

限界耐力計算に基づく木造建物の耐震補強設計への利用を目的とした表層地盤増幅率のデータベース構築

ON THE DATABASE OF SURFACE GROUND AMPLIFICATION TO SEISMIC STRENGTHENING OF WOOD HOUSES BY RESPONSE AND LIMIT STRENGTH CALCULATION

泉 洋輔 - *1 横田友行 - *2
貝谷淳一 - *3

Yousuke IZUMI - *1 Tomoyuki YOKOTA - *2
Junichi KAITANI - *3

キーワード：

限界耐力計算，表層地盤増幅率，データベース構築，木造建物，耐震補強設計

Keywords：

Response and limit strength calculation, Surface ground amplification, Database construction, Wood houses, Seismic strengthening design

In general, response of wood houses during earthquakes is strongly affected by characteristics of surface ground amplification and incident ground motion. Seismic design method and seismic strengthening design method of wood houses based on “Response and Limit Strength Calculation (RLSC)” is developed considering in the excellent deformability of traditional construction system. From the importance of evaluating rational surface ground amplification G_s in RLSC, we constructed the database of G_s using the public open data of surface strata presenting from “Central Disaster Management Council” of Cabinet Office, Government of Japan. Some remarks are pointed out with utilizing this database, and investigated about effect of various evaluating G_s on wood houses response.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降最近に至るまで全国的に地震活動が活発化している。さらに、近い将来起こると予想されている東海、東南海、および南海地震の発生確率が公表される状況のもと、木造建物の耐震補強に関しては、これまでの耐震化率を今後10年間で90%にまで引き上げることが国の方針として打ち出されており、その実現が急務となっている。

一般的に、木造建物の基礎の根入れは浅く地表面基礎となる。そのため入力との相互作用である入力損失は期待できず、地表面での地震動がそのまま設計対象となる。したがって、木造建物の地震時応答は地盤増幅特性および入射地震動特性が大きく影響するものと考えられる¹⁾。

限界耐力計算(以下、限耐法)に基づく木造建物の耐震設計法・耐震補強設計法²⁾は、地域特性が反映された軸組構法や伝統構法を対象に、そのすぐれた変形能力の特性を活かすことを目的として開発されたものであり、すでに実用化されている。この設計手法を適用する場合、設計用入力地震動である地表面の加速度応答スペクトル(以下、 S_{as})の算定には、表層地盤の増幅率(以下、 G_s)を考慮する必要がある。これには、建設地の地盤データに基づいて算定する告示第1457号第7第一号(以下、精算法)と、地盤種別ごとに規定されたものを用いる第二号(以下、簡略法)の2通りの方法がある。

木造建物の耐震補強においては、物件ごとに地盤調査が詳細に行われることはないものと推定される。このため、 S_{as} の設定には簡略法を適用することになるが、後述するように、簡略法で算定される S_{as} は1秒を超えるあたりから精算法より大きく評価される傾向

があり、このことが木造建物の応答変位、補強材の数量およびその配置計画など耐震性能評価結果の判断に大きな影響を及ぼす要因となっている。一方、精算法を適用する場合には、当然ながら地盤情報が必要となり、上記のような状況に対処する方法として、周辺に建つ建物の地盤データを入手することや、大都市圏を対象として刊行されている地盤図を利用することなどが考えられる。これらの方法では N 値と土質種別から S 波速度を推定した既往の回帰式を利用することになる。また、数は限定されるが全国的に整備されている防災科学技術研究所のK-Net(強震ネットワーク)やKik-Net(基盤強震観測網)の地盤データの利用も考えられる。

以上のような背景より本報告は、限耐法による木造建物の耐震補強設計において建設地の地盤増幅特性を反映した S_{as} を用いることの重要性に着目し、内閣府に設置されている中央防災会議³⁾から公開されている地盤データ(以下、公開データ)を利用して精算法による G_s を算定し、そのデータベース構築を試みたものである。

2. 限耐法の表層地盤増幅率の特性

限耐法において多層成層地盤の G_s は、図1に示すように各地層の非線形性を考慮して地盤の1次固有周期 T_1 が収束する条件によって設定される等価2層地盤から求められる。ここで表層地盤の G_s は、解放工学的基盤面に対する地表面の変位振幅比で定義される。図1において表層地盤の S 波速度 V_{se} 、減衰定数 h_e 、質量密度 ρ_{se} は等価物性値である。告示式から明らかなように、等価2層地盤の G_s は、表層地盤の T_1 、波動インピーダンス比および表層地盤の減衰定数 h_e から一義的に決まることになる。なお、告示では減衰定数 h_e

*1 ㈱能勢建築構造研究所・博士(工学)
(〒541-0048 大阪市中央区瓦町3-3-7)

*2 ㈱能勢建築構造研究所・取締役

*3 ㈱能勢建築構造研究所・修士(工学)

*1 Nose Structural Engineering Inc., Dr. Eng.

*2 Director, Nose Structural Engineering Inc.

*3 Nose Structural Engineering Inc., M. Eng.

は、 T_1 収束後の h_e を 0.8 倍して評価することになっている。

一方、1 次元波動論による 2 層地盤の G_S は、式(1)で算出される。

$$G_S = 2 \sqrt{\left| (1+\alpha)e^{ikH} + (1-\alpha)e^{-ikH} \right|} \quad (1)$$

$$\text{ここで、} k = \frac{\omega}{V_{se}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+i2h_e}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \alpha = \frac{\rho_{se}V_{se}\sqrt{1+i2h_e}}{\rho_bV_b\sqrt{1+i2h_b}}$$

式(1)で層厚 H は $T_1=4H/V_{se}$ の関係を用いて消去することができ、波動論による G_S は精算法と同様に T_1 、および h_e から計算できる。なお、以下の計算では工学的基盤での減衰定数 h_b をゼロとし、また、表層地盤の減衰定数 h_e は 0.8 倍しないものとしている。図 2 に 1 次および 2 次増幅率と減衰定数の関係をパラメータとして精算法と波動論を比較して示す。また、 $T_1=0.75\text{sec}$ 、 $\alpha=0.25$ 、 $h_e=0.15$ の場合の安全限界時の G_S を精算法、簡略法(2 種地盤)および波動論を比較して図 3 に示す。これを見ると、全体的には精算法の G_S は波動論のそれを包絡しており、特に短周期領域では下限値の設定のために安全側の評価となっている。これらを解放工学的基盤で規定される標準加速度応答スペクトル S_{ao} に乗じて S_{as} が図 4 のように算定される。図中には比較のために三浦ら⁴⁾による S_{as} をプロットしている。算定結果より、簡略法での S_{as} は 1 秒を超えるあたりから精算法より大きく評価されることがわかる。

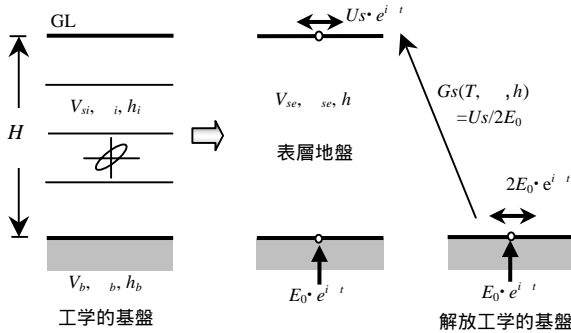


図 1 等価 2 層地盤への置換

3. 表層地盤増幅率のデータベース構築

3.1 公開データの構成と処理方法

公開データは、(1)メッシュ図、(2)表層および深部地盤データ、(3)震度 PL 値リスト、(4)断層パラメータ、(5)強震動波形、および(6)利用規定とデータ内容説明、から構成されている。これらの中から本データベース構築のために用いたものは、(1)、(2)の表層地盤データおよび(3)の PL 値である。公開データでの各都府県はコード化されており、たとえば大阪府の場合(図 5)は南北に 2 つの地域からなり(コード 5235[北部]、5135[南部])、北部は 874 個、南部は 1168 個のメッシュで分割(大きさは約 1km)されて各々に 4 桁の番号が付けられている。この各メッシュに対して地盤データが与えられており、そのファイル名は上記の 8 桁(地域 4 桁、メッシュ 4 桁)のコードとなっている。

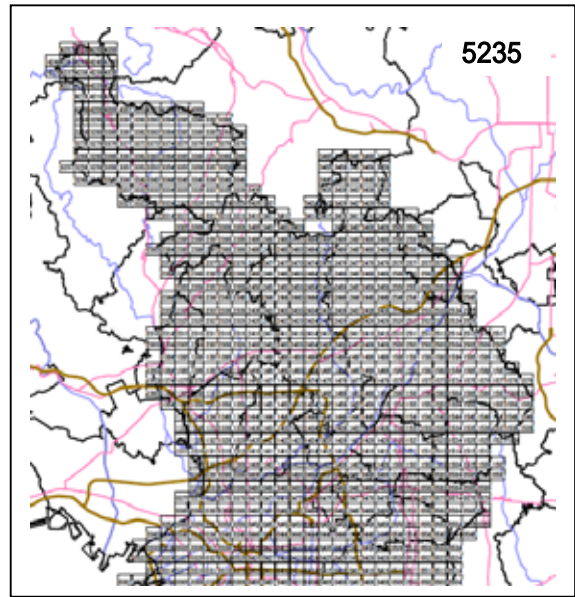


図 5 メッシュ図例³⁾

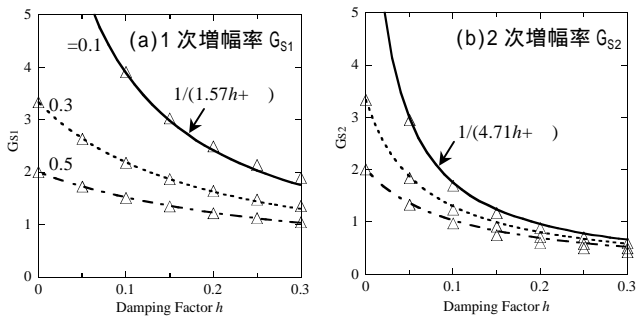


図 2 地盤増幅率の比較(: 波動論)

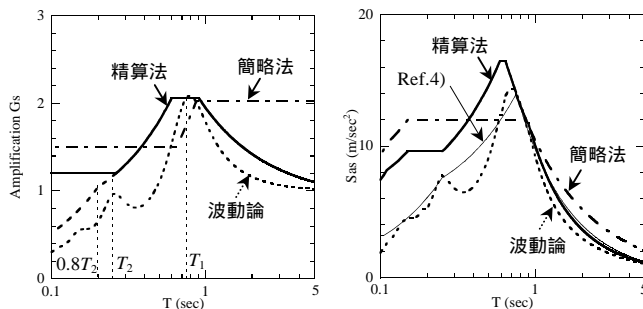


図 3 G_S の比較

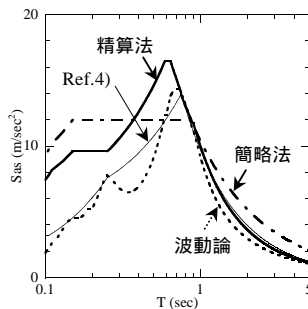


図 4 S_{as} の比較

地盤データの構成は各地層ごとに、P 波速度、S 波速度、 Q_p 値、 Q_s 値、質量密度、層厚、および動的変形特性曲線番号の順となっている。動的変形特性曲線番号は、1:粘性土、2:砂質土、3:礫質土、4,5:線形、に対応している。なお、公開データでは、工学的基盤の V_s は 700m/sec を設定しており、告示第 1457 号での定義(400m/sec 程度以上)と異なっていることに注意を要する。

計算方法は文献 5 に準じて作成したプログラムに基づいているが、公開データを用いるにあたり以下のような仕様としている。

- 1) 工学的基盤の位置は、動的変形特性曲線番号が 4 あるいは 5(ともに線形)に設定されている地層とする。
- 2) 上で設定した工学的基盤の V_s が 400m/sec 以下の場合は、400m/sec に設定する。逆に 400m/sec 以上ならその値のままとする。これによって波動インピーダンス比は小さくなり、 G_S は大きく評価されることになる。
- 3) 各地層の非線形特性は、告示第 1457 号第 7 別表第一および第二(大崎・原モデル)を用いる。動的変形特性曲線番号 1 には粘性土を、また 2 および 3 には砂質土の非線形特性を設定する。
- 4) 弾性 1 次固有周期 T_0 は、 V_s を層厚で重み付け平均した値より算出する。ただし、動的変形特性曲線番号が 4 あるいは 5 のみで構成される地盤に対しては、1 層目のデータから T_0 のみ算出

し、 G_s の算定は行わない。

5) Q_p 値および Q_s 値データは使用しない。

その他の計算条件としては、

6) 各地層は約 1m 程度となるように内部計算により細分割する。

7) 工学的基盤の半無限性を考慮するためのせん断ばね剛性の算

出に使用するポアソン比 ν は、S 波速度 V_s と P 波速度 V_p から

$$\nu = \{1 - 2(V_s/V_p)^2\} / \{2 - 2(V_s/V_p)^2\}$$

としている。

2章で示したように、精算法の G_s は、 T_1 、および h_e の 3 個のパラメータから一義的に決まるため、 Sas を計算するのに必要な基本情報として損傷限界時および安全限界時それぞれに対して T_1 、 $T_2 (=T_1/3)$ 、 h_e 、 G_{S1} 、および G_{S2} を出力する方針とした。

3.2 表示例

入手した 38 都府県 182,343 個の公開データを上記の方法によって処理した。計算結果は表計算シートを利用するものとし、表示例を図 6 に示す。建設地のメッシュコードを入力することによって、弾性時固有周期 T_0 、損傷限界時および安全限界時それぞれに対する T_1 、 T_2 、 G_{S1} 、 G_{S2} を表示し、 G_s のグラフを簡略法とともにプロットして示している。

3.3 運用上の留意点

本データベースを運用する上での留意点および限用法による耐震補強設計全般に関する注意点は以下のようにまとめられる。

- 1) 公開データは地震の影響を広域的に評価するために作成されたものであり、各メッシュ内の地質変化などを詳細に反映したものではないことに注意する必要がある。
- 2) T_0 が隣接するメッシュと比べて極端に長く算定されるケースがある。これは、先にも述べたように本公開データでは工学的基盤の V_s を 700m/sec に設定しているため、計算対象の層厚が 100m 程度あるいはそれ以上となることによるものである。境ら⁶⁾ は表層 30m の地盤データを用いて Sas を求める手順を提案しており、このようなケースとの比較検討に用いることができるものと考えられる。
- 3) 液状化発生危険度の情報については、公開データで提供されて

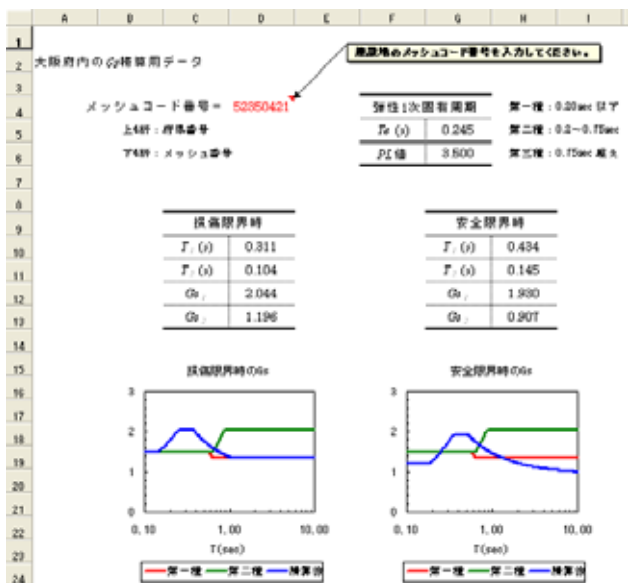


図 6 データベースの表示例

いる PL 値のうち、東南海および東海地震が同時に発生した場合の値を表示している。

- 4) 本報告で対象としている変形能力を有する木造建物については、これまでの実験的研究に基づいて図 7 のような変形角と被害程度の対応関係が確認されており、地盤が 2 種地盤程度であれば補強設計における限界変形角は 1/30 程度が設定されている。ただし、建設地が 3 種地盤あるいは活断層近傍である場合には、変形能力とともにある程度以上の強度を確保しておく必要があることが指摘⁷⁾されており、補強設計に幅を持たせる工夫が必要となるものと考えられる。

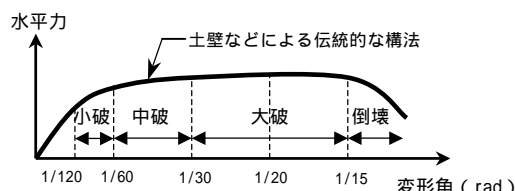


図 7 木造建物の構造特性²⁾

4. 木造建物の耐震補強設計例

図 8 に示すような木造モデル建物を対象として、簡略法(2 種地盤)と本データベースを用いた精算法で耐震補強設計を行い、その補強効果について比較検討した。補強としては、1 階に乾式土壁パネル(壁長 1m)を 2 箇所増設している。検討は、けた行方向とし、安全限界時を対象とした。また、補強後の設計クライテリアとして限界変形角を 1/30 と設定した。

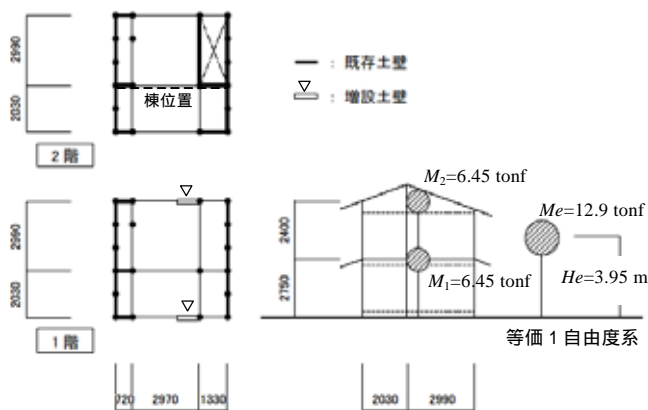


図 8 木造モデル建物の伏図および断面図

建設地はメッシュコード 52353692(京都市内)を想定した。安全限界時での G_s 算定用の諸量は $T_1=0.30\text{sec}$ 、 $G_{S1}=1.57$ 、 $G_{S2}=0.94$ である。

木造建物全体の復元力特性は、ほぞ・貫・土壁・小壁など各種の耐震要素を有する単位フレームの復元力特性の重ね合わせ、すなわち、各耐震要素の並列系によって評価できることが、一連の動的加振実験結果より確認されている。この方法によって求めた各階の復元力特性を補強前と補強後を比較して図 9 に示す。2 階は補強材を配置していないため復元力特性は共通である。

建物の地震時応答は、この復元力特性を林の提案⁸⁾する性能等価加速度応答スペクトル(以下、 Se)に変換し、 Sas と対比することで評価した。 Se は、変位ステップごとに求めた変形モードを用いて建物全体を等価 1 自由度系に縮約し、各ステップにおける等価周期 Te と等価減衰定数 h から、荷重-変形関係を Te を用いて加速度応答スペクトル($Sa-T$)に変換したものに加速度低減係数 Fh の逆数を乗ずる

ことで求まる。図 10 に種々の最大変形角に対応する Se と簡略法(2種地盤)および精算法による $Sas(h=5\%)$ との関係を示す。ただし、 Sas には階数による調整係数 $p=0.85$ を考慮している。各階の応答せん断力係数および層間変形角(以下、 R)の比較を表 1 に示す。この評価結果を図 7 の木造建物の構造特性と対比すれば、簡略法の 1 階 $R=1/15$ から予想される損傷の程度は、倒壊は免れるものの大きな損傷を受けて残留変形が生じるのに対して、精算法の 1 階 $R=1/33$ から予想されるそれは、中程度の損傷で補修により再使用が可能なレベルとなる。また、補強後の設計クライテリアとして限界変形角を $1/30$ と設定しているため、簡略法においてはさらに補強材を追加することになり、その平面配置が困難になるものと予想される。

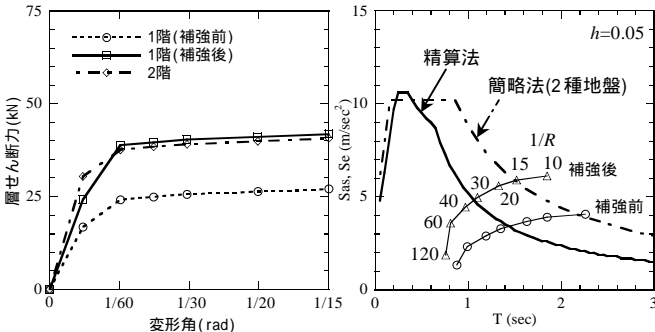


図 9 復元力特性の比較

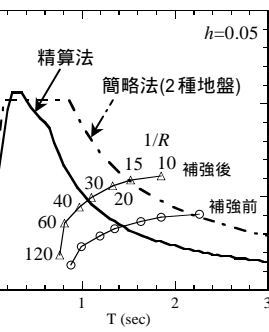


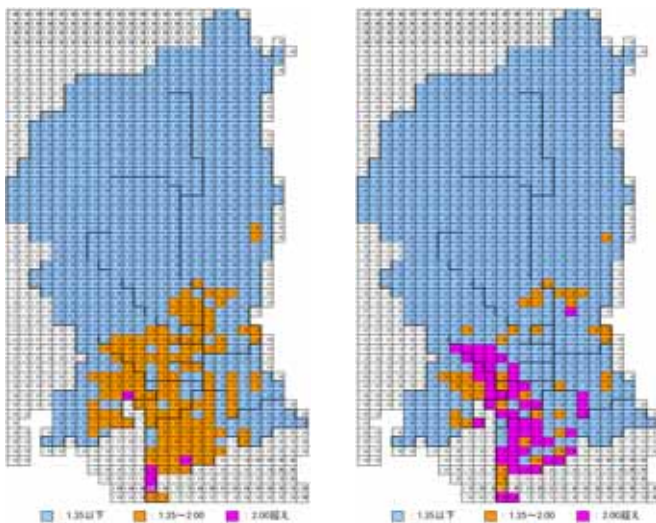
図 10 Sas と Se の比較

表 1 応答値の比較

	階	補強後		
		簡略法	簡略法	精算法
層せん断力係数	2	0.105	0.246	0.221
	1	0.204	0.326	0.293
層間変形角	2	1/547	1/234	1/260
	1	1/10	1/15	1/33

5. データベースの応用例

本データベースは、個別建物への適用のみならず、本来の主旨から広域的な耐震補強計画に利用することも考えられる。図 11 は、京都市を例として、伝統的な構法による木造住宅の耐震補強計画に対



(a) T=1.0 sec (b) T=2.0 sec
図 11 安全限界固有周期に対応する G_s の分布

する利用を想定して、安全限界固有周期 T に対応する G_s の分布を算定した例である。同図(a)は $T=1.0\text{sec}$, (b)は $T=2.0\text{sec}$ の場合である。これらの G_s 分布図の利用方法としては、1) 限界変形角をあらかじめ設定して安全限界固有周期 T を求める、2) 種々の T に対する分布図の中から 1) で設定した T に対応する G_s を読み取る、3) この G_s に基づいて応答せん断力を算定し補強材の概算数量を把握する、4) 必要に応じて詳細な検討を個別に行う、のようなフローが考えられる。

6. まとめ

以上、本報告では、限耐法に基づく木造建物の耐震補強設計への利用を目的として中央防災会議の公開データを利用した精算法による G_s のデータベース構築例を紹介した。運用上の留意点を指摘し、また、耐震補強設計例より G_s の評価法の違いが建物の応答値に及ぼす影響について検討した。限耐法では、建設地の地盤特性を設計に直接考慮できるようになったが、その反面、設計用入力地震動の設定は設計者の工学的判断に委ねられる面も多々存在する。たとえば、工学的基盤の設定位置や V_s 評価の違いによる Sas の変動、およびこれらに起因する架構の必要耐力の変動^{8,9)}が考えられる。また、液状化の発生する可能性のある地盤のように等価 2 層地盤への置換が困難な不均質な地盤に対する G_s の算定法の提案¹⁰⁾もなされている。いずれにしても、 Sas の設定については、既往の研究成果を参考にしつつ多角的に検討する必要があるものと考えられる。なお、本報告では、入射地震動に関しては告示で規定されている解放工学的基盤上の標準加速度応答スペクトルを対象としている。この入射地震動特性が変化する場合については今後の検討課題としたい。

謝辞

本報告で用いた表層地盤データは、内閣府に設置されている中央防災会議で公開されたものである。関係各位に敬意を表し感謝いたします。常日頃から建物と地盤との動的相互作用に関してご指導を頂いています広島大学大学院工学研究科教授・三浦賢治先生に謝意を表します。本データベースを作成するにあたり討論頂いた(社)日本建築構造技術者協会(JSCA)関西支部技術委員長・榎原健一氏(鴻池組)、同木構造分科会主査・小倉正恒氏(清水建設)およびメンバー各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 森井雄史・林康裕：表層地盤の地震動増幅特性と入射地震動特性が木造建物応答に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、第 568 号、pp.75-82、2003.6
- 2) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル、限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法、学芸出版社、2004.3
- 3) 内閣府・中央防災会議：東南海・南海地震等に関する専門調査会、<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index.html>
- 4) 三浦賢治・古山田耕司・飯場正紀：応答スペクトル法による表層地盤の非線形増幅特性の解析法、日本建築学会構造系論文集、第 539 号、pp.57-62、2001.1
- 5) 国土交通省建築研究所編著：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景、ぎょうせい、2001.3
- 6) 境有紀・津野靖士・工藤一嘉・壁谷澤寿海：改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法、日本建築学会構造系論文集、第 565 号、pp.73-78、2003.3
- 7) 林康裕：性能等価応答スペクトルに基づく建築物の地震荷重評価、第 11 回日本地震工学シンポジウム、pp.651-656、2003.11
- 8) 林康裕・森井雄史・鬼丸貞友・吉川正隆：限界耐力計算における地盤増幅係数評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 567 号、pp.41-46、2003.5
- 9) 泉洋輔・三浦賢治：限界耐力計算における設計用地震荷重評価の変動が架構の必要耐力に及ぼす影響、日本建築学会技術報告集、第 19 号、pp.91-94、2004.6
- 10) 古山田耕司・宮本裕司・時松孝次・三浦賢治：応答スペクトル法を用いた液状化地盤の応答解析と杭応力評価、日本建築学会技術報告集、第 19 号、pp.67-72、2004.6