

論文 地震動の周期特性, 継続時間がRC建物の耐震挙動に及ぼす影響に関する基礎的検討

岩本 政巳*1・清水 藤太*2・杉戸 真太*3

要旨: 本研究では, RC 建物を対象にさまざまな地震動波形を入力波とする地震応答解析を行い, 計測震度ごとの耐震挙動, 地震動の周期特性や継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した。その結果, 計測震度ごとの挙動に関しては, 建物が高くなるにしたがい, 応答塑性率や履歴エネルギーが低下し, 破壊確率が低下する傾向にあることが分かった。また, 地震動の周期特性, 継続時間に関しては, 卓越周期, 継続時間が長くなるにしたがって, 応答塑性率や履歴エネルギーが増大し, 破壊に達する計測震度が低下することが分かった。

キーワード: 耐震, 地震被害推定, 地震動, 継続時間, 周期特性, RC 建物

1. はじめに

平成15年9月26日に発生した2003年十勝沖地震は, 十勝沖を震源とするマグニチュード M8.0 の海溝型巨大地震である。この地震は震源に近い十勝, 釧路, 日高地方だけでなく, 札幌市や室蘭市などにも被害をもたらした。また, 苫小牧市では石油タンクの火災が発生した。海溝型巨大地震の特徴の一つである長周期成分を多く含む地震動に励起されたスロッシングが原因と考えられている¹⁾。

海溝型巨大地震のもう一つの特徴は継続時間が長いことである。近い将来発生するとされる東海, 東南海地震は想定震源域が広く, また連動して発生する可能性も高いため, その継続時間はかなり長いものになると予想されている。一般に, 地震による被害予想は計測震度をもとに行われることが多い。しかし, 計測震度は地震動の最大振幅に大きく依存し継続時間の影響を受けにくい指標のため, 計測震度に基づく被害予想は継続時間が長い地震動に対する被害を過小評価する可能性がある。

こうした地震動の周期特性や継続時間が構造物の損傷度, 被災度に及ぼす影響を明確にすることは, 地震被害推定の精度を高める上で重要と考えられる。そのため基礎的な検討として, 本研究では RC 建物を対象にさまざまな地震動波形を入力波とする地震応答解析を行い, 地震動の周期特性や継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討する。

2. 解析対象

解析対象としたのは, 文献 2)において試設計された, 梁曲げ降伏先行型の中・高層の鉄筋コンクリート造建物

である。その概要を表-1に示す。なお建物名称は, 最初のアルファベットが建物の用途(O: オフィス, A: アパートメント)を, 次の数字が階数を, それぞれ表している。

文献 2)では, フレームモデルとして設計された各建物モデルに対して静的弾塑性解析が行われ, 地震応答解析のための等価1自由度系モデルに変換されている。等価1自由度系の特性は, 荷重-変位曲線のトリリニア型スケルトンカーブとしてまとめられている。

本研究では, この等価1自由度系のスケルトンカーブに基づいて地震応答解析を行うこととした。解析に用いたスケルトンカーブを図-1に示す。階数は異なるが, O-06とA-08, O-12とA-16の高さはそれぞれおおむね等しく, スケルトンカーブもそれぞれほぼ一致している。なお, 文献 2)の検討では, 設計許容変形として層間変形角1/100, 梁端の塑性率4, 1階柱脚の塑性率2と設定されている。図-1中の○は層間変形角1/100に, △は1階柱脚の塑性率2に, それぞれ対応する点である。等価1自由度系におけるこれらの点の塑性率を表-2に示

表-1 解析対象としたRC建物の概要²⁾

建物名称	用途	階数	スパン (m)	階高 (m)
O-06	事務所	6	8*×6	3.7
A-08	共同住宅	8	6*×6	2.8
O-12	事務所	12	8*×6	3.7
A-16	共同住宅	16	5*×5	2.8
A-24	共同住宅	24	5*×5	2.8

注) *: 検討対象とするスパンの方向を示す。

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻准教授 工博 (正会員)

*2 研究当時 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 工修 (非会員)

*3 岐阜大学 流域圏科学研究センター教授 工博 (非会員)

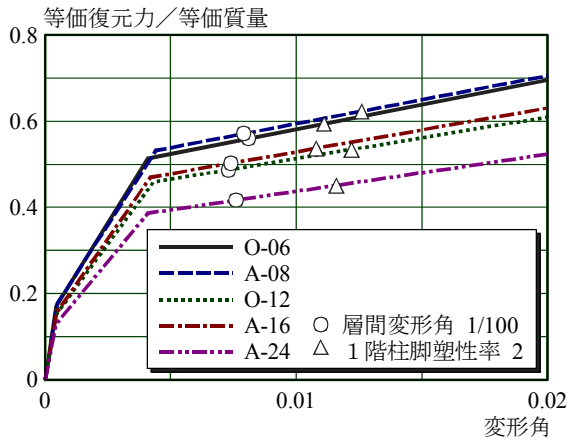


図-1 等価1自由度系のスケルトンカーブ²⁾

表-2 等価1自由度系における設計許容変形に対応する塑性率

建物名称	層間変形角 1/100	1階柱脚の 塑性率2
O-06	1.98	2.71
A-08	1.80	2.89
O-12	1.69	2.83
A-16	1.75	2.57
A-24	1.88	2.85

表-3 等価1自由度系の有効高さ、固有振動数および固有周期

建物名称	有効高さ (m)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)
O-06	14.8	2.52	0.40
A-08	14.9	2.48	0.40
O-12	29.6	1.65	0.61
A-16	29.9	1.68	0.60
A-24	44.8	1.27	0.79

す。また、各モデルの有効高さ、初期剛性より算定した等価1自由度系の固有振動数および固有周期を表-3に示す。

3.入力地震動

入力地震動波形として、国内の実測波形86成分およびシミュレーション波形33成分の計119成分の加速度波形(水平1方向)を用いることとした。実測波形は、防災科学技術研究所K-Netのほか、旧運輸省港湾技術研究所、旧建設省土木研究所、気象庁等により観測された、表-4に示す地震の観測記録である。シミュレーション波形は、地震動予測モデルEMPRと周波数依存型等価線形化法FDEL³⁾により作成された、想定東海地震、想定東

表-4 解析に用いた地震動波形(観測波形)

発生年	地震名称	波形内訳
1962	広尾沖地震	1地点2成分
1968	十勝沖地震	3地点6成分
1968	愛媛県西方沖地震	1地点2成分
1970	宮城県沖地震	1地点1成分
1973	根室半島沖地震	2地点3成分
1978	宮城県沖地震	2地点4成分
1982	浦河沖地震	1地点2成分
1983	日本海中部地震	2地点4成分
1995	兵庫県南部地震	4地点5成分
1997	鹿児島県北西部地震	3地点5成分
1997	第2鹿児島県北西部地震	3地点5成分
2000	鳥取県西部地震	5地点6成分
2001	芸予地震	4地点5成分
2003	十勝沖地震	5地点6成分
2003	十勝沖地震(余震)	4地点5成分
2003	三陸南地震	4地点4成分
2003	宮城県北部地震	3地点5成分
2004	釧路沖地震	4地点5成分
2004	根室半島南東沖地震	5地点5成分
2004	新潟県中越地震	5地点6成分

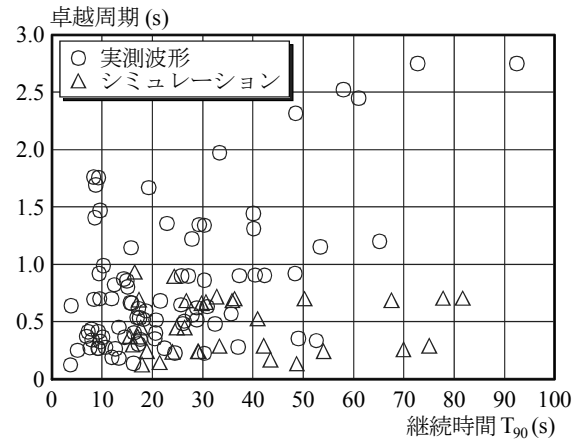


図-2 入力地震動波形の卓越周期と継続時間 T_{90}

南海地震およびそれらの複合地震の波形である。

119波形の卓越周期および継続時間の指標 T_{90} を図-2に示す。卓越周期はMEM法により算定したパワースペクトルの最大ピークより求めた。また、継続時間の指標 T_{90} は地震動パワーの累積値が5%~95%となる時間である。

地震応答解析にあたっては、これらの地震動波形に対して振幅調整を行い、計測震度5.0から7.0まで0.1刻みで入力地震動波形を作成した。なお、計測震度は各成分ごとに算定している。

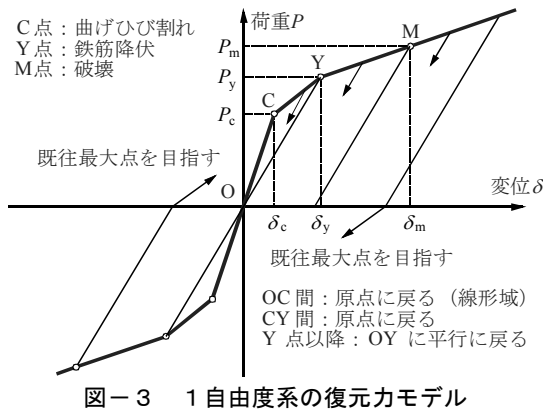


図-3 1自由度系の復元力モデル

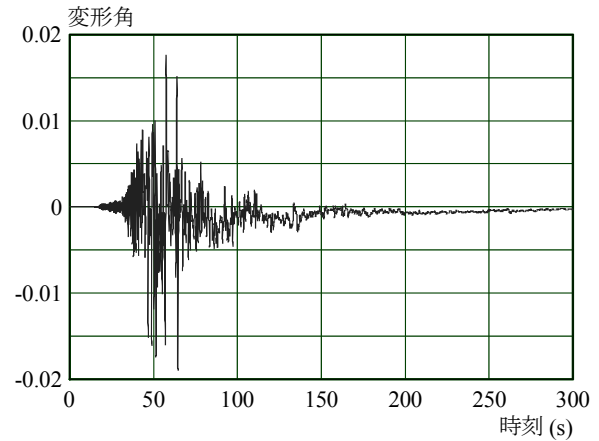


図-4 時刻歴応答の例
(O-06, 十勝沖地震, 計測震度 6.5)

4. 解析方法

図-1に示したスケルトンカーブをもとに等価1自由度系の弾塑性地震応答解析を行った。運動方程式は増分型とし、数値解法としてNewmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた。減衰についてはレイリー減衰を用い、減衰定数は0.01とした。地震動データの時間刻みは0.01sあるいは0.02sであったが、地震応答解析は原則として0.001sの時間刻みで行った。

復元力モデルには、図-3に示すような最大点指向型のモデルを用いた。本解析では、鉄筋降伏に相当するY点以降の接線剛性は一定とした。また、解析中の破壊判定は行わず、設計許容変形に相当するM点に達しても解析は継続することとした。

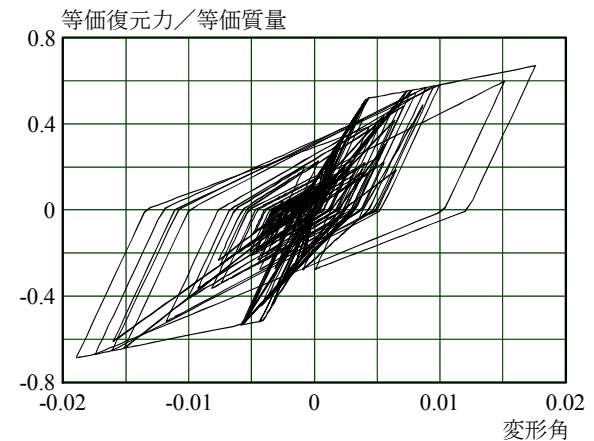


図-5 履歴曲線の例
(O-06, 十勝沖地震, 計測震度 6.5)

5. 解析結果

5.1 計測震度ごとの損傷状況

地震応答解析結果の一例として、O-06に計測震度6.5の十勝沖地震を作用させたときの時刻歴応答、履歴曲線を図-4、図-5にそれぞれ示す。このケースでは、時刻64.540sにて最大変形角0.019が発生している。このときの応答塑性率は4.62であった。また、履歴曲線より算定した履歴エネルギーを図-6に示す。ただし、履歴エネルギーは等価質量で除した値である。応答振幅の大きい40~80sあたりで履歴エネルギーが急激に増大していることが分かる。

解析結果から算定した、応答塑性率と計測震度との関係を図-7に示す。計測震度ごとに振幅調整した119波形による解析を行っているが、同じ計測震度であっても応答塑性率には大きなばらつきがあることが分かる。特に計測震度が高くなるほどその傾向が高いように見受けられる。

そこで、計測震度ごとの応答塑性率について平均をとったものを図-8に示す。どの建物モデルにおいても計測震度とともに応答塑性率が滑らかに増加していることが分かる。建物モデルごとの傾向を見ると、建物の高

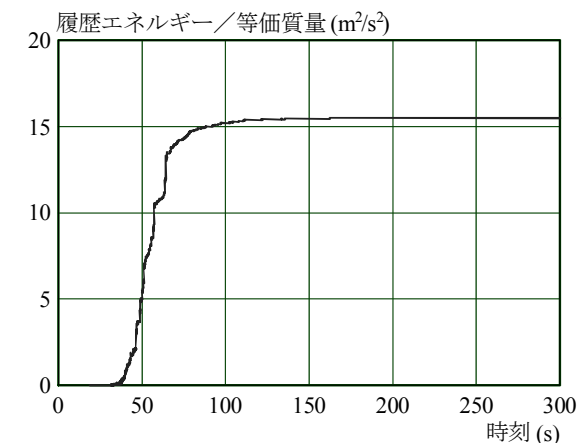


図-6 履歴エネルギーの例
(O-06, 十勝沖地震, 計測震度 6.5)

さが高くなるにしたがい応答塑性率は低下している。前述のとおり、O-06とA-08、O-12とA-16のモデルでは、高さがそれぞれほぼ等しく、スケルトンカーブもほぼ一致している。そのため、図-8の応答塑性率にも同様の傾向が見られる。

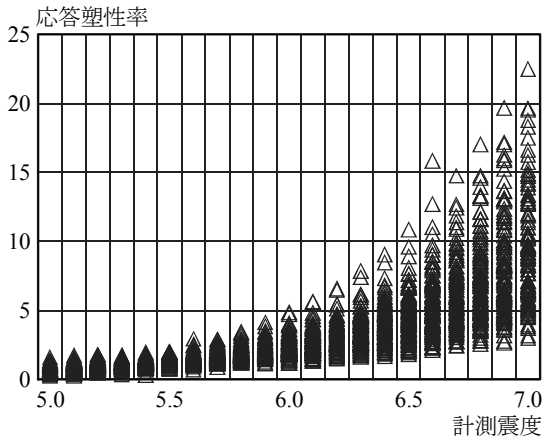


図-7 a) 計測震度と応答塑性率の関係 (O-06)

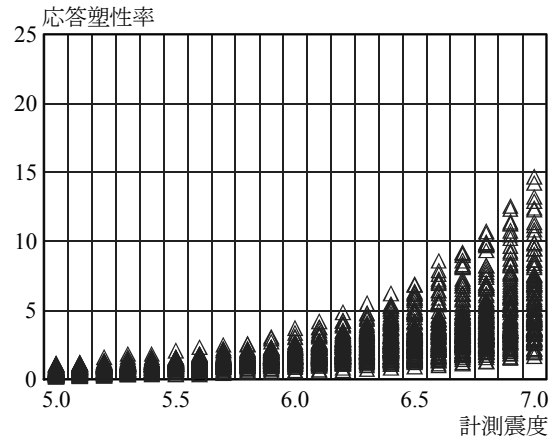


図-7 d) 計測震度と応答塑性率の関係 (A-16)

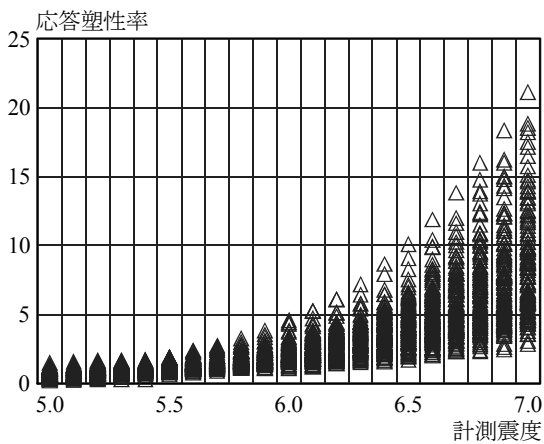


図-7 b) 計測震度と応答塑性率の関係 (A-08)

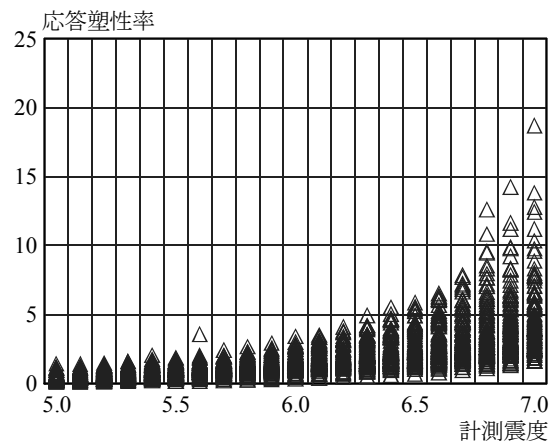


図-7 e) 計測震度と応答塑性率の関係 (A-24)

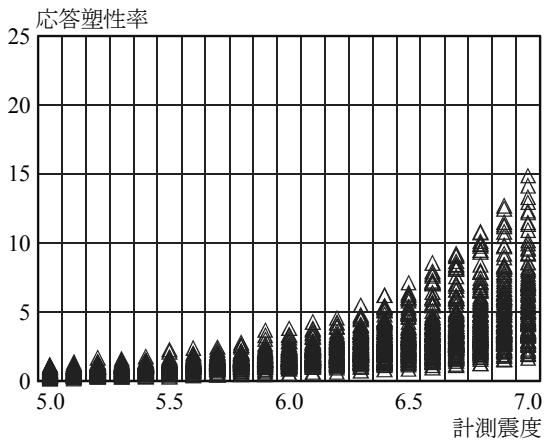


図-7 c) 計測震度と応答塑性率の関係 (O-12)

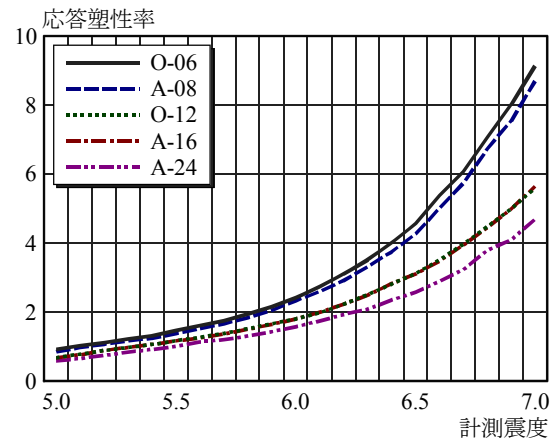


図-8 計測震度と応答塑性率の関係 (平均値)

前述のとおり、本解析では解析中の破壊判定は行っていない。その代わりとして、表-2に示した設計許容変形に対応する塑性率と応答塑性率とを比較することで破壊確率を算定することとした。破壊確率は、各計測震度で行った119波形の解析において、応答塑性率が設計許容変形に相当する塑性率を超えた割合と定義した。破壊判定の基準として層間変形角1/100を用いた場合、1階柱脚の塑性率2を用いた場合の両方について算定した

破壊確率を図-9に示す。破壊確率はおおむね建物高さとともに低下する傾向にある。ただし、層間変形角1/100を用いた場合にはO-06よりもA-08が、またO-12よりもA-16が破壊確率が高いのに対し、1階柱脚の塑性率2を用いた場合には逆の傾向が見られる。

累積エネルギー（地震動作用終了時の履歴エネルギー値）を等価質量で除した値について、図-8と同様、計測震度ごとの119の値の平均をとったものを図-10に

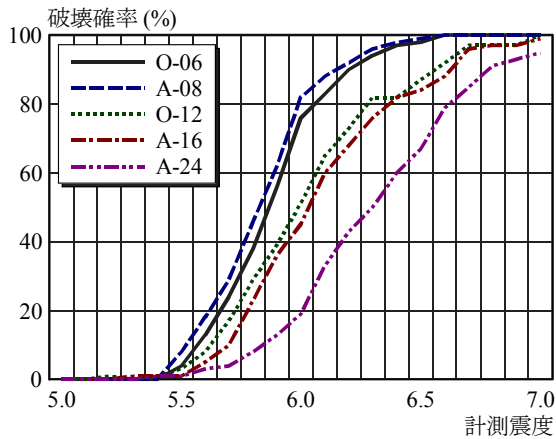


図-9a) 計測震度と破壊確率の関係
(層間変形角 1/100)

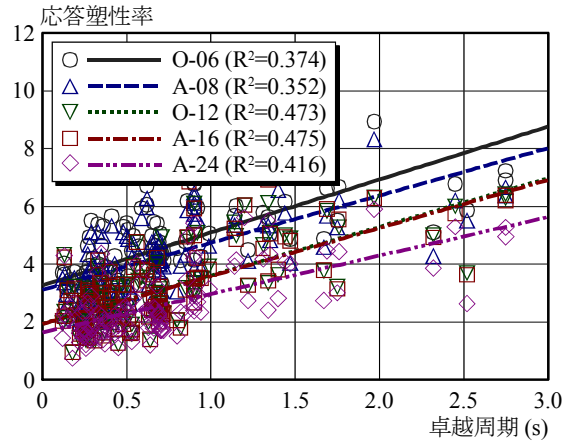


図-11 地震動卓越周期と応答塑性率の関係
(計測震度 6.5)

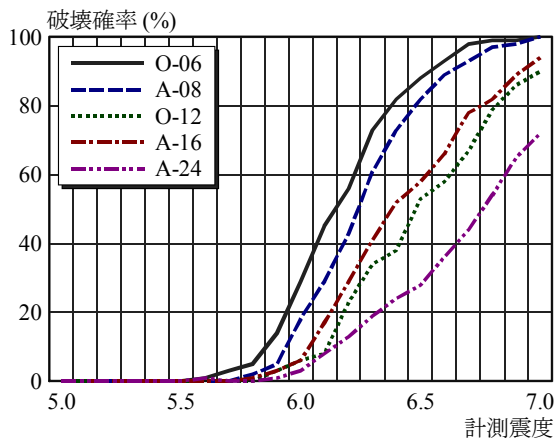


図-9b) 計測震度と破壊確率の関係
(1階柱脚の塑性率2)

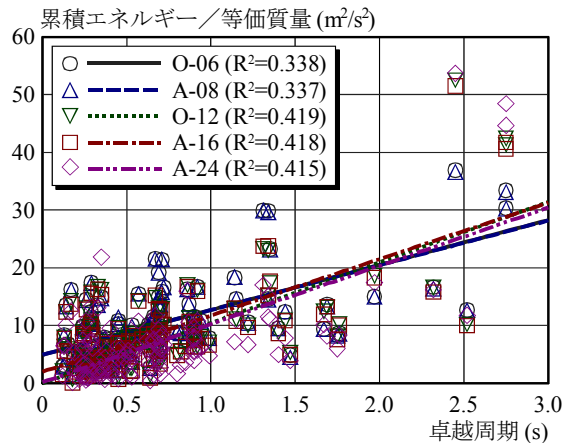


図-12 地震動卓越周期と累積エネルギーの関係
(計測震度 6.5)

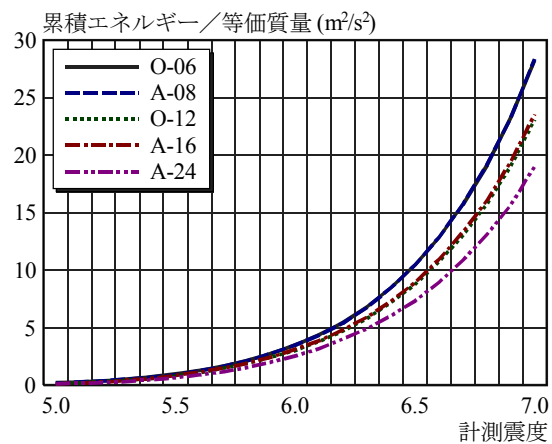


図-10 計測震度と累積エネルギーの関係
(平均値)

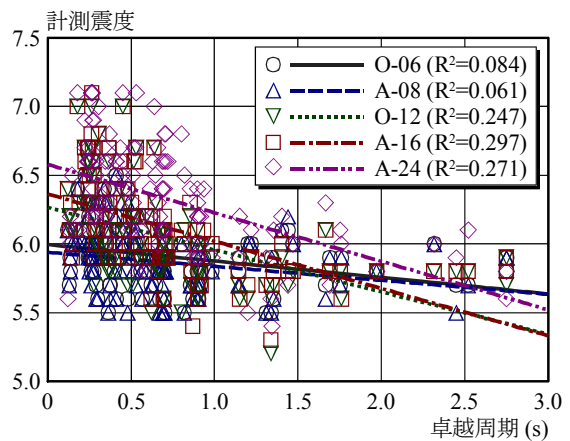


図-13 地震動卓越周期と破壊時計測震度の関係
(層間変形角 1/100)

示す。建物の用途によらず、建物高さとともに累積エネルギーは低下しているが、その低下幅はさほど大きくないことが分かる。

5.2 地震動の周期特性の影響

図-2に示した地震動波形の卓越周期をもとに周期

特性の影響をしてみる。計測震度 6.5 における各建物モデルの応答塑性率および累積エネルギーを、図-11、図-12にそれぞれ示す。図中には、点で示した解析値のほか、建物モデルごとに求めた回帰直線と相関係数の2乗 R^2 も併せて示してある。値のばらつきは大きい

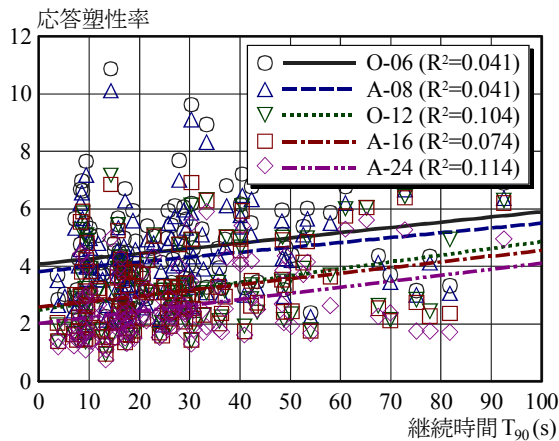


図-14 地震動継続時間と応答塑性率の関係
(計測震度 6.5)

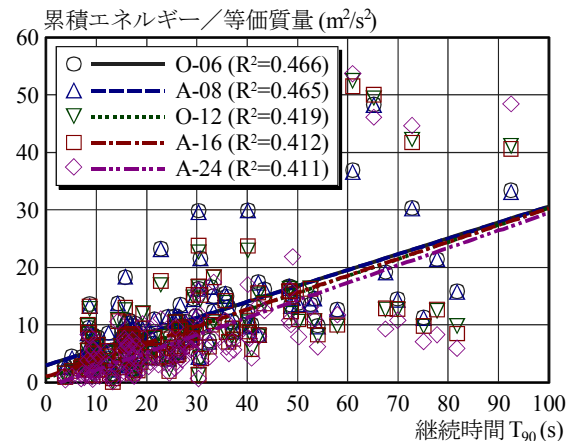


図-15 地震動継続時間と累積エネルギーの関係
(計測震度 6.5)

卓越周期が長くなるにしたがい、応答塑性率、累積エネルギーとともに上昇する傾向にあることが分かる。その上昇の割合は建物によらずほぼ一定である。

119の地震動波形ごとに求めた、層間変形角 1/100 を基準として破壊が生じた最小の計測震度を図-13に示す。計測震度 7.0 でも破壊しなかった場合は、便宜的に 7.1 としている。また、直線で示したのは建物モデルごとの回帰直線である。卓越周期は長くなるにしたがい破壊が生じる計測震度が低下する傾向にあることが分かる。ただし、その程度は建物の高さにより異なり、高い建物ほど低下の割合は大きくなっている。

5.3 地震動の継続時間の影響

続いて、図-2に示した地震動波形の継続時間 T_{90} の影響を見る。計測震度 6.5 における各建物モデルの応答塑性率および累積エネルギー、層間変形角 1/100 を基準として破壊が生じた最小の計測震度を、図-14～図-16に示す。いずれの図でも、直線は建物モデルごとに求めた回帰直線と相関係数の 2 乗 R^2 を示している。また、図-16において、計測震度 7.0 でも破壊しなかった場合は 7.1 とした。

継続時間 T_{90} が長くなるにしたがい、応答塑性率、累積エネルギーとともに上昇する傾向にあり、その上昇の割合は建物によらずほぼ一定である。また、継続時間 T_{90} が長くなるにしたがい、破壊が生じる計測震度が低下する傾向にあり、建物が高くなるほど低下の割合は大きくなっている。

6. まとめ

本研究では、RC 建物を対象として地震応答解析を行い、地震動の周期特性や継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、地震動の卓越周期、継続時間が長くなるにしたがって、応答塑性率や履歴エ

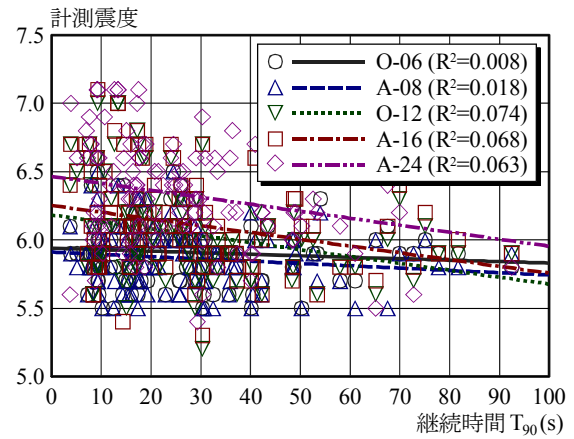


図-16 地震動継続時間と破壊時計測震度の関係
(層間変形角 1/100)

ネルギーが増大し、破壊に達する計測震度が低下することが確認できた。

今後は、道路橋や鉄道橋などの都市内高架橋に対しても地震応答解析を行い、地震動の周期特性や継続時間がその損傷度、被災度に及ぼす影響について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 太田外氣晴, 座間信作: 巨大地震と大規模構造物 — 長周期地震動による被害と対策 —, 共立出版, 2005
- 2) 青山博之: 鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法, 技報堂出版, 1990
- 3) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤震動解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1994