_c' = 3500 \mu$ 到達時まで局所的な変形はみられず、部材として曲げモーメントに抵抗できていたと考えられる。

3.5 断面内のひずみの分布

試験体の支間中央で測定した断面高さ方向のひずみ分布を図-9に示す。試験体 L 及び試験体 M は $\varepsilon_c' = 3500 \mu$ の段階まで断面高さ方向にひずみが線形に分布しており、支間中央の断面では平面保持の仮定が成立していたといえる。一方で、試験体 H では等曲げ区間内の主鉄筋降伏

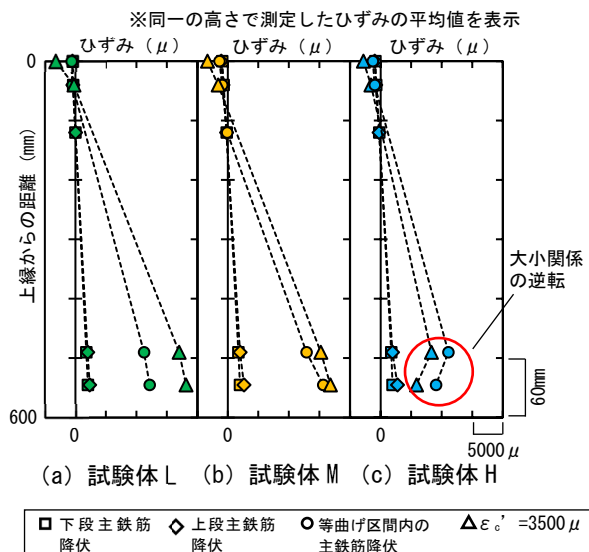


図-9 支間中央断面のひずみ分布

以降に上段及び下段主鉄筋で測定したひずみの大小関係が逆転し、線形性が保たれていないことがあった。

そこで、支間中央断面の主鉄筋のひずみと変位の関係を図-10に示す。図-10によると、試験体Hでは上段及び下段主鉄筋の降伏以降にひずみが増加した後、下段主鉄筋のひずみの急激な低下がみられた。この結果、図-9に示す支間中央断面における断面高さ方向のひずみ分布において、試験体Hのみ線形性が保持できなくなったと考えられる。この一因としては、試験体Hは主鉄筋のあきが他の試験体と比較して小さいため、曲げモーメントの作用時に主鉄筋から発生するリングテンションが干渉し合い、主鉄筋に沿った割裂ひび割れが発生し、鉄筋とコンクリートの付着応力の低下が引き起こされた可能性があることが挙げられる。既往の文献⁵⁾においても鉄筋間のあきが小さくなると付着強度が低下することが報告されており、本論文の実験結果においても同様の現象が生じた可能性があると考えられる。一方で、すべての試験体において、 $\epsilon_c' = 3500\mu$ 到達時までは図-8に示したように部材に局所的な変形が見られなかった。このことから、曲げモーメントを受けるRC部材の設計上の仮定を成立させるための前提条件であるコンクリートと鉄筋の付着や鉄筋の端部の定着が確保されており、部材として曲げモーメントに抵抗できていたと考えられる。

4. 結論

本論文では、1方向の曲げモーメントを受けるRC部材の耐力機構に基づいた限界状態の検討を行うことを目的に、道示の規定内の鉄筋比のパラメータを持つRC部材を用いて繰返し載荷実験を実施した。得られた結果を以下に示す。

(1) 曲げモーメントを受けるRC部材では、下段主鉄筋

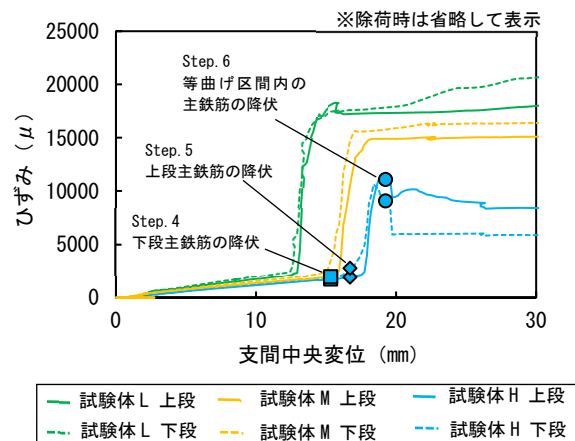


図-10 支間中央の断面の主鉄筋ひずみと変位の関係

の降伏までは剛性の低下及び残留変位の増加が明確に現れることはなく、挙動の可逆性及び再帰性を有していた。

- (2) 曲げモーメントを受けるRC部材では、上段主鉄筋の降伏までの残留変位の急増が明確に現れなかったため、上段主鉄筋が降伏した状態が残留変位の急増に至らない限界の状態に該当する。
- (3) 道示における曲げモーメントを受けるRC部材の設計上の仮定の前提条件である鉄筋とコンクリートの付着や鉄筋端部の定着を確保することにより、圧縮側コンクリートが終局ひずみに達するまでRC部材の設計上の仮定を成立させ、耐力の喪失までに十分な安全余裕を保持できた。

本論文では、上部構造の機能に基づいたRC部材の限界状態の設定についての検討を示した。この結果は、多様な材料や構造形式等の合理的な設計への活用や、橋の機能や復旧性の観点から残留変位の累積を急増させない状態に対する指標を設定する際の検討の一助になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編，丸善，2017
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説III編コンクリート橋・コンクリート部材編，丸善，2017
- 3) Kulicki, J., Wassef, W., Mertz, D., Nowak, A., Samtani, N. and Nassif, H. : Bridges for Service Life Beyond 100 Years : Service Limit State Design, SHRP2 Report, Issue S2-R19B-RW-1. Transportation Research Board, Washington, DC, 2015.
- 4) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，1956.5
- 5) 森田司郎：鉄筋とコンクリートとの付着性状－異形鉄筋の割り裂き付着破壊について－，コンクリート工学，Vol.16, No.10, pp.1~10, 1978