

将来発生する地震動の理論的予測方法

赤尾 嘉彦

正会員 工学博士 有限会社赤尾地震工学研究所 (〒279-0031 千葉県浦安市舞浜2丁目3番6号)

構造物の動的設計をおこなうための入力地震動の作成方法の1つとして、過去の類似地震の震源破壊過程を用いて、予測地震の断層面上で同じ破壊が生じると仮定して理論的に計算する方法を提案した。

具体的には、将来発生が予測される南関東大地震による東京都の臨海副都心の地震動を、南関東大地震と断層面の特徴が似ていると思われる1968年十勝沖地震の震源破壊過程のインバージョン結果を用い、正規モード理論により表面波による地動の推定を試みた。

この方法の利点は、過去の小地震記録が得られていない任意の地点での入力地震動の推定に用いることができる点である。

Key Word : artificial seismic motion, the great Kanto earthquake, surface wave, inversion analysis

1. はじめに

構造物の動的耐震設計をおこなうには、構造物の周辺で耐用期間中に発生するかもしれない地震の中から影響の最も強い地震の地震動を予測し、その地震動を構造物に人力して応答解析をおこない、構造物が崩壊に至らないことを確認することが必要である。

一般に、このような目的で人工的に作られた工学基盤上の地震動を模擬地震動というが、原子力発電所などの設計用入力地震動には大崎スペクトルから作られた模擬地震動が用いられている。しかし、この模擬地震動は基本的にマグニチュード M と震央距離 Δ だけから決められており、予測地点と断層面の位置関係などが考慮されておらず、問題点が残されている。

最近、経験的グリーン関数法で模擬地震動を作成することが試みられている。この方法は予測地点と断層面の位置関係などを考慮でき、グリーン関数となる小地震の観測記録によっては十分な短周期成分まで地震動を表現できるという利点がある。しかし、将来発生する地震と同じ震源域で同じメカニズムを有し、予測地震に比べマグニチュードのそれほど小さくない地震の地動を経験的グリーン関数として用いるため、そのような地震動が予測地点で観測されていなければならない。また、小地震の観測記録には観測点におけるサイト特性が含まれているため、

観測記録のない任意の異なる地点の地震動を予測することはできない。さらに、地震の破壊パターンをどのように与えるかや、P波やコーダ波の扱いに問題が残されている。

そこで、以上のような経験的手法を用いずに、模擬地震動を理論的に作成することができないか考えた。このときに問題となるのは、将来の地震の断層から発生する地震動を構造物の固有周期を含む短周期成分まで正確に計算するにはどうしたら良いかという点である。一般に、短周期地震波は断層面上のアスペリティーあるいはバリアによって不規則な断層運動が生じて励起されるものと考えられている。ところが、将来発生する地震の断層面がどのようなアスペリティーやバリアを有し、それによってどのような不規則な断層運動が生じるか予測することは、現在の技術レベルでは不可能である。そこで、筆者は過去に発生した地震の震源破壊過程のインバージョン結果を用いて、将来発生する可能性のある地震の震源破壊過程と見なし、理論的に地震動を計算することを考案した。

2. 模擬地震動の作成

(1) 南関東大地震の震源破壊過程

今回の研究では、近い将来発生が予測される南関東大地震(1923年の関東大震災の再来)による東京都の臨海副都心における表面波による長周期地震動

の予測を試みた。

関東大震災の表面波による地震動は、工藤⁹⁾によって東京・本郷におけるやや長周期地震動の再現が試みられている。ただし、工藤の方法は不規則な断層運動は考慮していない。今回の研究では不規則な断層運動を与えて、長周期成分が励起されやすい東京・臨海副都心部の軟弱な地盤構造を用いて解析をおこなった。

不規則な断層運動として、Mori and Shimazaki²⁾によってインバージョン解析された1968年の十勝沖地震の震源破壊過程を用いた。この解析は周期10秒～25秒の表面波を用いたものである。図-1にbilateralに3.1km/sの破壊伝播速度を与えたときのインバージョン結果を示す。この解析では断層面を18個の40km×40kmのブロックに分けて計算をおこない、各ブロックからのモーメントの放出量を同定している。表-1にこのモーメント量を示す。(真の数値は著者に問い合わせたが記録に残っていないとのことであり、図-1から筆者が読み取った。)各ブロックからのモーメントの総量はMw7.7に相当し、Mw8.2と推定されている十勝沖地震では、大部分のエネルギーが周期25秒より長周期の地震波によって放出したと考えられる。

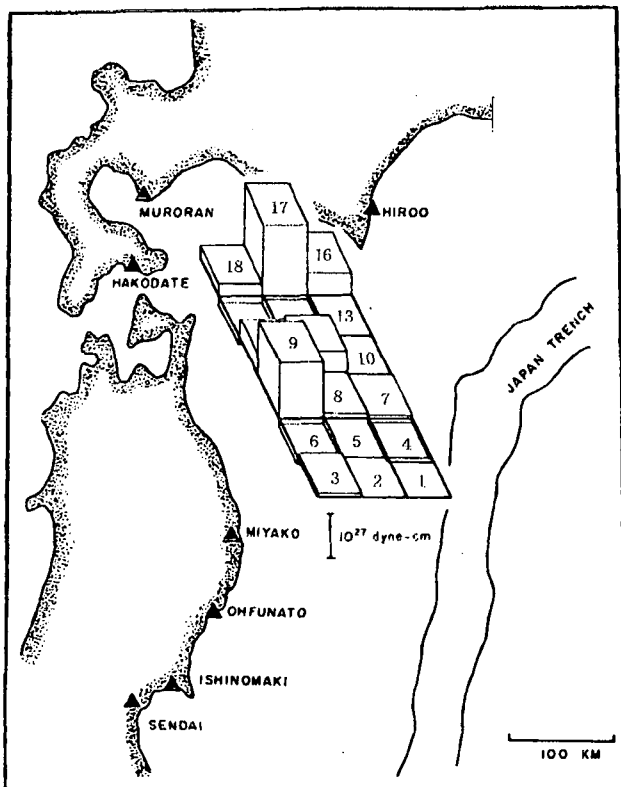


図-1 Mori and Shimazaki²⁾による1968年十勝沖地震のモーメント分布
(ブロックの番号は筆者が加筆したもの)

表-1 十勝沖地震の各ブロックのモーメント値

event number	moment (10E27 dyne-cm)
1	-0.07
2	0.00
3	0.11
4	-0.10
5	0.00
6	-0.10
7	0.06
8	0.12
9	1.29
10	0.00
11	0.52
12	0.49
13	0.00
14	-0.09
15	-0.16
16	0.52
17	1.60
18	0.28
total	4.47

十勝沖地震を用いた理由は次の3つである。

- ① 南関東地震と同じサブダクションゾーンで発生する低角逆断層型の巨大地震であり、メカニズムが似ていると考えられること。
- ② 再来周期が100年～200年程度であり、スティックスリップの状態(すなわちアスペリティーやバリアの強度やその分布)が似ていると考えられること。
- ③ 大正の関東大地震M7.9より十勝沖地震Mw8.2の方が断層面が約3倍大きい。1703年の元禄の関東大地震M8.2は大正の地震の2倍の断層面を有していたと推定されており(金森・安藤³⁾)、十勝沖地震クラスの地震は南関東でも発生する可能性がないとは言えないこと。

(2) 臨海副都心の地盤構造と分散曲線

臨海副都心における地盤構造を表-2のように決めた。この構造は、表層付近は近藤・高橋⁴⁾による豊州付近のP-S検層結果から推定し、それより下は嶋・他⁵⁾による夢の島での発破実験から推定した。本来、模擬地震動は工学基盤面での地震動を予測するものであるが、表面波の場合は地表付近の柔らかい層が位相速度や振幅に与える影響が大きいため、工学基盤より上の層までモデル化をした。

この構造から求まるLove波とRayleigh波の分散曲

表-2 東京都臨海副都心における地盤構造

depth to top (km)	density (ton/m ³)	P-wave vel. (km/s)	S-wave vel. (km/s)
0.00	1.50	1.65	0.58
0.15	2.00	1.83	0.70
1.50	2.20	2.80	1.50
2.30	2.60	5.50	3.00
5.00	2.70	6.00	3.40
15.00	3.00	6.70	3.90
31.00	3.35	7.50	4.40
70.00	3.40	8.10	4.70

線を図-2と図-3に示す。今回は両者共に基本モードだけの計算をおこなった。また、周期はMori and Shimazakiのインバージョン解析と同じ10秒~25秒を計算した。両図を比較すると、Love波の位相速度の方が変化が大きいことが伺える。

(3) 南関東大地震の断層モデルと計算波形

図-4は1923年の関東大地震の断層モデル(Kanamori model)に、十勝沖地震の断層モデルを重ね書きしたものである。断層面の走向はN110°、傾斜角は146°(西側傾斜)、滑り角(rake)は198°(南東

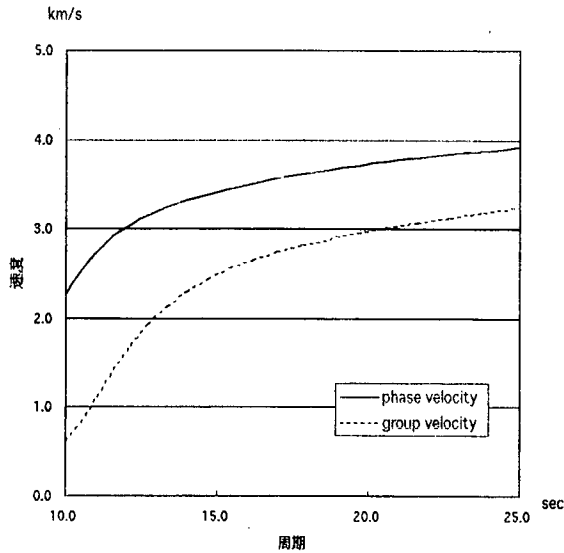


図-2 Love波の分散曲線

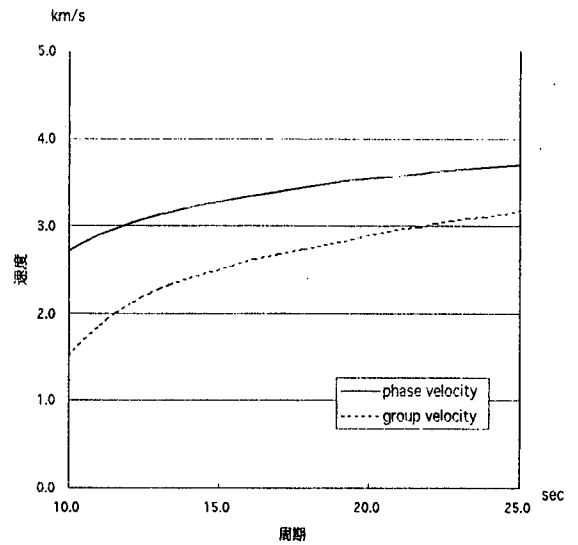


図-3 Rayleigh波の分散曲線

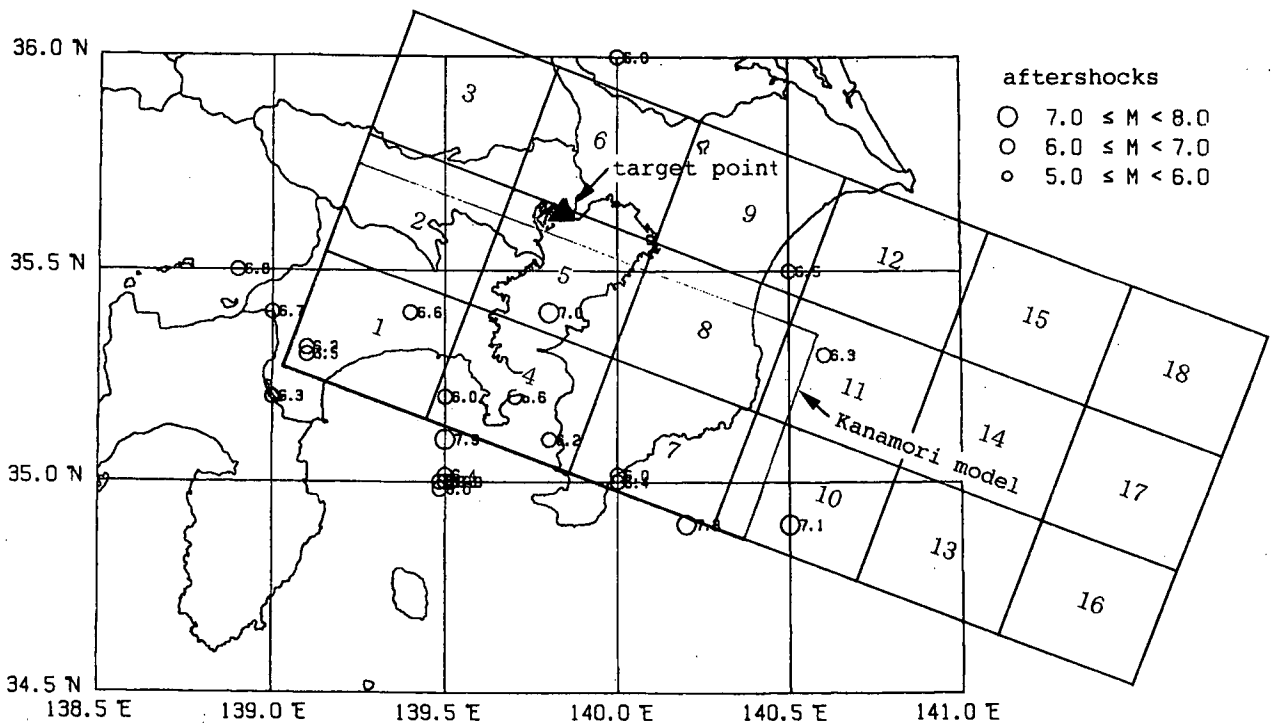


図-4 想定した南関東大地震の断層面と地震動計算地点(▲)

方向の逆断層), 上端深さは3kmとし, Kanamori modelと同じ値を用いた。また, 震央距離が震源深さの2.5倍より短い部分は, 表面波の励起が充分ではないので計算をしなかった。正規モード理論は1秒間隔で1024ポイントの計算をおこなった。周波数軸上では約0.001Hz間隔でナイキスト周波数が0.5Hzに相当する。周期にすると2秒から1000秒までの計算をおこなったことになるが, 表面波の固有値は10秒から25秒までしか計算していないので, 解析結果もこの区間しか見ることができない。

解析の結果, Love波の計算からは図-5の地動波形が得られた。Love波ではN-S成分よりもE-W成分が卓越し, 周期11秒程度の地動が300秒ほど続く結果が得られた。

Rayleigh波の計算からは図-6の地動波形が得られた。Rayleigh波ではE-W成分よりもN-S成分が卓越し, 周期13秒程度の地動が200秒ほど続く結果が得られた。U-D成分も卓越周期13秒程度で最大振幅は約7cmとなった。

図-7はLove波とRayleigh波を併せた結果である。N-S成分では周期13秒程度で振幅10cm以上の変位振幅を有する地震動が100秒ほど続き, 最大振幅は約17cmとなる結果が得られた。E-W成分もN-S成分と似た性質の地震動が生じたが, 振幅はやや小さく最大振幅は約16cmとなった。

図-8はLove波とRayleigh波を併せたN-S成分の速度応答スペクトルである。また, 図-9はRayleigh波のU-D成分の速度応答スペクトルである。Love波成分は継続時間が長く, 水平成分には10秒より短周期に速度応答スペクトルのピークがあるように見える。

3. まとめ及び今後の方向

近い将来, 発生が予測される南関東地震の模擬地震動を1968年の十勝沖地震の震源破壊過程を用いて計算した。十勝沖地震の断層モデル(240km×120km)は, 1923年の関東大地震のKanamori model(130km×70km)に比べて断層面積がかなり大きく, 特に断層面下端が深く入り込み過ぎている感は否めない。また, Mori and Shimazakiのインバージョン解析は工学的に必要な周期よりも長周期を対象としており, 従って, 模擬地震動も長周期しか再現できない。この点に関して, たとえば1993年の釧路沖地震のインバージョン結果(Ide and Takeo⁶⁾)や1994年の北海道東方沖地震のインバージョン結果⁷⁾を用いることも考え

られる。しかし, 釧路沖地震はプレート内部地震で水平の断層面を持った特殊な地震であった。また, 釧路沖地震はほぼ鉛直の高角な断層面を持った地震であった。このように十勝沖地震以外に適当地震のインバージョン解析結果が見つからなかったこともあり, 今回は十勝沖地震の震源破壊過程を用いて計算した。そのために周期10秒より短周期の特性が見られなかったことは残念である。

ただし, 現在, 数多くの地震に対して震源の破壊過程が解明されつつあり, データベースが蓄積されてきている。今後は, これらのデータベースの中から予測しようとする地震と大きさや特性が似た地震の震源破壊過程を用いれば, 任意の地点の模擬地震動を計算できるようになるであろう。例えば, 兵庫県南部地震の震源破壊過程を用いて有馬-高槻断層で地震が生じたときの周辺の地震動を予測することは可能である。

さらに, 将来はこの方法により, 水平成層構造でなく3次元不均質構造を考慮した解析にも適用可能になるであろう。これは他の模擬地震動作成方法では不可能である。

参考文献

- 1) 上藤一嘉: 正規モード解による強震地動の研究とその応用, 東北大学理学部博士論文, 1979.
- 2) J. Mori and K. Shimazaki: Inversion of intermediate period Rayleigh waves for source characteristics of the 1968 Tokachi-oki earthquake, J. Geophys. Res., 90, 11374-11382, 1985.
- 3) 金森博雄, 安藤雅孝: 関東大地震の断層モデル, 関東地震50周年論文集, 東京大学地震研究所, 89-101, 1973.
- 4) 近藤和男, 高崎英邦: 東京の地下構造, 清水建設株式会社, 軟弱地盤設計開発プロジェクト, 1977.
- 5) 嶋悦三, 柳沢馬住, 上藤一嘉, 吉井敏かつ, 瀬尾和夫, 羽黒公明: 東京の基盤構造その3, 東京大学地震研究所報, 53, 305-318, 1978.
- 6) S. Ide and M. Takeo: The dynamic rupture process of the 1993 Kushiro-oki earthquake, J. Geophys. Res., 101, 5661-5675, 1996.
- 7) 京都大学防災研究所地震予知研究センター: 北海道東方沖地震の震源過程, 地震予知連絡会会報, 第53巻, 71-75, 1995.

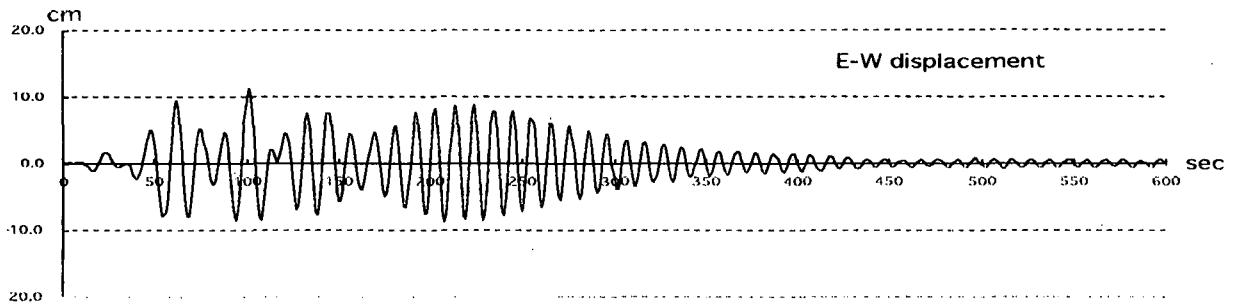
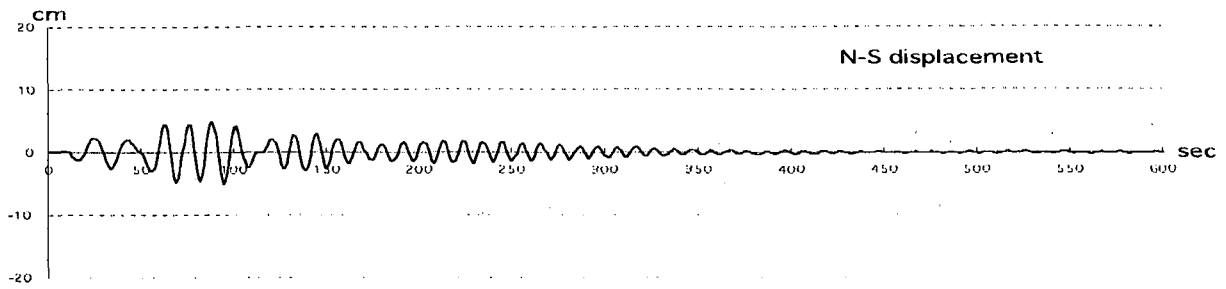


図-5 基本モードのLove波による計算波形

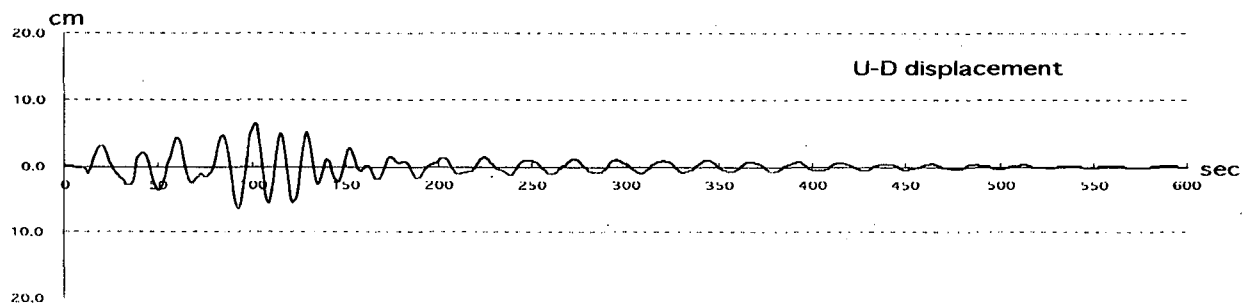
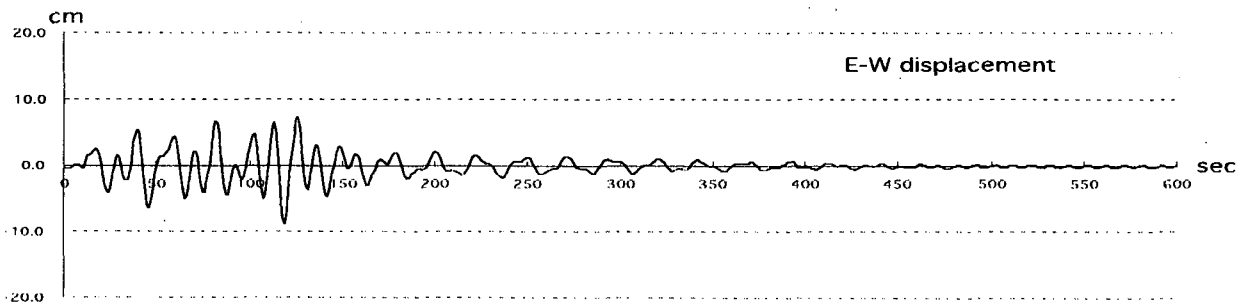
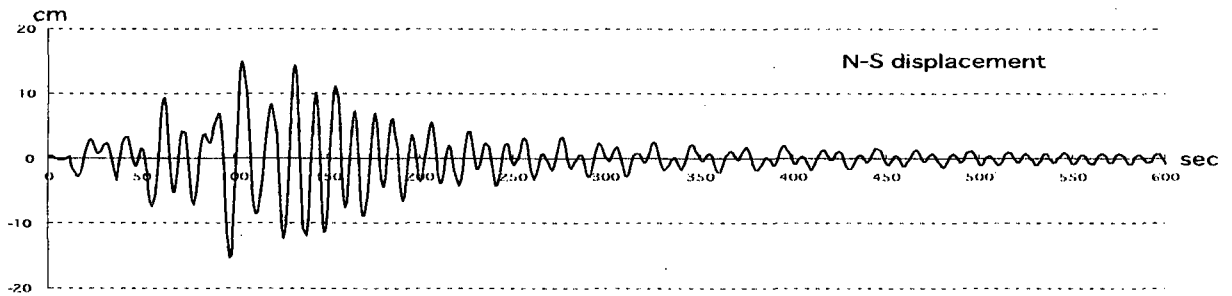


図-6 基本モードのRayleigh波による計算波形

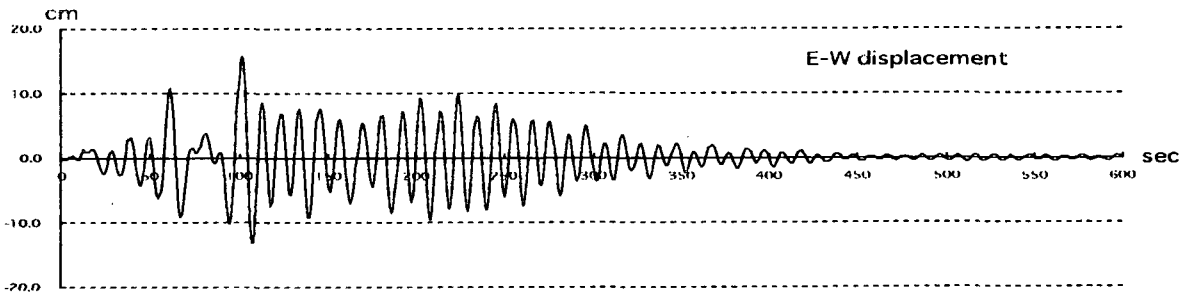
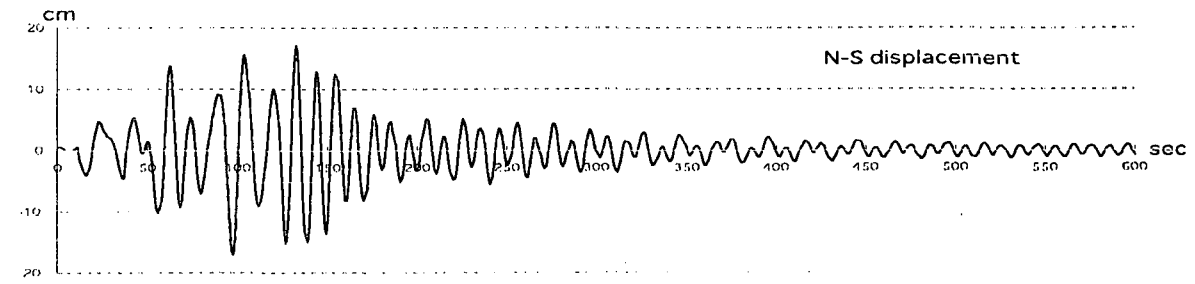


図-7 love波と ayleigh波を合わせた計算波形の水平成分

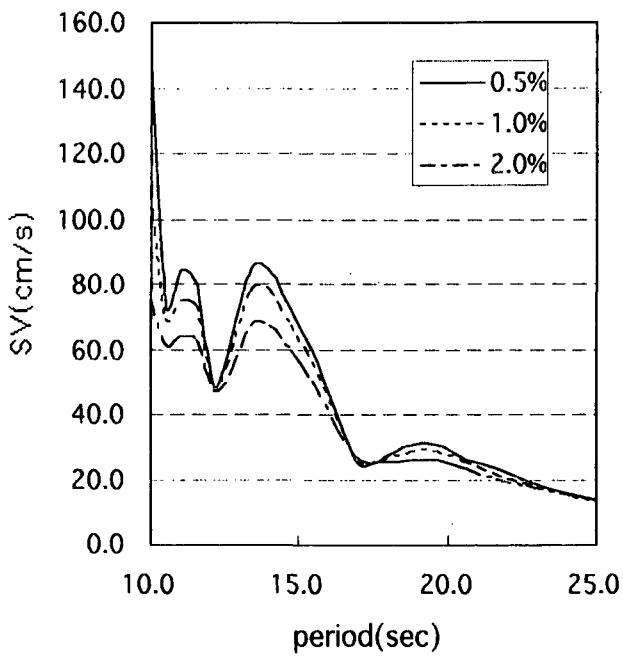


図-8 水平成分(N-S)合成波形の速度応答スペクトル

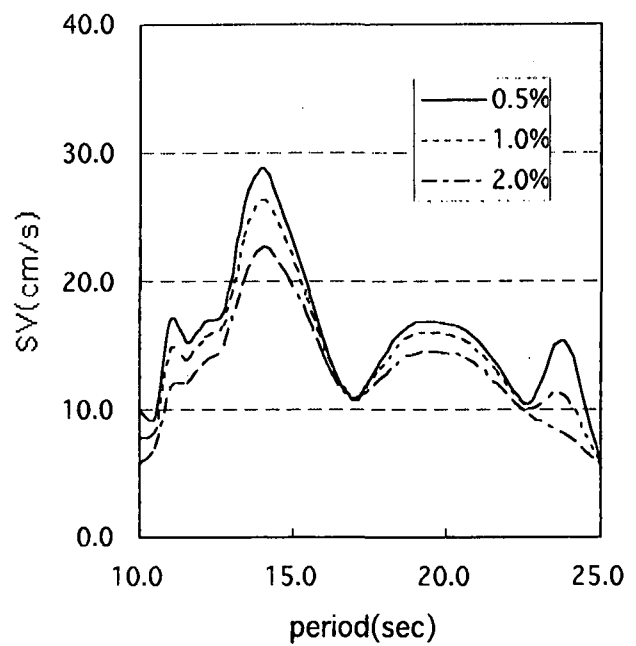


図-9 鉛直成分(U-D)波形の速度応答スペクトル