

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560528

研究課題名（和文）中低層弾塑性構造物の最大地震応答と相関の高い地震動強さの指標に関する研究

研究課題名（英文）Study on the strength index of strong motions related to the maximum response of the low and middle rise inelastic buildings

研究代表者

松村 和雄 (MATSUMURA KAZUO)

鹿児島大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：50038014

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は地震動を受ける中低層弾塑性構造物の最大応答と相関の高い地震動の強さの指標を明らかにすることである。固有周期が短い建物の最大応答は最大地動加速度と相関が高く、固有周期が長い建物では最大地動速度が相関が高いとされているが、それらの指標で基準化した地震動による最大応答は大きなばらつきがある。地震動をパルスと見なしてその時間積分である力積の最大値が地震動の強さの指標として最大応答との相関が高くて固有周期に依存しない指標であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to find out the strength index of ground motion related to the maximum response of low and middle rise inelastic buildings. It is known that the maximum response of the buildings of short natural period is related to the peak ground acceleration and that of the building of the longer natural period is related to the peak ground velocity, but the maximum response values by the ground motions normalized by these indexes show large randomness. The ground motion is assumed as the sequence of pulses and the maximum impulse defined as the time integral of the pulse is strongly related to the maximum response and is not related to the natural period.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：建築構造物の地震応答の特性、建築構造物の耐震設計、建築構造物の地震荷重  
 科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：弾塑性構造物、地震動の強さ、力積、時刻歴応答解析、最大地震応答、塑性率

## 1. 研究開始当初の背景

建築物の耐震設計において、高い安全性が求められている超高層建築などに対しては地震動を用いた時刻歴応答解析が用いられ

ており、応答解析の信頼度が高い。一方、一般の中低層の建築物に対しては許容応力度等計算や保有耐力計算が用いられており、これらは地震動の応答スペクトルに基づい

てはいるが等価静的な解析法であり、建物固有の振動特性が反映しにくいものである。

計算機が普及した現状においても応答計算法として信頼度の高い時刻歴応答解析が中低層建築で利用されないのは、使用する地震動の選定が難しいためである。建築物の固有周期が 0.5 秒以下の加速度応答スペクトルが一定となる領域では地震動を最大地動加速度で基準化した方が最大応答との相関が高いが、固有周期がそれ以上となる速度応答スペクトルが一定の領域では地震動を最大地動速度で基準化した方が最大応答との相関が高いことが知られている。そのため、固有周期によって地震動を基準化する指標が異なるという問題と 0.5 秒付近の固有周期に対してどちらを使うのがよいかという問題に加えてこれらの指標で基準化した地震動による最大応答が地震動により 2 倍程度異なるようにばらつきが大きいことが問題である。

今後はこれらの問題を解決して一般の中低層建築の耐震設計にも信頼度の高い時刻歴応答解析を導入することが必要である。そのためには建築物の最大応答と相関が高く、固有周期にも依存しない地震動の強さの指標が何かを明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

建築物の最大応答と相関が高い地震動の強さの指標を明らかにするには、地震動を受ける構造物の最大応答が何に依存しているのかが問題となるが、現行の耐震設計の地震荷重の基礎となっている加速度応答スペクトルは地震動を受ける建築物の全継続時間での最大応答であるためにこの点が曖昧で明確ではない。

地震動を受ける建築物の応答は共振の影響が大きいためほぼサイン波のような単純な波形をしている。一方、地震動をパルス波形の連続であると考えるとその最大のパルスが最大応答に関係しているのではないかと考えられる。地震動が建築物に作用するときの等価荷重は質量と地動加速度の積で表されるが、質量は一定で変化しないのでパルスの時間積分を「力積」と定義すれば、最大力積による応答と時刻歴応答解析による最大応答との関係が問題となる。

最大力積と弾塑性構造物の最大応答との相関を調べた既往の研究で、地震動の強さを表す指標としてこれまで多くの研究で用いられてきた、最大地動加速度、最大地動速度、最大地動変位、応答スペクトル、地震動の自乗平均値などと比べて、最大力積に基づいた指標との相関が高いことが解った。

しかし、この研究では最大力積だけでは固有周期が 0.5 秒以下では相関が高くない

ため最大加速度によって補正した修正最大力積値を用いていることと 100 個以上の地震動を用いたときの相関係数が 0.8 程度でそれ以上大きくできないことが課題として残された。

そこで、本研究の目的は、これらの改善をするために弾塑性構造物の最大応答がどのようなメカニズムで発生しているかを明らかにして、より適切な地震動の強さの指標を見いだすことと、その指標で基準化した多くの強震動を用いて時刻歴応答解析した弾塑性構造物の最大応答のばらつきを小さくできるかを明確にすることである。

## 3. 研究の方法

研究の対象とする建築物は一般の中低層建物であるので 1 次固有周期については 1.0 秒以下に設定し、弾塑性構造物を対象としているので、最大応答については無次元量として塑性率で評価することにする。なお、弾塑性構造物では塑性率よりも累積塑性変形倍率で評価する方が適切な場合が多いが、その値が極端に大きくなければ塑性率と累積塑性変形倍率との間には高い相関があることと耐震設計では大きな累積塑性変形倍率を対象とすることは少ないので塑性率を構造物の性能を表す指標とする。

最初に、弾性 1 自由度系と弾塑性 1 自由度系のモデルを用いて最大力積と最大応答の基本的な特性を把握することにした。力積が大きいパルスの形状がどのようなものかを明らかにして、それを半正弦波パルスで近似することの妥当性を検討した。

次に、半正弦波パルスとしたときの最大応答の解析解と時刻歴応答の応答との関係を調べた。これについては弾性 1 自由度系のモデルを用いたが全ての地震動で最大力積によって最大応答が生じていないことが明らかになったため、力積の大きい値 10 個と応答の大きい値 10 個についてこれらがどのような関係にあるかを詳細に調べることにした。

解析解については、固有周期が 0.5 秒以上の場合についてはパルス後に最大応答になるので力積を衝撃荷重と見なした解析値で十分評価できるが、0.5 秒以下の短周期の場合には最大応答がパルスの作用中に生じるのでそれらを評価できる解析値を用いた評価についても検討してより正確な解析値との関係を調べることにした。

一方、最大力積で基準化した地震動を用いたときの最大応答のばらつきについては 1 層モデルの 1 自由度系、3 層モデルの 3 自由度系、5 層モデルの 5 自由度系で検討することにして、応答限界となる塑性率を 2.0 と 5.0 に設定して検討することにした。

解析に用いる地震動については、国内外で記録された3m/s/s程度以上の強震動を対象として1つの地震で約10個程度として全体で120個の地震動を用いることにした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 地震動の力積に基づいた指標と弾塑性構造物の損傷との相関関係

弾塑性構造物の最大応答との相関が高く、損傷を適切に評価できる地震動の強さの指標として何が適切かを明らかにするために以下の解析を行った。

地震動は最大加速度がおおよそ3m/s/s以上である国内外の強い地震動を用いることとして、強震ネットで観測された地震動を中心に総計120個の水平地震動を用いた。その内訳は1997年鹿児島県北西部地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、1994年ノースリッジ地震、1999年台湾集集地震、2003年宮城県沖地震、2004年中越地震、2007年能登半島沖地震で、これらについてはそれぞれ約10個の地震動を1つのグループとして、この他に既往の耐震設計で用いられてきた1940年EL Centoや1995年神戸気象台や1968年八戸などで観測された12個の地震動を1グループとして扱い、全地震動の平均的な特性とともに各グループの平均的な特性についても解析した。

建物モデルは基礎的な解析には弾塑性1自由度系モデルを用い、多層建物の解析では3層と5層のモデルを用いた。弾塑性構造物の復元力特性としてはバイリニア型として多層建物では層の重量は同じとして層剛性については層せん断力係数がAi分布に従うモデルとした。弾性時の1次固有周期は中低層の建築物を想定しているため0.1秒から0.1秒刻みで1.0秒までとした。

地震動強さの指標とそれによる最大応答の推定値は、(1)最大力積を指標としてそれを衝撃荷重と見なしたときの最大応答、(2)最大加速度とパルスの継続時間の積の1/4の値と最大力積の小さい値とした修正最大力積値を指標としてそれを衝撃荷重と見なしたときの応答、(3)最大力積を指標として同じパルスが連続した場合の最大応答、について弾塑性構造物の損傷との相関関係を調べた。

構造物の損傷の大きさについては最大応答のレベルを調整するために限界となる塑性率を2の場合と5の場合として、その塑性率に達するのに必要とする降伏せん断力の大きさとの相関を調べた。

(1)の場合は固有周期が0.4秒以下の場合には固有周期が小さくなるほど相関係数が小さくなり、0.2秒では0.5以下と相関が低い固有周期が0.5秒以上では相関係数が

0.8程度と大きい。この特性は最大地動速度の場合とよく似た傾向である。

それを修正した(2)の場合は、固有周期の全域で相関係数が0.8程度と高い相関を示す。芸予地震など震源によっては固有周期によって大きなばらつきが見られる。

更に改善するために(3)の指標について検討したが、(2)の場合よりも相関係数が大きくなる場合も見られたが全体的には(2)の場合と同じような傾向であり、相関係数を0.9に改善することはできなかった。

限界塑性率については2の場合と5の場合を比較したが相関係数の大きな違いは見られなかった。

また、多層モデルとして3層モデルと5層モデルを解析したが1層モデルと比べて相関係数の大きな違いは見られなかった。

これらの結果から、相関係数を上げるには全地震動の平均的な特性ではなくて個々の地震動による具体的な力積と最大応答の関係性を調べる必要があるという結論になった。

##### (2) 地震動強さの指標と1自由度系の最大応答との関係

地震動強さの指標と最大応答のばらつきが大きい原因を明確にして、それを反映できるように指標を用いないと両者の相関係数を上げることはできないので、1自由度系の弾塑性モデルを用いて応答の性状を調べた。

耐震設計に良く用いられるグループの地震動を用いて調べた結果、最大力積の直後に応答は大きくなるが必ずしも最大応答になるとは限らないことが解った。両者が直接関係していると判断される場合は5割以下で、固有周期が0.4秒以下では両者が関係あると思われる例が多い傾向が見られ、固有周期が0.6秒以上では両者の相関が低下する傾向があることが解った。

また、最大力積の形状についても調べたが、その結果、半正弦波と同じような波形をした場合はほとんどないこと、パルスの中にピークは1つある場合が大半であってそれらは半正弦波で近似できると見なすことができること、3つのピークがある1968年八戸の記録や2つのピークがあるTaftの記録など複数のピークがある場合もいくつかあるがこの場合は半正弦波の近似は必ずしも適切でないことが解った。

そこで、力積が大きい上位10個と構造物の変位応答が大きい上位10個についてそれらの関係を具体的に調べた。その結果、10番目の力積と最大力積の比は、1994年釧路沖地震のように9割となるように大きなパルスが連続している場合と、1995年兵庫県南部地震のように1割のように大きなパル

スが少ない場合があり、地震動によって異なっているのは地震動の継続時間を反映していると思われるが、平均的には10番目で約半分になることが解った。なお、また、その発生時刻についても、1994年八戸のように2秒程度の範囲に収まる場合もあればTaftのように10秒間の間に広がっている場合もあることが解った。

力積と最大応答の関係についてはそれぞれの地震動による大きなパルス発生の特性などに依存するために複雑で地震動によっても固有周期によっても異なるために一般的な傾向を見いだすのは難しいが、固有周期を0.2秒から1.0秒の範囲での特性として、最大力積の値の9割の範囲にある大きな力積によって最大応答の8割以上が決まっている場合が半分以上は占めていることが解った。そのため、最大力積の直後に最大応答にならないとしても最大力積に近い大きな力積によって最大応答が決まる場合が多いことから最大力積で評価することは適切であると思われる。

しかし、最大力積を半正弦波の衝撃荷重とした推定値と時刻歴応答解析による応答値とは同じような値にはならず、目標塑性率が2の場合は推定値が2割ほど小さい傾向が見られた。このことは、最大力積より小さな力積で最大応答になっていることと最大応答は単一のパルスによる応答として決まるのではなく、そのときまでの応答履歴にパルスによる応答が加算されることなどの影響と推測され、簡単な方法で最大応答の推定が難しいことを示す結果となった。

### (3) 最大力積による最大応答の推定値の改善

最大力積の直後に最大応答になるとは限らないことが明らかになったが、最大力積に近いパルスと最大応答に近い大きな応答とは関係があることから最大力積によって適切に最大応答の推定ができれば最大力積と最大応答の相関は大きくなると考えられる。

固有周期が0.4秒以下の短周期で最大力積の相関が低かったのは最大力積を衝撃荷重と見なしたことによるためと考えられるので、パルスの中で最大応答になる場合も含めて推定することにした。耐震設計によく用いられるグループの地震動を用いて調べた結果、短周期領域では最大力積と最大応答との関係は良くなり、最大力積のパルスのときに最大応答になっている場合が多くあることが解った。しかし、固有周期が大きな領域では両者が一致する場合は非常に少ないことが解った。最大力積による最大応答と時刻歴応答解析の最大応答との比

は0.8~0.6程度の場合が多いこと、全体としては短周期側では比が大きくて周期が長くなるに従って比が小さくなる傾向があることが解った。

### (4) 地震動の強さの指標で基準化した地震動による多層建物の最大応答のばらつき

最大力積と最大地動加速度と最大地動速度の3つの地震動の強さの指標で基準化した120個の地震動を用いて多層建物の最大応答のばらつきを調べて比較した。建物のモデルは前述したものとして最大応答は特定の階ではなくて最も大きな値となる階の値とした。目標とする限界塑性率は大性範囲の1.0と2.0と5.0になるようなレベルを設定することにしたが、地震動の違いで最大応答は2倍程度異なるのでレベルの設定は平均的な値とすることにした。指標による塑性率の違いを避けるために最大応答の平均は3つの指標で同じになるように指標のレベルを調整した。

また、最大応答は正規分布よりも対数正規分布に近い性状を示すことからそのままの値での分布についても算定したが、対数をとった値の分布について平均値と標準偏差を求めてばらつきの程度を検討した。

復元力特性がバイリニアモデルで変形は無限大に可能となるモデルを用いたために、地震動の強さが大きい場合には応答が非常に大きくなるために、標準偏差の数値は余り参考にはならないが、以下の結果が得られた。

①最大応答加速度に対しては、最大力積では全周期で0.1程度で、最大地動加速度では0.4秒以下では0.2以下であるが1.0秒では0.4と大きくなり、最大地動速度では0.2秒で0.4、0.6秒以上では0.1と最大力積の場合と同じになる。

②最大応答速度に対しては、最大力積では0.2秒では0.3であるが、それ以上の周期では0.2程度で、最大地動加速度では0.3秒では0.2程度であるが1.0秒では0.6と大きくなり、最大地動速度では0.2秒で0.6と大きい、0.6秒以上では0.2と最大力積の場合と同じになる。

③最大応答変位に対しては、最大力積では全周期において0.4程度で、最大地動加速度では0.2秒では0.4程度であるが1.0秒では1.0と大きくなり、最大地動速度では0.2秒で0.7と大きい、0.4秒以上では0.4と最大力積の場合と同じになる。

これらの結果から最大力積による基準化が固有周期によらないでほぼ同じようなばらつきを示すこと、比較した3つの指標では一番小さなばらつきを示すことが解った。これより、固有周期が小さな中低層弾塑性構

造物に対して時刻歴応答解析を適用する場合には、地震動の基準化に用いる地震動の強さの指標として最大力積を用いれば地震動によるばらつきを小さくすることができる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

松村 和雄、「地震動の最大力積と 1 自由度系の最大応答変位との関係」、日本建築学会九州支部研究報告、長崎総合科学大学 (長崎県), 2010 年 3 月 7 日

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松村 和雄 (MATSUMURA KAZUO)

鹿児島大学・理工学研究科 (工学系)・教授

研究者番号 : 50038014