

論文 二次壁損傷による耐力低下を考慮した RC 建造物の非線形時刻歴地震応答解析と耐力低下の影響

近藤 達也*1 高橋 典之*2

要旨: 鉄筋コンクリート造の二次壁を構造耐力として耐震設計に考慮する取り組みが進められている。本研究では、段階的耐力喪失解析で得られた骨格曲線を参考に、多質点系および一質点系モデルの漸増動的解析 IDA (Incremental Dynamic Analysis) を用いて二次壁の耐力低下が地震応答に与える影響について分析した。多質点系 IDA 解析での応答のばらつきは、耐力喪失到達地震動レベルに対し、耐力喪失部材発生階順で大きかった。一質点系 IDA 解析ではそれより小さな地震動レベルから応答のばらつきが現れはじめた。

キーワード: 段階的耐力喪失解析, IDA, 耐力低下, 地震応答

1. はじめに

鉄筋コンクリート建造物における袖壁、腰壁、垂壁といった二次壁を積極的に構造設計に反映させる研究開発が幅広く進められており^{例え 1)}、二次壁の耐力低下を考慮した Pushover 解析手法の提案²⁾もなされるようになってきた。二次壁や非構造壁を考慮した建物の耐震性能評価にあたっては、中小地震で水平力をいくらか負担していた壁部材の部分的な破壊によって耐力低下を伴う建造物の復元力特性が地震応答に与える影響がどのようなものかを把握することが重要になる。

本論文では、二次壁を有する鉄筋コンクリート造建造物を対象に段階的耐力喪失解析²⁾を行い、得られた結果から質点系モデルへの置換を行い、耐力劣化を考慮した tri-linear 履歴則を用いた多質点系モデルおよび一質点系モデルの非線形時刻歴地震応答解析を通し、耐力劣化が地震応答にどのような影響を与えるのかを調べる。その際、入力地震動強さを漸増させながら非線形時刻歴地震応答解析を行う漸増動的解析 IDA (Incremental Dynamic Analysis)³⁾を用いた考察を行う。

2. 段階的耐力喪失解析

2.1 段階的耐力喪失解析の手順

本論文では、文献 2) を参考に段階的耐力喪失解析を行った。段階的耐力喪失解析は、Pushover 解析時に破壊規準 (部材の限界状態) に到達した耐力喪失部材が発生した場合に、そこで一旦解析を終了し、当該部材を両端ピンとして変形・応力を初期状態に戻し、再度 Pushover 解析を実施しなおすもので、また耐力喪失部材が生じたら同様の対応をとって解析を繰り返す。耐力喪失部材の判定条件は以下の条件を満たすものとした。

- ・部材の負担せん断力がせん断耐力に達していること。
- ・部材せん断歪みが耐力喪失想定せん断歪みを上回って

いること。

具体的には、耐力喪失部材が発生する解析ステップで、負担せん断力がせん断耐力を上回る部材、かつ、せん断歪みが耐力喪失時のせん断歪みに対し 95%以上になっている部材に対し、前述の処理に基づいて計算を行った。なお軸力は、既往の研究でも指摘されているように²⁾、実際には耐力喪失後完全に保持することはできないと考えられるが、部材を完全に除去すると長期応力の分担が変わってしまい再解析前後の結果の連携が煩雑となるため、両端ピン部材でモーメントは負担しないものの軸力は保持できるものと仮定して解析を進めることにした。段階的耐力喪失解析の概要を図-1 に示す。

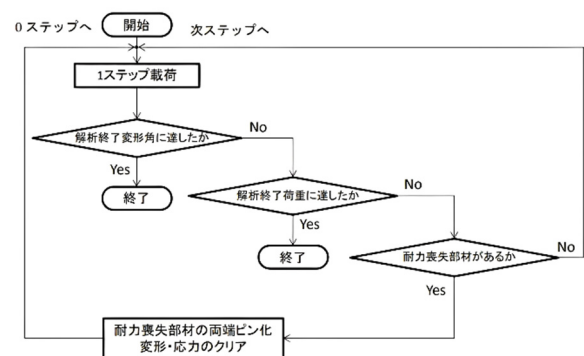


図-1 段階的耐力喪失解析の概要²⁾

2.2 検討対象架構

検討対象架構は、田尻ら⁴⁾が実施した水平加力実験で用いられた RC 造 6 階建て共同住宅を想定した部分架構 (桁方向の廊下側構面 2 層半、外柱とそれらをつなぐ梁からなる 1 スパンを想定した試験体) を参考にしつつ、後述する IDA 解析で質点系モデルに置換することを踏まえ、3 層 1 スパンの図-2 に示すような解析モデルを検討対象架構とした。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

ここで、 a_t : 梁引張側主筋断面積(mm^2)、 a_t' : 引張側壁横筋断面積(mm^2)、 σ_y : 梁引張側主筋降伏強度(N/mm^2)、 σ_y' : 引張側壁横筋降伏強度(N/mm^2)、 F_c : コンクリート圧縮強度(N/mm^2)、 t : 圧縮側壁厚、圧縮側に壁がない場合梁幅(mm)、 d_e : 引張鉄筋群の重心から圧縮縁までの距離(mm)、 $c\varepsilon_B$: コンクリート圧縮強度時歪み、 $s\varepsilon_y$: 梁主筋の降伏時歪みである。

- d) 柱、方立壁、袖壁、大梁のせん断耐力式は文献 7) による荒川 min 式および文献 8) によるせん断終局強度式を用いた。せん断ばねの復元力特性は終局強度で折れ点を有するバイリニア型とし、せん断ひび割れは考慮しないものとした。

2.4 解析条件

本論文では耐力喪失部材は方立壁と袖壁のみとし、柱や大梁は耐力喪失せず、せん断耐力に達したあとは初期剛性の 1/1000 の剛性を持ち、耐力は維持するものと仮定した。本論文では文献 9) と文献 10) を参考に、方立壁部材角が 1/150rad、袖壁部材角が 1/50rad のときのせん断歪みを 2.1 節の耐力喪失想定歪みとして計算を行った。

2.5 解析結果

段階的耐力喪失解析結果を図-7 に示す。縦軸にベースシア、横軸に頂部変位を取った。図-8 には文献 4) の実験結果(部分架構の水平力-全体変形角関係)を示す。参考にした実験試験体は 2.5 層の反曲点位置で切り出した部分架構であるが、本論文の解析対象架構は 3 層架構を想定しており 1 割ほど実験試験体よりせん断力が大きくなった。文献 4) の実験結果では、最大耐力は耐力喪失後(二次壁耐力を除く)架構耐力の約 2 倍あったが、解析では約 1.5 倍となった(最大耐力=916kN、耐力喪失後架構耐力=590kN)。解析では壁の耐力喪失は見込むものの、柱や梁自体の耐力低下を考慮していないこと等が影響したと考えられる。ここで、図-9 に解析時の耐力喪失部材の発生順を示す。部材別には方立壁、袖壁の順で、発生階については 2 階、3 階、1 階の順で、耐力喪失が発生した。これは 2.2 節で参考にした実験における試験体の耐力喪失発生順序と破壊過程が概ね一致しており、本解析により耐力喪失過程を追跡できたものと判断した。

3. IDA による耐力低下が地震応答に与える影響

3.1 IDA の解析モデル

前章で段階的耐力喪失解析を行った架構の荷重-変形関係を参考に、質点系せん断ばねモデルを用いた IDA を行う。質点系モデルの共通設定条件として、各層階高 $h_o=3.0\text{m}$ 、各層重量 $W_i=1000\text{kN}$ 、内部減衰定数は瞬間剛性比例型の 0.05 とした。耐力低下を有する復元力特性を評

E : ヤング率, σ_y : 降伏強度, $v\sigma_y$: ひび割れ強度, α : 剛性低下率

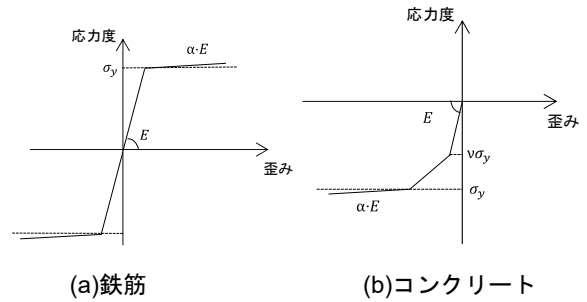


図-5 ファイバー要素の材料構成則

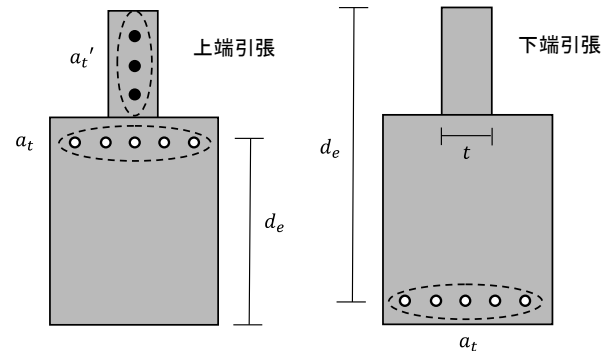


図-6 大梁の曲げ耐力計算で考慮した断面

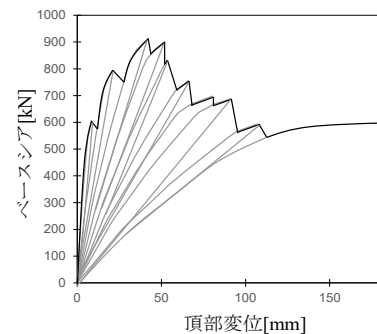


図-7 耐力喪失解析のベースシア-頂部変位

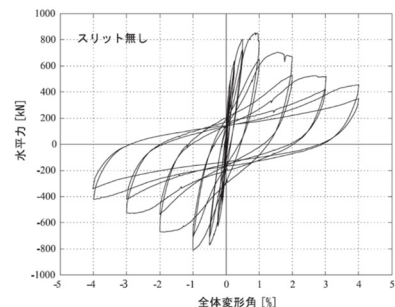


図-8 実験部分架構の水平力-全体変位関係⁴⁾

価するため積分時間刻みは 0.001 秒とし、数値積分に Newmark- β 法を用いた。質点系の骨格曲線は Takeda-slip 型¹¹⁾(図-10)の履歴特性を修正し、第一折れ点で壁部材が最大耐力を迎え、第二折れ点で耐力低下後の壁以外のフレームが水平耐力を負担する復元力特性を示すものとした(図-11)。第二折れ点変形角は、前章の段階的

耐力喪失解析結果（図－7）を参考に（架構頂部高さ4500mm 位置での第二折れ点変位が約 130mm より）簡単のため各層で $R_{yi} = 1/33\text{rad}$ とした。耐力低下のある trilinear-slip 型の履歴特性の定め方は筆者らが既に提案したもの¹²⁾であるが、その概略を以下に簡単に説明する。

耐力低下を考慮した trilinear-slip モデルは、Takeda-slip モデル⁸⁾における「ひび割れ点強度」すなわち「第一折れ点強度」を、「降伏点強度」すなわち「第二折れ点強度」よりも高く設定したもので、「第一折れ点」から「第二折れ点」に向かう負勾配発生による指向点の不具合が生じないよう修正したものである。具体的には、trilinear-slip モデルにおける剛性設定を Takeda-slip モデルに倣い以下のように定めている。

$$K_u = \frac{Q_{max}}{X_{max}} \quad (2)$$

$$K_s = \left| \frac{Q_{max}}{X_{max} - X_0} \right| \cdot \left| \frac{X_{max}}{X_Y} \right|^{-\alpha} \quad (3)$$

$$K_d = \frac{Q_{wc} + Q_Y}{X_C + X_Y} \cdot \left| \frac{X_Y}{X_{max}} \right|^{\beta} \quad (4)$$

ここに、 K_u ：経験最大点指向剛性、 K_s ：スリップ時剛性、 K_d ：スリップ後剛性、 Q_{max} ：経験最大せん断力、 X_{max} ：経験変位、 X_0 ：除荷後変位、 Q_{wc} ：先行損傷部材破壊時耐力（第一折れ点最大耐力）、 Q_Y ：第二折れ点せん断耐力、 X_C ：壁破壊（第一折れ点）変位（ $0.3X_Y$ ）、 X_Y ：第二折れ点変位、指数 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.45$ である。第一折れ点最大耐力 Q_{wc} は、第二折れ点せん断耐力 Q_Y に対して 1.5 倍とし、第二折れ点せん断耐力 Q_Y は式（5）より求めた。

$$Q_Y = C_{yi} \cdot \Sigma W_i \quad (5)$$

$$\text{但し, } C_{yi} = Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

$$Z = R_t = 1$$

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \cdot \frac{2T}{1 + 3T}$$

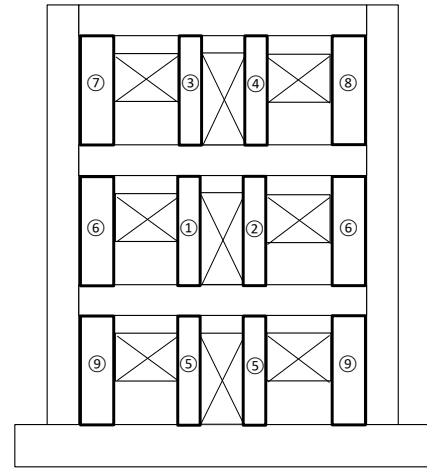
$$\alpha_1 = 1, \quad \alpha_i = \frac{\Sigma W_i - W_i}{\Sigma W_i}$$

ここで、 $T=0.02H$ で H は建物高さとし、 $C_0=0.4$ とした。一質点系への縮約は、各層階高 h_o および質量 m_o が一定で一次固有振動モードとして逆三角形分布を仮定すれば、等価高さ H_e および等価質量 M_e がそれぞれ、

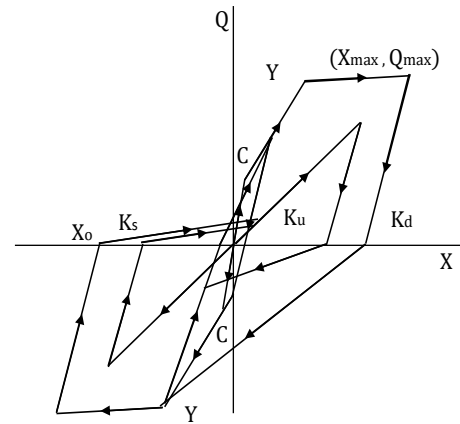
$$H_e = \frac{2N+1}{3N} \cdot H = \frac{2N+1}{3} \cdot h_o \quad (6)$$

$$M_e = \frac{1.5(N+1)}{(2N+1)} \cdot M = \frac{1.5N \cdot (N+1)}{(2N+1)} \cdot m_o \quad (7)$$

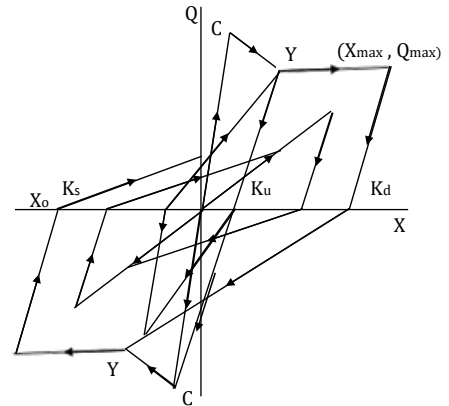
で与えられる。ここで、 N は建物層数である。このとき、降伏せん断耐力 Q_Y は式(8)で、第二折れ点変位は等価高さ



図－9 耐力喪失部材の耐力喪失発生順序



図－10 Takeda-slip モデル



図－11 耐力低下を考慮した trilinear-slip モデル

と第二折れ点変形角の積で式(9)より求められる。なお、 g は重力加速度とする。

$$Q_Y = C_y \cdot M_e \cdot g \quad (8)$$

$$X_Y = H_e \cdot R_y \quad (9)$$

3.2 入力地震動データセットの作成

IDAに用いる入力地震動データセットとして、文献13)、14)を参考に、40の強震動観測データからデータセットを作成した。なお本論文では図-12に示すように、建物一次固有周期（ここでは $T_1=0.4\text{s}$ ）での加速度応答スペクトル $Sa(T_1)$ を用いて入力地震動強さを規準化した。すなわち、IDAで用いる入力地震動強さは以下のように表される。

$$a_{SF} = \lambda \cdot a \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{Sa(T_1)}{Sa(T_1)'}, \quad (11)$$

ここで、 a_{SF} ：計算に用いる入力地震動（時刻歴波形）， a ：用意した模擬地震動の入力地震動（時刻歴波形）， λ ：倍率， $Sa(T_1)'$ ：用意した模擬地震動の初期状態での $Sa(T_1)$ 値， T_1 ：本論文では 0.4s ， $Sa(T_1)$ ：IDAで用いる入力地震動強さで本論文では $0\sim1200$ （gal）まで 10 （gal）刻みで地震動強さを漸増させた。

3.3 IDA解析結果

図-13～図-15に多質点系モデルを用いたIDA解析の各層の応答評価結果を（図-13が3層，図-14が2層，図-15が1層の応答），図-16に各層の標準偏差を示した。また，図-17に一質点系モデルを用いたIDA応答評価結果を示す。各図とも，縦軸に $Sa(T_1)$ ，横軸に最大応答塑性率を取った。但しここで言う「塑性率」は，第二折れ点変位の塑性率を1とし，第二折れ点変位に対する応答変位の比率を「塑性率」と便宜上定義している。

図-13～図-15より，各層地震応答の大きい順は1層>2層>3層の順となった。次に図-16より各地震動データセットごとのばらつきを見てみると，変形角の大きい1層で最大応答塑性率が1を超える $Sa(T_1)=900\text{gal}$ あたり（すなわち耐力低下が開始する領域）では，2階，3階，1階の順で地震動による応答のばらつきが大きくなる傾向が見られた。これは段階的耐力喪失解析における耐力喪失部材の発生階の順番（2階，3階，1階の順）と一致していた。IDA解析は静的漸増载荷ではないため，耐力喪失部材発生順をつぶさに追うものではないが，耐力喪失部材が早期に発生する層では， $(Sa(T_1))$ の大きさに基準化した地震動における $Sa(T_1)$ 以外の異なる地震動特性によって地震応答のばらつきが大きくなる傾向にあることが示された。

図-17に示す一質点系モデルの応答は，耐力低下以降 $Sa(T_1)$ が増大すると $(Sa(T_1))$ が 500gal を超えたあたりから急激に地震動セットごと応答のばらつきが大きくなる傾向が見られた。これは，多質点系モデルでは各層の復元力特性における耐力低下の影響の発現に差が

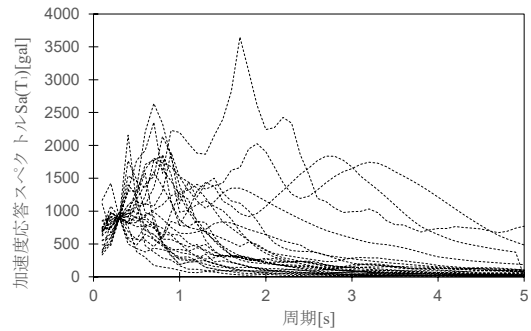


図-12 $Sa(T_1)=900[\text{gal}]$ で規準化した場合の加速度スペクトル群の例

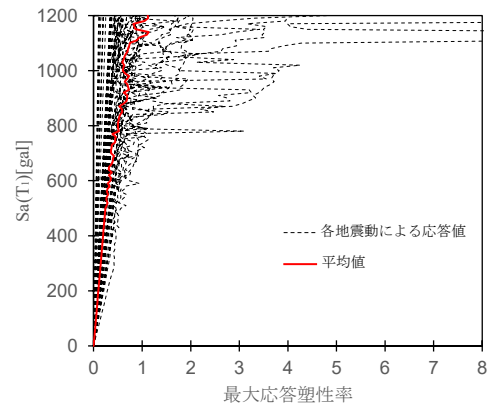


図-13 IDA解析結果（3層の応答）

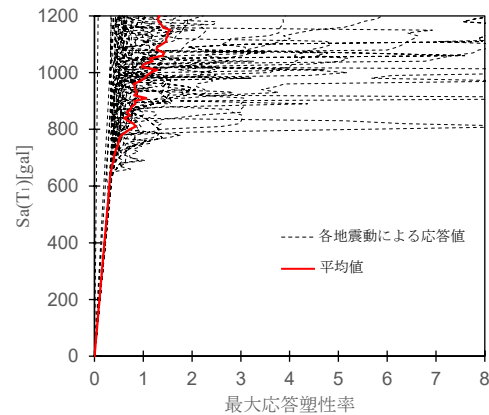


図-14 IDA解析結果（2層の応答）

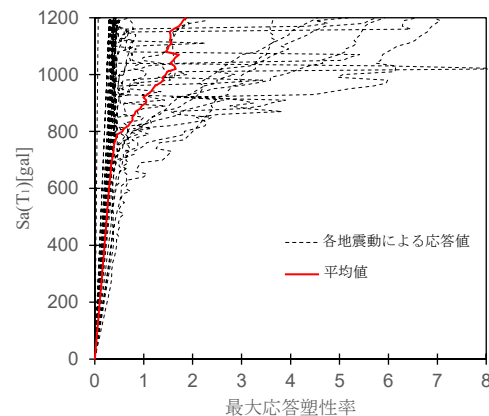


図-15 IDA解析結果（1層の応答）

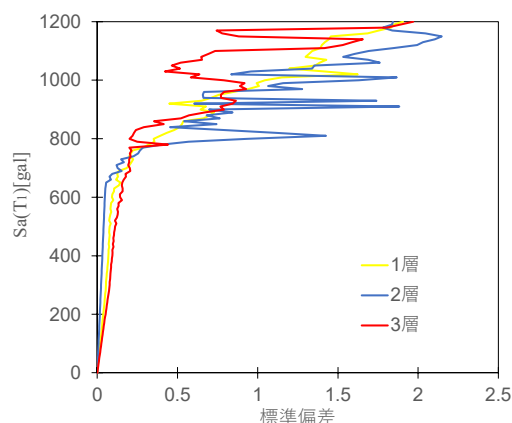


図-16 各地震動に対する各層応答塑性率の標準偏差

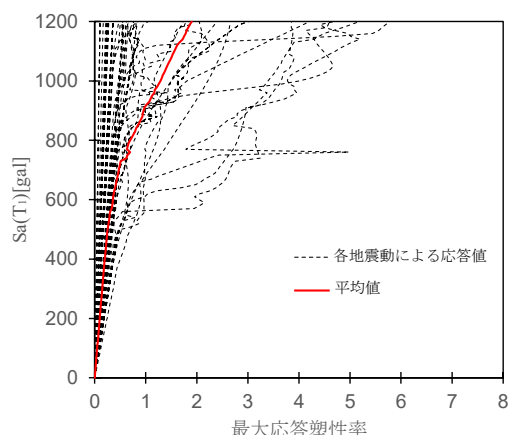


図-17 IDA 解析結果（一質点系の応答）

あり（そのため各層の応答のばらつきが段階的耐力喪失解析における耐力喪失部材発生の早い順に大きい傾向が現れたのだが）結果として架構全体で見たときに応答のばらつきが均されたのに対し、一質点系では地震波形（位相特性やパルスの性状など）の違いが耐力低下に至らしめる地震動の大小に強く影響し、比較的小さい地震動レベルからばらつきが現れはじめたと考えられる。

4. まとめ

段階的耐力喪失解析、および、これを踏まえた耐力低下を考慮する履歴モデルによる IDA 解析を行った。多質点系 IDA 解析の応答のばらつきは、1 層の応答が耐力喪失を迎える地震動レベルにおいて、段階的耐力喪失解析における耐力喪失部材発生階順（2 階、3 階、1 階の順）で大きくなった。また、一質点系 IDA 解析では（地震動データセット内の）地震波形の違いが耐力低下に至らしめる地震動の大小に影響し、比較的小さい地震動レベルから応答のばらつきが現れはじめたと考えられる。

今後、段階的耐力喪失解析に等価線形化法を適用した応答推定と、IDA 解析による非線形時刻歴応答との比較検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 今阪剛, 中村聡宏, 勅使川原正臣: 鉄筋コンクリート造二次壁付き架構の耐力と復元力特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.289-294, 2014.7
- 2) 鈴木壮, 梁川幸盛, 北嶋圭二, 松井智哉, 稲井栄一: 段階的耐力喪失解析による既存 RC 系建物の二次壁評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.23, No.55, pp.845-849, 2017.10
- 3) Dimitrios Vamvatsikos, C. Allin Cornell: Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 31(3), pp.491-514, Mar. 2002
- 4) 田尻清太郎, 加藤博人, 壁谷澤寿一, 諏訪田晴彦, 谷昌典, 福山洋: RC 造雑壁付き部分架構の水平加力実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.29-30, 2013.8
- 5) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰り返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.536, pp.135-142, 2000.10
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所他監修: 2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2020.11
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所他監修: 2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 全国官報販売協同組合, 2007.8
- 8) 日本建築防災協会: 2009 年改訂既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2009.12
- 9) 小塩友斗, 真田靖士, 金裕錫: 主体架構と一体の RC 造方立壁の構造性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 713 号, pp.1145-1153, 2015.7
- 10) 中村聡宏, 勅使川原正巨, 井上芳生, 太田勤: 鉄筋コンクリート造両側壁補強柱のせん断終局強度評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp.619-627, 2011.3
- 11) 江戸宏彰, 武田壽一: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1877-1878, 1977.10
- 12) 片貝勇介, 高橋典之: 歴史的建造物の経済性能評価における復元力特性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1231-1236, 2020.7
- 13) 防災科学技術研究所: K-NET 強震観測網, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2022.12.19 閲覧)
- 14) 国土交通省 気象庁: 強震観測データ, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2022.12.19 閲覧)