

画像解析と修正圧縮場理論を用いた 鉄筋コンクリートはりのせん断挙動解析

学生氏名 松本 啓

指導教員 吉川 弘道

本論では、鉄筋コンクリート部材に対するせん断破壊メカニズムの解明を目的としている。まず、修正圧縮場理論にファイバーモデルを併用した解析プログラムを用いた数値シミュレーションによって、せん断挙動の把握を試みた。次に、鉄筋コンクリートはりを対象とした静的二点載荷実験より、非接触変位計測方法の提案・検証を行った。その二次的処理として画像解析を用い、全変形量を曲げ・せん断変形に分離、また、曲げモーメントの影響を考慮した圧縮ストラット角度の算出、更には圧縮ストラットのモデル化を行った。その結果、曲げモーメントの影響を受ける際のせん断挙動を確認し、変位計測提案手法の有用性を実証した。また、本実験における圧縮ストラット角度は $23^{\circ} \sim 33^{\circ}$ であると分かった。

Key Words : *Modified Compression Field Theory, shear deformation, bending moment deformation, Image Analysis, diagonal compressive strut*

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のせん断に対する研究は、終局強度を求める事に重点が置かれ、代表的手法としてトラス理論がよく知られている。また、トラス理論にコンクリート寄与分を付加した修正トラス理論は、現行の各国示方書に多く採用されており、設計せん断耐力式の基準となっている¹⁾。しかし、いくつかの再考すべき要素を含んでいる。まず、腹部コンクリートの圧縮ストラット角度を 45° と仮定しているが、理論的・実験的にもその角度は載荷するに従い、終局時にはそれよりも低い角度となる事が多い。また、せん断力は曲げモーメントと分離して解析を行うが、非線形領域においては互いに影響を及ぼす事が確認されている²⁾。つまり、適切な角度・軸力・主鉄筋・せん断補強筋・曲げ応力・せん断スパン比等を考慮する必要がある。このような現状において、より合理的にせん断破壊のメカニズム³⁾⁴⁾を解明する手法の1つが修正圧縮場理論⁵⁾⁶⁾である。これは、せん断力が作用する鉄筋コンクリート要素の斜めひび割れの発生、せん断破壊に至るまでの過程を追跡できるモデルである。そこで本論では、曲げモーメントの影響も考慮するため、曲げ解析手法であるファイバーモデルを併用し、せん断変形・曲げ変形を考慮した非線形解析プログラム⁷⁾を用いて実験結果への評価・検証を行った。本論の検討項目をまとめると、次の2項になる。

曲げモーメントの影響を考慮した修正圧縮場理論を用い、数値シミュレーションから鉄筋コンクリートはりのせん断挙動について把握する。また、デジタルカメラを用いた非接触変位計測システム(実験手法/結果)の信頼精度に対する妥当性を検証した。

せん断耐力に影響を及ぼす要因の一つである圧縮ストラット角度に着目し、画像解析・解析プログラム・その他算出方法より求めた結果と照合することで、本実験における圧縮ストラットのモデル化・角度算定を行った。

2. ファイバーモデルを考慮した修正圧縮場理論

(1)ファイバーモデル(Fiber Model)²⁾

鉄筋コンクリート部材における断面剛性(EI)は、曲げひび割れの進展とともに変化する。このような鉄筋コンクリートの非線形な曲げ剛性を評価する手法にファイバーモデルがある。ファイバーモデルは直接曲げ剛性を算出するのではなく、平面保持の仮定のもと、コンクリート及び鉄筋の構成則・力の釣合い条件を用いて曲げモーメントM - 曲率 関係を算出する手法である。

a) 曲げモーメントM 曲率 関係(図 1参照)

曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート断面のM 関係の釣り合い式を、式(1)~式(3)に示す。

断面内における軸方向の釣り合い式

$$N = \int_A \sigma_x dA + \sum_1^n A_{s_i} \sigma_{s_i} \quad (1)$$

断面内の曲げモーメント計算式

$$M = \int_A \sigma_x v dA + \sum_1^n A_{s_i} \sigma_{s_i} x_i \quad (2)$$

曲率 (Curvature)

$$\phi = \frac{\epsilon'_c}{x} \equiv \frac{M}{EI} \quad (3)$$

N:軸力, A: 断面積, n: 断面の分割数

A_{s_i} : i 番目の鉄筋要素の面積, σ_{s_i} : i 番目の鉄筋要素に働く応力

x: 中立軸位置, x_i : i 番目のコンクリート要素から図心までの距離

ϵ'_c : 圧縮最外縁コンクリートひずみ

また, RC 要素内での関係を示すと図 6 の様になる.

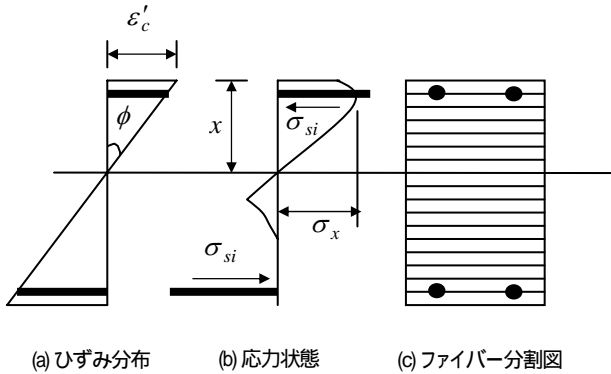


図 1 ファイバーモデルにおける RC 断面

(2)修正圧縮場理論(Modified Compression Field Theory)

Collins らによって提案された修正圧縮場理論⁵⁾は, RC 要素に発生した斜めひび割れを離散的に捉えるのではなく, 斜めひび割れを持つ一様な要素として捉え, 要素内に作用するひずみと応力を平均的に扱うことで, せん断問題をより合理的に評価できる解析手法である.

せん断力が作用する RC 要素に, 修正圧縮場理論を適用すると図 2 のようにモデル化され, 一様な斜めひび割れを持つ RC 要素として取り扱うことができる.

このモデル化により, ひび割れ間のコンクリート部分には, 部材軸に対し角度 θ (つまり, ひび割れの角度) で主圧縮応力, その直交方向に主引張応力が作用すると考えられ, その関係は Mohr の応力円より求められる.

要素内のひずみは, Mohr のひずみ円からひずみの適合条件式が求まり, 鉄筋・コンクリート材料構成則を用いることによって, 主鉄筋方向の力(軸力)が算出される. つまりこの理論は, 発生した内力を軸方向に置き換えることにより, 釣り合い条件を満たす RC 要素状態を収束計算から求める手法である. 必要項目は, 次の 3 つとなる.

- ・せん断補強筋方向および主鉄筋方向の力の釣り合い
- ・変形の適合
- ・コンクリートおよび鉄筋の材料構成則

従来のトラス理論では, 圧縮ストラット角度を 45° であると仮定しなければならなかった. しかし, MCFT では変形の適合条件を導入することで, 圧縮ストラット角度を仮定する必要がなくなり, ひび割れ発生以前からせん断補強筋降伏に至るまでのせん断耐荷機構を合理的に算出できるようになった.

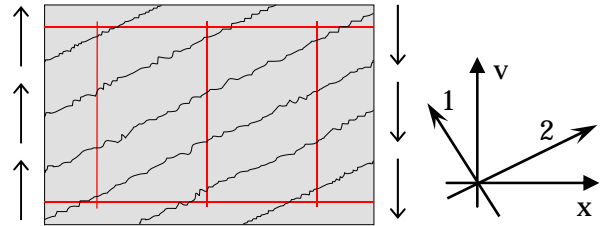


図 2 鉄筋コンクリートのモデル化

(3)修正圧縮場理論の定式化

上記項目を満たす条件式として, ひずみの適合条件, 応力の釣り合い条件, 力の釣り合い条件を示す.

a) ひずみの適合条件

修正圧縮場理論では図 3 に示すように, せん断力と軸力を受け, 一様なせん断ひび割れをもつ鉄筋コンクリート要素を考えている. さらに RC 要素のひび割れを平均的に取り扱い, その要素は一様に変化すると仮定すれば, 各ひずみは, 主鉄筋方向ひずみ ϵ_x , 主鉄筋鉛直方向ひずみ ϵ_v , 及びせん断ひずみ γ_{xy} , または主引張ひずみ ϵ_1 , 主圧縮ひずみ ϵ_2 とその角度 θ を考慮することにより, それぞれの適合条件式が求められる. Mohr のひずみ円を用いることで, 式(5)~式(8)のように表すことができる⁵⁾.

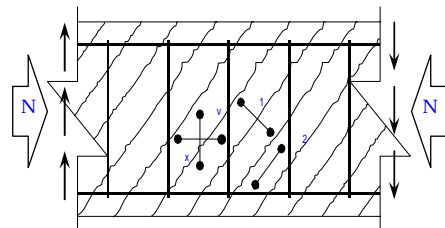


図 3 主ひずみと成分ひずみ

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_v - \epsilon_2 \quad (5)$$

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 \tan^2 \theta + \epsilon_2}{1 + \tan^2 \theta} \quad (6)$$

$$\epsilon_v = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta} \quad (7)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_x - \epsilon_2)}{\tan \theta} \quad (8)$$

b) 応力の釣合条件

ひび割れの発生したコンクリート要素内で発生した応力は、ひずみと同様に相互関係にあり、主応力とせん断力との関係は、Mohr の応力円によって次の式で表すことができる⁵⁾。

$$\sigma_2 = \tau(\tan \theta + \cot \theta) - \sigma_1 \quad (9)$$

$$\sigma_x = \sigma_1 - \tau \cot \theta \quad (10)$$

$$\sigma_v = \sigma_1 - \tau \tan \theta \quad (11)$$

c) 力の釣合条件

力の釣り合い条件は、内力と外力が釣り合うという条件であり、外力が作用して生じたひずみと応力との関係から導き出される⁵⁾。

$$V = \sigma_1 b j d \cot \theta + \left(\frac{\sigma_v A_v}{s} \right) j d \cot \theta \quad (12)$$

b:断面幅, jd:せん断解析での有効高さ, s:せん断補強筋間隔

式(12)の第1項は、コンクリートによるせん断耐力負担分を表しており、主引張応力 σ_1 と圧縮ストラット角度 θ によって決まる。第2項はせん断補強筋によるせん断耐力負担分を表しており、せん断補強筋の強度及び圧縮ストラット角度 θ によって決まる。両項にも圧縮ストラット角度が入っているため、作用せん断力によって変化する圧縮ストラット角度に適用できる形となっている。また、要素内に発生する力を、主鉄筋方向へ換算することで、式(13)が得られる⁵⁾。

$$N N = A_{sx} \sigma_{sx} - V \cot \theta + \sigma_1 b j d - \sigma_{cx} (A_c - b j d) \quad (13)$$

A_{sx} :主鉄筋の総断面積, σ_{sx} :主鉄筋方向の応力

A_{cx} :コンクリートの総断面積, σ_{cx} :主鉄筋方向のコンクリート応力

(4) 曲げモーメントを考慮した修正圧縮場理論

曲げモーメントとせん断力が同時に作用する鉄筋コンクリート要素では、せん断挙動が曲げモーメントに、曲げモーメントがせん断挙動にと、互いに影響を及ぼすことが確認されている。そこで、曲げモーメントの影響を修正圧縮場理論に考慮しこの様な問題の解決を試みた。

a) 等価軸ひずみと等価軸力

本論では、弾性状態の鉄筋コンクリート部材が曲げモーメントを受けるときの中立軸位置 x_g とし、このとき生じる軸方向ひずみを等価軸ひずみ ε^* として用いる。等価軸ひずみ ε^* は、ファイバーモデルから算出され、式(14)で表される。また、曲げモーメントと等価軸ひずみの関係は図4のようになる。また、曲げモーメントによって生じるひずみを式(15)のように断面に作用する軸力によって生じたものと仮定する(等価軸力 N^*)ことで、力の釣り合い式に導入し考慮した(図5)。

$$\varepsilon^* \equiv \varepsilon(x = x_g) = \varepsilon_0 + x_g \phi \quad (14)$$

$$N^* = \kappa \int_A \varepsilon^* p_x E_{sx} dA \quad (15)$$

ε_0 :初期ひずみ, κ :等価軸力係数, p_x :主鉄筋比, E_{sx} :主鉄筋弾性係

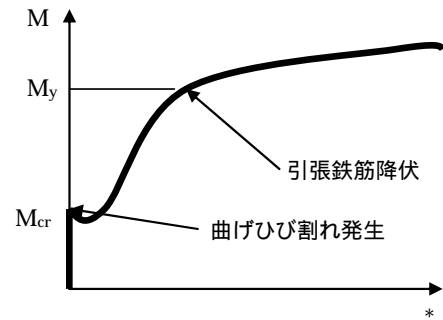


図4 曲げモーメントと等価軸ひずみの関係

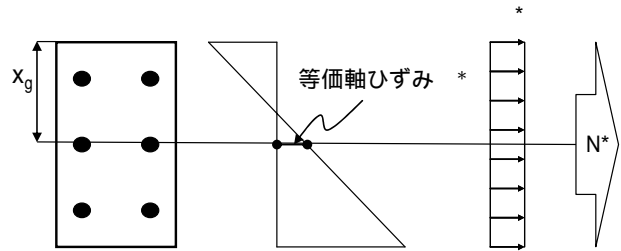


図5 等価軸ひずみと等価軸力

b) 変形量算出フロー

曲げモーメントを考慮した修正圧縮場理論では、ファイバーモデルを用いることで曲げ変形 δ_{flex} を式(16)算出することができ、部材諸元を加えることでせん断変形 δ_{shear} を式(17)、この2つの変形量を合算することで部材全体の变形量 δ_{all} を式(18)算出することができる。部材変形算出までのフローチャートを図6に示す。

$$\delta_{flex} = - \iint_L \phi dx dx \quad (16)$$

$$\delta_{shear} = \int_L \gamma dx \quad (17)$$

$$\delta_{all} = \delta_{flex} + \delta_{shear} \quad (18)$$

ϕ :曲率, γ :せん断ひずみ, L :せん断スパン

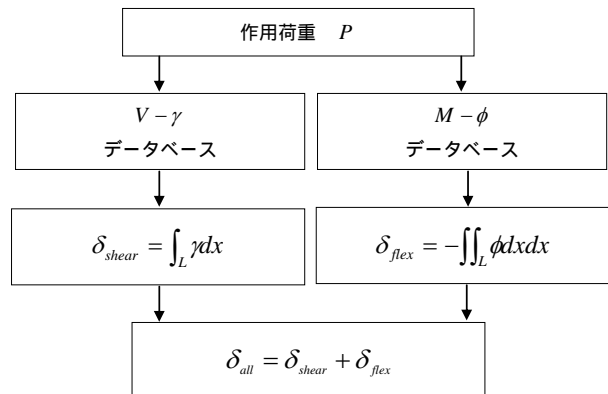


図6 解析フロー

3. 数値シミュレーション

(1) 修正圧縮場理論(MCFT)

a) 材料解析

MCFT プログラムを用いて、算出した各成分より材料解析を行った。縦軸にせん断応力 τ 、横軸にせん断ひずみ γ をとり、せん断ひび割れ、せん断補強筋降伏、最大せん断応力それぞれに影響を及ぼした挙動について以下の様に示した。

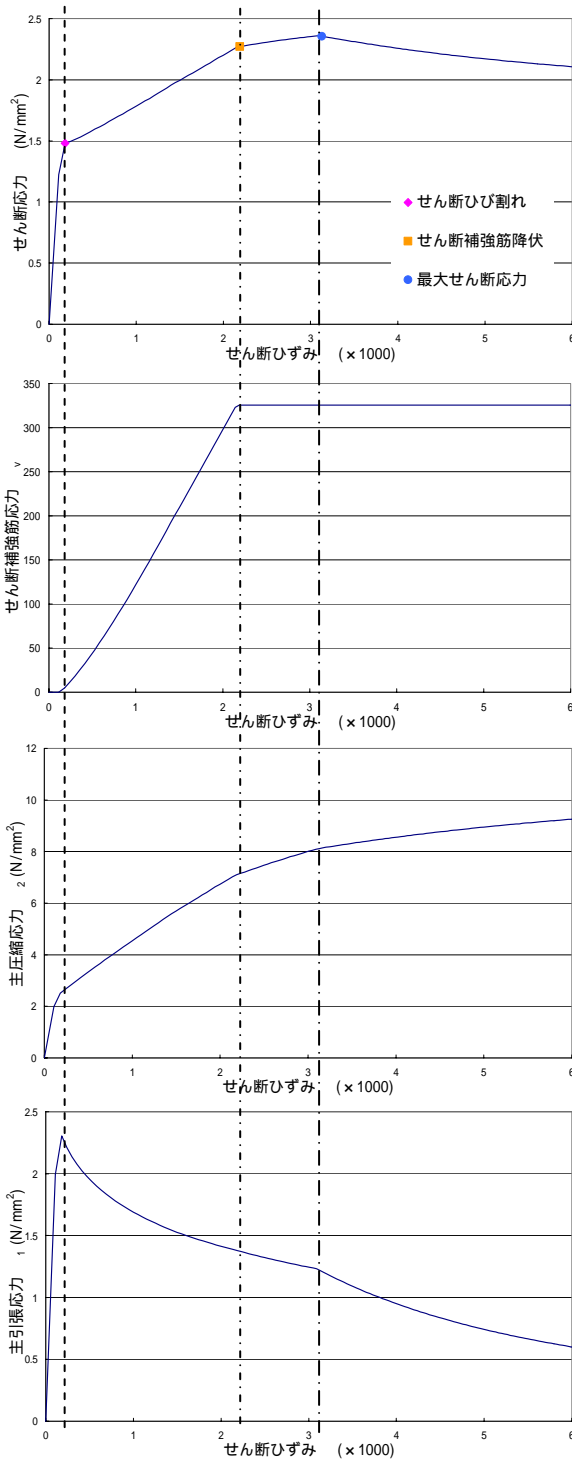


図 7 各応力とせん断ひずみの関係

図 7 では、各材料の応力挙動を示した。横軸をせん断ひずみで統一し、せん断応力 τ 、せん断ひずみ (断面解析) から算出した、せん断ひび割れ発生点・せん断補強筋降伏点・最大せん断応力点に対する要因を確認した。これにより、せん断ひび割れ発生点・最大せん断応力点は主引張応力が、せん断補強筋降伏点はせん断補強筋応力がそれぞれ起因していることが理解できる。

b) 圧縮ストラットと各せん断力

圧縮ストラット角度 θ (主圧縮ひずみと部材軸のなす角度で、ある一要素の平均角度) とせん断力 V の関係と、作用せん断力せん断抵抗力 V_s, V_c について示した。

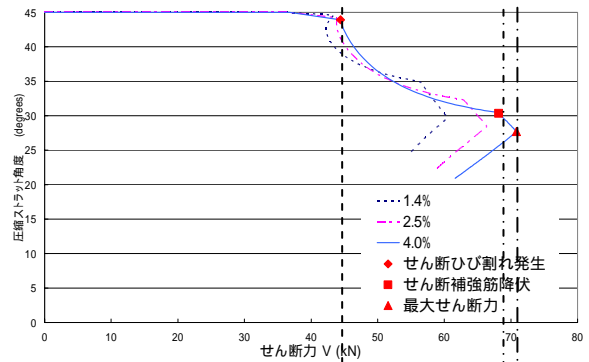


図 8 圧縮ストラット角度

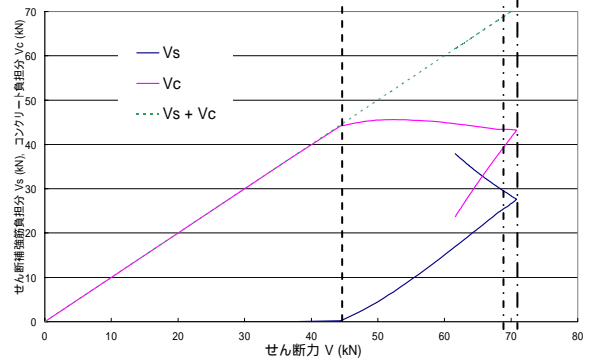


図 9 せん断力構成

図 8 では、せん断力変化に対する圧縮ストラット角度の検討を行った。主鉄筋比を変えた 3 パターンで示した。初期～中盤にかけて 45° 一定を保つが、更にせん断力が増加すると急激に角度を減少させる。また、この結果から、主鉄筋量を増加させると、最大せん断力が大きくなり、圧縮ストラット角度が低下する事が分かった。

図 9 は、主鉄筋比 4.0% 時の作用せん断力に対するせん断抵抗成分であり、せん断補強筋負担分 V_s とコンクリート負担分 V_c の変化を示したグラフである。せん断ひび割れ発生と同時に V_s が増加し、逆に V_c が減少する傾向を示した。また、せん断補強筋降伏点を迎え、終局に至ると負担分の割合は逆転する。以上の事からも、せん断ひび割れ発生以降に関して、せん断耐荷力に対する V_s の影響は大きい事が良く分かる。

(2) 曲げモーメントを考慮した修正圧縮場理論

(1)で用いた解析プログラムは、せん断成分のみを考慮して作成している。しかし、実際のせん断破壊挙動ではせん断成分のみならず、曲げ成分の存在が影響を及ぼすと考えられている。そこで、修正圧縮場理論にファイバーモデルを組み合わせた解析プログラムを作成し、数値シミュレーションによる検証結果を示す。

a) 区間分け定義

本論では、曲げモーメントの影響を考慮したせん断変形を考えるために、図 10 に示すようにせん断スパンを分割し、それぞれの要素に対し曲げの影響を考慮できるようにした。その方法として、支点から各要素の中心までの距離を x とし、その地点に作用する曲げモーメント M とせん断力 V の比を曲げ影響度 式(19)として各要素に曲げの影響を考慮した。 d は有効高さである。

$$\zeta = \frac{M}{Vd} = \frac{x}{d} \quad (19)$$

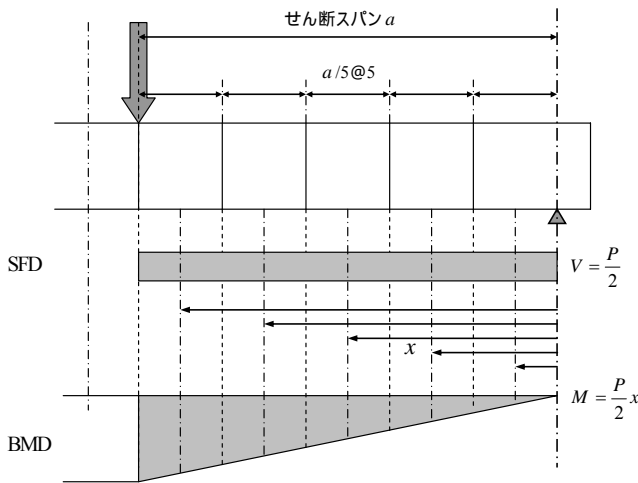


図 10 曲げモーメント考慮(区間分け)

b) 区間別解析

曲げモーメントを考慮した解析プログラムの算出結果を図 11, 図 12 に示す。

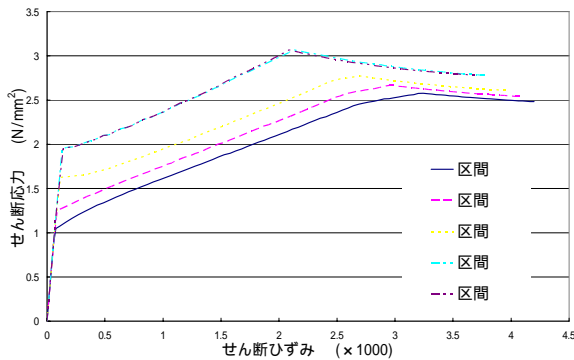


図 11 せん断応力とせん断ひずみ

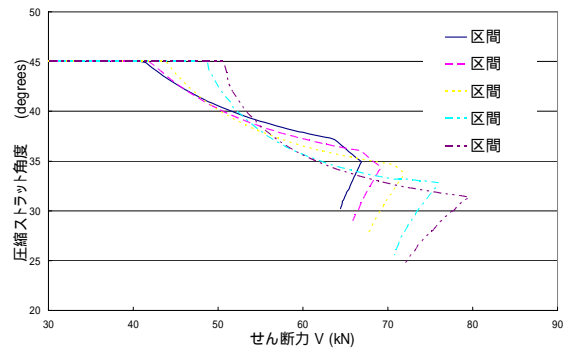


図 12 圧縮ストラット角度

図 11 の断面解析結果では、曲げモーメントの影響力が強い区間で、最もせん断応力が小さく算出された。このことから、せん断挙動に与える曲げモーメントの影響は大きいと言える。また、区間 と はほぼ同様の挙動を示した。これは、荷点から離れ曲げモーメントの影響も小さく、部材内の応力伝達機構に変化が起きにくいと考えられる。図 12 では区間別圧縮ストラット角度の算出を試みた。区間ごとに異なる角度を得た。最大せん断力時に着目すると、支点部に近い区間では小さな値を示し、荷点に向かって角度の上昇する傾向が見られる。これは、支点部に近い区間ではせん断力が卓越し応力進行に影響を及ぼしているためと言える。

c) 感度解析

b)で算出した結果から、各区間の最大せん断応力 τ_{max} 、また、その時の最大せん断ひずみ γ_{max} (図 13)の関係と、最大せん断力 V_{max} 時の圧縮ストラット角度 θ_{max} に着目した結果(図 14)を以下に示す。

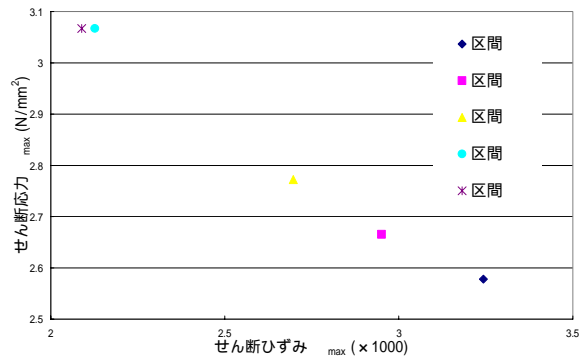


図 13 最大せん断応力とせん断ひずみ関係

各区間の最大せん断応力とせん断ひずみの関係について示した。荷点部から離れて支点部に近い区間では、応力値が大きく、ひずみが小さい値をとることが分かった。これは、支点部近傍において脆性的なせん断破壊を起こすパターンであるといえる。全体の傾向として曲げモーメントの影響が大きい区間ほど延性的であることが分かる。

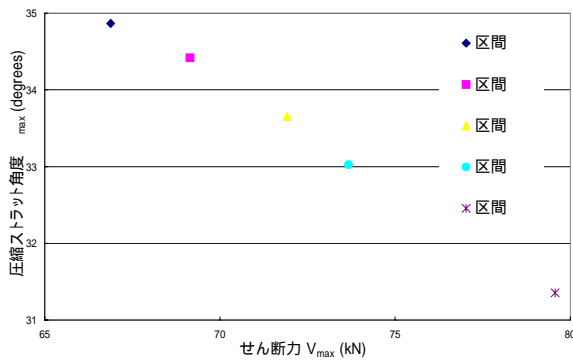


図 14 最大せん断力時における圧縮ストラット角度

各区間の最大せん断力時と圧縮ストラット角度の関係について示した。全体の傾向として、支点部では大きなせん断力になり、荷重点に近づく程せん断力は弱まる。しかし、せん断力が小さくなるに連れて(曲げモーメントの影響が大)圧縮ストラット角度の上昇が確認できた。これは、ほぼ直線上に変化(単調増減)する傾向を示した。

d)せん断スパン比の影響
 構造物の破壊形式を決定する要因の一つにせん断スパン比の影響が考えられる。せん断スパン比とは、せん断スパン a を有効高さ d で除したものである。これは耐力計算上大変重要な項目であり、軽視できない。そこで、せん断スパン比を変化させた時のせん断力・曲げモーメント値を図 15 に示す。

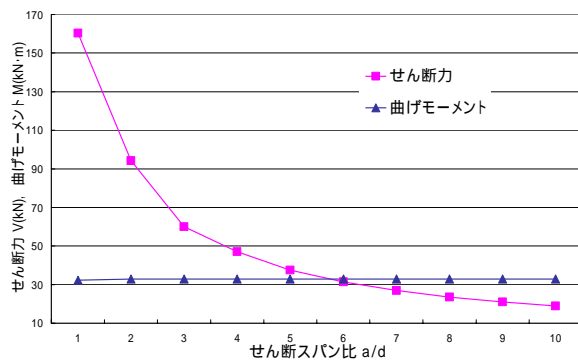


図 15 せん断スパン比の影響

せん断スパン長のみを変化させたため、曲げモーメントの値に変化はほとんど起きなかった。せん断力は、せん断スパン比 1 で圧倒的に大きな値を示し、せん断スパン比の増加に伴って減少する傾向が見られた。また、せん断スパン比 5~7 の区間では、せん断力・曲げモーメントの値がほぼ重なる状態となった。つまり、せん断スパン比 5~7 付近において、せん断破壊から曲げ破壊への移り変わりが起きると考えられる。以上のような、この結果のみを用いて破壊形式を決定することは危険であるが、判断材料の一つとしては有効であると言える。

4.鉄筋コンクリートはりの載荷実験

(1)実験概要

試験体は、矩形断面とした RC はりとし、せん断破壊するように設計した。荷重方法は、300 kN アクチュエータを使用し、変位制御で静的二点集中荷重とした。荷重時には、荷重・荷重点変位・支点変位・各鉄筋のひずみ等を測定した。

試験体は、断面を 150×200mm、長さ 1400mm、支持スパン長 1200mm、せん断補強筋ピッチ 125mm, 150mm, 175mm の 3 パターンとし、せん断破壊する RC はりを作成した。主鉄筋には D16、せん断補強筋には D6 を用いた。表 1 に試験体諸元を示す。

表 1 試験体諸元

断面幅(mm)	150	
断面高さ(mm)	200	
かぶり(mm)	27.05	
有効高さ(mm)	175.95	
主鉄筋比(%)	4.59	
せん断補強筋比(%)	s=125	0.338
	s=150	0.282
	s=175	0.241

s: せん断補強筋ピッチ(mm)

(2)使用材料

a)コンクリート

試験体に使用したコンクリートは、表 2 に示す配合によって作製した。コンクリートの力学特性として、載荷試験日前日に測定した結果は表 3 の通りである。

表 2 配合表

せん断補強筋ピッチ (mm)	W/C (%)	s/a (%)	配合量 (kg)				配合量 (cc)	
			W	C	S	G	NO.70	303A
125,150	55	45	164	309	797	980	3090	3090
175	50	45	167	348	766	990	3478	3478

C: 早強ポルトランドセメント(比重:3.14)
 W: 混和剤分含まず
 S: 相模川水系川砂(比重:125,150:2.51, 175:2.58)
 (粗粒率:125,150:2.97, 175:2.78)
 G: 八王子産砕石(比重:2.69)
 No.70: AE減水剤25%溶液
 303A: AE剤1%溶液

表 3 コンクリート力学特性

せん断補強筋ピッチ (mm)	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数
	(N/mm ²)			(kN/mm ²)
125,150	32.1	2.81	5.13	32.6
175	43.6	2.90	4.32	29.0

b)鉄筋

表 4 鉄筋材料力学特性

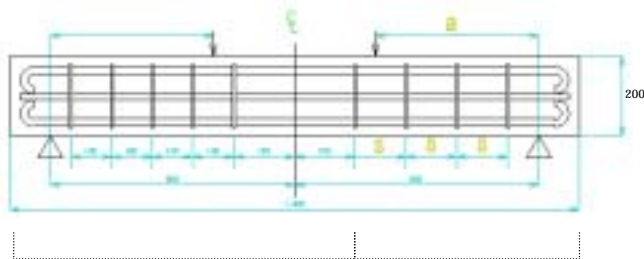
呼び径	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ	最大強度 (N/mm ²)	硬化ひずみ	破断ひずみ	弾性係数 (kN/mm ²)
D16	401.6	0.00215	569.8	0.0192	0.236	187
D6	325.7	0.00162	474.1	0.0227	0.270	203

(3) 実験ケース

実験パラメータは、表 5、図 16 に示すようにせん断スパン比・せん断補強筋比をそれぞれ 3 パターンずつ変化させ、合計 7 体の試験体で実験を行った。

表 5 実験パラメータ

試験体名	主鉄筋比 (%)	せん断補強筋比 (%)	せん断スパン (mm)	せん断スパン比
125-400	4.59	0.338	400	2.31
125-475			475	2.75
125-550			550	3.18
150-475	0.282	0.282	475	2.31
150-550			550	2.75
175-400			400	2.31
175-475	0.241	0.241	475	2.75



全試験体共通箇所 変更箇所
 a: せん断スパン(400mm, 475mm, 550mm)
 s: せん断補強筋ピッチ(125mm, 150mm, 175mm)

図 16 試験体配筋図

(4) 非接触変位計測システム

本研究では、実験により曲げ変形・せん断変形を求める手法として、一般に販売されている高性能デジタルカメラを用いた非接触変位計測システム(写真 1)により実験を行った。格子状に貼り付けたポイントを、30 秒に 1 回の間隔で撮影を連続的に行った。その後、撮影した画像を取り込み、画像解析ソフト(Win ROOF ver5.0)[®]を用いて時間毎の各ポインター座標を算出した。これにより、時間経過前後における変形量を求める事が出来る。



写真 1 実験風景

(5) 実験結果

試験体終局状況の一例(写真 2、写真 3) と、実験結果(表 6)を示す。s=175mm のみがせん断破壊した。



写真 2 試験体 125-475



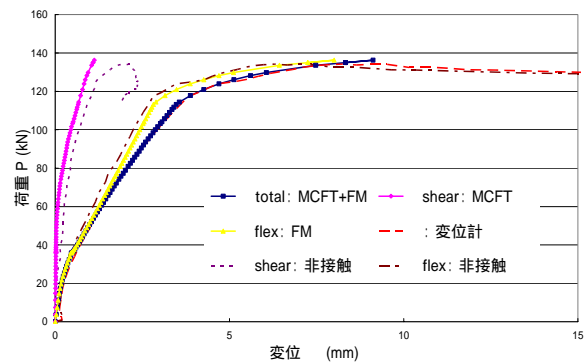
写真 3 試験体 175-475

表 6 実験結果

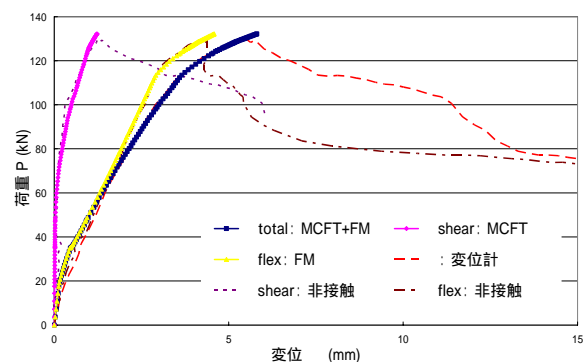
試験体名	曲げひび割れ発生荷重 (kN) Pcr	変位 (mm)		最大荷重 (kN) Pmax	変位 (mm)		破壊形式
		L	R		L	R	
125-400	16.5	0.550	0.410	172.3	10.4	9.21	曲げ破壊
125-475	19.3	0.645	0.605	134.2	8.82	10.3	曲げ破壊
125-550	16.2	0.468	0.434	121.4	7.09	7.16	曲げ破壊
150-475	15.1	0.470	0.390	128.5	7.60	7.33	曲げ破壊
150-550	15.0	0.450	0.490	119.5	8.55	8.61	曲げ破壊
175-400	20.3	0.570	0.375	152.0	6.31	5.70	せん断破壊
175-475	12.5	0.390	0.390	130.2	6.82	6.57	せん断破壊

(6) 荷重変位関係(解析値との比較)

解析値と実験値の荷重変位関係を図 17 に示した。共にほぼ同等の挙動を示し、弾性域からピーク時までよく追従していることが分かる。また、算出した変形量においては、せん断変形量 δ_{shear} 、曲げ変形量 δ_{flex} 共にほぼ解析値に重なる挙動を示し、精度良く算出できた。



a) 試験体 125-475



b) 試験体 175-475

図 17 荷重変位関係

(7)せん断抵抗成分の算定

a)主鉄筋/せん断補強筋応力の算定

主鉄筋/せん断補強筋に設置したひずみゲージ(図18)から、破壊過程における応力変化(図19)を示す。

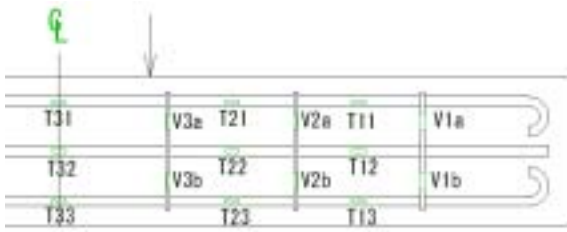
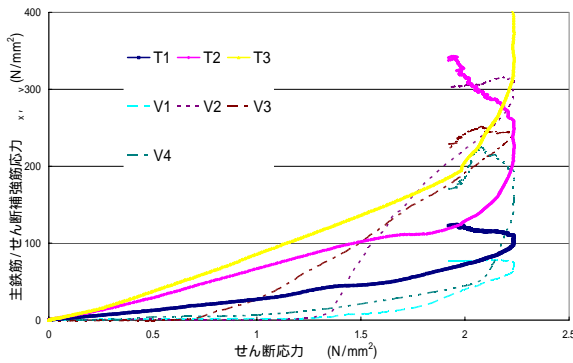
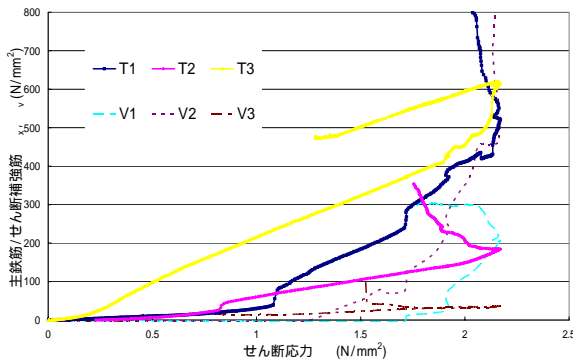


図 18 ひずみゲージ設置例



a) 試験体 125-475



b) 試験体 175-475

図 19 主鉄筋/せん断補強筋応力変化

b)せん断抵抗成分

せん断補強筋を持つはり部材は、外的に作用するせん断力に対して、コンクリートと鉄筋が分担する内力によって抗すると考えられている。現行の土木学会式に用いられている修正トラス理論は、終局耐力を式(20)で示す。

$$V_u = V_s + V_c \quad (20)$$

ここで、終局耐力 V_u を構成する V_s はせん断補強筋負担分を、 V_c はコンクリート負担分を表す。また、せん断抵抗成分の概念⁹⁾を図20に示す。せん断補強筋負担分の応力 σ_v は、せん断補強筋比 p_w を用いて式(21)で表す。

$$\sigma_v = \tau / p_w \cot \theta \quad (21)$$

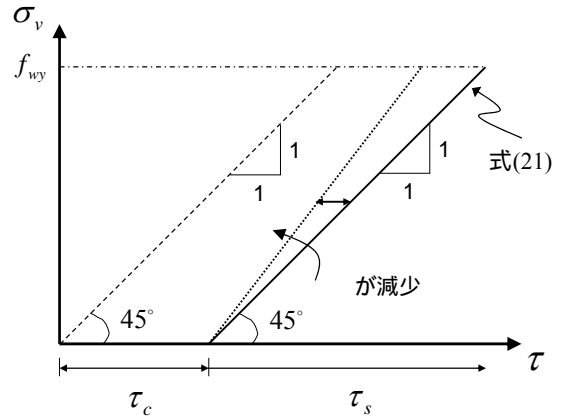


図 20 せん断抵抗成分概念

せん断補強筋負担分応力 σ_s の傾きは、初期の純せん断状態において 45° を形成するが、荷重が進むに連れて圧縮ストラット角度が減少することが認められている。従って、圧縮ストラット角度が 45° であるという仮定は非現実的な値であり、検討する必要があると考えられる。また、せん断ひび割れが発生するポイントまでがコンクリート負担分応力 σ_c となっている。

c)各せん断成分算出

せん断補強筋応力 σ_v とせん断応力 τ の関係図(図19参照)を用いて、せん断補強筋応力挙動からせん断ひび割れ発生点をコンクリート負担分 τ_{c0} とし読み取り(図21)、これから V_c 、 θ を算出する。また、最大せん断力 V_{max} の値からせん断補強筋負担分 V_s を求めた。

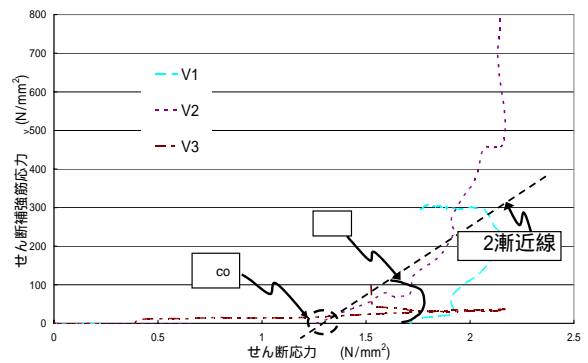


図 21 各せん断成分算出

各成分の算出結果を表7に示す。それぞれ、最大せん断力時における成分値となっている。

表 7 せん断成分算出結果

試験体名	コンクリート負担分応力 σ_c (N/mm ²)	コンクリート負担分 V_c (kN)	せん断補強筋負担分 V_s (kN)	圧縮ストラット角度 (degrees)
125-400	1.09	32.7	53.4	24.9
125-475	0.75	22.4	44.7	28.3
125-550	1.13	33.8	26.8	36.8
150-475	1.17	35.1	29.2	38.2
150-550	1.42	42.5	16.8	44.6
175-400	1.65	49.5	26.5	38.5
175-475	1.27	38.1	27.0	43.3

d) コンクリート負担分の検討

コンクリート負担分 V_c に関して、現行示方書に採用されている各種提案式(土木学会コンクリート標準示方書式、鉄道構造物等設計標準式¹⁰⁾、Euro-Code¹¹⁾、Priestleyらの提案式¹²⁾を、c)の表 7 で算出した実験値のコンクリート負担分と比較した(図 22)。

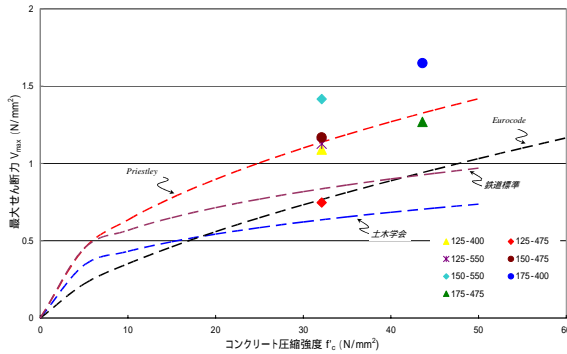


図 22 コンクリート負担分比較

多くの試験体が Euro-Code 式と、Priestley 式のほぼ線の上にプロット出来た。この結果から、本実験結果・コンクリート負担分算出方法に最も近似した提案式は Priestley 式であると分かる。また、今回用いた提案式はすべて実験から定めた式であるが、本実験結果の算定結果についてもこれら提案式に近い値を示した。土木学会式は、コンクリート負担分の評価が最も低く、本実験結果とは離れた軌道を取ることが分かった。

5. 圧縮ストラット角度に関する考察

(1) 圧縮ストラット角度の算出

構造物の破壊過程における耐荷機構を知る上で、ひび割れの進展特性・部材に働く応力の状態など荷重が作用した際の変形特性を解明することは必要不可欠である。そこで本論では、せん断抵抗機構であるアーチ機構の圧縮ストラットに着目し、画像解析や各種算定法によって得られたデータより圧縮ストラット角度の算出を試みた。

a) 算出区間の定義

圧縮ストラット角度 θ を算出する際、全区間だけでなくせん断スパン内を等間隔に分割した部位での解析を試みるため、図 23 のような区間分けを行った。載荷点から支点付近までの、区間 ~ 区間 及び全区間におけるそれぞれの圧縮ストラット角度を算出する。

図 24 に示すように弾性域では、純せん断状態の主応力で 45° の圧縮ストラットが形成される。しかし実際はひび割れ発生後、荷重を与え続けると圧縮ストラット角度は 45° を下回り低くなる傾向にある。

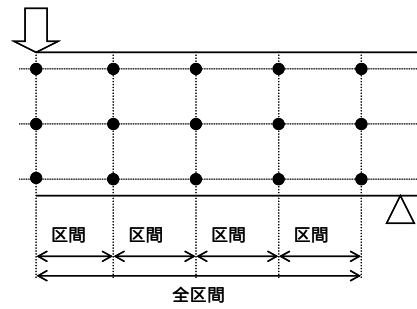


図 23 区間分け定義

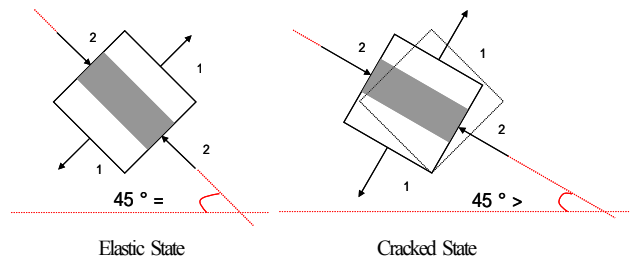


図 24 主応力の状態変化

b) 算出方法

圧縮ストラットは RC 部材内部に発生する圧縮合力の軌跡であり、主応力状態が連なって構成されている¹³⁾。一般にひび割れは、主引張りひずみ ϵ_1 によって発生すると考えられ、その直交方向にひび割れは展開する。つまり、主圧縮ひずみ ϵ_2 方向の角度が圧縮ストラット角度 θ となる。これら関係は式(22)になり、図 25 の Mohr のひずみ円(Mohr's strain circle)¹⁴⁾より導かれる。

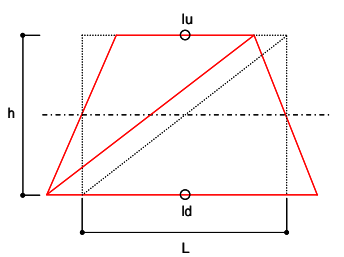
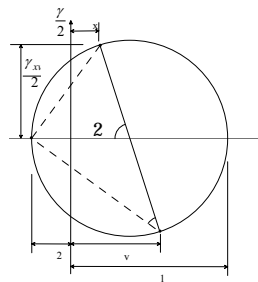
$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xv}}{\epsilon_x - \epsilon_v} \quad (22)$$

この時の θ が求める圧縮ストラット角度となる。せん断ひずみ γ_{xv} は、対象区間のせん断変形量(δ_{shear})を用いて式(23)より算出する。

$$\gamma_{xv} = \frac{\delta_{shear}}{L} \quad (23)$$

また、軸方向の変形を考えた際(図 26)、発生するひずみ(平均軸ひずみ ϵ_0)を式(24)の($\epsilon_x - \epsilon_v$)とした。

$$\epsilon_0 = \frac{(ld - lu)}{L} \quad (24)$$



lu:上辺の変化量, ld:下辺の変化量
L:せん断スパン, h:高さ

図 25 Mohr のひずみ円

図 26 軸方向変形量

c)算出結果

解析結果の一例を図 27 に示す．各せん断力に対し角度は変動するため最大荷重時に着目し，5つの試験体パターンに関しまとめた結果を表 8 に，また，このデータから各区間の変化を表したグラフを図 28 に示す．

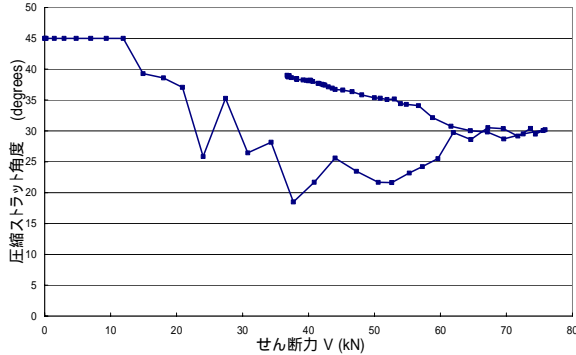


図 27 圧縮ストラット角度算出例

表 8 区間別圧縮ストラット角度一覧

試験体名	区間別圧縮ストラット角度(degrees)				最大せん断力 (kN)
	区間	区間	区間	区間	
125-400	13.8	11.9	42.2	42.1	86.1
125-475	11.5	12.7	37.7	25.7	67.1
150-475	12.5	19.8	43.6	30.1	64.2
175-400	23.3	26.6	25.5	30.7	75.9
175-475	16.0	25.6	22.5	27.5	64.8

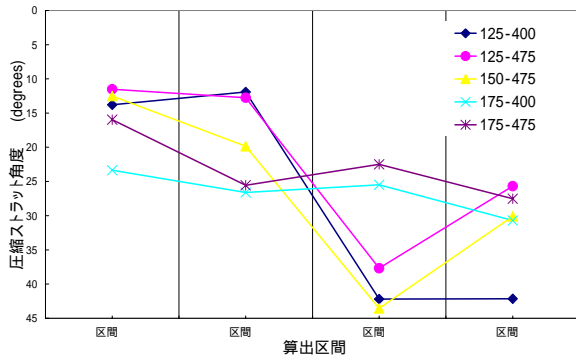


図 28 区間別圧縮ストラット角度

図 28 の変化図を見ると，全試験体に共通している傾向としては，載荷点に近い区間，では圧縮ストラット角度が低く算出された．逆に，支点付近の区間では角度が上昇していることが分かる．つまり，荷重(曲げモーメント)の影響を最も直接受け易い区間では圧縮ストラット角度の低減化が確認できた．更に，破壊形式による特徴が読み取れた．グラフ上の線動が示す通り，区間が変わる度に角度の変動が見られ，破壊形式が異なると全く逆の変動を見せた．特に曲げ破壊型では，区間で角度に大きな変化を示した．せん断破壊型は，曲げ破壊型に比べて区間毎の変動は小さいが，載荷点に近づくに連れて角度は低くなった．また，全区間を対象とした圧縮ストラット角度算出結果では，23°～27°に集中した．

d)圧縮ストラットモデル化

せん断スパン内の各区間に働く圧縮ストラットのモデル化を試みた．図 29 では表 8 を基に，各区間における圧縮ストラットを図化し，実際の挙動を想定したモデル化(せん断スパン長と断面高さは実寸比で設定)を行った．また，実写真を併記し，その精度の高さを確認した．その結果，ほぼ実挙動に近いモデル化が行えたと言える．

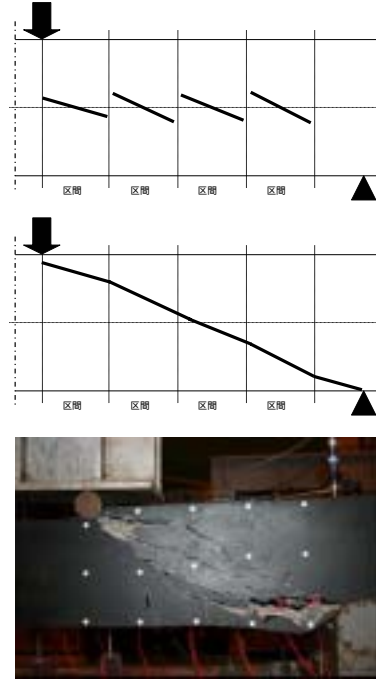


図 29 圧縮ストラットのモデル化(175-475)

e)圧縮ストラット角度算定

画像解析によって算出した圧縮ストラット角度と，表 9 に示した MCFT による解析結果，直接計測(目視)による算出結果を合わせ比較し，これを本解析・実験結果より導き出した圧縮ストラット角度とした(図 30)．

表 9 MCFT・目視による圧縮ストラット角度

試験体名	MCFT		直接計測角	
	最大せん断力(kN)	(deg)	最大せん断力(kN)	(deg)
125-400	107	28.2	86.1	27.6
125-475			67.1	38.6
150-475	100	28.2	64.2	32.5
175-400			75.9	23.7
175-475	95.0	28.2	64.8	31.5

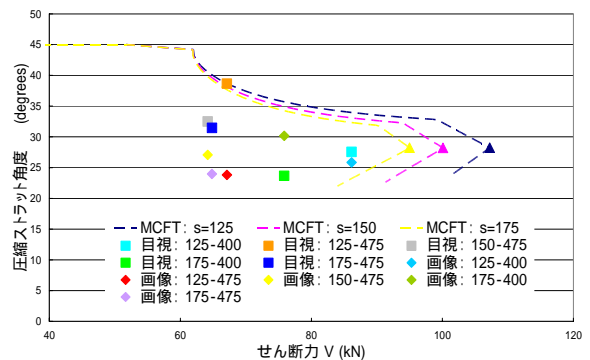


図 30 最大せん断力時における圧縮ストラット角度

図 30 では画像解析結果と他に、MCFT を用いた解析値と、直接画像から読み取った目視計測結果(目視)を比較した。目視計測結果は、撮影した画像から最も肥大に発達したと自分で判断(よって、主観性が大きい)した斜めひび割れから算出したため、試験体ごとに大きなばらつきが生じる結果となった。また、MCFT ではせん断スパン長を考慮しないため実施パターンすべて同等の角度となった。この結果から圧縮ストラット角度を算定すると、結論として 23°~33°であることが分かった。

f) 圧縮ストラット角度の検証

現行の土木学会式で、せん断強度算出の設計手法として用いられている塑性トラス理論では、圧縮ストラット角度を 45°と仮定し計算を行っている場合が多い。そこで、いくつか角度を変化させ、塑性トラス理論からせん断強度を算出して実験値との比較から算定した角度と、表 9 で求めた圧縮ストラット角度では、どれくらいの誤差が生じるか検証を実施し、本研究算出結果の妥当性について検証を行った。

図 31 は、縦軸にせん断強度 τ_s 、横軸にせん断補強筋量 $\rho_w f_{wy}$ をとり、塑性トラス理論を用いて圧縮ストラット角度 45°、40°、30°、20°の 4 パターンにおいて算出した値と、本実験の結果(表 10)と、MCFT による算出結果(表 11)を比較した。

表 10 せん断強度(実験値)

試験体名	せん断強度 τ_s (N/mm ²)	せん断補強筋量 $\rho_w f_{wy}$ (N/mm ²)
125-400	1.47	1.36
125-475	1.92	1.36
150-475	1.40	1.13
175-400	1.09	0.968
175-475	2.23	0.968

表 11 せん断強度(MCFT)

MCFT	せん断強度 τ_s (N/mm ²)	せん断補強筋量 $\rho_w f_{wy}$ (N/mm ²)
case1	0.580	0.571
case2	0.917	0.860
case3	1.34	1.33
case4	2.36	2.32
case5	3.48	4.10

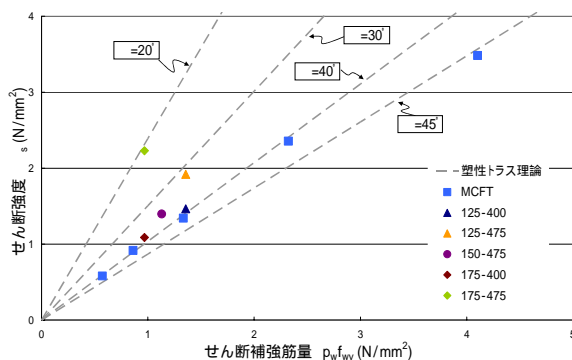


図 31 塑性トラス理論と実験結果の比較

実験値と MCFT によって算出した値が共に、 $\theta = 20^\circ \sim 40^\circ$ の間に分布することが分かった。設計用値に多く用いられている 45°ではせん断強度を過小評価していることになる。つまり、この結果から、せん断補強筋与分の圧縮ストラット角度は 30°~40°とすることが妥当であると考えられる。しかし、実際の破壊では様々な要因(例えば、骨材の噛み合い・せん断ひび割れを横切る圧縮応力の増大による影響など)を含むため、更なる角度低下が予想出来る。よって、e)での画像解析結果から算出した圧縮ストラット角度が 23°~33°と若干低い、この値に近似すると推測できる。

6. 結論

本論では、鉄筋コンクリートはりを対象とし、せん断解析手法である修正圧縮場理論にファイバーモデルを組み合わせて作成した解析プログラムを用いて行う数値シミュレーションや、実験結果に画像処理を施すことで、せん断変形成分・せん断破壊挙動に関する把握を試みる事を目的としている。主には、解析プログラムを用いた数値シミュレーション、鉄筋コンクリートはり載荷実験結果(非接触変位計測)と解析値の比較による実験手法・精度の検証、実験から得た画像データより画像解析を行い曲げ変形量・せん断変形量を分離、また、圧縮ストラット角度の算定である。以上より得られた結果をまとめると、以下の様になる。

- (1) Collins によって提案された修正圧縮場理論を用い、せん断挙動に着目した数値シミュレーション結果から、鉄筋コンクリートはりの耐力算定に影響を及ぼす要因について検証を行った(構成材料、圧縮ストラット角度、せん断抵抗成分)。
- (2) 曲げモーメントの影響を考慮したせん断解析モデルとファイバー法を用いた変形解析プログラムによる数値シミュレーション結果から、曲げモーメントがせん断へ及ぼす影響力の強弱によるせん断応力変化を確認出来た。
- (3) デジタルカメラを用いた非接触変位計測システムによる鉄筋コンクリートはりの静的載荷実験手法・算出結果に関し、解析プログラムを用いる事で有用性を実証出来た。これにより、画像処理から各変形量・各成分の算出が可能になり、実験結果からせん断力を構成するコンクリート負担分・せん断補強筋負担分及び、圧縮ストラット角度の算出を行えた。

(4)画像解析を用いて、曲げモーメントの影響を考慮した圧縮ストラット角度の算定をした。また、この結果から実験に使用した鉄筋コンクリートはりにおける圧縮ストラットのモデル化を行った。更に、画像解析による算出値・画像データからの目視計測値・解析値を用いて、本実験ケースの圧縮ストラット角度は、23°~33°であると分かった。この算定結果に対し、塑性トラス理論を用いる事で推定出来た。

以上、本論より算出した圧縮ストラット角度の算定方法・結果をまとめると以下ようになる(表 12)。

表 12 圧縮ストラット角度算出結果まとめ

試験体	せん断補強筋応力から算定	画像処理	MCFE	目視計測
	(degrees)			
125-400	24.9	27.2	28.2	27.6
125-475	28.3	22.3	28.2	38.6
125-550	36.8	-	-	-
150-475	38.2	26.6	28.2	32.5
150-550	44.6	-	-	-
175-400	38.5	27.3	28.2	23.7
175-475	43.3	23.1	28.2	31.5

謝辞: 本研究を行うにあたり、吉川弘道教授、栗原哲彦講師、構造実験棟の仲宗根技師には、貴重な御助言を頂きましたことを心より御礼申し上げます。また、平成 15 年度修士卒の五明賢先輩をはじめ、他の構造材料工学研究室の皆さんにも様々な面で協力して頂き、深くお礼を申し上げます。

<参考文献及び参考 WEB サイト>

1)吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計,丸善出版,pp123-

146,1995

2)五明賢：修正圧縮場理論とファイバーモデルを併用した鉄筋コンクリート梁の非線形解析，武蔵工業大学修士学位論文，2004

3)小林和夫：コンクリート構造学，森北出版株式会社，pp75-79,2002

4)藤原忠司，張英華：鉄筋コンクリート工学，技報堂出版，2003

5)M.P.Collins and D.Mitchell：Prestressed Concrete Structures,Prentice Hall,pp338-353,1991

6)中村光，檜貝勇：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，No.490/V-23, pp157-166,1997

7)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，武蔵工業大学修士学位論文，2001

8)三谷商事株式会社：Windows 汎用画像処理パッケージ Win ROOF 取扱説明書

9)前川 宏一：「コンクリート構造」講義メモ，東京大学工学部土木工学科

<http://concrete.tu-tokyo.ac.jp/ja/lectures/kouzou/kouzou.html>

10)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物，丸善出版，1992

11)Comite Euro-International du Beton：CEB-FIP MODEL CODE 1990

12)Priestley,M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, A Wiley-Interscience Publication, 1996

13)下村 匠:RC 部材のせん断破壊とせん断耐荷力算定法，長岡技術科学大学工学部建設工学科

<http://concrete.nagaokaut.ac.jp/edu>

14)宮本博，菊池正紀：材料力学，裳華房，1987

Shear Behavior Analysis of Reinforced Concrete Beams By Image Analysis And Modified Compression Field Theory

Akira Matsumoto

This research aims the clarification of the shear mechanism of reinforced concrete beams by means of experimental works with the image analysis and analytical methods. First of all, the experiments using seven specimens of RC beams were carried out. Especially, the flexural deformation and shear deformation are separated by means of measurement of the noncontact displacement and image analysis. The numerical program combining both of the Modified Compression Field Theory for the shear analysis and the Fiber Model for bending analysis is constructed. Consequently, the influence that the bending moment gives to the shearing force is clarified by separating displacement to the bending moment deformation and the shear deformation. In addition, it is found that the angle of inclination of the diagonal compressive struts in the actual experiment that uses the image analysis is from 23 to 33 degrees.