

論文 RC 建物の地震応答に及ぼす履歴エネルギー吸収性能の影響

堀井良浩*1・壁谷澤寿海*2

要旨：本研究の目的は、RC 建物の最大地震応答に及ぼすエネルギー吸収性能の影響を理論的に明らかにして、数値解析により検証することである。復元力特性の履歴エネルギー（スリップの程度）を変化させたモデルによる 1 質点系地震応答解析を行い、地震動の入力エネルギーと吸収エネルギーの釣合いに基づいて、スリップの影響による応答増分をスリップのない場合の最大応答を用いて簡略に定式化できることを示した。地震動応答スペクトルが建物の等価周期の長周期側で大きく卓越する場合を除いて提案式の妥当性を確認した。

キーワード：RC 建物、地震応答解析、履歴エネルギー、スリップ、最大応答変位

1. はじめに

RC 建物の柱梁接合部あるいは部材内で梁主筋の付着劣化が生じると履歴ループがスリップ性状を示すようになる[1]。このような場合、履歴エネルギー吸収性能が低下するため、地震応答が増大する可能性がある。履歴ループのスリップ性状が地震応答に与える影響に着目した研究は既に行われている。北山は、梁ヒンジの履歴モデルにスリップ性状を考慮した RC 平面骨組地震応答解析を行い、梁ヒンジのスリップが最大層間変形に与える影響は小さいと指摘した[2]。更にパラメトリックな 1 質点系地震応答解析を行い、弾性周期、許容塑性率ごとに、スリップの影響による応答増分が大きくなる等価粘性減衰定数 h_{eq} の下限値を示した[3]。この下限値は柱梁接合部を通し配筋する梁主筋の付着設計に採用されている [4]。

本研究では地震動の入力エネルギーと吸収エネルギーの釣合いに基づいて[5]、スリップが生じない場合の地震応答に対する、ス

リップの影響による応答の増分を簡便に定式化する。弾性周期、入力地震動、等価粘性減衰定数 h_{eq} を変化させた 1 質点系地震応答解析を行い、提案式の妥当性を検証する。

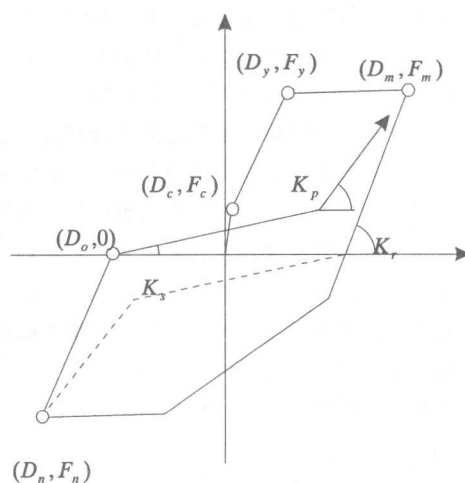


図 1 Takeda slip モデル

*1 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)

2. スリップの影響による応答増分の定式化

2.1 履歴モデル

RC 部材の付着すべりによるスリップ性状を表現するため、履歴モデルに Takeda slip モデル[6]を用いた (図 1)。Takeda slip モデルは、RC 建物を対象とした応答解析によく用いられる Takeda モデルと同一のスケルトンカーブを持ち、降伏後にスリップ性状を示す。スリップ剛性 K_s 、ピンチ剛性 K_p 、除荷剛性 K_r は次式で表される。

$$K_s = \frac{F_m}{D_m - D_0} \left(\frac{D_m}{D_m - D_0} \right)^\gamma \quad (1)$$

$$K_p = \frac{F_m}{D_m} \eta \leq K_r \quad (2)$$

$$K_r = \frac{F_c + F_y}{D_c + D_y} \left(\frac{D_m}{D_y} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

γ , η が大きいほど顕著なスリップ性状を示す。 $\gamma=0$ とすればスリップは生じず、Takeda モデルと一致する。

2.2 最大応答増分の定式化

スリップの影響による最大応答増分 ΔD を定式化する方法について以下に説明する。なおスリップのない場合の応答は既知としている。スリップの影響による応答増分は最大応答の発生する半サイクルでのみ生じると仮定し、更にこの半サイクル間の地震動の入力エネルギーはスリップが生じても変化しないと仮定する。これにより ΔD は、スリップにより減少した履歴面積 ΔW_p と等しい履歴面積を与える応答増分として、式(4)で表すことができる (図 2)。

$$\Delta D = \Delta W_p / F_m \quad (4)$$

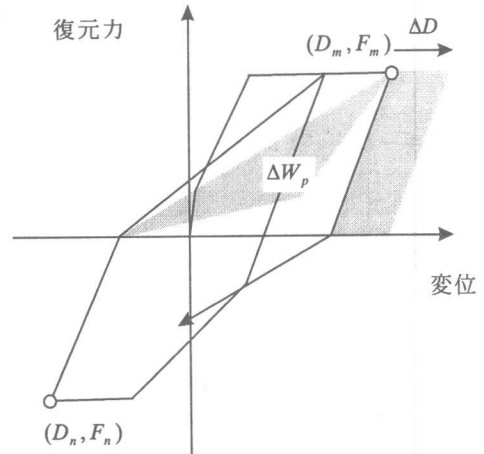
上式では簡単のため、復元力と除荷剛性は、スリップの生じない場合と等しいと考えている。一方、この半サイクルの h_{eq} の減少分 Δh_{eq} と ΔW_p には式(5)の関係がある。

$$\Delta h_{eq} = \Delta W_p / (\pi \cdot D_m \cdot F_m) \quad (5)$$

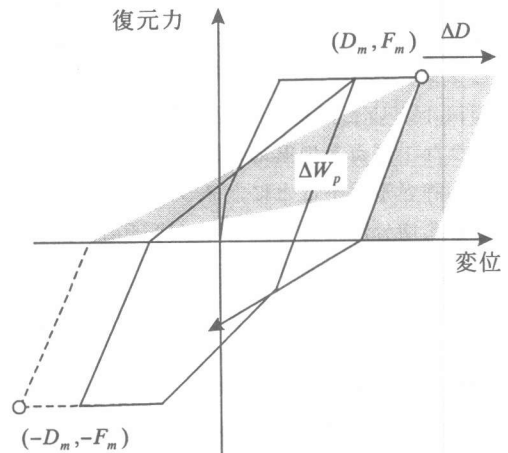
式(4)、式(5)をまとめると、 ΔD は Δh_{eq} と D_m より式(6)のように表される。

$$\Delta D = \pi \cdot D_m \cdot \Delta h_{eq} \quad (6)$$

ここで反対側の最大応答 (D_n, F_n) を、スリップのないモデルの応答解析から求める A 法 (図 2(a))、 $(-D_m, -F_m)$ で代用する B 法 (図 2(b)) の 2 通りの方法を考える。B 法は、スリップのない場合の最大応答 (D_m, F_m) が与え



(a) A 法



(b) B 法

図 2 2通りの応答増分の定式化方法

られれば応答解析を行わずに ΔD を評価することが可能となる。ただし (D_n, F_n) と $(-D_m, -F_m)$ の違いが大きいと、 ΔW_p を過大評価するため ΔD を大きく評価することになる。

3. 1 質点系地震応答解析

解析モデルはせん断型 1 質点系とし、弾性周期 T は 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 秒とした。スケルトンカーブを図 3 に示す。降伏強度はベースシア係数にして 0.25 に振動特性係数 R_t を考慮して決定し、ひび割れ強度は降伏強度の 0.3 倍とした。降伏点及び降伏後の剛性は、それぞれ弾性剛性 K_0 の 0.4 倍及び 0.01 倍とした。数値積分は線形加速度法により時間刻みを 0.001 秒として行った。減衰は瞬間剛性比例型とし弾性時の減衰定数を 3% にした。Takeda slip モデルの α は 0.2 とした。また γ は 0.0~2.5 まで 0.5 刻み、 η は 1.0, 1.4 と変化させて、塑性率 4 に対する h_{eq} を 0.09~0.22 の間で変化させた。入力地震動は八戸港湾、東北大学、大阪ガス葺合、神戸気象台、メキシコの 5 波を、ピンチ化の生じない場合($\gamma=0.0$)の最大塑性率が 4 となるように基準化して用いた。

スリップの影響による応答増分について、A 法及び B 法により予測した結果と、応答解析結果とを比較したグラフを、入力地震動別および弾性周期別に上下、左右に並べたものを図 4 に示す。上矢印は最大塑性率が 9 以上となったことを示す。図中の等価応答は後述する。

葺合を入力した場合、周期 0.3 秒のモデルでは予測を大きく上回る応答増分が生じたが、それ以外のモデルでは、A 法により概ね応答増分を予測でき、B 法により上限を抑えられた。八戸、東北、神戸の場合も同様な傾向が見られた。一方メキシコを入力した場合は、周期 0.3 秒の外に、周期 0.5 秒、0.7 秒のモデルでも B 法による予測値を上回る応答が生じた。

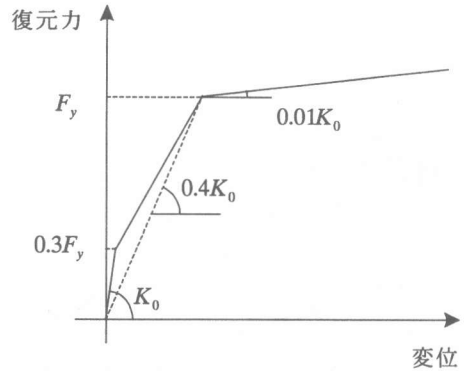
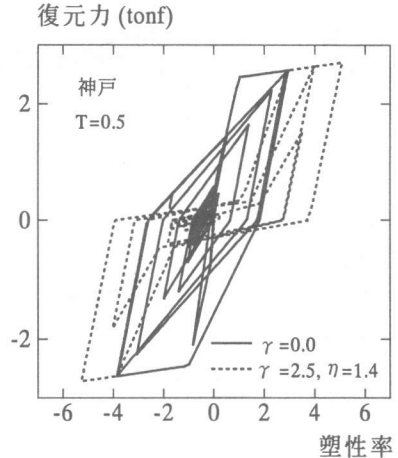
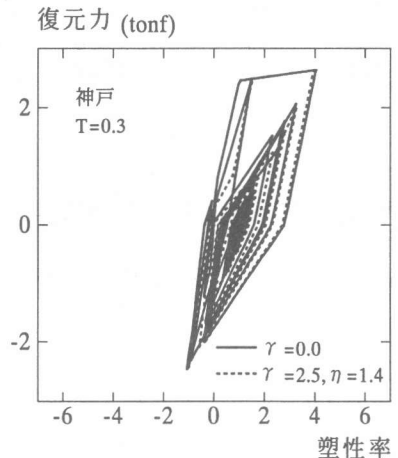


図 3 スケルトンカーブ



(a) 周期 0.5 秒に神戸を入力



(b) 周期 0.3 秒に神戸を入力

図 5 反対側の最大応答の影響

最大塑性率

—— A法 — B法 ○ 応答解析結果 × 等価応答

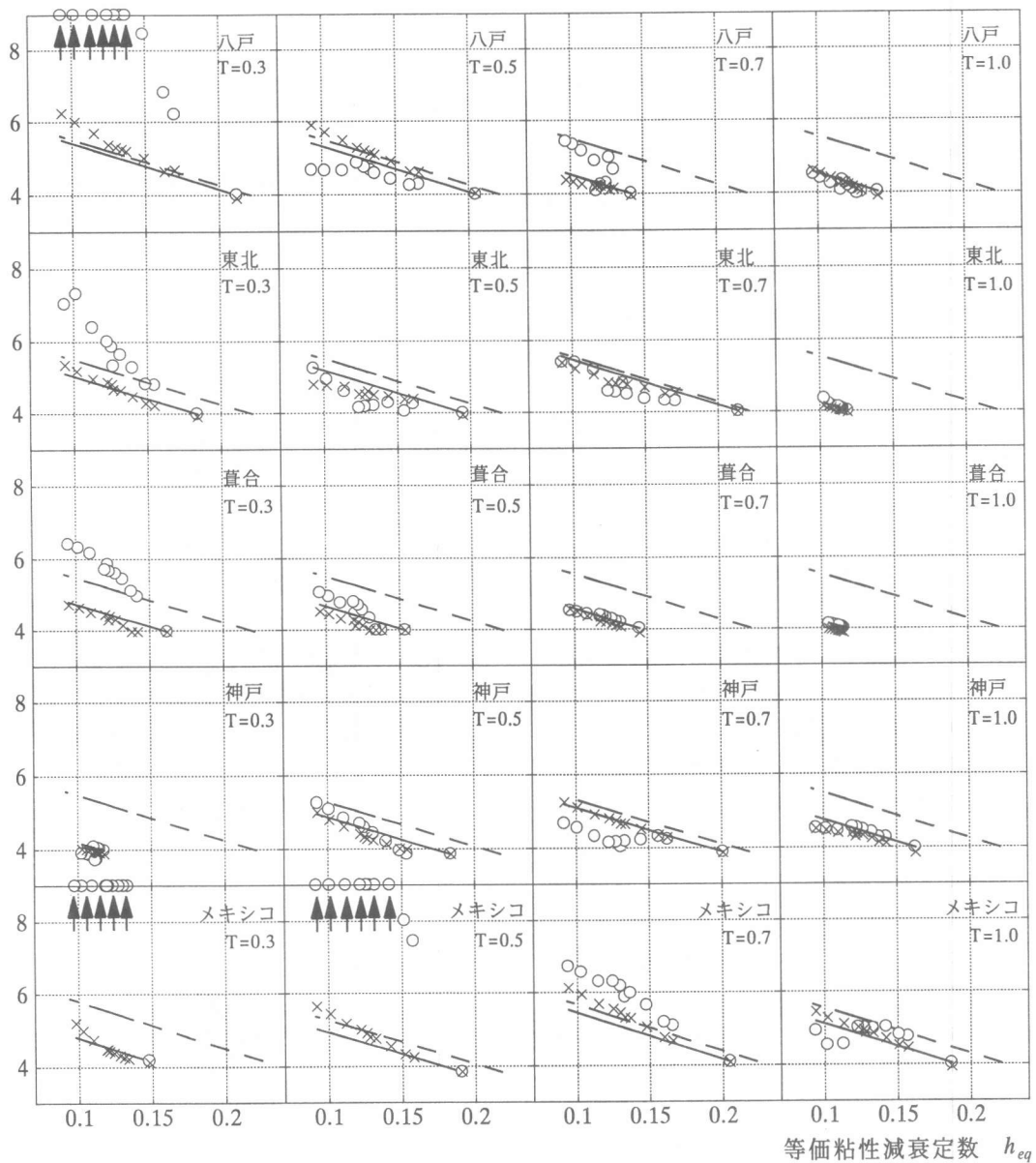


図 4 スリップによる応答増分予測値

V_E (cm/sec) $T=0.3$ $T=0.5$ $T=0.7$ $T=1.0$: 塑性率4に対する等価周期

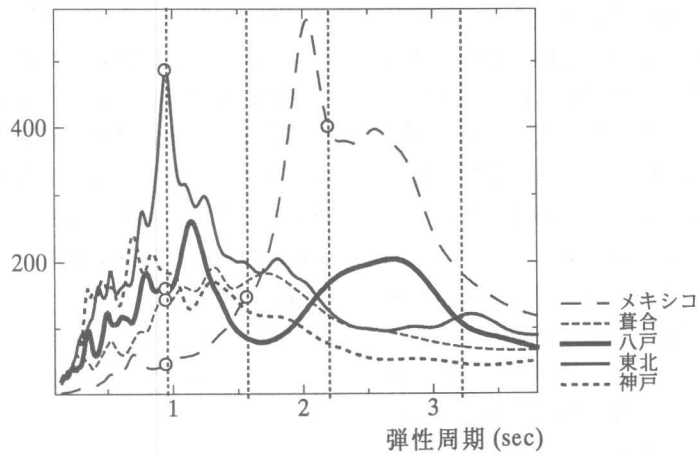
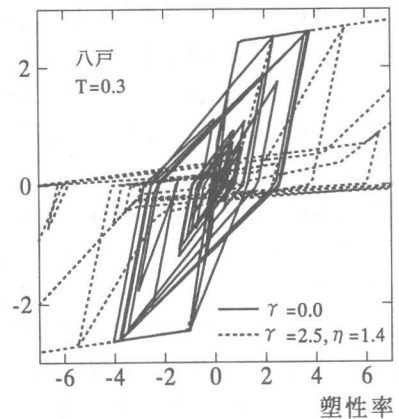


図 6 弾性系総入力エネルギースペクトル(h=5%)

周期 0.3 秒と 0.5 秒のモデルに神戸を入力した場合の履歴ループを図 5 に示す。最大塑性率が同程度であるにも関わらず、 D_n が大きい時には応答増分が生じたが (0.5 秒, 図 5(a)), D_n が小さい時には応答増分は殆ど生じなかった (0.3 秒, 図 5(b))。同様に, 周期 0.7 秒のモデルに東北, 周期 1.0 秒のモデルに菅合を入力した場合も, D_n が小さいため応答増分が小さかった。これよりスリップの影響による最大応答増分 ΔD は, 反対側の最大応答の影響を大きく受けることがわかる。

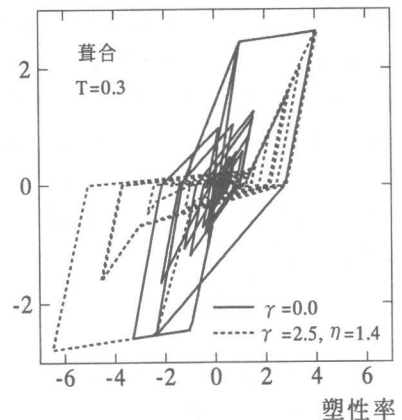
ここで ΔD に影響を及ぼす地震動の性質について考察する。図 6 に各地震動の最大速度を 50kine に基準化した時の減衰 5% の弾性系総入力エネルギースペクトルを示す[7]。ここで等価周期を最大応答点と原点との割線周期と定義し, 図中に最大塑性率 4 に対応する等価周期を示す。上述した B 法による予測値を上回る応答が生じたモデルと地震動の組合わせには, スペクトル上に白丸をプロットしている。このような場合, 周期 0.7 秒とメキシコの組合わせを除いて, 地震動のピーク周期がモデルの等価周期より長周期側に存在している。スリップの影響による応答増大に伴い等価周期が伸びて入力エネルギーが

復元力 (tonf)



(a) 周期 0.3 秒に八戸を入力

復元力 (tonf)



(b) 周期 0.3 秒に菅合を入力

図 7 繰返し数の影響

増大したため、エネルギー一定を仮定した予測値よりも大きな応答増分が生じたと考えられる。この現象は、建物の等価周期が地震動のピーク周期を超えるまで繰返されるため、ピーク周期が長周期側にあるほど、また地震動の繰返し数が多いほど、大きな応答増分が生じることが予測される。周期 0.3 秒のモデルでは、応答増分が大きい順にメキシコ、八戸、東北、葺合、神戸となり、応答スペクトルのピーク周期が長周期側である順に、メキシコ、葺合、八戸、東北、神戸となった。葺合を除けば、ピーク周期が長周期側にあるほど応答増分は大きくなった。葺合の応答増分が相対的に小さかったのは、繰返し数が少なかったためと考えられる(図 7)。以上より ΔD に影響を及ぼす地震動の性質としては、卓越周期と繰返し数を上げることができる。

次に、繰返し数の影響と入力エネルギー変化の影響を分離することを試みる。応答解析によりスリップのないモデルの全ての半サイクルの履歴面積を求めた後、応答解析ではなくエネルギーの釣合いにより全ての半サイクルの履歴面積が等しくなるように応答増分を決め、スリップの生じる場合の応答を求めた。この応答を等価応答と呼ぶ。等価応答は、入力エネルギーが一定であれば応答解析で求めた応答と一致すると考えられ、等価応答には繰返しの影響のみ含まれることになる。図 4 中に等価応答を示す。等価応答と A 法による予測値は概ね良い対応を示した。入力エネルギーの変化が生じない場合には、繰返し数の影響は小さいといえる。すなわち、応答と予測が合わない主な原因は入力エネルギー変化であり、繰返し数が多いとその傾向がやや強くなると考えられる。

4. まとめ

RC 建物の履歴ループのスリップの影響による応答増分を、地震動の入力エネルギーと吸収エネルギーの釣合いに基づいて定式化した。パラメトリックな 1 質点系応答解析を

行い、提案式の妥当性を検証した結果、次のことが分かった。

- (1) スリップのない場合の最大応答を用いれば、スリップの程度を変化させた時に生じる応答増分の上限は概ね評価することができる。反対側の最大応答が与えられれば、さらに精度の良い評価が可能である。
- (2) 建物の最大応答に対する等価周期より長周期側に総入力エネルギースペクトルのピーク周期が存在する場合には、応答の増大に伴う入力エネルギーの増分を考慮する必要がある。

5. 参考文献

- [1] 梅村魁：鉄筋コンクリート造建物の動的耐震設計法・続(中層編)、技法堂出版、1982
- [2] 北山和宏、青山博之：鉄筋コンクリート造骨組接合部の耐震性、第 7 回日本地震工学シンポジウム、1986
- [3] 北山和宏：鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震設計に関する研究、第 9 回日本地震工学シンポジウム、1994
- [4] 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
- [5] 中村友紀子、壁谷澤寿海：RC 構造の地震時最大塑性応答変形のエネルギー入力速度による推定、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, 1996
- [6] 壁谷澤寿海、塩原等、小谷俊介、青山博之：一日米共同研究—鉄筋コンクリート造実大 7 層試験体の耐震性に関する研究(その 3) 疑似動的解析、第 6 回日本地震工学シンポジウム、1982
- [7] 秋山宏：耐震極限設計 第 2 版、東京大学出版会、1987