

# 論文 RC梁のせん断抵抗機構に関する考察

小椋紀行<sup>\*1</sup>

要旨:単調および繰り返しせん断力を受けるRC梁を対象とした2次元有限要素解析を行い,梁内部の応力・歪分布を算定した。さらに,エネルギー原理に基づいて「靱性保障型設計指針」で仮定しているせん断抵抗機構(アーチ機構・トラス機構)および弾性応力分布の割合を算定した。上記の解析結果からせん断力を受ける梁の破壊過程およびせん断抵抗機構について考察し,せん断破壊時においても弾性応力状態が残存することなどを指摘した。  
 キーワード:せん断抵抗機構, 応力分布, アーチ機構, トラス機構, 弾性

## 1. はじめに

現在までに,鉄筋コンクリート部材のせん断破壊に関しては多くの実験および解析が行われ,実験結果をもとにした実験式(荒川mean式)や『鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針』<sup>[1]</sup>(以下,指針と称する。)で用いられている指針式などがある。後者の指針式は,既往の実験値との対応もよく,一般的に優れた評価を得ている。しかしながら一方で,指針の仮定(トラス機構におけるコンクリートの圧縮束の角度・コンクリート圧縮強度の有効係数等)に対する再検討の必要性が指摘され,様々な提案<sup>[2][3]</sup>がされている。筆者も,本論文に先立ちせん断補強筋の無いRC梁を対象として主筋の付着の有無をパラメータとした曲げせん断実験<sup>[4]</sup>および解析を行い,アーチ機構のストラットの幅・角度などの修正・提案を行った。

上記のような指摘は,せん断破壊は一般的に脆性的な破壊性状を示すため避けるべき破壊とされているが,指針では完全剛塑性状態を仮定

した塑性論を用いているという矛盾に起因していると考えられる。

本論文では,RC梁を対象とした有限要素法解析を行い,せん断破壊過程における応力分布を中心として検討を行う。さらに,モード分解法<sup>[5]</sup>を用いて戴荷方法の異なる場合について指針で仮定しているせん断抵抗機構(アーチ機構・トラス機構)の妥当性を考察する。

## 2. 解析対象

図-1に示すようなRC梁を対象とし,材料特性を表-1の値を用いた。なお,せん断補強筋は密に配筋されているものとした。

解析パラメータとして,せん断補強筋比を7パターン(pw=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2%),戴荷方法を3パターン(単調,片側繰り返し,両側繰り返し)の計21パターン設定した。

## 3. 有限要素法解析

2次元有限要素解析コード ATENA(version

表-1 材料特性

(a)コンクリート

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	G <sub>F</sub> (N/m)
30.0	2.6	32.4	64.6

(b)鉄筋

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
主筋	1000.0	1100.0	210.0
せん断補強筋	382.0		210.0

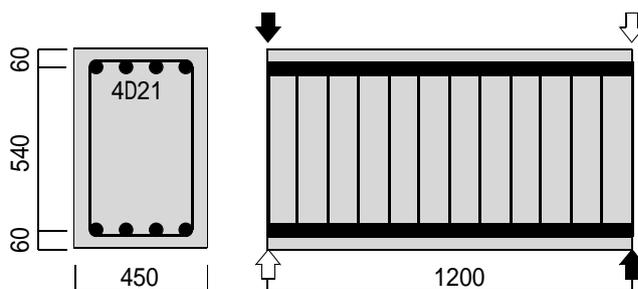


図-1 解析対象

\*1 愛知産業大学 造形学部建築学科 講師 工博 (正会員)

2.0.2)<sup>[6]</sup>を用いて平面応力解析を行う。なお、要素分割は全て三角形とし、試行錯誤の結果、分割の影響が少ない図-2のようなものとした。

### 3.1 コンクリートのモデル化

ひび割れ発生後のコンクリートの引張軟化は、図-3に示すような式(1)(2)の指数関数型ひび割れ開口則<sup>[7]</sup>でモデル化した。

$$\frac{\sigma}{R_t} = \left\{ 1 + \left( c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp \left( -c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1)$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_F}{R_t} \quad (2)$$

ここで、 $w$ はひび割れ開口変位、 $\sigma$ は引張応力度、 $w_c$ は応力が完全に開放された時のひび割れ開口変位、 $R_t$ は引張強度、 $G_F$ は応力のないひび割れの単位面積を作り出すのに必要な破壊エネルギーである。また、式中の $c_1=3$ 、 $c_2=6.93$ である。

二軸応力下での破壊条件としては、図-4に示すような二軸による強度上昇等を考慮したKupferの破壊基準<sup>[8]</sup>を用いた。同図において、 $f_c$ は圧縮強度である。また、応力-ひずみ関係は等価一軸歪モデルとした。コンクリートに発生するひび割れは、Bazant<sup>[9]</sup>が提案したひび割れ帯モデルをもちいて仮定した。ひび割れ帯では、コンクリートの破壊進行領域に対応する有限要素の

内部で消散される破壊エネルギーを一定とした。またひび割れ発生は、任意要素における引張応力がコンクリートの引張強度に達した時と定義した。ひび割れ発生後は、その要素内のひび割れ方向を固定し、図-5のようにひび割れ方向を軸とした直交異方性を有するものとし、必ずしも主歪軸とは一致しないものとした。そのため、せん断応力が生ずるが、このときのせん断剛性はKolmar則<sup>[10]</sup>により低減されるものとした。

### 3.2 主筋のモデル化

図-6(a)に示すように主筋は完全弾塑性性の線材要素(2節点1次元要素)とし、コンクリート要素に埋め込み、変位は連動節点を通じて、要素境界線と一致するものとした。なお、主筋の付着特性による影響を排除するため、指針と同様に主筋の付着は完全であるとした。

### 3.3 せん断補強筋のモデル化

せん断補強筋は図-6(b)の■部分のコンクリート要素に連動し、補強筋方向のみに作用するものとした。なお、本解析は2次元であるため、幅方向の補強領域は同図のようにかぶり0とみなしている。

### 3.4 解析結果

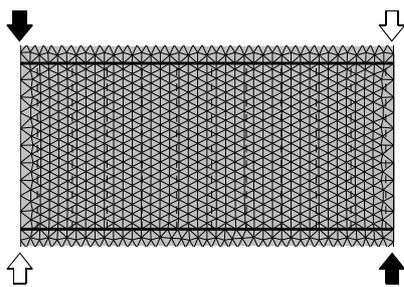


図-2 要素分割

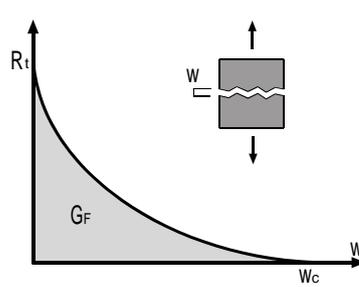


図-3 引張軟化曲線

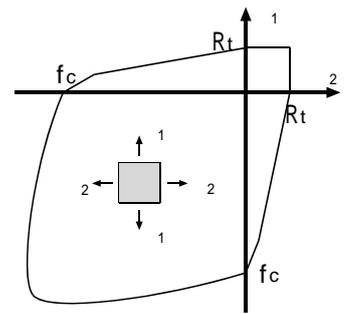


図-4 破壊条件

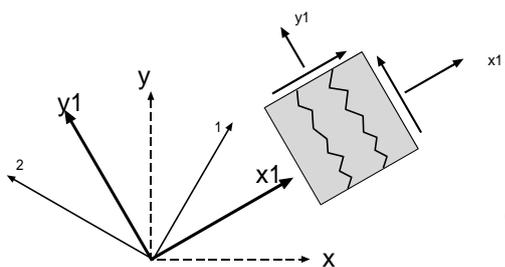
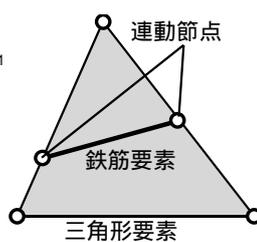
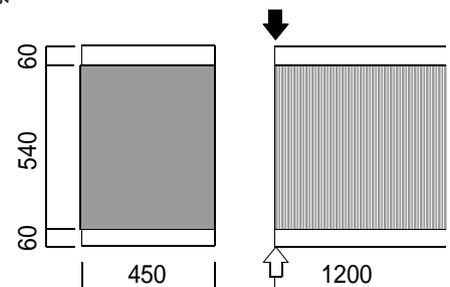


図-5 固定ひび割れモデル



(a) 主筋



(a) せん断補強筋

図-6 鉄筋のモデル化

図 - 7 に補強筋比別のせん断力 $Q$ と部材角 $R$ の関係を示す。(a)は単調戴荷,(b)は片側繰返し戴荷,(c)は両側繰返し戴荷の包絡線である。また,図中の各点( ~ )でのひび割れ状況を図 - 8にあわせて示す。

単調戴荷の場合,曲げひび割れ発生したのちに剛性が低下し,図 - 8 (a)のようにせん断ひび割れの拡大に伴い,以降に補強筋比の影響が生ずる。補強筋比 $pw=0.0\%$ では付近でせん断ひび割れが卓越し,その後,破壊に至っている。補強筋比の増加に伴って靱性およびせん断耐力が増加し,補強筋比 $pw=1.2\%$ の付近では試験部全域にせん断ひび割れが生じたのちに破壊に至っている。また,片側繰返し戴荷の場合,図 - 7 (a)(b)のように全ての補強筋比で単調戴荷とほ

ぼ同様の挙動を示す。ひび割れ発生過程に関しても差異はなく,補強筋比 $pw=1.2\%$ では最大耐力時にも単調戴荷の とほぼ同様のひび割れ状況となっている。一方,両側繰返し戴荷の場合,図 - 7 (c)に示すように前述の単調および片側繰返し戴荷と比較すると,せん断ひび割れ進展後の剛性および耐力の低下が大きい。この傾向は補強筋比が小さいほど顕著となっている。これは, のように繰返しによりせん断ひび割れが交差することで,コンクリートに劣化が生じているためと考えられる。

最大耐力時付近での主応力分布を図 - 9 に示す。ここで,(a) ~ (c)は各々図 - 7・8 に対応している。補強筋比が $0.0\%$ ,すなわち無補強の場合,(a)のように戴荷間をつなぐ領域の圧

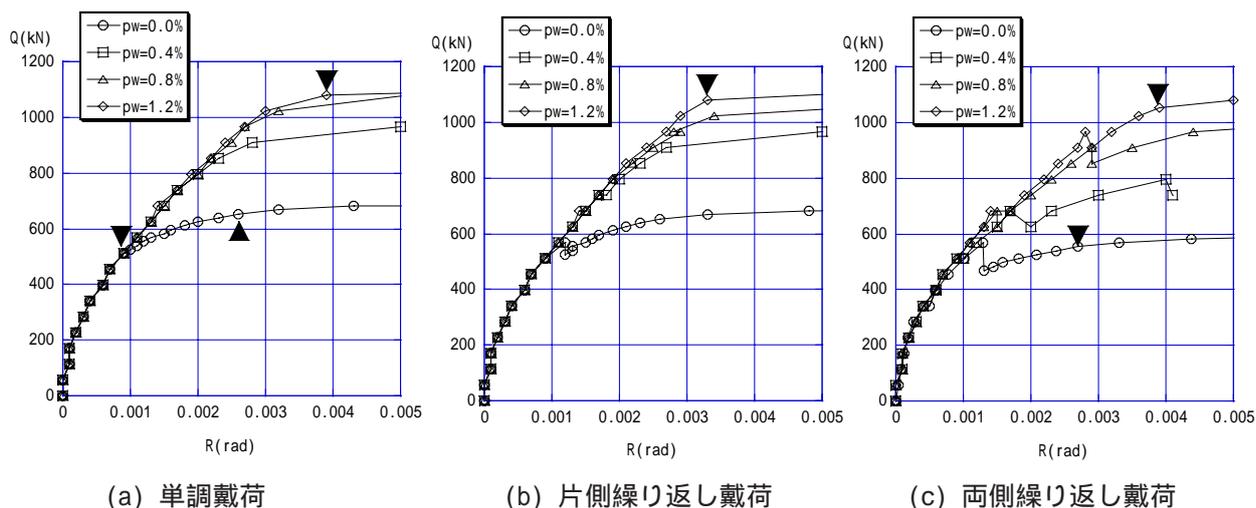


図 - 7 せん断力 - 部材角関係

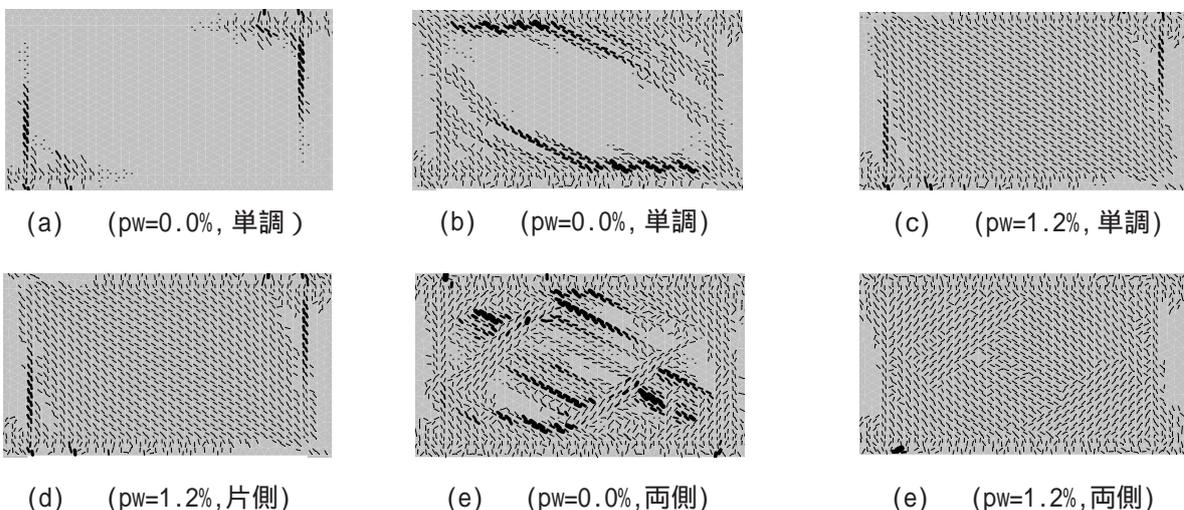


図 - 8 ひび割れ分布

縮応力のみが大きくなっている。補強筋比の増加にともない上記の領域以外の領域でも応力が生じ、(b)のように試験部全域に圧縮応力が生じている。また、片側繰り返し戴荷の場合も、上記の単調戴荷とほとんど同様の応力分布をなす。両側繰り返し戴荷の場合は若干応力の大きさは異なるが、補強筋比による影響は単調および片側繰り返しの場合と同様の傾向を示す。

指針では、補強筋比の増加に伴い、アーチ機構(コンクリートの圧縮応力により戴荷間をつなぐ様に応力を伝達する機構)からトラス機構(コンクリートの圧縮応力がせん断補強筋の引張力および主筋の付着力を介して伝達される機構)へと移行するとしている。このことは、前記の本解析から得られた主応力分布の傾向と対応しているように見える。しかしながら、図-10(a)に示す弾性状態での主応力分布を見てみると、指針で仮定している両機構の中間的な分布状態を示し、一概に「最大耐力時の応力分布を塑性状態を仮定した両機構のみで表せる」とは言い難い。そこで、本研究では、応力状態をより詳細に検討するべく、弾性状態と塑性状態(アーチ機構、トラス機構)のしめる割合を数値化するため、モード分解を行った。

#### 4. モード分解

モード分解法<sup>[5]</sup>はシュミットの直交化法、エネルギー原理を用いて、任意の応力分布を釣合条件を満たす複数の応力分布(モード)に分解する方法である。本論文では紙面の都合上、その詳細な解析法の記述は省略する。

##### 4.1 モードの仮定

図-10に示すような弾性状態の応力分布、指針で仮定しているアーチ機構およびトラス機構を初期応力モードテンソルとし、以後、各々(a)弾性モード、(b)アーチモード、および(c)トラスモードと称する。

弾性モードは各解析対象ごとに微小の荷重を加えた場合の有限要素解析を行い、得られた全ての位置で弾性状態の応力分布をモードとした。

アーチモードは(b)のように灰色部分では圧縮主応力  $\sigma_c$  のみ存在し、それ以外では無応力状態とした。なお、 $\sigma_c$  および主軸の角度  $\theta_c$  は指針の仮定と同様である。

トラスモードは図のように主筋間の領域(灰色部分)で圧縮主応力  $\sigma_t$  のみ存在し、それ以外の領域では無応力状態とした。トラスモデルとした。なお、 $\sigma_t$  および主軸の角度  $\theta_t$  は指針の仮定と同様である。

##### 4.2 分解結果

図-11にモード分解で得られた弾性モード、アーチモード、およびトラスモードが負担する

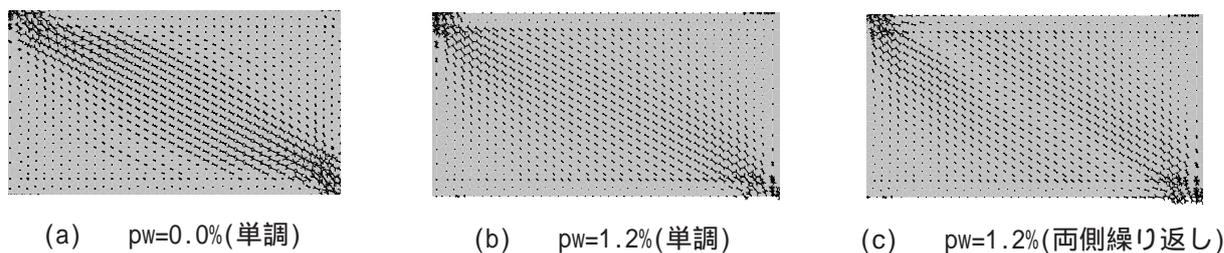


図-9 主応力分布

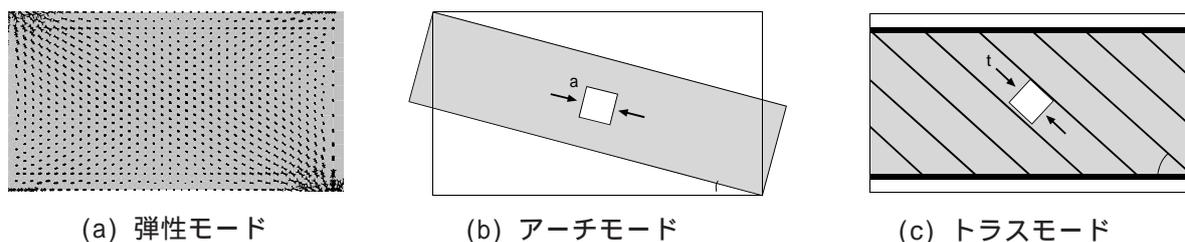


図-10 応力モード

せん断力と部材角の関係を示す。ここで(a)は  $p_w=0.0\%$  で単調戴荷の場合、(b)は  $p_w=1.2\%$  で単調戴荷の場合、(c)は  $p_w=0.0\%$  で両側繰返し戴荷の場合である。また、図-12は各モードがせん断力に占める割合(寄与分)と部材角の関係である。ここで、(a)は  $p_w=0.0\%$  で片側繰返し戴荷の場合、(b)は  $p_w=1.2\%$  で片側繰返し戴荷の場合、(c)は  $p_w=1.2\%$  で両側繰返し戴荷の場合である。

図に示すように全ての補強筋比および戴荷方法で、部材角によらず本解析で仮定したモードの和(弾性、アーチ、トラスモードの和で図中の全モード)が有限要素解析のせん断力とほぼ一致している。また、部材角の小さい場合に弾性モードが100%であるが、前述のようにせん断ひび割れが発生した部材角以後トラスモードが上

昇し始める。その後、部材角の増加に伴い、アーチモードも上昇する。しかしながら、指針で仮定している完全塑性状態には至らず、詳細な傾向は後述するが弾性モードと塑性モード(アーチモード+トラスモード)は補強筋比・戴荷方法によらずほぼ50%程度となる。

戴荷方法による影響では、いずれのせん断補強筋比の場合でも単調戴荷と片側繰返し戴荷はほぼ同様の値となる。すなわち、応力分布において両戴荷方法による差異はない。一方、両側繰返し戴荷は補強筋比が大きい場合はほとんど他の戴荷方法と差異はないが、補強筋比が小さくなるほど他の戴荷方法に比べてトラスモードの割合が低下している。これは、繰返しによる劣化のため、コンクリートが塑性状態に移行する前に破壊が進行するためと考えられる。

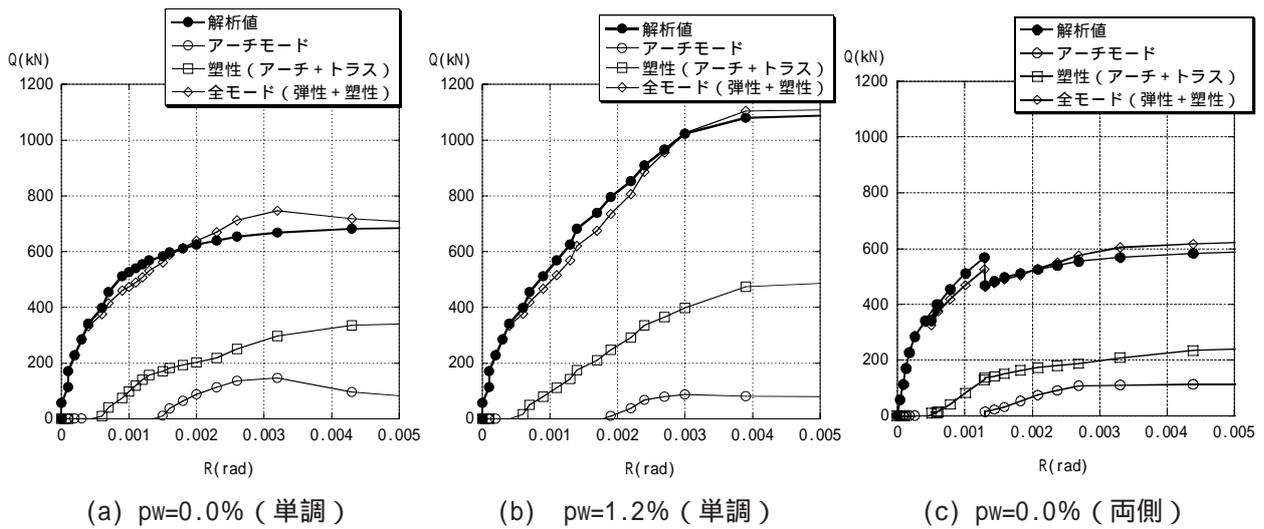


図-11 せん断力 - 部材角関係

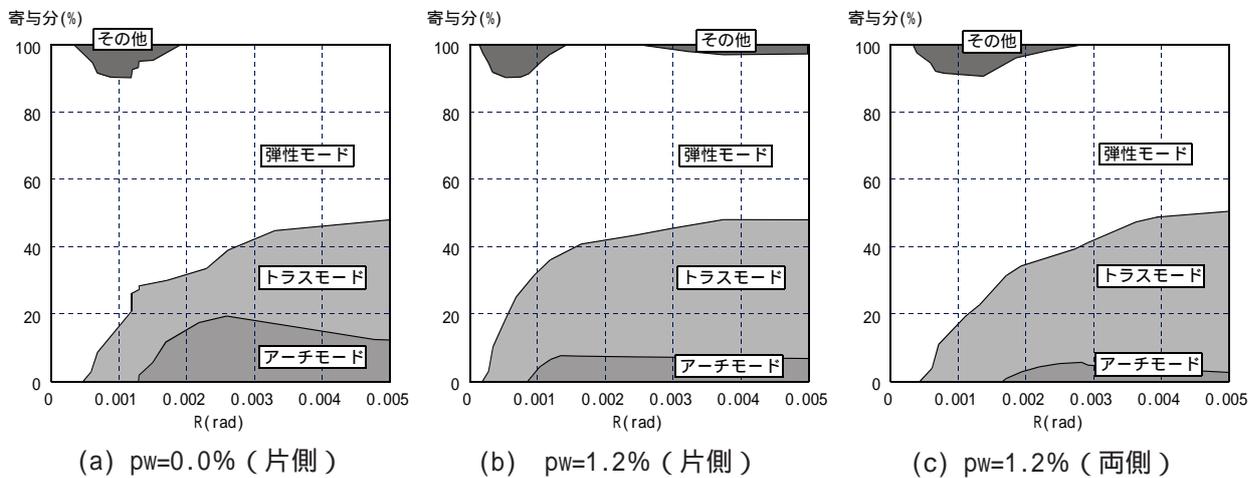


図-12 寄与分 - 部材角関係

図-11(a)と(b)および図-12(a)と(b)を比較すると、補強筋比が小さい程アーチモードの割合が大きくなるが、その割合はトラスモードと比して小さく、補強筋比が0%の場合でも最大でトラスモードと等しい程度までしか上昇しない。

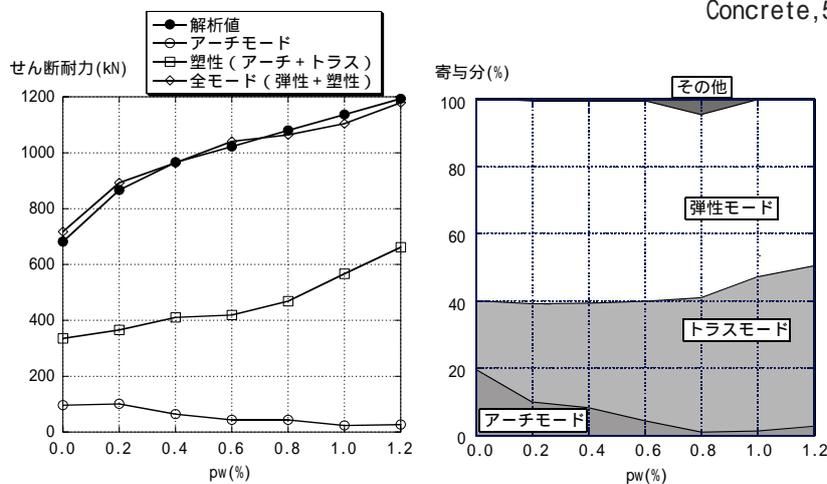
図-13は両側繰り返し戴荷でせん断耐力時の各モードの(a)せん断力負担分、(b)寄与分と部材角の関係である。図のようにせん断補強筋比が増加するに従い、せん断耐力は上昇する。これは、アーチモードの負担分が単調減少するが、その減少率に比して大きな増加率でトラスモードの負担分が増加するためである。しかし、前述したように、弾性モードが40～50%程度あることから、指針で仮定しているようにコンクリートが完全に塑性化する前にせん断破壊が生ずる。

## 5. まとめ

せん断破壊が先行する戴荷方法・補強筋比の異なるRC梁を対象として有限要素解析・モード分解を行った。解析結果をもとにコンクリート内部応力に関して以下に示す知見を得た。

1) 全ての場合の応力分布を弾性状態の応力分布、アーチ機構およびトラス機構の和で記述することができる。

2) 指針の仮定と同様に補強筋比が大きくなるほど、アーチ機構の割合は減少しトラス機構の割合は増加するが、両者の比率は仮定とは異なる。



(a) せん断耐力 - 補強筋比

(b) 寄与分 - 補強筋比

図-13 両側繰り返し戴荷のせん断耐力時

る。

3) せん断破壊が進行するのに従って弾性状態から塑性状態へと移行するが、せん断破壊時においてもコンクリートは完全には塑性化せず、割合にしてほぼ50%程度は弾性状態が残存する。

4) 単調戴荷と片側繰り返し戴荷の場合、せん断挙動および内部応力状態はほぼ同様である。一方、両側繰り返し戴荷の場合は、上記の戴荷方法に比べて塑性化の程度が低い状態で破壊に至る。この傾向はせん断補強筋比が小さいほど顕著である。

## [参考文献]

- [1] 日本建築学会:『鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針』第6章 柱および梁のせん断と付着に対する設計, 日本建築学会, 440 pp., 1999
- [2] 瀧口克己ら: 圧縮曲げせん断を受けるR/C柱端部の圧縮強度, 日本建築学会構造系論文集, 第496号, pp.141-148, 1996
- [3] 村上聖: 鉄筋コンクリート梁の終局せん断強度算定式に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第533号, pp. 143-150, 2000.6
- [4] 小椋紀行: R/C梁のアーチ機構における付着の影響: 日本建築学会学術講演梗概集C-2構造, pp. 453 - 454, 2000
- [5] 市之瀬敏勝ら: 二次元応力のモード分解, 日本建築学会構造系論文集, 第487号, pp. 83-91, 1996
- [6] (株)計算力学研究センタ -: RC非線形解析専用プログラムATENA(version 2.0.1)
- [7] Shah S. P. et al: Fracture Mechanics of Concrete, 552 pp., John Wiley and Sons, Inc., 1995
- [8] Kupfer, H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc. Vol.66, No.8, pp.656-666, 1969.8.
- [9] Bazant, Z.P., and Oh, B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Constructions, Vol. 16, No. 93 pp.155-177, 1983.5/6
- [10] Kolmar, W.: Beschreibung der Kraftuebertragung ueber Risse in nichtlinearen Finite-Element-Berechnungen Von Stahlbetontragwerken, Dissertation, T. H. Darmstadt, p. 94, 1986