

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

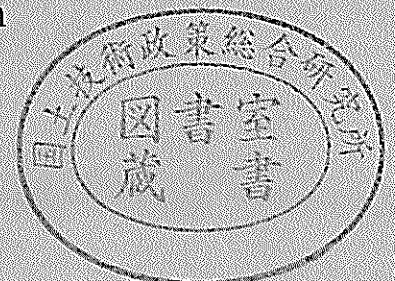
No.1080

June 2004

地震動の多点同時観測に基づく地盤の直ひずみの算定手法の検証

野 津 厚
菅 野 高 弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 地盤の直ひずみの算定手法	5
2.1 提案法	5
2.2 種々の設計法との比較	8
3. 地震動の多点同時観測に基づく検証	10
3.1 羽田空港新 A 滑走路のアレー観測の概要	10
3.2 解析対象記録	15
3.3 小アレーによる直ひずみの実測値	16
3.4 提案法による直ひずみの算定値	18
3.5 算定値と実測値の比較	21
4. 結論	21
5. あとがき	22
謝辞	22
参考文献	23
付録A	24

Axial Ground Strain Evaluated from Phase Velocity of Surface Waves and Its Comparison with Axial Strain Directly Obtained from Array Data

Atsushi NOZU*

Takahiro SUGANO**

Synopsis

To evaluate seismic performance of long buried structures such as buried pipelines and submerged tunnels, it is important to evaluate relative displacement between two adjacent points on the ground during earthquake. In other words, it is important to evaluate horizontal ground strain. The authors propose a new scheme to evaluate axial ground strain due to wave passage effect, which is a major cause for special variation of earthquake ground motion for a ground with relatively weak horizontal heterogeneity. Provided that the earthquake ground motion is composed of multiple frequency components, axial ground strain $\varepsilon(\omega)$ can be expressed as $\varepsilon(\omega) = v(\omega)/c(\omega)$, where $v(\omega)$ is the ground velocity and $c(\omega)$ is the phase velocity of seismic wave in the direction of structural axis. In the proposed method, the smaller of the phase velocities of the fundamental-mode Love wave and the fundamental-mode Rayleigh wave is adopted as the phase velocity $c(\omega)$. This choice was made to achieve conservative evaluation of the axial ground strain. Because phase velocities of surface waves are dependent on subsurface structures, it is preferable to evaluate $c(\omega)$ based on array observations of earthquake ground motions or microtremors. Because the proposed method was developed with a layered half-space model in mind, it is essential to validate its applicability to actual ground, which is more or less horizontally heterogeneous. Therefore, the method was tested against the array data from Runway A at Haneda Airport. The array at Runway A is composed both of a large array with accelerometers several hundreds of meters apart from each other and of a small array with accelerometers several tens of meters apart from each other. The "observed axial strains" were obtained from the difference of displacement time histories between two adjacent accelerometers. On the other hand, the "computed axial strains" were obtained by using the proposed method from the velocity time histories and the phase velocity of surface waves for the particular site (Nozu et al., 2002). As a result, it was confirmed that the proposed method leads to a conservative evaluation of the axial ground strain as it was originally intended. Because the proposed method uses phase velocities that are consistent with physical parameters such as elastic wave speeds, the method is suitable to be used in conjunction with ground velocities evaluated for a scenario earthquake based on physical constraints such as source, path and site effects. Another advantage of the method is that it is applicable to realistic ground motions that include multiple frequency components. The method can be easily implemented provided that the FFT algorithm is available in the environment.

Keywords: earthquake ground motion, long buried structure, axial strain, surface wave, phase velocity, array observation

* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Chief of Structural Dynamics Division, Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-468-44-5058 Fax: +81-468-44-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

地震動の多点同時観測に基づく 地盤の直ひずみの算定手法の検証

野津 厚*
菅野 高弘**

要 旨

埋設パイプラインや沈埋トンネルなど線状埋設構造物の耐震性を議論する際には、地表に沿った二点間の相対変位、または、地盤のひずみを評価することが重要である。本研究では、水平成層に近い地盤を念頭におき、地表の一点での地震動が与えられているとの前提で、波動伝播効果に起因する地盤の直ひずみを算定するための方法を検討した。地震波が複数の周波数成分から成ることを前提とすると、地盤の管軸方向の直ひずみ $\varepsilon(\omega)$ は、管軸方向の地動速度 $v(\omega)$ と地震波の管軸方向の位相速度 $c(\omega)$ を用いて次式で表現される。

$$\varepsilon(\omega) = v(\omega) / c(\omega) \quad (1)$$

提案法では式(1)の $c(\omega)$ としてラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いる。これは地盤の直ひずみに関して安全側の評価を与えることを意図したものである。一般に表面波の特性は場所毎の地下構造を反映して著しく異なるので、 $c(\omega)$ は地震動や微動のアレー観測結果に基づいて評価することが望ましい。提案法は水平成層に近い地盤を念頭においたものであるから、実地盤への適用性を検討することは重要である。そこで本研究では羽田空港新 A 滑走路のアレー観測記録に基づき提案法の検証を行うこととした。新 A 滑走路のアレーは、設置間隔が数 100m の大アレーと設置間隔が数 10m の小アレーから構成されている。このうち小アレーの記録を用い、隣同士の観測点における変位の差から地盤の直ひずみを求め、これを実測値とした。一方、当該空港における表面波の位相速度(野津他, 2002)と地表での速度波形から提案法により地盤の直ひずみを算定し、実測値と比較した。その結果、提案法は当初意図したとおり地盤の直ひずみに関して概ね安全側の評価を与えることが確認された。提案法は、位相速度の弾性波動論的な位置づけが明確なので、地震の震源特性・伝播経路特性・サイト特性などを考慮して物理的にあり得る地震動を想定するいわゆる強震動予測手法と組み合わせて用いることに適している。実際の地震動に含まれる複数の周波数成分を考慮できるという点も提案法の長所である。提案法は位相速度の周波数依存性を考慮するので一見複雑なように見えるが、FFT を使用できる環境さえ整っていれば特段の困難もなく実際の問題に適用できるので、今後の活用が期待される。

キーワード：地震動，線状埋設構造物，直ひずみ，表面波，位相速度，アレー観測

* 地盤・構造部主任研究官

** 地盤・構造部構造振動研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1

電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail：nozu@pari.go.jp

1. はじめに

埋設パイプラインや沈埋トンネルなど線状埋設構造物の地震時挙動は周辺地盤の変形に支配される（例えば土田他，1981；清宮他，1983）．従って，線状埋設構造物の耐震性を議論する際には，地表に沿った二点間の相対変位，または，地盤のひずみを評価することが重要である．

将来の地震による地盤の揺れを予測するための手法として，経験的グリーン関数法（例えば Hartzell,1978；Irikura,1983；Irikura ,1986；Takemura and Ikeura, 1988；Dan et al., 1989；入倉他，1997；野津他，2003a）や統計的グリーン関数法（釜江他，1991；古和田他，1998）などの強震動予測手法が提案されているが，これらはいずれもある一点での揺れを予測するための方法であり，地表に沿った二点間の相対変位や地盤のひずみを求めるためには，これらの方法を適用するだけでは十分とは言えない．そこで，本稿では，地表の一点での地震動が与えられているとの前提で，これに基づいて地盤のひずみを算定するための方法を検討する．

地表に沿った二点間の相対変位は，清宮他（1983）の図-5.24を参考にすると，主に3つの要因から成るものと考えることができる（図-1）．

- ①表層地盤が水平方向に不均質な場合，表層地盤へ鉛直下方から同じ振幅の実体波が同時に入射しても，実体波が表層地盤を通過して地表に達するまでに要する時間は場所毎に異なり，この間に振幅も変化するので，相対変位が生じる．また，地盤の急変部ではエッジ波（例えば Kawase, 1996）のような二次的な波が生成し，これが相対変位をもたらすこともある．
- ②表層地盤が仮に水平方向に一様であっても，表層地盤を实体波が斜めに伝播するとき，実体波が地表面に到達する時間が場所毎に異なるので，相対変位が生じる．
- ③表層地盤を表面波が伝播するとき，地表面の相異なる二点間には相対変位が生じる．

定性的には，地盤の急変部では①の要因による相対変位が卓越することが予想される．その一例として，沈埋トンネルの護岸部は地盤の急変部となっているので，ここでは①の要因による相対変位が卓越するものと考えられる（清宮他，1983）．①の要因による相対変位は2次元もしくは3次元の地震応答解析により評価することが最も適切である．一方，水平成層に近い地盤では，②もしくは③の要因による相対変位が卓越することが予想される．②③の場合，いずれにしても，地表面に沿って地震

波が伝播するようになることから，②③の要因により相対変位が生じることを波動伝播効果と呼ぶことがある．本稿では，水平成層に近い地盤を念頭におき，波動伝播効果による二点間の相対変位を検討の対象とする．

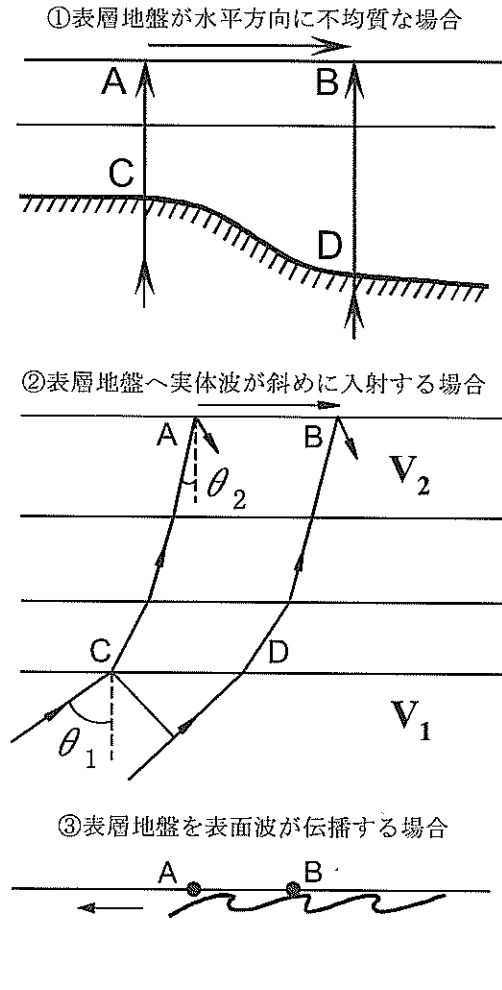


図-1 地表に沿った二点間の相対変位の要因

波動伝播効果を考慮した線状埋設構造物の縦断方向の耐震設計では，地震動の変位振幅と地表に沿った見かけの伝播速度（位相速度）を与えて設計を行うことが普通である．各種構造物の耐震設計における位相速度の設定方法には，現在，調和平均による方法（日本道路協会，1974；日本道路協会，1986；日本水道協会，1997；日本下水道協会，1997）と高圧ガス導管の方法（日本ガス協会，2000）がある．これら既往の設計法における位相速度の設定方法について著者等は次のような問題意識を持っている．

第一に，既往の設計法では，位相速度の弾性波動論的な位置づけが明確でない．高圧ガス導管の方法では，レイリー波を対象とすることが明記されているが，弾性波

動論から導かれるレイリー波の位相速度との関連がはっきりしていない。もちろん、各種構造物の耐震設計では、変位振幅と位相速度をセットで与えることにより構造物の安全性を保証しようとしているので、位相速度の設定方法だけを切り離してその合理性を論じることは公平でない面がある。しかしながら、想定する地震の震源特性・伝播経路特性・サイト特性などを考慮して、物理的にあり得る地震動を想定し、前述の強震動予測手法によって地表の一点での地震動を与える場合には（土木学会，2000），位相速度についても、物理的に意味のある値を用いる方向に向かうのでなければ、設計におけるロジックの一貫性を保つことができなくなる。従って、位相速度の弾性波動論的な位置づけを明確化することが必要である。

第二に、既往の設計法では、表層地盤の固有周期に対応する周波数成分のみを考え、管軸に沿った正弦波的な変位分布を仮定する。しかし、実際の地震動は一般に複数の周波数成分を含み、各々の周波数成分が波動伝播効果をもたらし得る。また、位相速度が周波数に依存する性質も重要である。

以上のような問題意識から、本稿では、弾性波動論的な位置づけが明確であり、かつ、多様な周波数成分の混在を前提とした地盤ひずみの算定手法を考える。

検討対象とすべき地盤ひずみの成分については次のように考える。いま、水平面内において、線状埋設構造物と並行に x 軸を、これと垂直に y 軸をとる。また地盤変位の x 成分を u 、 y 成分を u_y と書く。いま、考察を簡単にするため、線状埋設構造物（以下簡単のためパイプという）の剛性が小さく、構造物の変形が周辺地盤の変形に完全に支配されるような場合を考える。このとき、パイプの軸ひずみ ε_L は $\partial u / \partial x$ で与えられ、パイプの曲げひずみ ε_B は $(D/2) * (\partial^2 u_y / \partial x^2)$ で与えられる。ここに D はパイプの直径である。この式から、パイプの径が大きいほど曲げひずみの寄与が大きくなることがわかる。土田他（1981）は、羽田空港の旧 C 滑走路に設けられた地震動の多点同時観測（アレー観測）の測線上に外径 0.3556m のパイプが埋設されていると仮定し、このパイプの変形が周辺地盤の変形に完全に支配されるものと仮定して、パイプに生じる軸ひずみと曲げひずみをアレー観測記録に基づいて算定した。その結果、軸ひずみが曲げひずみよりも 3 オーダー程度大きいことを示している。清宮他（1983）は川崎港海底トンネル（沈埋トンネル、幅 31m）の地震応答観測結果に基づき、軸ひずみは曲げひずみよりも若干大きいがほぼ同程度であると述べている。これらの結果から、軸ひずみの寄与は構造物

の径によらず重要であること、曲げひずみの寄与は沈埋トンネルのような径の大きい構造物に限って重要であることなどがわかる。ここでは、パイプの曲げひずみに関する議論は後の研究に譲ることとして、パイプの軸ひずみと、これをもたらす地盤の直ひずみを検討の対象とする。

以下においては、まず、第 2 章では著者等の提案する地盤ひずみの算定方法について説明し、簡単なモデル地盤に対して既往の設計法との比較を行う。

次に、第 3 章では、東京国際空港（羽田空港）新 A 滑走路の多点同時観測（アレー観測）の記録を利用して、提案法の実地盤への適用性を検討する。提案法はもともと水平成層に近い地盤を念頭においたものであるから、実地盤への適用性を検討することは重要である。新 A 滑走路のアレーは、後述するように、設置間隔が数 100m の大アレーと設置間隔が数 10m の小アレーから構成されており、後者は観測記録から地盤の直ひずみを直接求めるのに適している。そこで、提案法による直ひずみの算定値を、小アレーによる直ひずみの実測値と比較することにより、提案法の実地盤への適用性を検討する。

第 4 章では本稿の結論を述べ、第 5 章では今後の展望等について述べる。

2. 地盤の直ひずみの算定手法

2.1 提案法（野津他，2002）

波動伝播効果による地盤の管軸方向の直ひずみ $\varepsilon(\omega)$ は、管軸方向の地動速度 $v(\omega)$ と地震波の地表面に沿った見かけの伝播速度（位相速度） $c(\omega)$ 、それに伝播方向と管軸方向とのなす角 θ を用いて次式で表される。

$$\varepsilon(\omega) = v(\omega) \cos \theta / c(\omega) \quad (1)$$

式 (1) は地震動が複数の周波数成分から成ることを意識したものである。

いま、なんらかの強震動予測手法により管軸方向の地動速度 $v(\omega)$ が与えられていることを前提として、式 (1) により管軸方向の直ひずみ $\varepsilon(\omega)$ を求めることを考える。このとき、式 (1) からわかるように、 $c(\omega)$ として小さな値を与えるほど $\varepsilon(\omega)$ は大きく評価される。理想的には、 $c(\omega)$ は $v(\omega)$ に含まれる地震波の種類（実体波、表面波など）を考慮して定められるべきである。しかし、実際には、強震動予測手法で与えられる地表の一点での地震動は実体波や表面波など様々な種類の波を含むことが多く、そこから実体波や表面波を分離することは、一般には容易でない。その一例として、図

-2は 2000 年鳥取県西部地震の際の境港市とその周辺の地動速度を経験的グリーン関数法により再現したものであるが(野津他, 2003a), この結果からも, 実体波と表面波の分離が容易でないことがわかる。

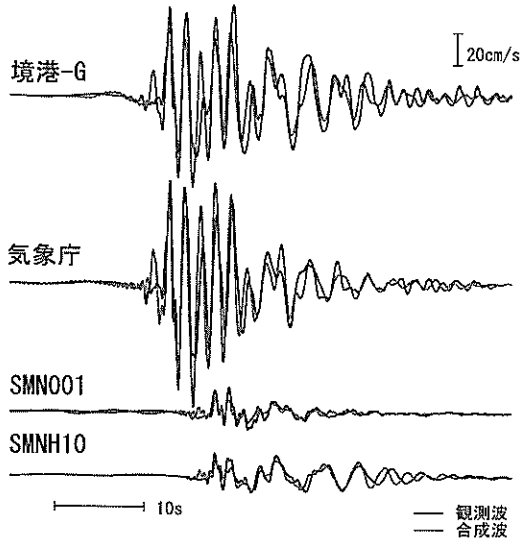


図-2 経験的グリーン関数法による 2000 年鳥取県西部地震の地動速度の再現(野津他, 2003a)

そこで, 地震波の種別を行うことなく, 地盤の直ひずみについて安全側の評価を与えることをここでは考える。地震波には実体波と表面波があり, 表面波はラブ波とレイリー波に分かれる(表-1)。さらに, ラブ波とレイリー波には各々基本モードと高次モードがある(Aki and Richards, 1980)。ここで, 地盤の直ひずみが位相速度の減少関数であることに注意すると, 種々の地震波の位相速度のうち最小のものを式(1)で用いることにすれば, 地盤の直ひずみについて安全側の評価を与えることができるはずである。付録 A に示すように, 同一の周波数で比較すると, 実体波より表面波の方が位相速度は小さい。また, ラブ波についてもレイリー波についても, 同一の周波数で比較すると, 高次モードより基本モードの方が位相速度は小さい(Aki and Richards, 1980)。ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の大小関係は地盤条件や周波数にも依存する。そこで提案法では式(1)の $c(\omega)$ としてラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いる。一般に表面波の特性は場所毎の地下構造を反映して著しく異なることが知られているので, $c(\omega)$ は地震動や微動のアレー観測結果に基づいて評価することが望ましい。以上が提案法における $c(\omega)$ の与え方である。

一方, 地震波の伝播方向と管軸方向とのなす角 θ については, 地震波の進行方向に関して情報が入手可能などときにはこれに基づいて設定しても良いが, 一般には地震波の伝播方向には大きな不確実性が伴うので, 地盤の直ひずみに関して安全側の評価を与えるため $\theta=0$ とする。

ここで, 地盤の直ひずみをもたらす表面波の種別について考察を行う。地盤の直ひずみが主にラブ波によってもたらされるかレイリー波によってもたらされるかは議論のある点である。まず, レイリー波の場合, 粒子軌跡は進行方向ベクトルを含む鉛直面内で円または楕円を描くので(表-1), レイリー波が管軸と平行に入射する場合には管軸方向に直ひずみが生じることは明らかである。次に, ラブ波の場合, 粒子軌跡は進行方向に対して直交するが(表-1), 図-3に示すようにラブ波の進行方向と管軸方向とのなす角 θ が $0 < \theta < 90^\circ$ の範囲にあれば, やはり管軸方向に直ひずみが生じる。以上のことから, 与えられた管軸方向の地動速度 $v(\omega)$ の下で管軸方向の直ひずみ $\varepsilon(\omega)$ について安全側の評価を行うためには, $c(\omega)$ としてラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いる必要がある。ただし, ラブ波が管軸方向の直ひずみをもたらす条件は $0 < \theta < 90^\circ$ であるから, ラブ波基本モードの位相速度と入射角 $\theta=0$ を組み合わせて用いることは, 地盤の直ひずみに関して安全側過ぎる評価につながるかも知れない。この点も含め, 第3章において, 提案法による直ひずみの算定の妥当性について, アレー観測記録に基づく検証を行うこととする。

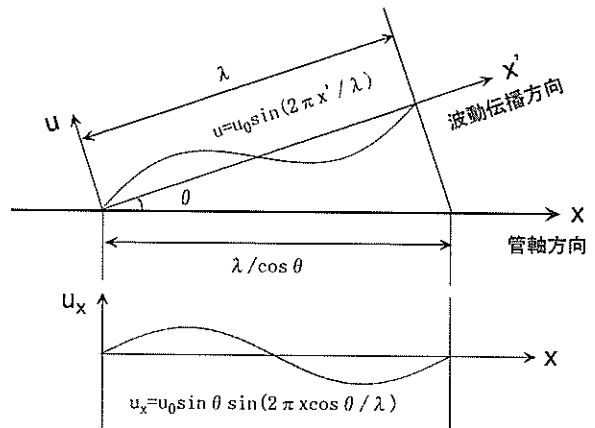
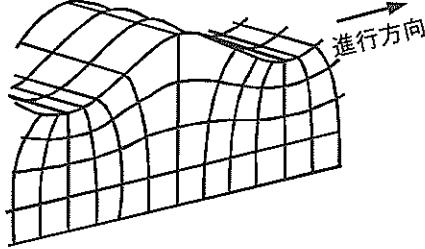
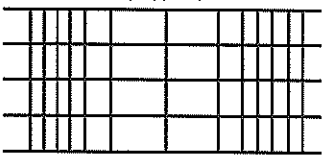
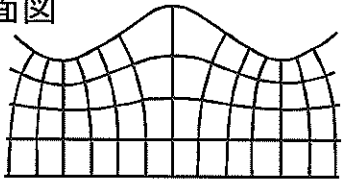
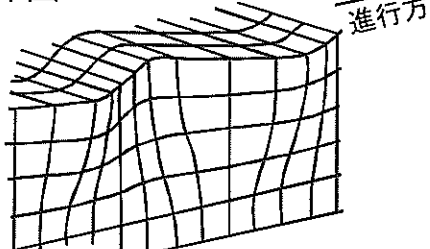
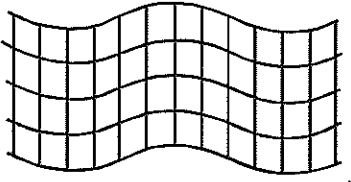
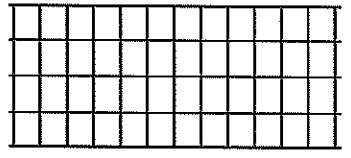
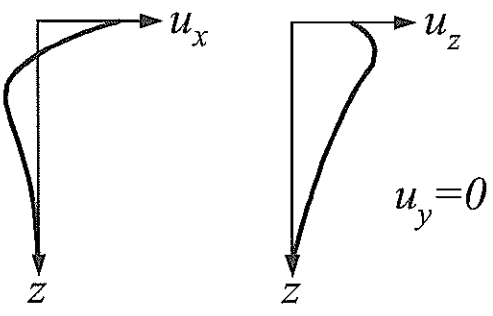
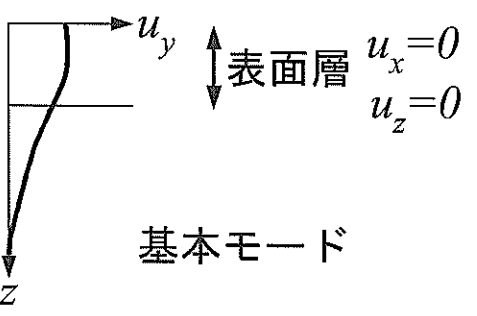
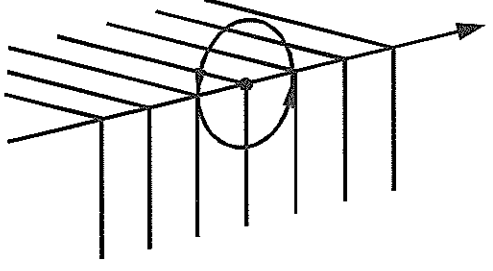
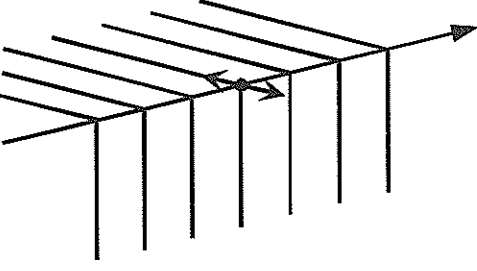


図-3 ラブ波の進行方向と管軸方向のなす角 θ が $0 < \theta < 90^\circ$ の範囲にある場合にもたらされる管軸方向の直ひずみ

表-1 レイリー波とラブ波 - 土田・井合 (1991) の図 3.19 に加筆

	レイリー波	ラブ波
存在する地盤	半無限地盤もしくは水平成層地盤	水平成層地盤
変位分布	<p>立体図</p>  <p>進行方向</p> <p>平面図 (地表面)</p>  <p>断面図</p> 	<p>立体図</p>  <p>進行方向</p> <p>平面図 (地表面)</p>  <p>断面図</p> 
振幅分布 u_x, u_y, u_z : x, y, z 方向の 変位成分 x は表面波の進行 方向 z は深さ方向	 <p>u_x u_z</p> <p>$u_y = 0$</p> <p>振幅分布は地盤条件に依存. 図は半無限地盤の場合.</p>	 <p>u_y 表面層 $u_x = 0$ $u_z = 0$</p> <p>基本モード</p> <p>振幅分布は地盤条件に依存.</p>
軌跡	 <p>回転の向きは地盤条件に依存.</p>	

2.2 種々の設計法との比較

先に述べたように、各種構造物の耐震設計における位相速度の設定方法には、現在、調和平均による方法（日本道路協会，1974；日本道路協会，1986；日本水道協会，1997；日本下水道協会，1997）と高圧ガス導管の方法（日本ガス協会，2000）がある。ここでは、簡単なモデル地盤に対して、提案法の位相速度と既往の設計法の位相速度との比較を行う。なお、提案法の位相速度（表面波の位相速度）は地震波の周期に依存するが、既往の設計法では表層地盤の固有周期に対応する地震波の位相速度が与えられるので、同じ条件で比較を行うため、ここでは表層地盤の固有周期に対応する表面波の位相速度を既往の設計法の位相速度と比較する。

まず、既往の設計法における位相速度の設定方法を紹介する。

調和平均法では地表に沿った見かけの波長（ λ ）は表層地盤での地震波の波長（ λ_1 ）と工学的基盤での地震波の波長（ λ_2 ）の調和平均として算定される。すなわち

$$\lambda = 2 \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (2)$$

である。ここに、表層地盤での地震波の波長（ λ_1 ）と工学的基盤での地震波の波長（ λ_2 ）はそれぞれ次式で算定される。

$$\lambda_1 = \beta_1 T_g \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \beta_2 T_g \quad (4)$$

ここに β_1 は表層地盤の S 波速度、 β_2 は工学的基盤の S 波速度、 T_g は表層地盤の固有周期である。(2) - (4) より調和平均法では位相速度 c は表層地盤の固有周期によらず次式で与えられる。

$$c = 2 \beta_1 \beta_2 / (\beta_1 + \beta_2) \quad (5)$$

以上のように調和平均法では位相速度は表層地盤と工学的基盤の S 波速度の中間的な値をとる。

一方、高圧ガス導管の方法では、位相速度はレイリー波によるものを考慮するものとされている。高圧ガス導管の方法では位相速度 c は周期の関数として図-4の太線で与えられる。

ここで、高圧ガス導管の方法と調和平均法との比較を行うため、 β_1 を 100, 200, 300m/s の三通り、 β_2 を 350m/s とし式 (5) により c を求め、図-4に細線で示している。同図から、周期の短い地盤では高圧ガス導管の方法が安全側の位相速度を与えること、周期の長い地盤では調和平均法が安全側の位相速度を与えることがわかる。

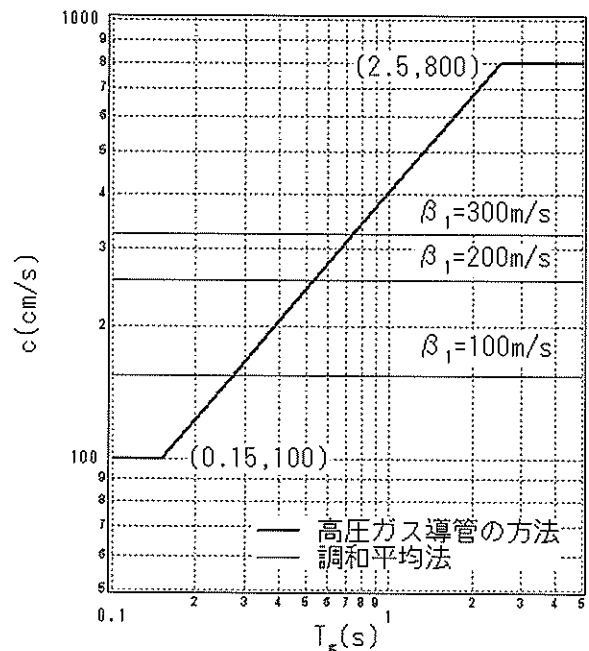


図-4 高圧ガス導管の方法と調和平均法の比較

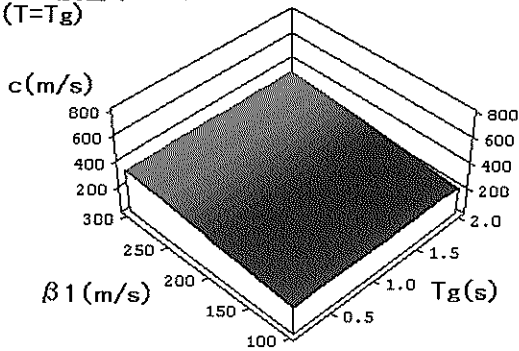
表-2 モデル地盤

	P 波速度 (m/s)	S 波速度 (m/s)	密度 (ton/m ³)	層厚 (m)
表層地盤	1600	100-300	2.0	H ₁
工学的基盤	1600	350	2.0	∞

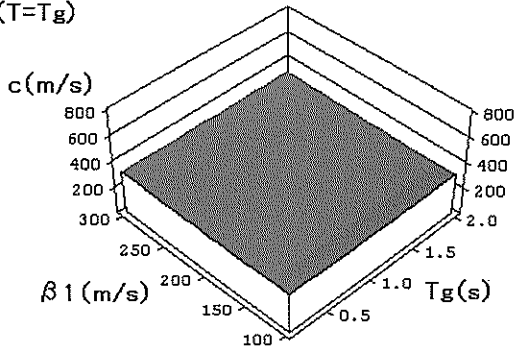
ここでは S 波速度と層厚の異なる様々なモデル地盤に対し、表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードおよびレイリー波基本モードの位相速度と調和平均法および高圧ガス導管の方法で設定される位相速度との比較を行う。モデル地盤としては、表-2に示すような表層地盤と工学的基盤の二層からなる単純なものを考える。表層地盤の S 波速度 β_1 の変域は 100m/s ~ 300m/s とし、表層地盤の固有周期 T_g の変域は 0.1s ~ 2s とした。表層地盤の層厚 H_1 は β_1 と T_g から計算した。工学的基盤の S 波速度は 350m/s とした。P 波速度は表層地盤、工学的基盤とも 1600m/s とした。密度は表層地盤、工学的基盤とも 2ton/m³ とした。

図-5に計算結果を示す。(a) は表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードの位相速度、(b) は表層地盤の固有周期に対応するレイリー波基本モードの位相速度、(c) は調和平均法の位相速度 (式 5)、(d) は高圧ガス導管の方法による位相速度 (図-4) である。ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度は Aki and Richards(1980)に掲載された方法で計算した。

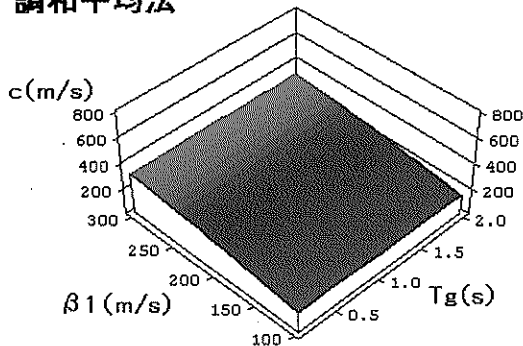
Love波基本モード
($T=T_g$)



Rayleigh波基本モード
($T=T_g$)



調和平均法



高圧ガス導管
の方法

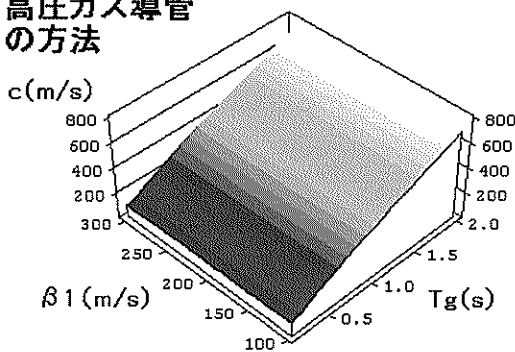


図-5 モデル地盤に対する位相速度 (その1)

- (a) 表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードの位相速度.
- (b) 表層地盤の固有周期に対応するレイリー波基本モードの位相速度.
- (c) 調和平均法の位相速度.
- (d) 高圧ガス導管の方法による位相速度.

表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードおよびレイリー波基本モードの位相速度と調和平均法の位相速度は、表層地盤の固有周期には依存せず、表層地盤のS波速度に応じて緩やかに変化する。一方、高圧ガス導管の方法の位相速度は、逆に表層地盤のS波速度には依存せず、表層地盤の固有周期に応じて比較的急激に変化する。高圧ガス導管の方法は、固有周期の短い地盤に対しては、表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードやレイリー波基本モードよりも小さい位相速度を与え、逆に固有周期の長い地盤に対しては、表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードやレイリー波基本モードよりも大きい位相速度を与えることがわかる。

図-5は曲面で示されているので、高圧ガス導管の方法以外の位相速度の大小関係がわかりにくい。そこで、図-5の曲面と T_g =一定の平面との交線を図-6に示す。

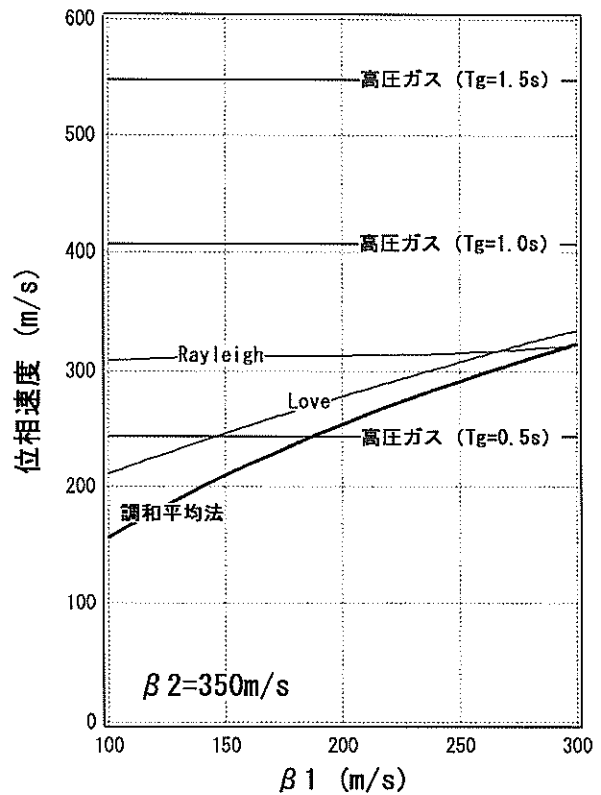


図-6 モデル地盤に対する位相速度 (その2)

図-6から、調和平均法による位相速度は表層地盤の固有周期に対応するラブ波基本モードおよびレイリー波基本モードの位相速度を包絡する性質があることがわかる。高次モードの位相速度は基本モードの位相速度より大きいから、調和平均法による位相速度は表層地盤の固有周期に対応する表面波の位相速度を包絡する性質があることがわかる。表層地盤の固有周期よりも周期の長い

表面波は位相速度がより大きいから、結局、調和平均法による位相速度は、周期が表層地盤の固有周期に等しいかそれよりも長い表面波の位相速度を包絡する性質があることがわかる。

3. 地震動の多点同時観測に基づく検証

3.1 羽田空港新A滑走路のアレー観測の概要

羽田空港新 A 滑走路では 1988 年 7 月の供用開始より地震動の多点同時観測（アレー観測）を実施している。ここではアレー観測の概要を述べる。

図-7にアレーの平面図を示す。同図に示すように新 A 滑走路では No.1 ~ No.8 の 8 地点で観測を行っている。No.1 ~ No.6 は滑走路に平行であり、No.7 と No.8 を結ぶ線分は滑走路に直交して、全体として十文字型のアレーを形成している。十文字の交点を原点とし、滑走路に平行に x 軸を（南向き正）、これと直交する方向に y 軸をとり（東向き正）、No.1 ~ No.8 の x 座標と y 座標を示したものが表-3である。なお、ここでは詳しく述べないが羽田空港では新 A 滑走路以外にもスカイアーチ（No.9, No.10）、新 B 滑走路（No.11 ~ No.13）および鉄道トンネル（No.14 ~ No.17）において観測を実施している。それらの位置についても図-7に示している。

表-3 新 A 滑走路の観測点座標（単位 m）

観測点	x 座標	y 座標
No.1	2000	0
No.2	1500	0
No.3	1050	0
No.4	500	0
No.5	0	0
No.6	-550	0
No.7	0	-330
No.8	0	170

さて、新 A 滑走路の No.1 ~ No.8 の各地点には図-8 ~ 図-10に示すように深さの異なる 6 つのボアホール A,B,C,D,E,F がある。各々のボアホールには地震計または間隙水圧計が設置されている。図-11に各ボアホールの観測上の機能を示す。同図に示すように、ボアホール A には基盤層の地震動を記録するための地震計が、ボアホール B には Ac2 層の地震動を記録するための地震計が、

ボアホール D には As 層の地震動を記録するための地震計が、ボアホール F には地表付近の地震動を記録するための地震計が設置されている。また、ボアホール C,D,E には As 層の間隙水圧を記録するための間隙水圧計が設置されている。各々の計器の設置深度は表-4に示す通りである。

新 A 滑走路の No.5 および No.7 地点では、図-9および図-10に示すように、ボアホール A ~ F に加え滑走路と平行にボアホール G,H,I,J が設けられている。No.5 および No.7 地点のボアホール G,H,I,J には地表付近の地震動を記録するための地震計が設置されている。ボアホール G,H,I,J は No.5 地点では滑走路に平行に、No.7 地点では滑走路と直交する方向に設置されている。

以上の計器のうち、地表付近の地震計だけに注目すると、No.1 ~ 8 地点のボアホール F の地震計は互いに数 100m 離れた大アレーを構成し、一方、No.5 および No.7 地点のボアホール F,G,H,I,J の地震計は互いに数 10m 離れた小アレーを構成することになる。このうち後者の小アレーは、極めて密であるため、観測記録から地盤の直ひずみを直接求めるのに適している。そこで、後の節では、提案法による直ひずみの算定値を、小アレーによる直ひずみの実測値と比較することにより、提案法の実地盤への適用性を検討する。なお、以下においては、No.5 地点のボアホール F のことを「5F」等と書く。

新 A 滑走路に沿った地層断面図を図-12に示す。また No.5 および No.7 地点のボアホール F（一番深いボアホール）における土質柱状図を図-13に示す。N 値 50 以上の工学的基盤の深度は、No.5 地点よりも No.7 地点の方が深いことがわかる。No.5 および No.7 地点の表層地盤の S 波速度については、図-13の土質柱状図に示された値をもとに、地表と地中の観測スペクトル比をより良く再現できるよう、最適化の作業を実施した。これについては後述する。

観測に使用されている換振器は港湾地域強震観測（例えば野津他，2003b）で使用されている ERS-G 型強震計の換振器（フォースバランス式）と同じものである。写真-1に換振器を示す。また表-5に換振器の仕様を示す。

さて、ボアホールへの換振器の設置にあたっては、東西、南北、上下の 3 成分を記録することを目標として注意深く設置することになっている。しかし実際にはボアホール内に設置された換振器の水平面内での設置方位は必ずしも正確でない場合がある。ここではこのことにも注意して、今回解析に用いる No.5 および No.7 地点の換振器の水平面内での設置方位誤差を検討した。この検討には、比較的長周期成分を多く含む 1994 年 10 月 4 日北

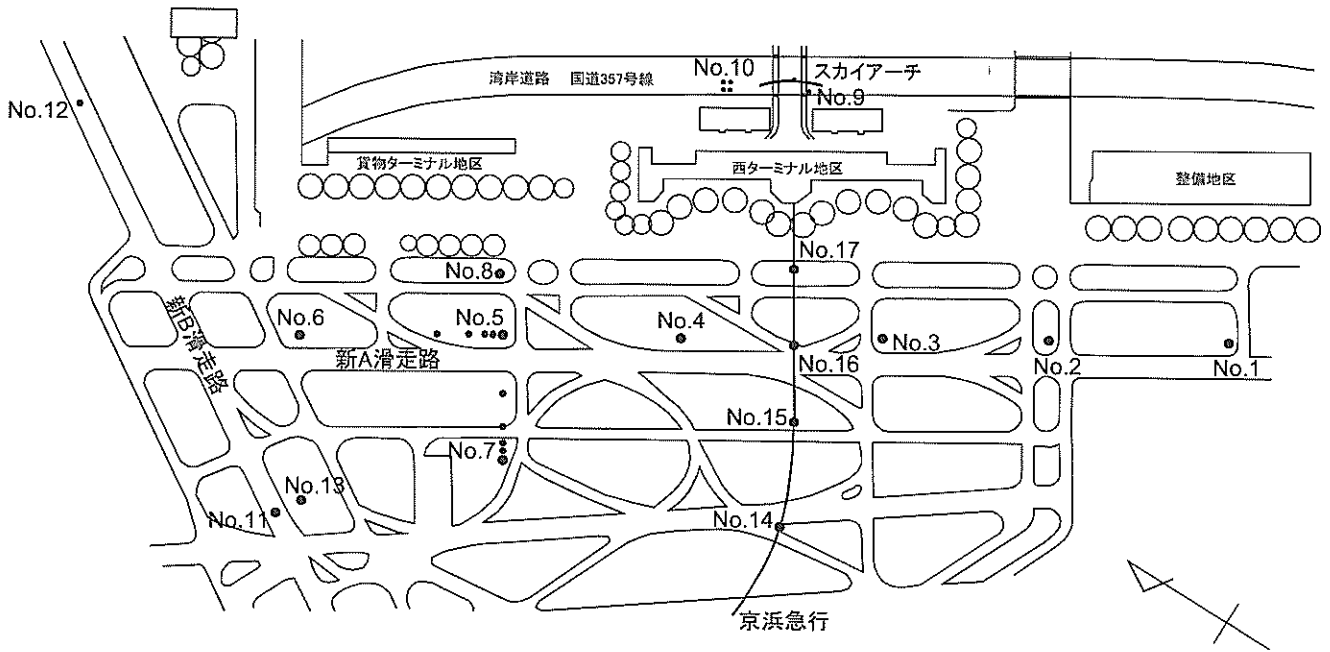


図-7 羽田空港地震観測平面図

No. 1, 2, 3, 4, 6, 8 地点

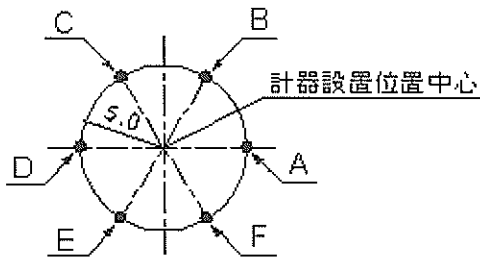
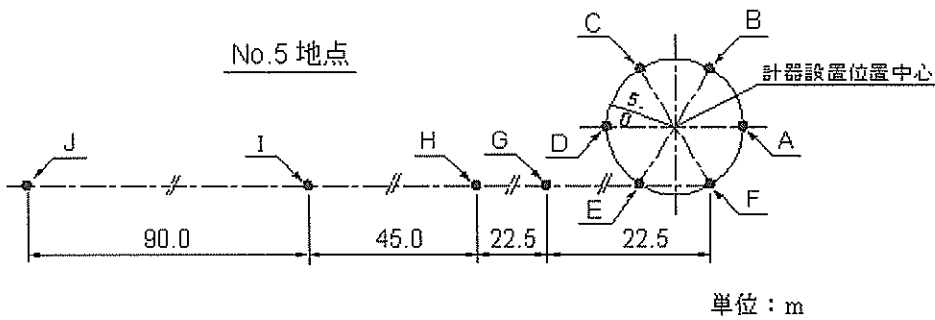


図-8 No. 1, 2, 3, 4, 6, 8 地点平面図

No. 5 地点



単位：m

図-9 No. 5 地点平面図

No. 7 地点

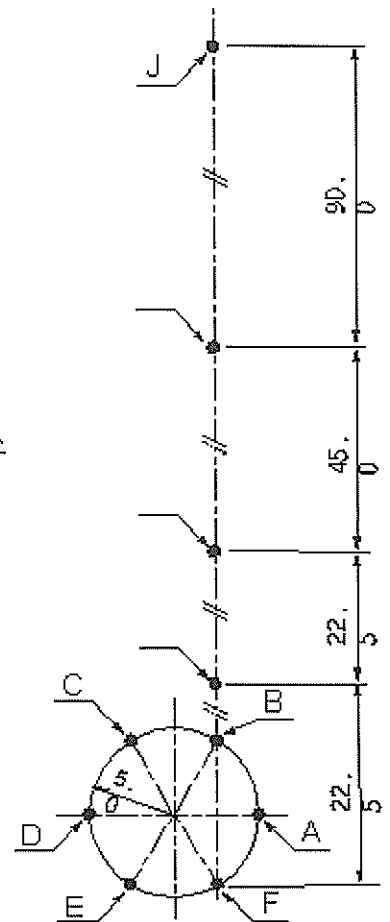


図-10 No. 7 地点平面図

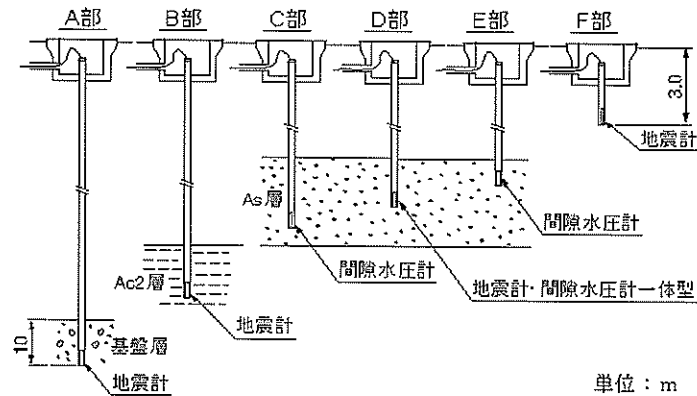


図-11 ボアホール A～F の役割

表-4 地震計・間隙水圧計設置深度一覧

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
No.1	GL-85.20	GL-28.10	GL-16.30	GL-13.70	GL-11.10	GL-3.00	---	---	---	---
No.2	GL-84.70	GL-26.30	GL-13.60	GL-11.30	GL-9.00	GL-3.00	---	---	---	---
No.3	GL-61.00	GL-25.57	GL-18.70	GL-17.90	GL-17.10	GL-3.05	---	---	---	---
No.4	GL-71.00	GL-25.45	GL-13.37	GL-12.80	GL-12.23	GL-2.82	---	---	---	---
No.5	GL-66.00	GL-25.73	GL-15.39	GL-14.68	GL-13.96	GL-2.99	GL-2.99	GL-2.99	GL-2.98	GL-2.98
No.6	GL-69.60	GL-26.45	GL-14.70	GL-13.95	GL-13.20	GL-2.96	---	---	---	---
No.7	GL-75.00	GL-24.62	GL-13.95	GL-13.60	GL-13.25	GL-3.12	GL-2.72	GL-2.28	GL-1.94	GL-2.23
No.8	GL-45.00	GL-26.07	GL-16.32	GL-15.80	GL-15.28	GL-2.97	---	---	---	---

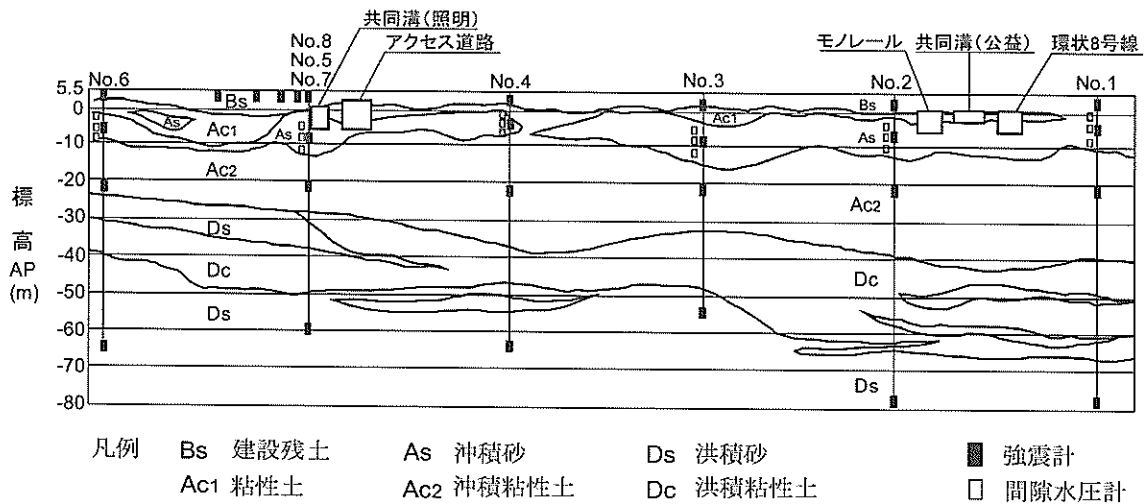
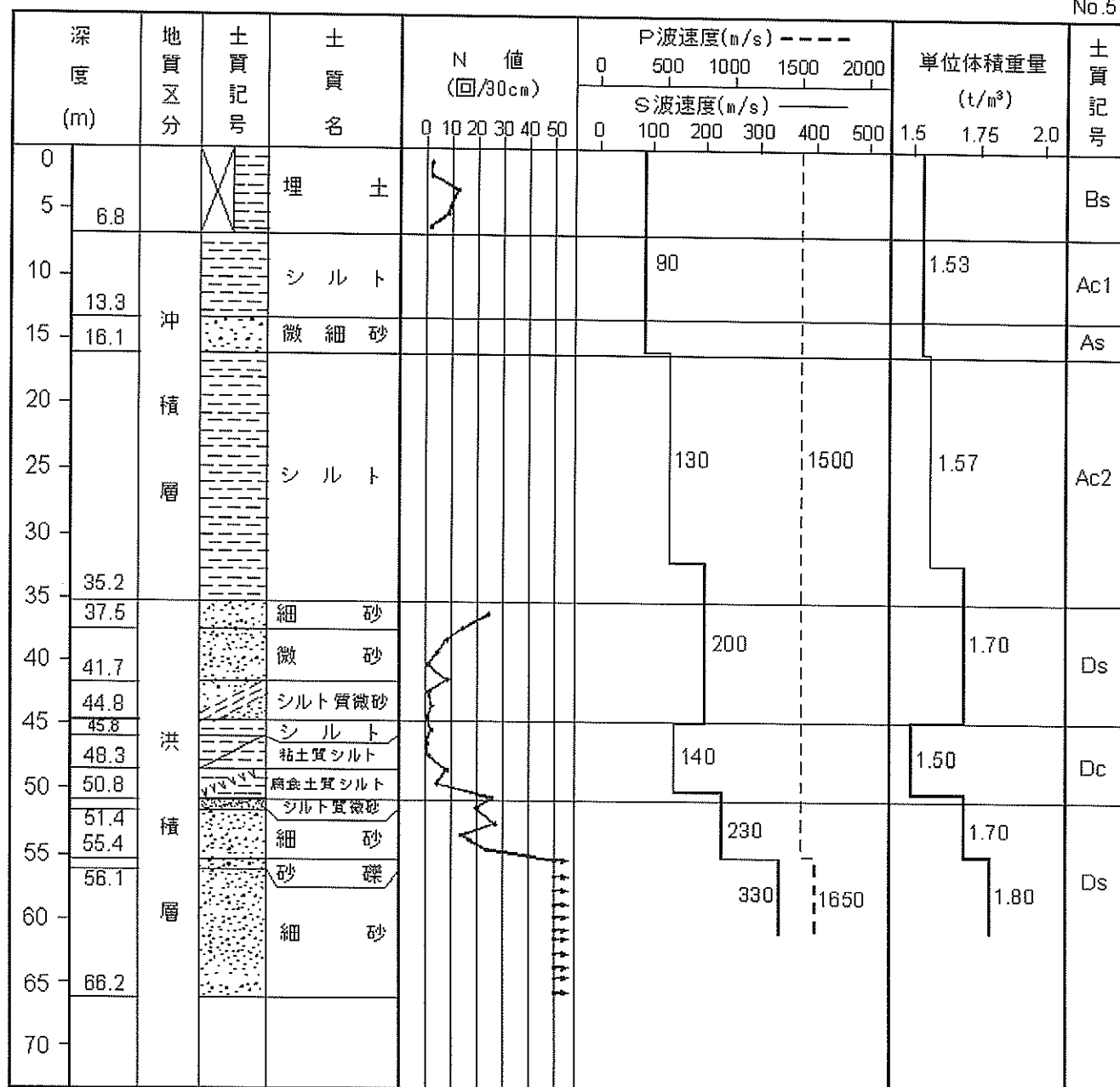


図-12 地層断面図

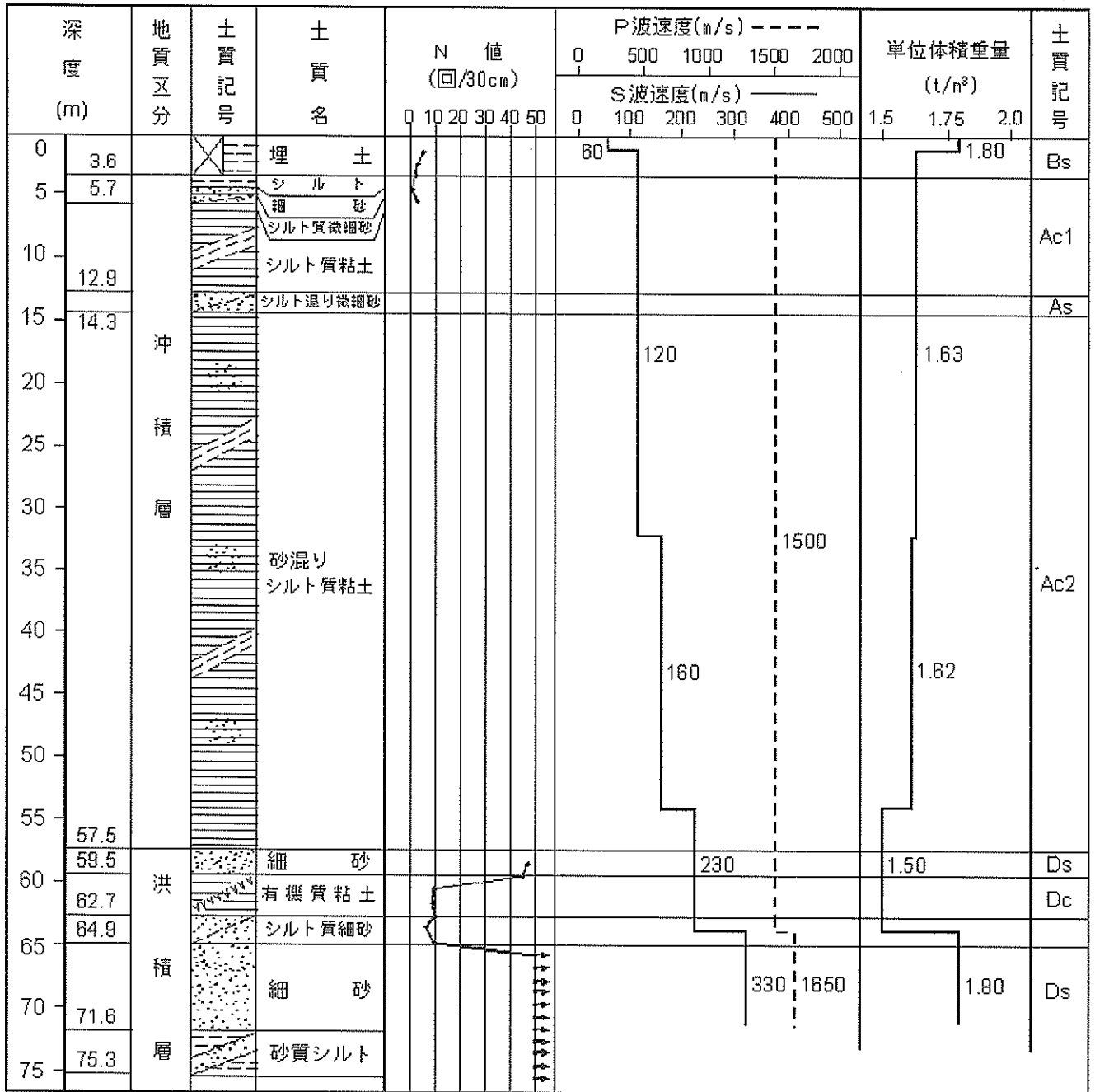
北海道東方沖地震の記録を用いた。No.5 および No.7 地点の記録からフィルターにより長周期成分 (10-20s) を取り出し、二階積分して変位の軌跡を描く。変位の軌跡は、もしも設置方位誤差がなければ互いにちょうど重なり合うはずであるが、実際には軌跡同士は重なり合わない。そこで、一方の軌跡を原点を中心に回転させ、どの程度回転させれば互いに重なり合うかを調べ、設置方位誤差を明らかにした。このとき、5F の換振器を基準とした。このようにして得られた 5F の換振器に対する各換振器の相対的な設置方位誤差を表-6の中央の欄に示す。一方、

5F の換振器の絶対的な設置方位誤差が野津他 (2002) において推定されているので、この値を用いることにより、各換振器の絶対的な設置方位誤差を推定し、表-6の右の欄に示した。なお、野津他 (2002) では、1F-8F の換振器の絶対的な設置方位誤差の平均が 0 であるとの仮定の下に、1F-8F の換振器の絶対的な設置方位誤差を求めている。実際に、1994 年 10 月 4 日北海道東方沖地震の記録に対して、表-6の値を用いて設置方位誤差に関する補正を行った状況を図-14に示す。図-14では、5F,5G,5H,5I,5J,7F,7G,7H,7I,7J の 10 地点の記録から長周



地盤高 A.P. +4.7m
 孔内水位 G.L. -1.9m

図-13(a) No.5 地点のボアホール F における土質柱状図



地盤高 A.P. +3.6m
 孔内水位 G.L. -8.2m

図-13(b) No.7 地点のボアホール F における土質柱状図

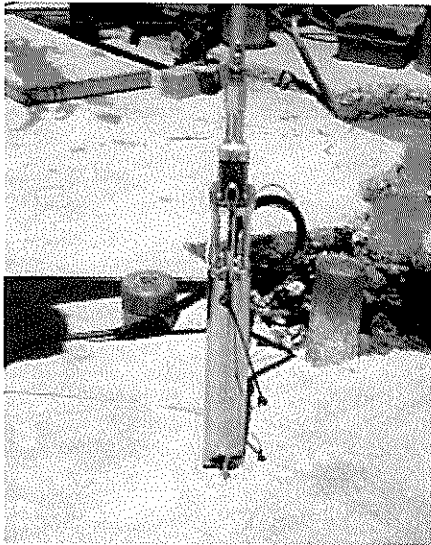


写真-1 新A滑走路で使用中のものと同じ換振器

表-5 新A滑走路で使用中の換振器の仕様

形式	フォースバランス
成分	水平2成分と上下成分
感度	2V/フルスケール
フルスケール	0.008G から 2G の範囲 で設定可能

期成分 (10-20s) をとりだし、二階積分して得た変位の軌跡を重ね合わせて示しているが、設置方位誤差の補正を行わない場合には軌跡が互いにうまく重なり合わず (上)、補正を行う場合には軌跡が重なり合うことがわかる (下)。以上のことから、表-6 に示された設置方位誤差の相対値は妥当であると考えられる。以下において、No.5 および No.7 地点の記録を用いる場合には、表-6 の数字に基づいて設置方位誤差に関する補正を施したうえで用いることとする。

3.2 解析対象記録

新A滑走路は1988年7月の供用開始と同時に地震観測を開始している。著者等が以前に実施した羽田空港を伝播する表面波の特性に関する検討 (野津他, 2002) では、2001年末までに収録された204地震による記録から、次の二つの条件を満足する27地震の記録を選択して用いた。

表-6 地表換振器の水平面内での設置方位誤差 (度)

地点	相対値 (基準は5F)	絶対値
5A	5.0	1.0
5B	6.0	2.0
5D	9.0	5.0
5F	0.0	-4.0
5G	9.0	5.0
5H	7.0	3.0
5I	4.0	0.0
5J	6.0	2.0
7A	22.0	18.0
7B	16.0	12.0
7D	1.0	-3.0
7F	11.0	7.0
7G	5.0	1.0
7H	11.0	7.0
7I	-9.0	-13.0
7J	-2.0	-6.0

①気象庁マグニチュードが5.0以上

②地表最大加速度が10Gal以上

ここで言う最大加速度とは当該地震による地表のすべての記録 (東西・南北・上下の3成分を含む) の最大加速度のうち最も大きいものである。本稿では、野津他 (2002) で用いられたのと同じ27地震によるNo.5地点とNo.7地点の記録を解析に用いることとした。対象とする27地震を表-7に示す。対象とする27地震の震央を図-15に示す。図-15において、■印の横の番号は表-7の地震番号と対応している。地震番号6の地震と地震番号151の地震は互いに近接しているので重なって見える。また地震番号27の地震と地震番号28の地震も重なって見える。1994年北海道東方沖地震 (地震番号61) の震央は表示していない。対象地震の震央位置は、羽田空港の周辺にまんべんなく分布しているように見える。

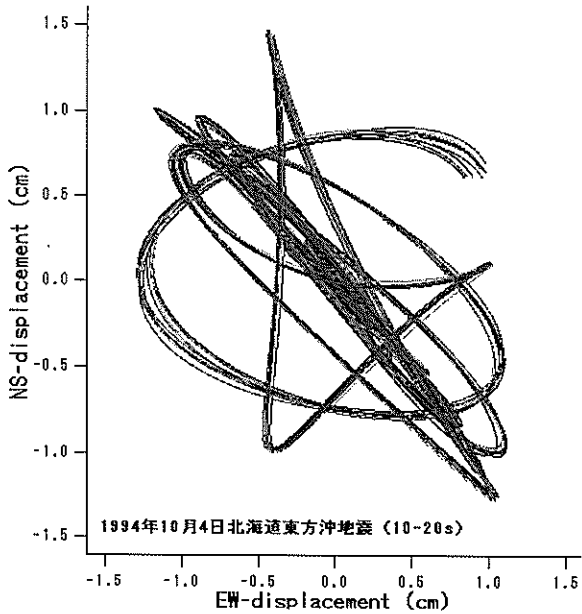
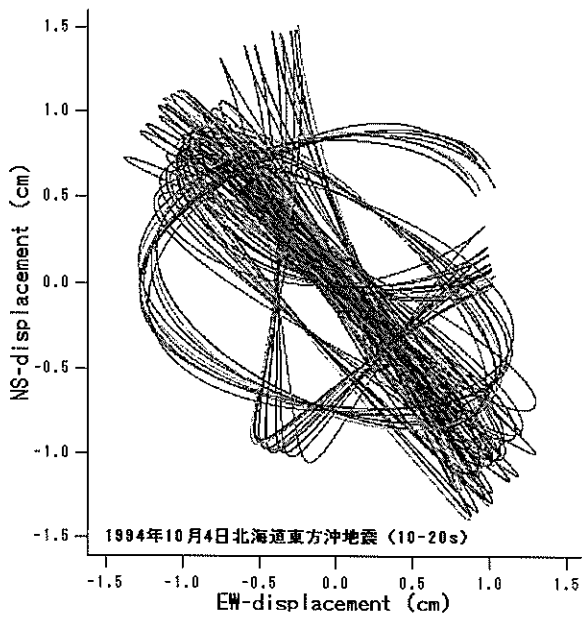


図-14 設置方位誤差の補正を行う前（上）と後（下）の1994年10月4日北海道東方沖地震に対する変位の軌跡（5F,5G,5H,5I,5J,7F,7G,7H,7I,7Jの10地点の重ね合わせ）。

3.3 小アレーによる直ひずみの実測値

対象とする27地震について、No.5およびNo.7地点の小アレーの記録から次式により地盤の直ひずみを求め、これを実測値として取り扱うこととした。

$$\varepsilon = \partial u / \partial x \approx \Delta u / \Delta x \quad (6)$$

ここに Δu は隣り合う観測点間における変位の測線方向成分の差、 Δx は隣り合う二点間の距離（図-9および図-10）である。変位の測線方向成分は、加速度記録（東

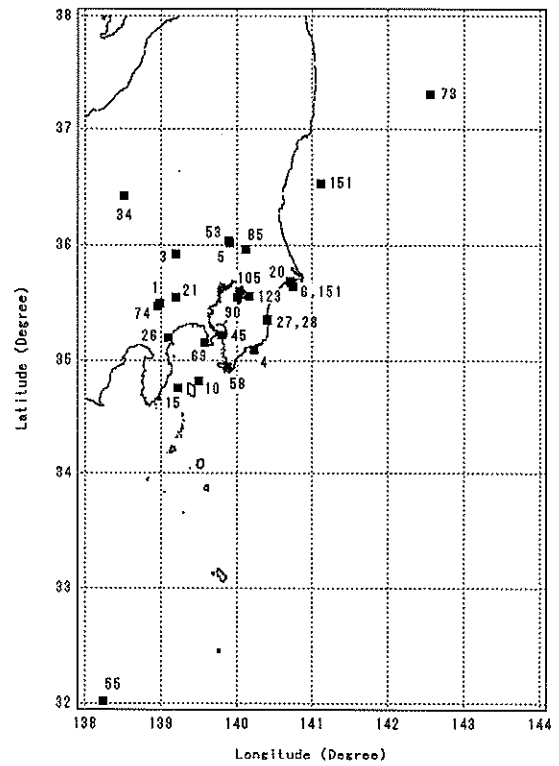


図-15 解析対象地震の震央

西成分と南北成分)を周波数領域で積分し、座標変換することにより求めた。各々の地震について、5F-5G, 5G-5H, 5H-5I, 5I-5J, 7F-7G, 7G-7H, 7H-7I, 7I-7Jの8区間を対象にひずみの算定を行うこととした。ただし表-7に示す観測点はデータが不良であったため、それらのデータが影響を及ぼす両隣の区間（表-7）は検討の対象から除外することとした。

さて、加速度記録を積分して変位波形を求める際、SN比（信号とノイズの比）の小さい低周波成分を削除する必要がある。本研究では、単に変位を求めるのではなく、隣り合う観測点間における変位の差を求める必要があるが、このような場合、信号同士が打ち消しあうので、低周波側のSN比が一層低下する傾向がある。その一例として、地震番号6の地震について、0.1Hzと0.3Hzの二通りのカットオフ周波数を用いて7F, 7G, 7Hの各点での変位波形を計算し、その差から7F-7G, 7G-7Hの各区間におけるひずみ波形を求め、図-16に示す。同図に示すように、カットオフ周波数として0.3Hzを用いた場合には、隣り合う二区間で独立に求めたひずみ波形には互いに良い相関が見られる。ところが、カットオフ周波数として0.1Hzを用いた場合には、隣り合う二区間のひずみ波形に差が生じる（特に波形後半部分）。他の地震や区間についても、同様の傾向が見られた。仮にこれが地

表-7 解析対象 27 地震

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度 (Gal)
1	1988/09/05 00:49	35° 29.8'	138° 59.2'	EASTERN YAMANASHI PREF	29.6	72	5.6	14.0
3	1988/09/29 17:23	35° 55.1'	139° 11.4'	WESTERN SAITAMA PREF	15.0	67	5.0	16.8
4	1988/10/28 15:13	35° 05.8'	140° 13.8'	SE OFF BOSO PENINSULA	75.5	65	5.1	25.4
5	1989/02/19 21:27	36° 01.1'	139° 54.5'	SW IBARAKI PREF	55.3	53	5.6	37.8
6	1989/03/06 23:39	35° 41.6'	140° 42.8'	NEAR CHOSHI CITY	55.7	85	6.0	12.9
10	1989/10/14 06:19	34° 49.4'	139° 30.2'	NEAR IZU-OSHIMA ISLAND	21.2	85	5.7	13.4
15	1990/02/20 15:53	34° 45.6'	139° 14.0'	NEAR IZU-OSHIMA ISLAND	5.8	101	6.5	15.8
20	1990/06/01 10:22	35° 38.5'	140° 43.8'	NEAR CHOSHI CITY	59.3	86	6.0	13.3
21	1990/06/05 22:42	35° 33.2'	139° 11.8'	KANAGAWA PREF	122.8	53	5.4	13.8
26	1990/08/05 16:13	35° 12.4'	139° 05.7'	HAKONE REGION	13.6	73	5.1	10.0
27	1990/08/23 08:47	35° 20.7'	140° 23.8'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	49.9	60	5.4	48.0
28	1990/08/23 11:44	35° 21.5'	140° 24.3'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	49.5	60	5.2	24.0
34	1991/07/14 23:19	36° 25.0'	138° 30.5'	NW GUNMA PREF	187.8	150	5.4	14.4
45	1992/02/02 04:04	35° 13.6'	139° 47.5'	TOKYO BAY REGION	92.3	36	5.9	133.7
53	1993/05/21 11:36	36° 02.5'	139° 54.0'	SW IBARAKI PREF	60.8	56	5.3	18.3
55	1993/10/12 00:54	32° 01.5'	138° 14.6'	FAR S OFF TOKAI DISTRICT	390.7	416	7.1	21.0
58	1994/06/29 11:01	34° 57.1'	139° 52.9'	SOUTHERN BOSO PENINSULA	60.0	67	5.2	17.2
61	1994/10/04 22:22	43° 22.3'	147° 40.7'	E OFF HOKKAIDO	28.0	1095	8.1	13.2
69	1995/07/03 08:53	35° 09.8'	139° 34.1'	SAGAMI BAY REGION	122.1	47	5.2	86.6
73	1996/02/17 00:22	37° 18.4'	142° 33.1'	E OFF FUKUSHIMA PREF	58.0	315	6.5	13.5
74	1996/03/06 23:35	35° 28.4'	138° 57.0'	EASTERN YAMANASHI PREF	19.6	76	5.3	19.2
85	1997/03/23 14:58	35° 57.9'	140° 06.6'	SOUTHERN IBARAKI PREF	71.5	55	5.0	49.0
90	1997/09/08 08:40	35° 33.3'	140° 00.3'	CENTRAL CHIBA PREF	108.6	20	5.2	40.3
105	1998/08/29 08:46	35° 36.2'	140° 02.7'	CENTRAL CHIBA PREF	67.1	24	5.1	50.1
123	1999/09/13 07:56	35° 34.0'	140° 09.6'	CENTRAL CHIBA PREF	77.1	34	5.0	51.6
136	2000/06/03 17:54	35° 40.7'	140° 43.2'	NEAR CHOSHI CITY	47.7	86	6.0	16.5
151	2000/07/21 03:39	36° 31.4'	141° 05.8'	E OFF IBARAKI PREF	49.3	160	6.0	10.0

表-7 検討対象から除外した観測点および区間

地震番号	データ不良の観測点	除外した区間
10	7I, 7J	7H-7I, 7I-7J
90	No.7 のすべて	No.7 のすべて
123	No.5 のすべて	No.5 のすべて
136	5F, 5G, 5J	5F-5G,5G-5H,5I-5J
151	5F, 5G, 5J	5F-5G,5G-5H,5I-5J

盤の真の挙動を示しているとするならば、アレーに沿った各点が 0.3Hz 以上ではコヒーレントな挙動を示し、0.1-0.3Hz では互いにランダムな挙動を示していることになるが、これは考えにくいシナリオである。従って、カットオフ周波数を 0.1Hz として算定される地盤のひずみは真の値ではないものと判断される。そこで、ひずみを計算する際のカットオフ周波数は 0.3Hz とすることとした。なお、7F, 7G, 7H の各点における地震番号 6 の記録のフーリエスペクトルを重ね書きすると図-17が得られるが、0.1-0.3Hz の帯域ではこれらのスペクトルは

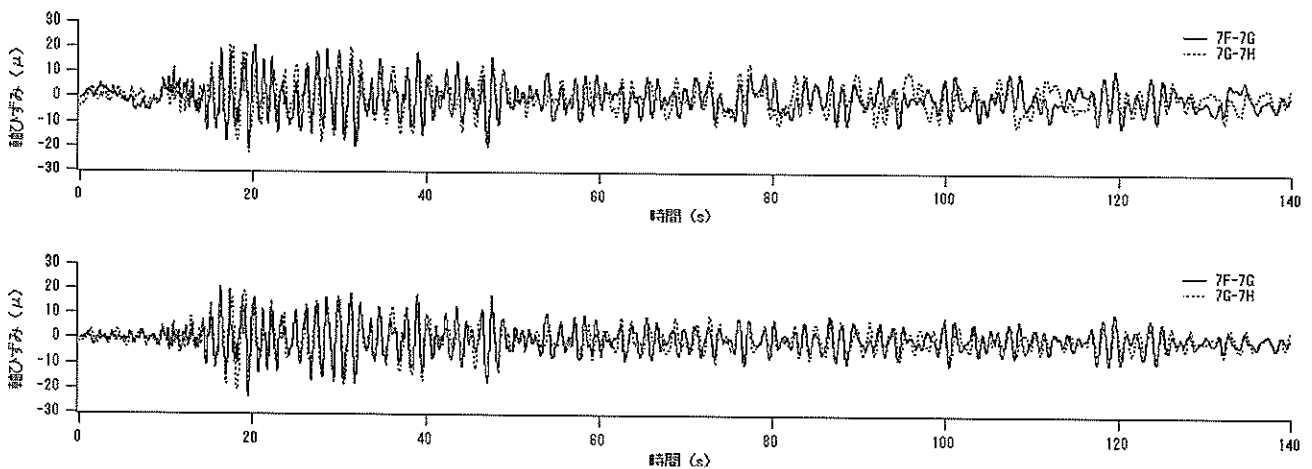


図-16 直ひずみの実測値. 1989年3月6日の地震による区間7F-7Gおよび7G-7Hの直ひずみ. カットオフ周波数を0.1Hzとした場合には隣り合う二区間の相関が悪く(上), 0.3Hzとした場合には相関が良い(下).

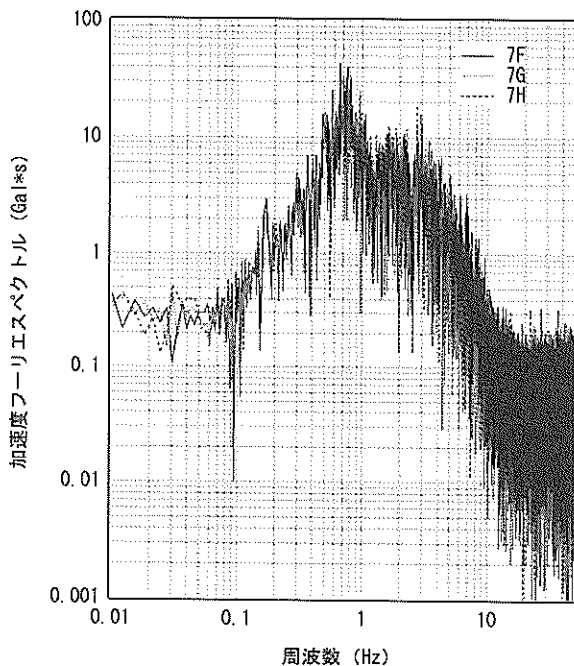


図-17 1989年3月6日の地震による7F, 7G, 7Hの各点での加速度フーリエスペクトル

互いに重なり合っており, またその形状からも, 0.1-0.3Hzの帯域における記録自体の精度は良好のようである. それにも関わらず 0.1-0.3Hzの帯域において良好なひずみ波形が得られないのは, 先に述べたように, 隣り合う二点間の変位差をとるときに信号同士がうち消しあい, 結果的にS/N比が低下するためであると考えられる.

次節で述べるように, 提案法による地盤の直ひずみの算定を行う際, カットオフ周波数を0.1Hzとしても0.3Hzとしても, 算定される直ひずみの時刻歴上の最大値には

大差なかった. このことから, ここで検討対象とするデータに関する限り, 0.1-0.3Hzの周波数成分は直ひずみの最大値にはほとんど影響を与えず, 従って直ひずみを求める際にこの帯域を無視しても差し支えないものと考えられる.

なお, 本稿での議論の本筋から離れることであるが, 以上の方法で求められた5G-5H, 5H-5I, 5I-5Jの各区間におけるひずみ波形は互いに良い相関を示すにも関わらず, 区間5F-5Gにおけるひずみ波形だけは, 系統的に振幅が大きい傾向が見られた. その原因としては, 区間5F-5Gの地盤材料の弾性定数が他の区間と比較して小さいことなどが考えられるが, 正確な原因は把握できていない. 以下の検討においては, 区間5F-5Gにおける地盤のひずみを別扱いすることはせず, 通常のデータとして取り扱う. なお, 区間5F-5Gにおける直ひずみの値は, 算定値と実測値との比較において重要な位置を占めていないので, これを検討対象から除外するかどうかは, 本稿の結論には直接関係がない.

3.4 提案法による直ひずみの算定値

次に, 提案法を用いた直ひずみの算定を行う. その際, 地表の一点での測線方向の地動速度と位相速度 $c(\omega)$ が必要である. 測線方向の地動速度は, No.5地点およびNo.7地点における地表の加速度記録(東西成分と南北成分)を周波数領域で積分し, 座標変換することにより求めた. その際, 低周波側のカットオフ周波数は, 直ひずみの実測値を求める場合と同様0.3Hzとした. No.5地点, No.7地点とも地表の複数地点で記録が得られているので, いずれの記録を用いるかという点で選択肢が

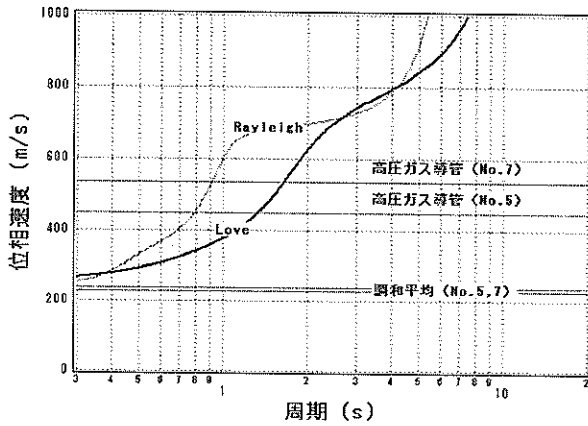


図-18 直ひずみの算定に用いる位相速度

ある。ここでは、検討対象とする区間の両端における記録を用いることとした。例えば、区間 5F-5G における直ひずみを提案法により算定しようとする場合、5F の記録と 5G の記録を用いて二通りの算定値を得ることとし、各々を実測値と比較することとした。

位相速度 $c(\omega)$ としては、ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いる。羽田空港新 A 滑走路における表面波の位相速度は野津他 (2002) により検討されている。野津他 (2002) は、地震動のアレー観測に基づいて表面波の位相速度を求め、これを説明しうるような地下構造モデル (表-8) を求めている。このモデルに対応するラブ波およびレイリー波基本モードの位相速度を比較すると、図-18に示すように、ほぼすべての周期においてラブ波基本モードの方が小さい。そこで、提案法による直ひずみの算定には、図-18に示すラブ波基本モードの位相速度を用いることとする。なお、野津他 (2002) においては周期 1 秒以上の表面波を検討対象としており、図-18に示す位相速度の周期 1 秒以下の部分は、表-8の地下構造モデルに基づいて外挿されたものである。

なお、加速度波形を積分する際の低周波側のカットオフ周波数について、0.1Hz とする場合と 0.3Hz とする場合の比較を行った。二通りのカットオフ周波数に対して提案法による直ひずみの算定を実施し、時刻歴上の最大値を読みとって比較すると、図-19に示すように両者には大差のないことがわかった。このことから、ここで検討対象とするデータに関する限り、0.1-0.3Hz の周波数成分は直ひずみの最大値にはほとんど影響を与えていないものと考えられる。

提案法による直ひずみの算定に加え、比較のため、調和平均法と高圧ガス導管の方法による位相速度を用い、式 (1) による直ひずみの算定を行った。位相速度以外

表-8 表面波の位相速度と調和的な羽田空港の地下構造モデル

層厚 (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	密度 (ton/m ³)
50.0	1600.0	250.0	1.80
120.0	1800.0	410.0	1.90
1580.0	1900.0	800.0	1.90
1250.0	2400.0	1200.0	2.10
3100.0	5000.0	2600.0	2.60
	6000.0	3400.0	2.60

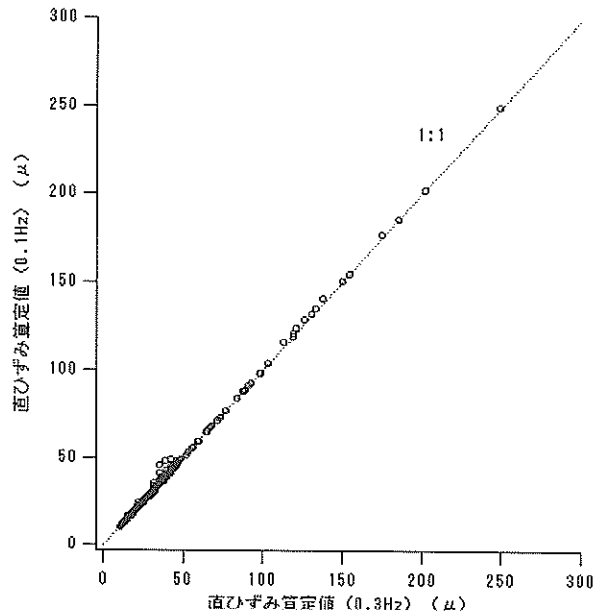


図-19 カットオフ周波数を 0.1Hz とする場合と 0.3Hz とする場合の直ひずみの最大値の比較

の条件を揃えるため、地動速度は提案法と同様のもの (加速度記録を積分したもの) を用い、地震波の伝播方向と測線方向とのなす角 θ は 0 とした。調和平均法と高圧ガス導管の方法による位相速度は表層地盤の固有周期に対応するものであるが、他の周期に対しても同様の値を用いることとした。

先に述べたように、調和平均法の位相速度は表層地盤と工学的基盤の S 波速度から、高圧ガス導管の方法の位相速度は表層地盤の固有周期からそれぞれ求まる。ここでは、図-13に示された No.5 地点および No.7 地点の表層地盤モデルに基づき、表層地盤の周波数伝達関数の実測値をより良く再現できるように修正を加え、修正後

表-9 No.5 地点の表層地盤モデル

層厚 (m)	Vs (m/s)	密度 (ton/m ³)	減衰定数
32.0	130.0	1.80	0.005
12.8	280.0	1.80	0.005
4.7	220.0	1.80	0.005
5.5	310.0	1.80	0.005
	410.0	1.80	

表-10 No.7 地点の表層地盤モデル

層厚 (m)	Vs (m/s)	密度 (ton/m ³)	減衰定数
3.6	140.0	1.80	0.005
28.4	120.0	1.80	0.005
22.0	210.0	1.80	0.005
10.0	280.0	1.80	0.005
	410.0	1.80	

のモデル (表-9および表-10) から位相速度を算定することとした。表-9および表-10の表層地盤モデルから重複反射理論で計算される地中-地表間の周波数伝達関数と、1989年3月6日の地震による周波数伝達関数の実測値との比較を図-20および図-21に示す。同図に示すように、実測値の傾向は概ね再現されている。

表-9および表-10の表層地盤モデルから表層地盤の平均 S 波速度は No.5 および No.7 地点に対しそれぞれ 166m/s および 158m/s と計算される。その結果、調和平均法による位相速度はそれぞれ 236m/s および 228m/s と求まる。また、表-9および表-10の表層地盤モデルから表層地盤の固有周期は No.5 および No.7 地点に対しそれぞれ 1.2 秒および 1.4 秒と計算される。その結果、高压ガス導管の方法による位相速度はそれぞれ 448m/s および 535m/s と求まる。なお固有周期の算定は層厚平均法 (日本ガス協会, 2000) によった。これらの値を図-18に示す。

なお、表面波の位相速度と調和的な地下構造モデル (表-8) の表層部分と、表層地盤の周波数伝達関数と調和的な地盤モデル (表-9および表-10) とを比較すると、後者の方が S 波速度が小さい傾向にあることがわかる。そこで、表-8の地下構造モデルの表層部分を S 波速度

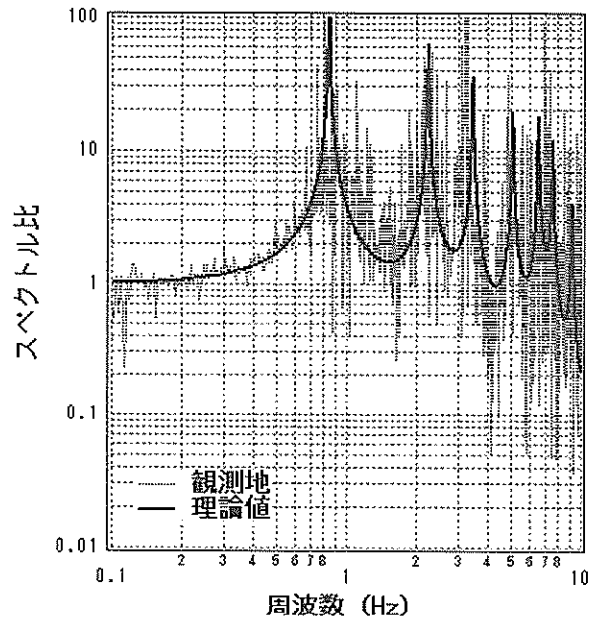


図-20 No.5 地点の表層地盤モデル (表-9) による周波数伝達関数 (5F/5A) の理論値と 1989年3月6日の地震による実測値 (NS 成分)

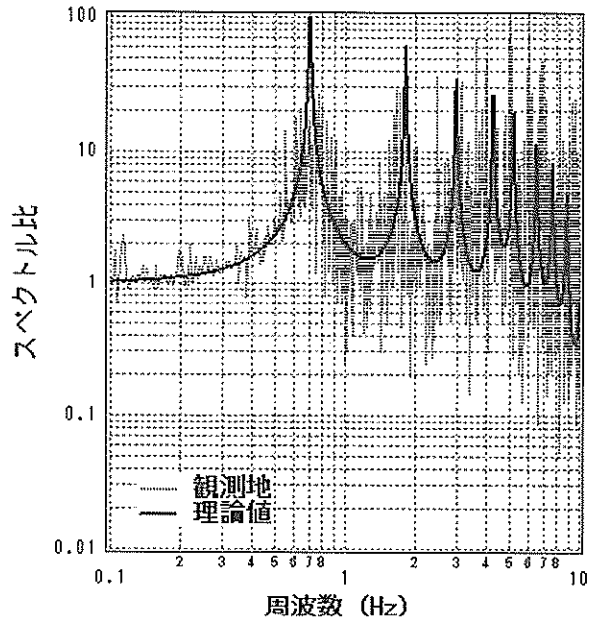


図-21 No.7 地点の表層地盤モデル (表-10) による周波数伝達関数 (7F/7A) の理論値と 1989年3月6日の地震による実測値 (NS 成分)

のより小さい媒質に置き換えて表-9および表-10の媒質に近づけたところ、表面波の位相速度の観測値を再現できない結果となった。そこで、提案法では、表-8の地下構造モデルに対する変更は行わず、表-8の地下構造モデ

ルから求まる位相速度を用いることとする。上述の差異の原因は明確にできていないが、地表付近の舗装の影響も一因ではないかと考えている。つまり、地表付近の舗装が地盤の変形を拘束する効果は、表層地盤の1次元的なせん断振動に対してよりも表面波の伝播に対してより顕著である可能性がある。その場合、舗装の影響を考慮せずに表面波の位相速度を算定すると、実測値を過小評価する可能性があるものと考えられる。

3.5 算定値と実測値の比較

小アレーによる直ひずみの実測値と、提案法による直ひずみの算定値から、時刻歴上の最大値を求め、比較を行った。その結果を図-22に示す。同図に示すように、実測値は概ね1:1の線より下側に集まっている。実測値(時刻歴上の最大値)の算定値(同)に対する比の値の頻度を図-23に示す。比較を行った全400ケースのうち、比の値が1を越えるのは3ケース(0.75%)のみである。また、比の値の最大値は1.09であり大きくはない。このことから、対象地盤について言えば、提案法は当初意図したとおり地盤の直ひずみに関して概ね安全側の評価を与えていると言える。提案法はもともと水平成層に近い地盤を念頭においたものであり、実地盤への適用性の検討は課題となっていたが、羽田空港新A滑走路程度の地盤の不整形性であれば、提案法の適用には特に問題はないことがわかる。

参考のため、提案法の位相速度を調和平均法のものと同圧ガス導管の方法のものに置き換えた場合の実測値(時刻歴上の最大値)の算定値(同)に対する比の値の頻度を図-24および図-25にそれぞれ示す。調和平均法の位相速度を用いた場合には、比の値は0.6を越えることはなく、経済的、合理的設計法という見地からすれば、調和平均法の位相速度を用いることは最善の選択でないことがわかる。高圧ガス導管の方法の位相速度を用いた場合には、全400ケースのうち20ケース(5%)で比の値が1を越える。また、比の値の最大値は1.9であり小さいとは言えない。従って、高圧ガス導管の方法による位相速度は、地表の一点における地震動として現実的なものを与え、かつ、地盤の直ひずみに関して安全側の評価を与えようとする場合には不向きであると言える。

4. 結論

埋設パイプラインや沈埋トンネルなど線状埋設構造物の耐震性を議論する際には、地表に沿った二点間の相対変位、または、地盤のひずみを評価することが重要であ

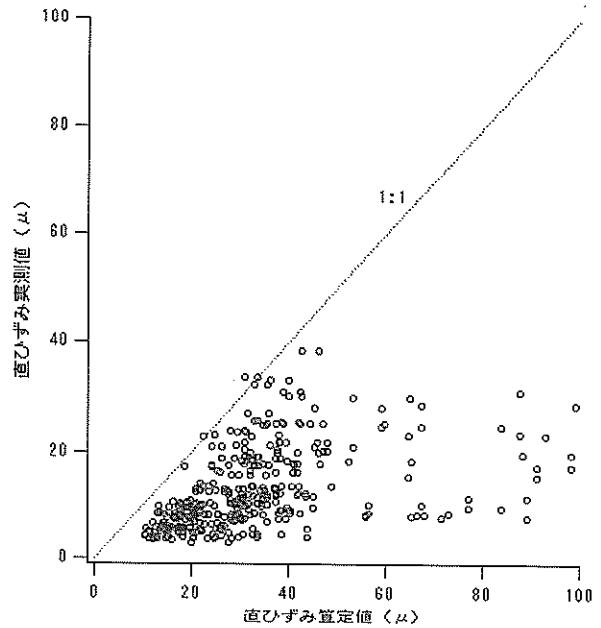


図-22 直ひずみの実測値と算定値との比較

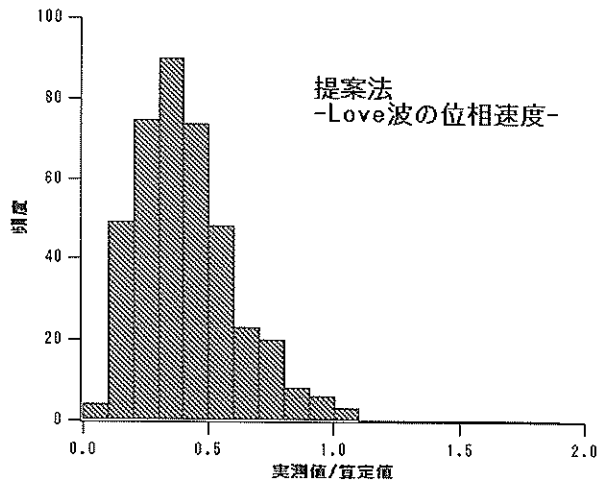


図-23 直ひずみの実測値と算定値の比の頻度
(提案法により直ひずみを算定した場合)

る。本研究では、水平成層に近い地盤を念頭におき、地表の一点での地震動が与えられているとの前提で、波動伝播効果に起因する地盤の直ひずみを算定するための方法を検討した。地震波が複数の周波数成分から成ることを前提とすると、地盤の管軸方向の直ひずみ $\varepsilon(\omega)$ は、管軸方向の地動速度 $v(\omega)$ と地震波の管軸方向の位相速度 $c(\omega)$ を用いて次式で表現される。

$$\varepsilon(\omega) = v(\omega) / c(\omega) \quad (1)$$

提案法では式(1)の $c(\omega)$ としてラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いる。これは地盤の直ひずみに関して安全側の評価を与えることを意図したものである。一般に表面波の特性は場所毎

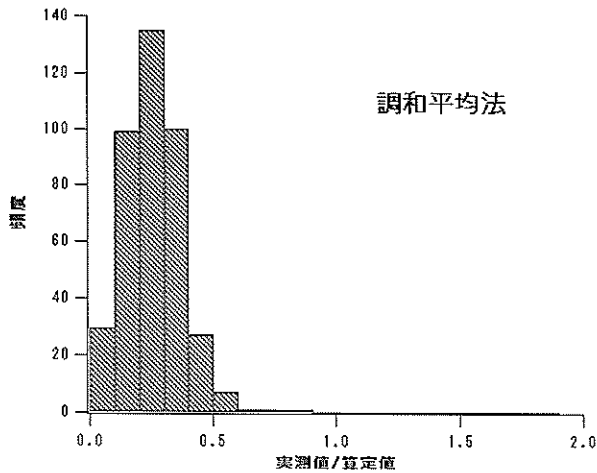


図-24 直ひずみの実測値と算定値の比の頻度
(調和平均法の位相速度を用いた場合)

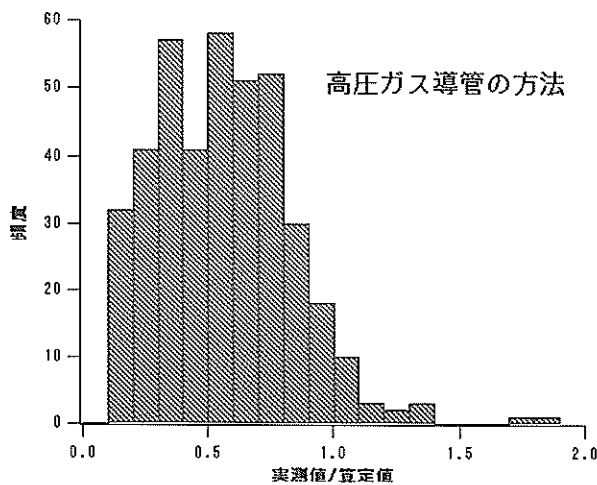


図-25 直ひずみの実測値と算定値の比の頻度
(高圧ガス導管の方法の位相速度を用いた場合)

の地下構造を反映して著しく異なるので、 $c(\omega)$ は地震動や微動のアレー観測結果に基づいて評価することが望ましい。提案法は水平成層に近い地盤を念頭においたものであるから、実地盤への適用性を検討することは重要である。そこで、本研究では羽田空港新 A 滑走路のアレー観測記録に基づき提案法の検証を行うこととした。新 A 滑走路のアレーは、設置間隔が数 100m の大アレーと設置間隔が数 10m の小アレーから構成されている。このうち小アレーの記録を用い、隣同士の観測点における変位の差から地盤の直ひずみを求め、これを実測値とした。一方、当該空港における表面波の位相速度(野津他, 2002)と地表での速度波形から提案法により地盤の直ひずみを算定し、実測値と比較した。その結果、提案法は当初意図したとおり地盤の直ひずみに関して概ね安全側の評価を与えることが確認された。

5. あとがき

本稿で提案した地盤の直ひずみの算定手法は、位相速度の弾性波動論的な位置づけが明確なので、地震の震源特性・伝播経路特性・サイト特性などを考慮して物理的にあり得る地震動を想定するいわゆる強震動予測手法と組み合わせて用いることに適している。実際の地震動に含まれる複数の周波数成分を考慮できるという点も提案法の長所である。提案法は位相速度の周波数依存性を考慮するので一見複雑なように見えるが、FFT を使用できる環境さえ整っていれば特段の困難もなく実際の問題に適用できるので、今後の活用が期待される。

最近では、微動のアレー観測等により、原位置での表面波の位相速度も比較的容易に求めることができるようになってきた。実際に、線状埋設構造物の耐震設計のため、原位置での表面波の位相速度を微動のアレー観測により求めた事例がある(足立他, 2001)。

本稿では地盤の直ひずみを対象としたが、沈埋トンネルのように径の大きい線状埋設構造物の場合には、地盤の曲率がもたらす曲げ応力も設計上無視できない要因となる。提案法は地盤の曲率の算定にも用いることができるが、その精度の検証は今後の課題である。また、本研究では専ら表層地盤が線形の状態のデータを対象としているが、本来重要なのは、表層地盤が非線形挙動を示す場合の地盤の変形予測である。この面での研究を進めるためには、地盤の非線形挙動を伴うような強い地震動をアレーの枠組みの中で捉えることがぜひとも必要である。

(2004年2月10日受付)

謝辞

本研究では羽田空港新 A 滑走路に設置されたアレー観測システムの記録を使用していますが、この観測システムは運輸省第二港湾建設局により整備され、運輸省第二港湾建設局及び国土交通省関東地方整備局によりメンテナンスがなされてきたものです。観測に係るこれらの機関の努力に対し敬意を表します。同観測システムによる記録の収集・整理と解析は国土交通省関東地方整備局から当所への受託業務となっています。(財)建設技術研究所の岩崎敏男博士には調和平均法が提案された当時の事情について丁寧に教えていただき、研究を進める上での動機づけを与えていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 足立幸郎, 中本覚, 鈴木直人 (2001): 開削トンネルの縦断方向耐震設計に考慮する地震波長と構造目地間隔に関する研究, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1205-1208.
- 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子 (1997): 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.2, B25.
- 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長 (1991): 地震のスクエ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報告集, 第 430 号, pp.1-9.
- 清宮理・西澤英雄・横田弘 (1983): 川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻, 第 3 号, pp.253-299.
- 古和田明・田居優・入倉孝次郎 (1998): 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 514 号, pp.97-104.
- 土田肇・南兼一郎・清宮理・倉田栄一・西沢英雄 (1981): 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻, 第 4 号, pp.3-40.
- 土田肇・井合進 (1991): 建設技術者のための耐震工学, 山海堂.
- 土木学会 (2000): 土木構造物の耐震設計法に関する第 3 次提言と解説.
- 日本ガス協会 (2000): 高圧ガス導管耐震設計指針.
- 日本下水道協会 (1997): 下水道施設の耐震対策指針と解説.
- 日本水道協会 (1997): 水道施設耐震工法指針・解説.
- 日本道路協会 (1974): 石油パイプライン地震対策要綱・同解説.
- 日本道路協会 (1986): 共同溝設計指針.
- 野津厚, 安中正, 佐藤陽子, 菅野高広 (2002): 羽田空港の地震動特性に関する研究 (第 1 報) 表面波の特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1022, 2002.
- 野津厚・佐藤陽子・菅野高広 (2003a): 半経験的な強震動予測手法の改良に関する提案, 港湾技術研究所報告, 第 42 巻, 第 1 号. pp.139-166.
- 野津厚・佐藤陽子・深澤清尊・佐藤泰子・菅野高広 (2003b): 港湾地域強震観測年報 (2002), 港湾空港技術研究所資料, No.1054.
- Aki, K. and Richards, P.G. (1980): *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, Vol.1, W.H. Freeman.
- Dan, K., T. Watanabe and T. Tanaka (1989): A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on approximate far-field shear-wave displacement, *J. Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 396, pp.27-36.
- Hartzell, S.H. (1978): Earthquake aftershock as Green's functions, *Geophys. Res. Lett.*, 5, pp.104.
- Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, 32, pp.63-104.
- Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp.151-156.
- Kawase, H. (1996): The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect," constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, *Seism. Res. Lett.*, 67, pp.25-34.
- Takemura, M. and T. Ikeura (1988): A semi-empirical method using a hybrid stochastic and deterministic fault models: Simulation of strong ground motions during large earthquakes, *J. Phys. Earth*, 36, 89-106.

付録A 実体波と表面波の位相速度の比較

本文中で述べたように、水平成層地盤に実体波が斜めに入射する場合にも、水平成層地盤を表面波が伝播する場合にも、波動伝播効果は生じる。しかし、同一の周波数で比較した場合、位相速度は必ず後者の方が小さい。このことは次のように示される。

ω および k はそれぞれ周波数と波数の水平成分を示すものとする。このとき、位相速度 c は式 (A1) で与えられる。

$$c = \omega / k \quad (\text{A1})$$

従っていかなる周波数 ω に対しても c は k の減少関数である。さて、 β は基盤での S 波速度を意味するものとする。このとき、波数の水平成分 k (全層に共通) と基盤における波数の鉛直成分 γ との関係は式 (A2) で与えられる。

$$\gamma^2 = (\omega / \beta)^2 - k^2 \quad (\text{A2})$$

式 (A2) の右辺が負であれば、基盤における振幅の鉛直分布は指数関数で与えられることになり、表面波に対応する。式 (A2) の右辺が正であれば、基盤における振幅の鉛直分布は三角関数で与えられることになり、実体波に対応する。従って、実体波よりも表面波の方が波数の水平成分 k の値は大きく、従って同じ周波数で比較すると、実体波よりも表面波の方が位相速度は小さいことがわかる。

港湾空港技術研究所資料 No.1080

2004.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。