木造建物の最大変位応答に対する地盤特性定数の変動の影響

INFLUENCE OF THE GROUND PROPERTY VARIATION TO THE MAXIMUM DISPLACEMENT RESPONSE OF JAPANESE WOODEN HOUSES

山田 耕 司*
Koji YAMADA

The seismic breakdown probability of a building requires several parameters: the event probability of earthquakes, the variation of ground properties, and the seismic performance variation of a given building. In this paper, we discuss the influence of the ground property variation to the maximum displacement response of Japanese wooden houses. Monte Carlo simulation is employed to consider both the variation of ground properties and the seismic performance variation of a given building. As results, the variation coefficient of surface subsoil amplifying characteristic is 0.3 - 1.0 under 5.0Hz. The variation coefficient of surface layer has a large effect on the estimate values of maximum displacement responses by the result of Monte Carlo simulation.

Keywords : Traditional timber wooden house, Ground Property, Monte Carlo simulation, Maximum displacement response
軸組木造住宅, 地盤特性, モンテカルロシミュレーション, 最大変位応答

1. 序

本研究では、個々の木造住宅に対する地震被害関数の創出を目的として、地盤増幅特性の木造住宅の最大変位応答への影響を検討する。これまでの地震被害関数は、実地震災害の被害調査から統計的に導き出されている。これは、特定地域、特定建物群に対する特定地震動に対する関数であり、個別の建物に対する被害関数ではない。一方で、社会的には、建物の証券化が進み、個別の建物の地震被害リスクを検証する必要性が出てきている。以上のことから、サイト特性と建物の耐力特性を加味した地震被害関数作成手法の開発が急務と考えられる。

そこで著者は、既報¹⁾において図1に示す地震被害の発生メカニズムから、建物の耐力特性の変動、および、表層地盤の増幅特性の変動、基盤における地震動波形の非定常振動特性とその発生確率より、建物の被害確率をモンテカルロシミュレーションにより計算する手順を図2のように提案した。この方法では、 α_i の発生確率を持った基盤入力動(E_i)に対して表層の地盤増幅の変動を考慮して1つの基盤入力動あたりMヶの入力地震動(W_j)を作成する。次にこの特定入力地震動(W_j)に対する、対象建物の耐力の変動を考慮した複数の地震応答解析を行い、その最大変位

図1 本報の研究範囲

応答の平均と分散に基づく地震被害関数(例えば正規分布を用いる)を作成し被害確率(β_j)を算定する。従って、 α_i の発生確率を持った基盤入力動(E_i)に対する被害確率は、 $(\sum \beta_j) / M$ で表される。こうして求めた α_i の発生確率を持った基盤入力動(E_i)に対する被害確率の和により、個別建物の被害確率($\sum \alpha_i \{(\sum \beta_j) / M\}$)を推定する。この場合、解決すべき技術的問題は3つに集約される: 発生確率を伴った断層パラメータの設定、地盤物性の変動を考慮し

* 豊田工業高等専門学校建築学科 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology, Dr. Eng.

た表層地盤増幅，耐力変動を考慮した建物応答，である。

以上の課題に対し，既報¹⁾では，表 1 に示す地盤特性および耐力壁の変動組み合わせのうち，耐力変動を考慮した建物被害確率の簡易算定法を検討した．その結果，剛床仮定の下，1 建物に対して，耐力壁の耐力の変動を考慮したモデル 20 例の最大変位応答を計算すれば，被害確率算定に用いても概ね妥当と判断した．そこで本報では，サイトにおける地震動特性のうち“表層地盤における増幅特性定数の変動”（3 節），とモンテカルロシミュレーションを行う際の表層地盤の必要モデル数（図 2 における M，5 節）を検討する．また，建物の耐力特性のうち“木造住宅における耐力壁の耐力特性の変動”も考慮した場合の最大変位応答分布の変動を考察する（6 節）．

図 2 建物の地震被害確率の計算法

表 1 本報の研究範囲

		表層地盤の増幅特性	
		確定値	変動値
耐力壁の耐力特性	確定	—	◎ (5 節)
	変動値	○ (既報 ¹⁾ , 4 節)	一例 (6 節)

2. 各種仮定・使用する既存建物の壁量

2. 1 建物モデルの仮定

本報では，既報^{2),3)}で用いた建物データを用いる．解析モデルは，壁を耐震要素と考えた剛床仮定の疑似 3 次元モデルであり，耐震要素の偏心が考慮されている．また，耐震要素として耐力壁，雑壁を考慮し，その耐力特性に応じた等価せん断バネを仮定した．耐力壁は二つ割筋かい，雑壁は石膏ボード雑壁を想定している．具体的な解析事例を図 3 に示す．図中の数字は，壁倍率を示している．最大変位応答は，変位の水平成分と回転成分から計算した剛床面内での変位応答の最大値である．階高は，2700mm としている．建物質量と回転慣性は表 2 に基づいて計算した．

耐力特性の変動を考慮する際は，既報¹⁾に基づき，1 つの建物平面プランに対して，20 例の耐力壁・雑壁の最大耐力分布の異なる解析モデルを作成した．なお，耐力特性の変動は，耐力壁および雑壁の最大耐力を正規分布で分布するとして，壁長 910mm で設定した各耐力壁・雑壁ごとに最大耐力を設定した．図 4 に図 3 の建物における壁耐力分布の 20 例中の 1 例を示す．図中の壁枚数は，1 建物内に配置される 910mm 毎に区切られた壁枚数を表す．

図 3 壁配置の具体的事例（4 節の計算建物）
（2 階床レベル質量 9500kg，小屋レベル質量 6894kg）

表 2 建物質量の仮定

項目	質量算定仮定*	備考
重い屋根	90 kg/m ²	施行令を参考（軒の深さは 0.75m）
軽い屋根	60 kg/m ²	施行令を参考（軒の深さは 0.75m）
外壁	190 kg/m	サイディング+軸組+ボード内壁
内壁	95 kg/m	ボード内壁+軸組+ボード内壁 （雑壁長は壁実長の 2 倍になる）
床	50 kg/m ²	施行令を参考
積載物	60 kg/m ²	施行令を参考

*：外壁・内壁は壁長さ 1m あたりの質量，その他は床面積 1 m²あたりの質量を表す

図 4 図 3 の建物における壁耐力分布の例（20 例中の 1 例）
（図中の x は，設定された最大耐力の最大耐力平均値に対する比）

耐力壁 1 枚毎に復元力特性の変動を与えるため，次のルールで壁長を分割した．壁実長 910mm 以上の耐力壁・雑壁は，910mm 程度の壁が連続して設置されていると仮定し，次のルールにより複数の

壁に分割した。耐力壁は、壁実長 1450mm 以下を 1 枚の壁と考え、壁実長 1450mm を超える場合は、910mm 毎に壁を分割した（例えば、壁実長 2300mm=910mm+1390mm の 2 枚の壁とする）。実際は壁実長 1800mm の耐力壁も存在したが、本報では壁実長 910mm を標準と考える。雑壁は無開口壁のみを対象とし、垂壁、腰壁は雑壁に算入しない。また、雑壁は大壁形式、外周壁においては片面貼り、内壁においては両面貼りと仮定した。雑壁も、耐力壁の場合と同様に、壁実長 910mm ごとに 1 つの雑壁としてまとめ、端数(900mm 未満)も雑壁として算入した（例えば、壁実長 2300mm = 910mm +910mm +480mm の 3 枚の壁とする）。

減衰定数は、1 次固有周期に対して初期剛性比例 3%と設定した。

2. 2 壁の骨格曲線と復元力特性

図 5 に文献 4)に基づく壁 1m 当たりの骨格曲線、復元力特性を示す。この履歴モデルは文献 3)の Bilinear 型パネと Slip 特性を持つ Tri-linear 型パネの並列パネであり、一方向の最大耐力を越える経験最大変位を正負両方向の変位で共有している。また、除荷時は、第 1 剛性で除荷されるものとしている。

本報では、図 5 中の復元力特性を平均的な復元力特性として用い、壁耐力の変動は所定の変動係数でばらつかせた最大耐力に比例する形で、耐力方向に復元力特性を変化させる。図 5 の設定パラメータを表 3 に示す。各耐力壁の変動は、文献 5)を参考に、最大耐力を平均 8kN 変動係数 0.3 として正規分布で設定最大耐力を生成している。雑壁の耐力分布特性は不明であるが、耐力壁の変動を準用し、変動係数を 0.3 とした。

なお、一般の木造軸組建物では、1 階の最大層間変位が 2 階の最大層間変位に卓越するため、本報で論じる最大変位応答は 1 階のねじり振動も考慮した最大層間変位応答とする。数値積分には、中間加速度法を用い、時間刻み 0.005 秒で計算している。

a) 壁 1m あたりの骨格曲線 b) 復元力特性モデル
図 5 壁 1m あたりの骨格曲線および復元力特性

表 3 耐力壁と雑壁のパラメーター（壁長さ 1m 当たりで表記）

		剛性 (kN/cm)			降伏変位 (cm)	
		K1	K2	K3	Y1	Y2
耐力壁	Bilinear	2.39	0.13		0.38	
	Tri-linear	1.96	0.61	-0.74	2.25	5.63
雑壁	Bilinear	1.08	0.04		0.23	
	Tri-linear	0.81	0.04	-0.07	0.90	4.50

2. 3 使用する既存建物の充足率

本建物群は既報⁷⁾で用いた 2 階建て在来軸組構法木造住宅の内の 208 棟である。本報では、X,Y 両方向を個別に計算する。従って、

計算サンプル数は 416 となる。本報で使用した建物充足率（＝耐力壁量/表 4 の所有有効壁量）の分布、耐力壁の壁量より算定した 1 階偏心率の分布を図 6 に示す。1 階充足率の平均は 1.67, 2 階充足率の平均 1.90, 1 階偏心率の平均は 0.16 である。また、図より、1 階充足率より 2 階充足率が高いこと、1 階偏心率と 1 階充足率に相関が低いことが分かる。以下、1 階充足率のことを充足率と呼ぶ。

表 4 所有有効壁長(m)⁶⁾

	1 階	2 階
軽い屋根	$0.11 A_1 + 0.18 A_2$	$0.15 A_2$
重い屋根	$0.15 A_1 + 0.18 A_2$	$0.21 A_2$

A_1, A_2 : それぞれ 1 階, 2 階の床面積 (m²)

a) 充足率の分布 b) 1 階充足率と偏心率の関係
図 6 使用した建物の充足率と偏心率の分布

3. 入力地震動

3. 1 表層地盤の設定

地盤モデルは、大崎ら⁸⁾が我が国都市地域の地盤を類型化して作成した沖積層 6 種 (N 値で記載、表 5 参照) を使用する。N 値と Vs の関係は、今井⁹⁾の示した次式を用いる。

$$\text{粘性土 : } V_s = 102N^{0.292} \quad (1)$$

$$\text{砂質土 : } V_s = 80.6N^{0.331} \quad (2)$$

結果として、表 5 のせん断波速度 V_s (m/s) を基本値として用いる。

せん断波速度の変動は、文献 10) を参考に V_s の変動係数 0.3 とし、 V_s の分布関数は正規分布を仮定した。その上で、各々の表層地盤種別毎に 100 枚の地盤データを作成した。

表 5 表層地盤の設定

沖積層種別 ⁸⁾	層厚 (m)	土質	N 値	換算 V_s (m/s)
A1	7.0	砂質土	10	172.7
		基盤	40	
A2	9.5	粘性土	2	124.9
		基盤	40	
A3	5.5	砂質土	12	183.5
	11.0	粘性土	2	124.9
		基盤	45	
A4	4.5	砂質土	12	183.5
	10.0	粘性土	2	124.9
	6.5	砂質土	6.5	149.8
		基盤	50	
A5	8.5	粘性土	2	124.9
	7.5	砂質土	20	217.3
	6.0	粘性土	10	199.8
		基盤	45	
A6	5.5	砂	12	183.5
	10.0	粘性土	2	124.9
	4.5	砂	25	233.9
	6.0	粘性土	10	199.8
		基盤	50	

3. 2 地盤増幅計算時の設定

地盤増幅特性の計算には、吉田の DYNEQ¹⁾を用いる。材料特性は旧・建築基準法告示 1457 号とし、等価線形化法 (SHAKE) で計算している。単位体積重量は、表層地盤で 1.7t/m³、基盤で 2.0 t/m³ としている。Cut-off 振動数は 10Hz としている。

工学基盤への入力動は、本来地震断層を想定すべきであるが、本報では、表層地盤特性の最大変位応答への影響を考察するため、応答スペクトルの安定した 80%に低減した BCJ-L2 波を解放基盤入力として設定した。なお、地震動レベルの最大変位応答への影響を検討するため、沖積層種別 A5 に関してのみ、40%に低減した BCJ-L2 波 (レベル 1 地震動を想定)、120%に増加させた BCJ-L2 波 (過大入力を想定) を入力し表層での入力地震動を作製した。

3. 3 地盤増幅特性

地盤増幅特性 (特性図中の太線は表 5 の換算 V_s より計算、細線は変動を考慮した 100 事例中の 10 事例) および (5, 10, 20, 50, 100 波形に対する) 振動数毎の変動係数を図 7 に示す。振動数毎の変動係数は、変動を考慮して作成した 100 ケの地震動より計算している。図中の太線は、表 5 の換算 V_s より計算した増幅特性である。層数が少ないほど卓越振動数が大きく変動することが分かる。しかし、振動数毎の変動係数は層数が多いほど大きくなる傾向を示している。また、全ての表層地盤において、2Hz~4Hz 間で振動数に比例して変動係数が増大していることが分かる。

4. 壁耐力の変動を考慮した場合の最大変位応答の変動

建物の壁耐力変動の最大変位応答への影響を検討するため、図 7 中の太線の増幅特性 (変動を考慮しない場合の増幅特性) を考慮した地震動で最大変位応答を計算した。1 棟の壁配置に対して 100 事例計算した最大変位応答の変動係数を図 8 に示す。地震動により多少の変動はあるものの、変動係数は 0.3 以下となっている。また、建物の壁量充足率にほぼ無関係であることも分かる。これは、既報 12)の結果とも同じ傾向である。

5. 地盤増幅特性の変動の影響とサンプル数の検討

5. 1 地盤増幅特性の変動と最大変位応答の変動係数の関係

地盤増幅特性変動の最大変位応答への影響を検討するため、壁の耐力特性を確定値 (図 5、表 3 の特性) として、図 7 の地盤増幅特性を持つ地震動 100 ケに対する応答計算を行った。地震動 100 ケに対する最大変位応答の変動係数を図 9 に示す。基盤入力動の大きさの影響を見るために、沖積層 A5 のみ基盤入力動 (80%に低減した BCJ-L2 波) の大きさを 50%,150%に変化させた場合を計算した。図より、層厚が薄く層数が少ない沖積層 A1,A2 の場合は、最大変位応答の変動係数が 0.3 以下程度であり、壁耐力の変動を検討した場合と同程度の最大変位応答の変動が予測される。一方、層厚が厚く層数が増えた他の場合には、最大変位応答の変動係数が 0.5 を超える場合が多くなる。特に沖積層 A3 の場合には変動係数が 1.0 近傍の場合が生じている。また、沖積層 A5 では、基盤入力動の増加に伴い変動係数が大きくなる傾向がある。結果として、最大変位応答と変動係数の関係は、表層地盤、基盤入力動の大きさにより異なり、一定の傾向はないと言える。

図 7 地盤増幅特性および変動係数
(N5,N10,...,N100 はサンプル数 5,10,...,100 を示す)

5. 2 地盤増幅特性のサンプル数の検討

本節では、検討すべき地盤増幅特性のサンプル数を検討する。先ず、図3建物の最大変位応答分布への地盤増幅特性サンプル数の影響を検討する。図10に地盤増幅特性サンプル数の図3建物の最

大変位応答分布への影響を示す。100事例の最大変位応答分布を正解として比べると、40事例以上の最大変位応答分布は、ほぼ同程度の分布を示すことが分かる。従って、図3の建物では、地盤増幅特性サンプル数を40事例もしくは50事例にすれば効率的と言える。

図8 建物耐力の変動に起因するの最大変位応答の変動係数

図9 地盤増幅特性の最大変位応答への影響

図10 地盤増幅特性サンプル数の最大変位応答分布への影響
(図3の建物、沖積層A5、サンプル数100,50,40,30,20,10の場合)

次に 416 ケの建物の最大変位応答の平均値・変動係数の地盤増幅特性サンプル数を変更した場合の変化を検討する。平均値比を地盤増幅特性サンプル数 100 事例の平均値に対するサンプル数 40 もしくは 50 事例の平均値の比、変動係数比を同じく地盤増幅特性サンプル数 100 事例の変動係数に対する比と定義する。図 11, 12 に地盤増幅特性サンプル数の最大変位応答の平均値比・変動係数比への影響を示す。沖積層事例として、図 10 で用いた A5 と比較的サンプル数の影響が大きかった A2 を示す。沖積層 A2 の場合では、サンプル数 40 の平均値比、変動係数比の分布は、サンプル数 50 の場合に比して多少大きい。しかし、図上で判断できるほど明確ではない。

沖積層 A2

沖積層 A5

50 事例/100 事例

40 事例/100 事例

図 11 地盤増幅特性サンプル数の平均値比への影響

沖積層 A2

沖積層 A5

50 事例/100 事例

40 事例/100 事例

図 12 地盤増幅特性サンプル数の変動係数比への影響

そこで、416 ケの建物の平均値比および変動係数比の平均・標準偏差を図 13, 14 に示す。地盤増幅特性のサンプル数の影響は、沖

積層種別、基盤入力動の大きさにより異なるが、概ね地盤増幅特性サンプル数の減少とともに平均値比の平均は 1.0 より外れ平均値比の標準偏差は増大する。また、変動係数比の平均は、表層地盤、サンプル数の影響を複雑に受け、変動係数比の標準偏差はサンプル数の減少とともに増大する。しかし、サンプル数を 40 事例、もしくは、50 事例に決定づける強い証拠性は見られない。

以上の結果を踏まえ、本稿では、地盤増幅特性のサンプル数をより収束する傾向のある 50 事例とすることとした。

図 13 最大変位応答の平均値比

(計算事例 100 例に対する計算事例 30,40,50 例の場合)

図 14 最大変位応答の変動係数比

(計算事例 100 例に対する計算事例 30,40,50 例の場合)

6. 一建物の最大変位応答分布

本節では、耐震要素の耐力特性の変動、および、表層地盤の増幅特性の変動、双方を考慮した最大変位応答の変動を検討する。建物モデルは図 3 とし、既報¹⁾および 4 節の結果より、モンテカルロシミュレーションのサンプル数を 20 事例とした。また、表層地盤は沖積層 A5 とし、前節の結果を受けてモンテカルロシミュレーションのサンプル数を 50 事例とした。以上の建物 20 事例×表層地盤 50 事例=1000 事例の計算結果を図 15 に示す。本計算事例では、建物と表層地盤の変動を同時に考慮した場合(“建物と地盤”)の最大変位応答の分布は、表層地盤の変動のみを検討した場合(“表層地盤のみ”)の最大変位応答の分布に近くなっている。また、最大変位応答の最頻値は、建物と表層地盤の変動を同時に考慮した場合(“建物と地盤”)と表層地盤の変動のみを検討した場合(“表層地盤のみ”)で同値となった。

7. まとめ

本報では、サイトにおける地震動特性のうち“表層地盤における増幅特性の変動”，および、建物の耐力特性のうち“木造住宅における耐力壁の耐力特性の変動”を考慮し、その最大変位応答への影響を考察した。

図 15 地盤特性サンプル数 50 事例，建物サンプル数 20 事例の最大変位応答の分布（図 3 の建物，沖積層 A5 の場合）

その結果，耐力壁耐力特性の変動の影響は，本報で作成した地震動においても既報で用いた地震動による最大変位応答の変動と同程度の値となった．一方，表層地盤における増幅特性の変動を考慮した場合には，表層地盤の設定により大きく異なる最大変位応答の変動が生じた．そこで，本研究の範囲では，モンテカルロシミュレーションを行う際の表層地盤のサンプル数を 50 事例とし，一建物に対しモンテカルロシミュレーション（1000 サンプル）を行った結果，表層地盤増幅特性の変動の影響が推定値の変動の主要因であることが示された．

以上，類型化された沖積層の地盤増幅特性の推定誤差を含んだ最大変位応答分布を検討した．しかし，本提案手法を実用に供するためには，具体的な表層地盤特性を用いて更なる検討を要する．

謝辞

本研究に際し，吉田の公開プログラムを使用した．記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 山田耕司：耐力の変動を考慮した個別木造軸組建物の被害関数生成法，日本建築学会構造系論文集第621号，pp. 97-102，2007. 11
- 2) 山田耕司：木造住宅の保有水平耐力分布とその推定法，日本建築学会技術報告集 第 18 号，pp.91-96,2003.12
- 3) 山田耕司：床剛性と雄壁を考慮した木造軸組建物の最大変位応答分布，日本建築学会構造系論文集 第586号，pp. 131-137，2004. 12
- 4) 河合直人，岡部実，渡辺一正：在来軸組構法耐力壁の耐震性能 その 2 仮動的試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.135-136，1998
- 5) 山田耕司，後藤正美：筋かい耐力壁復元力特性の変動と地震応答の変動，構造工学論文集 Vol. 50. B，pp. 327-333，2004. 3
- 6) 建設省住宅局：木造住宅の耐震精密診断と補強方法，1985
- 7) 山田耕司：愛知県の在来軸組木造住宅の壁量に関する調査研究，構造工学論文集 Vol.46.B，pp.181-188，2000.3
- 8) Y. Ohsaki, O. Sakaguchi : Major types of soil deposits in urban areas in Japan, soil and foundation vol.13, No.2, pp.49-65, 1973
- 9) 耐震地盤調査の計画と管理，酒井運雄，鹿島出版会，p.74
- 10) 長郁夫，趙伯明，香川敬生：増幅スペクトルを評価するための浅部 S 波速度構造のモデル化—大阪湾岸部—，日本地震工学会論文集 第5巻，第1号，pp. 1-16，2005
- 11) 吉田望，末富岩雄（1996）：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業（株）技術研究所報，pp. 61-70
- 12) 山田耕司：耐力の変動が木造軸組建物の耐震性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集 第 599 号，pp. 111-118，2006. 1

（2007年10月17日原稿受理，2008年5月8日採用決定）