

修正斜め圧縮場理論によるせん断解析

岩本 隆生 吉川 弘道

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の設計において、せん断破壊のような脆性的な破壊形態は、回避しなければならない。現在、我が国の土木学会コンクリート示方書をはじめ、世界各国の示方書では、ひび割れた鉄筋コンクリート構造物をトラスでモデル化を行う、経験則を含めた修正トラス理論を採用している。この考え方は、せん断耐力(V)を求める際、コンクリート負担分(V_c)とせん断補強鋼材負担分(V_s)に分けて考え、これらの和として与えられている。このせん断耐力を算出するために、トラス理論では圧縮ストラット角度を用いている。現在、トラス理論では圧縮ストラット角度を一律 45° と仮定している。しかし、鉄筋コンクリート構造物のせん断耐力には、主鉄筋比、コンクリート強度、せん断補強鉄筋比、断面寸法、断面形状など多くの要因が複雑に影響を及ぼしあう。このため実際の角度は、理論とは一致せず論点となっている。そこで、鉄筋コンクリート構造物の圧縮ストラット角度に注目し、鉄筋コンクリート要素に対する新たな解析方法として提案されたものの1つが、修正圧縮場理論である。

2. 修正圧縮場理論の基本的考え方と基本記号

2-1. 基本的考え方

修正圧縮場理論はひび割れの発生している鉄筋コンクリート要素の平均ひずみ、平均応力を考える。これによりを一樣な性質を持つ連続的な要素としてとらえ、それらの要素内での力の釣り合い条件、変形の適合条件をもちいることにより、せん断耐力を算出しようとするものである。

斜めひび割れが発生した鉄筋コンクリートを、一樣なひび割れをもつ要素としてモデル化する。(図 - 1)

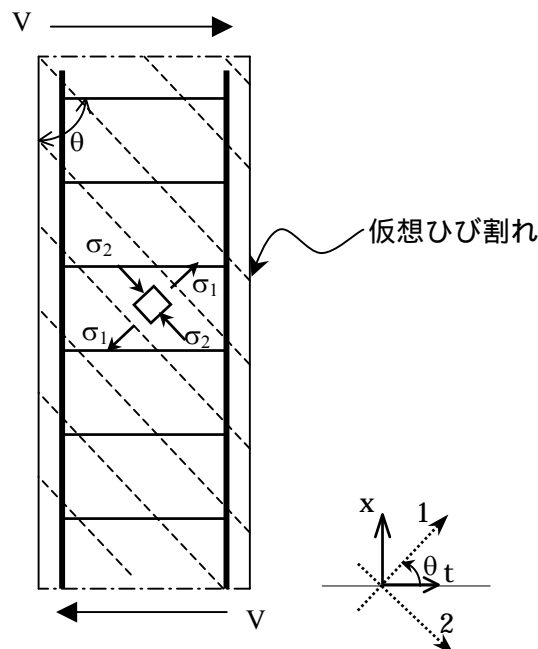


図 - 1 斜めひび割れが発生した鉄筋コンクリート要素

ひび割れ間のコンクリート部分には、部材軸に対して θ の角度で主圧縮応力、その直角方向に主引張応力が作用すること、せん断補強鉄筋および軸方向鉄筋は線材として軸方向のみに抵抗することを仮定して進めていく。また、ひび割れは平均的に取り扱われ、コンクリート要素は一樣に変形するものと仮定する。そのため、

ひずみに関して、軸方向ひずみ ϵ_x 、軸鉛直方向ひずみ ϵ_t およびせん断ひずみ ϵ_{xt} 、または主圧縮ひずみ ϵ_2 、主引張ひずみ ϵ_1 およびひび割れ角度 θ を考慮することに変形の適合条件を求めることができる。さらに使用材料の特性を考慮して、それぞれの応力を考えることにより、力の釣り合い式が求められる。

その結果、外部せん断力が作用する場合、解析における未知数は次の4つとなる。

- σ_x : 軸方向鉄筋の応力
- σ_w : せん断補強鉄筋
- σ_2 : コンクリートの主圧縮応力
- θ : 主圧縮応力の角度

これら解くために、次の3つの関係式を用いて解いていく。

帯筋および主鉄筋方向の力の釣り合い条件式

変形の適合条件

コンクリートおよび鉄筋の応力とひずみに関係づける構成式

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が 45° であることを根拠に、斜めひび割れ角度は 45° であると大胆な仮定をしなければならないが、修正圧縮場理論では、変形の適合条件を導入することにより、斜めひび割れ角度 (θ) を 45° と仮定する必要がなくなり、さらにひび割れ発生前から破壊に至るまでのそれぞれの主引張ひずみを考えることによって、鉄筋コンクリート要素の破壊までの挙動を追跡することができる。

2 - 2 . 基本記号

ここで、本論に用いる基本記号を以下のように提示する。

h: 断面高さ	b: 断面幅	A_c : 部材断面積
c: かぶり厚さ	a: 最大骨材寸法	
ϵ_1 : 主引張ひずみ	ϵ_2 : 主圧縮ひずみ	
ϵ_x : 軸方向ひずみ	ϵ_t : 軸直交方向ひずみ	ϵ_{xt} : せん断ひずみ
w: ひび割れ幅	S_m : 平均ひび割れ間隔	
d_x : 軸方向鉄筋径	E_{sx} : 軸方向鉄筋の弾性係数	
A_x : 軸方向鉄筋の全断面積	f_{xy} : 軸方向鉄筋の引張降伏強度	σ_x : 軸方向鉄筋の応力
d_t : 帯鉄筋鉄筋径	E_{sw} : 帯鉄筋の弾性係数	
A_w : 帯鉄筋の全断面積	f_{wy} : 帯鉄筋の引張降伏強度	σ_w : 帯鉄筋の応力
f'_c : コンクリートの圧縮強度	f_{cr} : コンクリートの引張強度	E_c : コンクリートの弾性係数
ϵ'_{cp} : コンクリートの最大圧縮強度時のひずみ		
ϵ'_{cr} : 引張力によりコンクリートがひび割れを生じるときのひずみ		
σ_1 : コンクリートの主引張応力	σ_2 : コンクリートの主圧縮応力	
σ_{int} : コンクリートの主引張応力の限界	f'_{2max} : コンクリートの最大圧縮応力	
N: 軸力	θ : 圧縮ストラット角度	
V: 作用せん断力	σ : 作用せん断応力	
V_c : コンクリートせん断力負担分	σ_c : コンクリートせん断応力負担分	
V_s : 帯鉄筋せん断力負担分	σ_s : 帯鉄筋せん断応力負担分	

s: せん断補強筋ピッチ

s_x: 軸方向鉄筋ピッチ

c_x: 中心線～軸方向鉄筋間距離

c_t: 中心線～帯鉄筋間距離

p_x: 軸方向鉄筋の鉄筋比

p_t: 帯鉄筋の鉄筋比

S_{mx}: 軸方向ひび割れ間隔

S_{mt}: 水平方向ひび割れ間隔

k₁: 鉄筋の付着特性を関連付ける係数

k₂: 応力勾配から求める係数

Collins の引張軟化曲線の係数

1: 帯鉄筋の付着特性を表す係数

2: 荷重の載荷種類を表す係数

3: 中村・檜垣による低減係数

3. 修正圧縮場理論の定式化

3 - 1. ひずみの適合条件(Appendix)

主ひずみと主角, または成分ひずみとの関係を以下の諸式に整理することができる.

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_1 - \varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_t - \varepsilon_2} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_t \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{2} \gamma = (\varepsilon_1 - \varepsilon_t) \quad (3.3)$$

また, 上式を整理し, 成分ひずみを求めると次式を得ることができる.

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1 \cdot \tan^2 \theta + \varepsilon_2}{1 + \tan^2 \theta} \quad (3.4a)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta} \quad (3.4b)$$

3 - 2. 釣り合い条件

各応力の関係(Appendix)

$$\sigma_2 = \frac{V}{b_w \cdot jd} \times \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_1 = \tau \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_1 \quad (3.5)$$

力の釣り合い条件は, せん断力と軸力によって判断を行う.

荷重表示:

$$V = \sigma_1 b j d \cot \theta + \frac{A_w \sigma_{ws}}{s} j d \cot \theta \quad (3.6)$$

$$N = A_s \sigma_{sx} - \frac{V}{\tan \theta} + \sigma_1 b j d - \sigma'_c (A_c - b j d) \quad (3.7)$$

応力表示:

$$\tau \equiv \frac{V}{b d} = (\sigma_1 + p_w \sigma_{ws}) j d \cot \theta \quad (3.6)'$$

$$\frac{N}{b d} = p_x \sigma_{sx} - \tau \cot \theta + j \sigma_1 - \sigma'_c \left(\frac{H}{d} - j \right) \quad (3.7)'$$

ここでせん断力Vは, ひび割れを介して伝達される力を考えると, ひび割れ領域の平均応力と, ひび割れ面での局所応力の2つの場合に分けられる. 外的に作用するせん断力Vと釣り合うことから次のような式を得ること

ができる。(Appendix)

$$A_w \sigma_w \left(\frac{jd}{s \tan \theta} \right) + \frac{\sigma_1 bjd \cos \theta}{\sin \theta} = A_w f_{wy} \left(\frac{jd}{s \tan \theta} \right) + \tau_{ci} bjd \quad (3.8)$$

上式では、左辺が平均応力、右辺がひび割れ面での応力となり、両者が釣り合うことを示している。これをコンクリートの主引張応力について整理することにより、コンクリートの主引張応力の限界値 σ_{int} が求まる。

$$\sigma_{int} = \tau_{ci} \tan \theta + \frac{A_w f_{wy}}{s} (f_{wy} - \sigma_w) = \tau_{ci} \tan \theta + p_w (f_{wy} - \sigma_w) \quad (3.9)$$

3 - 3 . 材料特性:コンクリート

(1) 圧縮特性(Appendix)

$$\sigma_2 = f'_{2max} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

$$\frac{f'_{2max}}{f'_c} = \frac{1}{\left(0.8 - 0.34 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon'_c} \right)} \quad (3.11)$$

(2) 引張特性(Appendix)

$$\sigma_1 = E_c \cdot \varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}) \quad (3.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot f_{cr}}{1 + \alpha_3 \sqrt{500 \varepsilon_1}} \quad (\varepsilon_1 > \varepsilon_{cr}) \quad (3.13)$$

$$\sigma_{int} = \tau_{ci} \cdot \tan \theta + \frac{A_w}{s \cdot b_w} (f_{wy} - \sigma_w) \quad (3.14)$$

$$\sigma_1 \leq \sigma_{int}$$

(3) ひび割れ特性(Appendix)

$$\text{せん断伝達: } \tau_{ci} = \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.3 + \frac{24 \cdot w}{a + 16}} \quad (3.15)$$

$$\text{ひび割れ幅: } w = \varepsilon_1 \cdot s_{m\theta} \quad (3.16)$$

$$\text{x 方向ひび割れ間隔: } s_{mx} = 2 \left(c_x + \frac{s_x}{10} \right) + k_1 \cdot k_2 \frac{d_x}{p_x} \quad (3.17)$$

$$\text{t 方向ひび割れ間隔: } s_{mt} = 2 \left(c_t + \frac{s}{10} \right) + k_1 \cdot k_2 \frac{d_t}{p_w} \quad (3.18)$$

$$(p_w = A_w / b_s , p_x = A_s / A_c)$$

3 - 4 . 材料特性:鉄筋

(1) 軸方向鉄筋の引張特性

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x \quad (\varepsilon_x < \varepsilon_{xy}) \quad (3.19)$$

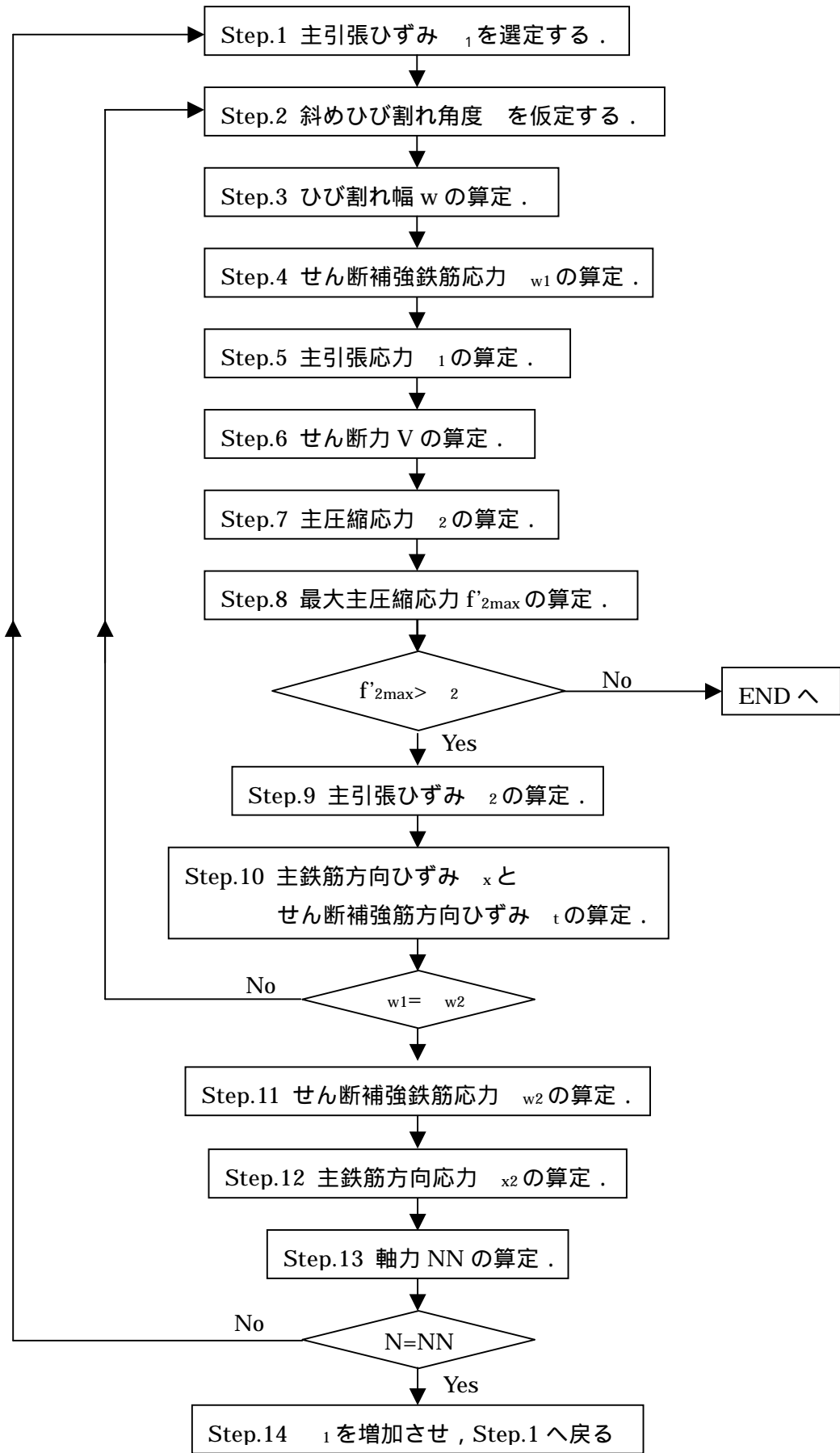
$$\sigma_x = f_{xy} \quad (\varepsilon_x \geq \varepsilon_{xy}) \quad (3.20)$$

(2) 帯鉄筋の引張特性

$$\sigma_w = E_{sw} \varepsilon_t \quad (\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}) \quad (3.21)$$

$$\sigma_w = f_{wy} \quad (\varepsilon_t \geq \varepsilon_{ty}) \quad (3.22)$$

4. 数値解析のフロー



5. 数値解析結果

5-1. MCFT の適合性

MCFT によって算出された値が、信頼できる結果であるかを検討した。

対象構造物は、本学で行ったRC柱の耐震実験で用いたS12-1-3とS15-1-3試験体とし、せん断作用区間を図-5.1のように設定し、水平荷重作用位置から区間、 a 、 b 、 c とした。

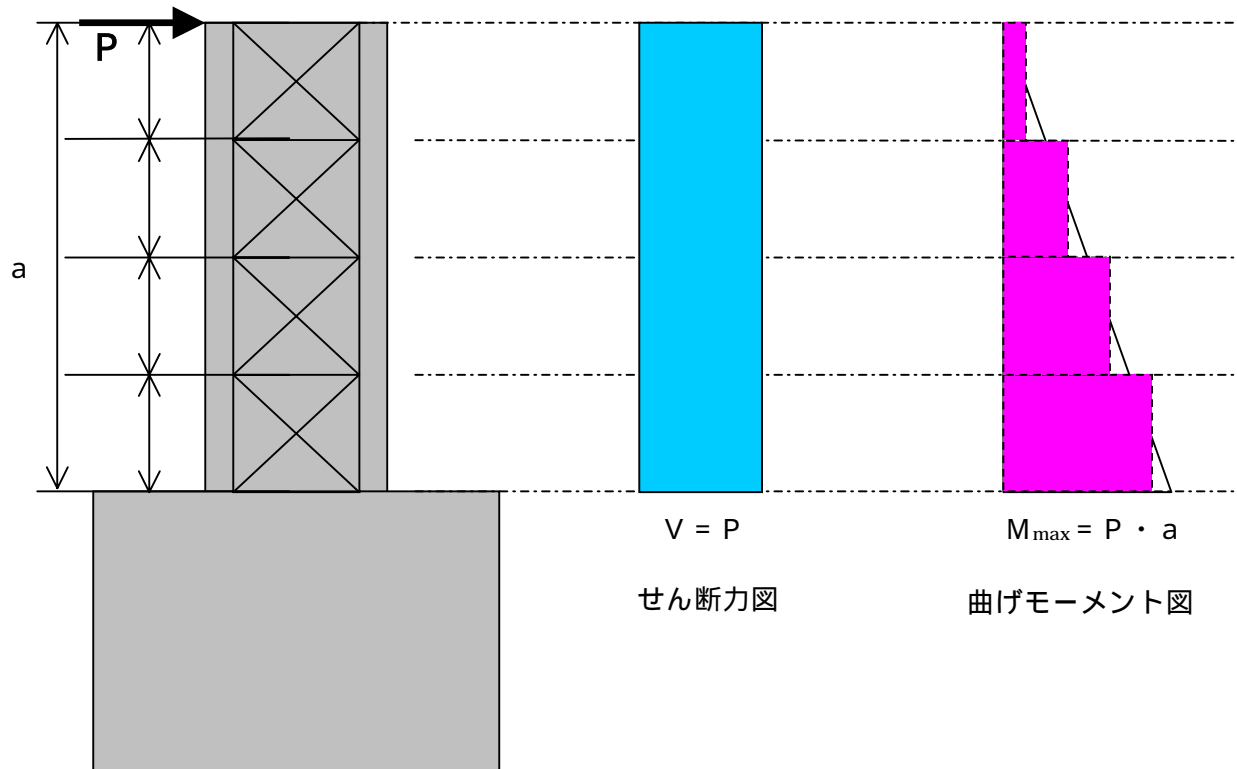


図 - 5.1 せん断力・曲げモーメント作用区間

(1)解析手法

MCFTでは、せん断力のみを対象としているため、最も曲げモーメントの影響がでない区間を対象とした。RC柱に水平荷重を与え生じたせん断ひずみと、MCFTにより算出されたせん断ひずみを適合させ、せん断応力を実験値と解析値を比較した。

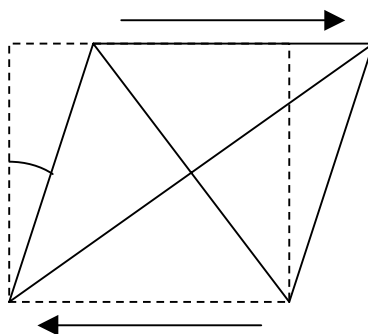


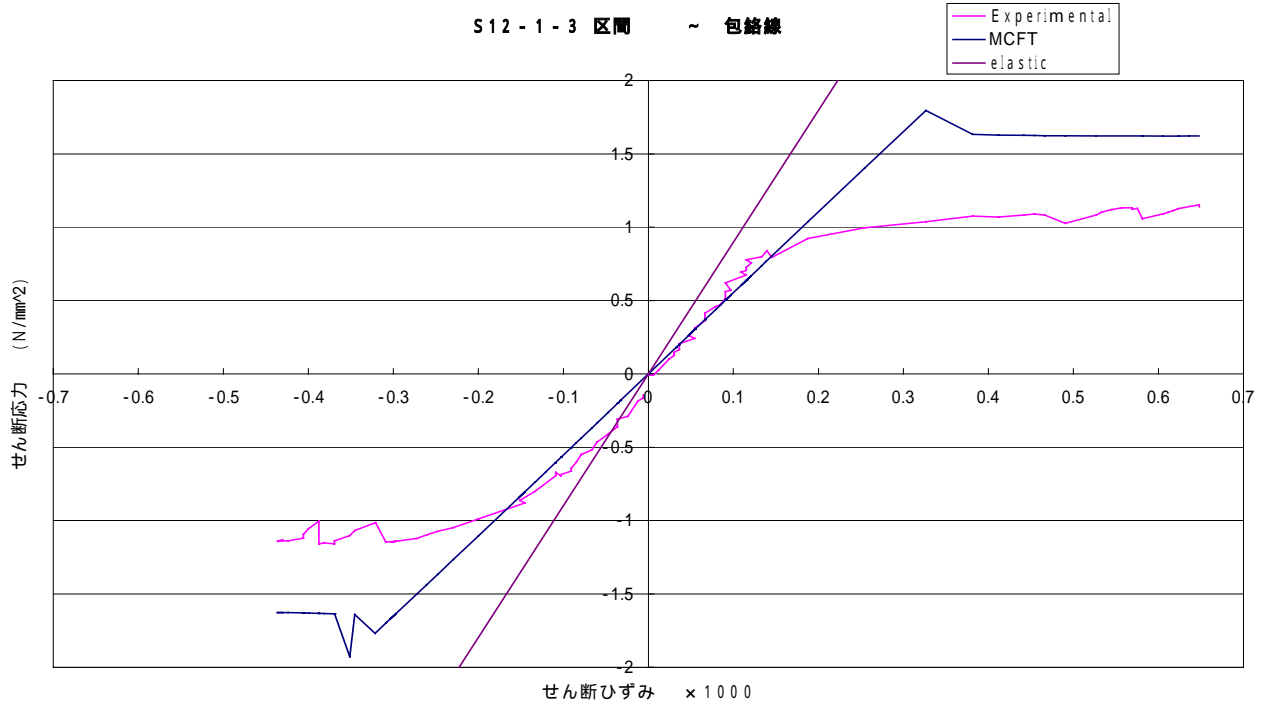
図 - 5.2 せん断ひずみ とせん断応力 の関係

(2)解析結果

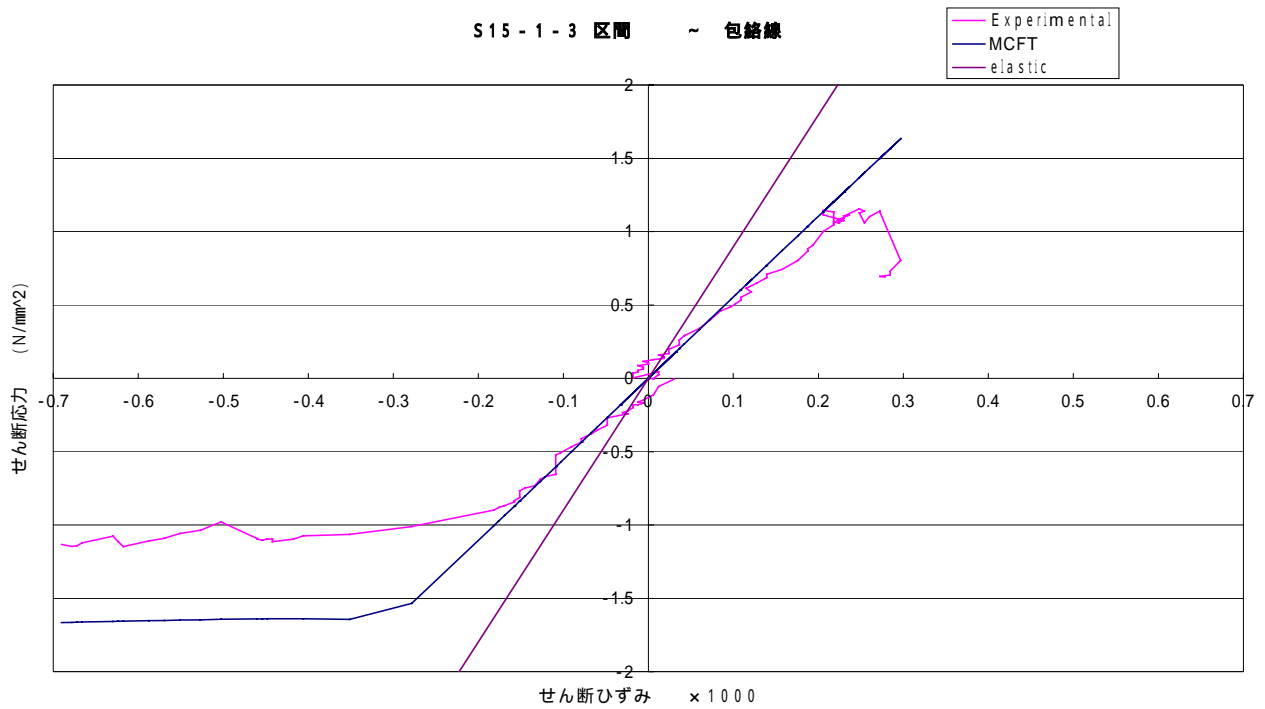
図 - 5.3に S12-1-3と S15-1-3の ~ 包絡線を示す.

図 - 5.3の(a), (b)から, MCFTの解析値は実験値とほぼ適合するため, MCFTのせん断解析は十分な信頼性を持つことがわかる.

せん断ひずみが増加するにつれ, 実験値と解析値の差が大きくなが, これは実験では繰り返し荷重で载荷をしているため, コンクリートの劣化の影響が現れたと考えられる.



(a) S12-1-3 区間



(b) S15-1-3 区間

図 - 5.3 せん断ひずみせん断応力関係

5 - 2 . 曲げモーメントによる影響

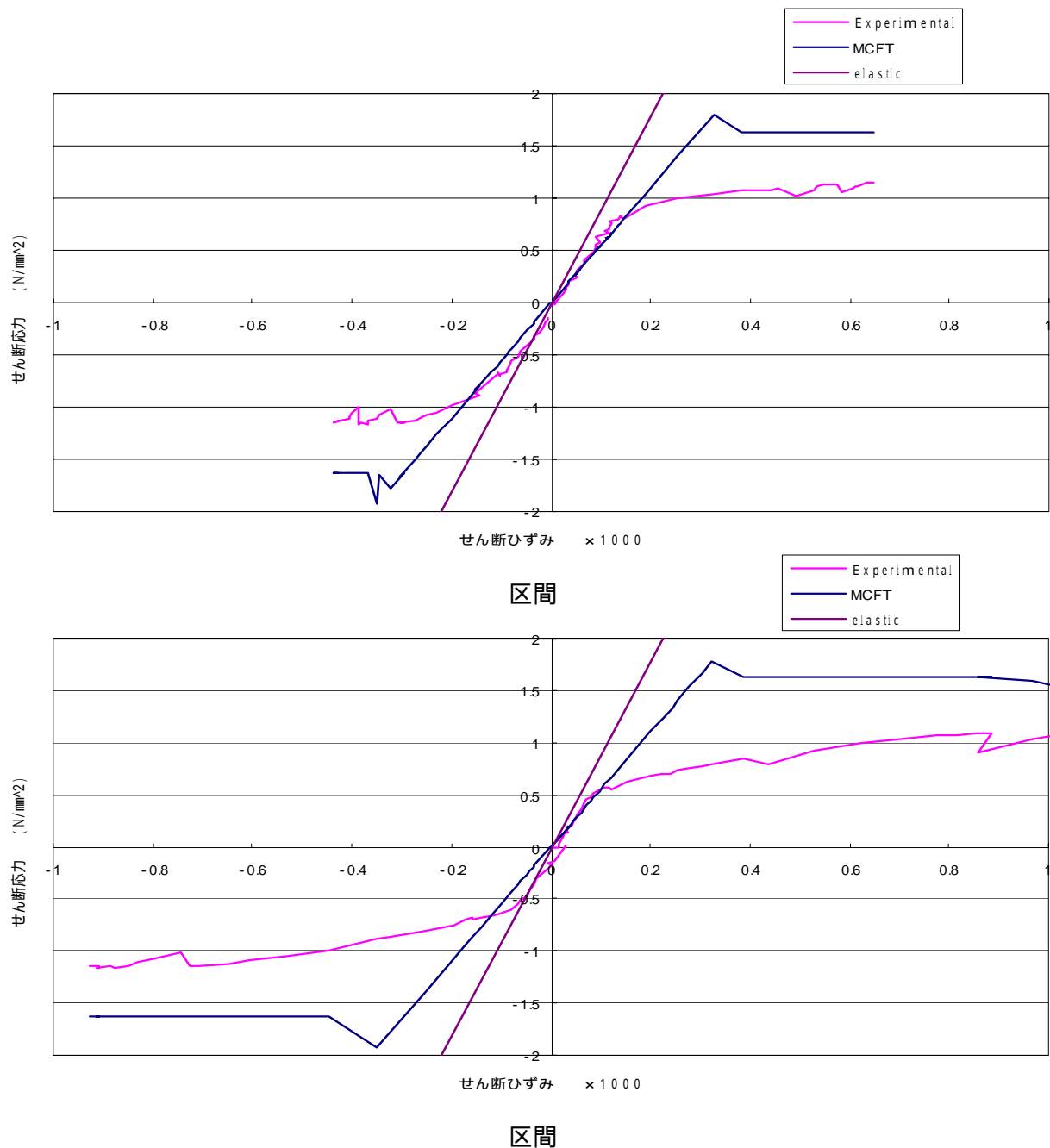
RC 柱にせん断力のみ作用する場合 , MCFT の適合性は , 5-1-1 で証明できた . しかし , 実際の構造物では , せん断力のみが作用する部材はほとんどない . そこで曲げモーメントが生じている区間に MCFT と適用させ , 曲げモーメントによって影響が生じるかを検討した .

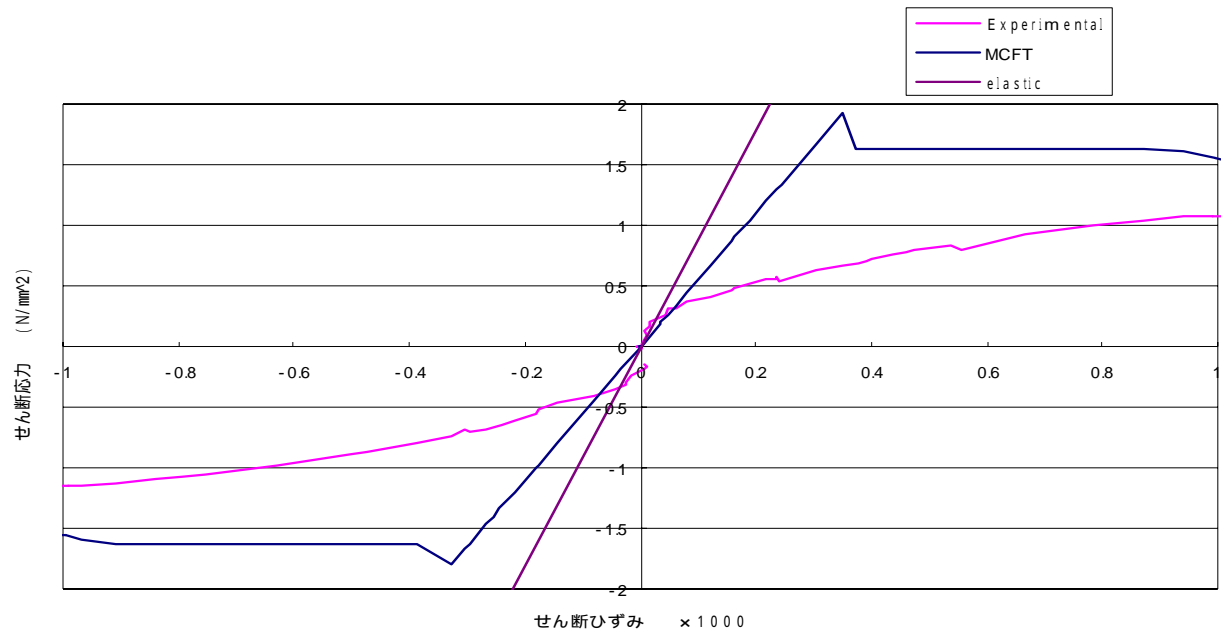
(1)解析手法

S12-1-3 試験体を対象とし , 5-1-1 と同様に , 曲げモーメントをせん断作用区間 ~ に分け , せん断ひずみとせん断応力を比較することにより曲げモーメントの影響を区間 ~ に対し比較した .

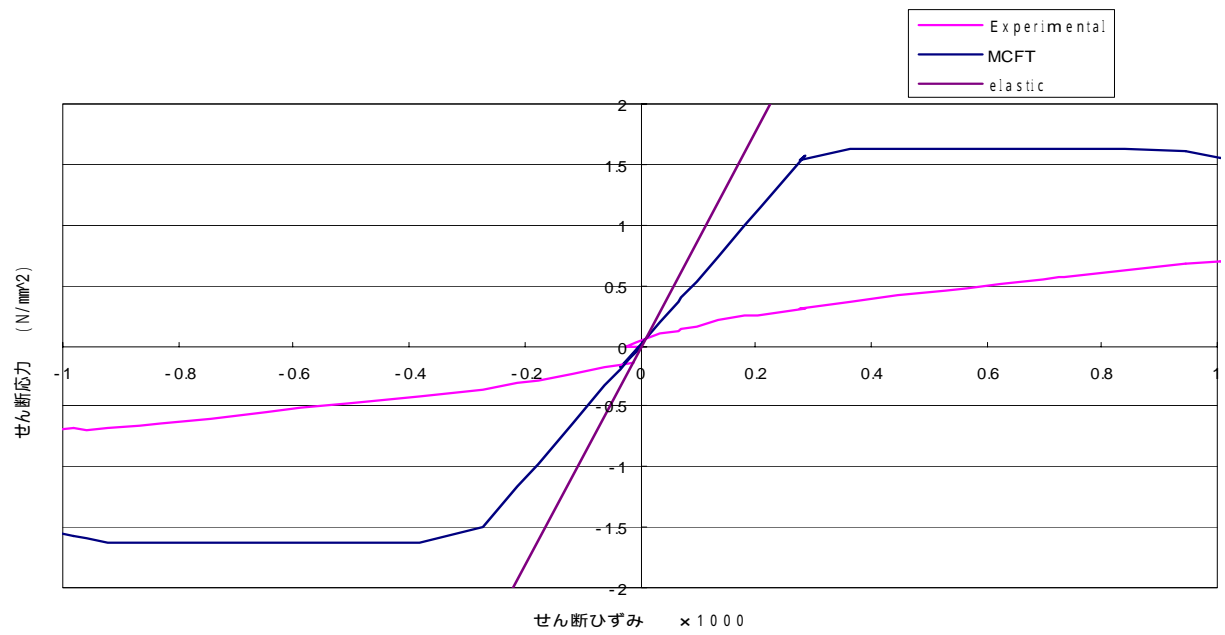
(2)解析結果

図 - 5 . 4 に区間別の ~ 包絡線を示す . 曲げモーメントの最も影響する区間 では , せん断ひずみが生じるとすぐに , せん断応力が低下していく . そして曲げモーメントの影響が小さくなるに伴い , MCFT の解析値と実験値の差が小さくなっていくことが顕著にわかる . このことから曲げモーメントの作用することにより , MCFT による解析値が実験値と大幅に異なることが言える .





区間



区間

図 - 5.4 曲げモーメントの影響を考慮したせん断ひずみせん断応力関係

5 - 3 . 圧縮ストラット角度の妥当性

MCFTでは圧縮ストラット角度を、ひび割れ発生前から破壊に至るまで作用せん断力の変化に伴い、算出することができる。このことを用いて試験体の致命的なひび割れ角度が生じたときのせん断応力から、MCFTによる圧縮ストラット角度を算出し、実験値との比較を行った。

(1)解析手法

S12-1-3とS15-1-3試験体の水平荷重Pと水平変位 の関係(図 - 5.5)から、耐力低下が生じたときのひび割れを致命的なひび割れとして、耐力低下時のせん断応力を求める。そのときの、ひび割れの通っている、区間、 のせん断ひずみ γ_M から、圧縮ストラット角度 θ_m を算出し、試験体の最終写真(図 - 5.6)から求めた、ひび割れ角度 ρ とを比較した。

(2)解析結果

図 - 5.5より、致命的なひび割れが生じたときを、耐力低下が生じたステップとし、S12-1-3 では -4×1 、S15-1-3 では $+5 \times 1$ とし を求め、ひび割れ角度は図 - 5.6から算出し、MCFT による解析と比較するため表 - 1に示した。

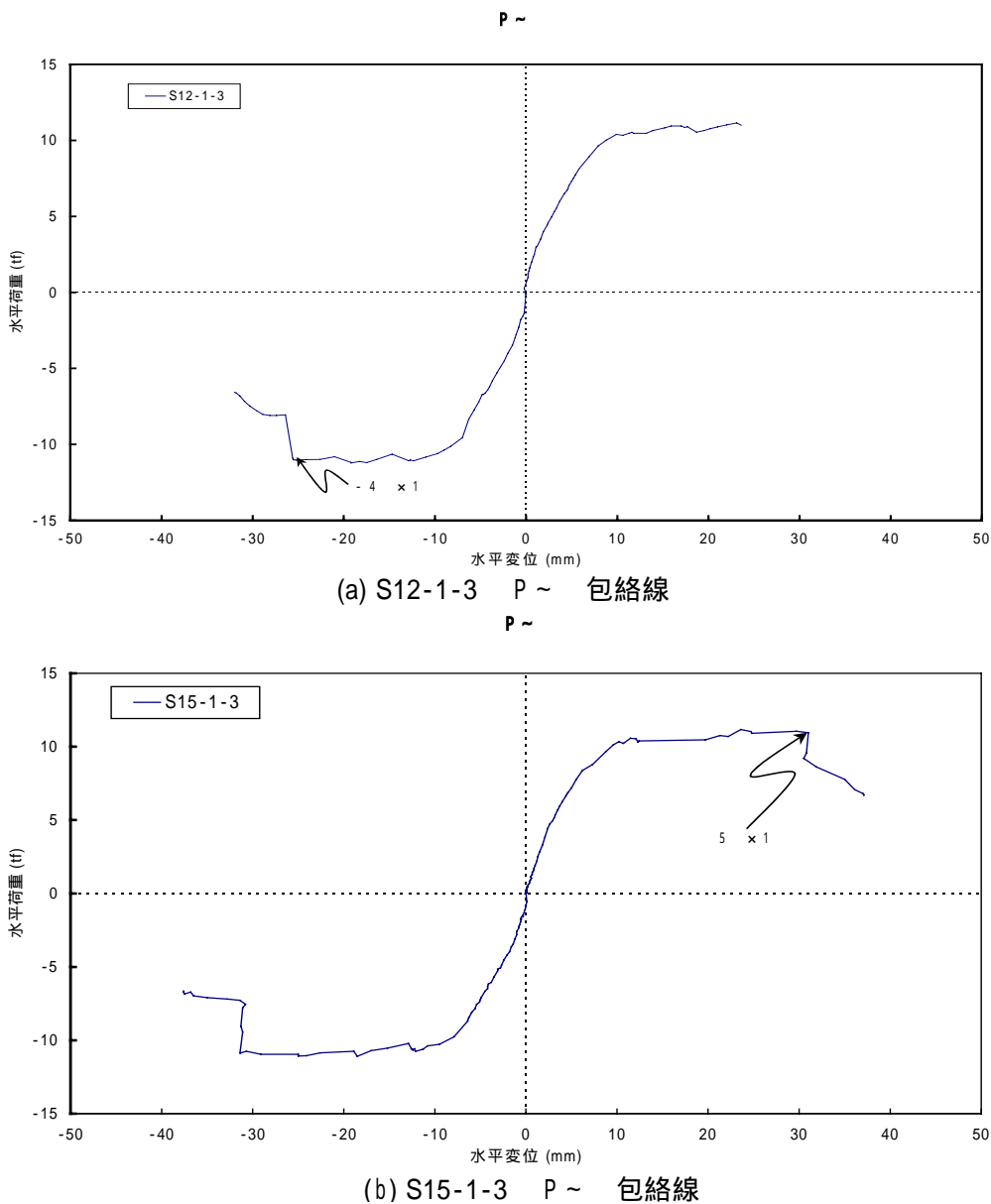
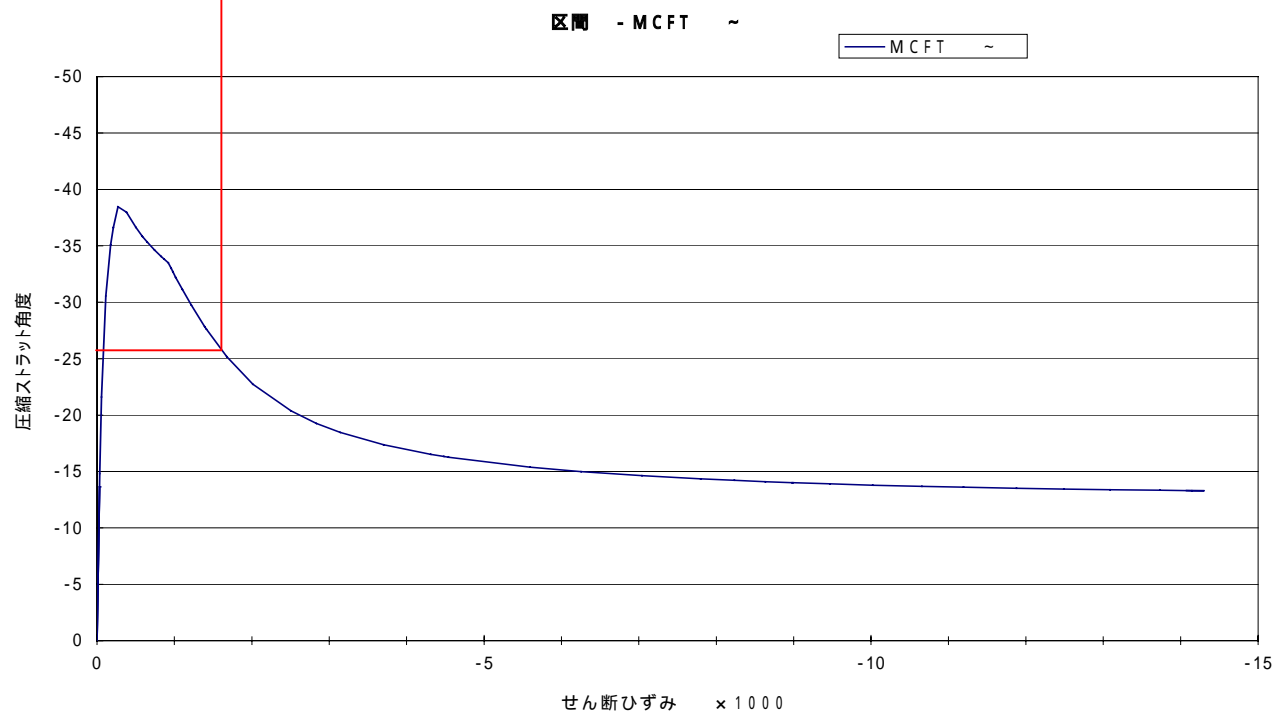
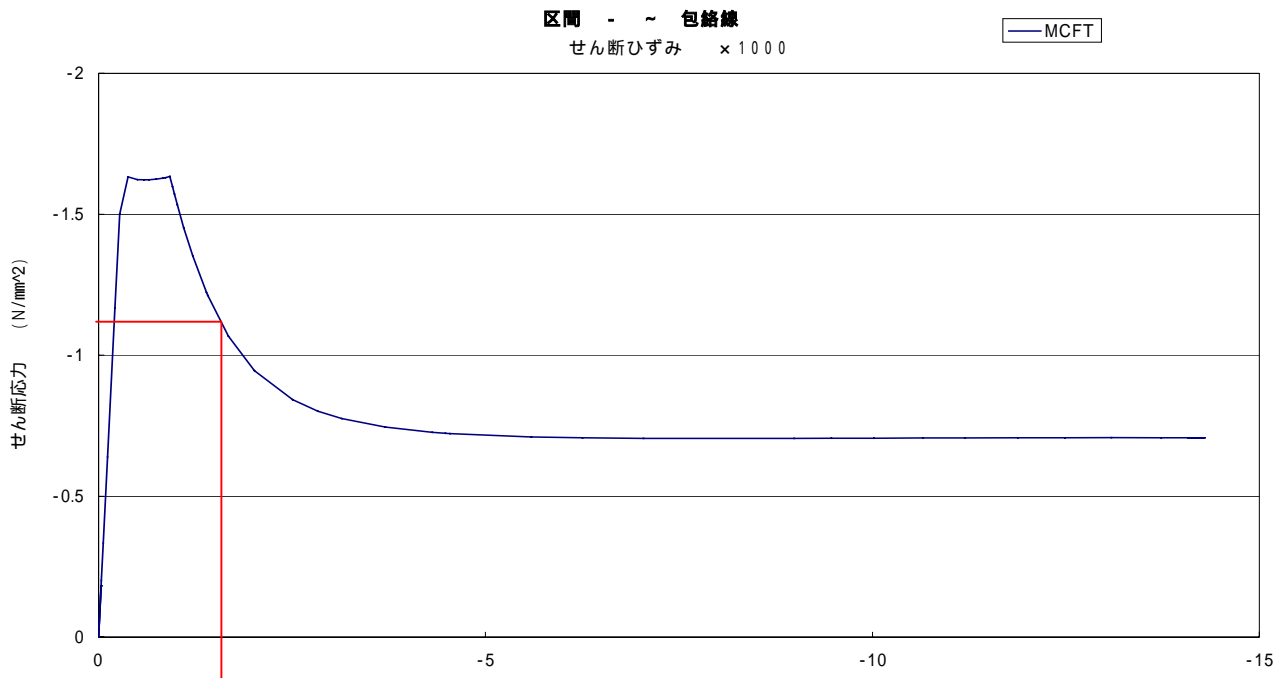
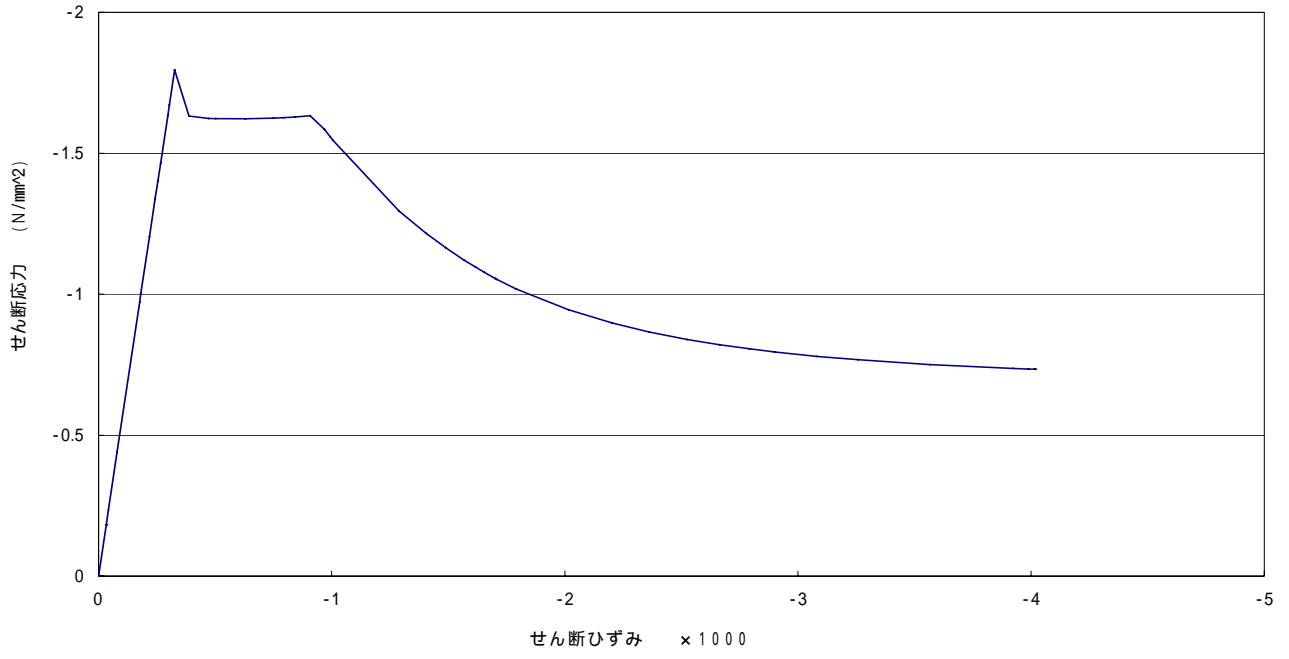


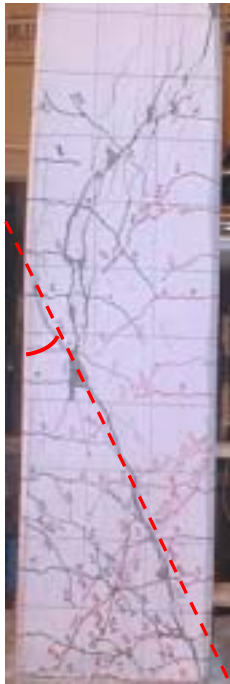
図 - 5.5 水平荷重と水平変位の関係



MCFT



負 ←————→ 正
 荷 荷 方 向



(a) S12-1-3 の最終写真



(b) S15-1-3 の最終写真

ひび割れ角度 = 27.5 [deg]

ひび割れ角度 = 31.8 [deg]

図 - 5.6 試験体の終局写真

表 - 1 解析結果比較

対象試験体	S12 - 1 - 3	S15 - 1 - 3
耐力低下時のせん断応力 [N/mm ²]	$-4 \times 1 = 1.14$	$+5 \times 1 = 1.13$
ひび割れ角度 ρ [deg]	$\rho = 27.5$	$\rho = 31.8$
MCFT による圧縮ストラット角度 m	$m = 30.3$	$m = \text{なし}$

S12-1-3 では、MCFT による圧縮ストラット角度は算出されるものの、ひび割れ角度に対し、誤差が10%となった。S15-1-3 では、耐力低下時のせん断応力に対しての圧縮ストラット角度は算出されなかった。

修正圧縮場理論では、曲げモーメントが考慮されていないため、曲げモーメントが最も生じる柱基部では、せん断変形が曲げモーメントによる影響を受ける。その結果、ひび割れ角度と圧縮ストラット角度の誤差が生じることが考えられる。さらには、本学のRC柱の耐震実験では、正負交番荷重であるため、コンクリートのせん断劣化が大きく実験結果に影響を及ぼすと考えられる。

6. まとめ

修正圧縮場理論では、せん断力のみが作用する場合、解析値は実験値とほぼ適合し、信頼性のもてる手法であることが証明された。しかし、曲げモーメントとせん断力が作用する区間では、せん断力の影響と曲げモーメントによる影響を分け、MCFT をせん断力のみで適用してはならない。さらに圧縮ストラット角度は曲げモーメントが大きくなるを正確なひび割れ角度を算定できないため、曲げモーメントの影響を考慮した解析手法を提案する必要がある。

一つの手法として、RC 柱では靱性を考える際、 $P - \delta$ 曲線を用いる。水平変位 δ を算出する際に曲げ解析を行い $M - \delta$ 関係から δ_{flex} を求めるが、曲げ解析ではせん断変形を考慮していない。そこで、図 - 6 のように水平変位 δ を曲げモーメントによる水平変位 δ_{flex} 、せん断力による水平変位 δ_{shear} 、主鉄筋の抜け出しによる水平変位 δ_{pull} にわけ、 $P - \delta$ 曲線を考える。曲げ解析を基に、MCFT を適用する一つの手法である。もう一つは、MCFT 解析を基に、曲げモーメント M と曲率 κ の関係を、帯筋および主鉄筋方向の力の釣り合い条件式、変形の適合条件、コンクリートおよび鉄筋の応力とひずみを関係づける構成式に加える手法があげられる。これらの手法を用いることにより、曲げ解析のみによる靱性評価よりも精度の良い、解析手法が提案できると考えられる。

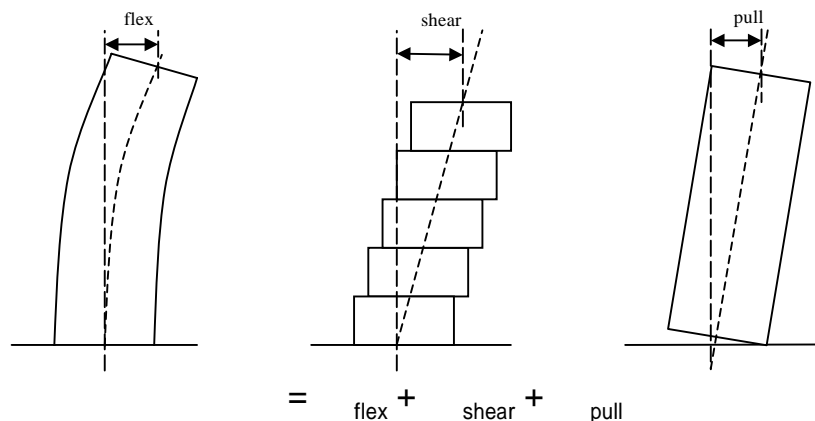


図 - 6 各要因による水平変位

【参考文献】

M.P.Collins and D.Mitchell: Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL INC., 1991

田辺忠顕, 檜垣勇, 梅原秀哲, 二羽淳一郎: コンクリート構造, 朝倉書店, 1985.6

中村光, 檜垣勇: 拡張した修正圧縮場理論による RC はり断面のせん断耐荷力評価, 土木学会論文集, No.490/ -23, pp.157-166, 1994.5

幸左賢二, 小林和夫, 安田扶律, 水田崇志: 修正圧縮場理論による大型 RC 橋脚のせん断評価, 土木学会論文集, No.490/ -43, pp.71-81, 1999.5

吉川弘道: 鉄筋コンクリートの解析と設計, 丸善, 1995.6

関谷壮, 角誠之助, 谷村眞治, 岡村正明, 金岡昭治: 最新材料力学, 朝倉書店, 1990.5

Appendix : 主ひずみと成分ひずみ

主鉄筋(x軸)方向ひずみ ε_x と主鉄筋鉛直(t軸)方向ひずみ ε_t

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_t - \varepsilon_2} \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_t - \varepsilon_2$$

上式は, Mohr のひずみ円(図 - 1) から求まる .

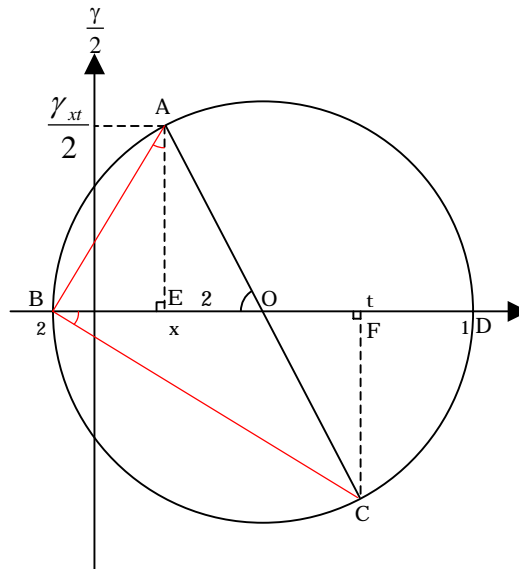
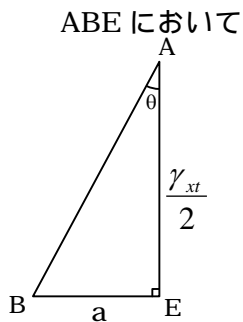
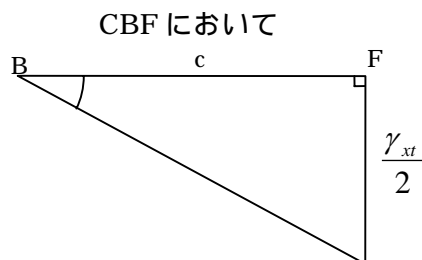


図 - 1 Mohr のひずみ円



$$\begin{aligned} a &= \varepsilon_x + (-\varepsilon_2) \\ \frac{\gamma_{xt}}{2} &= a \tan \theta \\ \gamma_{xt} &= 2a \tan \theta \\ &= 2(\varepsilon_x - \varepsilon_2) \tan \theta \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} c &= \varepsilon_t + (-\varepsilon_2) \\ \frac{\gamma_{xt}}{2} &= c \cdot \tan \theta \\ \gamma_{xt} &= 2c \tan \theta \\ &= 2(\varepsilon_t - \varepsilon_2) \tan \theta \end{aligned}$$

$$\frac{a}{\tan \theta} = c \cdot \tan \theta$$

$$\tan^2 \theta = \frac{a}{c} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_t - \varepsilon_2}$$

これらの2つの式を用いて, 主鉄筋(x軸)方向ひずみ ε_x と主鉄筋鉛直(t軸)方向ひずみ ε_t を表すと, 次の

よくなる .

$$\varepsilon_t = \varepsilon_1 - \varepsilon_x + \varepsilon_2$$

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}$$

$$\varepsilon_1 \cdot \tan^2 \theta - \varepsilon_x \cdot \tan^2 \theta = \varepsilon_x - \varepsilon_2$$

$$\varepsilon_1 \cdot \tan^2 \theta + \varepsilon_2 = \varepsilon_x (1 + \tan^2 \theta)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1 \cdot \tan^2 \theta + \varepsilon_2}{1 + \tan^2 \theta}$$

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta}$$

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= \frac{V}{b_w \cdot jd} \times \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_1 \\ &= \tau \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_1\end{aligned}$$

上式は Mohr の応力円(図 - 1)によって求めることができる。

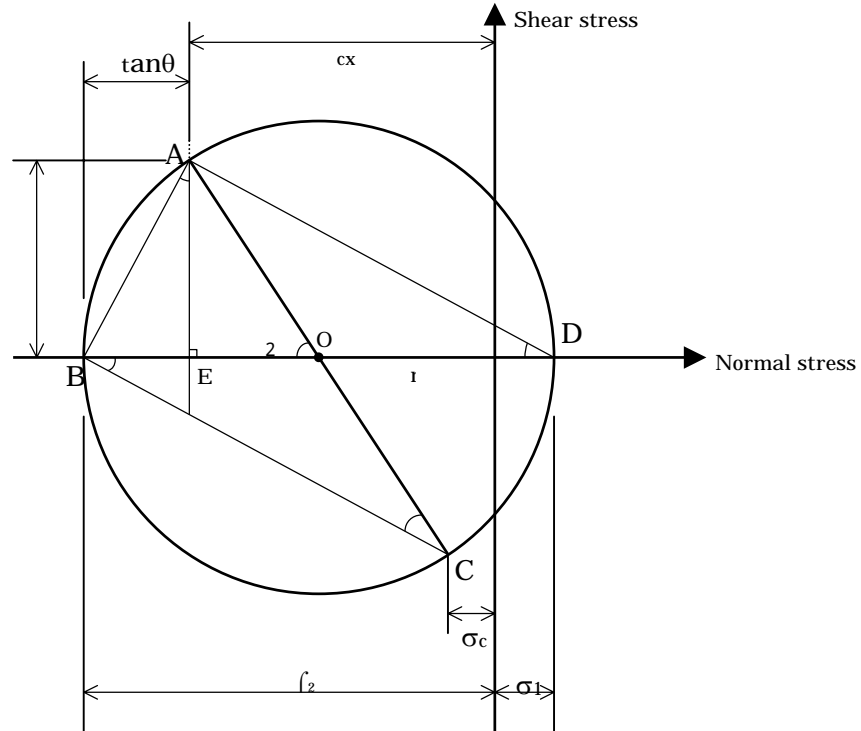
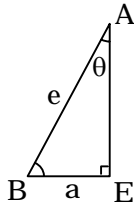


図 - 1 Mohr の応力円

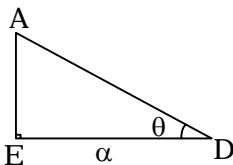
ABE において



$$\tan(90 - \theta) = \cot \theta = \frac{\tau}{a}$$

$$a = \tau \tan \theta$$

AED において



$$\alpha = \frac{\tau}{\tan \theta}$$

これらより、コンクリートの主圧縮応力は次のように表される。

$$\sigma_1 + \sigma_2 = (a + \alpha) = \tau \tan \theta + \frac{\tau}{\tan \theta}$$

$$\sigma_2 = \tau \left(\tan \theta + \frac{1}{\tan \theta} \right) - \sigma_1$$

ひび割れ間の領域で伝達されるせん断力は、ひび割れ面でのせん断力と等価であるという条件から求められる。

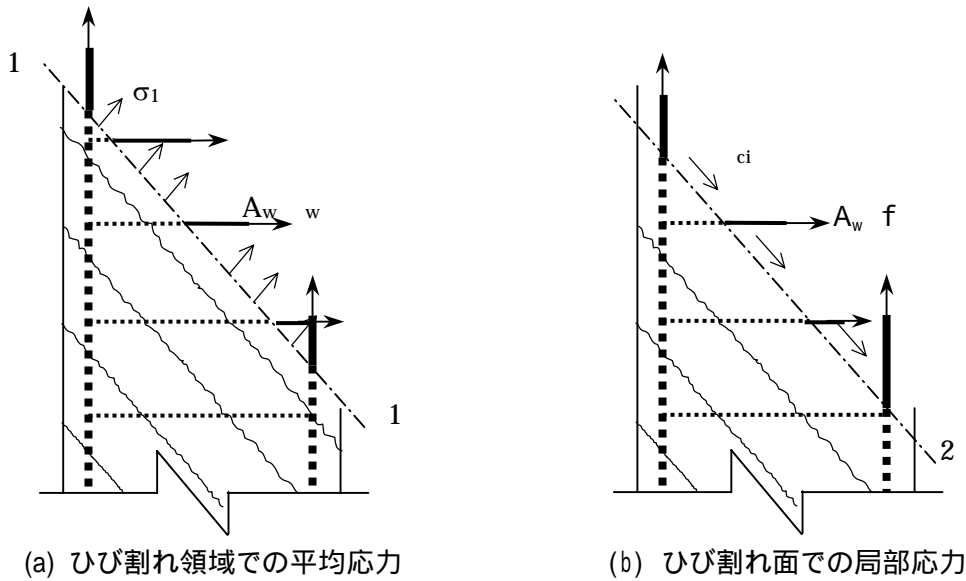


図 1 ひび割れを介して伝達される力

つまり、図 - 1 の(a) , (b)の状態が等しいと考えている。

この状態を力の釣り合い式で表すと次式で表される。

$$A_w \sigma_w \left(\frac{jd}{s \tan \theta} \right) + \frac{\sigma_1 bjd \cos \theta}{\sin \theta} = A_w f_{wy} \left(\frac{jd}{s \tan \theta} \right) + \tau_{ci} bjd$$

(3.6)

はじめに、左辺を考える。

・第1項目

$$A_w \sigma_w \left(\frac{jd}{s \tan \theta} \right)$$

トラス理論を基に考えていく。トラス理論では、帯鉄筋の降伏により、せん断破壊に至るものとして仮定している。そのため、帯鉄筋を配置した柱のせん断耐力は次式で表される。

$$V_s = \frac{A_w \sigma_w \sin \alpha jd (\cot \theta + \tan \alpha)}{s}$$

ひび割れを横切るせん断補強鉄筋の本数を n とすると、

$$n = jd (\cot \theta + \cot \alpha) / s$$

ここで alpha は帯鉄筋と軸方向鉄筋のなす角であり、柱では alpha = 90° であるため、

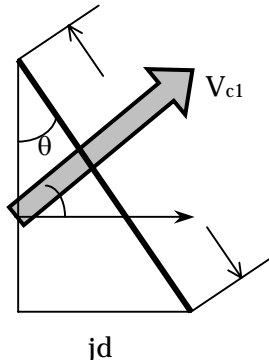
$$V_s = \frac{A_w f_w \left(\frac{jd}{\tan \theta} \right)}{s}$$

となり、帯鉄筋のせん断耐力負担分であることが解る。

・第2項目

$$\frac{\sigma_1 b j d \cos \theta}{\sin \theta}$$

左辺でのコンクリートせん断力負担分を V_{c1} , ひび割れ面長さを 1 とすると ,



$$l = \frac{j d}{\sin \theta}$$

$$V_{c1} = \sigma_1 l = \sigma_1 \frac{j d}{\sin \theta}$$

V_{c1} は , ひび割れに対して鉛直方向であるので帯鉄筋 (主鉄筋鉛直) 方に , 断面幅を考慮して変換する .

$$V_{cw} = V_{c1} \cos \theta \quad \Rightarrow \quad V_{cw} = \sigma_1 \frac{j d}{\sin \theta} b \cos \theta$$

次に , 右辺を検討する .

・第1項目

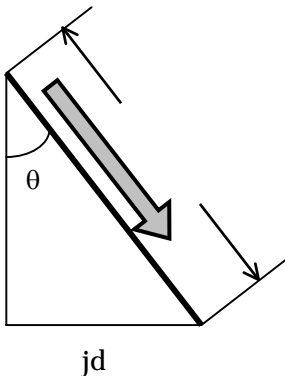
$$A_w f_{wy} \left(\frac{j d}{s \tan \theta} \right)$$

ひび割れ面では , 帯鉄筋は降伏しているものと考え , 帯鉄筋の降伏強度を f_{wy} で表し , 左辺の第一項目と同様に求めることができる .

・第2項目

$$\tau_{ci} b j d$$

右辺でのコンクリートせん断力負担分を V_{c2} , コンクリートのひび割れ面を介して伝達されるせん断力を τ_{ci} , ひび割れ面長さを 1 とすると ,



$$l = \frac{j d}{\sin \theta} , \quad l b = \frac{j d \cdot b}{\sin \theta}$$

V_{c2} はひび割れ方向であるため , 帯鉄筋 (主鉄筋鉛直) 方向に変換する .

$$V_{cw} = V_{c2} \sin \theta \quad \Rightarrow \quad V_{cw} = \tau_{ci} j d b$$

これらのコンクリートせん断力負担分 (V_c) と帯鉄筋負担分 (V_s) は , ひび割れの発生しているコンクリートと鉄筋の要素をマクロ的にとらえているため , 応力レベルから求めることができる . さらにせん断力 (V) は , V_c と V_s の累計式であると考えたと (3 . 6) 式のような形をとる .

(3.6)式を主引張応力 (σ_1) について , 整理すると次式となる .

$$\sigma_1 = \tau_{ci} \tan \theta + \frac{A_w (f_{wy} - f_w)}{s b}$$

主圧縮応力は次式で表される。

$$\sigma_2 = f'_{2\max} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{f'_{2\max}}{f'_c} = \frac{1}{\left(0.8 - 0.34 \cdot \varepsilon_1 / \varepsilon'_c \right)} \quad (3.9)$$

ここで、 ε'_c は、1軸圧縮で圧縮強度が最大となるときのひずみである。

(3.8)式は2軸応力状態のコンクリートの応力 - ひずみの関係は1軸圧縮状態と異なることを表現したもので、コンクリートの最大圧縮応力および応力 - ひずみ曲線は、主引張ひずみ ε_1 の影響を受けることを示している。これは引張ひずみの影響でコンクリート応力 - ひずみ曲線のピークの低下する現象（引張軟化）を示している。(3.9)式は、1軸圧縮での最大圧縮応力と2軸圧縮との比をとることにより、その低下程度を表している。コンクリート標準示方書では、面内力を受ける壁面の場合0.4~0.6に低減している。

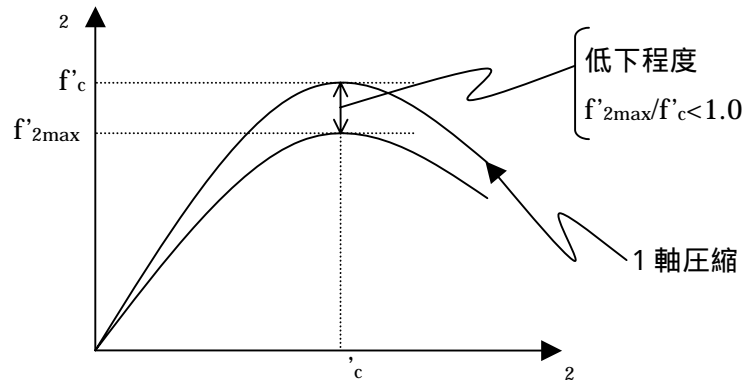


図 - 6 コンクリートの応力～ひずみ関

最大主圧縮応力と主圧縮応力を比較し、もし最大主圧縮応力が小さい場合はコンクリートが圧壊していることを示している。

さらに主圧縮ひずみは、2軸応力状態のコンクリートの応力とひずみの関係より求まる。

$$\sigma_2 = f'_{2\max} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon'_c \cdot f'_{2\max} - \sqrt{-\varepsilon'_c \cdot \sigma_2 \cdot f'_{2\max} + \varepsilon'^2_c \cdot f'^2_{2\max}}}{f'_{2\max}}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon'_c - \sqrt{\varepsilon'^2_c \left(-\frac{\sigma_2}{f'_{2\max}} + 1 \right)}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon'_c \left\{ 1 - \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{f'_{2\max}} \right)} \right\}$$

1.引張軟化

コンクリートの引張強度は、圧縮強度の約 1/10 であることが知られている。そのため大構造物を対象とした解析では、引張強度を弾性域まで考慮する手法や、または全く考慮しない手法がとられている。しかし実際の応力ひずみ関係は、ひび割れ発生後においても応力伝達が生じている。この現象を“引張軟化”と呼び、詳細解析を行う際、引張側の応力として解析に導入する必要がある。

せん断問題を取り扱う場合、ひび割れ発生後の主引張応力は、解析に大きな影響を与えることとなる。

様々な、引張軟化構成則が提案されているが、本論においては、Collins・Vecchio によって提案された式を適用することとした。

$$\sigma_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \cdot f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \varepsilon_1}}$$

ここで、

- 1: 帯鉄筋の付着特性を表す係数
- 2: 荷重の载荷種類を表す係数

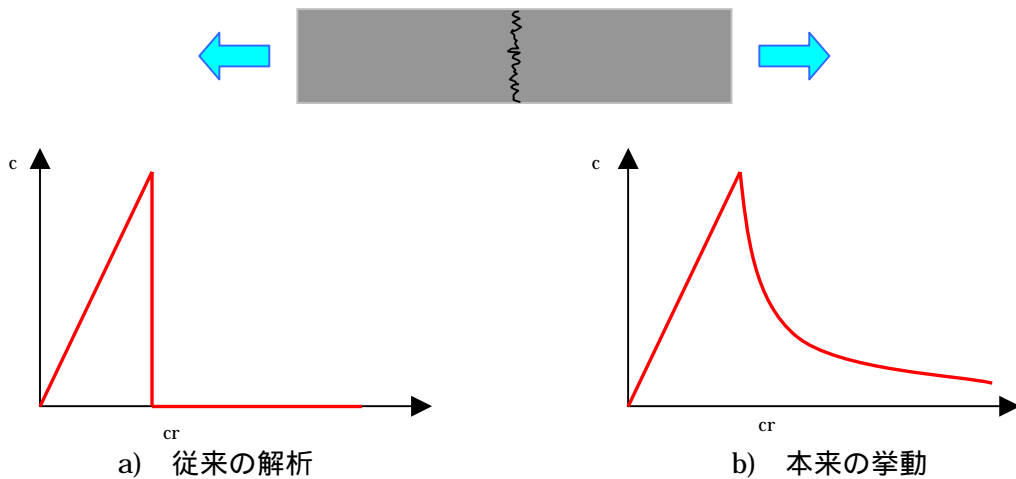


図-1 コンクリートの引張応力～ひずみ関係(解析と実際の挙動)

2.引張硬化(tension stiffening)

RC 部材を部材軸方向に引張力を作用させると、初期ひび割れ発生以降順次ひび割れ本数は増加し、数本のひび割れを挟む、ある区間におけるコンクリートの引張応力と平均ひずみの関係は比較的緩やかな降下曲線を描く。

これは、鉄筋とコンクリートとの付着作用によって、ひび割れ間ではコンクリートが引張力に対し、鉄筋に比べ微少ではあるが、有効に抵抗しているためである。このような力学的現象を引張硬化 (tension stiffening) と呼び、変形解析において重要な要因となる。

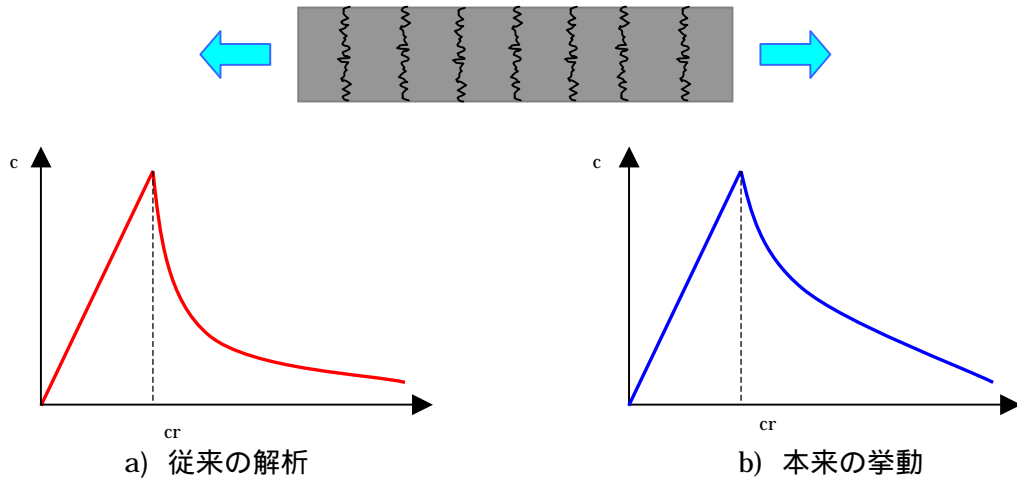


図-2 コンクリートの引張応力～ひずみ関係(引張硬化)

引張硬化は鉄筋コンクリートのひび割れ後の引張抵抗力である。つまり、それぞれの力学的特性を分けて考えると、ひび割れ後の挙動は図-3の青線に示すようになり、実際の挙動(赤線)とは大きく異なる。しかし、鉄筋コンクリートは複合部材であり、相互的作用を及ぼすため、図-3の赤線のような挙動を示すのである。この挙動の差が、鉄筋とコンクリートの付着作用であると考えられる“引張硬化”を解析に導入することによって、より実現象に近い解析を行うことができる。

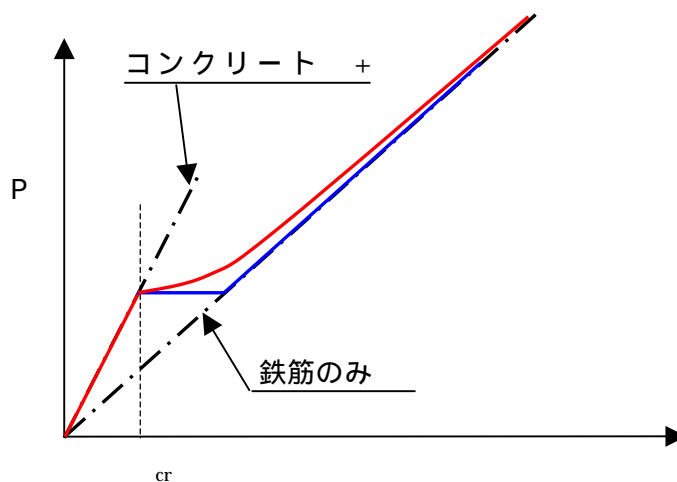


図-3 単軸引張を受ける RC 部材の変形挙動

引張軟化と引張硬化の違いは、複合部材である RC コンクリートではコンクリートの引張抵抗は、無

筋コンクリートの引張抵抗と、鉄筋との付着によるコンクリートの抵抗分を累計したもの(図-4)とすると理解しやすい。つまり、引張軟化は無筋コンクリートのひび割れ後の挙動であり、引張硬化は RC コンクリートのひび割れ後の挙動である。

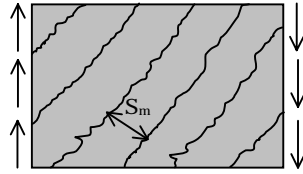


図 - 1 セン断力による斜めひび割れ

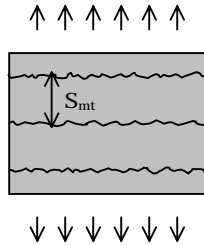


図 - 2 軸方向引張力による水平ひび割れ

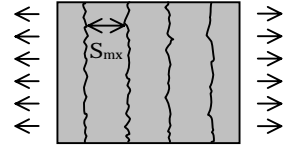


図 - 3 帯筋方向引張力による鉛直ひび割れ

S_{mx} : 軸方向(主鉄筋方向)の平均ひび割れ間隔

$$s_{mx} = 2 \left(c_x + \frac{s_x}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{d_x}{p_x}$$

S_{mt} : 横方向(帯鉄筋方向)の平均ひび割れ間隔

$$s_{mt} = 2 \left(c_t + \frac{s}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{d_t}{p_t}$$

$$\begin{cases} p_x = A_{sx} / A_c \\ s_x = \left[b - 2c - \left(2 \frac{d_x}{2} \right) \right] (n_x - 2) \\ c_x = \frac{h}{2} - c - d_x \\ p_t = A_t / (bs) \\ c_t = \frac{h}{2} - c - d_t \end{cases}$$

ここで、

c : かぶり
間隔

c_x : 中心線 ~ 軸方向鉄筋の間隔

c_t : 中心線 ~ 帯鉄筋の

n_x : 軸方向鉄筋最外縁一列分本数

s_x : 軸方向鉄筋ピッチ

s : セン断補強筋ピッチ

d_x : 軸方向鉄筋径

d_t : 帯鉄筋径

p_x : 軸方向鉄筋の鉄筋比

p_t : 帯鉄筋の鉄筋比

k_1 : 鉄筋の付着特性を関連付ける係数

$k_1 = 0.4 \dots \dots$ 異形鉄筋

$k_1 = 0.8 \dots \dots$ 丸鋼

k_2 : 応力勾配から求める係数

$$k_2 = \frac{0.25(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1}$$

を表している。 k_2 に関しては、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ として、主引張ひずみと主圧縮ひずみが等しいと仮定しているため、 $k_2 = 0.25$ としている。

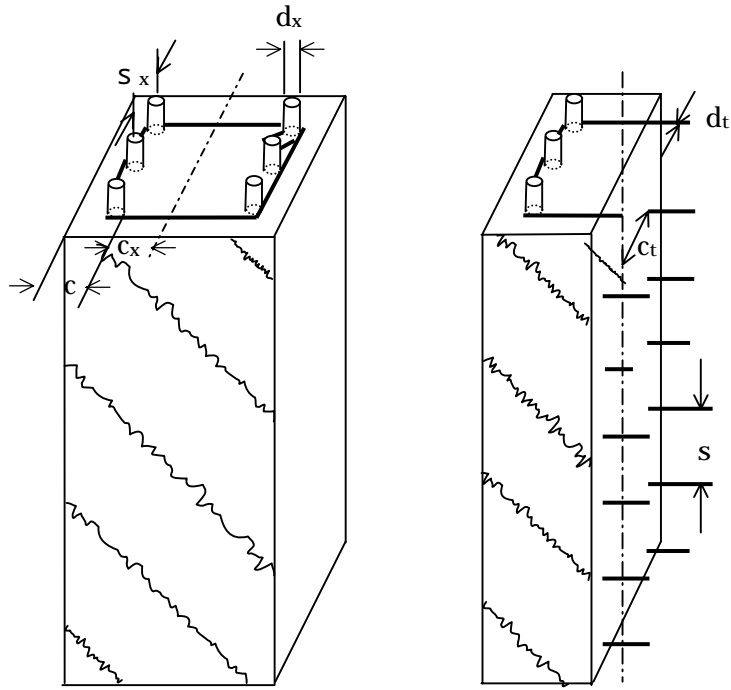


図 - 4 ひび割れ間隔に影響を与えるパラメータ

これらを用いて、平均せん断ひび割れ間隔 (s_m) を算定する

$$s_{m\theta} = \frac{1}{\left(\frac{\sin \theta}{s_{mx}}\right) + \left(\frac{\cos \theta}{s_{mt}}\right)} \quad \left[\begin{array}{l} \theta : \text{圧縮ストラット角度} \end{array} \right.$$

修正圧縮場理論による解析のフロー図

