

◆ 長大橋特集 ◆

断層モデルを用いた震源近傍における地震動の推定

片岡正次郎* 田村敬一**

1. はじめに

1998年3月に策定された全国総合開発計画¹⁾において、地域間の連携と交流を目指した多軸型国土構造の形成が謳われている。その中で海峡横断道路プロジェクトは目標達成に資するものと位置づけられ、長大橋等に係る技術開発を通じて構想を進めることとされている。

構想されている海峡横断道路には、例えば東京湾口や伊勢湾口のように1923年関東地震、1944年東南海地震(ともに気象庁マグニチュード $M_J = 7.9$)といった過去の大規模地震の震源近傍に位置するものもある。従って、このような海峡横断道路に対して適正な耐震安全性を確保した合理的な耐震設計を行うためには、大規模地震が発生した場合に震源近傍で生じる地震動を推定し、その結果に基づいて設計地震動を設定する必要がある。

従来、東京湾横断道路²⁾や明石海峡大橋³⁾を含む構造物の設計地震動の設定には、距離減衰式が使用されることが多かった。距離減衰式は、地震規模と震源距離あるいは震央距離から、最大加速度等の地震動特性を推定する簡便かつ精度のよい手法であり、設計実務において多くの実績を有するものである。反面、距離減衰式は実際に観測された強震記録をもとにした経験式であるため、強震記録が十分には得られていない大規模地震の震源近傍については、適用性に限界があることも事実である。

一方、地震学の分野では断層の運動をモデル化した断層モデルを用いて、地震動の推定を行うための研究が行われてきた。当初これらの研究は土木構造物の固有周期に比較して長い周期の地震動を対象としたものであった⁴⁾が、近年ではより周期の短い地震動を推定する研究も行われるようになってきた⁵⁾。

本報文ではこのような背景から、大規模地震と

して1923年関東地震(以下、単に関東地震とする)を取り上げ、その断層モデルを用いて震源近傍である東京湾口の観音崎地点における地震動を推定した結果を示すとともに、将来発生する地震を想定し、予測できないパラメータについて種々のパターンを想定した断層モデルを設定することにより、推定地震動の変動特性への影響を検討する。

2. 断層モデル

2.1 断層モデルを用いた地震動の推定

震源近傍の地震動は、地震波を発生させる震源断層の特性に特に強い影響を受ける。そのため、震源近傍の地震動を推定する際には、地震の規模だけでなく、個々の震源断層の位置や大きさ、それがどこからどのように破壊していくのかといった震源特性を考慮する必要がある。

このような断層運動を数値的に表現したものを断層モデルという。断層モデルでは、一般に断層面を図-1のように長方形と仮定し、断層パラメータと呼ばれる断層面の長さや幅、くい違い量や破壊速度等を数値で与えることによってモデル化する。断層を小断層に分割し、小断層ごとに異なる破壊開始時刻やくい違いの時間変化を与えることによって、現実に近い破壊過程をモデル化することも行われている。このような断層モデルに従って各小断層から発生する地震動を重ね合わせるこ

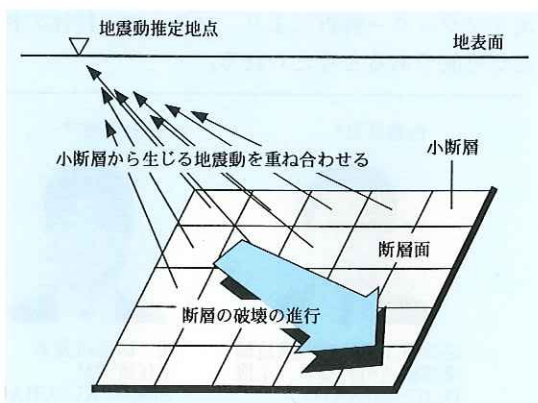


図-1 断層モデルを用いた地震動の推定

とにより、震源特性を精度良く取り入れた地震動の推定を行うことができる。

2.2 関東地震の断層モデル

関東地震の断層モデルとしては、これまで多くのモデルが提案されているが、ここでは関東地震の際の測地学的データと遠地の地震記録から逆解析で求められたもの⁶⁾を用いた。このモデルでは、断層の長さ方向(東西方向)に10、幅方向(南北方向)に7の合計70の小断層におけるくい違い量が求められている。

図-2にこの断層モデル全体及び小断層におけるくい違い量を示すが、断層面は長さ130km、幅70km、北北東落ちに傾斜角25度で傾斜しており、破壊は震源(図中の☆)から3km/sの速度で同心円状に広がるとしている。また、断層面全体の平均くい違い量は2.4mであるが、大きいところでは約7mのくい違い量となっている。

3. 地震動推定手法

3.1 地震動推定の手順

本報文では2.1でも述べたように、断層モデルに従って各小断層から発生する地震動を重ね合わせることで、大規模地震の震源特性を考慮した地震動推定を行う。

具体的な手順としては、まず地震動を推定する観音崎地点直下の地震基盤面(S波速度3km/s程度の層の上面)における各小断層から発生する地震動を計算する。次にそれらを破壊伝播と波動伝

播に関する時間遅れを考慮して重ね合わせることで、地震基盤面における大規模地震の地震動を合成する。さらにS波の一次元重複反射理論から計算した地震基盤以浅の地盤増幅率をかけ合わせる震動ことによって、観音崎地点の地表面における地を計算した。表-1と図-3に、ここで用いた観音崎地点における地盤構造モデルと地盤増幅率を示す。

3.2 統計的グリーン関数法

ある媒体の一点を加振した場合に、他の一点で観測される波形(を表す関数)をグリーン関数という。同様に、点震源あるいは十分小さい震源から発生して地盤内を伝播し、ある場所で観測される地震動もグリーン関数と呼ばれ、経験的手法、統計的手法、理論的手法あるいはそれらを組み合わせたハイブリッド法によって計算することが可能である。これらの手法にはそれぞれ対象とする周期帯域や必要なデータ等の特徴があるが、本報文では比較的必要なデータが少なく任意の地点に

表-1 観音崎地点における地盤構造モデル

	深さ[m]	密度[t/m ³]	S波速度[km/s]
地表	0~31	1.9	0.42
	31~45	1.9	0.40
	45~57	1.9	0.50
	57~77	1.9	0.61
	77~94	1.9	0.70
	94~120	1.9	0.84
	120~1005	2.0	1.15
	1005~1405	2.0	1.20
	1405~2605	2.1	1.30
地震基盤	2605~3005	2.3	1.40
	3005~	2.5	2.72

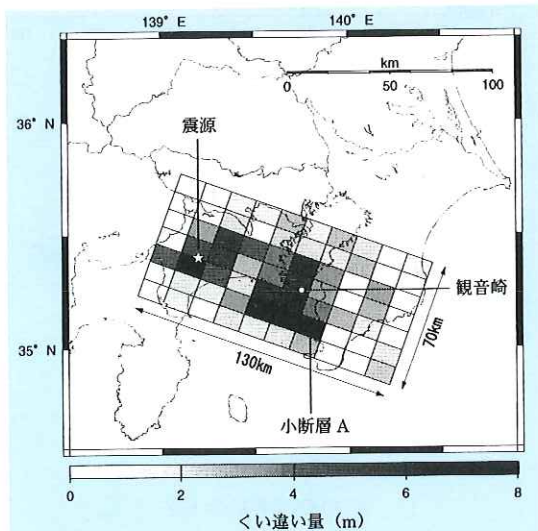


図-2 1923年関東地震の断層モデル⁶⁾

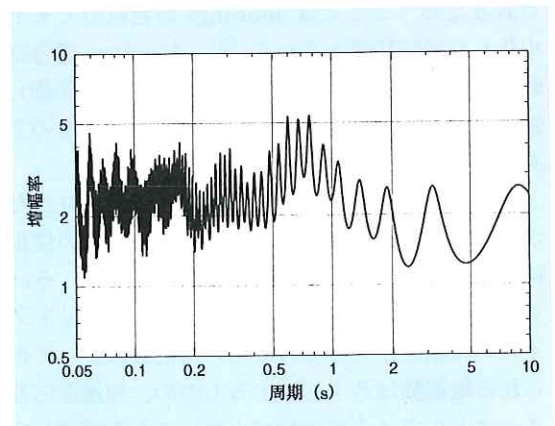


図-3 観音崎地点における地震基盤以浅の地盤増幅率

適用できる手法として、統計的グリーン関数法を用いることにした。この手法は、地震記録の統計解析から、中小規模の地震による平均的な地震動(統計的グリーン関数)を作成し、それを重ね合わせることによって大規模地震の地震動を合成するものである⁷⁾。

本報文では、地震モーメント(地震の規模を表すパラメータ) M_0 の地震による、地震動推定地点直下の地震基盤面(震源距離 R)における地震動の加速度振幅スペクトル $A(f)$ を次式で与えた⁸⁾。

$$A(f) = \frac{F}{4\pi\rho\beta^3} M_0 \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\max})^s}} \cdot \frac{1}{R} \exp\left\{-\frac{\pi f R}{Q(f)\beta}\right\} \cdot \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_b\beta_b}} \quad (1)$$

ここで、 f は周波数、 F は地震波の放射特性、 ρ および β は震源における地盤の密度およびS波速度、 f_c はコーナー周波数、 $f_{\max}$ は高周波遮断周波数、 s は高周波遮断フィルターの特性値、 $Q(f)$ は地盤の減衰を表すQ値、 ρ_b および β_b は地震動推定地点における地盤の密度およびS波速度である。詳細は文献⁸⁾に譲るが、式(1)はS波の加速度振幅スペクトルを理論と観測記録に適合するようにモデル化したものである。また、右辺最終項は震源と地震動推定地点における地盤インピーダンスの相違による影響を考慮した項である⁹⁾。

この加速度振幅スペクトルをもつ時刻歴波形を作成するには、位相特性あるいは経時特性(時刻歴波形の振幅包絡線の時間的変化)の情報が必要であるため、ここではJennings型包絡形でモデル化した経時特性を用いた¹⁰⁾。Jennings型包絡形とは、図-4のように立ち上がり部(2次曲線)、強震部(定数)、減衰部(指数曲線)からなるものである。

実際の手順としては、まず位相を乱数で与えたホワイトノイズに包絡形をかけ、その波形の位相特性と $A(f)$ を用いて時刻歴波形を作成し、それを統計的グリーン関数とした。なお、ホワイトノイズの位相を与えるために用いた乱数によって得られる地震動は若干変動するものの、加速度応答スペクトルではその変動が小さいことを確認している。

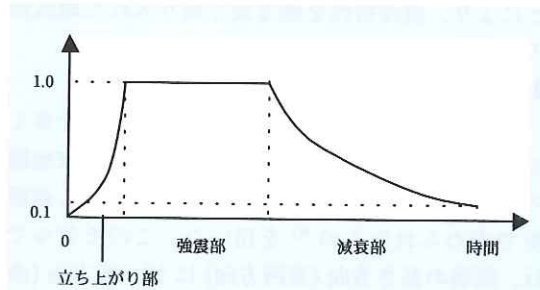
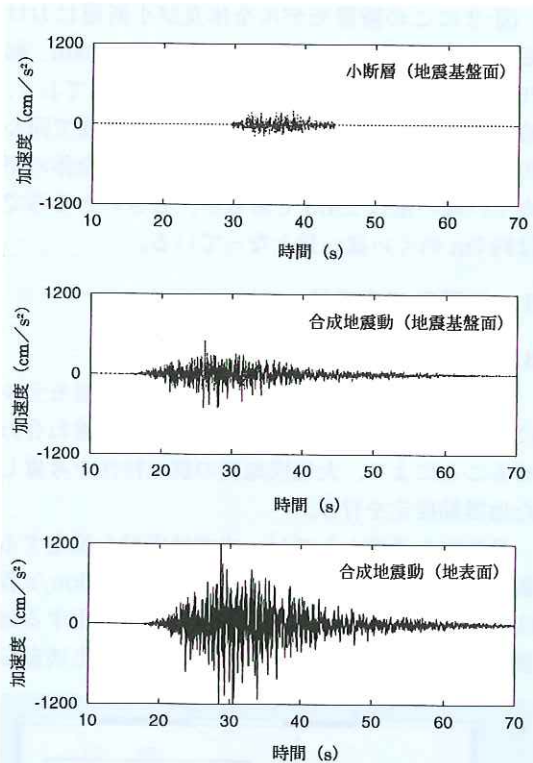
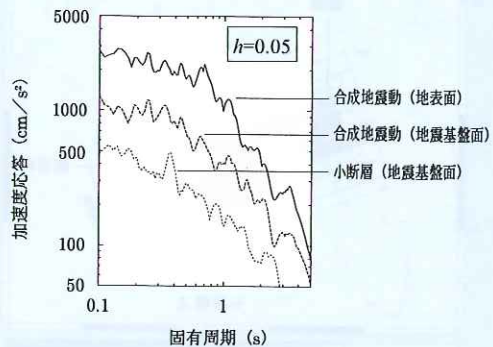


図-4 Jennings 型包絡形



(a) 時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図-5 観音崎地点における地震動の推定結果

4. 関東地震による地震動の推定

2.2 で述べた関東地震の断層モデル及び 3. で述べた地震動推定手法を用いて、観音崎地点における地震動を推定した結果を図-5 に示す。図-5(a) は時刻歴波形を計算したものであるが、最もくい違い量の大きい小断層 (図-2 の小断層 A、くい違い量 7.38m) による地震基盤面における地震動、地震基盤面における合成地震動、地表面における合成地震動を示している。最大加速度はそれぞれ 200、500、1200 cm/s^2 程度である。小断層による地震動と比較して、合成地震動は振幅が大きく、継続時間が長くなっていることが分かる。図-5(b) には加速度応答スペクトル (減衰定数 $h = 0.05$) を示すが、地表面における合成地震動は周期約 1 秒以下では加速度応答値が 1,000~3,000 cm/s^2 となっている。

5. 震源特性の不確定性による推定地震動の変動

構造物の設計地震動は、計画地点において将来生じる可能性がある地震動に基づいて設定されるべきであり、過去に発生した地震による地震動を推定するだけでは不十分である。しかし、将来発生する地震がどのような震源特性を有しているのかを完全に予測することは困難であるため、予測できないパラメータについては種々のパターンを想定した断層モデルを設定し、それらの断層モデルを用いた場合の推定地震動の変動を把握しておく必要がある。ここでは、断層面の位置や大きさは図-2 に示したものと同一として、震源位置とアスぺリティ (断層面の中でも特にくい違い量大きい領域) の位置を系統的に変更した断層モデルを設定し、推定地震動の変動について検討を行った。

5.1 震源位置による推定地震動の変動

図-6 に ● で示した震源から同心円状に破壊が進行する 15 ケースを想定した。ただし、くい違い量分布は 2.2 で述べた関東地震のものをを用いている。

このときの推定地震動の加速度応答スペクトルを示すと図-7 のようになる。この図によると、長周期側よりも短周期側の方がやや変動幅が小さいものの、同じ固有周期で比較するとその変動幅は 3 倍程度と無視できない大きさであり、将来発生

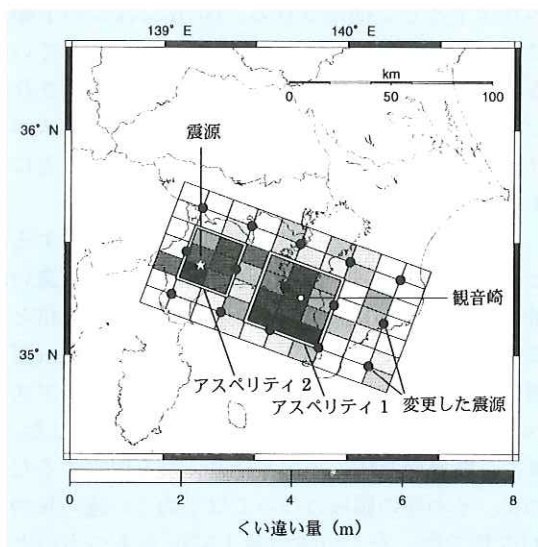


図-6 1923 年関東地震の断層モデルから抽出した矩形アスぺリティと変更した震源位置 (●)

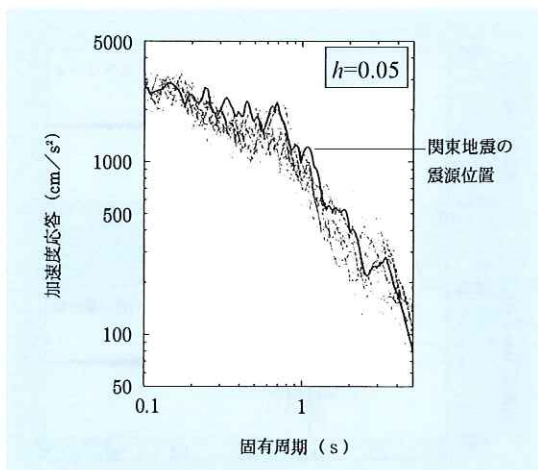


図-7 震源位置を変更した計算結果

する地震による地震動を評価する際には、一つの震源位置を想定するだけでは不十分であることが分かる。また、関東地震の震源位置を用いた結果は、短周期側では変動幅の上限近くの影響値を示しているが、長周期側では 15 ケースの平均程度である。

5.2 アスぺリティ位置

5.2.1 アスぺリティの簡略化

図-2 のように各小断層によってくい違い量が異なる断層モデルから、矩形のアスぺリティを抽出する手順が提案されている¹¹⁾。この手順では、断層面全体の平均くい違い量の 1.5 倍以上のくい違い量をもつ小断層を含むような矩形領域がアス

ペリティとして抽出される。図-6にはこの手順に従って抽出した矩形アスペリティが示されているが、この場合は2つのアスペリティが抽出されたため、面積が大きい方のアスペリティをアスペリティ1、小さい方をアスペリティ2と呼ぶことにする。

アスペリティ内の平均くい違い量を計算すると、アスペリティ1は断層面全体の平均くい違い量 2.40m の 2.00 倍、アスペリティ2は 2.09 倍となった。そこで、双方ともくい違い量 4.80m(断層面全体の平均くい違い量の 2 倍) をもち、アスペリティ内でのくい違い量は均一であるとした。また、断層面全体の平均くい違い量を固定するために、その他の領域については平均くい違い量の 0.65 倍で均一なくい違い量 1.57m をもつものとした。

このように、矩形で均一なくい違い量のアス

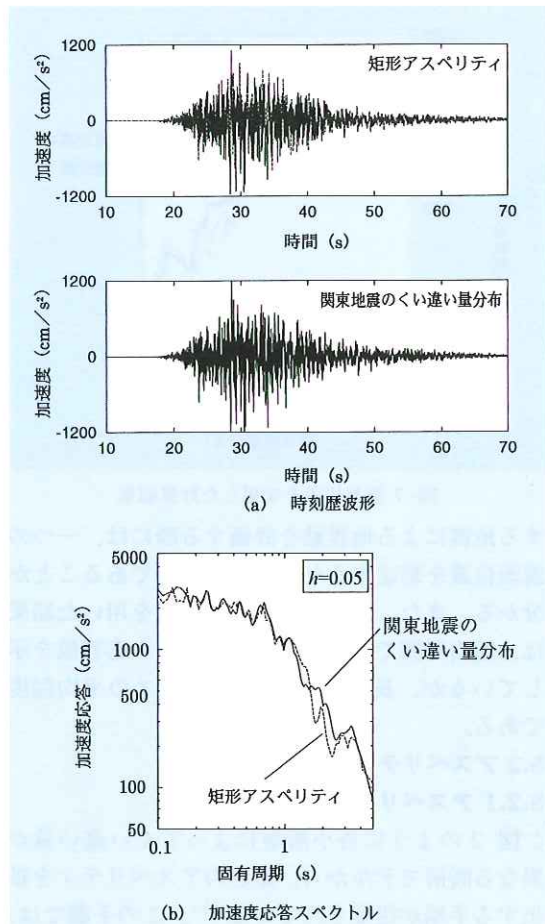


図-8 矩形アスペリティと関東地震のくい違い量分布を用いた推定地震動の比較

ペリティとそれ以外の領域で簡略化したくい違い量分布と、各小断層によってくい違い量が異なる図-2 に示した関東地震のくい違い量分布を用いた推定地震動を比較したものが図-8である。ただし、ここでは関東地震の震源位置を用いた。両者はよく一致していることから、簡略化したアスペリティの位置を変更することによって、くい違い量分布の変動の影響を検討することができると考えられる。

5.2.2 アスペリティ位置による推定地震動の変動

予備的な検討を行った結果、アスペリティ1を断層幅方向(北北東-南南西方向)に移動させる影響は小さいことが明らかになったため、図-9に示

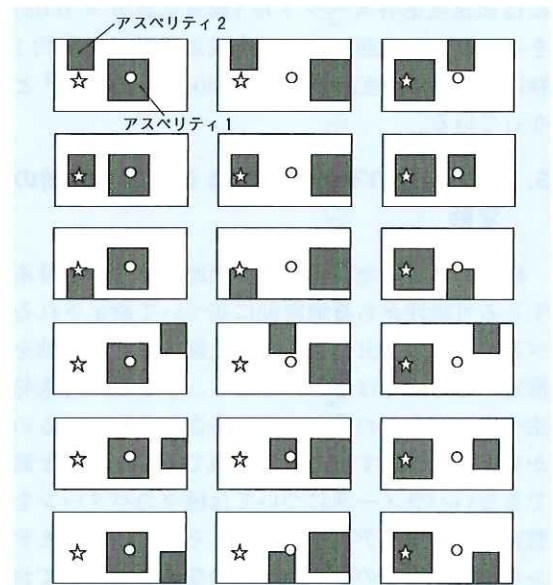


図-9 変更した矩形アスペリティ、震源(☆)、観音崎(○)の位置

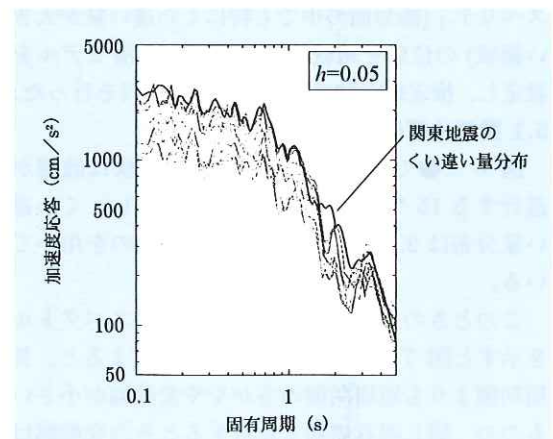


図-10 アスペリティ位置を変更した計算結果

すように、アスペリティ1の断層幅方向の位置は固定した上で、系統的にアスペリティの位置を変化させた18ケースを想定した。

これらのアスペリティ分布を用い、震源を関東地震の震源位置として推定した地震動の加速度応答スペクトルを比較したものが図-10である。この図には、関東地震の不均一なくい違い量分布を用いた結果も示してあるが、これが他の18ケースをほぼ包絡していることが分かる。これは図-2からも明らかなように、関東地震の際に断層面上でくい違い量の大きい領域が観音崎地点の周辺に集中していたことを意味している。

矩形アスペリティを用いた18ケースの計算結果は、震源位置の影響を検討した結果とは逆に長周期側での変動がやや小さいが、全体的には同じ固有周期で比較するとその変動幅は3倍程度である。従って、将来発生する地震による地震動を評価する際には、震源位置と同様、一つのくい違い量分布を想定するだけでは不十分であることが分かる。

6. まとめ

本報文では関東地震の断層モデルを用いて、統計的グリーン関数法により観音崎地点における地震動を推定した。またその断層モデルの震源位置及びくい違い量分布を変化させ、種々の断層モデルを設定することにより、推定地震動の変動について検討を行った。得られた結果を列举すると以下ようになる。

- 1) 1923年関東地震の際に観音崎地点で生じた地震動を推定した結果、最大加速度は 1200cm/s^2 程度となった。
- 2) 震源位置を変更した場合、ある固有周期における加速度応答スペクトルの変動は3倍程度であり、長周期側の変動幅がやや大きい。
- 3) 均一なくい違い量の矩形アスペリティとそれ以外の領域でくい違い量分布を簡略化した断層モデルと、各小断層によってくい違い量が異なる本来の断層モデルを用いた推定地震動はほぼ一致した。
- 4) アスペリティ位置を変更した場合、ある固有周期における加速度応答スペクトルの変動は3倍程度であり、短周期側の変動幅がやや大きい。

今後は、地震動に対する他の断層パラメータの影響、深部地盤構造や表面波の影響が無視できな

い長周期地震動などに関して同様の検討を行い、それらの結果を総合して設計地震動を設定する手法についても研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土庁：21世紀の国土のグランドデザイン，133p，1998。
- 2) 建設省土木研究所：東京湾横断道路の構造・施設設計に関する調査研究，土木研究所報告第184号，pp.19-34，1991。
- 3) 本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋耐震設計要領(案)・同解説，47p，1988。
- 4) 例えば、Aki, K.: Seismic displacements near a fault, J. Geophys. Res., 73, pp.5359-5376, 1968。
- 5) 例えば、入倉孝次郎：強震動予測のためのレシピ，第1回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ予稿集，pp.33-58，2000。
- 6) Wald, D. J. and Somerville, P. G.: Variable-slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 85, pp.159-177, 1995。
- 7) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測，日本建築学会構造系論文集，430，pp.1-9，1991。
- 8) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 73, pp.1865-1894, 1983。
- 9) 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、宮腰淳一、佐藤智美：統計的グリーン関数法による1923年関東地震($M_{JMA}7.9$)の広域強震動評価，日本建築学会構造系論文集，530，pp.53-62，2000。
- 10) 佐藤智美、川瀬博・佐藤俊明：ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性，日本建築学会構造系論文集，461，pp.19-28，1994。
- 11) Somerville, P. G., 香川敬生、入倉孝次郎、澤田純男、巽啓樹：断層面上のすべり分布の経験的なモデル化の検討，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.123-128，1998。

片岡正次郎*



建設省土木研究所
耐震技術研究センター
振動研究室研究員、工博
Dr.Shojiro KATAOKA

田村敬一**



同 振動研究室長、工博
Dr.Keiichi TAMURA