

論文 耐力低下の伴う既存中層 SRC 造建築物の最大瞬間入力エネルギーと地震時最大応答変位の関係

藤井 賢志*1

要旨：本論文では、部材のせん断破壊による耐力低下の伴う既存 SRC 造 7 層建築物を対象として、最大瞬間入力エネルギーと地震時最大応答変位の関係を検討した。時刻歴応答解析の結果、耐力低下の伴う建築物に生じる最大応答変位は、最大瞬間入力エネルギーの量のみならず、その入力以前での顕著な耐力低下の発生有無に大きく影響されることがわかった。加えて、最大瞬間入力エネルギーと最大応答変位の関係は、耐力低下の有無で分類することで、本論文で定式化した関係で概ね捉えられることがわかった。

キーワード：既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物，瞬間入力エネルギー，地震応答評価，経時特性

1. はじめに

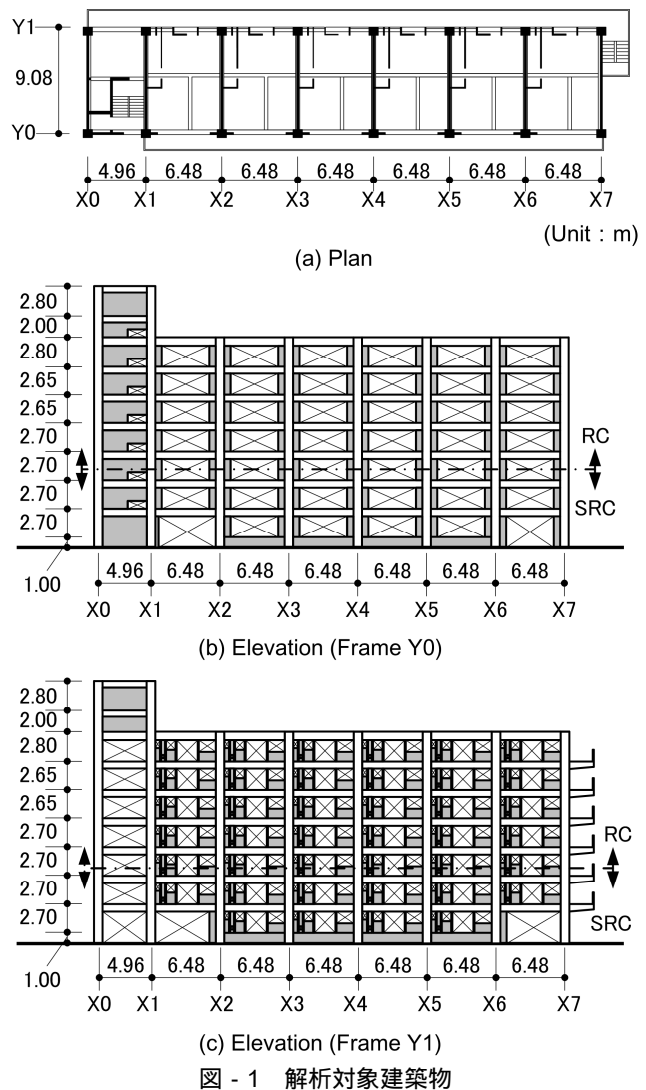
近年，既存建築物の耐震性能評価において，新築建築物と同様，想定される地震動に対する対象建築物の地震応答を陽な形で評価できる方法が必要とされている。このための方法として，筆者は文献 1)~3)において，せん断破壊により変形能力の乏しい挙動をする部材（せん断破壊型部材）と曲げ破壊により変形能力の高い挙動をする部材（曲げ破壊型部材）の混在した 7 層鉄骨鉄筋コンクリート（以下 SRC 造と表記）建築物を対象として，静的非線形解析を用いて等価線形化法に基づく最大応答推定手法を示しその推定精度を検証した。その結果，等価線形化法による最大応答変位の推定値は，継続時間の長い模擬地震動に対する時刻歴応答解析結果とは良好に対応するものの，継続時間の短い模擬地震動に関しては過大な値となった。このことから，耐力低下の伴う建築物の最大応答推定精度を改善させるためには，地震動の経時特性を適切に反映させる必要があると考えられる。

本論文では，文献 4)で提唱されている「瞬間入力エネルギー」に着目して，文献 1)~3)で検討した 7 層 SRC 造建築物を対象に最大瞬間入力エネルギーと最大応答変位の関係を検討する。

2. 解析諸元

2.1 解析対象建築物 1)~3)

解析対象建築物は，1978 年度建設（団地管理年度）の地上 7 階建ての集合住宅である。図 - 1(a)に対象建築物の基準階平面図を，同図(b),(c)に桁行方向構面の軸組図を示す。構造形式は，1 ~ 2 層が充腹型の SRC 造，3 層以上が鉄筋コンクリート造(以下 RC 造と表記)である。文献 1)~3)で既に述べたように，対象建築物では 3 層以上において，せん断破壊型となる Y0 構面の耐震壁 X0X1，ならびに Y1 構面にある柱 X1 ~ X7 で耐力低下が生じる。解析モデルの詳細に関しては文献 2)を参照されたい。



2.2 入力地震動

本論文では，継続時間の短い地震動の例として 1995 年兵庫県南部地震において暮合で観測された記録，継続時間の長い地震動の例として翠川・三浦により再デジタル化された 1968 年十勝沖地震における八戸港湾の観測

*1 千葉工業大学 創造工学部建築学科 教授 博（工）（正会員）

記録⁵⁾の水平主軸成分を用いて作成した模擬地震動とする。以下では、文献3)と同様、同一の観測地震動より作成した1組の模擬地震動を「模擬地震動群」と称する。

以下に、本論文での模擬地震動の作成手順を記す。

手順1：観測地震動の加速度 $a_{g0}(t)$ をフーリエ変換し、式(1)における振幅 A_i 、位相 ϕ_i を求める。

$$a_{g0}(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (1)$$

ここで、 ω_i は i 番目の成分の円振動数である。

手順2：位相 ϕ_i を任意の定数 $\Delta\phi_0$ だけシフトさせ、模擬地震動での位相 ϕ_i^* を式(2)で定める。

$$\phi_i^* = \phi_i + \Delta\phi_0 \quad (2)$$

手順3：手順2で得られた位相 ϕ_i^* を用いて、フーリエ逆変換により模擬地震動 $a_{g0}^*(t)$ を求める。得られた $a_{g0}^*(t)$ は、振幅 A_i 、位相 ϕ_i^* を用いて式(3)で表される。

$$a_{g0}^*(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t - \phi_i^*) \quad (3)$$

手順4：手順3で得られた波形 $a_{g0}^*(t)$ に対する加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を計算し、各々の周期における目標応答スペクトルとの比を求める。

手順5：振幅 A_i を手順4で得られた比率に応じて修正し、再度フーリエ逆変換して新しい模擬地震動 $a_g^*(t)$ を作成する。以下、模擬地震動に対する応答スペクトルと目標応答スペクトルの差が許容値に収まるまで、手順4と手順5を繰り返す。

本論文では、告示で規定された極めて稀に生じる地震動（第1種地盤と第2種地盤）の設計用応答スペクトルに適合するように模擬地震動を作成した。ここで、位相のシフト分 $\Delta\phi_0$ は、0 から $11\pi/12$ まで $\pi/12$ 刻みで変化させて与えることとした。従って、元の観測地震動1波に対し目標応答スペクトル2種類×模擬地震動12波で24波、全体では48波を作成した。以下、第1種地盤の設計用応答スペクトルに適合させた模擬地震動群をそれぞれ Art-FK11, Art-HAC1 と表記する。同様に、第2種地盤の設計用応答スペクトルに適合させた模擬地震動群をそれぞれ Art-FK12, Art-HAC2 と表記する。

図-2と図-3に、作成した模擬地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数5%）を示す。なお、図-2は Art-FK11 と Art-HAC1、図-3は Art-FK12 と Art-HAC2 の加速度応答スペクトルである。同図より、作成した48波は目標応答スペクトルに概ね適合していることが確認できる。図-4に、作成した模擬地震動の波形の例を示す。

本研究では、模擬地震動群 Art-FK11 と Art-HAC1 に関しては入力倍率を0.75倍、0.90倍ならびに1.05倍とした。一方、模擬地震動群 Art-FK12 と Art-HAC2 に関しては入力倍率を0.50倍、0.60倍ならびに0.70倍とした。これは、Art-FK12 と Art-HAC2 の速度一定領域における速度応答

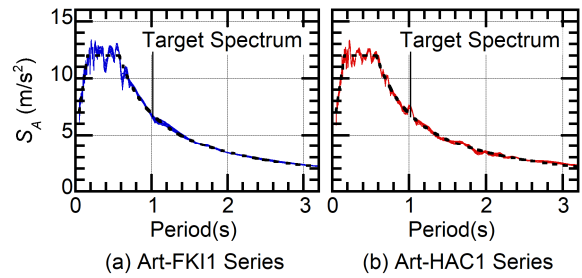


図-2 模擬地震動群の加速度応答スペクトル (Soil-1)

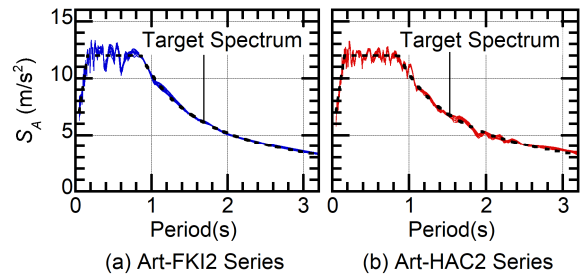


図-3 模擬地震動群の加速度応答スペクトル (Soil-2)

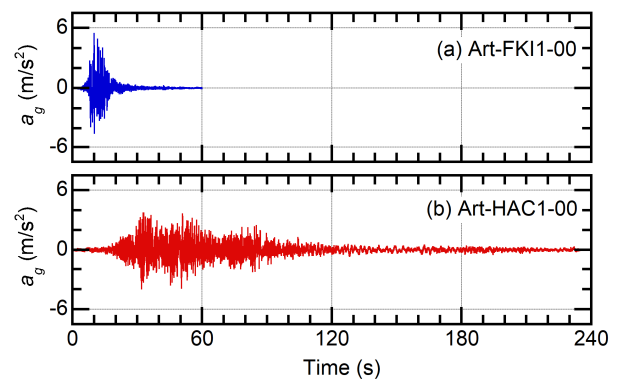


図-4 模擬地震動波形の例

スペクトルの値が、Art-FK11 と Art-HAC1 における値の1.5倍であることから、文献1)~3)で検討した等価線形化法による最大応答の推定値を、第1種・第2種地盤に対する模擬地震動群でそれぞれ対応させるためである。

3. 解析結果

図-5に、時刻歴応答解析で得られた各層の最大応答変形角を、文献1)~3)で検討した等価線形化法による推定結果と比較して示す。同図より、第1種地盤 (Soil-1) ならびに第2種地盤 (Soil-2) のどちらにおいても、文献1)~3)の等価線形化法による推定結果は、各模擬地震動群に対する最大応答の平均値を安全側に評価できていることがわかる。特に、文献3)において既に筆者らが指摘しているように、継続時間の長い模擬地震動群 Art-HAC1 と Art-HAC2 での最大応答は、等価線形化法による推定値と近い結果となった。一方、継続時間の短い Art-FK11 と Art-FK12 での最大応答は、等価線形化法による推定値

と比べ小さめの結果となった。この傾向は、同図(d)~(f)に示す第2種地盤(Soil-2)で顕著となり, Art-FK12 に対しては過剰に安全側の推定結果となった。

4. 最大瞬間入力エネルギーと最大応答変形の関係

4.1 縮約等価1自由度系の瞬間入力エネルギー

本研究では、以下の手順により縮約等価1自由度系の瞬間入力エネルギーを評価する。ここで、多自由度系の質量マトリクスを M 、地動加速度を $a_g(t)$ 、変位ベクトルを $d(t)$ 、復元力ベクトルを $f_R(t)$ で表す。

はじめに、文献 6) の倉本の方法により、縮約等価1自由度系の等価変位の時刻歴 $D_1^*(t)$ 、等価加速度の時刻歴 $A_1^*(t)$ を式(4)、(5)より求める。

$$D_1^*(t) = \frac{\beta_1 \phi_1^T M d(t)}{M_1^*} \quad (4)$$

$$A_1^*(t) = \frac{\beta_1 \phi_1^T f_R(t)}{M_1^*} \quad (5)$$

$$M_1^* = \beta_1 \phi_1^T M \mathbf{1} \quad (6)$$

ここで、 M_1^* は1次モードの等価質量である。なお、このときの1次モードベクトル $\beta_1 \phi_1$ は、最大等価変位(正負両領域で絶対値の大きい方の値) $D_{1, \max}^*$ に対応するステップを静的漸増荷解析結果より定め、そのステップでの1次モードベクトルを用いた。

次いで、文献 4) に基づき、縮約等価1自由度系において等価変位 $D_1^*(t)$ が正負いずれかのピークから逆側のピークにいたるまでの半ループを考えると、半ループ開始時刻を t 、半ループ終了時刻を $t+\Delta t$ とする。これより、縮約等価1自由度系の単位質量当たりの瞬間入力エネルギーを、式(7)で定義する。

$$\frac{\Delta E_{I1}^*}{M_1^*} = - \int_t^{t+\Delta t} a_g(t) \dot{D}_1^*(t) dt \quad (7)$$

これに対応させて、半ループ間での単位質量当たりの履歴吸収エネルギーを式(8)で定義する。

$$\frac{\Delta E_{H1}^*}{M_1^*} = \int_t^{t+\Delta t} A_1^*(t) \dot{D}_1^*(t) dt \quad (8)$$

以下では、等価変位 $D_1^*(t)$ のピーク値のうち、時刻 $t=0$ より数えた最大値(絶対値)の更新回数を n とし、 n 番目の最大値を ${}_n D_{1, \text{peak}}^*$ 、このときの単位質量当たりの瞬間入力エネルギーを ${}_n \Delta E_{I1}^*/M_1^*$ で表す。加えて、単位質量当たりの最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{I1, \max}^*/M_1^*$ の入力するときの n を N で表す。

図 - 6 に、縮約等価1自由度系の応答の例を示す。同図中には、単位質量あたりの最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{I1, \max}^*/M_1^*$ の入力するときの半ループとその開始・終了時刻を示している。同図(a)より、模擬地震動 Art-FK11-01 を入力倍率 1.05 倍で入力したときには、最大瞬間入力エネルギーの入力する半ループ間で大きな耐力低下が生じ

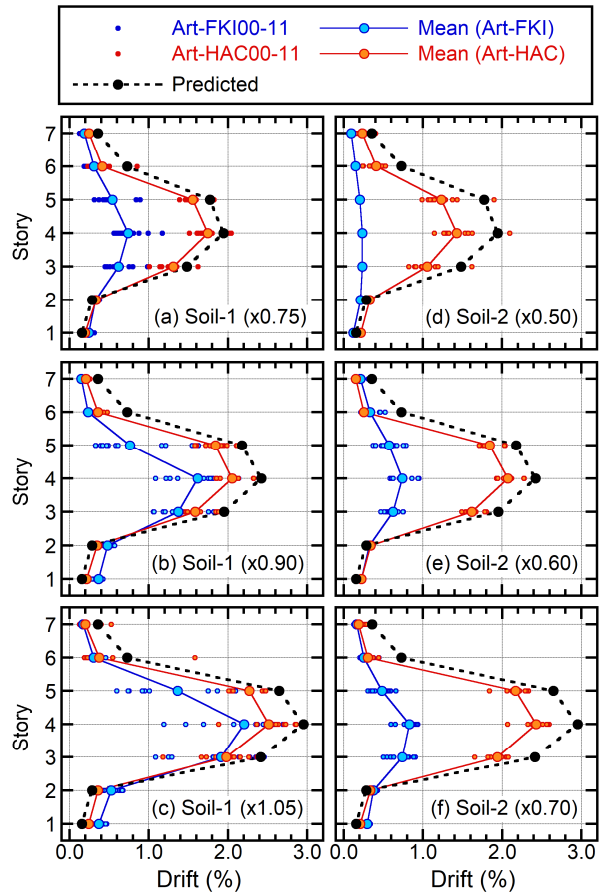


図 - 5 最大応答変形角の比較

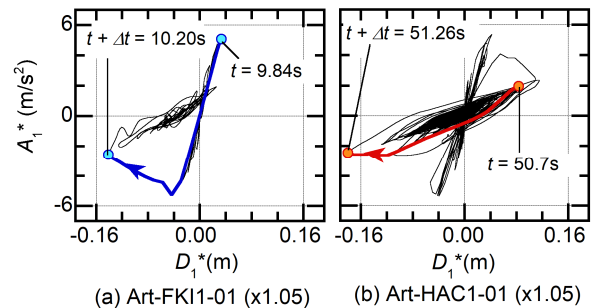


図 - 6 縮約等価1自由度系の応答の例

て最大応答変位に至っていることがわかる。一方で同図(b)より、模擬地震動 Art-HAC1-01 を入力倍率 1.05 倍で入力したときには、最大瞬間入力エネルギーが入力されるのは大きな耐力低下を経験した後となり、図(a)と同様に最大瞬間入力エネルギーの入力する半ループで最大応答変位に至っていることがわかる。

図 - 7 と図 - 8 に、縮約等価1自由度系の等価変位と瞬間入力エネルギーの時刻歴を示す。図 - 7 より、模擬地震動 Art-FK11-01 を入力倍率 1.05 倍で入力したときには、最大瞬間入力エネルギーが入力される以前でのエネルギー入力は小さく、ほぼ一撃で最大応答に至っていることがわかる。これに対し図 - 8 より、模擬地震動 Art-HAC1 を入力倍率 1.05 倍で入力したときには、最大

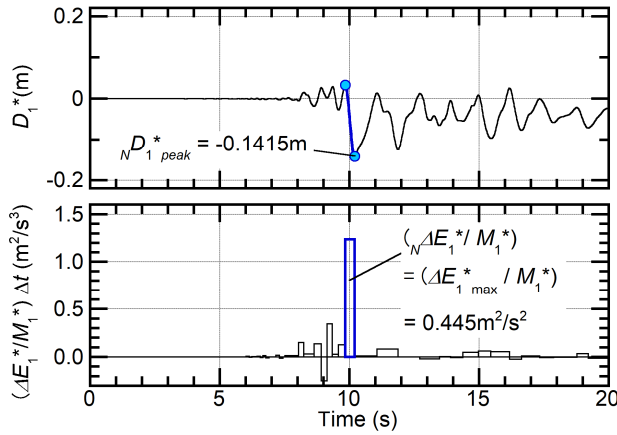


図 - 7 縮約等価 1 自由度系の応答時刻歴 (Art-FK11-01)

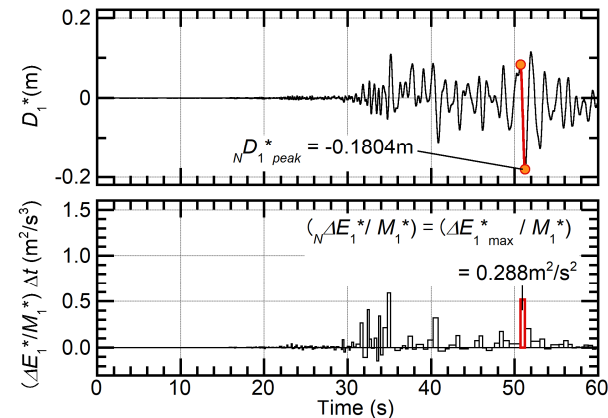


図 - 8 縮約等価 1 自由度系の応答時刻歴 (Art-HAC1-01)

瞬間入力エネルギーが入力される以前より繰り返しエネルギーが入力されていることがわかる。加えて、図 - 7 と図 - 8 の比較より明らかなように、最大瞬間入力エネルギー入力時の変位ピーク ${}_N D_{1 \text{ peak}}^*$ の絶対値は、Art-FK11-01 では 0.1415m、Art-HAC1-01 では 0.1804m となり Art-HAC1-01 の方が大きいのに、単位質量あたりの最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{1 \text{ max}}^*/M_1^*$ は Art-FK11-01 では $0.445 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、Art-HAC1-01 では $0.288 \text{ m}^2/\text{s}^2$ となり逆に Art-FK11-01 の方が大きくなっていることがわかる。

この現象の理由を検討するため、図 - 9 に瞬間入力エネルギーの時系列を示す。ここで同図中の $d_1^* = 3.599 \times 10^{-2} \text{ m}$ は、後述するように静的漸増荷解析より得られる等価 1 自由度系の等価加速度 A_1^* - 等価変位 D_1^* 関係において、等価加速度が最大となる点での等価変位の値である。同図(a)より、Art-FK11-01 を入力倍率 1.05 倍で入力した場合には、最大瞬間入力エネルギーの入力前ではその時点までに経験した最大変位は d_1^* を下回っていることがわかる。一方で同図(b)より、Art-HAC1-01 を入力倍率 1.05 倍で入力した場合には、最大瞬間入力エネルギーの入力前に等価変位は d_1^* を超えており、エネルギーが繰り返し入力されるに伴い等価変位が増大していることがわかる。このことから、Art-HAC1-01 では

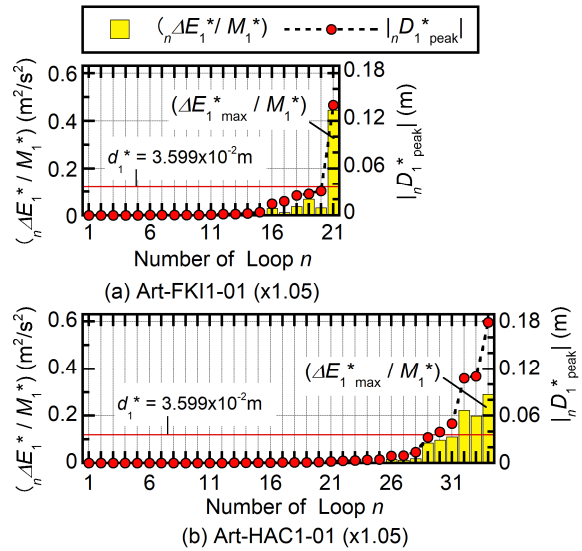


図 - 9 瞬間入力エネルギーの入力時系列

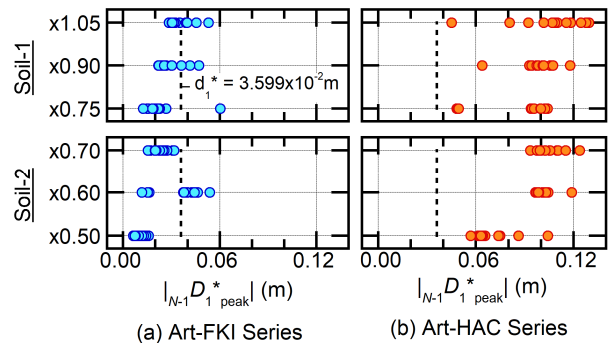


図 - 10 最大瞬間入力エネルギーの入力前に経験した最大等価変位

Art-FK11-01 と比べて最大瞬間入力エネルギーが小さいにもかかわらず最大等価変位が大きくなった理由は、Art-HAC1-01 では応答変位が等価加速度の最大となる点を越えた後も最大瞬間入力エネルギーの前に繰り返しエネルギー入力を受けたためであると考えられる。

図 - 10 に、全解析ケースについて、最大瞬間入力エネルギー以前に経験した最大等価変位 ${}_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ を示す。同図(a)より、模擬地震動群 Art-FK11 ならびに Art-FK12 では ${}_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ の値が d_1^* を下回っていることがわかる。加えて、Art-FK12 では ${}_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ が Art-FK11 と比べて全般的に小さくなっていることがわかる。一方で同図(b)より、模擬地震動群 Art-HAC1 ならびに Art-HAC2 では ${}_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ の値が d_1^* を超えていることがわかる。

以上のことから、模擬地震動群 Art-FK11、Art-FK12 では Art-HAC1、Art-HAC2 と比べ最大応答変形角が小さくなった現象の理由としては、模擬地震動群 Art-FK11、Art-FK12 では最大瞬間入力エネルギー入力前に大きな耐力低下が生じなかったのに対し、模擬地震動群 Art-HAC1、Art-HAC2 では最大瞬間入力エネルギー入力前に大きな耐力低下を経験していたためであると考えられる。

4.2 半ループでの吸収エネルギーのモデル化

図 - 11 に、半ループでの吸収エネルギーのモデル化で用いる、等価 1 自由度系の簡略化した等価加速度 - 等価変位関係のモデルを示す。同図において、点 $P_1(d_1^*, a_1^*)$ は静的漸増荷解析結果の等価 1 自由度系縮約より得られる $A_1^* - D_1^*$ 関係において等価加速度が最大となる点(耐力低下開始点), 点 $P_2(d_2^*, a_2^*)$ は耐力低下の生じたのちに耐力が安定した点で、本研究では曲げ降伏変位に相当するものとして扱う。点 $P_3(d_3^*, a_2^*)$ は対象建築物全体が終局に至る点で、この点での等価加速度の値は点 P_2 と等しいものと仮定する。本研究では、便宜上点 P_3 を静的漸増荷解析において最大層間変形角が 1/50 に至った点と仮定し、点 P_2 での等価変位 d_2^* の値は、図 - 11 の簡略化モデルにおける点 O から点 P_3 までの履歴面積が静的漸増荷解析結果の等価 1 自由度系縮約より得られる $A_1^* - D_1^*$ 関係と等しくなるように定めた。この際、ひび割れ点に相当する点 P_1' は、傾きが弾性時の 1 次固有円振動数 ω_{1c} の自乗で点 O を通る直線と、点 $(0, a_1^*/3)$ と点 P_1 を結ぶ直線との交点とした。

図 - 12 に、最大瞬間入力エネルギーが入力される半ループでの単位質量当たり履歴吸収エネルギー $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ のモデル化を示す。ここで、同図の Case 1 は最大瞬間入力エネルギーが入力される以前に耐力低下が生じていない場合、Case 2 は最大瞬間入力エネルギーが入力されるまでに耐力低下が生じた場合である。本研究では、Case 1 での半ループ開始点の変位は、最大等価変位 $D_{1 \max}^*$ が耐力低下開始点の変位 d_1^* 以下のときには $D_{1 \max}^*/2$ 、 $D_{1 \max}^*$ が d_1^* 以上のときには $d_1^*/2$ とした。加えて Case 2 での半ループ開始点の変位は、文献 4) で提案されている Type-2 に倣い $D_{1 \max}^*/2$ とした。なお、Case 1 での $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ に際し、簡便化のため点 P_1' での変位を 0 とした。

図 - 13 に、各ケースでの半ループでの単位質量当たりの最大履歴吸収エネルギー $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ と最大等価変位

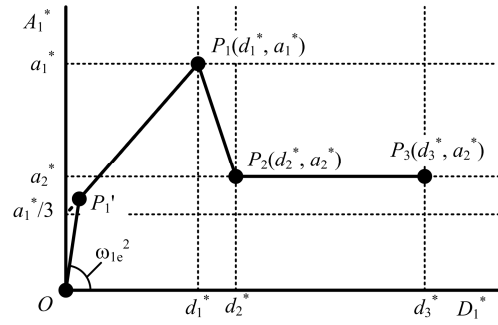


図 - 11 簡略化した $A_1^* - D_1^*$ 関係のモデル

$D_{1 \max}^*$ の関係を、時刻歴応答解析結果の等価 1 自由度系縮約より得られた単位質量当たりの最大履歴吸収エネルギー $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ と $D_{1 \max}^*$ の関係と重ねて示す。ここで、同図(a)には、図 - 10 に示した、最大瞬間入力エネルギー以前に経験した最大等価変位 $|_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ が耐力低下開始点での等価変位 d_1^* より小さい場合を、同図(b)には $|_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ が d_1^* より大きい場合に分類して示す。なお、本解析における $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ と単位質量あたりの最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{1 \max}^*/M_1^*$ との比 $\Delta E_{H1 \max}^*/\Delta E_{1 \max}^*$ は 0.811 から 0.973 の範囲となった。

同図(a)より、 $|_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ が d_1^* より小さい場合には、Case 1 による $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ は時刻歴応答解析による $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ と概ね対応しているのに対し、Case 2 による $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ は $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ を過小評価していることがわかる。一方で同図(b)より、 $|_{N-1} D_{1 \text{ peak}}^*$ が d_1^* より大きい場合には、Case 1 による $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ が時刻歴応答解析による $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ を過大評価しているのに対し、Case 2 による $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ は $\Delta E_{H1 \max}^*/M_1^*$ と概ね良好に対応していることがわかる。すなわち、本論文での検討範囲では、最大瞬間入力エネルギーの入力以前での顕著な耐力低下の有無で場合分けすることで、本論文で定式化した半ループでの最大履歴吸収エネルギーと最大応答変位の関係が時刻歴応答解析結果と良好に対応することがわかる。なお、同図(a)にお

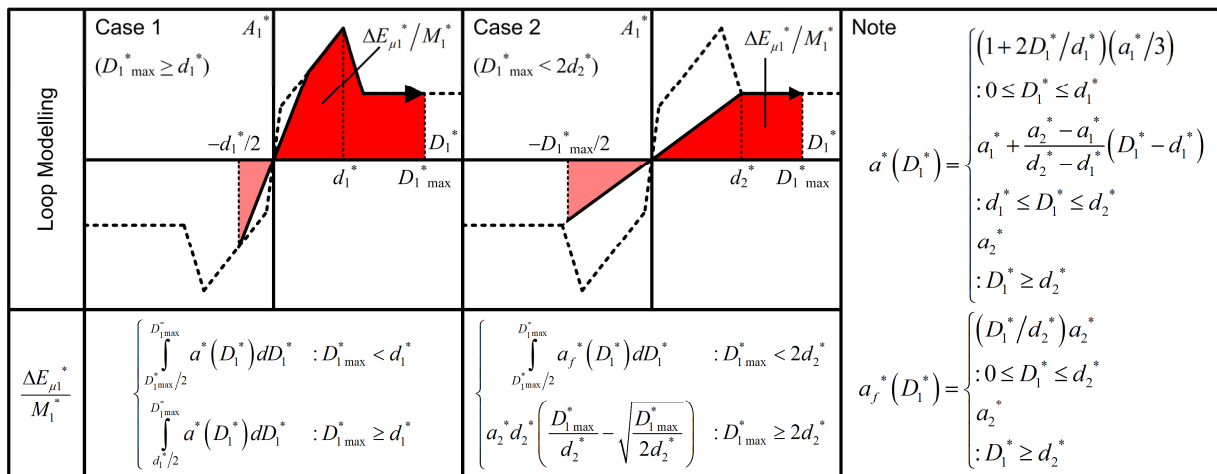


図 - 12 半ループでの単位質量当たり履歴吸収エネルギーのモデル化

いて、 $D_{1\max}^*$ が 0.06m 前後において、 $\Delta E_{H1\max}^*/M_1^*$ が Case 1 による $\Delta E_{\mu 1}^*/M_1^*$ と比べ小さくなるケースが多く確認できる。これらは、模擬地震動群 Art-FKI を入力した結果、最大瞬間入力エネルギー $\Delta E_{1\max}^*$ の入力時、または $\Delta E_{1\max}^*$ の入力後に顕著な耐力低下が生じ、これに続く $\Delta E_{1\max}^*$ 未満の入力により最大変位が増大したケースであった。

5. まとめ

本論文では、文献 4) で提唱されている「瞬間入力エネルギー」に着目して、文献 1)~3) で検討した 7 層 SRC 造建築物を対象に最大瞬間入力エネルギーと最大応答変位の関係を検討した。結論を以下に記す。

- (1) 本論文の検討範囲では、耐力低下の伴う建築物に生じる最大応答変位は、最大瞬間入力エネルギーの量のみならず、その入力以前での顕著な耐力低下の発生有無に大きく影響される結果となった。従って、耐力低下の伴う建築物において最大瞬間入力エネルギーと最大応答変位の関係を検討する場合、最大瞬間入力エネルギーの入力以前での顕著な耐力低下の発生有無を考慮することが重要である。
- (2) 本論文の検討範囲では、耐力低下の伴う建築物においては、最大瞬間入力エネルギーの入力以前での顕著な耐力低下の有無で場合分けすることで、本論文で定式化した半ループでの最大履歴吸収エネルギーと最大応答変位の関係が時刻歴応答解析結果と良好に対応した。

なお、別途検討したところによると、構造物に入力される総入力エネルギーと最大瞬間入力エネルギーの関係が、構造物の固有周期で無次元化した地震動の継続時間から概ね推定できることが既にわかっている⁷⁾。今後、これを用いて最大瞬間入力エネルギーの入力以前での顕著な耐力低下の発生有無を判別することで、耐力低下の伴う構造物に対して瞬間入力エネルギーに基づく地震時最大応答推定手法の開発を行う予定である。

謝辞

本論文の検討にあたり、日本建築学会構造委員会の既存中層 RC 建物の耐震性能評価小委員会（委員会主査：山口大学教授 稲井栄一先生）の静的 WG で解析した集合住宅の資料を使用させていただきました。また、本研究の実施にあたり、文部科学省科学研究費 基盤研究(C)「損傷状態を陽な形で評価する次世代耐震診断法のための地震時最大応答推定手法の開発（課題番号 26420556，研究代表者：秋田県立大学教授 西田哲也先生）」の助成を受けました。ここに謝意を示します。

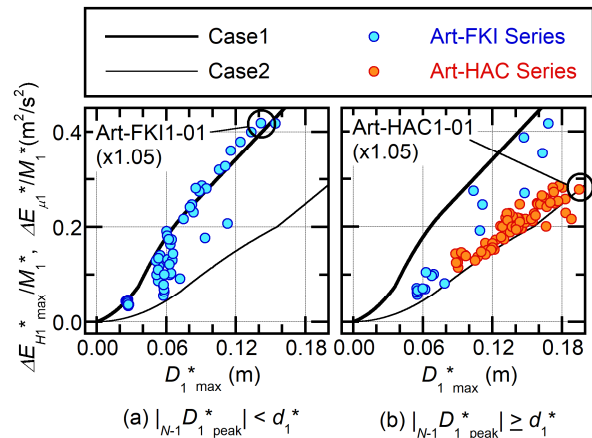


図 - 13 半ループでの履歴吸収エネルギーと最大等価変位の関係

参考文献

- 1) 藤井 賢志：主題解説（1）既存建築物の地震応答と静的評価，既存中層鉄筋コンクリート造建物の等価線形化法を用いた耐震性能評価法，2014 年度日本建築学会大会（近畿）PD 資料，pp. 3-20，2014. 9.
- 2) 藤井 賢志：等価線形化法による既存中層鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の地震時最大応答変形の推定精度，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻第 721 号，pp.483-493，2016. 3.
- 3) 藤井 賢志，菅野 秀人，西田 哲也：観測地震動の位相をシフトさせて作成した模擬地震動を用いた既存中層 SRC 造建築物の応答推定精度の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No. 2，pp.823-828，2016. 7.
- 4) 中村 孝也，堀 則男，井上 範夫：瞬間入力エネルギーによる地震動破壊特性評価と応答変形の推定，日本建築学会構造系論文集，第 513 号，pp.65-72，1998.11.
- 5) 翠川 三郎，三浦 弘之：1968 年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化，日本地震工学会論文集，第 10 巻第 2 号，pp.12-21，2010.5.
- 6) 倉本 洋：多層建築物における等価 1 自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測，日本建築学会構造系論文集，第 580 号，pp.61-68，2004.6.
- 7) 喜田 修平，藤井 賢志：継続時間を考慮した線形 1 自由度系への最大瞬間入力エネルギーの推定，日本地震工学会・大会 - 2016 梗概集，Paper ID: P1-11，2016.9.