

RC単柱の破壊モードの判定と靱性評価

依田 宏之 , 吉川 弘道

1. 古典トラス理論と修正トラス理論: 基本式の提示

・トラスアナロジー¹⁾(トラス近似)

斜めひび割れを有する RC 部材をトラスモデルに置き換えることで, その耐荷機構を明瞭に説明することができる. このトラスモデルは, コンクリートの圧縮ストラット(斜めひび割れに沿った圧縮材)角度を θ , セン断補強筋の角度を α とする.

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \quad (1)$$

V_s : セン断補強筋負担分 A_w : セン断補強筋断面積 f_{wy} : セン断補強筋降伏強度 z : セン断解析での有効高さ
 θ : 圧縮ストラット角度 α : 腹鉄筋の角度 s : セン断補強筋ピッチ間隔

ここで, $\theta = 45^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ とすると式(2)のように表される

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} z}{s} \quad (2)$$

・修正トラス理論

上述の古典トラス理論はせん断耐力を過小評価することから, せん断耐力 V_u は式(3)に示すように V_s にトラス理論の余剰分(*other contribution*)として, 実験式から求められるコンクリート寄与分 V_c が導入された. すなわち, せん断耐力 V_u を以下のような累加式によって表せる.

$$V_u = V_s + V_c \quad (3)$$

V_u : せん断耐力

V_s : セン断補強筋負担によるせん断耐力

V_c : コンクリート負担によるせん断耐力

さらに, セン断補強筋負担分 V_s に用いる圧縮ストラット角度 θ を 45° と仮定した場合を固定トラス理論 (Constant angle truss model), 修正圧縮場理論より算出されたひび割れ角度を用いたものを変角トラス理論 (Variable angle truss model) とした.

2.コンクリート負担強度

2.1 各種提案式

以下に現行示方書に採用されている各種提案式を示す。

土木学会コンクリート標準示方書²⁾および鉄道構造物等設計標準³⁾

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし, } d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_v} \quad \text{ただし, } p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする.}$$

$$\beta_n = 1 + M_o / M_d \quad \text{ただし, } n > 2 \text{ となる場合は } 2 \text{ とする.}$$

$$= 1 + 2M_o / M_d \quad \text{ただし, } n < 0 \text{ となる場合は } 0 \text{ とする.}$$

f_{vc} については土木学会コンクリート標準示方書式(以下,土木学会),鉄道構造物等設計標準式(以下,鉄道標準)は以下のような算定式になっている。

()土木学会

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_c} \quad (f_{vcd} \ 0.72)$$

()鉄道標準

$$f_{vcd} = 0.20(0.75 + 1.4d/a) \cdot \sqrt[3]{f'_c} \quad (2.5 \ a/d \text{ の場合})$$

$$f_{vcd} = 0.76(a/d)^{-1.166} \cdot \sqrt[3]{f'_c} \quad (0.5 \ a/d \ 2.5 \text{ の場合})$$

f_{vcd} : コンクリートの設計せん断強度

b_w : 断面積 d : 断面有効高さ p_s : せん断引張鋼材比 A_s : 引張側鋼材の断面積

f'_c : コンクリートの圧縮強度 M_d : 設計曲げモーメント M_o : M_d に対する引張縁において,軸方向力によって発生する応力を打消すのに必要な曲げモーメント a/d : せん断スパン比

β_d : せん断耐力に関する有効高さの係数 β_p : せん断耐力に関する軸方向鉄筋比の係数

道路橋示方書⁴⁾

以下に、道路橋示方書(以下、道路橋)の提案式を示す。

$$P_s = S_c + S_s$$

$$S_c = c_c c_e c_{pt} \tau_c b d$$

P_s : せん断耐力 S_c : コンクリートが負担できる平均せん断応力度

c_c : 荷重の正負交番繰返し作用の影響に関する補正係数

c_e : 橋脚断面の有効高 d に関する補正係数

c_{pt} : 軸方向鉄筋比 p_t に関する補正係数

b : せん断耐力を算定する方向に直角な方向の橋脚断面の幅

d : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の橋脚断面の有効高

The European Concrete Standards in Practice (Euro-Code)⁵⁾

表 1 Tensile strength of concrete

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
f_{ctm}	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
$f_{ctk0.05}$	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9
$f_{ctk0.95}$	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3

τ_{Rd} : 基本せん断強度 = $0.25 f_{ctm}$ f_{ctm} : 引張力の平均値 = $0.3(f_{ck})^{0.67}$

$f_{ctk0.05}$: 超過確率 5% 未満のコンクリート引張強度 = $0.7 f_{ctm}$

$f_{ctk0.95}$: 超過確率 95% 以上のコンクリート引張強度 = $1.3 f_{ctm}$

Priestley

Priestley らの提案式⁶⁾では、土木学会や鉄道標準(参照)のように軸力による影響をコンクリート負担分に考慮していない。また、コンクリート負担分 V_c は変形量の増加に伴う劣化を正負交番漸増載荷実験から同定した低下率を用いることで評価している。

$$V_c = k \sqrt{f_c'} A_e$$

$$A_e = 0.8 A_{gross}$$

k : せん断抵抗メカニズムによるコンクリートのせん断強度, A_e : 有効せん断面積, A_{gross} : 柱の全断面積

2.2 比較と考察

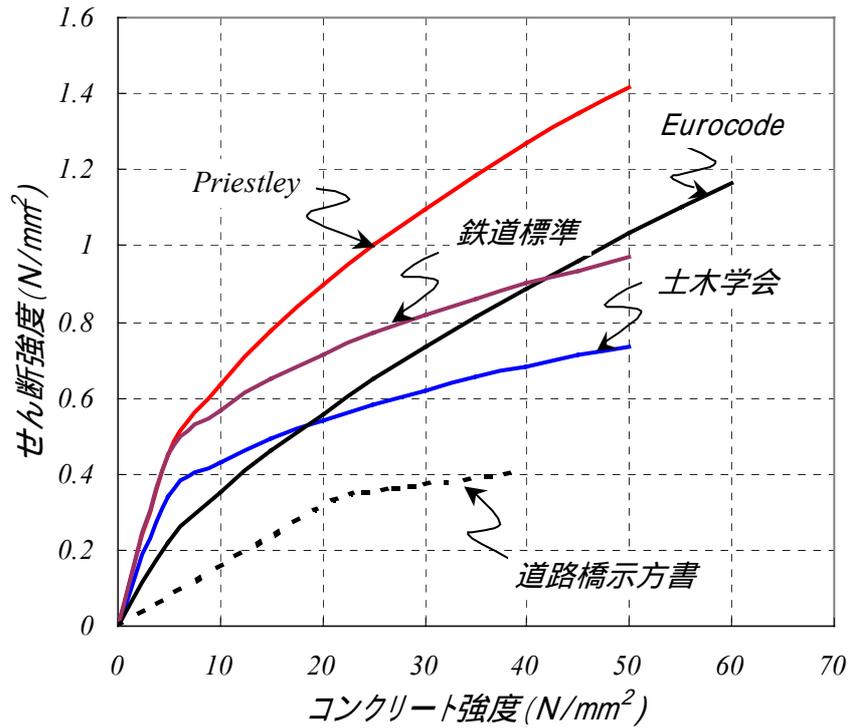


図1 各種コンクリート負担分の比較

図1に各示方書によるコンクリート負担分せん断耐力を表した各種提案式による比較を示す。縦軸にせん断強度 v_c 、横軸にコンクリート圧縮強度 f'_c とした。 f'_c が $5(N/mm^2)$ の時、Priestleyと鉄道標準は合致した挙動を示していることが確認できる。また、この $5(N/mm^2)$ 付近を境にPriestleyとEurocode、鉄道標準と土木学会がほぼ平行した挙動をとっていることも確認できる。一方、道路橋示方書は他式に比べせん断強度を過小評価していることがわかる。

3. 繰返し大変形履歴下におけるせん断劣化

RC 柱部材は大変形領域での正負交番繰返し荷重によって、せん断耐力が著しく低下するため、せん断耐力の低下を考慮することが必要となってくる。以下に、各種提案された靱性評価式を示す。

Priestley/変位靱性率による評価，曲率靱性率による評価

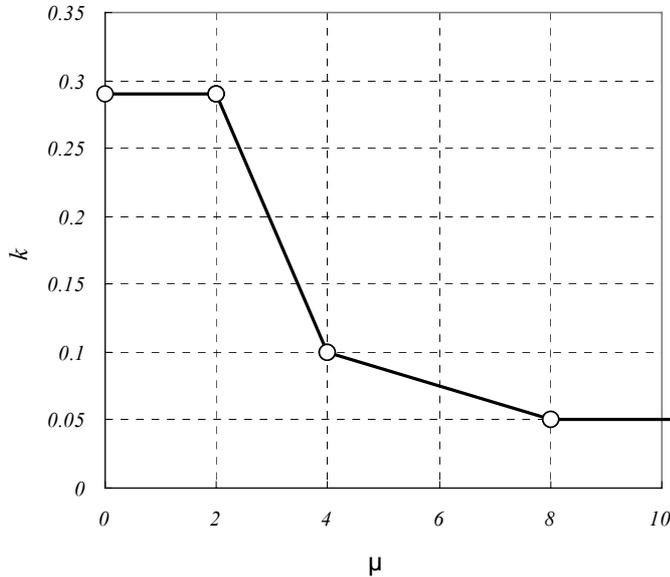


図2 変位靱性率による評価

図2に变位靱性率による評価を示す。kは塑性ヒンジ区間においては部材の変位靱性率 μ に依存し、 $\mu = 2$ では0.29であり、靱性率の増加に伴い減少している。 $\mu = 8$ では0.05となっている。

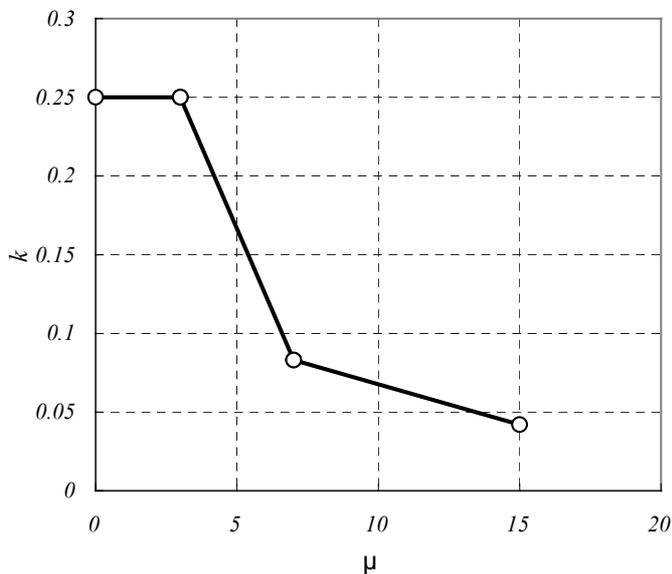


図3 曲率靱性率による評価

図3に曲率靱性率による評価を示す。図2の横軸として用いた変位靱性率は部材の変位靱性率であり、構造物の変位靱性率より幾分大きくなる。そこで、より簡便にするために変位靱性率を曲率靱性率に変換して評価する。コンクリートの負担するせん断力の低下は、主としてひび割れ幅の増大とこれによる骨材のかみ合わせ効果の低下によって起きるため、曲率靱性率はひび割れ幅の指標として重要な意味をもっており、コンクリートの負担するせん断耐力の低下を評価するためには曲率靱性率を用いる方が望ましい。

JCI データベース⁷⁾の適用

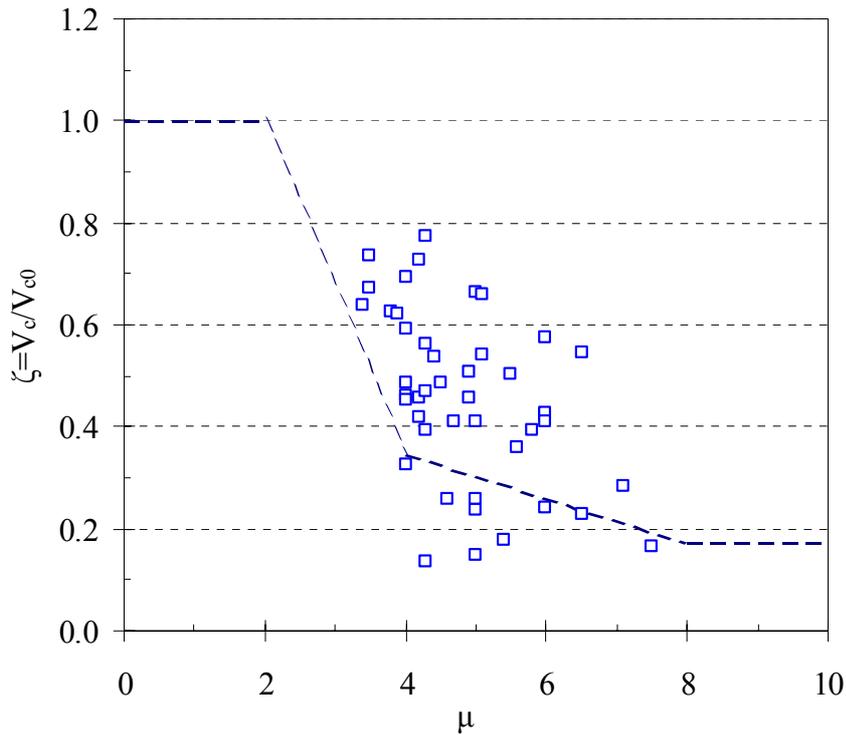


図4 JCI データベース(: Kim & Mander モデル)

・Kim & Mander モデル⁸⁾

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

p_v : せん断補強筋比, p_t : 主鉄筋比,

A_v : 柱のせん断面積(mm²)

A_g : 柱の全断面積(mm²), n : 弾性係数比

: 柱の構造形式による係数

(fixed-pinned end: = 1.5704)

JCI データベースにおけるせん断劣化係数 の結果を図 4 に示す。ここでは、曲げ降伏後のせん断破壊を呈した試験体 45 体の実験データを用いた。実験データ 45 体のプロット点は広範囲に散在し、変位靱性率 μ の増加に伴う低下傾向を概ね確認することができる。また、Priestley らの劣化曲線を併記したところ、実験データの概ね下限値を評価していることが確認できた。

建築学会靱性評価指針⁹⁾

部材が曲げ降伏以後の繰返し载荷を受ける場合、ヒンジ領域内ではひび割れが交差することによってコンクリートの有効強度係数を図5のように、すなわち次式のような塑性ヒンジ回転角 R_p の関数と仮定する。

$$\begin{aligned} \nu &= (1 - 15R_p)\nu_0 & R_p \leq 0.05rad \\ &= \nu_0 / 4 & R_p > 0.05rad \end{aligned}$$

ν : ヒンジ領域内での有効強度係数, R_p : 保証ヒンジ回転角
 ν_0 : 非ヒンジ部材の有効係数

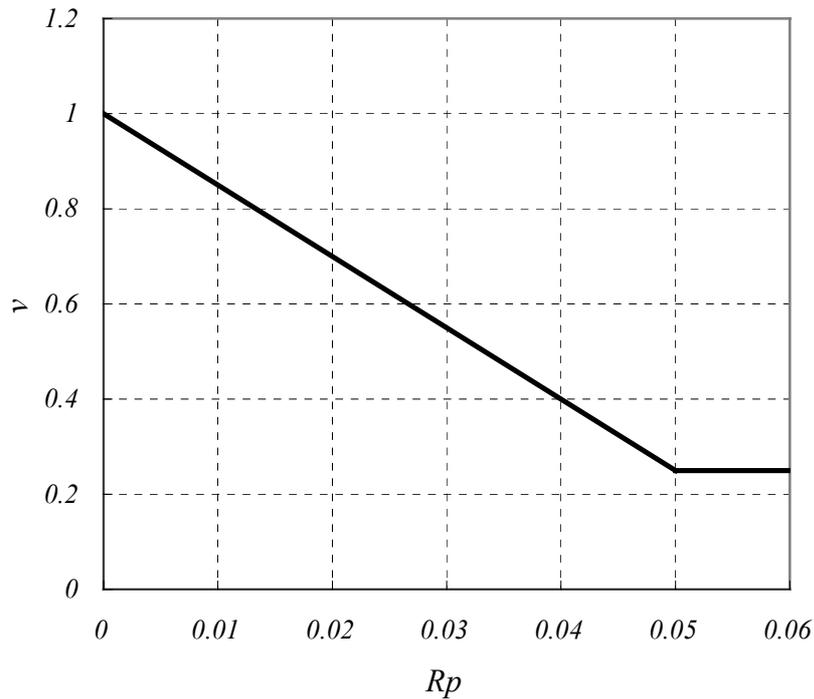


図5 靱性部材の有効強度係数

図5に有効強度係数 ν と回転角 R_p の関係を示す。塑性ヒンジ回転角 R_p が $0 \leq R_p \leq 0.05$ の場合、有効強度係数は減少傾向を示している。一方、 $0.05 \leq R_p$ の場合は、 ν は一定の値を示している。このことから、ヒンジ領域内での回転角が 0.05 に到達するまでの領域では ν は変化するが、0.05 を超えると一定に収束してしまうといえる。

4.RC 単柱の破壊モードの判定と靱性評価

4.1 固定トラスモデル v.s.変角トラスモデル

(1)固定トラスモデル

RC 部材のせん断耐荷機構は、ひび割れの発生した部材を静定トラスモデルで近似することにより、合理的に説明でき、塑性状態を考慮したせん断補強筋負担分 V_s (塑性トラス理論) を評価するものである。しかし、塑性トラス理論はせん断耐力を過小評価することから、せん断耐力 V_u は V_s にトラス理論の余剰分として、実験式から求められるコンクリート負担分 V_c との累加した修正トラス理論を用いて評価している。ここで、本論ではせん断補強筋負担分 V_s に用いる圧縮ストラット角度を 45° と仮定した場合を固定トラス理論 (Constant angle truss model) と呼ぶ。(図 6 参照)

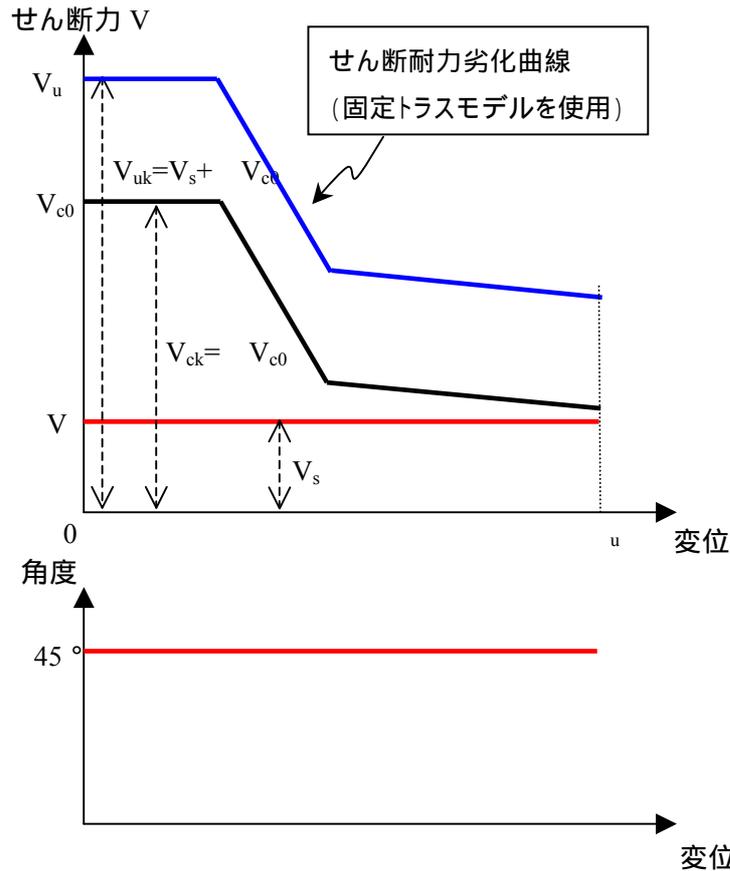


図 6 Constant angle truss model theory (固定トラス理論) の場合

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} j d}{s}$$

A_w : せん断補強筋断面積

f_{wy} : せん断補強筋降伏強度 (N/mm^2)

j : $7/8$, d : 有効高さ, s : せん断補強筋間隔 (mm)

: 圧縮ストラット角度 (45° に固定)

修正トラス理論: $V_u = V_s + V_c$

V_u : せん断耐力 (kN)

V_s : せん断補強筋負担せん断耐力

V_c : コンクリート負担せん断耐力

(2) 変角トラス理論

せん断補強筋負担せん断耐力 V_s の算定に用いられるひび割れ角度は $\theta = 45^\circ$ とした固定トラス理論を用いることが一般的である。しかし、既往の正負交番載荷実験では角度が 45° より小さくなることが知られている。

そこで、本論では修正圧縮場理論より算出されたひび割れ角度を用いることにより、変形の進展に伴うひび割れ角度の変遷を追跡できる変角トラス理論を採用する。

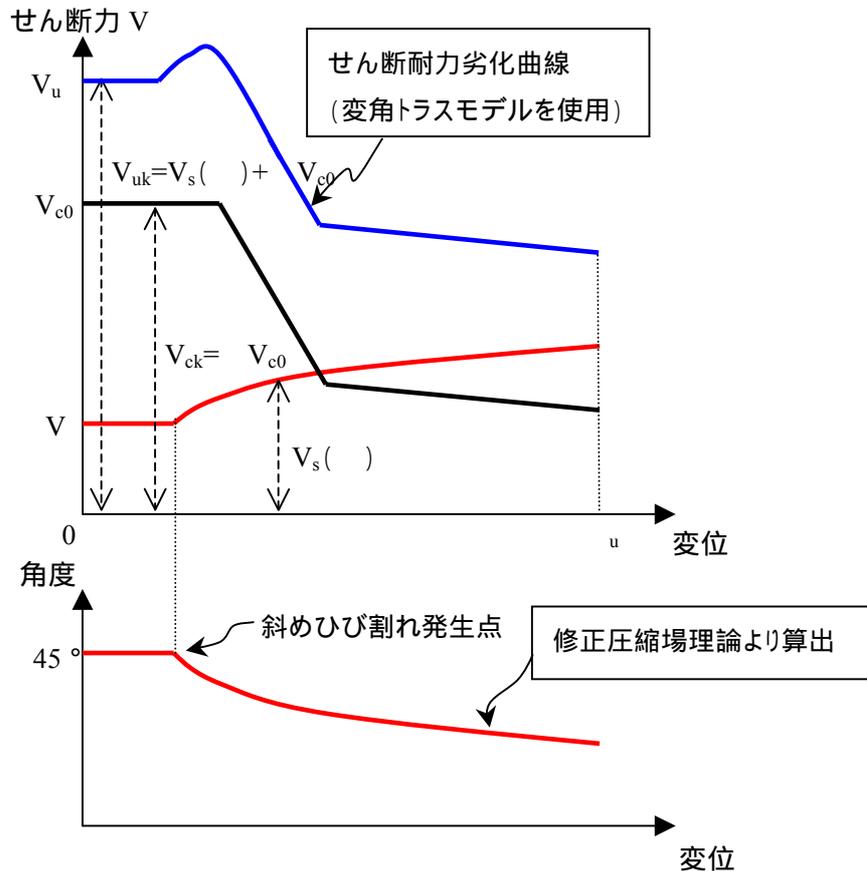


図7 Variable angle truss model theory (変角トラス理論) の場合

$$V_s(\theta) = \frac{A_w f_{wy} j d \cot \theta}{s}$$

: 圧縮ストラット角度 (MCFT の値を使用)

$$V_u = V_s(\theta) + V_c$$

4.2 変形性能評価

本稿で提案する評価手法は RC 柱部材を対象とし、先に示した解析手法を統合して、最終的に RC 柱部材の変形量として表すものである。よって変形解析により算出した荷重-変位 ($P-\delta$) 曲線上に、繰返しを考慮したせん断劣化曲線を変位軸上に同期させ、併記することにより破壊形式の判定および変形性能を数値解析的に評価する手法とした(図 8 参照)。この評価方法では、せん断耐力劣化曲線が $P-\delta$ 曲線と交差した時がせん断破壊となり、部材の最終破壊点とする。ここで、初期降伏点 P_y より早期に交差する場合はせん断破壊となり、初期降伏点後に交差する場合は曲げ降伏後のせん断破壊となる。両曲線が交差しない場合を曲げ破壊となり、変形性能に優れた破壊形式となる。表 1 に提案手法に用いる算定式一覧、図 9 に本評価手法のフローチャート¹⁰⁾を示す。

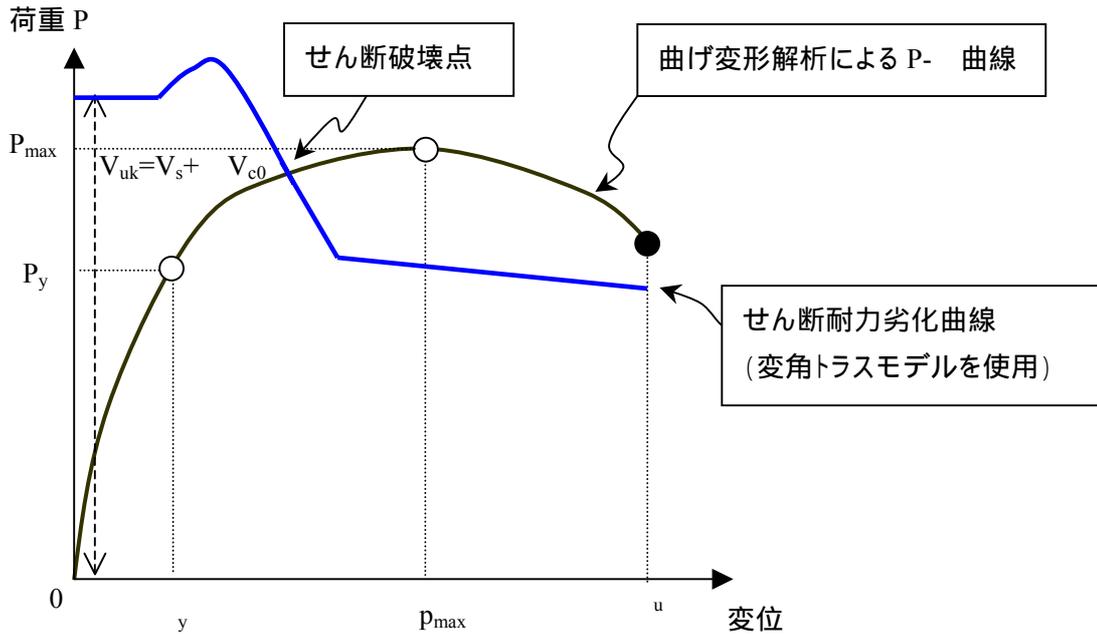


図 8 変形性能評価手法モデル図

表 1 提案手法に用いる算定式

P- 曲線	せん断耐力		靱性率
	固定トラスモデル	変角トラスモデル	
$\delta_{all} = \delta_{flex} + \delta_{shr} + \delta_{slip}$ δ_{all} : 総変形量 δ_{flex} : 曲げ変形量 δ_{shr} : せん断変形量 δ_{slip} : 軸方向鉄筋伸出し量	$V_y = V_s + \zeta V_{c0}$ ζ : Priestley V_{c0} : 鉄道標準式		部材靱性率 $\mu = \delta / \delta_y, \mu_{mu} = \delta_{mu} / \delta_y$
	θ : 45° (固定)	θ : 修正圧縮場理論	せん断破壊: $\mu < 1$ 曲げせん断破壊: $1 < \mu < \mu_{mu}$ 曲げ破壊: $\mu = \mu_{mu}$
	θ : Kim&Mander Model (参考値)		

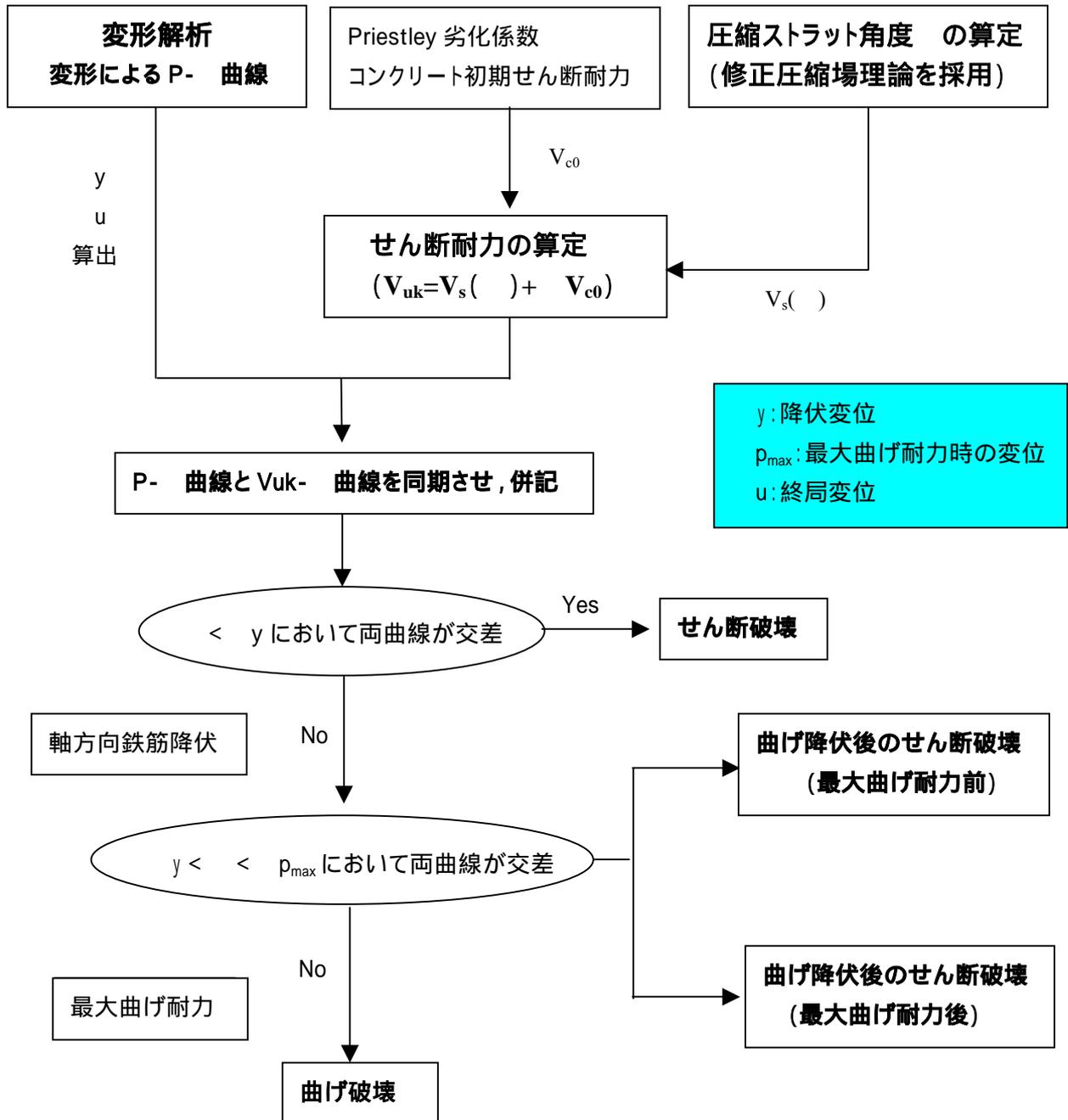


図 9 変形性能評価手法のフローチャート

【参考文献】

- 1)例えば, 吉川 弘道:鉄筋コンクリートの解析と設計, 丸善株式会社, 2004.2
- 2)土木学会:[2002 年制定]コンクリート標準示方書 構造性能照査編
- 3)鉄道総合研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善株式会社, 1999.10
- 4)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2002.3
- 5)A.W. Beeby and R.S.Narayanan, Designers Handbook to Eurocode2, Thomas Telford, 1995
- 6)M.J.N Priestley, F.Seible and G.M.Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996
- 7)日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の靱性評価研究委員会 「コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム 第 編 委員会報告書」, 1988.3
- 8)J.B.Mander, J.H.Kim, and A.Dutta: "Shear-Flexure Interaction Seismic Analysis and Design" JCI Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads-Recent Advances and challenges on Analysis and Design-Volume1, 1999
- 9)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(案)・同解説, 1997.7
- 10)白子将則:RC 柱部材のせん断劣化と変形性能評価に関する研究, 武蔵工業大学修士学位論文, 2004