

論文 ねじりと曲げ・せん断を同時に受ける RC 部材の破壊性状に及ぼすかぶりの影響

柳田 龍平*1・近藤 克紀*2・下川 信彦*3・岡本 享久*4

要旨: 本研究では、RC 供試体を対象に曲げ・せん断・ねじりを同時に作用させた載荷実験を実施し、各破壊形式におけるかぶりの破壊性状を確認したのち、同様の部材の有限要素法解析から、ねじりの影響による耐力の低下やかぶりの剥離について考察を行った。その結果、ねじりにより一般的なせん断破壊とは異なるひび割れが生じ、同一部材において、腹鉄筋に囲まれたコア部分とかぶり为一体となって破壊する面と、コア部分とかぶりが剥離する面が存在することを確認した。また、ねじりと曲げの比率を変化させた解析により、作用するねじりの割合によって、耐力、破壊形式およびかぶりの破壊性状が変わることを明らかにした。

キーワード: 曲げ・せん断・ねじり、かぶり、剥落、破壊形式、FEM 解析

1. はじめに

写真-1 に、兵庫県南部地震により損傷を受けた阪神高速神戸線の RC 製橋脚のひび割れ発生状況を示す。写真より、北側面と南側面でのひび割れ発生状況が異なっていた。これより、曲げ・せん断に加えてねじりも同時に作用した結果、各面において異なる形態のひび割れが発生したと推察することができた。また、阪神高速神戸線の被災状況を写真-2 に示している。このような被災状況になった理由は種々考えられるが、著者らは、地震により生じた揺れにより最弱の橋脚 1 本が倒壊し、ピルツ構造の橋脚が高架部と繋がる隣接した橋脚にねじりが作用し、次々と連鎖的に倒壊したと考察している。

このような背景から、著者らは震災後にあまり議論されなかったねじりモーメント（以下、ねじり）が部材に与える影響について検討した。著者らの既往の研究では、曲げ・せん断・ねじりが同時に作用する RC 供試体の載荷実験を実施し、ねじりの影響で部材両側面のひび割れ性状が異なり、ねじりとせん断の主応力方向が一致する面において顕著な斜めひび割れが発生し、せん断破壊に至ることを実験的に確認している¹⁾。また、長瀧、岡本らの研究^{2) 3)} および著者らの既往の研究⁴⁾ では、純ねじりが作用する部材のかぶりの剥離現象について考察を加えており、ねじり耐力にはかぶりコンクリートが寄与しないことが証明された。現在では、純ねじりが作用する部材については、スターラップの中心線をねじりによるせん断流の中心線と仮定して設計がなされている。しかしながら、実際の地震において、供用中の RC 部材にねじりが働く場合は、ねじりのみでなく曲げ・せん断が同時に作用する場合が一般的である。そのように、曲げ・

せん断にねじりが同時に作用する場合において、かぶりの破壊現象について考慮した検討はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、RC 供試体を対象として曲げ・せん断・ねじりを作用させた載荷実験を行い、かぶりの破壊現象について考察するとともに、有限要素法解析（以下、FEM）によってモデル化した部材に作用するねじりと曲げの比率を変化させ、ねじりの影響によるかぶりの破壊性状の変化に関して検討を加え、設計への基礎資料を得ることを目的とした。



(a) 北側面 (b) 南側面

写真-1 兵庫県南部地震により損傷を受けた RC 製橋脚のひび割れ発生状況



写真-2 阪神高速神戸線の兵庫県深江地域の被災状況

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)

*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科

*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)

2. 曲げ・せん断にねじりが同時に作用する RC 供試体のかぶりの破壊性状

2.1 実験概要

表-1に供試体の概要を示す。本研究では、曲げ・せん断・ねじりを同時に作用させる供試体を「MQT」とし、主鉄筋比が0.78%、1.55%となる供試体をそれぞれ1体作製した。なお、主鉄筋比は、 A_s/bd （ここで、 A_s : 主鉄筋2本分の断面積 (mm^2)、 b : 部材腹部の幅 (mm)、 d : 有効高さ (mm)）で算出している。算出した数値はシリーズ名の後に付与し、シリーズ名と主鉄筋比から供試体名称を付けている（表-1参照）。供試体の配筋図を図-1に示す。なお、図中の埋め込みゲージについては、その設置方法をのちに2.2で述べる。供試体は、いずれの場合においても、断面寸法250mm×250mm、スパン長1800mm、腹鉄筋のかぶり30mmに設定した。主鉄筋比が0.78%では、上端軸筋および下端軸筋にD16を、腹鉄筋にD10を用いた。一方、主鉄筋比が1.55%の場合は、上端軸筋および下端軸筋にD22を、腹鉄筋にD10を使用した。これより、腹鉄筋比(= A_v/b_s , A_v : 腹鉄筋1組の断面積 (mm^2)、 b_s : 部材腹部の幅 (mm)、 s : 腹鉄筋の間隔 (mm))は、主鉄筋比が0.78%の場合、1.55%の場合ともに0.38%となる（表-1参照）。設計基準強度 $f_{ck}=21\text{N/mm}^2$ としたコンクリートの強度試験結果および鉄筋の引張試験の結果を、表-2および表-3にそれぞれ示す。

表-1 供試体の概要

供試体名	軸方向鉄筋		腹鉄筋	主鉄筋比 (%)	腹鉄筋比 (%)
	上端	下端			
MQT0.78	D16		D10	0.78	0.38
MQT1.55	D22			1.55	

表-2 コンクリートの強度試験結果

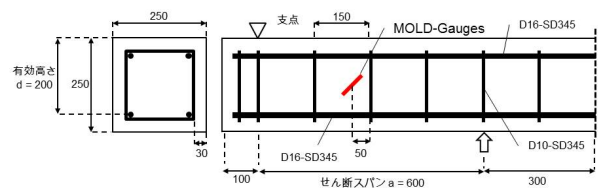
供試体名	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	ヤング係数
	N/mm^2			kN/mm^2
MQT0.78	21.2	2.56	4.35	27.6
MQT1.55	22.4	2.69	4.32	28.9

表-3 鉄筋の引張試験結果

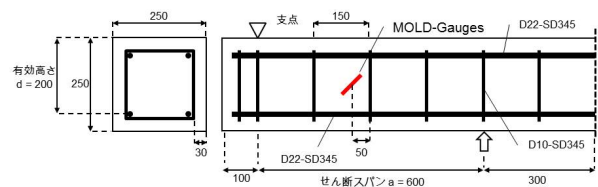
呼び名	種類の記号	断面積 mm^2	降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	降伏ひずみ $\mu\epsilon$
D10	SD345	71.3	383.3	548.1	2156
D16		198.6	361.9	554.9	1977
D22		387.1	373.3	559.0	2038

供試体の荷重は、等曲げスパン 600mm、せん断スパン 600mm とし、供試体幅方向の中心位置から幅方向に250mm の位置に点対称となるようにそれぞれの支点を設けた（図-2参照）。すなわち、ねじりアーム長は250mmとなる。なお、部材軸方向の伸びは無拘束であり、支点および荷重点のそれぞれの位置は、既往の研究^{1),5)}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 ）から決定している。すなわち、曲げ・せん断・ねじりが同時に作用する場合、 $T/M \geq 0.6$ で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し、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。これを参考に、曲げ・せん断の影響とねじりの影響の両方が供試体に現れた $T/M=0.42$ とした。なお、荷重点においては、供試体が自由に回転できるように荷重板を設置した（図-2参照）。

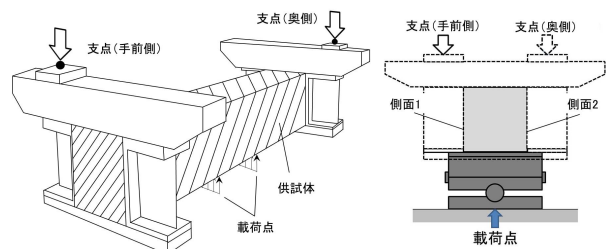


(a) MQT0.78 (単位: mm)



(b) MQT1.55 (単位: mm)

図-1 供試体の配筋図



(a) 斜投影図

(b) 正面図

図-2 荷重試験装置

2.2 実験結果および考察

(1) 終局耐力と破壊性状

曲げモーメント M とたわみ δ との関係を図-3に示す。なお、材軸方向中央部の部材端部に対する相対変位をたわみとした。MQT0.78においては、軸方向鉄筋が降伏した後に延性的にたわみが増大していく曲げ引張破壊となり、最終的には等曲げスパンの圧縮域においてコンクリートが圧壊に至り、終局耐力は $M=25.2(\text{kN}\cdot\text{m})$ となった。一方、MQT1.55においては軸方向鉄筋降伏の前にせん断スパン、特にせん断とねじりの主引張応力方向が一致する面において腹鉄筋が降伏し、最大耐力 ($M=31.5(\text{kN}\cdot\text{m})$) 後に急激に耐力が低下する脆性的なせん断破壊モードとなった。軸方向鉄筋量により、耐力や破壊モード

が異なることが本研究においても確認された。

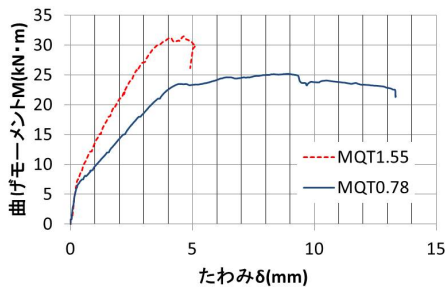


図-3 曲げモーメント M - たわみ δ 関係

(2) ひび割れ性状

各供試体のひび割れ発生状況を図-4にそれぞれ示す。なお、図中鉛直方向の点線は荷点および支点相当の位置を示している。いずれの場合においても、各面は上から順に、図-2の側面1、側面2をそれぞれ示している。図より、MQT0.78、MQT1.55ともに側面1・左半分と側面2・右半分で顕著な斜めひび割れが発生し、特にせん断破壊型となったMQT1.55では、斜めひび割れ幅が大きく、そのひび割れの直下において腹鉄筋が降伏したことが確認された。また、それと線対称となる側面1・右半分と側面2・左半分においては、ひび割れが生じているものの、斜めひび割れはほとんど発生していない。すなわち、曲げ・せん断にねじりが同時に作用する場合のひび割れ性状は、せん断とねじりのそれぞれの主引張応力方向が一致する面で斜めひび割れが極端に発生し、一方で主引張応力方向が直交し双方の影響が相殺される面では斜めひび割れは発生せず、ひび割れ間隔も大きくなる。したがって、曲げ・せん断にねじりが同時に作用する複合断面力下の破壊は、一般的なせん断破壊と異なり、両側面のひび割れ性状が全く異なる特徴的な破壊となる。

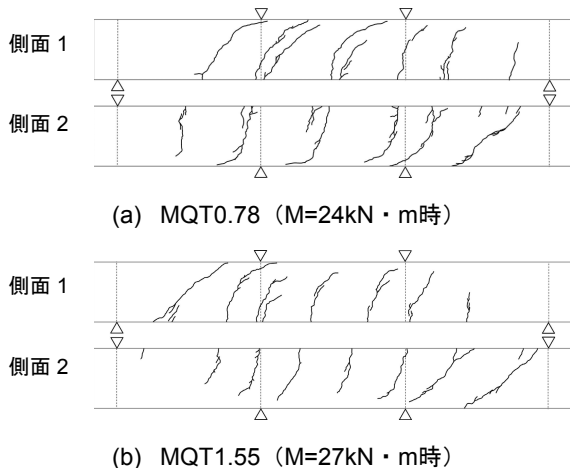


図-4 各供試体のひび割れ発生状況

(3) かぶりの破壊性状に関する考察

ひずみ測定用埋め込みゲージを、はり断面の中心から

50mm(コアコンクリート内部)、70mm(コアコンクリート内部)、90mm(スターラップの中心線)、110mm(かぶり部分)に、ねじりによる斜めひび割れが生じる方向と並行となるように、部材軸と45度の角をなす方向に各深さごとに配置し、腹部コンクリートのひずみを測定した。荷初期段階から斜めひび割れ発生まで測定したひずみ分布をそれぞれ図-5、図-6に示す。なお、せん断とねじりの主応力方向が一致し双方の影響が重なり合うせん断スパン(以下、重合面)およびせん断とねじりの主応力方向が直交し双方の影響が打ち消しあうせん断スパン(以下、打消面)においてひずみ分布が異なることが考えられたため、両せん断スパンの側面2側に埋め込みゲージを設置した。その材軸方向位置は、図-1のようにせん断スパンの中心から部材端部の方向へ50mmの位置である。また、図-5a)およびb)は、それぞれ図-4(a)の側面2における左側および右側のスパンのひずみ分布であり、同じく図-6a)およびb)は、それぞれ図-4(b)の側面2における左側および右側のスパンのひずみ分布である。

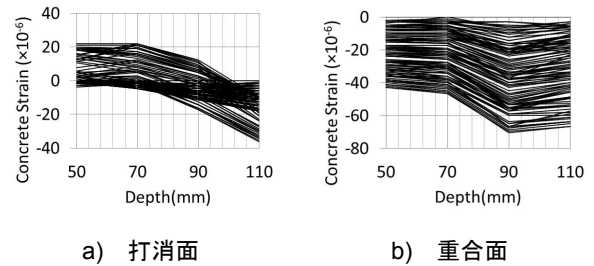


図-5 断面深さ方向のひずみ分布図 (MQT0.78)

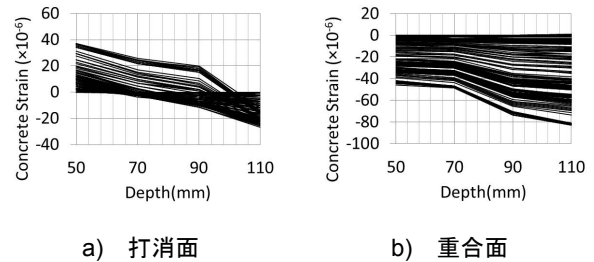


図-6 断面深さ方向のひずみ分布図 (MQT1.55)

図より、打消面においては、コア部分は引張側に、かぶり部分は圧縮側に分布していることがわかる。また、鉄筋位置の深さ80mmから100mm付近においてひずみがおおよそゼロとなっている。一方、顕著な斜めひび割れが卓越した重合面においては、概ね連続的に圧縮ひずみが分布しており、引張ひずみは生じていない。

すなわち、打消面においては曲げによるせん断の主ひずみ方向とねじりによる主ひずみ方向が直交する状態にあるため、断面内部のコア部分は曲げによるせん断の影響により引張側に、断面外周上にあるかぶり部分ではねじりの影響でひずみが圧縮側となり、かぶりが剥離することが認められた。一方で、重合面においては顕著な斜

めひび割れが生じるものの、せん断とねじりの主応力方向が一致するため、コア部分とかぶり部分は概ね一体的に破壊が進行し、かぶりの剥離は生じない。

以上のことから、 $T/M=0.4$ と曲げが主体となる荷条件にありながらも、部材全面に生じるねじりの影響によって、部材の一部においては純ねじりが生じる場合と同様に、かぶりがプッシュオフされる状態になるといえる。

3. FEM を用いた耐力・変形解析

本章では、2章に示した荷結果をFEMを用いて再現し、部材に生じるねじりと曲げの割合の変化がかぶりの破壊に与える影響について検討した。すなわち、既往の研究⁵⁾において指摘されているように、ねじりの作用は構造物の耐力と破壊モードに大きく影響する。そこで、 T/M を変化させることで作用するねじりの割合を変化させ、ねじりと部材の耐力、破壊形式およびかぶりの破壊性状の関係について考察した。以下にその詳細を示す。

3.1 解析概要

解析の対象とした供試体は、2章で示したMQT0.78とMQT1.55とした。解析に用いたコンクリートの材料特性値を表-4に示す。鉄筋の物性値は、表-3に示すとおりである。解析で使用したソフトは、汎用のFEM解析ソフト：ATENAである。図-7に解析モデルを示す。コンクリートおよび荷治具は、いずれも8節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。荷点や支点において実現象と異なる応力集中が発生する可能性があるため、荷板も併せてモデル化した。なお、鉄筋は埋め込み式離散鉄筋として定義し、コンクリートと鉄筋は完全付着状態にあると仮定した。

また、ひび割れモデルは、固定ひび割れモデルを設定した。なお、この固定ひび割れモデルは、Collins・Vecchioraが提案した修正圧縮場理論⁶⁾でのひび割れ発生後のせん断強度算定式を用いている。よって、ひび割れ幅の増大に伴ってせん断強度は低減すると仮定した。

表-4 定義したコンクリートの材料特性値

f_c (N/mm^2)	f_t (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	G_F (N/m)
24.3	2.26	25.0	78.6

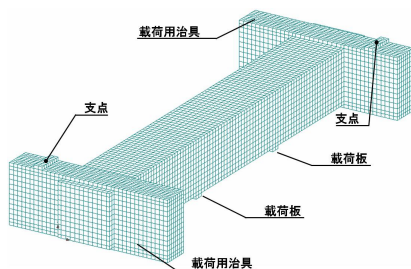
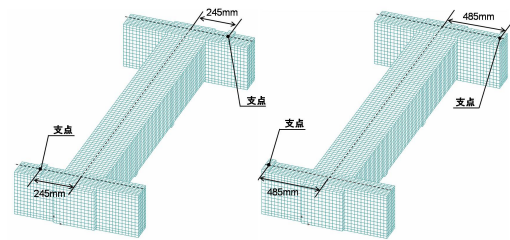


図-7 解析モデルの概要

T/M に関しては、支点の位置を変え、ねじりアーム長を変化させることで、 $T/M=0,0.2,0.4,0.6,0.8$ の5ケースを設定した。 $T/M=0.4$ および0.8の例を図-8に示す。なお、 $T/M=0.4$ のケースは2章の実験と同様のアーム長である。



a) $T/M=0.4$ b) $T/M=0.8$

図-8 支点条件

3.2 耐力・変形解析の結果および考察

各解析結果の耐力と破壊形式を表-5に示し、図-9に解析により得られた各供試体の曲げモーメント M - たわみ δ の関係を、図-10に解析によって得られた $T/M=0.4$ の際の部材表面の最大主ひずみ分布図をそれぞれ示す。なお、表中の M_{ly} および M_{wy} はそれぞれ主筋と腹鉄筋の降伏耐力、 M_u は最大耐力であり、 δ はその荷重段階でのたわみである。表と図より、 T/M が大きくなるに従い、耐力および変形性能が低下し、MQT1.55においては、 T/M が大きくなるに従って、主筋降伏先行の曲げ破壊型から腹鉄筋降伏先行のせん断破壊型に移行した。表-5において、MQT0.78とMQT1.55の降伏耐力を実験値と計算値と比較したところ、 $T/M=0.4$ ではMQT0.78で $M_{lyTest}/M_{lyCal}=0.97$ 、MQT1.55で $M_{wyTest}/M_{wyCal}=0.87$ となり、最大耐力と変形の両面で実験を追従できたといえ、破壊形式が実験と一致し、解析における最大主ひずみ分布と図-4の実験のひび割れの向き、箇所が類似してい

表-5 耐力および破壊形式

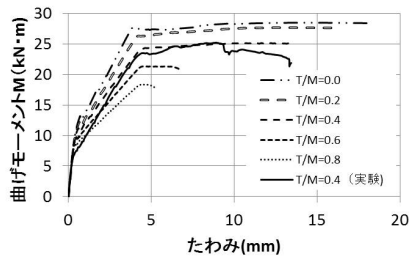
(a) MQT0.78

名称	T/M	M_{ly}	δ_{ly}	M_u	δ_u	破壊形式
		$kN \cdot m$	mm	$kN \cdot m$	mm	
MQT0.78-0.0	0	27.7	3.90	28.4	18.1	曲げ引張破壊
MQT0.78-0.2	0.2	26.2	4.13	27.6	16.1	
MQT0.78-0.4	0.4	24.2	4.46	25.1	12.8	
MQT0.78-0.6	0.6	20.8	4.18	21.2	6.41	
MQT0.78-0.8	0.8	18.1	4.19	17.6	5.23	
MQT0.78実験	0.4	23.5	4.43	25.2	8.84	曲げ引張破壊

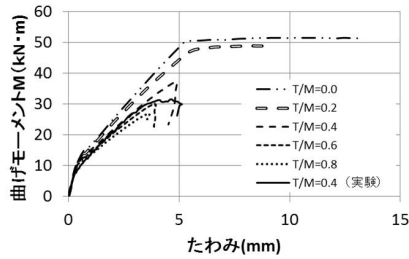
(b) MQT1.55

名称	T/M	M_{ly}	δ_{ly}	M_u	δ_u	破壊形式
		$kN \cdot m$	mm	$kN \cdot m$	mm	
MQT1.55-0	0.0	50.2	5.27	51.4	12.4	曲げ引張破壊
MQT1.55-0.2	0.2	44.5	5.05	48.8	8.98	
名称	T/M	M_{wy}	δ_{wy}	M_u	δ_u	破壊形式
		$kN \cdot m$	mm	$kN \cdot m$	mm	
MQT1.55-0.4	0.4	35.7	4.91	37.2	4.89	せん断破壊
MQT1.55-0.6	0.6	29.9	3.90	30.1	3.89	
MQT1.55-0.8	0.8	26.7	3.65	26.8	3.61	
MQT1.55実験	0.4	30.9	4.91	31.5	4.65	

ることから、解析結果は概ね妥当と考えられる。

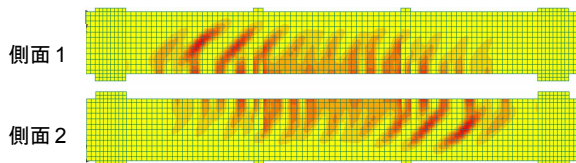


(a) MQT0.78

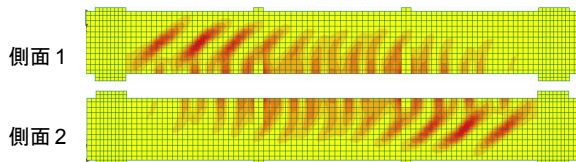


(b) MQT1.55

図-9 曲げモーメント M-たわみ δ 関係



(a) MQT0.78



(b) MQT1.55

図-10 最大主ひずみ分布 (T/M=0.4)

以上のように、RC 部材を対象に、T/M を変数として曲げ・せん断・ねじりを同時に作用させる解析を行い、部材全体の耐荷力および破壊形式を観察すると、本研究

の T/M=0 から 0.8 までの範囲に関しては、曲げ引張破壊とねじりと曲げ・せん断の組み合わせ断面力によるせん断破壊に分類されることが確認された。またその際、T/M が大きくなり、ねじりの影響が大きくなるに伴って耐荷力は低下し、変形性能が低下する。

3.3 かぶりの破壊性状

2章の実験と同様に、各荷重段階における部材軸と 45度をなす方向のコンクリートひずみを確認した。MQT0.78 における断面深さ方向のひずみ分布図を表-6 に、MQT1.55 における断面深さ方向のひずみ分布図を表-7 に示す。

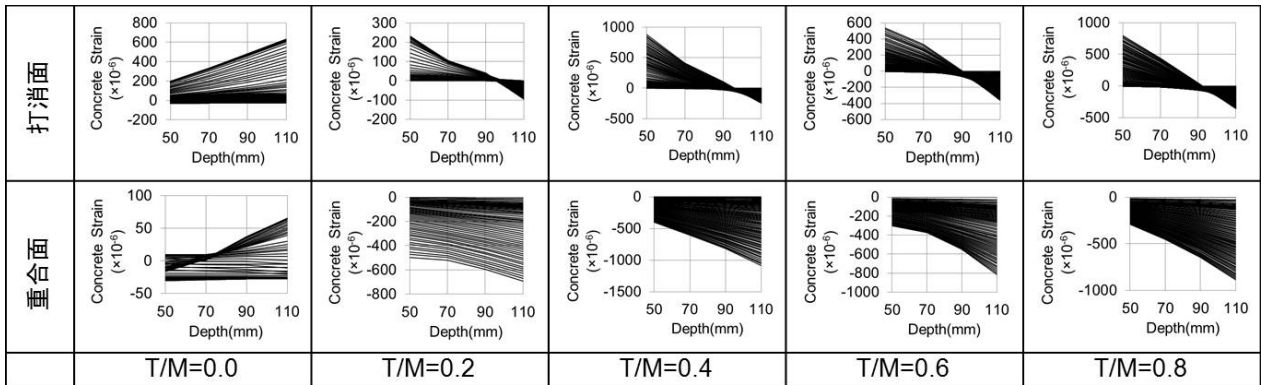
表-6 および表-7 より、T/M=0 の場合、単純な曲げせん断荷の状態にあるため、どの面においてもほとんど直線的・連続的にひずみが分布している。一方で、ねじりを同時に受けるものに関しては、断面内部と外周部分でひずみ分布は異なる。変形の増大に伴い、打消面ではコアのひずみが次第に引張側に、かぶりにおいては次第に圧縮側に移行し、そのひずみが 0 となる位置は深さ 80mm から 100mm 程度の位置であることがわかる。すなわち、コアとかぶりの境目に中立軸の位置が移動する。またそれは、T/M が大きくなり、曲げに比べてねじりが支配的になるにつれより顕著になる。一方で、重合面においては、コア部分からかぶり部分までほぼ一様に圧縮側に分布している。

したがって、実験結果と同様に、せん断とねじりの主応力方向が一致する重合面においては、T/M=0.8 とねじりが支配的になったとしても、コアとかぶりはほとんど一体となって破壊が進行するため、かぶりの剥離は生じないといえる。一方、せん断とねじりの主応力方向が直交し、双方の影響が相殺される打消面においては、T/M=0.2 とねじりの影響がごくわずかであっても、コアは曲げによるせん断力によって引張側に、かぶり部分はねじりの影響によって圧縮側にひずみが卓越し、コア部分からプッシュオフされる状態となるため、かぶりの剥離が生じる可能性は十分に考えられる。

表-6 断面深さ方向のひずみ分布図 (MQT0.78)

	T/M=0.0	T/M=0.2	T/M=0.4	T/M=0.6	T/M=0.8
打消面					
重合面					

表一七 断面深さ方向のひずみ分布図 (MQT1.55)



4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にそれぞれ示す。

- 1) RC 供試体を対象として、 $T/M=0.4$ となる曲げ・せん断・ねじり載荷実験を実施した。そのひび割れ発生状況は、一般的なせん断破壊におけるものとは異なり、供試体両側面において特徴的なひび割れが発生することを把握した。特に、せん断とねじりの主応力方向が一致する箇所においては、腹鉄筋が降伏し、せん断破壊に至る場合がある。
- 2) また、 $T/M=0.4$ とねじりの影響が小さい場合であっても、純ねじり下と同様のかぶりの剥離が生じることが明らかとなった。特に、せん断とねじりの主応力方向が一致する面においては剥離は進行せず、せん断とねじりの影響が打ち消される面において剥離が進行する。
- 3) 上記 1), 2) の実験に関して、供試体に生じるねじりと曲げの割合を変化させて FEM による再現解析を行い、ねじりが支配的になると部材の耐力、および変形性能が低下することが明らかとなった。特に、曲げ・せん断載荷で曲げ引張破壊する部材であっても、ねじりと鉄筋量の影響を受けてせん断破壊に移行する場合がある。
- 4) 上記 3) の解析から、 T/M が大きくなったとしても、せん断とねじりの主応力方向が一致する面においては剥離は起きない可能性がある。ただし、ねじりの影響を受けて顕著な斜めひび割れが卓越するため、注意が必要である。

5. 今後

実際に地震の様な外力が RC 部材に作用する場合、例えば、ねじりを受ける場合であっても、それは一方方向のみ作用するのではなく、地震による揺れにより交番ねじりとなって作用するものとして捉える必要がある。その場合も今回の様に曲げ・せん断・ねじりの

複合断面力が作用すると考えられる。よって本来、本研究のように静的一方向載荷だけではなく、正負交番載荷についても検討するべきである。一方向載荷によって部分的にかぶりの剥離が生じた場合、その分のウェブ厚が減少するため、次の負方向の載荷の際には、より耐力力が低下し、脆性的な破壊に及ぶ危険性がある。今後は、曲げ・せん断・ねじりの交番載荷の場合において、かぶりの挙動に関して検討する必要がある。

参考文献

- 1) 前田祐助, 加藤慎介, 岡本享久: 曲げ・せん断と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, コンクリート工学年次論文集, 34 巻, 2 号, pp.619-624, 2012
- 2) 長瀧重義, 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, セメント・コンクリート研究討論会論文報告集 vol.16th, pp.59-64, 1989
- 3) 岡本享久, 李承漢, 長瀧重義: 鉄筋コンクリート部材のねじり耐力機構に関する一考察, 土木学会論文集, 第 390 号, V-8, pp.179-188, 1988.2
- 4) 佐々木優介, 渡邊有輝, 前田祐助, 岡本享久: 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, コンクリート工学年次論文集, 第 32 巻, 2 号, pp709-714, 2010.
- 5) 岡本享久, 長瀧重義: 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, pp.81-89, 1985.8
- 6) Vecchio, F.J. and Collins, M.P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Proc. V.83 No.2, Mar-Apr. 1986, pp. 219-231.