

1995年兵庫県南部地震の神戸PIで得られた鉛直アレー観測記録に基づく動的地盤定数の逆解析結果に関する考察

Reflections on inverse analysis results of dynamic soil parameters on the seismometer array record obtained at Kobe Port Island during the Hogoken Nambu Earthquake of 1995

本城勇介*・鈴木良典**・吉澤睦博*** 鬼丸貞友****

Yusuke HONJO, Yoshinori SUZUI, Mutsuhiro YOSHIZAWA, and Sadatomo ONIMARU

*正会員 Ph.D. 岐阜大学教授 工学部 土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

**正会員 大豊建設(株) 東京支店 土木工務部 (〒104-8289 東京都中央区新川1-24-4)

***正会員 (株) 竹中工務店 原子力・火力本部 (〒104-8182 東京都中央区銀座8-21-1)

**** (株) 竹中工務店 技術研究所 (〒270-1352 千葉県印西市大塚1-5-1)

Strong earthquake motion record obtained from a seismometer array record at Kobe Port Island during the Hogoken Nambu earthquake of January 1995 is employed to inversely analyze the dynamic soil parameters, i.e. dynamic shear modulus and damping ratio of each layer. The extended Bayesian method (EBM) is employed to overcome the problem of illposedness. Some trade off between the shear modulus and the damping ratio is observed. Also the solution is not unique. Such kind of trade off have been successfully solved by EBM for relatively smaller earthquake motion records in the previous studies (Honjo et. al, 1997, 1998). It is speculated that this problem arose because of the extraordinarily strong earthquake motion record obtained, and approximating this phenomena by the equivalent linear model. Discussion is made both from statistical and soil dynamic view points on the problem.

Key Words : *inverse analysis, extended Bayesian Method, illposedness, SHAKE, dynamic soil parameters, equivalent linear analysis*

1. 研究目的

構造物の地震時の安全性や地盤の液化化予測のためには、深い基盤から入力する地震波が、それぞれのサイトでどのように増幅され伝播するかを知ることが極めて重要である。このため、深度方向に幾つもの地震計を設置し、地震波の伝播特性を捉える、アレー観測が各地で行われている。本研究では、兵庫県南部地震での神戸市ポートアイランド(以下、神戸PI)における観測結果の逆解析を行うことにより、各土層の土の定数(せん断剛性, 減衰比)を推定し、そのひずみ依存性を求める。

このアレー記録は、めったに得ることのできない強震時のもので、地盤の応答解析で特に問題となる、せん断剛性や減衰比などの地盤定数の原地盤におけるひずみ依存性を解析する上で貴重な記録である。しかしながら、この記録は一つの地震についてのものであり、一般に等価線形解析では、地震記録全体を対象として行なうのが一般的なので、いろいろな異なるひずみに対応した地盤定数の値を解析することができない。そこで本研究では、神戸PIの記録を、5秒ずつずらして15秒間隔に区切り、それぞれの時間間隔を定常波と考えて等価線形解析を行ない、地震動のレベルに応じた地盤定数値の推定を試み、その結果より、これらの定数の値のひずみ依存性を検討した。

以上のように、一つの地震の比較的短い時間間隔部分

の記録だけを取り出して、重複反射理論に基づいた応答解析を行なうことには、種々の無理がある。つまり、本来非定常な応答をしている地盤を、時間間隔を区切って定常応答と仮定していること、本来ひずみレベルがそれほど小さくなく、弾性応答に近い状態の近似を考慮して開発されたと考えられる重複反射理論による等価線形法を、かなり大きなひずみが発生したと思われる地盤応答に適用していることなどである。これらの点は、逆解析結果の解釈に当たり、注意を払った。

一方、手法としての逆解析の研究は地盤工学の分野においても、大きな進歩を示している。特に1994年度から1996年度に活動を行なった地盤工学会の「逆解析の地盤工学への適用に関する研究委員会(委員長 太田秀樹東京工業大学教授)」の活動では、逆解析の限界と可能性が、メンバーの活発な研究活動を通じてかなり明らかになった。(大谷他11名¹⁾参照)

その結果を簡単に要約すると、それは逆問題が不適切(illposed)であると言う認識の深化と、それを克服するための適切化手法(regularization procedures)の整理である。古典的境界値問題などと全く異なり、逆問題は一般に解の存在、唯一性、安定性の保証されない問題である。これが、近年に至るまで逆問題が研究のメインストリームから、阻害されていた最大の原因であると思われる。

限られたデータから多くのモデルパラメータを同定しようとしても、多くの場合共線性 (multicollinearity) と呼ばれる現象が発生し、パラメータ同定が著しく困難になることは、統計学でもよく知られていたが、これは不適切性と全く同じ現象の別名である。すなわち、このような場合多くのパラメータ値の間でトレードオフの関係が起こり、このため推定値は、少数のデータの追加や削減で著しい変化を生じる結果となる。

このような不適切性を克服するために、いくつかの方法が提案されている。その幾つかは、本論文集の本城²⁾およびその参考文献に紹介されているので、参照されたい。

本論文で取り扱った地震波伝播の問題でも、推定しなければならないパラメータは各土層のせん断剛性と減衰比合計 18 個であり、逆解析結果は不安定であり、典型的な不適切性挙動を示した。従ってパラメータの値の間には、トレードオフ関係が存在する。本研究では、このような不適切な問題に対する適切化手法の適用に興味があり、この点についても、逆解析結果をもとに、詳しく議論した。

本論文の構成は、次の通りである。第 2 章では、地盤の重複反射理論による等価線形応答解析と、本研究で採用した逆解析手法について述べる。第 3 章は、神戸 PI データの解析について述べた。すなわち、データの概要、観測記録の主方向への変換、逆解析結果の考察について記した。第 4 章は結論である。

2. 逆解析

2.1 地盤の動的特性と応答解析

地盤はもともと非線形材料であって、せん断剛性も減衰比も、ひずみ依存性が顕著である。しかし実務では、これを弾性モデルで表現し、重複反射理論による等価線形解析法を用いることが多い³⁾。このとき、地震動解析に必要な地盤の主な特性は、密度 $\rho(t/m^3)$ 、せん断剛性 $G(kN/m^2)$ 、減衰比 h の 3 つがあげられる。等価線形解析法の電算プログラム“SHAKE”は、実務で広く用いられている。本研究も、この解析法で設定すべき動的地盤定数の推定を、研究の目的としている。

重複反射理論による等価線形解析法については、既に広く知られているので、ここでは述べない³⁾。

2.2 拡張ベイズ法

任意の地盤内の 2 点 A と B で、地震動観測記録が得られているとき、これにフーリエ変換を施すことにより、それぞれのフーリエ・スペクトルを求めることができる：

$$G_A(\omega) = A_r(\omega) + i \cdot A_i(\omega) \quad (1)$$

$$G_B(\omega) = B_r(\omega) + i \cdot B_i(\omega) \quad (2)$$

これより、それぞれの振幅スペクトルは次のようになる：

$$T_A(\omega) = \sqrt{A_r(\omega)^2 + A_i(\omega)^2} \quad (3)$$

$$T_B(\omega) = \sqrt{B_r(\omega)^2 + B_i(\omega)^2} \quad (4)$$

振幅スペクトルに含まれるノイズを取り除くために、 $T_A(\omega), T_B(\omega)$ を、バンド幅 $\beta(Hz)$ の Parzen Window で平滑化したものを、それぞれ $T_A(\omega|\beta), T_B(\omega|\beta)$ と表わす。本論文では、0.2Hz のウィンドー幅を採用した。2 点間の伝達関数の振幅比部分 ($T_{AB}(\omega|\beta)$) は、これらの比であるから、次式により与えられる。

$$T_{AB}(\omega|\beta) = T_A(\omega|\beta) / T_B(\omega|\beta) \quad (5)$$

一方、伝達関数の位相部分は、次のようになる。

$$\phi_{AB}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{A_i(\omega)B_r(\omega) - A_r(\omega)B_i(\omega)}{A_r(\omega)B_r(\omega) + A_i(\omega)B_i(\omega)} \right] \quad (6)$$

本城ら^{4),5)}は、このような多層系地盤の応答解析の逆解析は、不適切性 (共線性) が強いとして、これを適切化するため事前情報を考慮して、拡張ベイズ法により定式化することを提案した。さらに、通常この種の問題で考慮される振幅に関する情報だけでなく、位相も評価関数に取り入れることを提案した⁴⁾。この研究でもこの考え方を踏襲し、次の 2 つの評価関数 J_1, J_3 を、逆解析を行なうとき採用し、その結果を比較した。なお、類似の定式化は辻原ら⁶⁾によっても採用されている。

$$\begin{aligned} \min J_1(G, h|d_1^2, d_2^2) \\ = \min \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{\sigma_\epsilon^2} \left[\{T_{ij}(\omega_k|G, h) - T_{ij}^*(\omega_k)|\beta\}^2 \right. \\ \left. + d_1^2(G - G^*)^T V_G^{-1}(G - G^*) \right. \\ \left. + d_2^2(h - h^*)^T V_h^{-1}(h - h^*) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

一方、これに伝達関数の位相を加えた評価関数は、

$$\begin{aligned} \min J_3(G, h|d_1^2, d_2^2) \\ = \min \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{\sigma_\epsilon^2} \left[\{T_{ij}(\omega_k|G, h) - T_{ij}^*(\omega_k|\beta)\}^2 \right. \\ \left. + \{\phi_{ij}(\omega_k|G, h) - \phi_{ij}^*(\omega_k)\}^2 \right. \\ \left. + d_1^2(G - G^*)^T V_G^{-1}(G - G^*) \right. \\ \left. + d_2^2(h - h^*)^T V_h^{-1}(h - h^*) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

ここに、

$T_{ij}(\omega_k G, h)$	: 2 観測点間の解析伝達関数の振幅比、
$T_{ij}^*(\omega_k \beta)$	: 2 観測点間の観測伝達関数の振幅比、
$\phi_{ij}(\omega_k G, h)$	: 2 観測点間の解析伝達関数の位相、
$\phi_{ij}^*(\omega_k)$	: 2 観測点間の観測伝達関数の位相、
G, h	: せん断剛性と減衰比ベクトル、
G^*, h^*	: 推定地盤定数の事前平均ベクトル、
σ_ϵ^2	: 観測値の分散 (一定値を仮定)、
V_G, V_h	: 事前情報の分散・共分散行列、
N	: 観測点の個数、
K	: 周波数の分割個数を表し、
d_1^2	: せん断剛性における事前情報の項の重み、
d_2^2	: 減衰比における事前情報の項の重み。

表-1 解析用地盤モデル

層番号	土質	標準値	層厚 h(m)	土の密度 $\rho(\text{t/m}^3)$	せん断剛性 G(MPa)	せん断速度 Vs(m/sec)	減衰比
1	砂礫	5.2	2.0	2.00	57.8	170.0	0.02
2	砂礫	5.2	3.0	2.00	57.8	170.0	0.02
3	砂礫	6.5	7.6	2.00	88.2	210.0	0.02
4	礫混り粘土	6.5	6.4	2.00	88.2	210.0	0.02
5	粘土	3.5	8.0	1.60	51.8	180.0	0.02
6	砂	13.5	6.0	1.80	108.0	245.0	0.02
7	礫混り砂、砂	36.5	17.0	1.90	176.7	305.0	0.02
8	砂	61.9	11.0	2.00	245.0	350.0	0.02
9	粘土	11.7	18.0	1.65	151.5	303.0	0.02
10	礫混り砂	68.0	6.0	2.00	204.8	320.0	0.02

表2 d_1^2 , d_2^2 の重み付けと ABIC(0~60(sec)、 β)

		$d1^{**2}$						
		10000	1000	100	10	1	0.1	0.01
$d2^{**2}$	10000	9191.97	9182.09	9009.87	8713.18	8735.93	8988.73	8677.33
	1000	9172.34	9141.31	8893.31	8539.08	8689.01	8540.57	8508.04
	100	9081.54	9046.83	8890.40	8519.50	8672.43	8480.35	8490.95
	10	8870.32	8815.84	8894.25	8517.95	8672.60	8476.24	8495.64
	1	8835.58	8582.63	8899.59	8520.02	8674.89	8478.82	8503.48
	0.1	8838.38	8414.83	8906.67	8525.55	8679.72	8484.44	8512.48
	0.01	8847.66	8400.55	8915.35	8533.79	8686.78	8492.57	8522.07
$d2^{**2}$	0.001	8859.71	8419.14	8924.96	8544.04	8695.71	8502.25	8532.93

 は、重み($d1^{**2}$)が大きいときの適用値
 は、重み($d1^{**2}$)が小さいときの適用値(ABIC最小値)

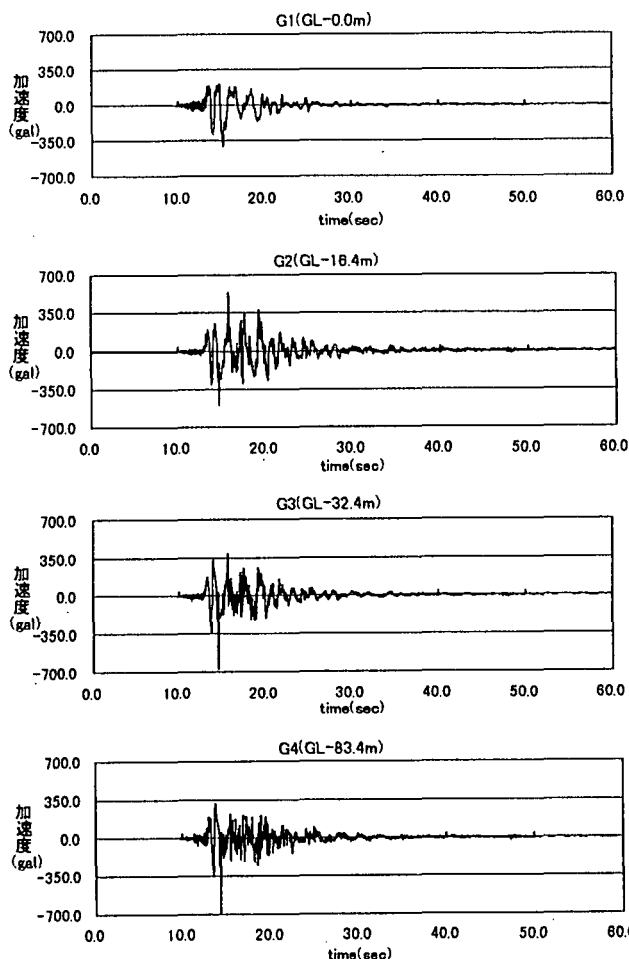


図-1 主軸方向へ変換後の加速度波形

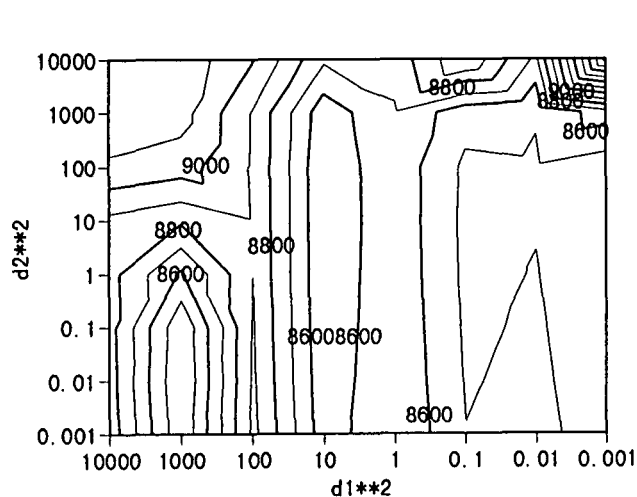


図-2 表-2におけるABICのコンター図

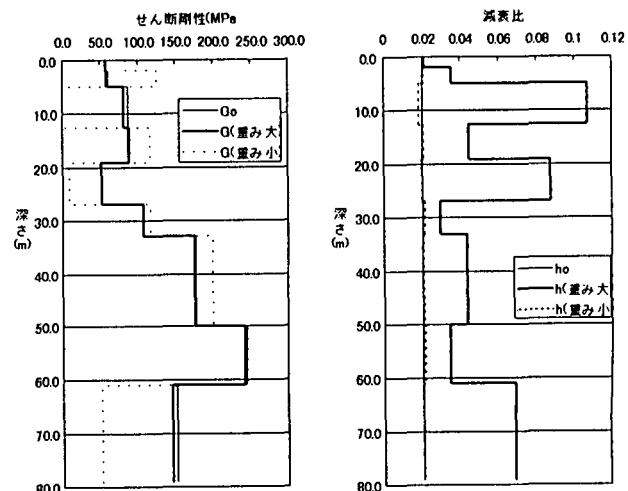


図-3 全時間(0~60(sec))におけるGに対する重みの大小による推定地盤定数の比較図

評価関数について詳しく述べると、 J_1 (式(7))は、観測情報については伝達関数の振幅比(T_{ij})のみ、 J_3 (式(8))は、伝達関数の振幅比と位相(ϕ_{ij})、それぞれの残差2乗和の最小化をはかる。なお、評価関数を J_1 と J_3 としたのは、既発表の論文との記号の整合性を計るためである。

なお、拡張ベイズ法を用いるのは、この逆問題が不適切であるため、これを適切化するため事前情報を加えるが、その重みをスカラー量 d_1^2, d_2^2 を用い調整するためである。この最適化にはABIC(赤池ベイズ情報量規準)を用いている⁷⁾。他の適切化手法については本城ら(1999)²⁾を参照されたい。また、逆解析の不適切性の度合いをみるため、条件数を用いる。条件数が小さいほど問題は適切化されており、推定値の信頼性は高いといえる。

3. ケース・スタディー

3.1 観測データの概要と前処理

(1) 実観測地震概要及び解析地盤モデル

本研究では、地震動が非常に大きい神戸PIの地震観測データを用いる。地震計は、G1(GL-0.0m)、G2(GL-16.4m)、G3(GL-32.4m)、G4(GL-83.4m)の4箇所に設置されている。神戸PIの表層地盤は、埋め立て地盤であり、液状化しにくい土とされていたが、周知のようにPI全域で液状化が起こった。また、解析地盤モデルは表1に示すような地盤定数を設定した。これは、PS陰層結果から与えたものである。

(2) 観測加速度の方位補正及び主軸への方向転換

鉛直アレーで観測された記録には、特にボアホールの深い場所に位置する地震計は、設置誤差がある場合が多いと言われている⁸⁾。そこで、神戸PIを対象地盤としている吉田と栗田⁹⁾、杉戸ら¹⁰⁾、岡ら¹¹⁾を参考にG4(GL-83.4m)の地震計の観測方位が、水平面で時計回りに20°ずれているものと考えた。

さらに、本研究では地震動が強く現れる主軸への座標変換を行った。これは、地震動の大きかった方向について解析を行なうことにより、実際に発生した大きな地盤内ひずみを捕らえられるように、逆解析を行なうためである。主軸の方向については、福武¹²⁾、山下ら¹³⁾を参考にして、主軸方向を真北から反時計回りに20°回転した方向とした。従って方位補正も合わせて考慮すると、変換する角度は、G1、G2、G3でそれぞれ反時計回りで20°、G4は40°となり、このように変換された主軸方向の加速度記録を用いて解析を行う。この主軸方向へ座標変換された加速度波形を図-1に示す。

(3) 加速度記録の時間区間分割

本研究では、先に説明したように地盤定数のひずみ依存性を明確にするため、加速度記録全体(0~60(sec))の解析と共に、加速度記録全体をステップ幅5(sec)

ごとに15(sec)ずつの区間、すなわち5~20(sec)、10~25(sec)、...、35~50(sec)と言う様に区切り、それぞれの時間区間に対してフーリエ変換を行い、伝達関数を求め逆解析を行った。また、15(sec)ごとに区切る際に、前後1秒間の記録に正弦波の4分の1波長を用いて、滑らかにフェードイン、フェードアウトするように操作を施し、地震波が大きい値から急に0をとることのないよう配慮している。

15(sec)を選択した理由は、これより短い区間を用いたとき、逆解析の推定結果が、安定しなかったためである。すなわち、15(sec)より小さい5、10(sec)でも同様の解析を行なったが、それらの推定値は時系列的に考えても、解釈をすることが困難な結果を与えた。15(sec)の場合は、その結果は後に示すように、ある程度時系列的な解釈が可能であった。もちろん区間を長く取れば、解はより安定すると予想されたが、経時的なひずみの増大に伴う地盤定数の変化を観察することが目的である当解析では、15(sec)が適当な時間間隔であると判断した。重複反射理論は、本来定常状態の地盤の応答解析に用いる方法であるから、極端に短い時間区間をとることに無理があることは当然と考えられる。

3.2 逆解析結果の考察

(1) 逆解析による地盤定数の推定

全記録に基づく逆解析結果：本解析で扱っているような、18個ものパラメータの値を同時に推定しようとする逆解析では、不適切性が生じることは避けられない。本解析でも不適切性が生じていることは、条件数が、事前情報の重み(d_1^2, d_2^2)が小さいとき、数万かそれ以上の値に達していることから明らかである。このような場合、推定値が極めて不安定な挙動をする。

逆解析を行なう際、今まではABIC最小値を最適な値とし、そのときの事前情報の重み(d_1^2, d_2^2)をとる地盤定数を推定値としていた^{4),5)}。しかし、神戸PIでの地震動が大きいいため、このデータの逆解析は、 $d_1^2 - d_2^2$ 平面上で、ABICの唯一の極小値を与えず、あまりよい結果が選られなかった。結果を詳細に検討した結果、これは、推定されるせん断剛性 G と減衰比 h の間にあるトレードオフのためであることがわかった。著者らの逆解析のモデル化では、評価関数でせん断剛性と減衰比の事前情報に、をそれぞれ一括して、重みをつけていることも、このようなトレードオフ関係を誘発している。

一般に、数層から構成されるような比較的単純な一次元波動伝播では、せん断剛性は伝達関数の周期特性を支配し、減衰比はその振幅比のピーク値に影響を与えることが知られている。しかし本解析が対象している様な10層もの土層よりなる複雑な振動系の逆解析では、せん断剛性と減衰比と言う要因の他にも、浅部と深部、隣り合う土層間、土層のグループ化の方法等で推定される各パラメータ値の間で複雑なトレードオフが発

生していると考えられ、実際解析の結果を詳細に観察しているとそのような例に出会うことも多い。

このようなトレードオフ関係は、一般的な地震動の観測結果の逆解析でも見られたが、神戸PIデータでは、その地震動が大きいのか、その現われ方が特に顕著であると思われる。

従って、 G に対する重み (d_1^2) が大きい場合 ($d_1^2 = 10, 100, 1000, 10000$) と小さい場合 ($d_1^2 = 0.001, 0.01, 0.1, 1$) の結果にそれぞれで ABIC は極小値をとっていた。これは、全時間 (0~60(sec)) で逆解析を行なった際にも生じ、 G の重みが大きい場合は、せん断剛性の事前平均値 G_0 に、 G の重みが小さい場合は、減衰比の事前平均値 h_0 に引張られる推定値となった。この解析結果を表-2 及び図-2 と図-3 に示した。特に表-2 及び図-2 より分かるように、ABIC には 2 つの極小値がある。

最終的に、著者らはせん断剛性に対する重み d_1^2 が大きい場合の推定が、良い推定結果を与えていると考えた。それは、表-4 に示した条件数が、この場合は 200 程度であり適切化が十分に行われていると判断されるのに対して、 d_1^2 が小さい場合の条件数は、1 から 10 万のオーダーで、依然として推定値の不安定が解消されていないと判断するからである。具体的な推定結果では、前者は G が相対的に固定され、 h が変化している (図-3)。

15sec ごとの記録に基づく逆解析結果： 時間間隔 15(sec) ごとの逆解析結果でも、ABIC はせん断剛性に対する重み d_1^2 が大きい場合と小さい場合でそれぞれ極値をとった。それぞれの場合の評価関数 J_1, J_3 の値、それぞれの ABIC の値を表-3 に、条件数を表-4 に示した。

全記録の解析の場合と同じ理由、すなわち条件数の大きさから d_1^2 が大きい場合の方が、安定した結果を与えていると判断した。これら推定された G と h の結果を、図-4(a),(b) と図-5(a),(b) に示した。前者は評価関数 J_1 による結果、後者は J_3 に関する結果である。

図-4(a) の評価関数 J_1 による G の推定結果で、 G は 1~16(sec), 5~20(sec) では、事前平均値に対してそれほど変化はないが、10~25(sec) 以降地震動の主要部では、3,5,9 層で G が初期値より 10~20(%) 小さな値をとっている。第 3 層は地下水位直下の地盤、5,9 層は粘土層であるため G が低く、その結果大きなひずみが発生し、初期せん断剛性からの低下が大きくなったと考えられる。

一方、図-5(a) の J_3 による G の推定結果では、1~16(sec), 5~20(sec) では 3,5,9 層でせん断剛性比は小さくなっている。10~25(sec) 以降の地震動の主要部では、事前平均値とあまり変わらない値をとっている。

h は、図-4(b) と図-5(b) に示されるように、 G に大きな重みを与えた分、 h/h_0 の変化は相対的に G/G_0 の変化より大きい。 G 同様 3,5,9 層に特徴があり、他の層に

比べても大きな値をとっている。しかし、 J_3 に比べて J_1 の場合、すなわち図-4(b) の方が図-5(b) の場合より、地震動の大きい 10~25(sec), 15~30(sec) で大きな値を与えており、より適切な推定結果を示していると考えられる。

さらに各時間帯における G に対する重み (d_1^2) の大小、各評価関数ごとの ABIC 最適値をとるときの事前情報の重み (d_1^2) の値、ABIC の値を表-3 に示す。 J_1 では、全体的に、また特に地震動の主要部で、 G に重みが大きい場合に ABIC 最小値をとる。 J_3 では、1~16(sec), 5~20(sec) で G に重みが小さい場合に ABIC 最小値をとるが、10~25(sec), 15~30(sec), 20~35(sec) のときは G に重みが大きいとき ABIC 最小値をとるなど、統一された傾向がみられない。このことから J_1 による G や h の推定値が、安定しているといえる。

逆解析に伝達関数の位相を用いても、ノイズが大きく結果的に推定にあまり役に立たないことは、沢田ら¹⁴⁾、飛田¹⁵⁾ も指摘しており、上記の結果は、これらの結論と一致している。

表-4 には、各ケースの最小 ABIC における条件数を示した。せん断剛性 G の重みが小さい場合は、条件数はかなり大きく、推定結果が不安定であることを明確に示している。一方 G の重みが大きい場合は、条件数は数百程度で、前者よりかなり小さく、安定した推定結果を与えていることが分かる。この結果よりも、 G の重みが大きい場合はの方が、妥当な推定結果であると考えられる。

(2) 推定地盤定数のひずみ依存性の推定

次に、推定した地盤定数を用いて砂質土 (第 1~4,6~8 層)、粘性土 (第 5,9 層) で、各層ごとの地盤定数のひずみ依存性を検討する。なお、ここで言う有効せん断ひずみ $G - \gamma_{eff}$ とは応答を時間領域で見たときの土層に発生している最大せん断ひずみの 65% の値である。図-6 に、特に砂質土でひずみが大きかった第 3 層における、 $G - \gamma_{eff}$ と $h - \gamma_{eff}$ の経時的な変化を表した。

この図で 1~16(sec) の解析結果を除いて考えると、 G と h は時間と共にひずみが増大し、それぞれ減少と増加をした後に、初期状態に戻っているの様子が明確である。ただし、 h の増加に比べ G の減少は少ない。また、図-7 は第 9 層における $G - \gamma_{eff}$ と $h - \gamma_{eff}$ の経時的な変化を表した。この層では G の低減は、余り見られないが、減衰比は、ひずみが大きくなると増加している。

図-8 にすべての層の G/G_0 と h/h_0 を γ_{eff} に対してプロットした。特に変化が大きい推定地盤定数をとった第 3,5,9 層は、ひずみは大きく、従ってひずみ依存性も明確に確認された。第 1,2 層 (特に第 1 層) のひずみの値が小さいのは、液状化の影響にであるとも思われる。

表3 各時刻歴間における d_1^2 , d_2^2 の重み付けと ABIC

せん断剛性に重みが大さい場合

せん断剛性に重みが小さい場合

記録全体

0.0~60.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1000	0.001	7131.36
J3	1000	0.01	8492.56

0.0~60.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	0.1	1	7281.74
J3	0.1	10	8476.24

ランニングスペクトル(Time Step = 15.0(sec))

1.0~16.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1000	1	1980.56
J3	100	0.001	2029.68
5.0~20.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1000	0.001	1753.87
J3	100	0.001	1996.31
10.0~25.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	100	0.001	1650.92
J3	1000	0.001	1962.07
15.0~30.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	100	0.001	1616.04
J3	1000	0.001	1932.87
20.0~35.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	100	0.001	1762.28
J3	100	0.01	1889.91
25.0~40.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	100	0.001	1706.76
J3	1000	0.01	2029.60
30.0~45.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1000	0.001	1806.42
J3	100	1	2034.78
35.0~50.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1000	100	2006.21
J3	1000	0.001	1982.91

1.0~16.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	10	1887.29
J3	0.01	10	1974.93
5.0~20.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	10	1869.73
J3	0.1	0.001	1952.06
10.0~25.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	0.1	1748.88
J3	0.1	100	2034.41
15.0~30.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	0.001	1767.43
J3	0.1	10	1975.26
20.0~35.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	0.01	0.1	1794.27
J3	1	0.1	2002.39
25.0~40.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	1	1899.58
J3	0.01	10	2004.07
30.0~45.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	1	0.1	1870.98
J3	1	10	1932.20
35.0~50.0(sec)			
評価関数	d1**2	d2**2	ABIC
J1	0.1	0.1	1775.32
J3	0.1	1	1949.34

は、ABIC最小値を示す。

表4 各時刻歴間における条件数

せん断剛性に重みが大さい場合

せん断剛性に重みが小さい場合

記録全体

0.0~60.0(sec)		
	J1	J3
条件数	239.0	209.0

0.0~60.0(sec)		
	J1	J3
条件数	14502.5	263588.4

ランニングスペクトル(Time Step = 15.0(sec))

1.0~16.0(sec)		
	J1	J3
条件数	825.8	1421.0
5.0~20.0(sec)		
	J1	J3
条件数	131.1	948.3
10.0~25.0(sec)		
	J1	J3
条件数	239.0	209.0
15.0~30.0(sec)		
	J1	J3
条件数	216.0	173.6
20.0~35.0(sec)		
	J1	J3
条件数	452.4	358.5
25.0~40.0(sec)		
	J1	J3
条件数	335.3	9645.4
30.0~45.0(sec)		
	J1	J3
条件数	158.3	52304.6
35.0~50.0(sec)		
	J1	J3
条件数	5554.7	6259.0

1.0~16.0(sec)		
	J1	J3
条件数	61453.5	275274.7
5.0~20.0(sec)		
	J1	J3
条件数	59525.1	19241.4
10.0~25.0(sec)		
	J1	J3
条件数	14502.5	263588.4
15.0~30.0(sec)		
	J1	J3
条件数	13786.7	154053.6
20.0~35.0(sec)		
	J1	J3
条件数	52191.2	20842.0
25.0~40.0(sec)		
	J1	J3
条件数	22548.1	410358.2
30.0~45.0(sec)		
	J1	J3
条件数	10144.2	320777.0
35.0~50.0(sec)		
	J1	J3
条件数	31256.6	65622.9

は、ABICが最小値をとるとき

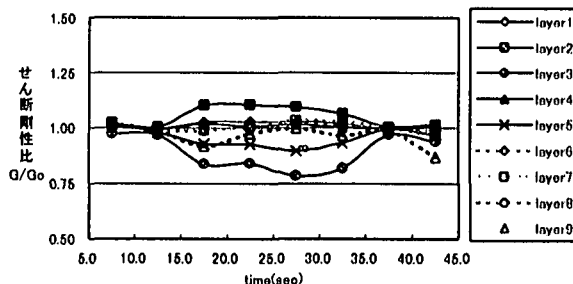


図-4(a) 各時刻、各層における正規化されたせん断剛性(せん断剛性に重みが多い場合、J1)

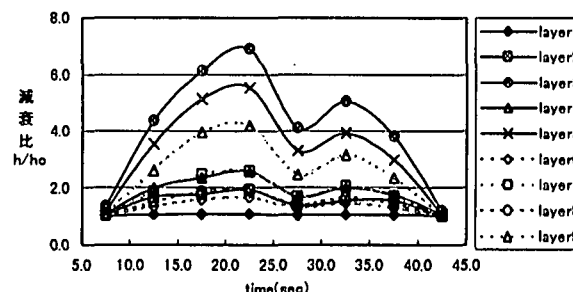


図-4(b) 各時刻、各層における正規化された減衰比(せん断剛性に重みが多い場合、J1)

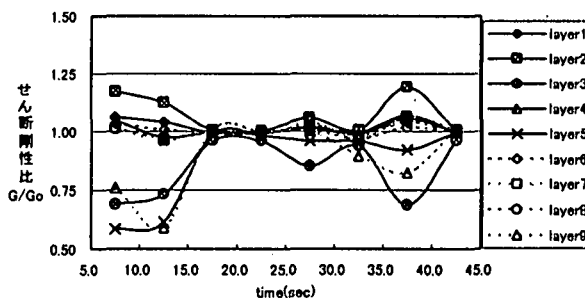


図-5(a) 各時刻、各層における正規化されたせん断剛性(せん断剛性に重みが大さい場合、J3)

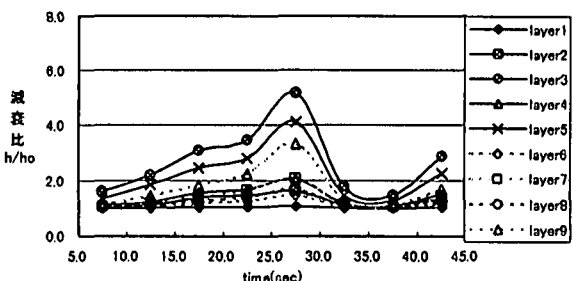


図-5(b) 各時刻、各層における正規化された減衰比(せん断剛性に重みが大さい場合、J3)

ところで Kokusho and Matsumoto (1998)¹⁶⁾は、この研究で扱った神戸 PI の地震を含む幾つかの地震動について逆解析を行ない、得られた G/G_0 と h/h_0 を、有効ひずみ γ_{eff} に対してプロットした。この結果を、図-9 に示す。

これらを比較することにより、次のことが言える：

1. ひずみの大きさに関しては、本研究と Kokusho ら¹⁶⁾の結果はほぼ同じスケールである。特に粘性土が他の土質よりひずみが大きく、最大 0.01 付近の値をとった。
2. 本研究で推定されたせん断剛性比 G/G_0 の、ひずみに関する依存性は、一般に室内実験などで求められた挙動に比較すると、その減少の割合は、大きくはない。
3. 一方 h/h_0 は、本解析の結果の方が、Kokusho らの結果よりも大きな増加を示している土層もある。
4. いずれの解析でも、一部の土層のせん断剛性比 (G/G_0) がひずみ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ で、1 より大きかった。この原因は明確ではない。

4. 結論

本研究により得られた、主な結論は次の通りである。

1. 鉛直観測アレーに基づいて、重複反射理論に基づいた等価線形解析による逆解析により動的地盤定数を求めるとき、問題の不適切性のため推定値がきわめて不安定になる。この研究では、問題の適切化を図るため、拡張ベイズ法という定式化をとり、せん断剛性 G と減衰比 h の事前情報にそれぞれ重み付けをした上で、解析に導入している。この結果不適切性は、この 2 種類のパラメータ間のトレードオフ関係に集約された。先の研究^{4), 5)}では、ABIC によりこの 2 つの定数群のトレード・オフ関係を比較的うまく調整できた。しかし、今回の地震動は大きいのか、調整が必ずしも自動的にうまくはいかなかった。すなわち、 G に対する事前情報の重み (d_1^2) が大きい場合と小さい場合の、2 つの部分で、それぞれ ABIC が極値をとるような結果になった。とは言え、 G に対する重みが小さい場合は、逆問題の適切性と言う観点からは条件数が大きく、問題は適切化されたとは判断できないので、すべての解析結果を、 G に対する重みが大きい場合で整理した。
2. 推定地盤定数としては、 G に対する事前情報の重み (d_1^2) が大きい場合で、かつ評価関数 J_1 を用いて推定した場合の結果がよかった。一方、評価関数

J_3 では、地震動の主要部で ABIC 最小値が、 G に重みが大きい場合と小さい場合に分かれ、推定の結果も不安定であった。伝達関数の位相は、ノイズが大きく、逆解析の改良に役立たないと言う従来からの知見を裏付ける結果となった。

3. 推定結果は、有効ひずみの増加に対する、せん断剛性の低下と、減衰比の増加を一般的には示した。しかし、せん断剛性の低下は、一般に考えられているほど大きくはなかった。これに対して、減衰比の増加は、一般に室内試験で求められているものとだいたい同程度であった。今回の解析結果は、 G と h の間のトレード・オフ関係を G を減少させず、むしろ h を大きくすることで満足しようとする傾向にあった。このようなトレードオフ関係が生じたのは、本研究で事前情報に重み付けを行なう過程で、 G と h に分けて 2 種類の重みを導入していることにも原因があると考えられる。
4. 本研究の第一の目的は、著しい不適切性を有する多層系地盤の波動伝播理論に基づく等価線形化法による、アレー記録逆解析問題で、不適切性を如何に克服し、問題を適切化し、合理的な解を得るかと言う点にあった。同時に、得られた解析結果から、動的地盤定数について議論することを第二の目的とした。事前情報への重みの導入の方法等に、改良の余地は残しているようにも思われるが、一応の目的は達したと考える。

謝辞： なお本解析で使用したデータは、神戸市開発局が公開している観測データである。このような有意義なデータを公開されていることに対し、深謝の意を表わす。

また、本論文の査読者の内 2 名の方からは、大変丁寧で有益な査読意見を頂いた。これら意見は、この論文の改良に大変貢献したので、ここに深謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 大谷順他 11 名：基礎理論ワーキンググループ報告 (WG1)、地盤工学における逆解析の適用と施工管理に関するシンポジウム発表論文集、pp.1~52, 1997。
- 2) 本城勇介、酒向一也、菊池喜昭：杭の水平地盤反力係数逆解析における各適切化手法の比較、応用力学論文集、Vol.2 (印刷中)、1999。
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994。
- 4) 本城勇介、西川原和幸、鬼丸貞友、吉澤睦博、杉本三千雄：実地震アレー観測に基づいた動的地盤定数の位相を考慮した逆解析、地盤工学における逆解析の適用と施工管理に関するシンポジウム発表論文集、pp.79~86, 1997。
- 5) Honjo Y., Iwamoto, S., Sugimoto, M., Onimaru, S. and Yoshizawa, M. : Inverse analysis of dynamic soil properties based on seismometer array records using the extended Bayesian method, Soils and Foundations, Vol.38, No.1, pp.131-143, 1998。
- 6) 辻原、沢田、谷：鉛直アレー観測記録による地盤振動特性の同定、構造工学論文集、36A, pp.747-756, 1990。

¹ 地表付近でせん断ひずみが小さいのは、地表面が応力解放面で、せん断がゼロになるためと言う意見もある。本論文は、どちらの説明が真の現象を捕らえているのかを議論することを目的としていない。

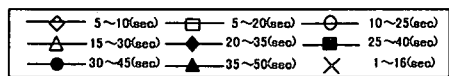
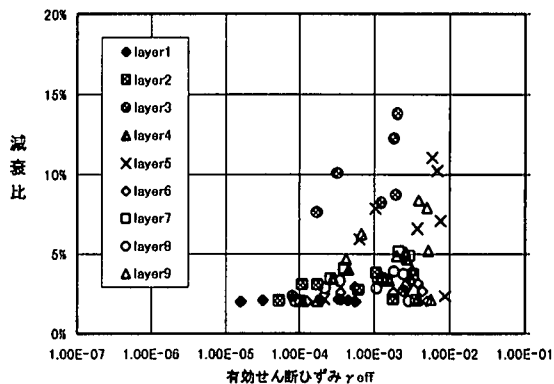
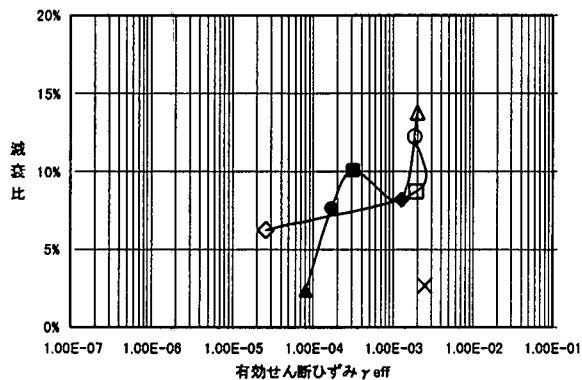
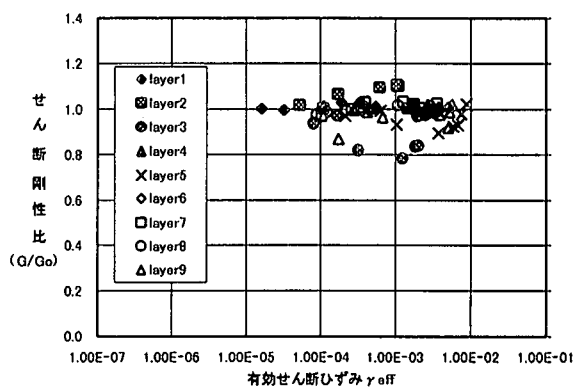
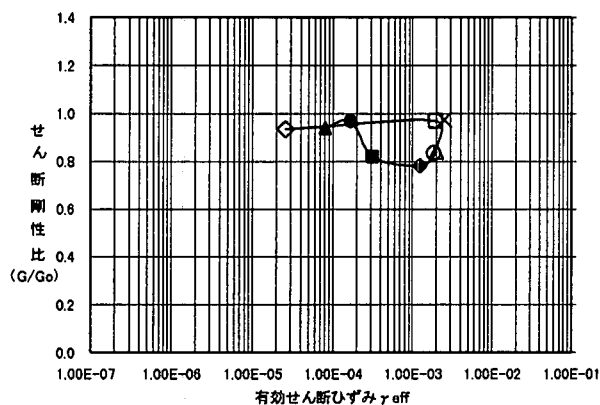


図-6 第3層の各時間帯における推定地盤定数に対するひずみ依存性(せん断剛性に重みが多い場合)

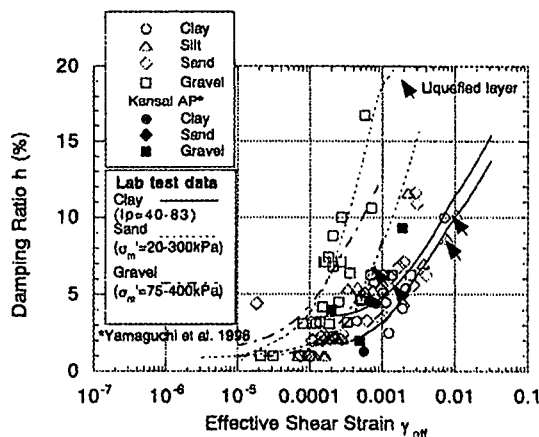
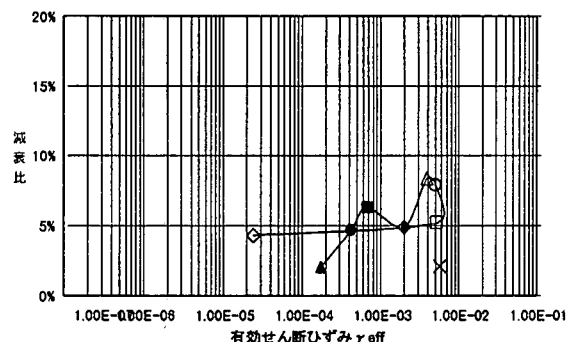
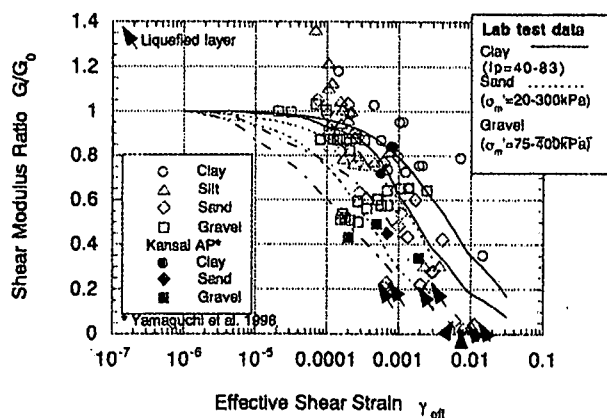
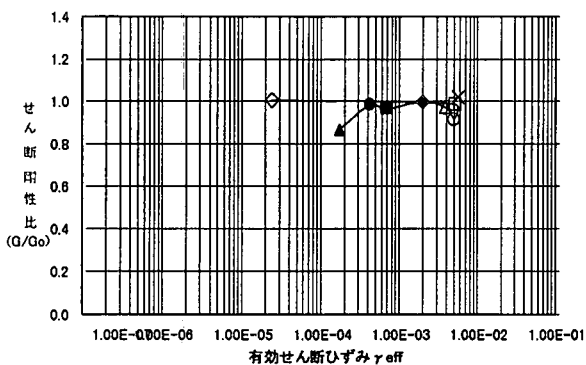


図-7 第9層の各時間帯における推定地盤定数に対するひずみ依存性(せん断剛性に重みが多い場合)

図-9 Kokusho¹²⁾における推定地盤定数のひずみ依存性

- 7) 本城勇介: 逆解析における事前情報とモデルの選択 (その1) 及び (その2), 土と基礎, Vol.43, No.7, pp.63-68, 及び No.8, pp.51-51, 1995.
- 8) 山崎文雄, 鹿林, 片山恒雄; アレー観測における地震計設置誤差の評価; 土木学会論文集 No.432 / I-16, pp.231-240, 1991.
- 9) 吉田郁政・栗田哲史; 兵庫県南部地震の観測記録を用いたポートアイランド表層地盤の動特性の逆解析, 土と基礎, 43-9(452)pp.44-48, 1995.
- 10) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, F., Taguchi, Y. and Kato, Y.: Correction of orientation error of borehole strong motion array records obtained during south Hyogo earthquake of Jan. 17, 1995, 土木学会論文集, No.531/I-34, pp.51-63, 1996.
- 11) 岡二三生・杉戸真太・八嶋厚・山田耕一郎・天野洋和; 埋立地盤での鉛直アレー観測記録に基づく地震動非線形増幅特性の検討, 地震工学研究発表会講演論文集, pp.49-52, 1997.
- 12) 福武毅芳; ポートアイランドにおける地盤の液状化と基礎の挙動解析, 日本建築学会関東支部構造部会シンポジウム「兵庫県南部地震における地震動と建築物の応答」, 1995.
- 13) 山下清, 平井芳雄; 神戸ポートアイランドにおける埋立マサ土の液状化解析 (その1) 解析モデルと地盤定数, 地盤工学研究発表会講演論文集, pp.899-900, 1997.
- 14) 沢田, 岡本, 平尾, 辻原: 地盤のS波速度とQ値の部分同定法の開発, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.111-119, 1994.
- 15) 飛田潤: 統計的手法による地震波形記録の解析, 理論地震動研究会編著, 「地震動」, pp.199-231, 鹿島出版会, 1994.
- 16) Kokusho, T. and Matsumoto, M.: Nonlinearity in situ amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken Nambu earthquake, Spacial Issue of Soils And Foundations, pp.1-9, 1998.

(1999 年 4 月 23 日 受付)