

RC 単柱のせん断変形と圧縮ストラット角度に関する考察 - MCFT の適用と実験結果との比較 -

武蔵工業大学構造材料工学研究室
依田 宏之 白子 将則 吉川 弘道

Key Words:修正圧縮場理論, Kim&Mander, 圧縮ストラット角度

1. はじめに

RC 部材の設計に際しては、脆性的な破壊を呈するせん断破壊を回避する必要がある、せん断挙動を的確に把握・予測することは、きわめて重要な論点である。このため、RC 部材を対象とするせん断問題に関する研究は数多く行われてきた。本文では、RC 単柱を検討対象とし、特に、せん断変形挙動と圧縮ストラット角度に着目し、Collins による修正圧縮場理論を適用するとともに、本研究室での既往実験結果と比較するものである。

トラス理論を適用する際、圧縮ストラット(または、斜めひび割れ)の角度が重要なが、これは、断面の釣合い条件、適合条件、材料構成則によって決定される。古典トラス理論では、これまで弾性解である 45° が仮定されてきたが、実験時の目視観測では、 $25 \sim 35^\circ$ 程度であることがわかっている。

本文では、修正圧縮場理論 (Modified Compression Field Theory, :以下 MCFT) により、RC 単柱のせん断挙動を解析するが、特に、せん断応力～せん断変形との関係および圧縮ストラット(または、斜めひび割れ)の角度に着目する。

また、本文で引用する単柱式試験体は、RC 橋脚を模擬したもので、7 体の実験と示している。実験結果は、曲げ破壊型、曲げせん断破壊型であるが、おおむね靱性率が $4 \sim 6$ を記録している。

2. 修正圧縮場理論の適用と使用プログラム

(1) MCFT の基本的な考え方

MCFT は、曲げひび割れの発生している鉄筋コンクリート要素を一様な要素としてとらえ、要素内での力の釣り合い条件および変形の適合条件を用いてせん断問題を解く手法である。その結果、従来のトラス理論では、中立軸における主引張応力の角度、斜めひび割れ角度を共に 45° と仮定をしていた。しかし、コンクリート強度、帯鉄筋量、軸力の大きさ、載荷方法などでその角度は変化する。そこで、MCFT では、変形の適合条件を導入することにより、圧縮ストラット角度として正しい角度を算定することができる。これにより、地震などによってせん断破壊に至り、圧縮ストラット角度 () が従来の 45° よりも小さい RC 橋脚などにも適用できると考えられる。

(2) 使用プログラムの概要

- ・ 使用したプログラム・・・RESPONSE
- ・ 対象物・・・RC 単柱
- ・ 概要・・・RC 単柱に作用するモーメント、軸応力、せん断力などを受け変形したプレストレストコンクリート部分の応答を荷重～変位関係により決定することができる。また、その際に発生する作用せん断力 (V)、圧縮ストラット角度 ()、せん断ひずみ ()、せん断応力 () の解析方法を容易にしてくれるものである。

(3) 圧縮ストラット角度の解析解

MCFT では圧縮ストラットに関する実験結果をよく追従しているが、数値解であり、汎用的な表現になっていない。ここに紹介する手法は、Kim & Mander による提案手法で、次式のように圧縮ストラット角度 θ を陽な解析解を与えている。

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{p_w n + \varphi \frac{p_w}{p_s} \frac{A_v}{A_g}}{1 + p_v n} \right]^{\frac{1}{4}}$$

p_w : せん断補強筋比 p_s : 主鉄筋比 n : 弾性係数比
 A_v : 柱のせん断面積 (mm^2) A_g : 柱の全断面積 (mm^2)
 φ : 柱の構造形式による係数 (*fixed - pinned* *end* : $\varphi = 1.5704$)

3. 引用した実験概要

試験体は RC 鉄道橋脚の 40% 縮小断面モデルとし、断面を 320 × 320mm、せん断スパン長 1200mm とした。

表 - 1 に試験体概要、表 - 2 に実験結果、図 - 1 に試験体断面図をそれぞれ示した。

表 - 1 試験体概要

試験体	略号	柱断面	軸応力	曲げせん断耐力比	主鉄筋降伏強度	主鉄筋比	せん断補強筋降伏強度	せん断補強筋比
		(mm)	(N/mm ²)		(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)	(%)
S05C	a	320 × 320	0	0.5	556	2.5	354	0.06
S10C	b		0	1	356			
S12-1-3	c		0.98	1.2				
S12-3-3	d		2.93		1.5		387	267
S15-0-3	e		0					
S15-1-3	f		0.98					
S15-3-3	g		2.93					

表 - 2 実験結果

試験体	略号	正側						負側						実験値 (°)
		鉄筋降伏時		最大荷重時		終局 変位 (mm)	靱性率	鉄筋降伏時		最大荷重時		終局 変位 (mm)	靱性率	
		荷重 (KN)	変位 (mm)	荷重 (KN)	変位 (mm)			荷重 (KN)	変位 (mm)	荷重 (KN)	変位 (mm)			
S05C	a	-	-	107.8	12.0	12.3	-	-	-	40.18	2.7	2.7	-	24.0
S10C	b	7.8	6.9	97.0	14.0	30.7	4.5	76.4	6.8	96.04	13.5	30.6	4.5	26.0
S12-1-3	c	79.4	5.8	109.0	23.1	23.6	4.1	81.3	6.3	110.0	19.2	26.2	4.2	27.0
S12-3-3	d	98.0	7.1	121.0	21.6	21.6	3.0	96.0	6.1	129.0	18.3	18.5	3.0	21.0
S15-0-3	e	78.4	6.7	102.0	26.7	33.8	5.0	76.4	5.9	99.0	22.8	30.1	5.1	38.0
S15-1-3	f	82.3	6.2	110.0	23.6	32.1	5.2	83.3	6.3	109.0	18.5	32.1	5.1	34.0
S15-3-3	g	98.0	7.1	127.0	35.3	40.2	5.7	95.1	6.3	131.0	31.7	38.3	6.1	31.0

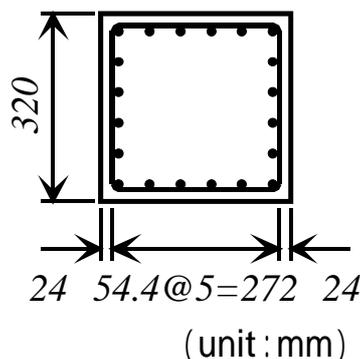


図 - 1 試験体断面図

4. 解析結果と考察 1:せん断変形

表 - 1 に示した a ~ g の軸応力を変化させ、せん断応力 とせん断ひずみ の関係を MCFT を用いて比較・検討を行った。

(1) RC 単柱の ~ 関係 (軸応力 0N/mm² の場合)

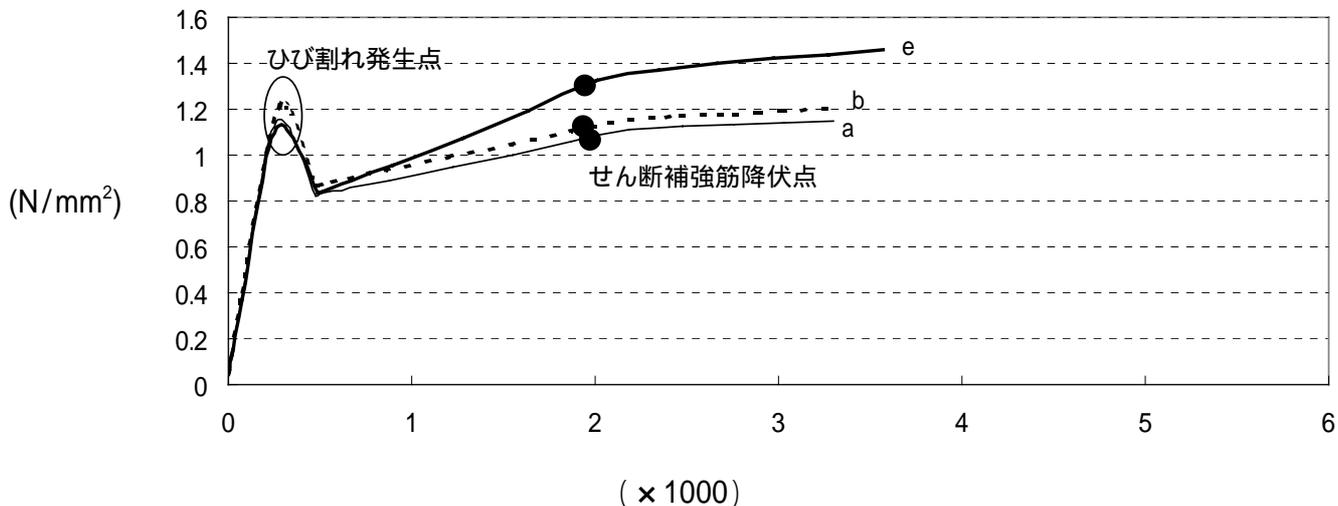


図 - 2 RC 単柱の - 図 (軸応力 0N/mm² の場合)

図 - 2 に軸応力 0(N/mm²) の - 図を示す。ひび割れ発生点では b のせん断応力 の値が最も大きい事がグラフより読み取ることができる。この要因として考えられるのは表 - 1 より a と b は e よりもせん断補強筋降伏強度が高いためひび割れ発生点でのせん断応力 の値が大きくなったと考えられる。また、ひび割れ発生点後からは e のせん断応力 の値の増加が著しく大きい事がわかる。この要因として考えられるのは e のせん断補強筋比が三つの試験体の中で最も大きいためだと考えられ、その後のせん断補強筋降伏点にも大きく影響していると推測される。また、a と b はせん断補強筋降伏強度とせん断補強筋比の値は同等の値を取っているが曲げせん断耐力比の大きい b の方が の値が大きくなったと考えられる。

(2) RC 単柱の ~ 関係 (軸応力 0.98N/mm² の場合)

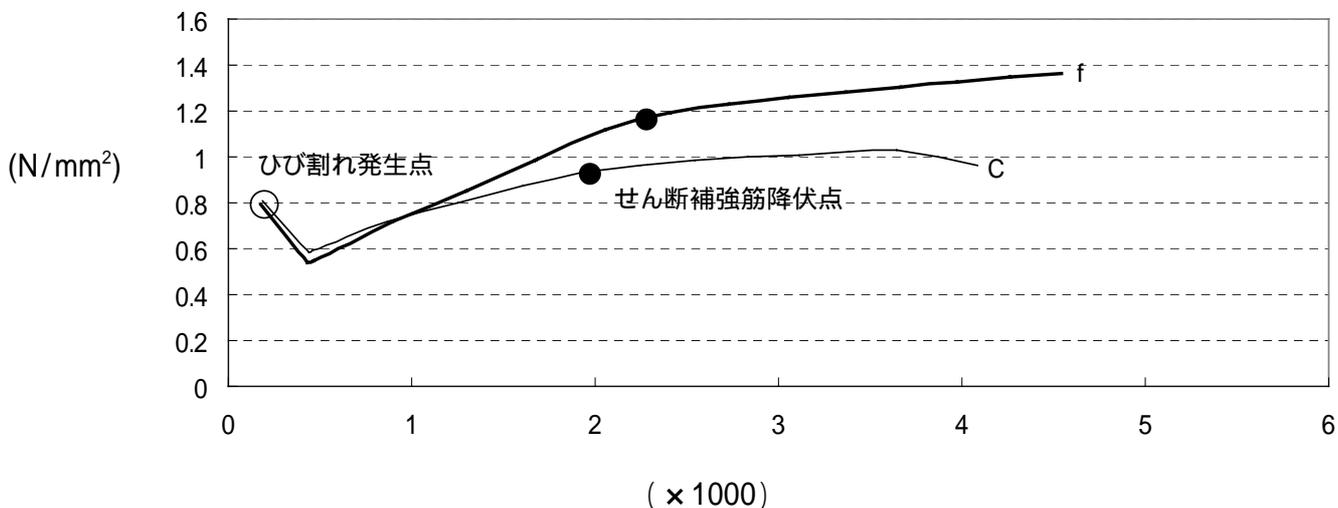


図 - 3 RC 単柱の - 図 (軸応力 0.98N/mm² の場合)

図 - 3 に軸応力 $0.98(\text{N}/\text{mm}^2)$ の 図を示す.ひび割れ発生点は二つの試験体ともにほぼ変わらない値を示している事がグラフより読み取ることができる.ひび割れ発生点後のせん断応力 の値の増加は f の方が c よりも曲げせん断耐力比とせん断補強筋比の値がともに大きいためせん断応力の値が著しく増加したと推測され,その後のせん断補強筋降伏点にも大きく影響を及ぼしていると考えられる.そのため, f の方がせん断応力 ,せん断ひずみ の二つの値が c のせん断補強筋降伏点での値より大きな値で起こったと考えられる.

(3) RC 単柱の ~ 関係 (軸応力 $2.93\text{N}/\text{mm}^2$ の場合)

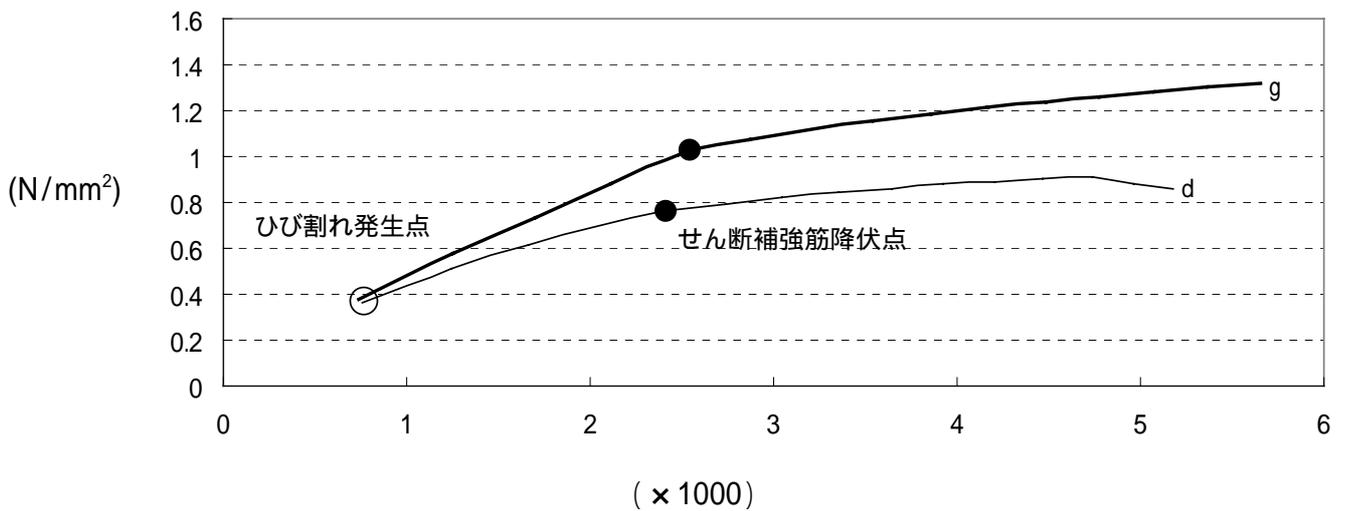


図 - 4 RC 単柱の 図 (軸応力 $2.98\text{N}/\text{mm}^2$ の場合)

図 - 4 に軸応力 $2.93(\text{N}/\text{mm}^2)$ に 図を示す.図 - 3と同様にひび割れ発生点後のせん断応力 の値の増加は g の方が d よりも曲げせん断耐力比とせん断補強筋比の値がともに大きいためせん断応力の値が著しく増加したと推測され,その後のせん断補強筋降伏点にも大きく影響を及ぼしていると考えられる.そのため, g の方がせん断応力 ,せん断ひずみ の二つの値が d のせん断補強筋降伏点での値より大きな値で起こったと考えられる.

5. 解析結果と考察 2: 圧縮ストラット角度

表 - 1 に示した a ~ g の軸応力を変化させ、せん断力 V と圧縮ストラット角度 の関係を MCFT を用いて比較、解析を行った。また、比較対象として終局時における Kim&Mander による解析解と実験値 (終局時における主たるせん断ひび割れの角度を目測と写真により判定した) を用いた。

5.1 荷重過程における圧縮ストラット角度の変化

(1) RC 単柱における V と の関係 (軸応力 $0\text{N}/\text{mm}^2$ の場合)

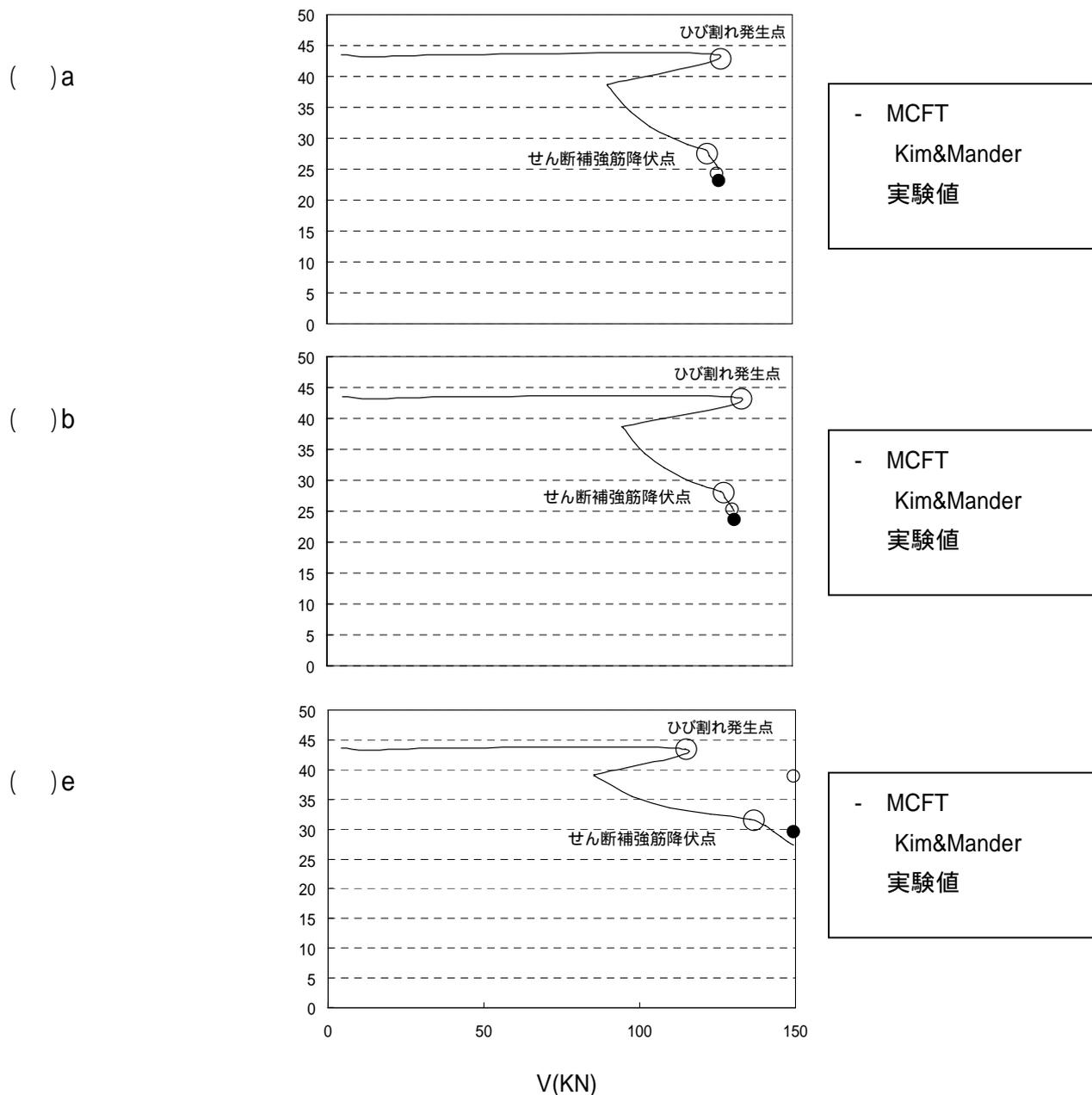


図 - 5 RC 単柱における V - 図 (軸応力 $0\text{N}/\text{mm}^2$ の場合)

図 - 5 に軸応力 $0(N/mm^2)$ の V - 図を示す。e はせん断力 V の増加が他の二つの試験体よりも顕著に表れている事がわかる。この要因として曲げせん断耐力比が影響していると考えられ、曲げせん断耐力比はせん断耐力を曲げ耐力で除したものであり、三つの試験体の中で e の曲げせん断耐力比が最も大きいためこの様な結果が得られたと推測される。また、終局点のみ Kim&Mander と実験値のひび割れ角度を比較対象として用いており、三つの試験体ともに MCFT, Kim&Mander と実験値の終局時におけるひび割れ角度が非常に近い値をとっている事が確認でき、ひび割れ角度も $20 \sim 35^\circ$ の値に集中している事も確認できる。

ひび割れ発生点は三つの試験体ともにほぼ同じ値をとっているがせん断補筋降伏点においては曲げせん断耐力比が影響しているものと考えられ、曲げせん断耐力比が最も大きい e のみがせん断補強筋降伏点でのせん断力の値が大きくなっていると推測される。

(2) RC 単柱における V と の関係 (軸応力 $0.98N/mm^2$ の場合)

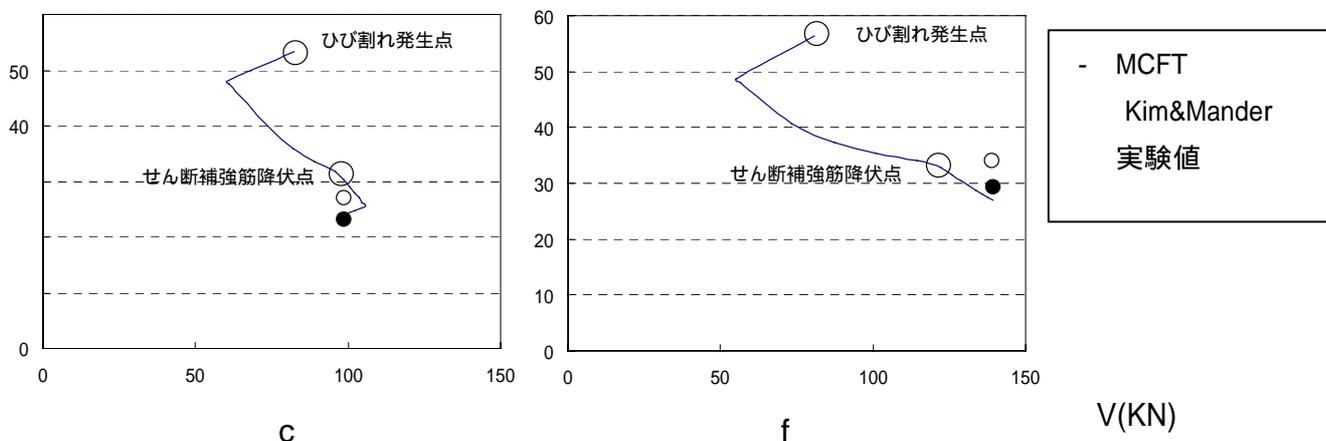


図 - 6 RC 単柱の V - 図 (軸応力 $0.98N/mm^2$ の場合)

図 - 6 に軸応力 $0.98(N/mm^2)$ の V - 図を示す。図 - 5 同様に f の方が c よりも曲げせん断耐力比が大きいためせん断力 V の増加が大きいことが確認できる。また、二つの試験体ともに MCFT, Kim&Mander と実験値の終局時におけるひび割れ角度の値が非常に近いことが確認する事ができる。さらに、ひび割れ角度も $20 \sim 35^\circ$ の値に集中していることも確認することができる。

ひび割れ発生点は二つの試験体ともほぼ同じ値をとっていることがグラフより読み取ることができる。また、せん断補強筋降伏点と終局時におけるひび割れ角度が曲げせん断耐力比とせん断補強筋比が大きい f の方がせん断力が大きいのところにある事が確認できる。

(3) RC 単柱における V と の関係 (軸応力 2.93N/mm^2 の場合)

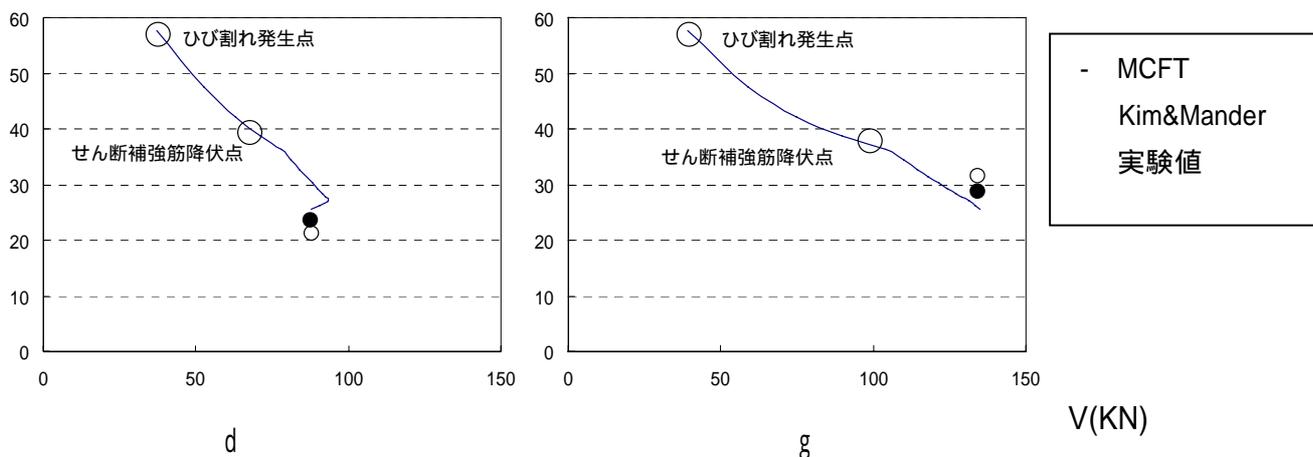


図 - 7 RC 単柱の V - 変位関係図 (軸応力 2.93N/mm^2)

図 - 7 に軸応力 $2.93(\text{N/mm}^2)$ の V - 変位関係図を示す。g の方が d よりも曲げせん断耐力比が大きいためにせん断力 V の増加が大きいことが確認できる。また、二つの試験体ともに MCFT, Kim&Mander と実験値の終局時におけるひび割れ角度の値が非常に近いことが確認する事ができる。さらに、ひび割れ角度も $20 \sim 35^\circ$ の値に集中していることも確認することができる。ひび割れ発生点は二つの試験体ともほぼ同じ値をとっていることがグラフより読み取ることができる。また、せん断補強筋降伏点と終局時におけるひび割れ角度が曲げせん断耐力比とせん断補強筋比が大きい g の方がせん断力が増加するところにある事が確認できる。また作用する軸力の値が大きいほど同じ曲げせん断耐力比の差であってもせん断力の増加の差の開きが大きくなることも確認することができた。

5.2 終局時における圧縮ストラット角度

5.2.1 MCFT - Kim&Mander - 実験値の比較

表 - 3 圧縮ストラット角度一覧表

試験体名	略号	実験値(°)	MCFT(°)	Kim&Mander(°)
S05C	a	24	25.0	24.8
S10C	b	26	25.0	24.7
S12-1-3	c	27	24.0	24.4
S12-3-3	d	21	25.5	24.4
S15-0-3	e	38	27.3	32.1
S15-1-3	f	34	27.0	32.1
S15-3-3	g	31	28.1	32.0

表 - 3 に終局時における圧縮ストラット角度の一覧表を示した。これを用いて終局時における圧縮ストラットの関係図を作成し比較・検討した。

(1) 終局時における圧縮ストラット角度 - 実験値と MCFT との比較 -

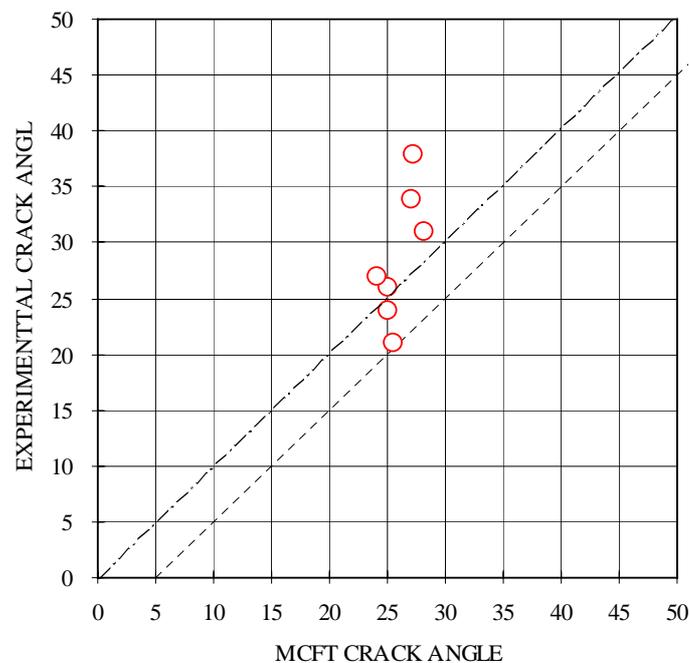


図 - 8 実験値と MCFT の関係図

図 - 8 に横軸に MCFT の圧縮ストラット角度,縦軸に実験値の圧縮ストラット角度をとる,終局時における圧縮ストラット角度の実験値と MCFT の関係図を示した。一般的にひび割れ角度は 20 ~ 35 度に集中する事で知られているが,本論においても図 - 8 よりひび割れ角度は 20 ~ 35 度に集中していることが確認でき,MCFT と実験値の誤差もほぼ 5° 以内に収まっていることがグラフより読み取ることができる。このことより MCFT により算出された圧縮ストラット角度は信頼性の高い値であると言える。

(2) 終局時における圧縮ストラット角度 - 実験値と Kim&Mander との比較 -

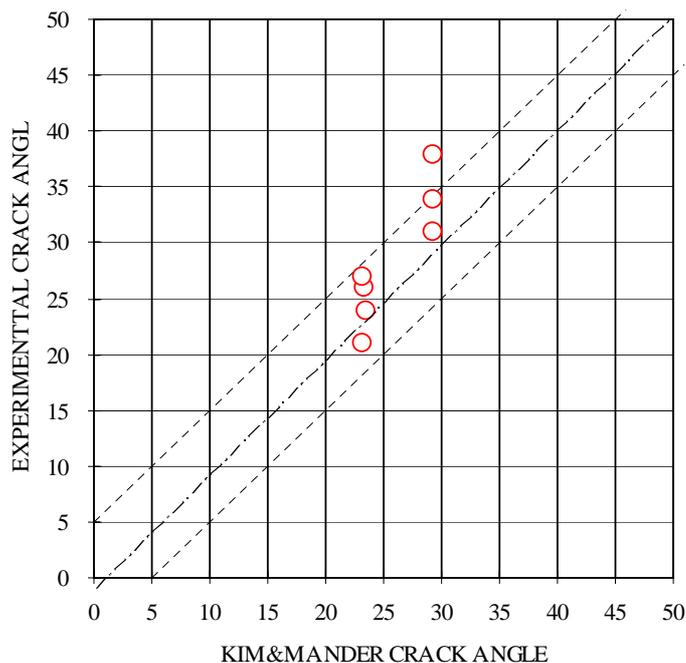


図 - 9 実験値と Kim & Mander の関係図

図 - 9に横軸に Kim&Mander の圧縮ストラット角度,縦軸に実験値の圧縮ストラット角度をとり,終局時における圧縮ストラット角度の実験値と MCFT の関係図を示した.図 - 8と同様にひび割れ角度は 20 ~ 35 度に集中していることが確認でき,Kim&Mander と実験値の誤差も 5° 以内に収まっていることがグラフより読み取ることができる.このことより Kim&Mander によって算出された終局時の圧縮ストラット角度は信頼性の高い値であると言える.

(3) 終局時における圧縮ストラット角度 - MCFT と Kim&Mander との比較 -

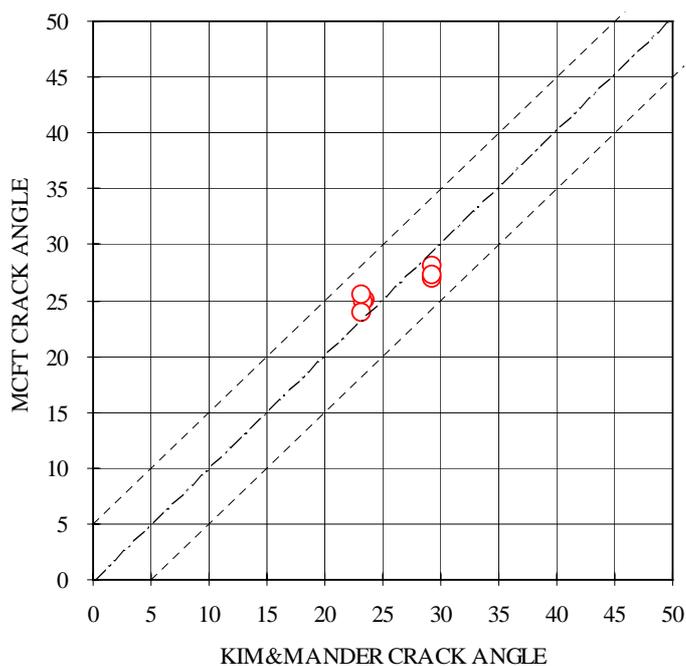


図 - 10 MCFT と Kim & Mander の関係図

図 - 10 に横軸に Kim&Mander の圧縮ストラット角度,縦軸に MCFT の圧縮ストラット角度をとり,終局時における圧縮ストラット角度の Kim&Mander と MCFT の関係図を示した.図 - 8,9と同様にひび割れ角度は 20 ~ 35 度に集中していることが確認でき,このことより Kim&Mander と MCFT によって算出された終局時の圧縮ストラット角度は信頼性の高い値であると言える.

5.2.2 圧縮ストラット角度の計算精度に関する統計的なまとめ

MCFT と Kim&Mander を用いて計算により算出された圧縮ストラット角度と実験値を統計的にみて比較・検討することにより MCFT, Kim&Mander のそれぞれの計算精度を判定した.

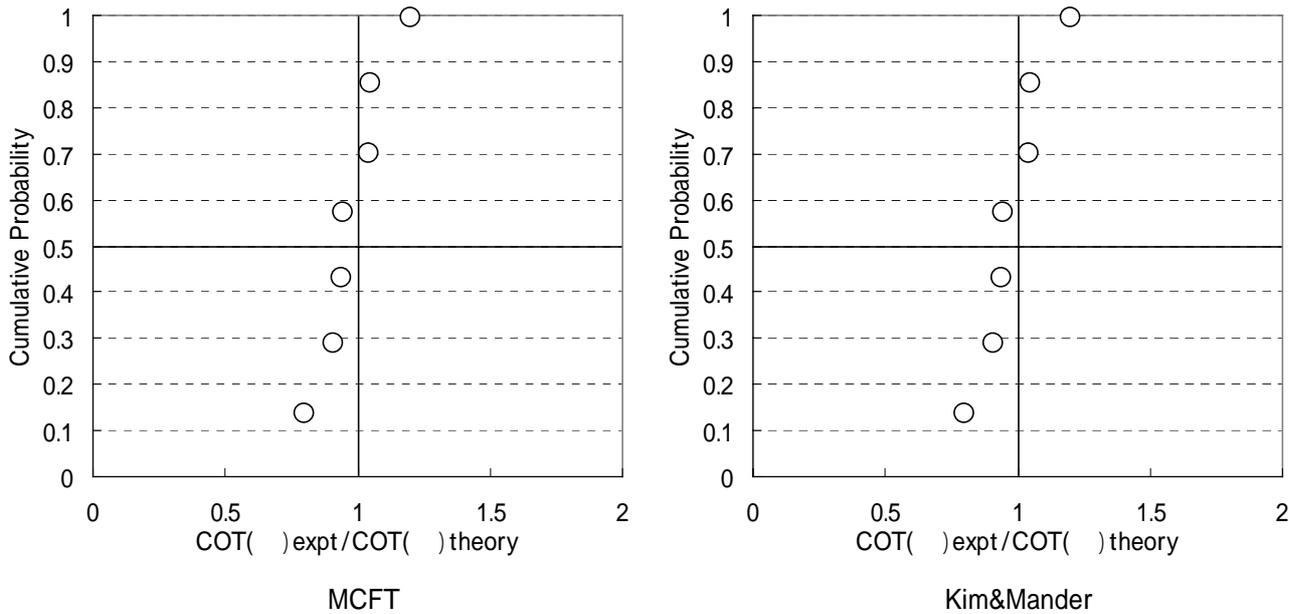


図 - 11 圧縮ストラット角度の統計図

図 - 11 に実験値と MCFT, Kim&Mander の計算により算出された圧縮ストラットを統計的にみた図を示した.縦軸に累積確率 (Cumulative Probability) として 0 ~ 1 までを試験体の数で等分に分割した値をとり,横軸に実験値の COT()を MCFT, Kim&Mander のそれぞれの終局時における圧縮ストラット角度の COT()で除した値をそれぞれの精度に対する比としてとった.まず, MCFT に着目してみると両者の比の値が 0.6 ~ 1.3 程度に収まっていることがわかる.比は 1 の値をとる時に比較対象としている両者の値が一致している事を示しており, MCFT の場合,両者の比のばらつきは 0.3 程度あり十分に計算精度が高いといえる値を示している.次に Kim&Mander に着目してみると両者の比の値は 0.7 ~ 1.3 程度に収まっている事がわかる.両者の比の値のばらつきは 0.3 程度であり MCFT のばらつきとほぼ同じでありこちらも十分に計算精度が高いということがいえる.この事より MCFT, Kim&Mander は共に高い計算精度であるといえ,この二つから求めた圧縮ストラット角度は信頼性の高い値であると言える.

6. まとめ

ひび割れ発生点後のせん断力 V の増加やせん断応力 τ の増加には曲げせん断耐力比やせん断補強筋が強く影響していると推測することができた。また、せん断補強筋降伏点の位置もその影響を強く受けていることも推測することができた。せん断ひずみ γ の伸びは軸応力が大きくなることに増加していることも確認することができた。

MCFT, Kim&Mander はともに計算精度が高く十分に適用できるものであり、この二つから求めた圧縮ストラット角度と実験値は $20 \sim 35^\circ$ 程度の値をとっており、修正トラス理論で設定されている 45° では過大であることもいえた。

[参考文献]

- 1)中村 光: 拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐力評価, 土木学会論文集 No.490/V - 23, pp157 ~ 166, 1994.5
- 2)岩本 隆生: 修正圧縮場理論を適用した鉄筋コンクリート部材のせん断解析, 2001 武蔵工業大学 修士学位論文
- 3)大江 亮二・吉川 弘道: 繰り返し大変形を受ける鉄筋コンクリート単柱のせん断強度劣化の評価に関する研究, 土木学会論文集 No.711/V 56, 59 ~ 71, 2002.8 2001.5
- 4)John B.Mander, Jang Hoon Kim, and Anindya Dutta: SHEAR-FLEXURE INTERACTION ANALYSIS AND DESIGN, SEMINAR ON POST-PEAK BEHAVIOR OF RC STRUCTURES SUBJECTED TO SEISMIC LOADS October 25-29, 1999 Volume 1
- 5)<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>(RESPONSE2000)