

論文 マクロモデルを用いた PCa 連層耐震壁の設計法の提案

武田 友喜^{*1}・松本 智夫^{*2}・今井 弘^{*3}・古谷 方人^{*4}

要旨：プレキャスト（PCa）連層耐震壁は、PCa 壁板の脚部の水平接合部に滑りを生じた後は、連層トラス機構、連層アーチ機構および各階アーチ機構の累加機構によって、作用せん断力に抵抗すると考える。このマクロモデルに基づいて、PCa 連層耐震壁の設計法を提案し、設計手順およびせん断耐力式を紹介すると共に、簡単な設計例を示す。本設計法により、PCa 壁板の水平接合部における滑りの有無を考慮した PCa 連層耐震壁の設計が可能となる。

キーワード：PCa 連層耐震壁、水平接合部、滑り、各階アーチ機構、作用せん断力

1. はじめに

PCa 工法に用いられる各接合部は、可能であるならば、一体打ちと同等以上のせん断強度を確保することが望ましい。しかし、PCa 連層耐震壁では、大きなせん断力の負担を期待されているにもかかわらず、その水平接合部に十分な強度を確保することが困難な場合が多い。

本報では、水平接合部の滑り強度の評価法および滑りを生じた後のせん断耐力の評価法に関する筆者らの研究¹⁾に基づき、PCa 壁板の脚部の水平接合部に生じる滑りの有無を考慮した PCa 連層耐震壁の設計法に関する提案を試みる。

2. 解析モデルの提案

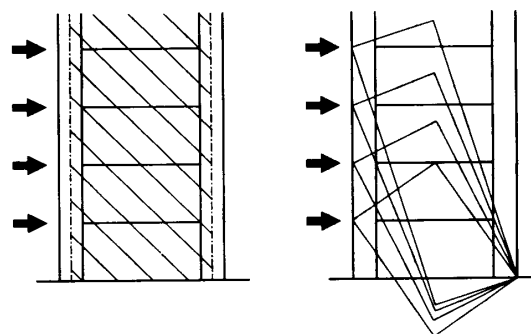
2.1 連層トラス機構および連層アーチ機構

PCa 連層耐震壁の水平接合部に滑りが生じない場合、あるいは滑りが生じる以前は、一体打ちの鉄筋コンクリート（RC）連層耐震壁と同様のせん断抵抗機構が成り立つと考える。このとき、PCa 連層耐震壁は、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²⁾（以下「靱性保証型指針」と呼ぶ）に示される

ように、鉄筋およびコンクリートからなる連層トラス機構と、残りのコンクリートからなる連層アーチ機構によってせん断力が負担されると考える。

図-1(a)に示す連層トラス機構は、鉛直方向および水平方向の鉄筋が負担する引張力と、コンクリートが負担する圧縮力とにより作用せん断力に抵抗する機構である。連層トラス機構に用いられる水平方向の鉄筋（水平筋）としては、壁横筋の他に層中間の梁主筋や有効幅内のスラブ筋も考慮する。

図-1(b)に示す連層アーチ機構は、各階の床高



(a)連層トラス機構 (b)連層アーチ機構

図-1 滑りが生じる前の解析モデル

*1 筑波大学大学院 理工学研究科構造工学専攻（正会員）

*2 安藤建設(株) 技術研究所（正会員）

*3 筑波大学教授 機能工学系（正会員）

*4 横浜国立大学 工学部建設学科（正会員）

さの引張柱側から、最下階の圧縮側柱脚部に向かうコンクリートが負担する圧縮力と、引張側柱主筋が負担する引張力によって作用せん断力に抵抗する機構である。

2.2 各階アーチ機構

PCa 連層耐震壁の水平接合部に滑りが生じた後は、水平接合部にそれ以上の作用せん断力の伝達を期待することは不可能となり、前述のように RC と同様に考えることはできない。そこで、滑りが生じた後の作用せん断力は、図-2 に示す各階アーチ機構によって負担されると考える。

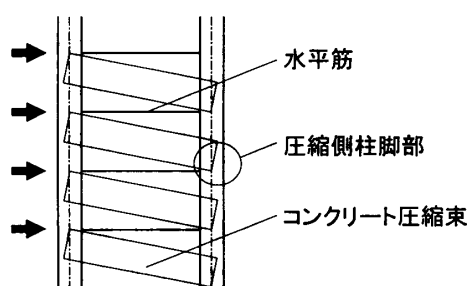


図-2 各階アーチ機構

図-2 に示す各階アーチ機構では、水平接合部をまたがってコンクリート圧縮束を考慮することはできず、各階の壁板の対角線方向に生じるコンクリート圧縮束を考える。コンクリート圧縮束が伝達する作用せん断力は、各階で圧縮側柱脚部を介して、水平接合部に滑りが生じるまでに使われた残りの水平筋によって引張側柱方向に引き戻され、下階のコンクリート圧縮束へと順次伝達される。

2.3 解析モデルの破壊形式

提案する解析モデルでは、水平接合部に滑りを生じることなく連層耐震壁が破壊に至る場合には、その破壊機構は RC 連層耐震壁と同等と判定する。

PCa 連層耐震壁の水平接合部における滑りの有無については、2mm 程度のずれ変位をその目安とする。また、滑り発生前に負担していたせん断力は、滑り発生後も維持し、作用せん断力の増分荷重に対しては各階アーチ機構が抵抗す

る。従って、水平接合部の滑り自体を最終破壊とは考えず、滑り発生後に形成される各階アーチ機構が強度を維持できなくなる状態を、滑りを生じた PCa 連層耐震壁の最終破壊と考える。

各階アーチ機構の破壊形式は、圧縮側柱のせん断破壊、水平筋の引張降伏、および壁板コンクリートの圧縮破壊の 3 通りが考えられる。現状では、これらを RC 連層耐震壁のせん断破壊に属するものとみなし、靱性能はあまり期待しないこととする。本設計法での破壊形式の分類を図-3 に示す。なお、水平接合部の破壊に焦点を絞るため、鉛直接合部は十分に強いと仮定し、その破壊はここでは考えない。

水平接合部が滑らない	水平接合部が滑る 各階アーチ機構を形成	
曲げ破壊	一体打ちの 曲げ破壊と同等	曲げ破壊
せん断破壊	一体打ちの せん断破壊と同等	圧縮側柱のせん断破壊 水平筋の引張降伏 コンクリートの圧縮破壊

図-3 破壊形式の分類

3. 設計例

提案した解析モデルに基づき、水平接合部に滑りを伴うせん断破壊型の PCa 連層耐震壁の設計例を示す。設計例では、破壊形式を仮定した仮想仕事法を用いてせん断耐力を確認する。本報では設計例のうち、設計用せん断力とせん断耐力の比較のみを紹介する。

3.1 建物概要

設計建物として、地上 10 階建ての PCa-RC 造共同住宅を想定する。建物の概要を図-4、図-5、表-1 および表-2 に示す。張間方向は、耐震壁上部に壁厚と同じ幅の梁を内蔵する PCa 壁板を全階で用いた PCa 連層耐震壁構造とする。桁行方向は純ラーメン構造とする。PCa 連層耐震壁の水平接合部の挙動に関する設計に焦点を絞るため、張間方向の支配幅 1 スパンのみを取り出して設計する。

PCa 壁板の下端面は平滑とし、敷モルタルを介したモルタル充填式のスリーブ継手によって鉛直筋を接合する。シャーキーは設置しない。

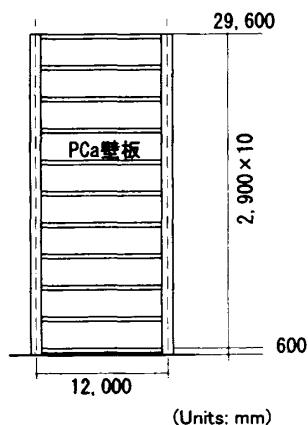


図-4 軸組図

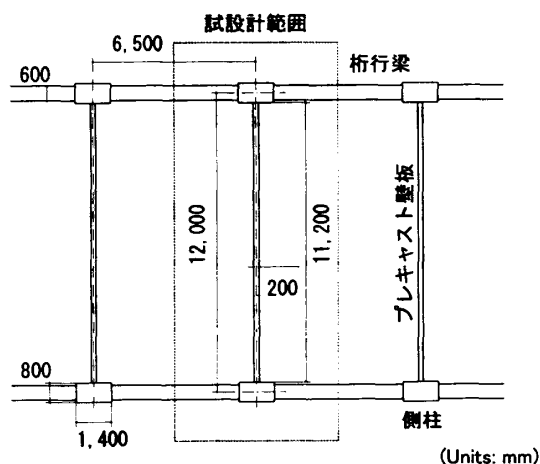


図-5 略伏図

表-1 建物概要

壁		
全長 D	12,800 mm	
柱芯々間距離 lw	12,000 mm	
桁行柱芯々間距離	6,500 mm	
階高 hw	2,900 mm	
壁厚 tw	200 mm	
水平接合部	敷モルタル方式 ($\mu=0.7$)	
鉛直接合筋	D16@600	7-10 階
	D19@600	1-6 階
頭繋ぎ筋	4-D22	
スラブ筋	10-D13	有効幅内
横補強筋	D10@175W	8-10 階
	D13@175W	3-7 階
	D13@150W	1-2 階
コッター筋	16-D13	8-10 階
	32-D13	3-7 階
	42-D13	1-2 階
柱		
幅 bc	1,400 mm	
せい Dc	800 mm	
主筋	12-D29	6-10 階
	12-D32	1-5 階
横補強筋	4-D10@100	6-10 階
	4-D13@100	1-5 階

表-2 使用材料

コンクリート	使用階
FC 30	6-10 階
FC 33	1-5 階

鉄筋	径	規格強度 (N/mm ²)	使用部位
SD 295A	D10, D13	295	スラブ筋、壁横筋、水平接合筋、柱横筋
SD 345	D16, D19, D22	345	鉛直接合筋、頭繋ぎ筋
SD 390	D29, D32	390	柱主筋

3.2 設計用せん断力

PCa 連層耐震壁の設計用せん断力 Q_m を図-6 に示す。本設計例では Q_m として、床単位荷重を 14.5 kN/m² としたときの A_i 分布による必要保有水平耐力を用いる。せん断破壊型を想定しているの、構造特性係数 D_s は 0.55 とした。

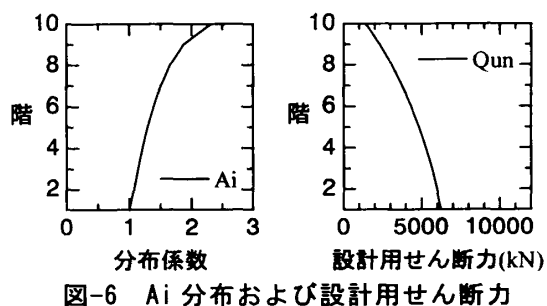


図-6 A_i 分布および設計用せん断力

3.3 せん断耐力の算定

(1) 滑りが生じないときのせん断耐力

全階の PCa 耐震壁を、同断面の RC 耐震壁であると仮定する。このときのせん断耐力 V_u を、連層トラス機構の負担せん断力 V_l および連層アーチ機構の負担せん断力 V_a より求める。水平接合部に滑りが生じず、一体打ちと同等と判断される階のせん断耐力の算定には、式(1)を用いる。

$$V_u = V_l + V_a \quad (1)$$

靱性保証型指針²⁾に示される連層アーチ機構の負担せん断力の計算法は、連層トラス機構の負担分を任意に仮定できることの影響で、せん断強度が変動するなど、やや煩雑な面がある。

本報では、連層アーチ機構で負担する分布外力は必ずしも引張側柱まで伝達される必要がないと考え、連層トラス機構の負担せん断力を配

筋から一意に求める。また、連層トラス機構と連層アーチ機構の負担する分布外力の割合は一定であるとする。これらの仮定によって、連層アーチ機構の負担せん断力を簡易に算定することが可能となる。

連層トラス機構の負担せん断力 V_t は、靱性保証型指針²⁾に示される式(2)により求める。

$$V_t = l_{wb} / h_w \cdot \sum A_t \cdot \sigma_y \quad (2)$$

ここで、 l_{wb} はトラス機構の有効壁長さ、 h_w は階高、 $\sum A_t \cdot \sigma_y$ は水平筋の引張強度の和である。

連層アーチ機構の負担せん断力 V_a は、靱性保証型指針²⁾に示される式(3)を満たす分布外力 P_{aj} の最大値より導かれる。

$$\sum_{j=i}^N \sigma_{aj} = 2 / (t_{wi} l_{wa1}) \cdot \sum_{j=i}^N P_{aj} / \tan \theta_j \leq (1 - \beta_i) \nu \sigma_{Bi} \quad (3)$$

ここで、 N は連層耐震壁の階数、 σ_{aj} は j 階のアーチ機構により i 階に生じるコンクリート圧縮応力度、 t_{wi} は i 階の壁厚、 l_{wa1} は最下階でのアーチ機構の有効壁長さ、 $\nu \sigma_{Bi}$ は i 階のコンクリート有効圧縮強度を表す。また、 θ_j は j 階のアーチ機構の角度、 β_i は i 階のトラス機構に用いられるコンクリート圧縮応力の割合で、式(4)および式(5)により算定する。

$$\tan \theta_j = \sqrt{[(h_j / l_{wa1})^2 + 1]} - h_j / l_{wa1} \quad (4)$$

$$\beta_i = (1 + \cot^2 \phi) \cdot V_t / (t_{wi} \cdot l_{wb} \cdot \nu \sigma_{Bi}) \quad (5)$$

ここで、 h_j は基礎梁上端から j 階上端までの高さ、 ϕ はトラス機構の角度である。

V_a の算定手順を以下に示す。まず、式(3)の P_{aj} を、Ai 分布 (図-6) に基づいた外力分布に従って式(6)が成り立つように変化させる。

$$2 / (t_{wi} l_{wa1}) \cdot \sum_{j=i}^N P_{aj} / \tan \theta_j = (1 - \beta_i) \nu \sigma_{Bi} \quad (6)$$

このときの分布外力を、 i 階の連層アーチ機構分のコンクリートが圧縮破壊するときに、 i

階より上階に生じている分布外力 P_{aj} とする。 P_{aj} は図-7 に実線で示すように、外力分布に比例した形で、想定する破壊階である i 階より上階のみの値となる。図-7 の破線部は外力分布に基づいて P_{aj} を最下階まで拡張したものである。実線部と破線部の境界が、想定する破壊階である i 階を示す。本設計例では、1 階破壊時の P_{aj} が最も低い値を示した。これらの P_{aj} を i 階についてそれぞれ作用せん断力に変換したものが、連層アーチ機構の負担せん断力 V_a である。

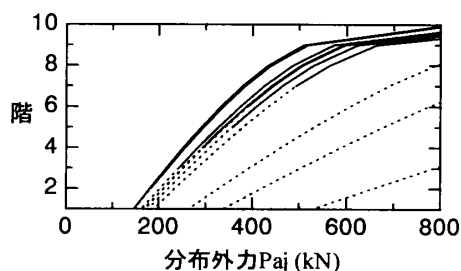


図-7 連層アーチ機構破壊時の外力分布

連層トラス機構と連層アーチ機構の負担せん断力を、表-3 および図-8 に示す。 V_t と V_a を加えたものが、水平接合部に滑りが生じないときのせん断耐力 V_u である。

表-3 滑りが生じないときのせん断耐力

階	連層トラス せん断力 V_t (kN)	β_i	連層アーチ コンクリート強度 ($1 - \beta_i$) $\nu \sigma_{Bi}$ (MPa)	連層アーチ せん断力 V_a (kN)	一体打ち 耐力 V_u (kN)
10	6543	0.330	11.05	2982	9525
9	6543	0.330	11.05	3090	9633
8	6543	0.330	11.05	3209	9752
7	8706	0.440	9.24	2791	11498
6	8706	0.440	9.24	2901	11607
5	8706	0.411	10.40	3389	12095
4	8706	0.411	10.40	3515	12221
3	8706	0.411	10.40	3636	12342
2	9634	0.455	9.63	3471	13106
1	9634	0.455	9.63	3566	13200

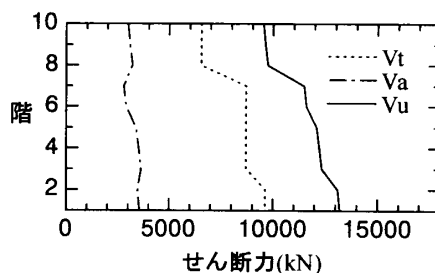


図-8 滑りが生じないときのせん断耐力

(2) 滑り判定および解析モデルの設定

水平接合部の滑り判定を、各階で滑り強度 V_{Hj} と設計用せん断力 Q_{un} を比較することにより行う。水平接合部の滑り強度の算定には、既報¹⁾で提案した、鉛直接合筋のだば効果、壁板に作用する長期軸力およびシャーキーの効果を考慮した式(7)を用いる。

$$V_{Hj} = \{ \mu (a_w \sigma_{wy} + N_L) + C \} \cdot \xi \quad (7)$$

ここで、 μ は界面の摩擦係数、 a_w は鉛直接合筋の断面積、 σ_{wy} は鉛直接合筋の降伏強度、 N_L は壁板に作用する長期軸力、 C はシャーキーのせん断強度（本設計例では $C=0$ ）、 ξ は両側柱の負担せん断力を含めるための割増係数である¹⁾。

本設計例では、数モルタル方式の水平接合部を用いており、摩擦係数は $\mu=0.7$ とする。壁板に作用する長期軸力 N_L は、耐震壁全体に作用する長期軸力を側柱と壁板の断面積比で分配することにより算出する。

水平接合部の滑り判定に基づき、PCa 連層耐震壁全体の解析モデルを設定する。水平接合部に滑りが生じる場合には各階アーチ機構を想定する。滑りが生じない場合は、一体打ちと同等と考えて、連層トラス機構と連層アーチ機構を想定する。

本設計例では、表-4 および図-9 に示すように、全ての階の水平接合部で滑りが発生し、全階で各階アーチ機構による負担せん断力を考慮するという結果になった。

表-4 水平接合部の滑り判定

階	断面係数 ξ	壁軸力 N_L (kN)	水平接合部の滑り判定	
			水平接合部の 滑り強度 V_{Hj} (kN)	判定
10	1.056	566	1329	0.93 slip
9	1.056	1131	1747	0.75 slip
8	1.056	1697	2165	0.70 slip
7	1.056	2262	2583	0.69 slip
6	1.056	2828	3404	0.79 slip
5	1.056	3393	3822	0.79 slip
4	1.056	3959	4240	0.80 slip
3	1.056	4524	4658	0.82 slip
2	1.056	5090	5076	0.85 slip
1	1.056	5655	5494	0.88 slip

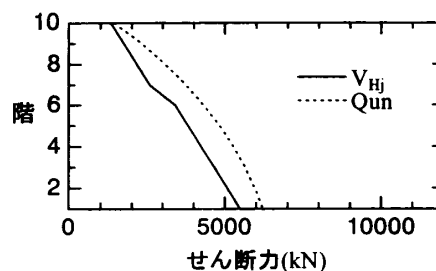


図-9 水平接合部の滑り判定

(3) 滑りが生じるときのせん断耐力

水平接合部に滑りが生じる場合のせん断耐力は、式(8)のように水平接合部の滑り強度に各階アーチ機構の強度を加えることで求められる。

$$V_{u(PCa)} = V_{Hj} + \min \{ T_u, V_d, {}_cV_{cu} \} \quad (8)$$

ここで、 $V_{u(PCa)}$ は PCa 連層耐震壁各階のせん断耐力である。 T_u 、 V_d 、 ${}_cV_{cu}$ はそれぞれ各階アーチ機構で使われる水平筋の引張降伏強度、コンクリート圧縮束の圧壊耐力、圧縮側柱のせん断耐力であり、下式(9)~(11)によって求める。

$$T_u = A_t \sigma_y (1 - \alpha_1) \quad (9)$$

$$V_d = v \sigma_B (1 - \alpha_2) \cdot h_w / 2 \cdot t_w \cdot \cos^2 \theta_2 \quad (10)$$

$${}_cV_{cu} = V_{ci} + V_{ca} \quad (11)$$

ここで、 θ_2 は各階アーチ機構の角度、 V_{ci} および V_{ca} はそれぞれ圧縮側柱脚部に生じるトラス機構およびアーチ機構のせん断力である。 α_1 および α_2 は、滑りが生じるまでに使用された鉄筋およびコンクリートの割合である。滑りが生じるときの連層トラス機構と連層アーチ機構のせん断力の負担率は不明であるため、本報では滑り発生時の負担率と終局時の負担率は等しいと仮定することで、式(12)により α_1 および α_2 を算定する。

$$\alpha_1 = \alpha_2 = V_{Hj} / V_u \quad (12)$$

各階アーチ機構の負担せん断力の算定結果を、表-5 に示す。全階で水平筋の引張降伏強度が最小となり、その破壊によりせん断耐力が決まる。

表-5 各階アーチ機構の負担せん断力

階	$\alpha_1 = \alpha_2$ $=V_H/V_u$	水平筋の 引張降伏強度 T_u (kN)	壁板コンクリート 圧縮耐力 V_d (kN)	圧縮側柱の せん断耐力 cV_{cu} (kN)
10	0.140	1296	4058	2880
9	0.181	1233	3861	2880
8	0.222	1172	3669	2880
7	0.225	1631	3657	2880
6	0.293	1487	3333	2880
5	0.316	1439	3452	3434
4	0.347	1374	3295	3434
3	0.377	1310	3142	3434
2	0.387	1427	3092	3434
1	0.416	1359	2946	3434

(4) PCa 連層耐震壁のせん断耐力

PCa 連層耐震壁各階のせん断耐力 $V_{u(PCa)}$ を A_i 分布と比較し、最初に破壊が生じる階を確認する。そのときの作用せん断力を PCa 連層耐震壁全体のせん断耐力 Q_u とする（表-6、図-10）。

表-6 PCa 連層耐震壁のせん断耐力

階	PCa連層耐震壁 せん断耐力 $V_{u(PCa)}$ (kN)	破壊時の 作用せん断力 Q_u (kN)	破壊形式
10	2625	1515	水平筋降伏
9	2980	2455	
8	3337	3253	
7	4214	3951	
6	4891	4565	
5	5261	5103	
4	5614	5569	
3	5968	5968	
2	6502	6301	
1	6853	6569	

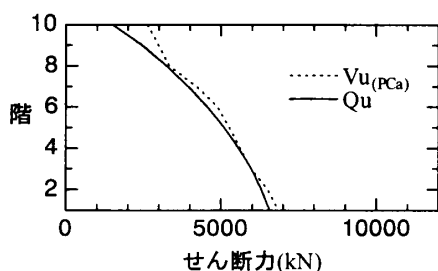


図-10 PCa 連層耐震壁のせん断耐力

3.4 設計用せん断力の確認

せん断耐力 Q_u が設計用せん断力 Q_{um} を上回ることを確認する。表-7 および図-11 に示すように、設計建物は、PCa 壁板の水平接合部には滑りが生じるものの、滑りが生じた後の各階アーチ機構の負担せん断力により、せん断破壊型の PCa 連層耐震壁としての設計が可能となる。

表-7 設計用せん断力の確認

階	せん断耐力 (保有水平耐力) Q_u (kN)	設計用せん断力 (必要保有水平耐力) Q_{un} (kN)	余裕度 Q_u/Q_{un}	判定
10	1515	1435	1.06	OK
9	2455	2324	1.06	OK
8	3253	3081	1.06	OK
7	3951	3742	1.06	OK
6	4565	4323	1.06	OK
5	5103	4832	1.06	OK
4	5569	5274	1.06	OK
3	5968	5651	1.06	OK
2	6301	5966	1.06	OK
1	6569	6221	1.06	OK

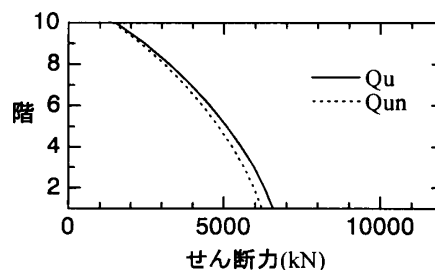


図-11 設計用せん断力の確認

4. まとめ

マクロモデルを用いて水平接合部の滑りを考慮した PCa 連層耐震壁の設計法を提案することにより、以下の結論を得た。

- 1) 分布外力の仮定により、連層アーチ機構の負担せん断力の簡易な算定が可能となる。
- 2) 各階アーチ機構を考慮することにより、水平接合部に滑りを生じた PCa 連層耐震壁の設計が可能となる。
- 3) 本設計例では、3 階の水平筋の引張降伏により破壊形式が支配された。

参考文献

- 1) 今井 弘, 古谷方人, 松本智夫: 枠付き PCa 連層耐震壁のせん断耐力の評価法に関する研究 (その 1 解析方法, その 2 解析結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 構造 IV, pp. 807~810, 1998.9
- 2) 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, pp. 221~226, 1997