

設計入力地震動の震源モデルの違いが建物応答に及ぼす影響  
—経験的グリーン関数法に基づいて—

Building response by difference of hypocenter model of input earthquake movement for design

2. 構造 -2. 振動

設計入力地震動 東海・東南海地震  
経験的グリーン関数法 震源モデル  
免震建築物 建物応答特性

正会員

○千賀 英樹<sup>\*1</sup>

Hideki SENG

高橋 広人<sup>\*2</sup>

Hirohito TAKAHASHI

福和 伸夫<sup>\*3</sup>

Nobuo FUKUWA

飛田 潤<sup>\*4</sup>

Jun TOBITA

護 雅史<sup>\*5</sup>

Masahumi MORI

1. はじめに

高層建築物や免震建築物の耐震設計においては、適切な地震動を入力地震動として用いることが重要である。中部地域は想定東海・東南海地震の発生が危惧されて久しく、適切な設計入力地震動の策定が望まれる。しかしながら、想定地震動のための震源、伝播経路、地盤の各パラメータによって想定される地震動の様相は大きく変わるため、これらが与える建築物の設計への影響が懸念される。

本論は愛知県名古屋市鶴舞地区を対象とし、経験的グリーン関数法に基づいて設計入力地震動を作成し、建物応答に与える影響を検討する。経験的グリーン関数法は、対象とする地点で観測された小地震記録(グリーン関数)を、想定する大地震の震源モデルに合わせて複数個重ね合わせるため、大地震の震源モデルが合成波形に与える影響は大きい。本論では特に、その震源モデルに着目し、中央防災会議<sup>1)</sup>及び愛知県設計入力地震動研究協議会(以下、協議会と呼ぶ)<sup>2)</sup>の震源モデルによる影響を検討する。対象とする建築物は、鶴舞地区内の免震建築物である名古屋大学附属病院中央診療棟(SRC造地上7階、地下2階建)である。

2. 対象地及び地盤構造概要

図1に、対象地の地盤概要を示す。地質は盛土以下、第四紀更新世の大曾根層、熱田層、海部・弥富累層の順で分

布し、第三紀鮮新世である東海層群(矢田川累層)に至る。対象地及びその近傍では、地震防災上の観点から反射法探査、微動アレイ探査等の地盤調査が多数行われている。さらに常時微動計測や強震観測記録などの分析も含め、対象地における一次卓越周期は3.5秒付近、地震基盤の深さは735m付近であると推測されている<sup>3)</sup>。

3. 経験的グリーン関数に用いる観測波形及びその震源の概要

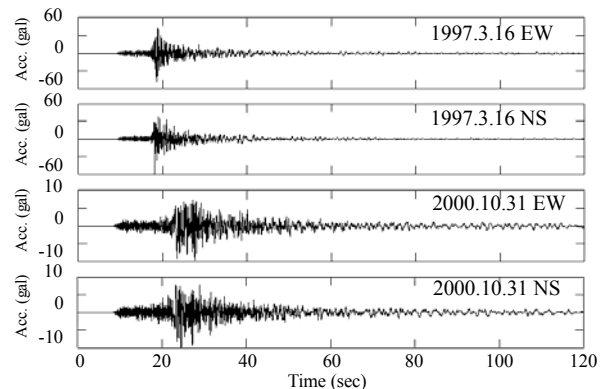


図2. 観測波形

表1. 観測地震の震源パラメータ

| 発生日                    | 1997.3.16  | 2000.10.31 |
|------------------------|------------|------------|
| 緯度                     | 34°55.4'N  | 34°16.8'N  |
| 経度                     | 137°31.6'E | 136°20.9'E |
| 震央位置                   | 愛知県東部      | 三重県中部      |
| 震源深さ                   | 39km       | 43km       |
| 鶴舞からの震央距離(km)          | 66km       | 100km      |
| マグニチュードMj              | 5.8        | 5.5        |
| 地震モーメント(Nm)            | 2.97E+17   | 1.70E+17   |
| 走向                     | 302°       | 306°       |
| 傾斜                     | 58°        | 72°        |
| すべり角                   | -104°      | 130°       |
| コーナー周波数(Hz)            | 1.02       | 1.09       |
| 応力降下量(bar)             | 488        | 341        |
| 断層面積(km <sup>2</sup> ) | 6.03       | 5.28       |
| すべり量(m)                | 1.28       | 0.84       |

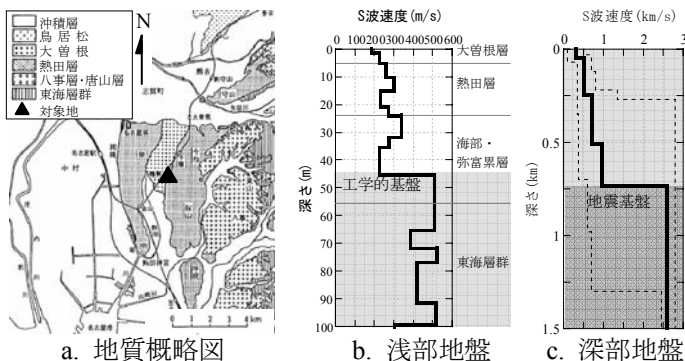


図1. 対象地の地盤概要

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

<sup>\*2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 (応用地質株式会社) 修士(工学)

<sup>\*3</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

<sup>\*4</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・工博

<sup>\*5</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 助教授・博士(工学)

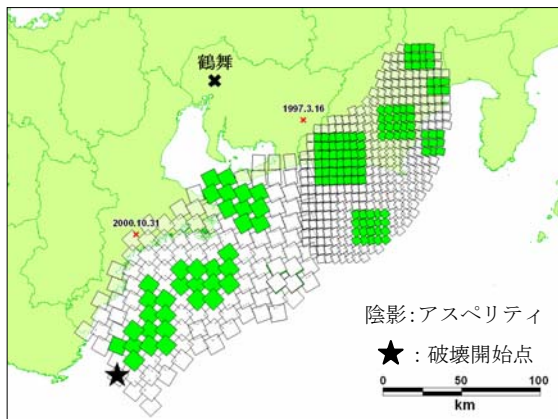
Graduate Student, Grad. School of Env. Studies, Nagoya Univ.

Grad. School of Env. Studies, Nagoya Univ. (OYO Corporation), M. Eng.

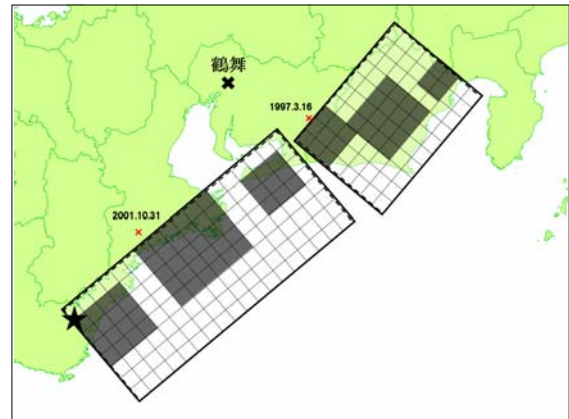
Prof., Grad. School of Env. Studies, Nagoya Univ. Dr. Eng.

Assoc. Prof., Grad. School of Env. Studies, Nagoya Univ. Dr. Eng.

Assoc. Prof., Grad. School of Env. Studies, Nagoya Univ. Dr. Eng.



a. 中央防災会議モデル



b. 協議会モデル

図 3. 震源域及びアスペリティの位置

### 3.1 観測波形の概要

経験的グリーン関数として用いた観測地震は、1997年3月16日に発生した愛知県東部の地震(Mj=5.8、深さ39km)及び2000年10月31日に発生した三重県中部の地震(Mj=5.5、深さ43km)である。観測記録はいずれも、鶴舞地区の名古屋大学附属病院内(地中1m)で得られた記録を用いた。図2に、加速度波形を示す。

### 3.2 震源パラメータの推定

ここでは経験的グリーン関数法を適用する地震の震源パラメータの推定を行う。

観測地点のフーリエスペクトル  $O(f)$  は(1)式のように表せる。

$$O(f) = \frac{1}{r} S(f) \times G(f) \times \exp\left(-\frac{\pi f r}{Q(f) V_s}\right) \quad (1)$$

ここに、 $S(f)$ は震源スペクトル、 $G(f)$ は観測地点近傍の地盤特性、 $Q(f)$ はS波のQ値、 $r$ は震源距離、 $V_s$ はS波速度である。本論ではQ値を、中央防災会議にならい  $Q(f) = 100f^{0.7}$  と仮定し、K-NETの多地点のフーリエスペクトルから最小二乗法により震源スペクトルを推定した<sup>4)</sup>。これに Brune<sup>5)</sup>の  $\omega^{-2}$ モデルをフィッティングさせることにより、コーナー周波数等の推定を行った。表1に観測地震の震源パラメータを示す。地震モーメント及びメカニズム解はF-net<sup>6)</sup>の推定値を用いた。

### 4. 東海・東南海地震の震源モデル

本論では、多重クラックモデルによる震源モデリングを行っている中央防災会議の震源モデル及び、アスペリティモデルに基づく震源モデリングを行っている協議会の震源モデルを用いる。中央防災会議及び協議会の震源域及びアスペリティの位置を図3に、震源モデルの各パラメータを表2に示す。ただし、アスペリティでの平均すべり量及び応力降下量は、波形合成での影響が大きいとされる対象地に最も近

表 2. 震源パラメーター一覧

|                          | 中央防災会議   | 協議会        |
|--------------------------|----------|------------|
| 走向                       | 要素断層毎に設定 | 230°, 220° |
| 傾斜                       | 要素断層毎に設定 | 15°, 20°   |
| すべり角                     | 要素断層毎に設定 | 90°        |
| 地震発生層(km)                | 10~30    | 10~36      |
| 総断層面積(km <sup>2</sup> )  | 23200    | 21900      |
| マグニチュードMw                | 8.27     | 8.3        |
| 総地震モーメント(Nm)             | 3.25E+21 | 4.00E+21   |
| 破壊伝播速度(km/s)             | 2.7      | 2.83       |
| <b>アスペリティ</b>            |          |            |
| アスペリティ個数                 | 9        | 6          |
| 総面積(km <sup>2</sup> )    | 6400     | 7665       |
| 総地震モーメント(Nm)             | 1.72E+21 | 2.80E+21   |
| 平均すべり量(m)                | 7.3      | 5.3        |
| 応力降下量(bar)               | 219      | 167        |
| <b>背景領域</b>              |          |            |
| 総面積(km <sup>2</sup> )    | 16800    | 14235      |
| 総地震モーメント(Nm)             | 1.53E+21 | 1.20E+21   |
| 平均すべり量(m)                | 2.45     | 2.08       |
| 応力降下量(bar)               | 25       | 39         |
| S波速度(km/s)               | 3.8      | 3.93       |
| 平均密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.8      | 2.9        |

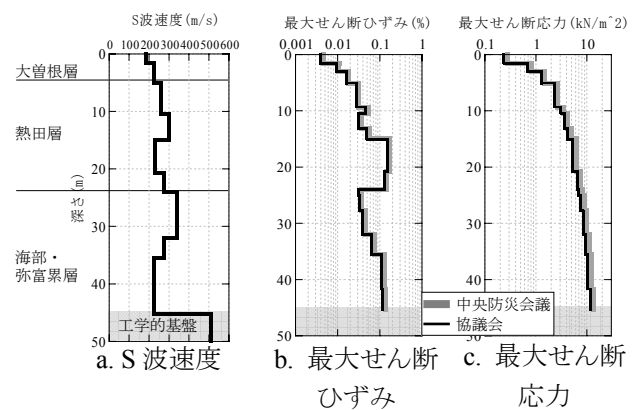


図 4. 等価線形法による応答特性

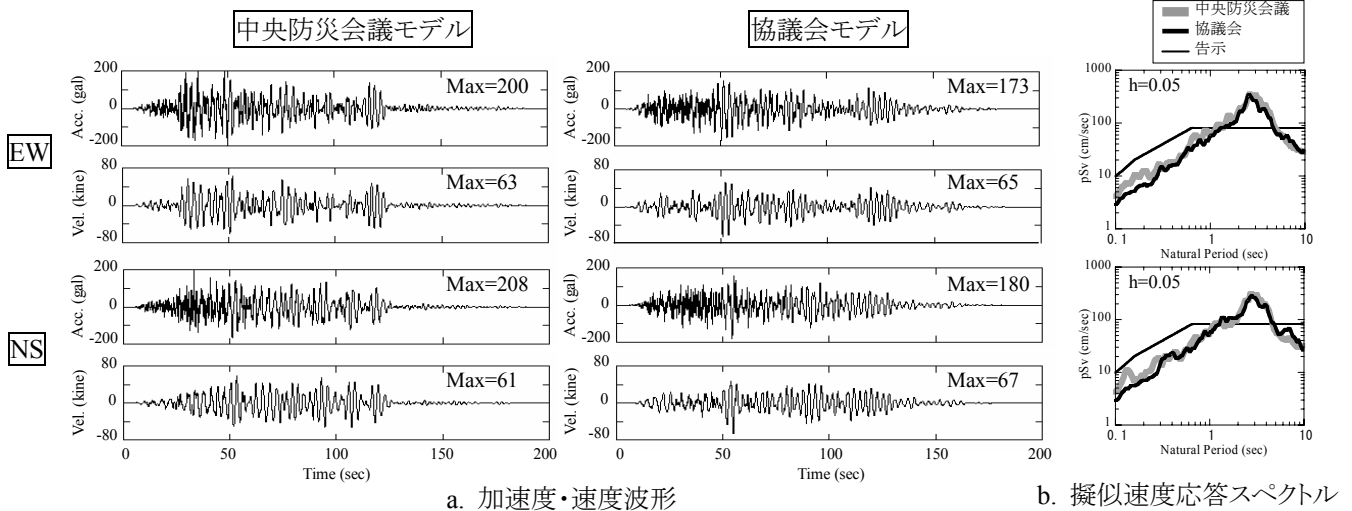


図 5. 解析結果(地表)

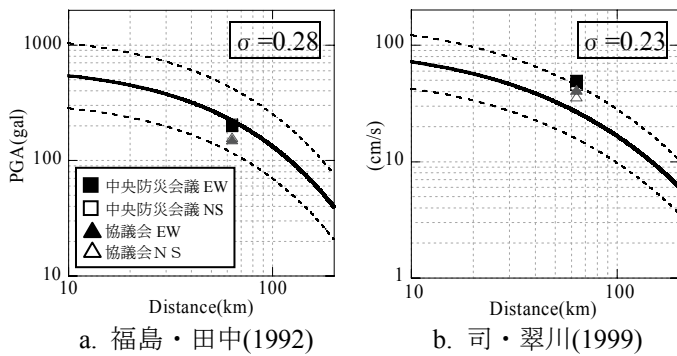


図 6. 距離減衰式

いアスペリティの値を表記している。中央防災会議及び協議会のアスペリティの総面積、平均すべり量及び応力降下量に大きな差があることが確認できる。

## 5. 波形合成手法及び合成結果

経験的グリーン関数法の適用にあたっては、壇・佐藤<sup>7)</sup>の方法を用いた。なお、波形には全て0.1Hz～20.0Hzのバンドパスフィルタを施している。この方法により得られる合成波形(地表)は、地盤の非線形性を考慮していないため、重複反射理論に基づいて工学的基盤における入射波を求めた上で、等価線形解析<sup>8)</sup>によって地表における地震波を求めた。なお、この地盤の非線形特性は動的変形試験結果に基づいており、海部・弥富累層は線形弾性体として扱い、熱田層以浅の非線形性を考慮した。図4に、等価線形法による応答計算結果(EW方向)を示す。これより、各層のせん断ひずみ分布は概ね0.1%程度であり、等価線形法の適用範囲内である。

図5に、中央防災会議及び協議会の各震源モデルによる地表での解析結果(地表)を示す。加速度は、中央防災会議モデルが、速度は協議会モデルの方がやや大きな値となっている。また、擬似速度応答スペクトルの特性は、おおむ

ね一致しており、当該敷地の卓越周期3.5秒付近で大きな応答を示している。また、国土交通省告示第1461号の告示スペクトル(工学的基盤)と比較すると、免震建物の周期帯域での応答は遙かに大きく、工学的地盤以深の深部地盤の影響を適切に評価することが重要である。

図6に、最大加速度(地表)、最大速度(工学的基盤)と震源距離の関係を、福島・田中(1992)<sup>9)</sup>、司・翠川(1999)<sup>10)</sup>の距離減衰式と比較して示す。ただし、最大速度は工学的基盤のせん断波速度を $V_s=500(\text{m/s})$ として補正している。その最大速度はやや大きめの値となっているが、標準偏差の範囲内であり、中央防災会議・協議会双方の震源モデルによる波形合成は妥当なものであるといえる。

## 6. 建物応答に与える影響

### 6.1 建物概要及び解析モデル

対象建物はSRC造純ラーメン構造で、地上7階地下2階建の病院であり、地下1階と地下2階の間に免震層を持つ中間階免震構造を持つ。長辺方向9.0m×13スパン、短辺方向7.2m×7スパンの長方形の建物である。免震装置として天然ゴム系積層ゴム34基、鉛プラグ入り積層ゴム72基、オイルダンパー8基を設置し、隣接する建物との渡り廊下に転がり系支承4基を配している。免震層の擁壁とのクリアランスは70cmである。

解析モデルは上部構造をEW・NS方向毎にそれぞれ一層一質点系の等価せん断バネに、免震層はEW・NS共に各免震装置ごとにせん断バネに置換する。図7に、解析モデルを示す。上部構造のスケルトンカーブは、静的弾塑性解析による荷重変形曲線から履歴によるエネルギー吸収が同等となるようTri-linear型に置換し、履歴法則は、地下1階はRC耐震壁が主な耐震要素であることから原点指向型、1～7階は純ラーメン構造より修正武田型とす

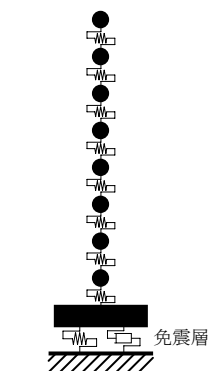


図 7. 解析モデル

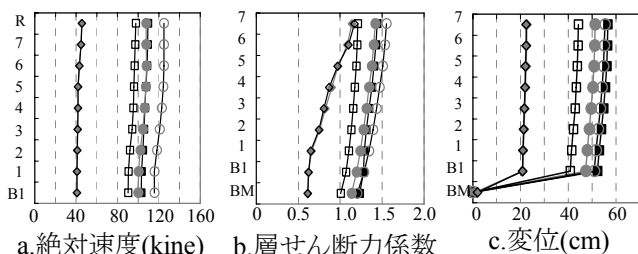
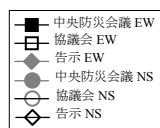


図 9. 最大応答

る。表 3 に、上部構造の固有周期を示す。免震層の復元力特性は Tri-linear 型で、降伏点は 2 種類の鉛プラグ入り積層ゴムの降伏変位に対応している。表 4 に免震層の復元力特性を、表 5 に上部構造と免震層の全体系の固有周期を示す。免震建物の周期は、地盤との共振を避けて、地盤の周期よりもやや長めに設定されている。

また、免震層以下の地下 2 階を形成する下部構造は、外周部地下壁によって十分な剛性を有しており振動解析モデルとして無視できると考えられるため、地震波の入力位置は免震層直下の GL-8.0m とする。

## 6.2 解析結果

図 9 に、中央防災会議及び協議会モデルの合成波、加えて文献<sup>11)</sup>による国土交通省告示 1461 号の加速度応答スペクトルに適合した模擬地震動(告示波・ランダム位相)を入力とする建物の各最大応答値(絶対速度、層せん断力係数、免震層下部を基準とした変位)を示す。

両モデルの波形合成結果がスペクトル特性も含めてよく似かよっており、建物の応答結果には明瞭な傾向は現れていない。また、免震層の最大応答値は 50cm をやや上回っているが、クリアランスの 70cm を下回っている。当建物では設計時に、極めて希に発生する地震動(レベル 2)の加速度波形の 1.5 倍を余裕度検討レベルとして検討しており、本論で作成した合成波においても建物の安全性が確認された。

表 3. 上部構造の固有周期

| 次数 | EW    | NS    |
|----|-------|-------|
| 1  | 0.777 | 0.748 |
| 2  | 0.285 | 0.273 |
| 3  | 0.179 | 0.173 |

表 4. 免震層の復元力特性

|             | 第1折点    | 第2折点    |
|-------------|---------|---------|
| 降伏荷重(kN)    | 17634.7 | 20518.3 |
| 降伏変位(mm)    | 10.8    | 12.6    |
| 初期剛性(kN/mm) | 1632.9  |         |
| 接線剛性(kN/mm) | 176.8   |         |

表 5. 全体系の固有周期

| 想定変形(cm) | EW   | NS   |
|----------|------|------|
| 1.5      | 1.72 | 1.71 |
| 25.0     | 3.85 | 3.84 |
| 45.0     | 4.12 | 4.12 |
| 70.0     | 4.26 | 4.26 |

また、告示波と両モデルを比較すると、前者の各応答値は後者を大きく下回り、併用期間中に発生が懸念される南海トラフでの地震に対して、震源及びサイト特性を考慮した入力地震動を策定することの重要性が確認できる。

## 7. まとめ

本論は愛知県名古屋市鶴舞地区の免震建物を対象とし、経験的グリーン関数法に基づいて、中央防災会議と愛知県設計用入力地震動研究協議会の震源モデルによる設計用入力地震動を作成し、震源モデルの違いが建物応答に与える影響を検討した。

両震源モデルの合成波形には、振幅、継続時間共に明瞭な違いが認められず、今回対象とした免震建物の応答へ震源モデルの影響は顕著ではなかった。しかしながら、告示と比較すると、免震建物の周期帯域での応答は遙かに大きく、来るべき東海・東南海地震に対して、震源及び深部地盤まで含めたサイト特性を考慮した入力地震動を策定することの重要性が確認された。

今後は経験的手法だけでなく、他の手法による推定波形による影響を検討する。また、鶴舞地区に新たに建設予定の規模及び基礎形式の異なる免震建物や、中・高層建物の対しても同様に建物応答を解析することにより、構造形式・規模の異なる建物への影響を検討する。加えて、この建物では継続的に強震観測を行っており、得られた観測記録を含めて分析していく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 中央防災会議「東海地震に関する専門調査会」、「東南海、南海地震等に関する専門調査会」
- 2) 愛知県設計用入力地震動研究協議会「愛知県設計用入力地震動の作成」2005 改訂版
- 3) 「濃尾平野地下構造調査」(愛知県、2002)、「鶴舞公園における微動アレイ探査結果」(名古屋大学澤田教授、1999)等
- 4) 栗田、山中、瀬尾「兵庫県南部地震の余震記録を用いた神戸市東灘区的地盤増幅特性の評価」日本建築学会構造系論文集 第 509 号、180-190、1998.7
- 5) Brune, J., 「Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes」 Journal of Geophysical Research, Vol75, No.26 1970
- 6) F-net 防災科学技術研究所広帯域地震観測網 <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>
- 7) 壇・佐藤「断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測」日本建築学会構造系論文集 第 509 号、49-60、1998.7
- 8) 吉田、末富「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、61-70、1996
- 9) 福島・田中「新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂」地震学会 1992 年秋季大会講演予稿集、p.116、1992
- 10) 司・翠川「断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式」日本建築学会構造系論文集 第 523 号、63-70、1999.9
- 11) 木村、飛田、福和「免震構造物の応答特性に及ぼす入力地震動・地盤条件・構造特性の影響」日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2003