論文　曲げ・せん断にねじりが同時に作用するRC部材の破壊性状に関する一考察

前田　祐助[*1]・加藤　慎介[*2]・岡本　享久[*3]

要旨：本研究は，地震を受けたRC部材の耐荷力およびひび割れ性状を，兵庫県南部地震により破壊したRC橋脚を例にとり，当時あまり議論されなかったねじりモーメント（以下，ねじりと略称する）の影響について再考し，震災を受けたこの種のRC部材の補修・補強の方法に考察を加えた。すなわち，兵庫県南部地震の写真資料から，当時せん断破壊に分類させたものが，ねじりとの組み合わせによる破壊を起こしている可能性についても検討した。その結果，地震時に特有のねじりを含む組合せ断面力により構造物は局所的な破壊をおこし，補修・補強により再び供用できる可能性があることを示唆した。

キーワード：地震，ねじり，曲げ・せん断，組み合わせ断面力，RC部材，残存耐力，補修

1. はじめに

兵庫県南部地震における数多くの土木構造物の崩壊は日本のみならず世界にも大きな衝撃を与えた。特に，RC製高架橋脚の倒壊は人々の記憶に鮮明に残っている。これらのRC橋脚は，震災後ただちに有識者により，曲げ破壊，曲げせん断破壊或いはせん断破壊として分類された。我々は，この被災したRC橋脚について当時の写真を入手し，約200体の写真による観察を行った。その結果，11%の写真については震災時の複雑な荷重条件において，曲げ破壊，曲げせん断破壊或いはせん断破壊だけではなく，ねじりが作用している可能性が見受けられた。例えば，阪神高速道路神戸線の橋脚倒壊は，最初は地盤と地震波動の組み合わせから最弱位置の1本の橋脚が倒壊，その影響が高架部とピルツ構造の橋脚でつながる隣接橋脚にねじりが作用し，次々と連鎖的に倒壊したものとも考えられる。(**写真－1**に一例）すなわち，阪神高速神戸線のRC橋脚の崩壊は，このような隣接する橋脚間に作用するねじりの影響によるものも見受けられる点に注目した。

本研究ではははじめに，兵庫県南部地震の際にあまり検討されなかったねじりの影響について，当時に撮影した被災構造物の写真により判定を行った。この調査結果に基づき，ねじりと曲げ・せん断の組合せ断面力下にあるRC製橋脚の破壊性状を定性的に把握する目的で供試体の作製と載荷試験を実施し，そのひび割れおよび破壊性状を再現した（**3章**）。また，壁厚を変えた中空断面供試体を用いた実験も行い，ねじり作用と中空断面の壁厚方向の耐荷範囲に注力し，中空断面の内部ひび割れと外部ひび割れの比較より壁厚方向の破壊性状の考察を加えた（**4章**）。さらに，ねじりと曲げ・せん断の作用にて終局耐力まで到達したRC部材に再度ねじりを除く曲げ・せん断を作用させ，構造物の残存耐力に関する考察を加えた（**5章**）。

よって，本研究では，地震と高架橋構造との相関により発生する「ねじり」が構造物に与える影響に着目し，被災した構造物の破壊性状やその耐荷履歴を持つ構造物の残存耐力を把握し，地震時にねじりを含む組合せ断面力を受けたコンクリート構造物を対象とした構造物の補修・補強による供用の可能性についても言及した。

2.本研究の流れと被災構造物の再検証

兵庫県南部地震の際にあまり検討されなかったねじりの影響について，当時に撮影した被災構造物の写真により判定を行った。ねじりがコンクリート構造物に作用した場合，例えば，純ねじり条件下においては，独特の「らせん状のひび割れ」が部材の全面に生じる。「らせん状のひび割れ」の一部分は一般のせん断による斜めひび割れに類似したひび割れ性状（特にひび割れ角度）を示す。また，ねじりとせん断が同時に作用する場合では，「ねじりによるらせん状の斜めひび割れの一部」と「せん断による斜めひび割れ」が重なり合う面(**写真－2**右，**写真－3**下）とその対称面ではそれらが打ち消し合う面（**写真－2**左，**写真－3**上）が並存する。すなわち，一面でねじりとせん断による斜めひび割れが重複し，その対称となる面では斜めひび割れの進展が抑制される特徴的なひび割れ性状を示すことが知られている。以上のような特徴的なひび割れ性状を有するコンクリート構造物には，曲げ・せん断のみならずねじりも影響していると考えられ，被災構造物の破壊性状を考える上で，ねじりの影響を無視はできないと考えられた。

*1 立命館大学大学院　理工学研究科　(学生会員)
*2 立命館大学大学院　理工学研究科
*3 立命館大学教授　理工学部環境システム工学科教授　工博（正会員）

写真－１　阪神高速道路神戸線　125 番 RC 橋脚
（写真提供：阪神高速道路㈱）

橋脚の倒壊により構造的に連結する隣接橋脚
（写真中央）にねじりが作用し崩壊した例

3.　曲げ・せん断にねじりが同時に作用する RC の終局耐力とひび割れ性状

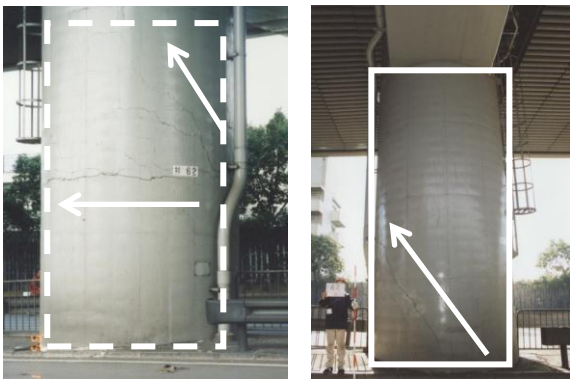
3.1　実験概要

供試体の概要を**表－１**に示し，配筋図を**図－１**に示す。供試体は，全てに共通して断面寸法 250mm×250mm，スパン 1800mm，コンクリートかぶり 30mm とし，上端軸筋および腹鉄筋に D10 を，下端軸筋に D16 を使用した。**表－1** に表す腹鉄筋比（＝Av/bs，但し Av：腹鉄筋 1 組の断面積（mm^2），b：部材の腹部幅（mm），s：腹鉄筋間隔（mm）とする。）は MQ8 および MQT8 では 0.26%, MQT11 では 0.35%と変化させている。載荷条件は MQ8 で曲げ・せん断力を，MQT シリーズで曲げ・せん断に加え，ねじりを同時に作用させている。なお，使用したコンクリートおよび鉄筋の物性を**表－２**および**表－３**に示す。

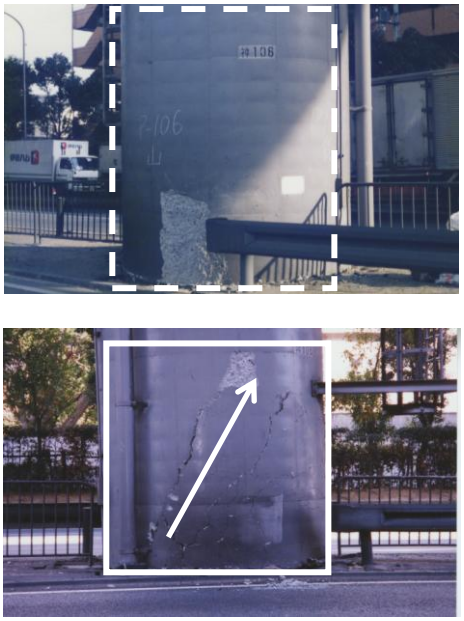
載荷方法は MQ8 では，曲げスパン 600mm，せん断スパン 600mm として，3 等分一方向載荷試験を行った。また，MQT シリーズは，**図-2** 示す試験装置によって行い，曲げスパン 600mm，せん断スパン 600mm とし，はり軸方向中心から垂直方向に偏心距離を設け，対称に載荷することによって，曲げ・せん断にねじりを同時に作用させる。実験における曲げモーメントとねじりモーメントの比率（以下，T/M）は，以下の根拠より T/M＝0.42 とした。すなわち，岡本・李らの既往の研究成果[1) 2)]より曲げ・せん断とねじりを同時に受ける場合で T/M≧0.6 では，純ねじり下で発生する「らせん状のひび割れ」と同様なひび割れが断面の全面に発生するが，この値以下の T/M では「らせん状のひび割れ」は発生しない。よって本研究では写真判定も参考にして，曲げ・せん断の影響とねじりの影響の両方が構造物に現れる T/M=0.42 と固定し載荷試験を実施した。

3.2　終局耐力と破壊性状

作用曲げモーメント M とたわみの関係を**図－３**に示



写真－２　阪神高速道路神戸線 62 番 RC 橋脚
（写真提供：阪神高速道路㈱，右写真：山側・左写真：海側より撮影）



写真－３　阪神高速道路神戸線 106 番 RC 橋脚
（写真提供：阪神高速道路㈱，上写真：山側・下写真：海側より撮影）

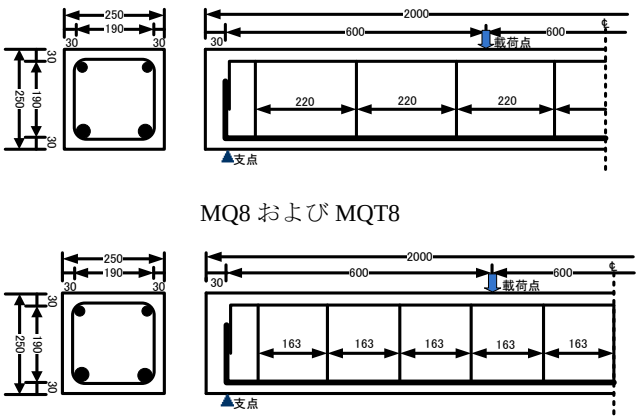
点線枠:ねじりとせん断で打ち消されたと見られる面
実線枠：ねじりとせん断の影響が重なり合った面

表－1　供試体名

供試体名	腹鉄筋比	腹鉄筋本数	載荷条件
	%	本	
MQ8	0.26	8	曲げ・せん断
MQT8	0.26	8	曲げ・せん断・ねじり
MQT11	0.35	11	曲げ・せん断・ねじり

表－2　使用したコンクリート

供試体名	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	静弾性係数
	N/mm^2			kN/mm^2
MQ8	35.1	3.51	4.72	22.7
MQT8	34.5	3.18	5.15	23.6
MQT11	26.2	2.64	4.64	26.4



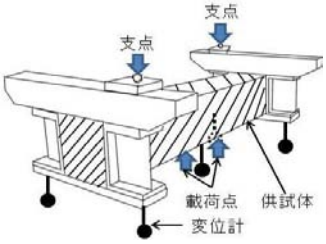
MQ8 および MQT8

MQT11

図－１　配筋図

表－3　使用した鉄筋

種別	材料	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び (%)
D-10	SD 295A	371	506	26
D-16		359	502	27



図－２　MQT 載荷試験装置

す。MQ8 は，終局耐力 M=35.7(kN・m)で典型的な曲げ引張破壊であった。MQT8 および MQT11 はそれぞれ，終局耐力が M=19.8(kN・m)および 23.7(kN・m)のねじりとせん断の影響が並存するせん断型破壊であった。以前から指摘[1] されているように，ねじりの作用は構造物の耐荷力に大きく影響をすることが認められた。

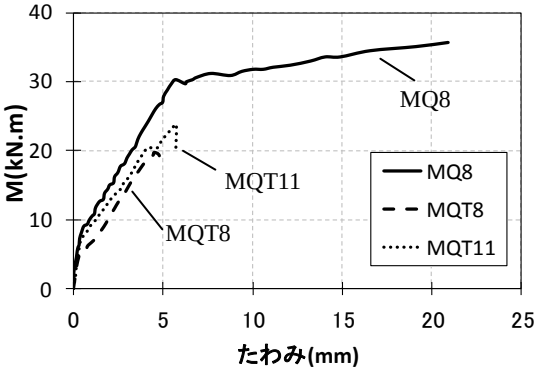
3.3　ひび割れ性状

供試体のひび割れ図を**図－４**に示す。なお，各面は上から順番に，側面 1，下面，側面 2，上面である。MQ8 は純曲げスパンに生じたひび割れが進展し，鉄筋降伏後に終局に至った。

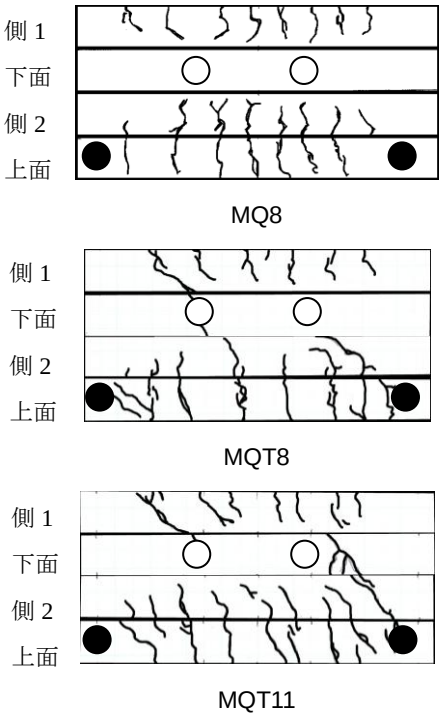
MQT8 および MQT11 では，側面 1・左側と側面 2・右側で斜めひび割れの発達による破壊を生じた。また，その対称となる側面 1・右側と側面 2・左側には 曲げひび割れが生じたが斜めひび割れは発達していない。曲げ・せん断にねじりが同時に作用する RC はりのひび割れ性状は，せん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が重なる面で，斜めひび割れが極端に発達し，一方，主引張応力方向が直交し影響が相殺される面では，斜めひび割れは生じず曲げひび割れのみが発生した。よって，一般的なせん断破壊と違い，側面の両サイドのひび割れ性状が全く異なる特徴的な破壊をすることが示された。

3.4　まとめ

曲げ・せん断載荷試験において曲げ引張破壊するRC はりでも，曲げ・せん断にねじりが同時に作用すると，ねじりの影響でせん断耐力が低下し，脆性的なせん断破壊に移行し，しかも，今回の場合ねじりの影響で終局耐力が約30%低下した。その折のひび割れ性状及び破壊性状は，せん断力とねじりによるそれぞれの主引張応力方向が重なる面で斜めひび割れが極端に発達して破壊に至る「局所的な破壊」であった。



図－３　作用曲げモーメント M とたわみの関係



図－４　ひび割れ図（※支点：●，載荷点：○）

4. 曲げ・せん断とねじりを同時に受ける RC 中空断面はりの壁厚が終局耐力とひび割れ性状に及ぼす影響

4.1 実験概要

供試体の概要を**表－４**に示し，配筋図を**図－５**に示す。本実験では壁厚を変化させた中空断面供試体を用い，ねじり作用と中空断面の壁厚方向の耐荷範囲に注力し，中空断面の内部ひび割れと外部ひび割れの比較により壁厚方向の破壊性状を明らかにすることを目的に行った。供試体概要は，全てに共通して断面寸法 250mm×250mm，スパンを 1800mm，上端軸筋および腹鉄筋に D10 を，下端軸筋に D16 を使用した。腹鉄筋比は 0.26%で統一した。コンクリート標準示方書［設計編：本編］では，箱型断面の設計ねじり耐力の算定について，壁厚の総計が部材全幅の 1/4 未満の場合は中空断面の算定式が示され，1/4 以上は中実断面の算定式が示される [3)]。よって，本実験では壁厚の総計が部材全幅の 1/4 未満の壁厚 25mm（以下，壁厚 25），それ以上の 50mm（以下，壁厚 50），75mm（以下，壁厚 75）の 3 種類に変化させている。載荷条件は曲げ・せん断にねじりを同時に作用させた。また，純ねじり荷重下ではかぶりコンクリートは初斜めひび割れ耐力には有効であるが，斜めひび割れ発生と同時にかぶり部分が剥離することにより，かぶり部分とコアコンクリートが別挙動を示し，かぶりが終局耐力には全く貢献していないことが長滝･岡本 [4)] らにより報告されている。よって，曲げ・せん断・ねじり荷重下においてもねじりの影響によりかぶり部分が剥離する可能性があり，また本実験ではひび割れ発生以降の現象，特に終局耐力に着目した考察を行うために全供試体共通でかぶりを 0 とした。なお，使用した鉄筋は 3.1 と同様で，使用したコンクリートの物性を**表－５**に示す。

載荷方法は 3.1 の MQT シリーズと同様の方法で，曲げモーメントとねじりの比率を T/M=0.42 として載荷試験を行った。

4.2 終局耐力と破壊性状

作用曲げモーメント M とたわみの関係を**図－６**に示す。なお，図中に MQT8 の実験データ(3.2)を引用した。壁厚 25 の場合では，終局耐力が 16.8(kN・m)のせん断型破壊となり，中実断面の MQT8 と比較して剛性が低下し，終局耐力も小となった。一方，壁厚 50 と壁厚 75 では，終局耐力が 19.3(kN・m)と 23.1(kN・m)となり，終局耐力および変形性状ともに中実断面の MQT8 とほぼ同様の傾向を示した。よって，示方書に示される通り，壁厚 25 と壁厚 50 以上では異なる耐荷挙動を示した。

4.3 ひび割れ性状

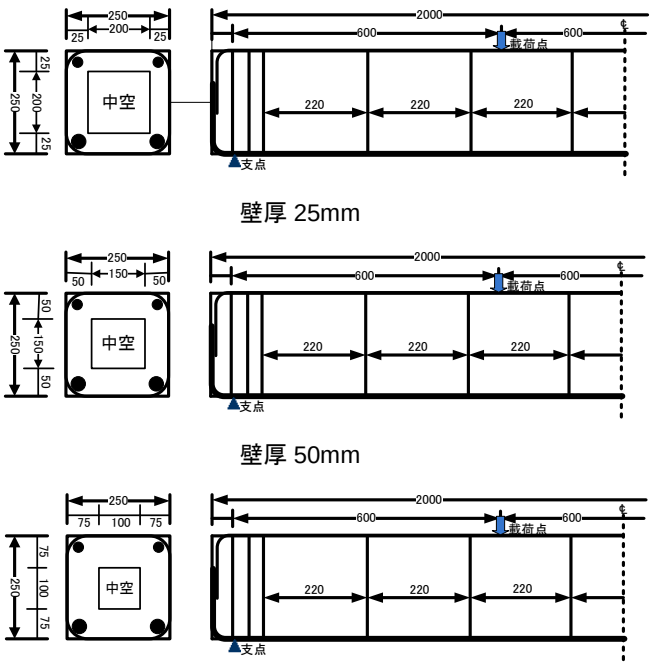
供試体のひび割れ図を**図－７**に示す。本実験では，中空断面供試体であり，中空部分の内部に現れたひび割れ図も示す。なお，各面は上から順番に，側面 1，下面，側面 2，上面である。いずれの壁厚の供試体も図の太線部分でのせん断型破壊である。また，かぶりが 0 であることから，一部にスターラップに沿った垂直のひび割れ

表－４　供試体名

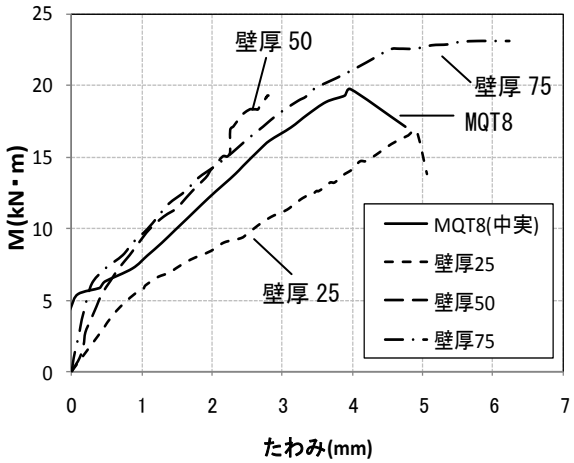
供試体名	腹鉄筋比 %	壁厚 mm	載荷条件
壁厚25	0.26	25	曲げ･せん断･ねじり
壁厚50		50	曲げ･せん断･ねじり
壁厚75		75	曲げ･せん断･ねじり

表－５　使用したコンクリート

供試体名	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	静弾性係数
	N/mm^2			kN/mm^2
壁厚25	32.8	2.45	4.1	23.8
壁厚50	36.8	3.15	2.65	28.2
壁厚75	36.8	3.15	2.65	28.2



図－５　配筋図



図－６　作用曲げモーメント M とたわみの関係

が生じた。

壁厚 25 の場合，壁の外側ひび割れ図と，壁の内側ひび割れ図の比較より，ひび割れ本数は外側ひび割れに多く，内側ひび割れは少ないことが分かる。なお，外側ひび割れにおいて，3.3 と同様にせん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が同一（重なる部分）で，ひび割れが多く発達し，打ち消し合う部分ではひび割れが少ないことがわかる。一方，中空断面の内面に発生した内側ひび割れを観察すると，せん断とねじりの主応力方向が重なる部分では一部ひび割れが貫通しているが，外側ひび割れよりも本数は非常に少なかった。また，せん断とねじりのそれぞれの主応力方向が打ち消し合う部分は外側ひび割れと同様に内側にはひび割れが見られなかった。

壁厚 50 と壁厚 75 の場合の外側ひび割れ性状は壁厚 25 の場合とほぼ同様にせん断とねじりの主応力方向が重なり合う部分でひび割れが発達し，打ち消し合う部分のひび割れはあまり発達していない。

4.4　まとめ

曲げ･せん断にねじりが作用して破壊した RC はりは，せん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が重なり合う部分での局所的な破壊であり，さらに斜めひび割れ深さ方向の進展は比較的浅く，一般的なせん断破壊の損傷と比べると，損傷程度は比較的小さいと思われた。ただし，壁厚の総計が部材全幅の 1/4 未満のような壁厚が薄い中空断面の場合は，中実断面と比較して，壁厚部のひび割れによる剛性低下と耐力低下を示す場合もあり，注意が必要である。

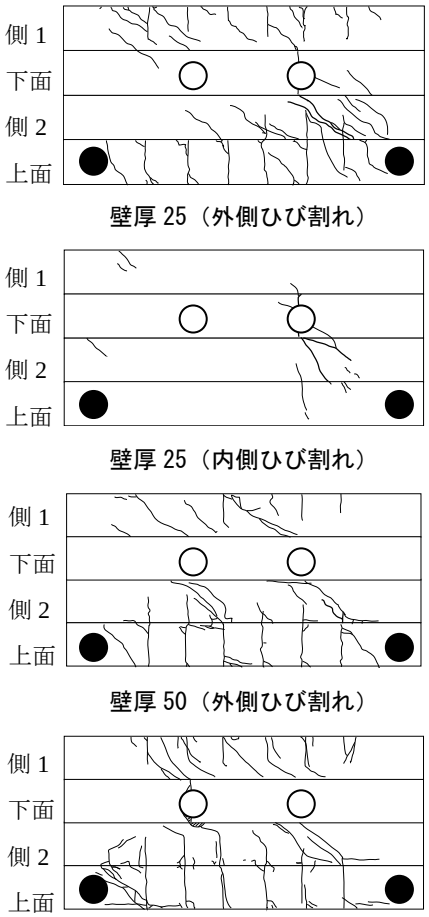
5.　曲げ・せん断にねじりを同時に作用させ最終耐力まで到達した RC 梁を用い曲げ・せん断のみの再載荷をした場合の耐荷挙動

5.1　実験概要

供試体の概要を表－６に示す。3.1 で曲げ・せん断とねじりの同時作用によりせん断型の破壊した MQT8，MQT11 の供試体と，4.1 で同じく曲げ・せん断・ねじりの同時作用によりせん断型の破壊した壁厚 25，壁厚 50，壁厚 75 の供試体の総計 5 体について，終局状態に達した RC はりの残存耐力を検証するために，ねじりを除く曲げ・せん断を再び作用させる載荷試験を実施した。載荷方法は，曲げスパン 600mm，せん断スパン 600mm の 3 等分一方向載荷試験を行った。

5.2　曲げ･せん断にねじりを同時に作用させ最終耐力まで到達した RC はりを用い，曲げ・せん断作用にて再載荷した場合の耐荷性状

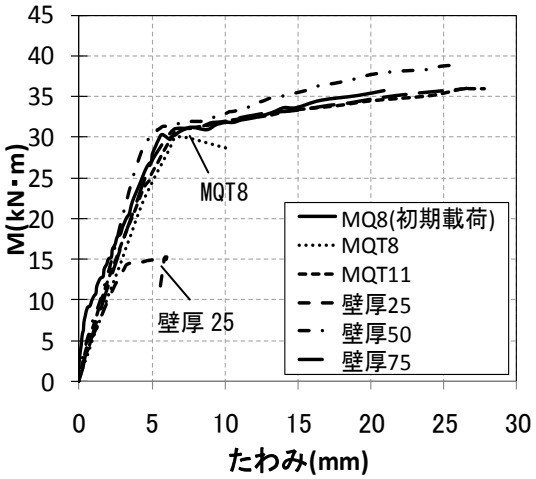
再載荷後における供試体の作用曲げモーメント M とたわみの関係を図－８に示す。壁内をひび割れが貫通した壁厚 25 供試体を除く全ての供試体で，初期曲げ･せん



図－７　ひび割れ図（※支点：●，載荷点：○）

表－６　供試体名（再載荷前条件）

供試体名	腹鉄筋比 %	壁厚 mm	曲げ･せん断･ねじり時破壊モード 初期載荷
MQT8	0.26	−	せん断型破壊
MQT11	0.35	−	
壁厚25	0.26	25	
壁厚50	0.26	50	
壁厚75	0.26	75	



図－８　作用曲げモーメント M とたわみの関係（再載荷試験結果）

断載荷（3.1 の試験結果：MQ8）と同等もしくはそれ以上の耐力を有していた。しかし，腹鉄筋比が 0.26%の MQT8 では，終局変位が小さいせん断破壊を示した。これは，曲げ・せん断・ねじりを同時に作用させた初期載荷の際に，斜めひび割れが進展し破壊した部分のスターラップが降伏していたことによると考えられる。同時に，腹鉄筋比が 0.35%の MQT11 では終局変位が大きく曲げ引張破壊を示したことから，腹鉄筋量によって再載荷でのせん断破壊を回避できることが示された。また壁厚 25 の場合は，曲げ・せん断・ねじりの作用させた初期載荷の際，せん断とねじりの主引張応力方向が重なり合う面の壁内コンクリートが壁厚全体で損傷し，再載荷時にこの壁厚部分のせん断耐荷性能が減少し，せん断破壊したと考えられる。

5.3　まとめ

曲げ・せん断にねじりを同時に作用させ終局耐力に達した RC はりを用い，ねじりを除く曲げ・せん断の作用により再載荷したはりの耐荷力は，曲げ・せん断のみの作用の初期載荷で破壊したはりと同等であり，十分な残存耐力を保持していると分かった。これは，再載荷試験を行っても，初期載荷時の損傷部分以外の部分でせん断に抵抗したと思われ，初期載荷による損傷は極めて局所的で，他の部分は再載荷前の状態では健全であったことが証明された。

すなわち，曲げ･せん断にねじりが同時に作用した RC はりは，せん断とねじりの主引張応力方向が重なる部分での局所的な破壊で，ひび割れの深さ方向への進展は浅く，損傷としては比較的軽微と考えられる。また，一度曲げ・せん断にねじりが同時に作用したことにより終局に達した RC はりでも，曲げ・せん断耐力は十分保持していることから，ひび割れ部分を補修・補強すれば構造物として供用できる可能性がある。

6.　結論

本研究は兵庫県南部地震により被災した構造物の写真より，当時あまり議論されなかったねじりの影響について検討を行った。本研究の範囲内で以下の結論を得た。

(1) 兵庫県南部地震で被災した構造物の写真より，ねじりが作用したとされる橋脚を見受けることができる。

(2) 設計において曲げ破壊する供試体が，ねじりの影響で，せん断破壊に移行する場合がある。

(3) ねじりが加わった構造物は，せん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が重なる部分と打ち消し合う部分のひび割れ性状は全く異なる。

(4) ねじりが加わった構造物において，断面の内部までひび割れが進展しているのは，せん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が重なる部分の一部であり，極めて局所的な破壊である。

(5) 曲げ･せん断にねじりが同時に作用するような組合せ断面力下で破壊した供試体は，ねじり作用を除外し，曲げ･せん断下で十分な残存耐力を有している場合があり，損傷を受けたのはごく一部分のみで，他の部分は健全である。

(6) 兵庫県南部地震で被災した構造物の写真より，ねじりが作用したとされる橋脚を見受けることができた。地震時にねじりの影響を受け被災した構造物は，撤去して作り直すのではなく，損傷部分を補修・補強することで構造物として供用できる可能性は十分あった。

謝辞：

本研究を進めるに当たり，　多くの方々のご意見やご助言を頂きました。特に，立命館大学理工学部都市システム工学科・水田　真紀助教，故竹内　正喜客員研究員（2011.8.17 逝去）には，実験を行う課程で，大変多くのご助言を頂きました。また，阪神高速道路株式会社から兵庫県南部地震時の貴重な被災写真を提供して頂きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

1) 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
2) 岡本　享久，李　承漢，長滝　重義：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.
3) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，pp.154-157
4) 長滝　重義，岡本　享久，宮坂　享明：純ねじり下にあるコンクリート部材のかぶりの役割，第 16 回セメント・コンクリート研究討論会研究報告集，pp59-64，1989.