

論文 RC 建物の耐震診断における耐震壁の回転条件に及ぼす杭の影響

高田 豊文^{*1}・畑中 重光^{*2}・久保田 謙三^{*3}

要旨：本論文では、RC 建物の耐震診断において、3次診断での連層耐震壁の破壊形式が回転（回転壁）となる場合について考察した。回転壁の抵抗要素には、常時鉛直荷重による柱軸力、境界梁・直交梁の抵抗力、基礎重量が挙げられる。杭の引抜き抵抗も壁の回転抵抗要素になると考えられるが、引抜き抵抗力の評価には不明な点も多い。本論文では、事例解析により、杭径・杭長・地盤構成が杭の引抜き耐力に及ぼす影響を調べた。さらに、3次診断の「節点振分法+仮想仕事法」および変形増分解析による耐震診断事例を通して、杭の引抜き抵抗力が連層耐震壁の破壊形式・抵抗機構に及ぼす影響を検討した。

キーワード：耐震診断, 回転壁, 杭, 引抜き抵抗, 節点振分法, 仮想仕事法, 増分解析

1. はじめに

兵庫県南部地震から10年が経過し、最近では、東海・東南海・南海地震や都市直下型地震の被害想定も盛んに行われている。地震防災対策の一つとして耐震診断が挙げられるが、RC建物の耐震診断の多くは、日本建築防災協会による「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」¹⁾に基づいて行われている。

筆者らは、既報^{2),3)}において、耐震壁を含むRC建物について、材料構成や壁配置等の各種要因をパラメトリックに変化させ、2次診断と3次診断の水平耐力（強度指標C）、靱性（靱性指標F）、およびこれらを総合した評価指標である保有性能基本指標（ E_0 ）などが、どのように異なるかを示した。特に、既報^{4),5)}では、3次診断において、連層耐震壁の破壊形式が回転（回転壁）となる場合の抵抗機構について、詳細に検討を行った。

壁の回転抵抗要素としては、常時鉛直荷重による柱軸力、境界梁・直交梁の抵抗力、基礎の重量が挙げられる。杭の引抜き抵抗も壁回転の抵抗要素になると考えられるが、引抜き抵抗力の評価には不明な点も多い。加藤ら⁶⁾は、3次

診断に杭の引抜き抵抗を考慮するか否かで、兵庫県南部地震の実被害と3次診断での耐震壁の破壊形式とが異なることを指摘している。すなわち、壁の回転抵抗として杭の引抜き耐力を考慮したところ、実被害通りのせん断破壊に移行したと報告している。

本論文では、杭径・杭長・地盤構成が杭の引抜き耐力に及ぼす影響を調べる。さらに、3次診断の「節点振分法+仮想仕事法」（以降、略算法と略記）および変形増分解析による耐震診断事例を通して、杭の引抜き抵抗力が連層壁の破壊形式・抵抗機構に及ぼす影響を検討する。

2. 杭の引抜き抵抗力に関する考察

2.1 杭の概要

杭は、昭和53年に宮城沖地震で杭頭部の破壊、杭のひび割れ等の被害が生じて以来、杭頭に水平力が加わるものとして設計されている。一般に、昭和56年以前の耐震診断対象建物は、「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」⁷⁾が刊行される以前に設計されているため、杭の引抜き抵抗力を考慮することができない。しかし、調査等で地震時に杭頭に著しい被害が生じないと

*1 三重大学 工学部建築学科講師 博士（工学）（正会員）

*2 三重大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻

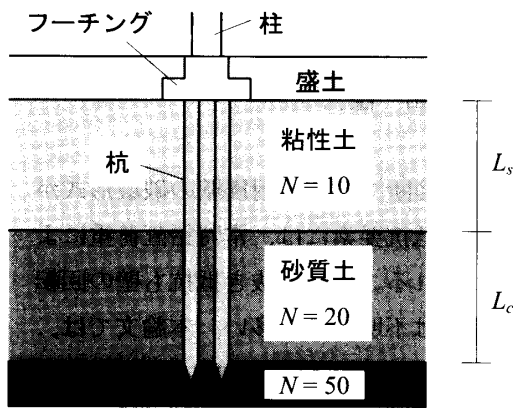


図-1 地盤構成

判断できる場合は、上部構造と杭頭が一体となっていると見なし、耐震診断時に壁の回転に対する抵抗要因として算入することができる⁶⁾。そこで本節では、杭単体に着目し、杭の引抜き耐力に及ぼす各種の要因について考察する。

2.2 杭の引抜き耐力

図-1に示すように、砂質土層と粘性土層の2層から成る地盤に杭が設置されている場合を考える。杭の引抜き耐力が「建築基礎構造設計指針」⁸⁾中の残留引抜き抵抗力に相当すると仮定し、杭1本当たりの引抜き耐力 R_u を次式によって与える。

$$R_u = \frac{1}{1.2}(\tau_s L_s + \tau_c L_c)\phi + W \quad (1)$$

ここに、 L_s, L_c はそれぞれ砂質土層、粘性土層における杭長(m)、 ϕ は杭の周長(m)、 W は杭重量を表す。 τ_s, τ_c はそれぞれ砂質土層、粘性土層における杭の引抜き時の最大周面摩擦力度(kN/m²)

表-1 杭基礎に関する要因と水準

要因	水準
杭径(mm)	200, 300, 400
杭長 ($L_s + L_c$) (m)	10, 20, 40
地盤構成 ($L_s : L_c$)	7 : 3, 1 : 1, 3 : 7

(注) 径 200 mm の杭の重量については、既製杭の重量から推定した値を用いる。

を表し、 N 値から以下のように算定される⁸⁾。

$$\tau_s = \frac{2}{3} \cdot 2.5N = \frac{5}{3}N \quad (2)$$

$$\tau_c = 0.8C_u = 0.8 \cdot \frac{12.5N}{2} = 5N \quad (3)$$

ここに、 C_u は粘性土層の非排水せん断強さ(kN/m²)を表す。なお本研究では、地下水および群杭効果は考慮しないものとする。

2.3 杭の引抜き耐力の事例解析

杭の引抜き耐力に及ぼす各要因の影響を調べるため、杭径・杭長・地盤構成を変えて事例解析を行う。

表-1に杭基礎に関する要因と水準を示す。杭の基本形は、一般的な3階建ての学校建築にみられるものとして、杭径 300 mm、杭長 20 mを設定し、地盤構成は 1:1 とした。基本形として設定した水準には表中にアンダーラインを付した。杭には既製の PC 杭を用いるものとして、式(1)から算定された引抜き耐力を図-2に示す。基本形の杭の引抜き抵抗力は 713 kN である。

式(1)からも分かる通り、杭の引抜き耐力は各

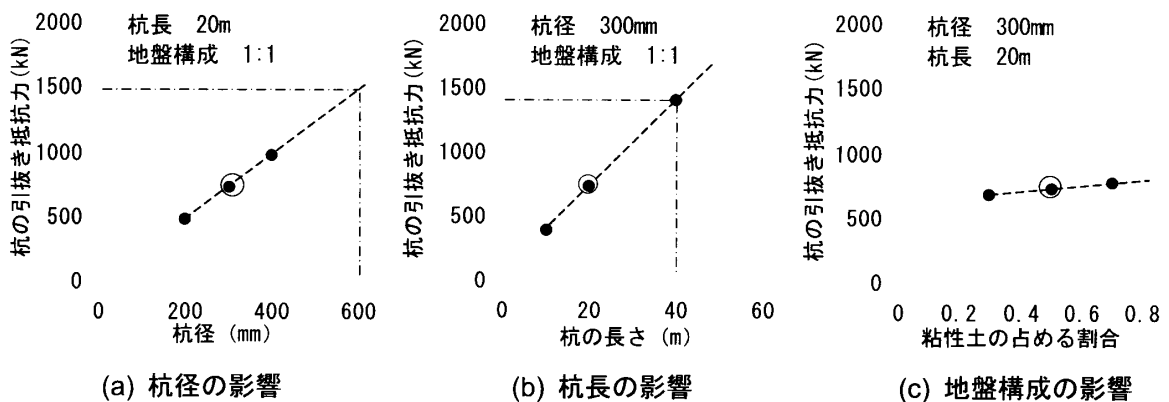


図-2 杭の引抜き耐力に及ぼす各要因の影響 (●が基本形)

要因に関して線形的に変化するが、杭の引抜き耐力に及ぼす各要因の影響について、以下の点が指摘される。

- ・ 引抜き耐力に及ぼす地盤構成の影響は比較的小さい。
- ・ 杭径と杭長の影響はほぼ等しい。例えば、杭径のみを2倍したときの耐力と、杭長のみを2倍したときの耐力は、いずれもほぼ1500kNとなっている（図中、一点鎖線）。

3. 杭を考慮した連層耐震壁の強度算定

3.1 耐震診断方法

連層耐震壁の強度に及ぼす杭の引抜き抵抗力の影響を調べるため、3次診断の略算法および変形増分解析により建物の耐震診断を行う。耐震診断方法は文献¹⁾の3次診断に準じる。なお、耐震診断および変形増分解析には、文献⁹⁾の診断プログラムを用いた。

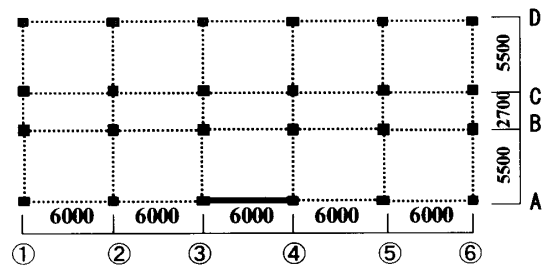
3.2 対象建物の概要

建物概要を図-3に示す。対象とする建物は、5×3スパンの鉄筋コンクリート造3階建てであり、A通り構面3-4間に配置された3層の連層耐震壁を検討対象とする。柱・梁・耐震壁の寸法、材料強度および鉄筋量等は文献¹⁰⁾の例題の建物と同じ値を用いることとし、その一部を表-2に示す。詳細は文献¹⁰⁾を参照されたい。

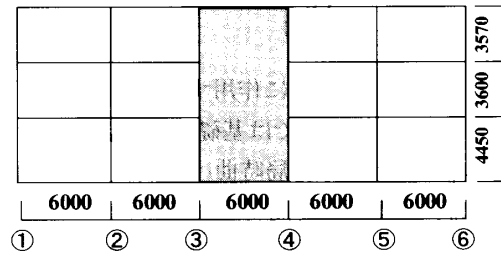
3.3 解析上の仮定

略算法および変形増分解析にあたり、以下に示す事項を仮定する。

- 略算法では、骨組に節点振分法を、耐震壁に等分布外力を仮定した仮想仕事法を用いる。
- 変形増分解析では、一様な層間変形角となるような変形分布を仮定する。
- 地震力の加力方向は、左加力とする。
- 杭の圧縮耐力は無量大とする。
- 連層耐震壁の回転抵抗要素として直交梁のせん断力も算入する。直交梁は終局に達していないものとし、そのせん断力を全断面積に対し0.5 N/mm²とする。
- 杭の引抜き抵抗力（耐力）は、鉛直荷重とし



(a) 伏図（ — は壁の配置位置）



(b) 軸組図(A通り)

図-3 建物形状

表-2 材料強度, 部材寸法, 配筋

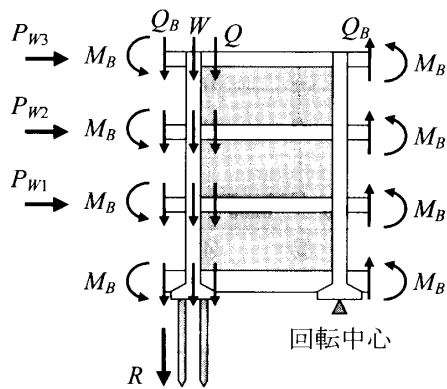
コンクリート強度	14.7 N/mm ²	
鉄筋種類	SR235	
単位面積当たり床荷重	11.8 kN/m ²	
柱 ^(注1)	寸法 (D×D)	55×55 cm
	主筋径 (主筋比)	φ19 (1.3%)
	h ₀ /D ^(注2)	6.3
梁 ^(注1)	寸法 (B×D)	30×65 cm
	主筋径 (主筋比)	φ19 (1.3%)
壁	壁厚	20 cm
	壁筋径	φ9
	壁筋間隔	20 cm (ダブル)
基礎重量	A,D フレーム	113.8 kN
	B,C フレーム	158.8 kN
最外縁からの鉄筋重心位置	柱・梁	5 cm
	基礎梁	7 cm

(注1) 1階の柱および2階床の梁における数値

(注2) 腰壁・たれ壁がないため h₀/D=6.3 となる。なお、h₀ は柱クリア高さを表す。

て基礎に作用させる。

図-3に示す建物から連層耐震壁周辺だけ切り出した図（自由体図）を図-4に示す。壁回



P_{wi} : 各層耐震壁に作用する地震力
 W : 床荷重(1階では基礎重量を含む)
 M_B : 境界梁の終局時曲げモーメント
 Q_B : 境界梁の終局時せん断力
 (Q_{su} と Q_{mu} の値の小さい方を採用)
 Q : 直交梁のせん断力
 R : 杭の引抜き抵抗力

図-4 連層耐震壁に作用する力

転の抵抗要素として、床荷重(柱軸力)、境界梁・直交梁のせん断力、基礎の重量および杭の引抜き抵抗力を算入する。また、杭の引抜き抵抗力 R は、杭と基礎との定着状況を考慮して、次の3通りを考える。

(a) 定着なし(杭の引抜き抵抗無視)

$$R = 0 \tag{4}$$

(b) 杭頭部鉄筋が引張降伏

$$R = \sigma_{sy} A_s \tag{5}$$

(c) 基礎と杭頭が完全定着(保有耐力接合)

$$R = \frac{1}{1.2} (\tau_s L_s + \tau_c L_c) \phi + W \tag{6}$$

ここに、 σ_{sy} は杭頭部鉄筋の引張降伏応力度、 A_s は杭頭部鉄筋の断面積を表す。

3.4 略算法による強度算定結果と考察

ここでは、連層耐震壁の第1層の強度(ΣP_{wi})に着目する。図-5(a)~(c)に、壁強度に対する各抵抗要素の寄与率を示す。数値は、基本形の杭を用いたときの略算法による結果である(表中の網掛けした数値は耐震壁の強度の値を表す)。なお、2次診断における第1層の壁強度は、せん断強度 2950 kN、曲げ強度 2256 kN となり、曲げ壁となった。

図-5(a)に示すように、杭の引抜き抵抗力を無視した場合($R=0$)、せん断強度 2950 kN、曲げ強度 2154 kN、回転強度 1117 kN となり、破壊形式は回転壁となった。曲げ強度が2次診断と3次診断で異なるのは、2次診断では、連層壁

円全体の面積は2次診断での壁の水平耐力(せん断または曲げ破壊時)を表す。「不足」を除く部分が3次診断での壁の水平耐力を表す。

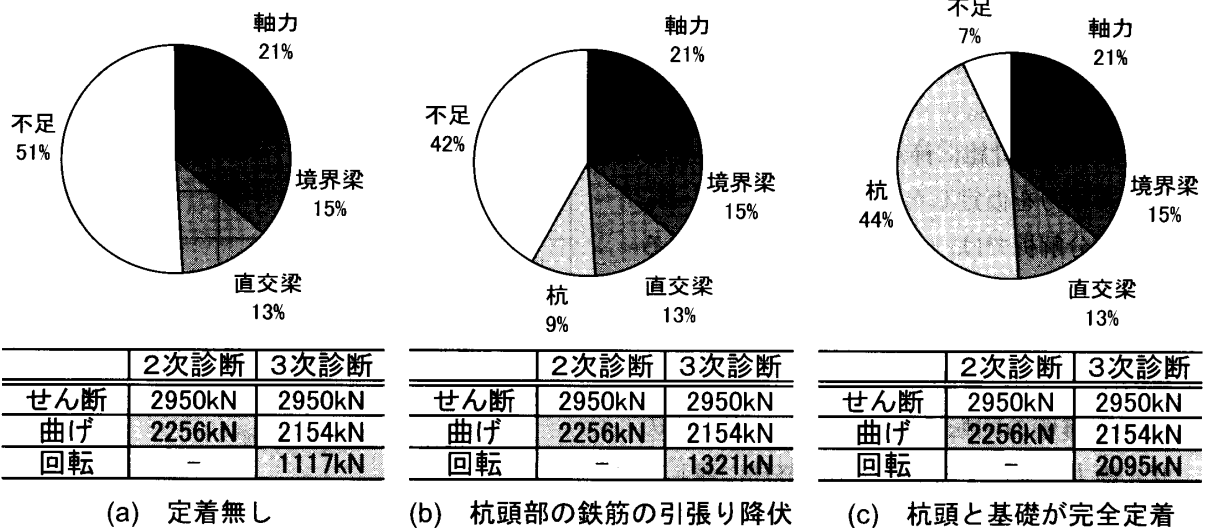


図-5 壁強度(ΣP_{wi})に対する壁回転抵抗要素の寄与率
 (略算法による結果。基礎重量は、軸力を含む。杭は基本形)

高さの半分を反曲点高さとして仮定して、境界梁等による曲げ戻しを考慮しているのに対して、3次診断では境界梁等の強度を精算して、境界梁等を考慮した曲げ強度を求めているためである。

杭の引抜き抵抗力を考慮すると図-5(b), (c)のようになる。図-5(b)は、杭の引抜き抵抗力が杭頭部の鉄筋の引張り降伏で決まる場合を示しており、回転耐力は(a)のときの数値の約1.2倍となった。なお、杭頭部の鉄筋はD13が4本で、 $\sigma_{sy} = 300 \text{ N/mm}^2$, $A_s = 5.08 \text{ cm}^2$ と仮定している。図-5(c)は、基礎と杭頭が完全定着（保有耐力接合）している場合を示しており、回転耐力は(a)のときの1.9倍となっている。

いずれの結果でも、回転耐力は曲げ耐力を下回っており、3次診断時の耐震壁の破壊形式は回転で決まった。しかし、耐震壁の回転抵抗として、杭の引抜き抵抗力の影響は大きいことが分かる。なお、杭の定着の状況については、現地調査等を綿密に行った上で総合的に判断する必要がある。

3.5 略算法と変形増分法との比較

図-6に、略算法および変形増分法によって求めた壁の水平耐力（強度）と杭の引抜き耐力との関係を示す。この図では、略算法と変形増分法との間には、あまり大きな数値的差異は見られない。例えば、杭の引抜き耐力を考慮しない場合、変形増分法と略算法の耐震壁の強度はほぼ同じ値となり、破壊形式も共に回転となった。しかし、基礎と杭頭が完全定着している場合、略算法では回転強度が曲げ強度を下回り、耐震壁の破壊形式が回転となったのに対して、変形増分法では回転が曲げを上回ったために耐震壁の破壊形式は曲げとなった。このように、曲げ強度と回転強度が近接している場合、計算手法（略算法と変形増分法）あるいは杭の引抜き抵抗力を考慮するか否かによって、連層耐震壁の破壊形式が異なることがある。

回転壁を含む構面について、略算法と変形増分法の各手法によって得られた塑性ヒンジ発生箇所（図中○印）を図-7に示す。ここで、杭

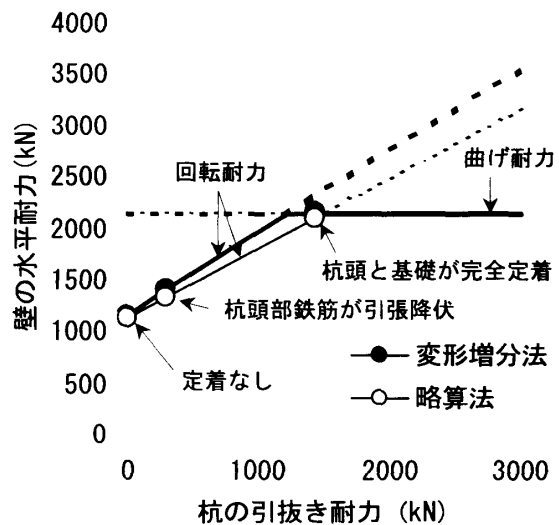


図-6 壁の水平耐力—杭の引抜き耐力関係

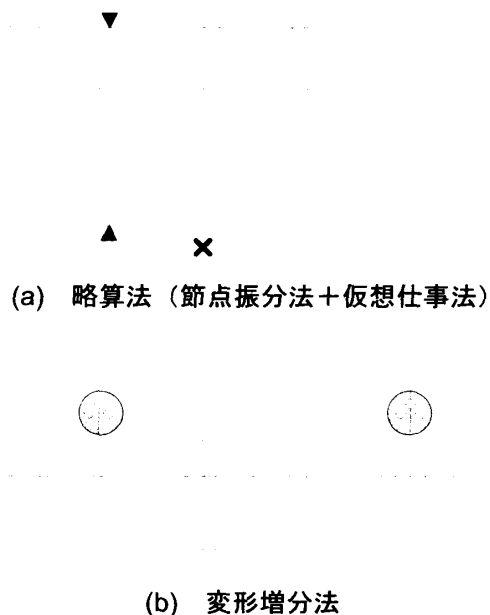


図-7 塑性ヒンジ発生箇所

頭と基礎は完全定着と仮定している。略算法の場合、図-7(a)の塑性ヒンジ発生箇所だけではまだ崩壊機構が形成されておらず、図中の▲印の部分に塑性ヒンジが必要である。一方、変形増分法では、図-7(b)中の灰色で囲まれた部分は塑性ヒンジ過多であり、過崩壊となっている。

極限解析の機構条件に基づく、崩壊機構は必要最小限の数の塑性ヒンジで形成されなければならない。したがって、この解析事例の場合、極限解析に基づく耐力に比べて、略算法では耐

力を過小評価し、一方、変形増分法では耐力をやや過大に評価していると考えられる。ただし、前述したように、両手法による壁の水平耐力に大きな差異はない。

3.6 杭径・杭長・地盤構成の壁強度への影響

耐震壁の水平耐力と杭の引抜き耐力との関係（図-6）、および杭の引抜き耐力と各要因との関係（図-2）を用いると、杭長・杭径・地盤構成が耐震壁の強度・破壊形式に及ぼす影響を知ることができる。特に杭径・杭長を変化させると壁の破壊形式は変化しやすい。例えば、杭長を20 mから40 mとした時、杭の引抜き抵抗力は大幅に増加するため、耐震壁の破壊形式が回転から曲げへ移行する。なお、杭の引抜き耐力には、地盤の周面摩擦力度 τ_s 、 τ_c などの不確定要因の影響も考えられるが、この点については、確率論の導入も含め、今後の検討課題である。

4. まとめ

本論文では、耐震3次診断の事例解析を通して、杭の引抜き抵抗力が連層耐震壁の強度・破壊形式に及ぼす影響を調べた。本論文で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) (1)式を用いて杭の引抜き耐力を評価する場合、引抜き耐力に及ぼす杭径・杭長の影響はほぼ等しいこと、地盤構成の影響は杭径・杭長に比べて小さいことを明らかにした。
- 2) 杭と基礎とが完全定着（保有耐力接合）している場合、耐震壁の回転を止める要因として杭の引抜き抵抗の影響は極めて大きい（図-5(c)）。また、杭頭部の鉄筋が降伏する場合でも、保有耐力接合より回転耐力に及ぼす寄与率は小さいが、境界梁・直交壁の効果次第では破壊形式が変わる可能性がある（図-5(b)）。したがって、耐震壁の回転耐力を正しく評価するには、調査等を行って、杭の引抜き抵抗力を正しく算入することが肝要である。
- 3) 境界梁・直交壁とともに杭の抵抗を考慮すると、3次診断における計算上の耐震壁の破壊形式は曲げになる可能性が高い。例えば、本

論文で取り扱った基本水準（径 ϕ 300 mm、長さ20 mの杭を各柱下で2本使用）程度の杭の引抜き抵抗が期待できるとすれば、耐震壁の破壊形式は曲げ壁になりやすい。

- 4) 本研究の解析対象建物では、略算法を用いた場合と変形増分法を用いた場合の耐震壁の耐力はほぼ等しい。しかし、曲げ強度と回転強度が近接している場合、計算手法（略算法と変形増分法）あるいは杭の引抜き抵抗力を考慮するか否かによって、連層耐震壁の破壊形式が異なることがある。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001年改訂版・既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001
- 2) 久保田謙三，加藤義幸，畑中重光：RC建物の耐震診断と耐震補強に関する基礎的研究—2次診断と3次診断の比較検討—，東海支部研究報告集，pp.325-328，2004.2
- 3) 福田浩史，畑中重光，高田豊文，小浜芳朗：学校建築物の耐震補強における耐震壁の配置計画に関する考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1357-1362，1999.7
- 4) 久保田謙三，畑中重光，加藤義幸：RC建物の耐震診断における耐震壁の回転条件に関する基礎的考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.1327-1332，2004.6
- 5) 畑中重光，加藤義幸，久保田謙三，小浜芳朗：RC建物の耐震診断における耐震壁の回転条件に関する基礎的考察，日本建築学会構造系論文集，第590号，2005（印刷中）
- 6) 加藤大介，南谷長俊：兵庫県南部地震における低層RC造建物の崩壊形の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.171-176，1997.6
- 7) 日本建築センター：地震力に対する建築物の基礎の設計指針，1984
- 8) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 9) (株)構造ソフト：BUILD.耐診 RC I&II / BUILD.耐診 RC III ver.4.16，2004
- 10) 日本建築防災協会：改訂版・既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準適用の手引，1990