

報告 曲げ, せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受ける RC はりにおけるかぶりの挙動に関する一考察

佐々木 優介*1・渡邊 有輝*2・前田 祐助*3・岡本 享久*4

要旨: 曲げ, せん断を受ける RC はり破壊に関しては, 現在までに確立され, 示方書を通じて設計に反映されている。しかし, 曲げ・せん断にねじりを加えた組み合わせ断面力を受ける RC はりの耐荷機構メカニズムは解明されていない部分が多い。本研究では, ねじり独特なかぶりの剥離現象に着目し, 組み合わせ断面力を受ける RC はりの破壊時のかぶり挙動を把握することを目的に, 純ねじり載荷試験, 組み合わせ断面力載荷試験, 組み合わせ断面力によって一度破壊した RC はりに対する曲げ試験を実験した。その結果, 組み合わせ断面力での破壊はかぶり部分での破壊であり, コアコンクリートは健全の様相を示すことがわかった。

キーワード: かぶり, ねじりモーメント, 曲げモーメント, せん断力, RC 梁, 組み合わせ断面力, 破壊機構

1. はじめに

今から 15 年前に発生した兵庫県南部地震における土木構造物の破壊は, 日本国民に衝撃を与えた。その中でも阪神高速道路神戸線の高架橋の倒壊は人々の記憶に鮮明に残っている。震災後, 多くの研究者により, その高架橋の橋脚の脆性的な倒壊は, 鉄筋の継手部や軸筋の段落とし部を原因とするせん断破壊であると結論づけられた。しかし, 我々は, 倒壊した橋脚のコンクリートかぶりが剥落していることから, 断層に流れた地震波によるねじりの影響もあったという可能性について検討を加えた。

曲げ・せん断およびねじりを受ける RC はりの研究は, 昭和 40 年代に狩野らによって行われた¹⁾が, 主たる課題はねじりを含む組み合わせ荷重条件下の耐荷力であり, 変形およびかぶりの影響に関してはほとんど取り扱っていない²⁾。

設計に関して, 曲げとせん断力を受ける RC はりに関しては多くの研究により, その耐荷メカニズムは解明され, 示方書に十分反映されている。さらに, 「曲げとねじり」, 「せん断とねじり」を受ける RC はりの耐荷力に関しても示方書に相互作用線で示されている。しかし, 「曲げ, せん断およびねじり」が同時に作用する場合の RC はりの研究は過去になされたものの³⁾, 設計に十分反映されていない。特に地震時の組み合わせ断面力による構造物の崩壊に関して, そのメカニズムは解明されるべきである。

本研究では, 既往の研究⁴⁾により解明されている純ねじりにおけるかぶりの剥離に注目し, 確認実験を行った。そして, 曲げ・せん断およびねじりの組み合わせ断面力

を受ける RC はりの破壊形状に関する実験を行った。さらに, 曲げ・せん断およびねじりが作用する RC はりの破壊形式に及ぼす影響を知る目的から, 一度破壊したはりに再度曲げ・せん断試験を行い, 組み合わせ断面力を受けた RC はりのかぶりの役割について実験的検証を行った。

2. 純ねじりにおける RC はりのかぶり剥離現象

2.1 実験概要

長滝らの研究⁴⁾により, 純ねじりを受ける RC はりにおいて斜めひび割れ発生後, かぶりは剥離し, その役割を失い, スターラップ内部のコアコンクリート部分のみで支えていることが示された。ねじりを受ける RC はり

表—1 鉄筋引張試験結果

呼び名	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (ε × 10 ⁻⁶)
D10	68.8	390.0	578.2	2171
D13	120.6	395.7	510.1	1951
D16	188.8	423.8	590.1	2025

表—2 コンクリートの物性試験結果

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
PT	28.5	2.35 × 10 ⁴
MQ8	35.1	2.27 × 10 ⁴
MQT8	34.5	2.36 × 10 ⁴
MQT11	26.2	2.64 × 10 ⁴

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部都市システム工学科

*3 立命館大学 理工学部都市システム工学科

*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博 (正会員)

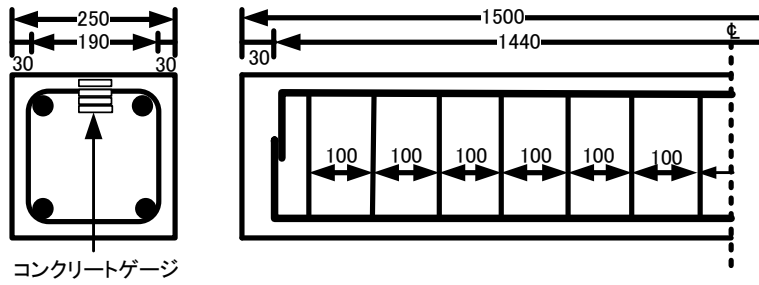


図-1 PT断面寸法および配筋図

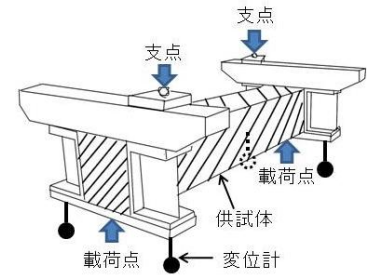


図-2 PT 載荷方法

の実験方法は規格化されておらず、我々のねじり載荷方法においても同様にかぶりの挙動について検討する必要がある。そこで、下記の方法で純ねじりの確認実験を行い、トルク-ねじり角関係から、コンクリート埋め込みゲージにより、かぶりの剥離を確認した。

2.2 実験方法

(1) 使用材料および設計

使用した鉄筋を表-1 に示す。鉄筋引張試験を JIS Z 2201 に準拠して実施し、降伏点、引張強度および降伏ひずみを求めた。純ねじり試験用 RC はり供試体(以下、PT とする。)の物性を表-2 に示す。PT は図-1 に示すように、250mm×250mm の正方形断面とし、スパンを1500mm とした。上端軸筋と下端軸筋に D13 を、スターラップに D10、間隔 S=100mm 配筋した。コンクリートひずみ測定用埋め込みゲージをはり断面の中心から 55mm(コアコンクリート内部)、75mm(コアコンクリート内部)、95mm(スターラップの中心線)、115mm(かぶり部分) に、斜めひび割れが生じる方向と並行で各深さごとに配置した。

(2) 載荷試験方法

図-2 に示すように PT の端部に載荷用ジグを取り付けることで、載荷点を PT の断面幅中心から偏心距離 250mm とし、ねじりモーメントを作用させた。変位計は PT のスパン中心から 600mm の位置に対称にはり断面に 4 点取り付けられた。端部のジグ両端に左右対称に取り付けられた変位計から、回転角を求めることで、単位長さ当たりのねじり角を求めた。

2.3 実験結果

(1) トルク-ねじり角

図-3 にトルク-ねじり角の関係を示す。長滝らの解析⁴⁾によると、ねじりをかけた供試体に斜めひび割れが生じると、実験解がコアコンクリート断面のみで解析した理論解と一致することから、かぶりコンクリートの役割が果たさなくなっていることがわかっている。本実験方法においても、従来研究と同様の挙動を示し、斜めひび割れ発生直後で、ねじり角が大きくなり、かぶりとコア部分が剥離し、かぶりの役割がなくなっていることがわ

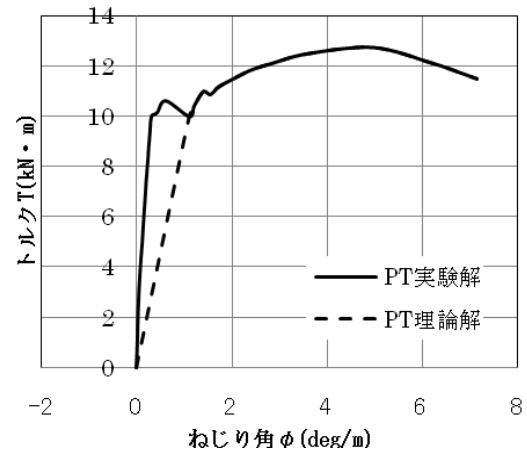


図-3 トルク-ねじり角

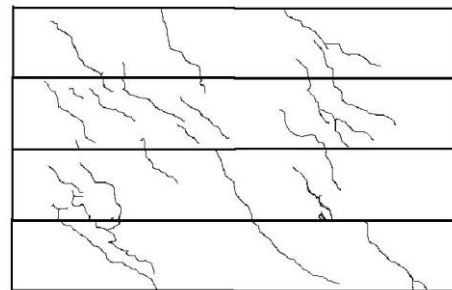


図-4 PT シリーズひび割れ図

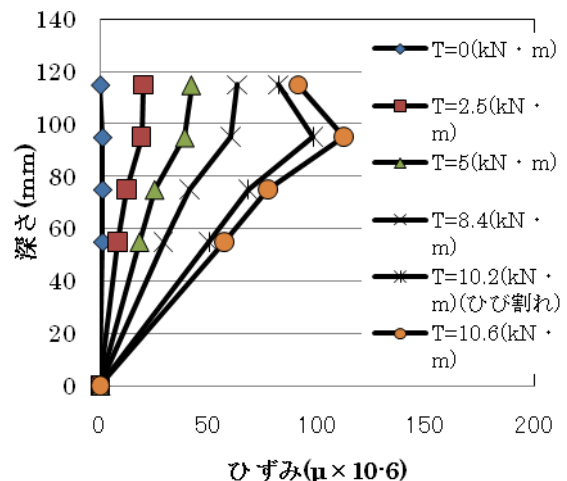


図-5 コンクリートひずみ

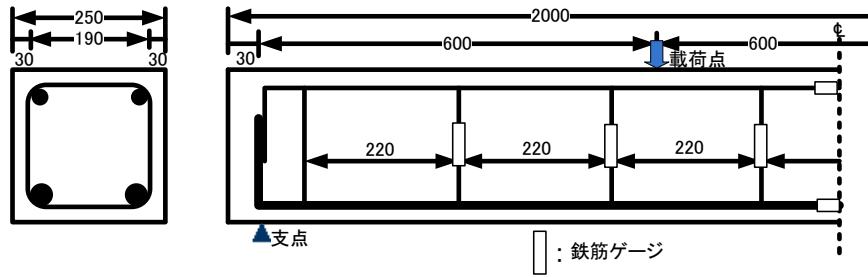


図-6 MQ8 および MQT8 の断面寸法および配筋図

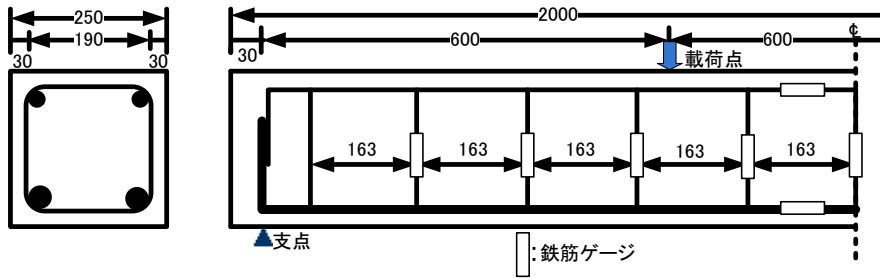


図-7 MQT11 の断面寸法および配筋図

かった。

(2) ひび割れ図

図-4 に PT のひび割れ図を示す。従来研究より⁵⁾、純ねじり実験において、ひび割れは斜め 45° のらせん状に生じる。本実験においても、同様の結果が得られたことから、確かに供試体にねじりモーメントが作用していたことがわかった。

(3) かぶりの剥離

図-5 に埋め込みゲージによるコンクリートのひずみ状態を示す。ひび割れが生じるまでは断面の中心からかぶりにかけて、線形的にひずみが増加している。しかし、ひび割れ発生後にかぶり部分のコンクリートひずみは急激に緩和されている。ひび割れ発生後のかぶり部分は、耐力について、その役割を果たさなくなり、コアコンクリート部分のみで終局に至っていることがわかった。

3. 曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受ける RC はりの耐荷挙動

3.1 実験概要

基本的に、RC 梁は、脆性的な破壊を避けるため、曲げ引張破壊が先行するように設計される。よって、本実験では曲げ引張破壊先行型となるように、配筋し、作用ねじりモーメントと作用曲げモーメントの比率が 0.42 (以下、 $T/M=0.42$, T はねじりモーメント, M は曲げモーメントとする) で曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受ける RC はりの載荷試験を行った。

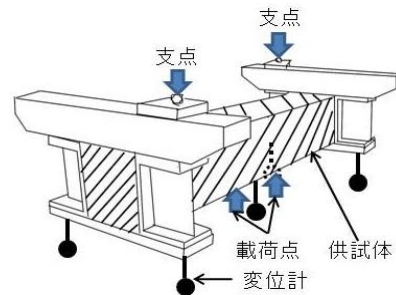


図-8 MQT8 および MQT11 載荷方法

3.2 実験方法

(1) 使用材料および設計

曲げ・せん断はりでは、スターラップ 8 本 (以下、MQ8 とする) とし、また、曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受ける RC はりでは、スターラップ 8 本とスターラップ 11 本 (以下、それぞれ MQT8 と MQT11 とする) とし、計 3 体を作製した。表-2 に 3 体の供試体のコンクリート物性試験結果を示す。図-6 の MQ8 および MQT8 と、図-7 の MQT11 に示すように、 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ の正方形断面とし、スパンを 2000mm とした。上端軸筋に D10 を、下端軸筋に D16 を、スターラップに D10、間隔 $S=220\text{mm}$ (MQ8 および MQT8 の 2 シリーズ)、 $S=163$ (MQT11) で配筋した。また、鉄筋ゲージを軸筋とスターラップの側面両サイドに貼付け、鉄筋ひずみを測定した。使用した鉄筋は表-1 と同様である。

(2) 載荷試験方法

MQ8 では対称 2 点一方向載荷曲げ試験を行った。なお、

せん断スパン 600mm, 純曲げスパン 600mm とした。
 MQT8 および MQT11 は, 曲げ・せん断およびねじりを同時に受ける場合で, 図-8 の MQT8 および MQT11 に示すように端部にジグを取り付け, 載荷点をせん断スパン 600mm, 純曲げスパン 600mm とした。T/M=0.42 とし, 曲げ, せん断, ねじりの組み合わせ断面力を加え, 実験を行った。

3.3 実験結果

(1) 曲げモーメント M-たわみ

図-9 に曲げモーメント M とたわみの関係を示す。MQ8 は, 典型的な曲げ引張先行型の破壊形状となった。それに対して, 同様の配筋を行った T/M=0.42 の MQT8 ではせん断型の破壊を起こした。また, スターラップ本数を増加させた T/M=0.42 の MQT11 でも, せん断型の破壊が起こった。

(2) ひび割れ図

図-10 にそれぞれの供試体別のひび割れ図を示す。な

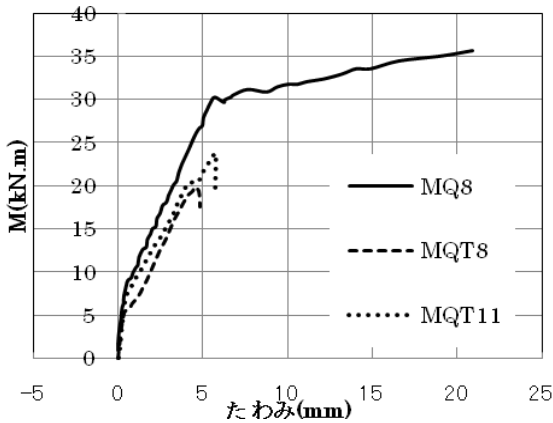


図-9 曲げモーメント M-たわみ

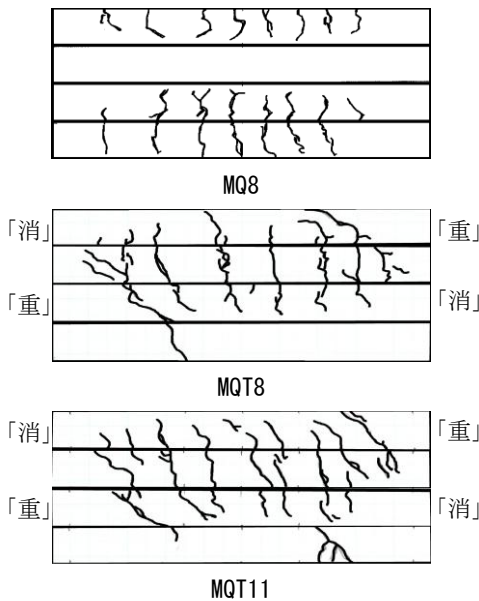
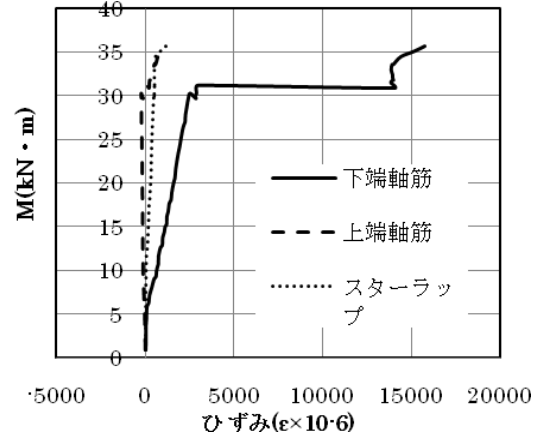
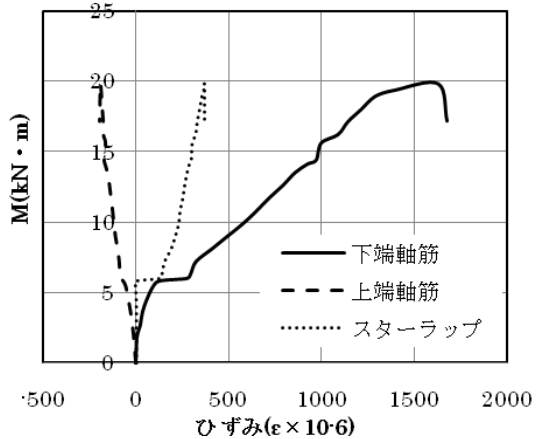


図-10 ひび割れ図 (組み合わせ荷重)

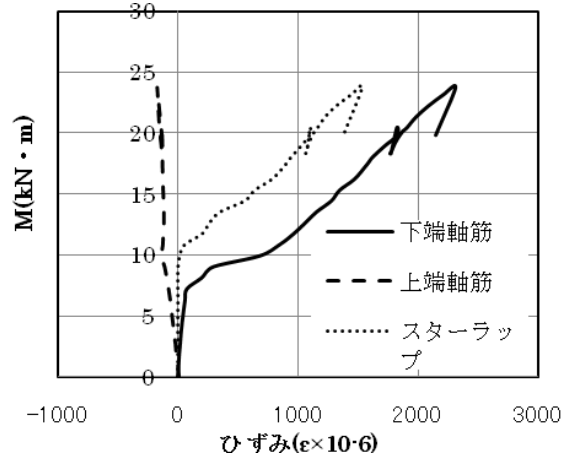
お, 表示は上から順番に側面, 上面, 側面, 下面である。T/M=0 の MQ8 は純曲げスパン内で, ひび割れが生じて, 幅を増大させた後, 終局を迎えた。T/M=0.42 の MQT8 および MQT11 は, 曲げスパンで図-4 の PT ひび割れ図で示したひび割れと類似したひび割れが生じており, ねじりとせん断による主応力方向が垂直で相殺される面



MQ8



MQT8



MQT11

図-11 鉄筋ひずみ

ではひび割れがほとんど生じていない(図中、「消」)。注目すべきはねじりとせん断の主応力方向が同一の面である(図中、「重」)。大きな斜めひび割れが生じていることがわかる。終局付近において、このひび割れ幅が拡大し、破壊はねじりとせん断力の重なる面のせん断型破壊であった。

(3) 曲げモーメント M-鉄筋ひずみ

T/M=0のMQ8の鉄筋ひずみを図—11のMQ8に示す。上端軸筋およびスターラップは降伏しておらず、終局を迎えている。下端軸筋は降伏して、曲げ引張破壊であることがわかる。一方、図—11のMQT8およびMQT11からMQT8とMQT11は軸方向もスターラップもほとんどの鉄筋が降伏していない。なお、スターラップには複数のゲージを貼付けしており、ここでは、ひずみが最大となったスターラップの鉄筋ひずみを示した。

4. 曲げ、せん断およびねじりが作用した RC はりのかぶり影響に関する考察

4.1 実験概要

組み合わせ断面力を受けるMQTシリーズのRC梁では、ねじりとせん断力の主方向が重なる面で卓越した斜めひび割れにより、せん断型の破壊を起こした。この際、ほとんどの鉄筋が降伏していなかった。そこで、本実験では、曲げ、せん断、ねじりの組み合わせ断面力を受けるRC梁の破壊でも、純ねじり実験で証明したかぶりの剥離が影響を受けると仮定した。すなわち、せん断力とねじりの主方向が重なる面のかぶり部分のみで破壊し、コアコンクリートは健全な状態であると推察した。そこで、曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受け、せん断型破壊した2体にねじりを除く、曲げ、せん断載荷試験を行い、コアコンクリートの健全性について、曲げモーメント M-たわみ関係およびひび割れ図から考察した。

4.2 実験方法

(1) 供試体

曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受け、せん断型破壊した供試体MQT8およびMQT11の供試体を使用した。

(2) 載荷試験方法

対称2点一方向載荷曲げ試験を実施した。載荷点は図—6、図—7のMQT8およびMQT11に示す通りである。

4.3 実験結果

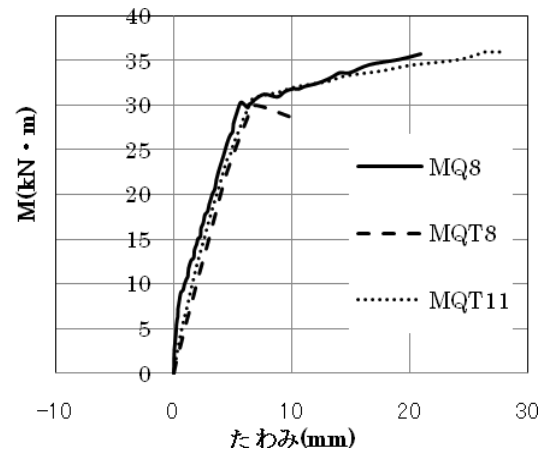
(1) 曲げモーメント M-たわみ

MQ8, MQT8, MQT11の曲げ・せん断試験における曲げモーメント M-たわみ関係を図—12に示す。なお、MQ8は3.3に示した曲げモーメント M-たわみ関係と同一で

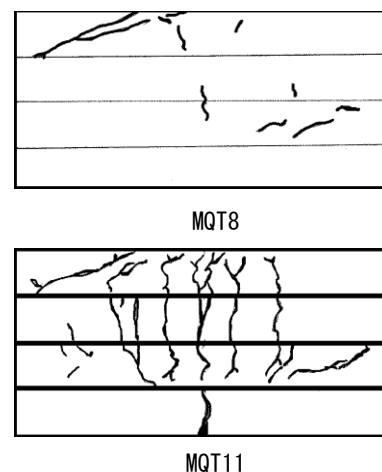
ある。M=30(kN・m)まで、MQT8とMQT11で、MQ8と同じ挙動を示した。MQT8はその後せん断型破壊により、終局に至った。MQT11は、MQ8と同様に下端軸筋降伏による曲げ引張破壊であった。MQT11の下端軸筋の降伏からのたわみの増大前と、MQT8のせん断破壊の荷重を見ると、いずれもM=30(kN・m)であるため、MQT8が下端軸筋の降伏ひずみの手前でスターラップが破断したと考えられる。MQ8が曲げ破壊であったのに対して、MQT8再載荷(曲げ・せん断試験)では、せん断破壊となった。これは、曲げ・せん断およびねじりの組み合わせ載荷時に、ねじりモーメントが作用したことで、部分的にかぶりが剥離して、ウェブ厚が減少したことにより、せん断耐力へ影響したと推測される。

(2) ひび割れ図

図-13のMQT8およびMQT11は、曲げ・せん断載荷により新たに発生したひび割れ図を示す。なお、表示は上から順番に側面、上面、側面、下面である。MQT8では、組み合わせ断面力試験で生じた斜めひび割れの対称側面に、支点から載荷点にかけて斜めひび割れが生じ、



図—12 曲げモーメント M-たわみ (曲げ荷重)



図—13 追加ひび割れ (曲げ荷重)

せん断型破壊が起こった。本来のせん断では、両側面において、同一の斜めひび割れ角で破壊するにも関わらず、MQT8ではそれぞれの側面で異なった角度の斜めひび割れによるせん断型破壊を起こしている。一方、MQT11では、斜めひび割れは生じたが、下端軸筋が降伏し、曲げ引張破壊型となり、それに対応するひび割れ分布となった。

5. まとめ

曲げ、せん断とねじりの組み合わせ断面力を受けるRC梁におけるかぶり挙動を以下にまとめる。

- (1) 純ねじりを受けるRCはりにおいて、斜めひび割れ後にかぶりは剥離し、ねじりに対しコアコンクリートのみが有効である。
- (2) 曲げ、せん断およびねじりを受ける場合、せん断とねじりの主方向が重なる面に発生した斜めひび割れにてその幅が広がることで破壊した。今回の場合、鉄筋は降伏していない。
- (3) ねじりと曲げせん断の組み合わせ断面力を受け破壊したはりについて、再度曲げせん断試験を行った結果、処女載荷曲げ試験同等の終局耐力が得られる。
- (4) ねじりと曲げせん断の組み合わせ断面力を受けせん断型破壊したはりを再度曲げせん断実験を実施すると、スターラップ量とかぶりの剥離の影響を受けせん断破壊を起こす場合がある。この場合、スターラップを増やすと、かぶり剥離の影響を受けていても曲げ型破壊となる。

曲げ、せん断およびねじりの組み合わせ断面力を受けるRC梁の破壊は、ねじりの影響によりかぶりとコアコンクリートが別々の挙動を示し、かぶり部分の影響が卓越する破壊となっており、この場合コアコンクリートは健全である場合が多い。地震などの偶発荷重でねじりを含めた組み合わせ断面力がかかり破壊した梁でも、斜めひび割れのみで破壊している場合、コアコンクリートは

健全と思われる。適切なせん断補強筋が入ればその後曲げ破壊を起こし、かぶり部分の補修で曲げに対する耐力回復の可能性がある。

今後の課題として、スターラップどの程度配筋することで、一度組み合わせ断面力を受けたRC梁が再度曲げ試験を行った際、曲げ型破壊を起こすのか、理論を持った形で証明しなければならない。また、今回のT/M=0.42では汎用性が得られないため、T/Mを変化させても同様の挙動を確認できるのか検証する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験時に大いに協力していただいた立命館大学客員研究員 竹内 正喜氏、また、実験装置の安全性の検討時に相談に乗っていただいた立命館大学建築都市デザイン学科教授 児島 孝之氏、立命館大学都市システム工学科助教 水田 真紀氏に対し、ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 泉 満明, ねじりを受けるコンクリート部材の設計方, 技報堂, pp. 145-146, 1972
- 2) 狩野 芳一, 岩崎 真志保, 早瀬 光昭: ねじりと曲げせん断を受ける部材の破壊性状に及ぼす荷重履歴の影響について, コンクリート工学, Vol. 7, pp.533-536, 1985
- 3) 岡本 享久, 長滝 重義: 曲げ・せん断とねじりを同時に受ける鉄筋コンクリート部材の耐力と変形, 土木学会論文集, 第 360 号, V-3, 1985.8
- 4) 長滝 重義, 李 承漢, 岡本 享久: 鉄筋コンクリート部材のねじり耐荷機構に関する一考察, 土木学会論文集, 第 390 号, V-8, 1988.2
- 5) S. Nagataki, T. Okamoto and S. H. Lee: A Study on Mechanism of Torsional Resistance of Reinforced Concrete Members, Concrete Library of JSCE, No.12, pp.75-91, 1989