論文　純ねじりを受けるRC中空断面部材の斜め圧縮破壊耐力の評価

近藤　克紀[*1]・柳田　龍平[*2]・下川　信彦[*3]・岡本　享久[*4]

要旨：本研究では，近年の地震による甚大な被害或いは高耐久性の要求からRC構造の鉄筋量とかぶりがより大きくなる傾向にあることを踏まえ，鉄筋を過剰に配置したRC中空断面部材が純ねじりを受ける最大耐力を載荷実験およびFEM解析から検討した。土木学会コンクリート標準示方書における腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力(最大ねじり破壊耐力)ではこのかぶりの影響を明確にしていない。本研究では，かぶりと壁厚の影響を同時に受けやすい中空断面部材の場合，壁厚/部材幅とかぶりの影響の両方に配慮しないと正しい斜め圧縮破壊耐力を得ることができないことを指摘し，この種部材に関する基礎的な設計資料を提供する。

キーワード：純ねじり，RC構造，過鉄筋，中空断面，壁厚，かぶり，斜め圧縮破壊耐力

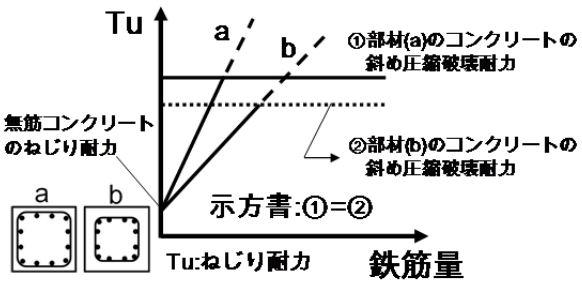
1. はじめに

日本ではここ20年の間に大地震を経験し，土木構造物は甚大な被害を受けた。これらの経験を踏まえ，被害を未然に防ぐ対策が必要である。設計に関して，鉄筋量を増大させることで耐力を向上させることが可能であるが，ここでコンクリートの圧壊を引き起こさないためにも釣り合い鉄筋量を考える必要がある。ほとんどの場合，曲げ，せん断および軸力に対する耐荷力の照査が行われている。しかし，地震の様な複雑な荷重条件が作用する場合は，ねじりが作用することがあり，ねじりの影響についても考慮する必要がある。また，近年構造物の長寿命化により，かぶりを増大させる傾向にある。長瀧らの研究[1)]により，ねじりが作用すると斜めひび割れ発生後，かぶりは剥離し，終局耐力に寄与しないことがわかっている。またCollinsら[2)]は，特にかぶりが断面に占める割合が大きいものに関しては，かぶりの剥離による影響を考慮する必要があるとしている。一方，土木学会コンクリート標準示方書[3)]（以下，示方書）では，ねじりによる腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力（以下，斜め圧縮破壊耐力）において，かぶりの剥離による影響まで考慮していない。以上のことから，斜め圧縮破壊耐力についての耐荷機構を明らかにし，より実現象に則した設計を行う必要がある。そこで，本研究ではかぶりの剥離による影響を顕著に受けると考えられるRC中空断面部材を対象に，斜め圧縮破壊耐力を検証した。

はじめに，鉄筋を過剰に配置したRC中空断面供試体を対象に純ねじりを作用させた載荷を行い，コンクリートの斜め圧縮破壊耐力について考察を行った。ここでは，断面寸法が同一でかぶりの有無に対して比較実験を行うことで，かぶりがねじり耐力に及ぼす影響を検証した。また，かぶりの影響を無視するためにかぶり厚を0mmとし，壁厚/部材幅（以下，t/b）を変化させて実験および解析を行うことで， t/bとねじり耐力の関係を検証した。さらに，RC中空断面部材に対する示方書の課題についても論じた。

2. 本研究の位置づけ

鉄筋量とねじり耐力の関係の模式図を**図－1**に示す。示方書では斜め圧縮破壊耐力をサンブナンねじり(単純ねじり理論)に基いて算出している。よって，同一断面でかぶり厚が異なる正方形断面RC部材，部材aと部材bでは，断面寸法が同じため，同一の斜め圧縮破壊耐力を有することになっている。しかし，ねじりが作用すると，斜めひび割れ発生後にかぶりは剥離するため，斜め圧縮破壊耐力に対してもかぶりが機能しなくなることが予想される。よって，部材bではかぶりが大きく，かぶりの剥離による影響が顕著に表れるため，部材aよりも耐力が小さくなると推測できる。そこで，著者らは断面寸法からではなく，かぶりを除いた部分の寸法によって斜め圧縮破壊耐力が決定するという仮定の基に研究を行った。



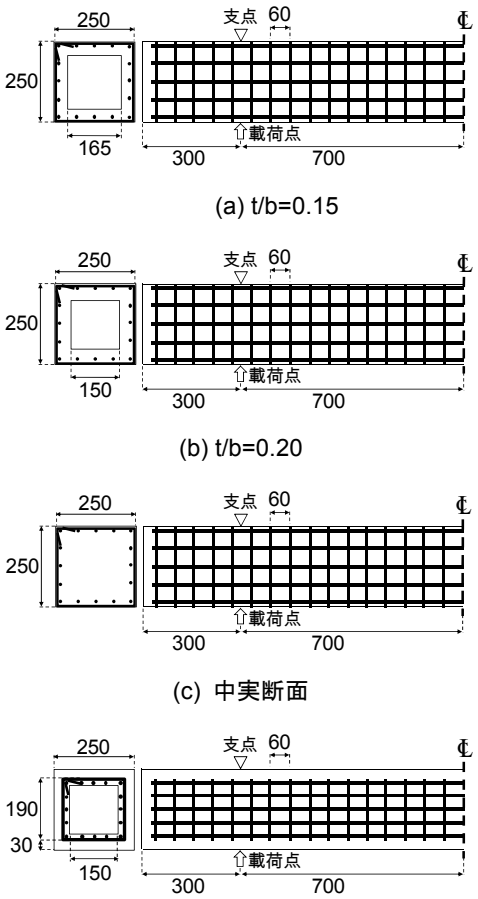
図－1　鉄筋量とねじり耐力の関係

*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）

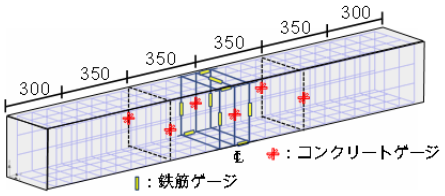
2. 実験概要

2.1 使用材料および設計

鉄筋の引張試験および材齢 7 日におけるコンクリートの強度試験の結果を**表－1** および**表－2** にそれぞれ示す。また，断面図および配筋図を**図－2** に，鉄筋ゲージおよびコンクリートゲージの貼付位置を**図－3** に示す。**図－2** に示すように，外寸 250×250mm，スパン 1400mm とし，壁厚 37.5mm（t/b=0.15）の中空断面部材，壁厚 50.0mm（t/b=0.20）の中空断面部材および中実断面部材を作製した。なお，かぶりの剥落による断面欠損が斜め圧縮耐力に及ぼす影響を無視するため，かぶり厚さは 0mm とした。また、上記の t/b=0.20 と断面寸法およびスパンが同一でかぶり厚を 30mm とした t/b=0.20(かぶり有り)の中空断面部材も作製した。いずれの供試体も軸方向筋には D10×16 本，腹鉄筋に D10 を 60mm 間隔に配置した。なお，鉄筋を過剰に配筋することでコンクリートの圧壊先行型となるように設計している。t/b=0.15，t/b=0.20 および中実断面において，腹鉄筋および軸方向鉄筋に流れる等価せん断流はともに 455.32(N/mm)とし，偏りがないようにバランス良く鉄筋を配置した。腹鉄筋に流れる等価せん断流は，$q_w=A_{tw}\cdot f_{wd}/s$[A_{tw}：腹鉄筋 1 組の断面積(mm^2)，f_{wd}：腹鉄筋の降伏強度，s：腹鉄筋の間隔（mm)]で算出している。また，軸方向鉄筋に流れる等価せん断流は，$q_l=\Sigma A_{tl}\cdot f_{ld}/u$[($\Sigma A_{tl}$：軸筋の断面積（mm^2)，$f_{ld}$：軸筋の降伏強度，$u$：腹鉄筋の中心線の長さ（mm)]で算出している。また，t/b=0.20(かぶり有り)では q_w=455.32(N/mm)，q_l=607.10(N/mm)とした。ここでは、t/b=0.20 と t/b=0.20(かぶり有り) において比較実験を行うことで，かぶりと斜め圧縮破壊耐力の関係の検証を行った。また，かぶりの影響を無視した条件下において，t/b=0.15，t/b=0.20 および中実断面において比較実験を行うことで，t/b とねじり耐力の関係について検証を行った。



図－2　断面図および配筋図（単位：mm）



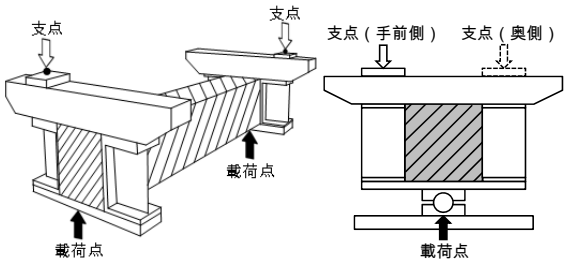
図－3　ゲージの貼付位置（単位：mm）

表－1　鉄筋引張試験結果

呼び名	断面積	降伏点	引張強度	降伏ひずみ
	(mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	($\varepsilon\times10^{-6}$)
D10	71.3	383.3	548.1	2156

表－2 コンクリートの物性試験結果

供試体	圧縮強度	曲げ強度	引張強度	ヤング係数
	(N/mm^2)			(kN/mm^2)
t/b=0.15	16.3	3.08	1.73	21.7
t/b=0.20	15.3	2.80	1.42	19.1
中実断面	12.4	2.73	1.35	18.2
t/b=0.20(かぶり有り)	15.8	2.94	1.58	20.4



図－4　載荷試験装置

2.2 載荷試験方法

図－4 に示すように RC 部材の軸方向中心から直角方向 250mm の位置に点対称となるように支点をそれぞれ設け，ねじりを供試体に作用させた。また，下面の載荷点の治具を梁の軸中心に回転できるように設置し，曲げおよびせん断力が作用しないようにした。変位計はスパ

ン中心から 600mm の位置に，対称に計 4 箇所に取り付けた。端部の治具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。

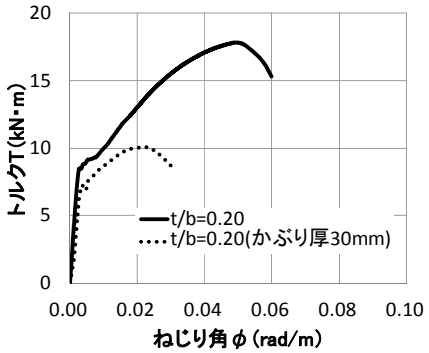
3. 実験結果

3.1 かぶりがねじり耐力に及ぼす影響

長瀧らの研究[4]および著者らの既往[5]の研究では，純ねじりを受ける RC はりにおいて，斜めひび割れ発生後にかぶりは剥離し，ねじりに対しスターラップ内部のコアコンクリート部分のみが有効であることを実験的に確認している。よって，中空断面ではねじりに対して有効に働くコアコンクリート部分の面積が小さいため，かぶりの剥離後，耐力が顕著に低下すると予想される。ここでは，t/b=0.20 の供試体において，かぶりの有無による耐力への影響を比較することでかぶりとねじり耐力の関係についての検証を行った。

(1) トルク-ねじり角

実験により得られた各供試体のトルク-ねじり角の関係を**図－5** に示し，**表－3** に各供試体の終局耐力および破壊形式を示す。いずれの供試体においても，ねじりによる腹部コンクリートの圧縮破壊先行型の破壊形式となった。かぶり有りのものにおいて終局耐力が T=10.11 (kN・m)であり，かぶり無しのものより 43%低い終局耐力を示した。このように，外寸法および壁厚が同一であっても，かぶりが有るものはかぶりが無いものに比べ，ねじり耐力が小さくなることが確認できた。このように，かぶりはねじり耐力に大きな影響を及ぼす場合があるため，合理的な設計においてはかぶりの剥離現象を無視することができないと考えられる。



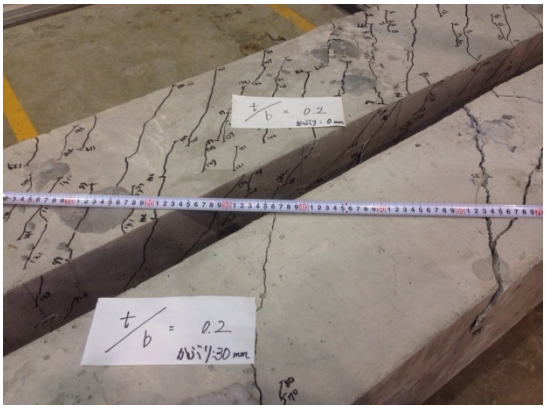
図－5　トルク-ねじり角

表－3　各供試体の終局耐力および破壊形式

供試体	t/b=0.20	t/b=0.20 (かぶり有り)
終局耐力(kN・m)	17.85	10.11
破壊形式	圧壊	圧壊

(2) ひび割れ図

実験により得られた各供試体のひび割れ性状を**写真－1** に示す。いずれの供試体においても，ねじりによる斜めひび割れ間に部材軸と水平方向のひび割れが生じた後，コンクリートの圧壊によって終局を迎えた。**写真－1(a)** を見ると，かぶり無しのものはかぶり有りと比べて，ひび割れの本数が多いことがわかる。これは，かぶり無しのものではコンクリート表面と腹鉄筋の表面が同一面にあり，剥離現象が生じないため，ひび割れの分散性が良くなったことでひび割れの本数が増加したと推測される。また**写真－1(b)** を見ると，かぶり有りのものでは斜めひび割れ発生後，ひび割れ幅の拡大が著しくみられた。これは，かぶりが剥離し，かぶりと軸方向鉄筋および腹鉄筋との間での力の伝達が行われなくなったことで，かぶり部分のひび割れの本数は増加せず，ひび割れが拡幅したと推測される。以上より，ひび割れ性状からかぶりコンクリートの剥離現象を把握することができた。



(a)　ひび割れ性状の比較

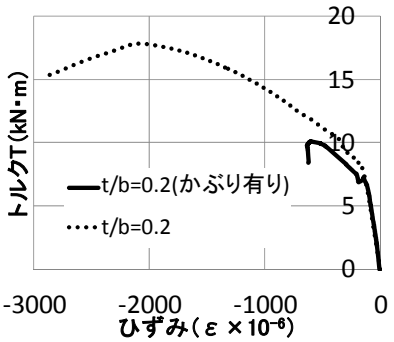
(b)　ひび割れ幅の拡幅[t/b=0.20(かぶり有り)]

写真－1　ひび割れ性状

(3) トルク-コンクリートひずみ

t/b=0.20 および t/b=0.20(かぶり有り)のコンクリートひずみを**図－6** に示す。また，ゲージの貼付位置は**図－3** に示してある。ここでは，圧縮ひずみが最大となったコ

ンクリートゲージの結果を示している。なお，いずれの供試体においても，斜め 45°に貼り付けたコンクリートゲージにおいて圧縮ひずみが最大となった。かぶり有りのものでは，斜めひび割れが発生するまで，かぶりが無いものと同様のひずみの増加傾向を示した。しかし，斜めひび割れ発生後，かぶりが無いものと比べ，ひずみの増加が緩和された。これは斜めひび割れ発生後、かぶりが剥離したことによる影響とみられる。なお、いずれの供試体においても腹鉄筋，軸方向鉄筋ともに降伏しておらず，コンクリートの圧壊により終局を迎えた。



図－6　コンクリートひずみ

(4) 示方書によるねじり耐力算定式の検討

実験値および示方書による耐力算定を行った結果を**表－4** に示す。示方書によるコンクリートの斜め圧縮破壊耐力 M_{tcu} では，かぶり厚を考慮していないため，計算上は t/b=0.20 と t/b=0.20(かぶり有り)は同じ耐力を有している事になる。しかし，t/b=0.20(かぶり有り)における実験値は示方書より小さいことがわかる。このように，かぶりの有無によって耐力に大きく差が生じるため，かぶり厚を考慮した算定を行う必要があると言える。特に，本実験供試体のように，断面に対してかぶりが占める面積が大きいものほど, 注意して設計しなければならない。

表－4　実験値および示方書による算定値

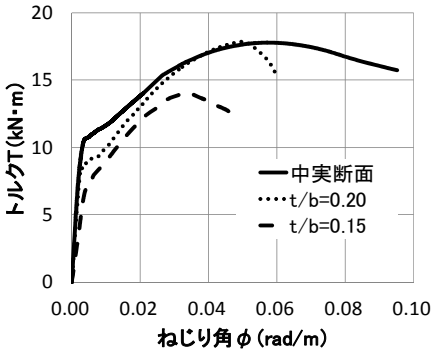
供試体	t/b=0.20	t/b=0.20 (かぶり有り)
終局耐力(kN･m)	17.85	10.11
示方書M_{tcu}(kN･m)	15.59	15.84

3.2 t/bとねじり耐力の関係

中実部材ではねじりによるせん断応力は断面の図心位置で0となり, 周辺に向かうにしたがって大きくなるため，断面の中心部はほとんど耐力に寄与していない。そのため，中空断面部材においてt/bがある程度大きくなると中実断面と同等の耐力を有するといえる。ここでは，かぶりの影響を無視するためにかぶり厚を0mmとし，t/b=0.15，t/b=0.20および中実断面供試体を比較することでt/bとねじり耐力の関係についての検証を行った。

(1) トルク-ねじり角

実験により得られた各供試体のトルク-ねじり角の関係を**図－7** に示し，**表－5** に各供試体の終局耐力および破壊形式を示す。いずれの供試体においても，ねじりによる腹部コンクリートの圧縮破壊先行型の破壊形式となった。中実断面では終局耐力が T=17.80(kN･m)であった。また，t/b=0.20 では終局耐力が T=17.85(kN・m)であり，中実断面と同等の終局耐力を有した。これに対して，t/b=0.15 においては終局耐力が T=14.06(kN・m)であり，t/b=0.20 と中実断面より終局耐力が 21%低い結果となった。ここから，ねじり耐力において t/b=0.20 付近を境に終局耐力が大きく変化することがわかる。以上より，コンクリートの斜め圧縮破壊耐力に関しては，t/b が 0.20 以上の場合は中実断面と同等のねじり耐力を有するが，t/b が 0.20 未満の場合は t/b が小さくなるほど耐力が低下すると推測される。ここで，本実験では各供試体の設計圧縮強度は同一だが, 圧縮強度にバラツキが生じたため，材料強度の違いによる影響を考慮する必要がある。したがって，4.2 では，材料強度の違いによる影響を考慮して，t/b とねじり耐力の関係について論じることとした。



図－7　トルク-ねじり角

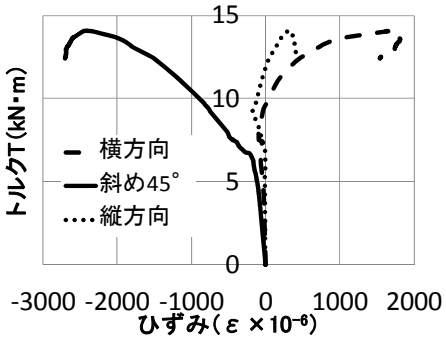
表—5　各供試体の終局耐力および破壊形式

供試体	t/b=0.15	t/b=0.20	中実断面
終局耐力(kN･m)	14.06	17.85	17.80
破壊形式	圧壊	圧壊	圧壊

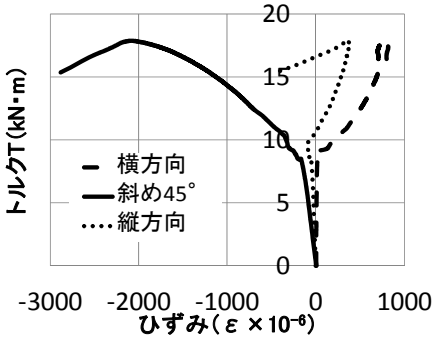
(2) トルク-コンクリートひずみ

各供試体のコンクリートひずみを**図－8** に示す。いずれの供試体においても腹鉄筋，軸方向鉄筋ともに降伏しておらず，コンクリートの圧壊により終局を迎えた。なお, ゲージの貼付位置は**図－3** に示してある。ここでは，ひずみが最大となったゲージがあるロゼットゲージの結果を示した。いずれの供試体においても，斜め 45°に貼り付けたコンクリートゲージで圧縮ひずみが最大となっ

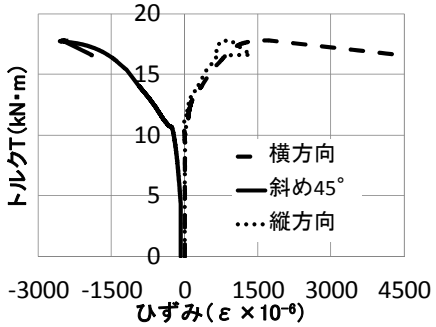
た。斜め 45°に貼り付けたコンクリートゲージはひび割れの方向と一致するため，ひび割れに対して水平方向に圧縮応力が働き，圧壊に至ったことが確認できた。



(a) t/b=0.15



(b) t/b=0.20



(c) 中実断面

図－8　コンクリートひずみ

4. FEM によるねじり耐力の考察

ここでは, RC 中空断面部材および RC 中実断面部材を FEM を用いて再現し，t/b とねじり耐力の関係について検討した。

4.1 解析概要

解析の対象とした供試体は，壁厚 20，30，40，50，60，80，100mm の RC 中空断面部材および RC 中実断面部材とした。いずれのモデルもかぶりは 0mm としている。解析に用いたコンクリートの材料特性値および鉄筋の物性値は，**表－6** および**表－1** に示すとおりである。解析では，汎用の FEM 解析ソフト「ATENA」を使用した。

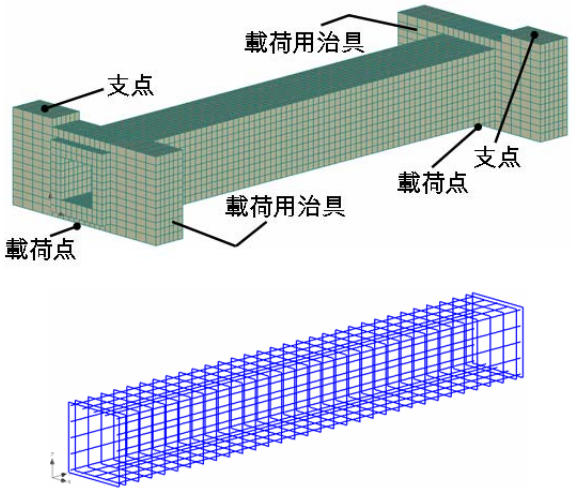
図－9 に解析モデルを示す。解析モデルでは 2 章の実験と同条件となるように作成した。要素の解析条件を**表－7** にまとめる。なお，コンクリートと鉄筋は完全付着状態にあると仮定し，ひび割れモデルは，固定ひび割れモデルを設定した。また，この固定ひび割れモデルでは，ひび割れ伝達モデルとして，せん断強度－ひび割れ幅の関係式を用いられており, ひび割れ幅が増大していくと，せん断強度が低減していく。さらに、テンションスティフニングを CEB－FIP モデルに従い設定した。これは，中空断面部材では鉄筋が占める面積率が大きく，耐力への貢献度が大きいためである。しかし，壁厚が大きいものに関しては過大に耐力を算定する可能性があるため注意が必要である。

表－6　定義したコンクリートの材料特性値

f_c	f_t	E_c	G_F
(N/mm^2)		(kN/mm^2)	(N/m)
15.3	1.42	19.1	61.2

表－7　要素の解析条件

コンクリート	8節点アイソパラメトリック要素
載荷治具	
鉄筋	埋込み式離散鉄筋



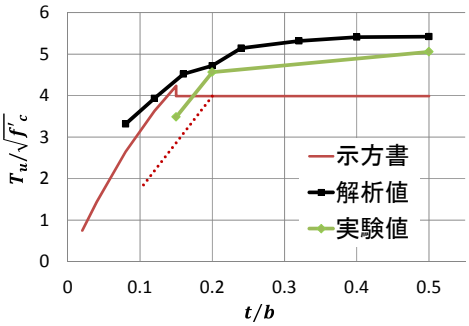
図－9　解析モデルの概要

4.2 t/b とねじり耐力の関係

図－10 は t/b とねじり耐力の関係について示しており，実験値と FEM に基づく解析値および示方書の腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力（γ_b=1 とした）をプロットしたものである。ここでは，材料強度の影響を無視するために各値を圧縮強度の平方根$\sqrt{f'_c}$で除したものを縦軸に示した。なお，各値を$\sqrt{f'_c}$で除した理由は，示方書によ

る斜め圧縮破壊耐力が，$M_{tcud} = 1.25\sqrt{f'_{cd}} \cdot K_t / \gamma_b$ [f'_{cd}: 設計圧縮強度，K_t: ねじり係数] で算出されているためである。また，示方書では t/b が 0.15 以上では中実断面とみなして耐力を算定し，t/b が 0.15 以下の場合は中空断面として耐力を算定している。

実験値では，t/b が 0.2 以上で傾きが小さく，中実断面とほぼ同等の耐力を示した。しかし，それ以下では，t/b の減少に伴い急激な耐力の低下が見られた。また，解析値においても実験値とほぼ同様の傾向を示した。したがって，t/b の基準を 0.2 として，各部材断面の斜め圧縮破壊耐力を算定する必要があると考えられる。また，示方書では，t/b が 0.2 以上において，安全な範囲内で実験値をフォローできていた。しかし，それ以下では，示方書が実験値を上回っている部分が見られた。さらに，示方書の斜め圧縮破壊耐力は t/b が 0.15 の位置において，不連続になっているという問題も見られた。この原因として，示方書では斜め圧縮破壊耐力をサンブナンねじり（単純ねじり理論）に基いて算出していることが挙げられ，実験値に沿って見直す必要がある。例えば，上述の考察を踏まえ，スタート位置は t/b=0.20，傾きは実験結果から求めることで，**図－10** の様な破線で示すこともできる。



図－10　t/b とねじり耐力の関係

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

(1) ねじりを受ける RC 中空断面部材における腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力は，断面寸法が同一であっても，かぶりが有るものはかぶりが無いものと比べて，明らかに耐力が小さかった。

(2) 示方書によるねじり耐力の算定では，腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力を断面寸法から決定しているため，かぶりが大きい RC 中空断面部材では耐力を過大に評価する場合がある。

(3) ねじりを受ける部材では外周上で最もせん断応力が大きくなり，断面の中心部はほとんど耐力に寄与しないため，壁厚/部材幅が 0.20 以上の RC 中空断面部材では，中実断面とほぼ同等の腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力を有することがわかった。

(4) 示方書のねじりによる腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力の算定方法では，t/b が 0.15 の位置において不連続になっていることがわかった。

(5) 壁厚/部材幅が 0.15 以下の RC 中空断面部材のねじり耐力については，示方書では適用できない場合がある。

(6) 上記(3)，(4)，(5)については，かぶり 0mm の場合の t/b とねじり耐力の関係であるため，かぶりが有る場合には，かぶりを除いた断面における t/b をパラメータとして耐力の算定を行う方が合理的な設計であると考えられる。

謝辞

本研究では，立命館大学客員研究員の明石知樹氏に，高流動コンクリートの配合設計に関して大いに協力して頂いた。また，立命館大学客員研究員の中川隆一氏は，実験装置の修理や安全性の検討の際に相談に乗って頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 長瀧重義，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，pp.179-188，1988.2

2) Rahal, K. N. and Collins, M. P. : Simple Model for Predicting Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Sections, ACI Structural Journal, VoL93, No. 6, pp. 658-666, 1996.

3) 2012 年制定　土木学会コンクリート標準示方書[設計編：本編]　pp.196-204

4) 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

5) 佐々木優介，渡邉有輝，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，Vol.32, No.2, pp.709-714, 2010