

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

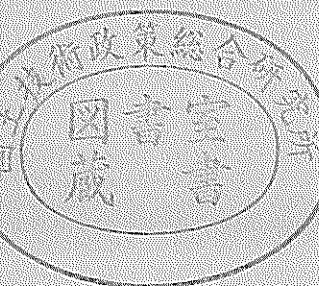
REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.42 NO.2 June 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 巻 第 2 号 (Vol. 42, No. 2), 2003 年 6 月 (June 2003)

## 目 次 (CONTENTS)

1. グリーンベルトを用いた南太平洋地域の津波対策  
..... 平石 哲也・原田 賢治 ..... 3  
(Greenbelt Tsunami Prevention in South-Pacific Region  
..... Tetsuya HIRAISHI, Kenji HARADA)
2. 時間発展型擬似段波モデルに基づく砕波モデルの開発  
..... 平山 克也・原 信彦 ..... 27  
(A Simple Wave Breaking Model with Quasi-Bore Model in Time Domain  
..... Katsuya HIRAYAMA, Nobuhiko HARA)
3. SCP 改良地盤における水平抵抗特性  
..... 北詰 昌樹・高橋 英紀・竹村 慎治 ..... 47  
(Experimental and Analytical Studies on Horizontal Resistance of Sand Compaction Pile Improved Ground  
..... Masaki KITAZUME, Hidenori TAKAHASHI, Shinji TAKEMURA)
4. 粘土地盤中の根入れ基礎の鉛直支持力に関する遠心載荷模型実験と解析  
..... 中村 健・北詰 昌樹 ..... 73  
(CENTRIFUGE MODEL TESTS AND STRESS CHARACTERISTICS ANALYSES ON VERTICAL BEARING  
CAPACITY OF EMBEDDED SHALLOW FOUNDATION  
..... Takeshi NAKAMURA, Masaki KITAZUME)
5. 斜め組杭式棧橋の地震時挙動に関する数値解析と耐震性能照査法の提案  
横田 弘・濱田 純次・大熊 弘行・杉澤 政敏・芥川 博昭・津國 正一・佐藤 博 ..... 87  
(Numerical Analysis on Dynamic Behavior of an Open Type Wharf on Coupled Raking Steel Piles During Earthquakes  
... Hiroshi YOKOTA, Junji HAMADA, Hiroyuki OHKUMA, Masatoshi SUGISAWA, Hiroaki AKUTAGAWA,  
Shouichi TSUKUNI, Hiroshi SATO)
6. ASR が発生したコンクリートの特性および内部鉄筋ひずみとコンクリート表面ひずみの関係  
..... タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 ..... 133  
(Concrete Properties and Relationship Between Surface Strain and Strain Over the Steel Bars of ASR Affected  
Concrete Members  
..... Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)

7. スラグセメントを用いたコンクリートの海洋環境下における長期耐久性  
 …… タレク ウディン モハメッド・濱田 秀則・山路 徹 …… 155  
 (Long-term Durability of Concrete Made with Slag Cements Under Marine Environment  
 …… Tarek Uddin MOHAMMED, Hidenori HAMADA, Toru YAMAJI)
8. 久里浜湾における越波被災の要因と特性  
 - ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築 -  
 …… 安田 誠宏・服部 昌樹・平石 哲也・平山 克也・永井 紀彦・小川 英明 …… 193  
 (Damage Cause and Characteristics of Wave Overtopping in Kurihama Bay  
 -Establishment of the Estimation Method for Wave Overtopping Damage Applying NOWPHAS-  
 …… Tomohiro YASUDA, Masaki HATTORI, Tetsuya HIRAIISHI, Tosihiko NAGAI, Hideaki OGAWA)
9. コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究  
 - 免震コンテナクレーンの開発 -  
 …… 菅野 高弘・芝草 隆博・藤原 潔・徳永 耕一・榎本 洋二・藤木 友幸 …… 221  
 (Study on the Seismic Performance of Container Crane  
 -Development of the Container Crane with Isolation System-  
 …… Takahiro SUGANO, Takahiro SHIBAKUSA, Kiyosi FUJIWARA, Koichi TOKUNAGA, Yoji MAKIMOTO,  
 Tomoyuki FUJIKI)
10. 羽田空港の地震動特性に関する研究  
 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性  
 …… 野津 厚・佐藤 陽子・菅野 高弘 …… 251  
 (Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport  
 (Second Report) Site Amplification Factors  
 …… Atsushi NOZU, Yoko SATO, Takahiro SUGANO)
11. 直立部に消波構造を用いた新しい高基混成堤の開発  
 - 水理特性および耐波安定性に関する実験的研究 -  
 …… 下迫 健一郎・高橋 重雄 …… 285  
 (Development of a New Type High Mound Composite Breakwater  
 -Experimental Study on Hydraulic Characteristics and Stability against Waves-  
 …… Kenichiro SHIMOSAKO, Shigeo TAKAHASHI)

## 羽田空港の地震動特性に関する研究 (第2報) スペクトルインバージョンによるサイト特性

野津 厚\*・佐藤 陽子\*\*・菅野 高弘\*\*\*

### 要 旨

羽田空港では沖合展開以後地震観測を継続的に実施しており記録の蓄積が進んでいる。それらの記録から空港施設の耐震設計に役立つ情報を抽出することを念頭において一連の研究を実施している。前報ではアレー観測の記録に F-K 解析を適用して、表面波の特性、特に位相速度と周期の関係を調べた。しかし、地震時の地盤のひずみを評価するためには、位相速度に加え、地震動の振幅を周期の関数として評価することが必要である。そこで、本報ではスペクトルインバージョン手法を適用し、当該空港のサイト特性、すなわちフリーエ振幅スペクトルの地震基盤に対する増幅率を明らかにすることを試みた。インバージョンには、羽田空港で得られた記録に加え、港湾地域強震観測や K-NET など、関東地方の他の地点で得られた記録を用いた。使用した記録は 122 の観測点で得られた 31 の地震による 1384 の記録である (2768 成分)。推定した未知数は 31 の地震による震源スペクトルと 122 の観測点のサイト特性、それに伝播経路の Q 値の併せて 154 である。スペクトルインバージョンでは基準観測点(サイト特性がすべての周波数に対して 1 であるような観測点)を与える必要がある。ここでは試行錯誤により K-NET の TKY002 (検原) を基準観測点とした。本研究で得られた羽田空港の No.1-No.8 地点のサイト特性は、概ね 0.2Hz 以下では共通であるが、それ以上では地点毎にかなり相違のあることがわかった。工学的基盤の深い観測点のグループ (No.1-4, No.7) では、周波数 0.3-1.0Hz の範囲でサイト特性は 10 を上回るかなり大きな値を示す。この値は関東地方の他のどの観測地点と比較しても大きいものであった。それに対して、工学的基盤の浅い観測点のグループ (No.5,6,8) では、サイト特性のピークはより高周波数側に移動し、そのピークの高さは 10 程度である。ここで得た結果はシナリオ地震による強震動の予測に活用することができる。特に、震源位置の関係で経験的グリーン関数法を適用できないような場合には、本研究で得られたサイト特性を統計的グリーン関数法と組み合わせて用いることにより、地表での揺れを大略評価することができる。

キーワード：羽田空港，地震動，サイト特性，スペクトルインバージョン

\* 地盤・構造部主任研究官

\*\* 前科学技術振興事業団重点研究支援協力員

\*\*\* 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

## Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport (Second Report) Site Amplification Factors

Atsushi NOZU\*

Yoko SATO\*\*

Takahiro SUGANO\*\*\*

### Synopsis

Earthquake ground motions have been observed at Haneda Airport for more than 14 years. The Port and Airport Research Institute have been in charge of collection and analyses of the data. Through the analyses of the data, the authors would like to retrieve a wide range of technical information which would play a vital role in the future construction of facilities not only at this particular airport but also at other airports which are located on soft soil layers. In the present technical report, the authors evaluated the site amplification factors at Haneda Airport based on spectral inversion technique. The data set comprises 1384 records (2768 horizontal components) from 31 earthquakes recorded at 122 stations in and around the Kanto plain, Japan, including not only stations at Haneda Airport but also K-NET stations and stations for strong-motion observation in Japanese Ports. Two cases of inversion analysis were carried out. For the first case, the quality factor  $Q$  was determined through the inversion analysis. For the second case,  $Q$  was prescribed based on Kinoshita's (1994) results. The K-NET station at Hinohara (TKY002) was selected as a reference site. The two inversion cases led to almost identical results as long as the site amplification factors are concerned. Although the site amplification factors at sites No.1 through No.8 at Haneda Airport are almost identical at frequencies lower than 0.2Hz, the site amplification factors are quite location-dependent at frequencies higher than 0.2Hz. At sites No.1,2,3,4 and 7, where the soft soil layers are thick, the site amplification factors are larger than 10 at frequencies 0.3-1.0Hz. At sites No.5,6 and 8, where the soft soil layers are thin, the peaks of site amplification factors are located at higher frequencies. The obtained site amplification factors can be used for strong motion prediction in conjunction with the stochastic Green's function method.

**Keywords:** Haneda Airport, ground motion, site amplification factor, spectral inversion

---

\* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Former Technological Supporting Staff of Priority Research, Japan Science and Technology Corporation

\*\*\* Chief of Structural Dynamics Division, Structural Engineering Department

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

Phone: +81-46-844-5058 Fax: +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	251
1. はじめに .....	255
2. 解析対象記録 .....	256
2.1 解析対象地点 .....	256
2.2 解析対象地震 .....	257
2.3 解析対象記録 .....	267
3. 解析手法 .....	268
3.1 フーリエスペクトルの算出 .....	268
3.2 スペクトルインバージョン .....	269
3.3 解析条件 .....	270
4. 解析結果 .....	270
4.1 伝播経路特性 .....	270
4.2 震源特性 .....	271
4.3 サイト特性 .....	272
5. 結論 .....	275
6. あとがき .....	275
謝辞 .....	275
参考文献 .....	276
付録 解析対象記録一覧 .....	277

1. はじめに

東京国際空港(羽田空港)では沖合展開以後、地震観測を継続的に実施しており、当研究所およびその前身に当たる運輸省港湾技術研究所は記録の収集・整理と解析を担当してきた。最も早く観測を開始した新A滑走路では観測を開始してからすでに14年が経過しており、2002年の末までに239の地震が記録されている。また、他の施設でもこれに次ぐ数の記録が得られている。これらの記録の解析を通じて、当該空港のみならず、広く軟弱地盤上における空港施設整備において有用となる情報を引き出すことを念頭において一連の研究を実施している。

前報(野津他, 2002)では、新A滑走路に展開された地震計群列(アレー)の記録にF-K解析を適用して、表面波の特性、特に位相速度と周期の関係を調べた。しかし、地震時の地盤のひずみを評価するためには、位相速度に加え、地震動の振幅を周期の関数として評価することも必要である。

一般に、地震動の振幅は震源の性質(震源特性)と震源から基盤に至るまでの伝播経路の性質(伝播経路特性)、さらに基盤から地表に至る地盤の性質(サイト特性)の三者によって決まるとされている(図-1)。このことをもっともシンプルに表現した式が次式である(例えば木下, 1993)。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

ここに $f$ は周波数、 $O_{ij}(f)$ は第 $i$ 地震による第 $j$ 地点の地震動のフーリエ振幅スペクトル、 $S_i(f)$ は第 $i$ 地震の震源特性、 $P_{ij}(f)$ は第 $i$ 地震の震源から第 $j$ 地点の基盤までの伝播経路特性、 $G_j(f)$ は第 $j$ 地点のサイト特性である。特

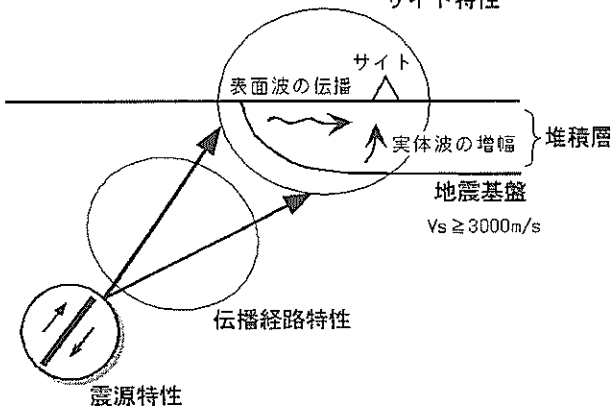


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

定地点においてシナリオ地震による地震動の振幅を予測するには、あらかじめ強震記録に基づいてサイト特性 $G_j(f)$ を求めておき、これをシナリオ地震の震源特性や伝播経路特性と組み合わせればよい。式(1)は、震源から放射される地震動が観測点の方位に依存しないとしている点や、サイト特性が震源の方位に依存しないとしている点など、実際の現象を簡略化している面もあるが、シナリオ地震による地震動の振幅を大略評価するには十分に役立つものと考えられる。

強震記録からサイト特性を求める方法としては次の二つがある。

①複数の地震と観測点の組み合わせに対して記録 $O_{ij}(f)$ が得られているとき、それらをもっとも良く説明できるような震源特性 $S_i(f)$ 、伝播経路特性 $P_{ij}(f)$ 、サイト特性 $G_j(f)$ を逆解析により求める方法(岩田・入倉, 1986)。

②強震記録 $O_{ij}(f)$ を、別途評価した $S_i(f)$ と $P_{ij}(f)$ で除すことによりサイト特性 $G_j(f)$ を求める方法(鶴来他, 1997)。

著者らは関西国際空港のサイト特性を求めるために②の方法を適用したことがある(野津・井合, 2001)。しかし、②の方法が適用できるのは、別の情報に基づいて震源特性と伝播経路特性が評価できている場合に限られる。本研究では①すなわちスペクトルインバージョン手法に基づいて、羽田空港のサイト特性、すなわちフーリエ振幅スペクトルの地震基盤に対する増幅率を求めることとした。手法の詳細については3.で述べる。

なお、強震記録からサイト特性を求める際に二つの考え方がある。一つは、強震記録から何らかの方法で「S波部分」を抜き出し、そのフーリエスペクトルを $O_{ij}(f)$ とする考え方である。もう一つは、S波だけでなく表面波も解析対象として、波形後半まで含めたフーリエスペクトルを計算し $O_{ij}(f)$ とする考え方である。前者の考え方で求めた $G_j(f)$ は地震基盤に対するS波の増幅特性を意味することになる。一方、後者の考え方で求めた $G_j(f)$ は表面波を含む主要動全体の地震基盤に対する増幅特性を意味することになる。既往の研究の中で岩田・入倉(1986)、Kinoshita(1994)、佐藤・巽(2002)などは前者の考え方を採用している。一方、鶴来他(1997)、野津・井合(2001)、鶴来他(2002)などは後者の考え方を採用している。本研究では、次の二点を考慮して、S波や表面波を含む波形全体を解析の対象とした。

①本研究で羽田空港のサイト特性を求める主な目的は、上述のように、シナリオ地震による地震動の予測に役立てることである。羽田空港の地震動には、前報(野津他, 2002)で検討したように表面波成分が多く含まれること

から、シナリオ地震に対する強震動予測を行う際には表面波を含む形での予測を行う必要がある。従って、S波や表面波を含む波形全体の地震基盤に対する増幅特性を求める必要がある。

②「S波部分」を対象とする場合、強震記録になんらかの時間領域でのウィンドウを作用させて「S波部分」を取り出すことになるが、ウィンドウを作用させて抽出した部分がS波に対応しているという保証は無く、ウィンドウを作用させて取り出した部分をS波と見なしているのが現実である。

スペクトルインバージョンでは、震源から放射される地震波の振幅が方位に依存することの影響を軽減するため、できるだけ多くの地点での記録を解析に含めることが望ましい。また、地震基盤に対する増幅特性を求めるため、地震基盤と見なしうような観測点で得られた記録を解析に含めることも必要である。そこで、羽田空港で得られた記録に加え、港湾地域強震観測（例えば深澤他，2002）やK-NET（Kinoshita, 1998）など、関東地方の他の地点で得られた記録を解析に用いた。解析の結果得られた羽田空港のサイト特性を関東地方の他の地点でのサイト特性と比較するとともに、羽田空港内の複数地点でのサイト特性を相互に比較した。

## 2. 解析対象記録

### 2.1 解析対象地点

本研究では、羽田空港の9地点に加え、港湾地域強震観測（例えば深澤他，2002）やK-NET（Kinoshita, 1998）など、関東地方の合計122の強震観測地点を対象とした。なお、解析の初期の段階では、これより多い強震観測地点を対象としていた。しかし、本研究では後述するように解析対象周波数を0.125Hz以上（対象周期を8秒以下）と比較的低いところに設定している。従って、特定の観測点において、周波数0.125Hz以上の範囲で解析可能な記録が1個も得られていなければ、当該観測点は解析対象とすることができない。このような観点から解析不可能な観測点は除外した。その結果残った観測点が122地点（うち9地点が羽田空港）である。

まず、羽田空港の対象地点について述べる。羽田空港では新A滑走路（No.1～No.8）、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。それらの位置を図-2に示す。このうち本研究では新A滑走路（No.1～No.8）とスカイアーチ（No.10）の合計9

地点を対象観測点とした。

新A滑走路のNo.1～No.8の各々の地点にはそれぞれ深度等の異なるボアホールA～Fが設置されている（野津他，2002）が、本研究では最も浅いボアホールFの記録を用いることとした。この記録はほぼ地表の記録と見なして差し支えない。なお、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ので、データ使用に際しては一般論としては設置方位に関する補正が必要であるが（野津他，2002）、本研究の場合、後述するように水平2成分のフーリエ振幅スペクトルのベクトル和のみを解析の対象とするので、設置方位に関する補正は特に実施しなかった。

新A滑走路の観測の詳細については前報（野津他，2002）に譲るが、地盤条件については、後の考察を行う上で重要であるからここに再掲する。まず、新A滑走路の縦断方向の地層断面図を図-3に示す。またNo.1～No.8地点のボアホールA（おのおのの観測点で一番深いボアホール）における土質柱状図を図-4(a)-(h)に示す。これらの図から、N値50以上の工学的基盤の深度は、No.1からNo.6に向かって次第に浅くなっていること、またNo.7からNo.8に向かって次第に浅くなっていることがわかる。ここで表層地盤の各層のS波速度と層厚から重複反射理論（例えば大崎，1994）により表層地盤の固有1次周期を求めると、固有1次周期は表-1に示す通りとなった。同表から、新A滑走路における表層地盤の固有1次周期は0.8秒と1.8秒の間にあることがわかる。

表-1 新A滑走路の表層地盤の固有1次周期  $T_0$

観測点	$T_0$ (s)
No.1	1.8
No.2	1.6
No.3	1.4
No.4	1.4
No.5	1.3
No.6	0.8
No.7	1.5
No.8	1.0

スカイアーチでは図-5に示すようにアーチ頂部、アーチ基部、橋台東、主桁中央、橋台西および地盤において観測を行っている。これらの観測点は、配線の都合上、



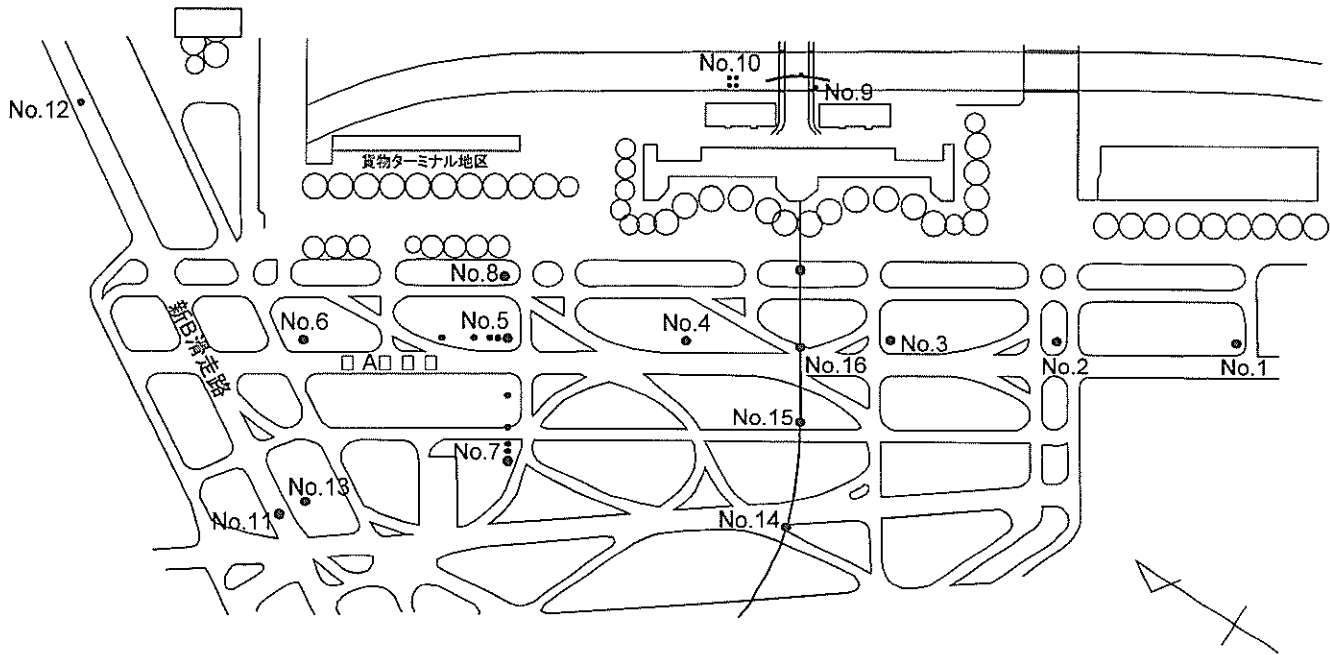


図-2 羽田空港地震観測平面図

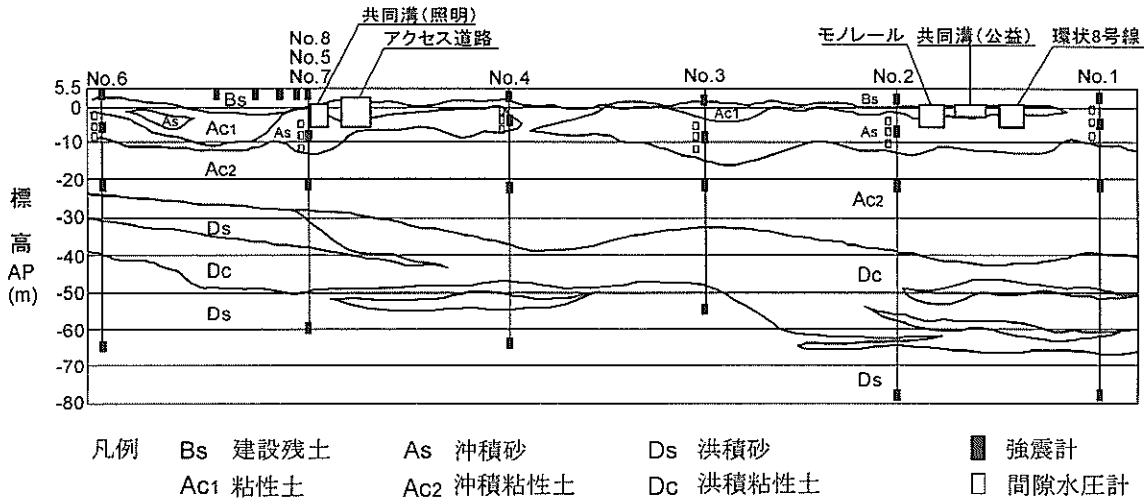


図-3 新A滑走路の縦断方向の地層断面図

No.9 (橋台東, 主桁中央, 橋台西) と No.10 (アーチ頂部, アーチ基部, 地盤) の二つのブロックに分かれている。このうち No.10 の地盤における観測は図-5に示すように AP-2.0m, AP-12.0m, AP-28.1m および AP-60.9m の4つの深度において実施されている。本研究では、このうち、AP-2.0m における記録を解析に使用した。この記録もほぼ地表の記録と見なして差し支えない記録である。設置方位に関する補正を特に実施せずに用いた点は新A滑走路における記録の場合と同様である。

羽田空港以外では、港湾地域強震観測 (例えば深澤他, 2002) や K-NET (Kinoshita, 1998) など、関東地方の合計 113 の強震観測地点を対象とした。これらの地点を図

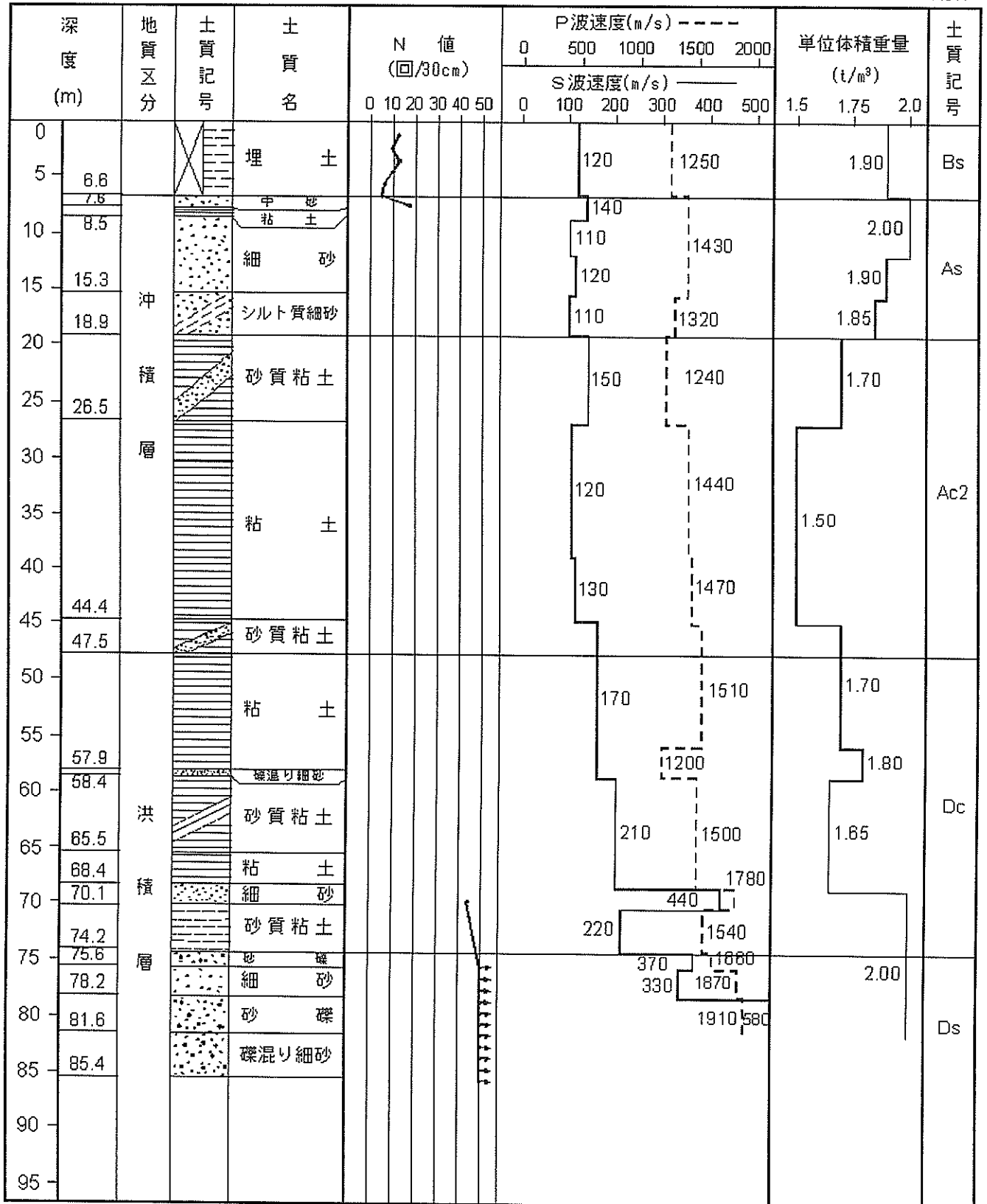
-6に示す。

## 2.2 解析対象地震

解析対象地震は次のように選定した。まず、羽田空港の新A滑走路で記録の取得されている地震の中で、

- ① 気象庁マグニチュード 4.5 以上
- ② 羽田空港での最大加速度が 10Gal 以上
- ③ 羽田空港からの震央距離が 150km 以下

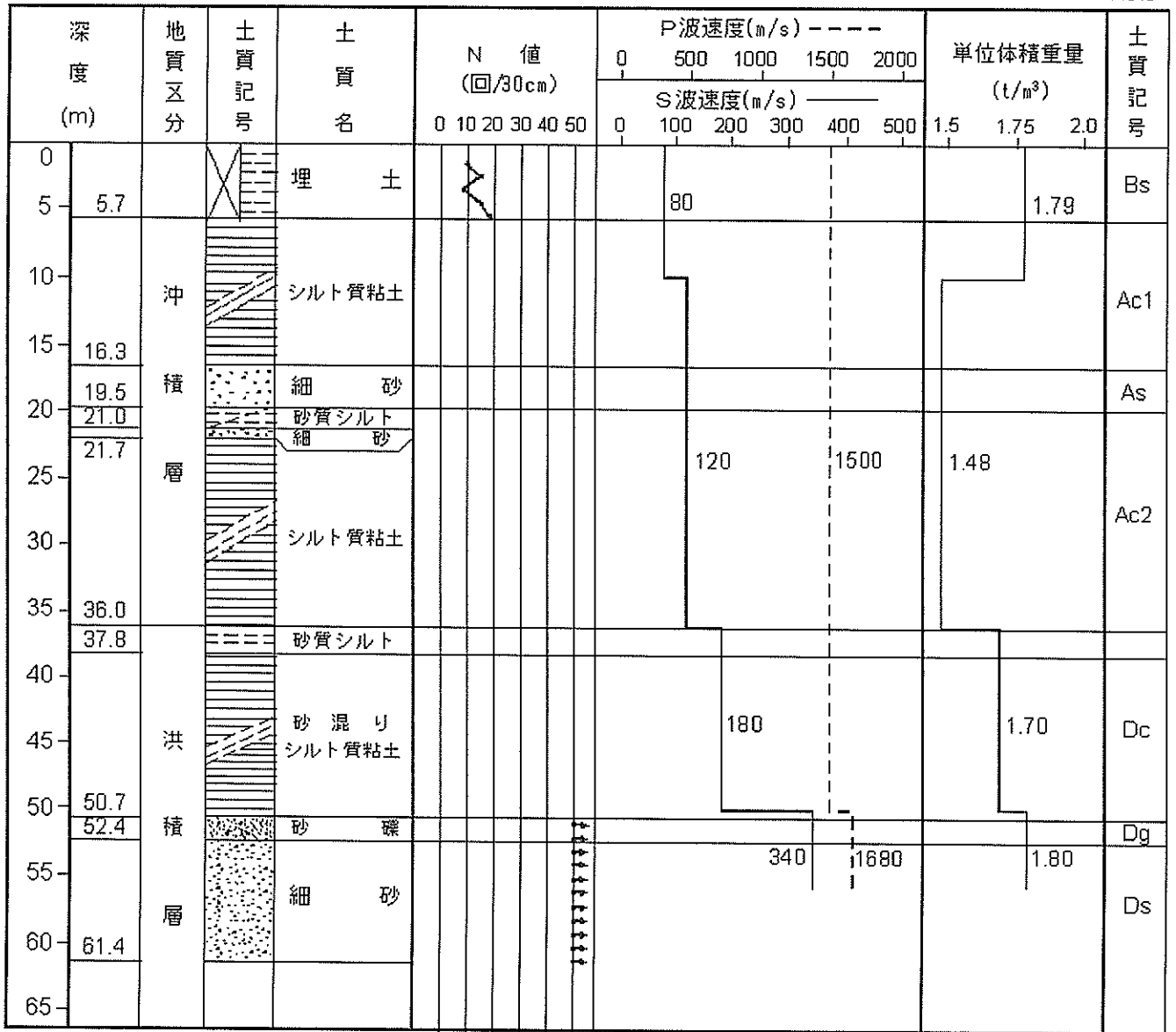
の三つの条件を満足する地震を選択した。①②の条件は、羽田空港において SN 比の良好な記録の得られている地震を優先的に用いる目的で設定した条件である。当然ではあるが、振幅の小さな記録は SN 比が小さいので、振



地盤高 A.P. +7.1m  
孔内水位 G.L. -5.4m

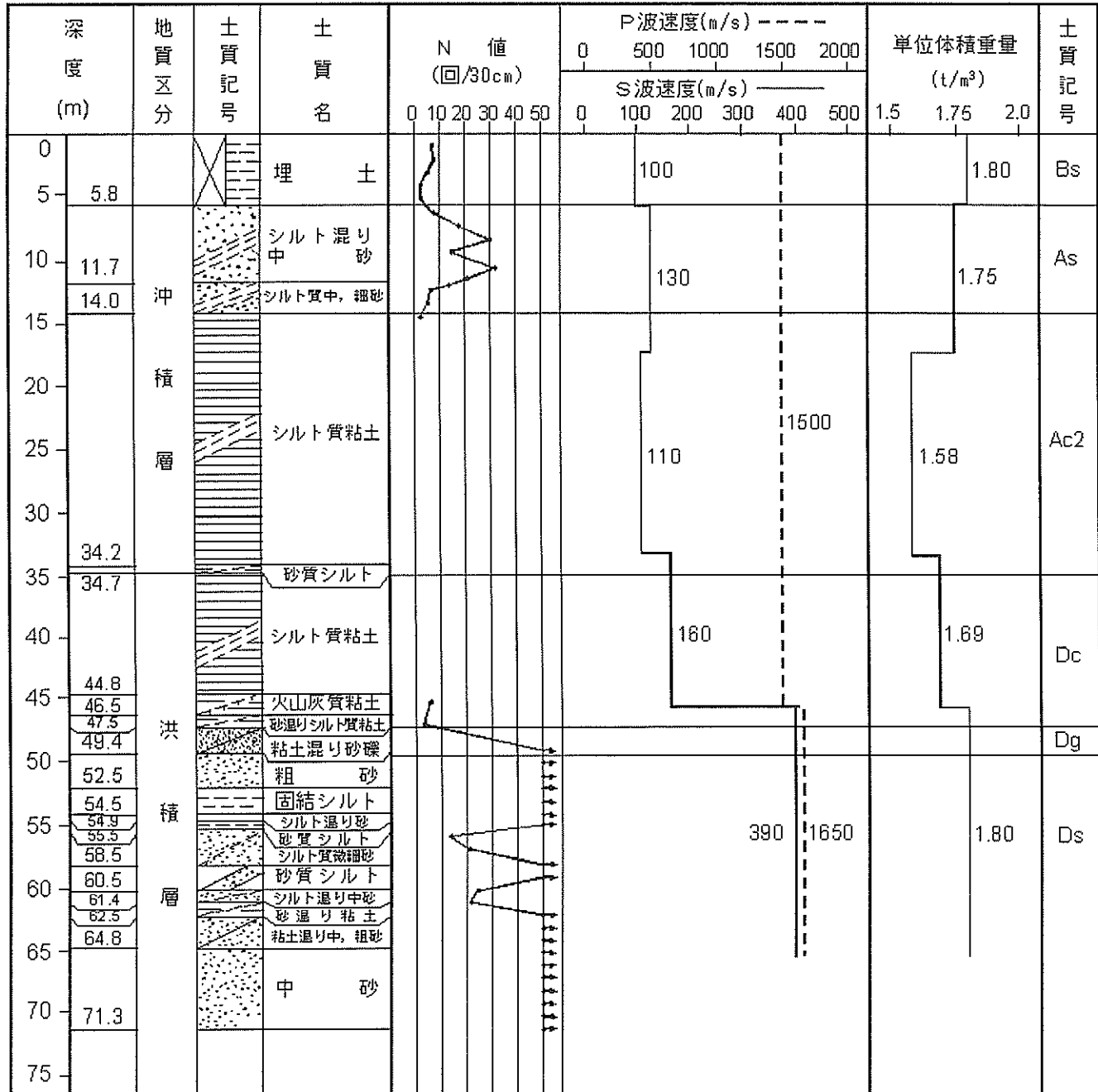
図-4(a) No.1 地点のボアホール A における土質柱状図





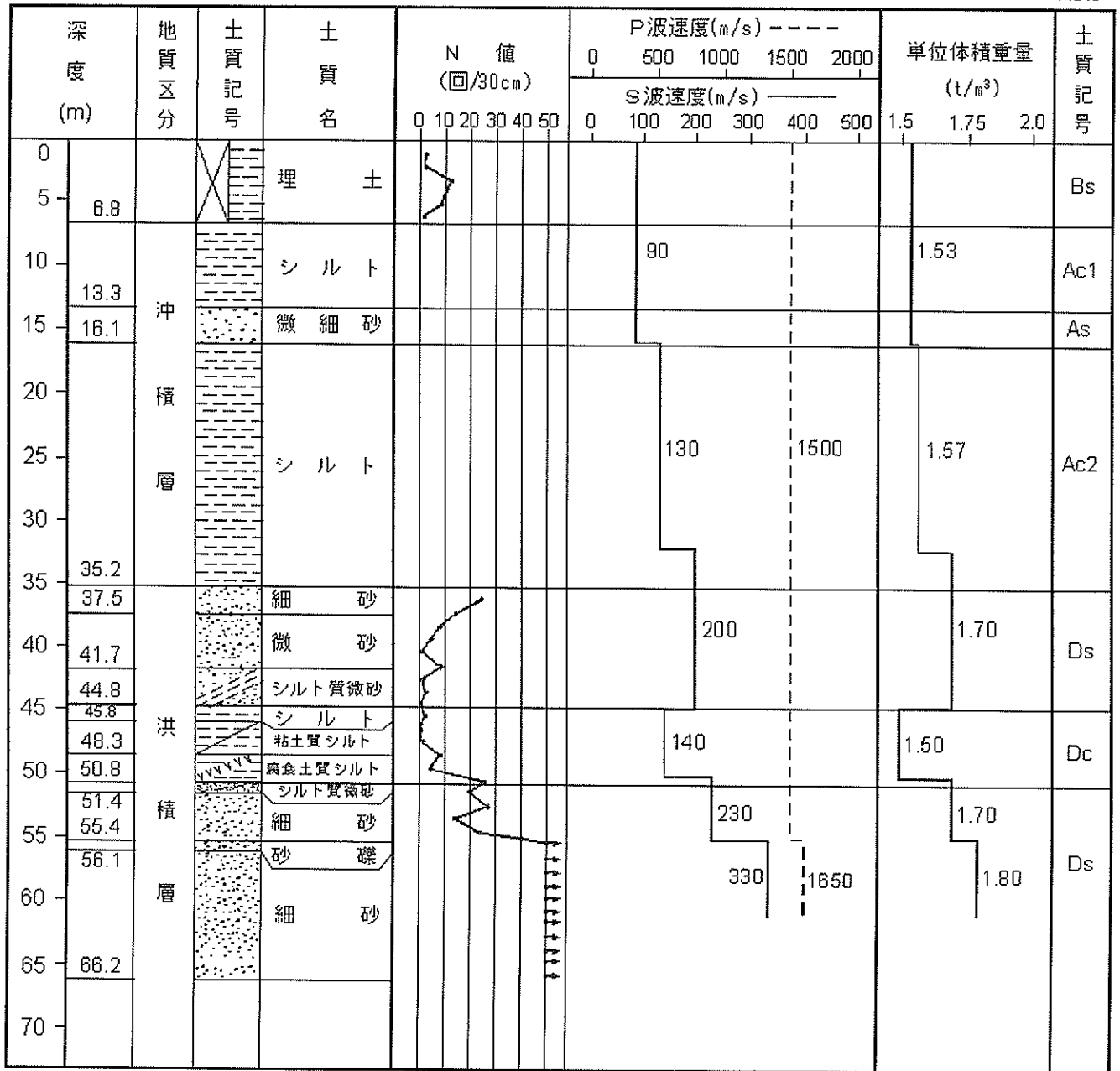
地盤高 A.P. +4.6m  
 孔内水位 G.L. -2.3m

図-4(c) No.3 地点のボアホール A における土質柱状図



地盤高 A.P. +4.5m  
 孔内水位 G.L. -5.8m

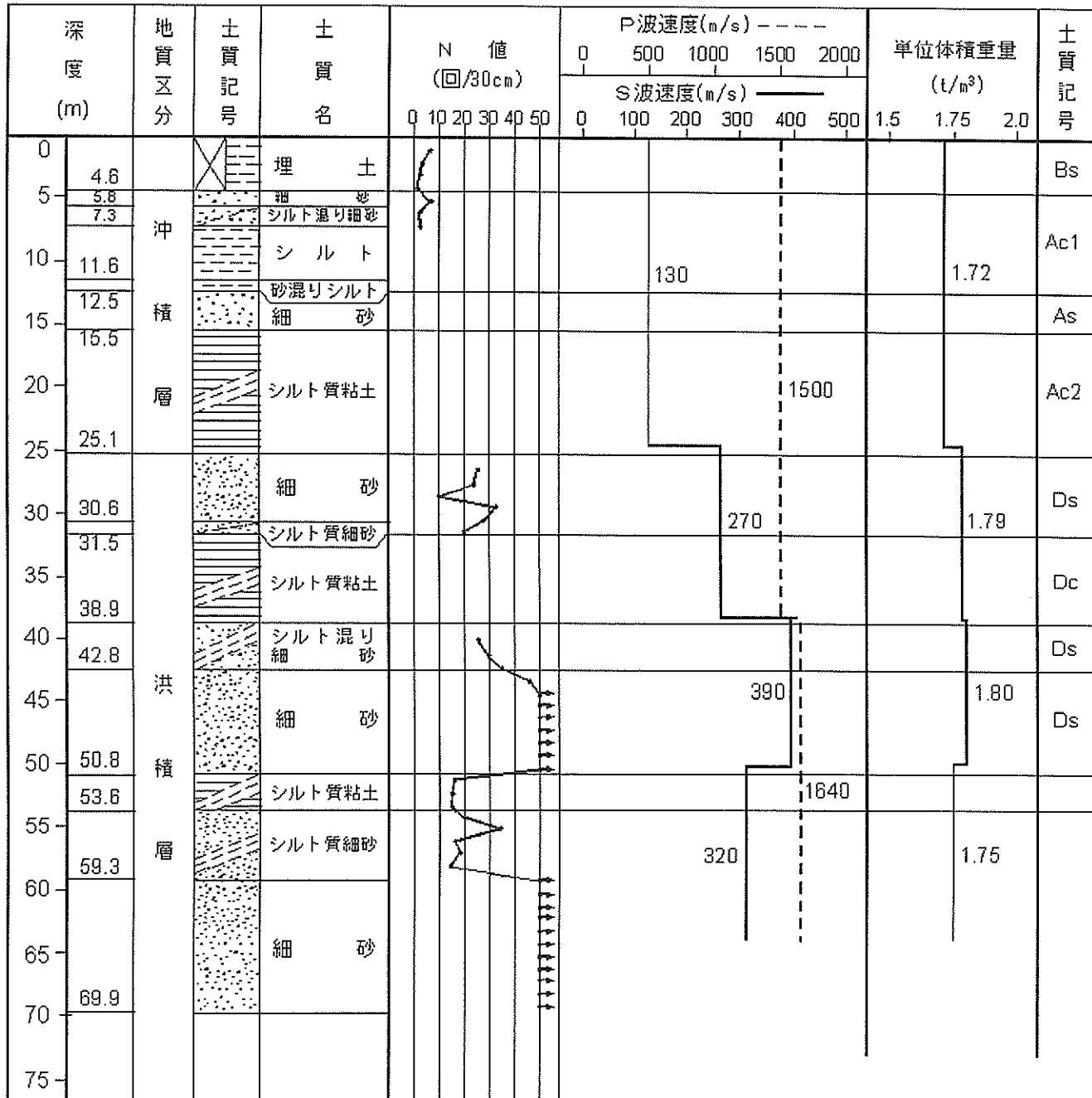
図-4(d) No.4 地点のボアホール A における土質柱状図



地盤高 A.P. +4.7m  
 孔内水位 G.L. -1.9m

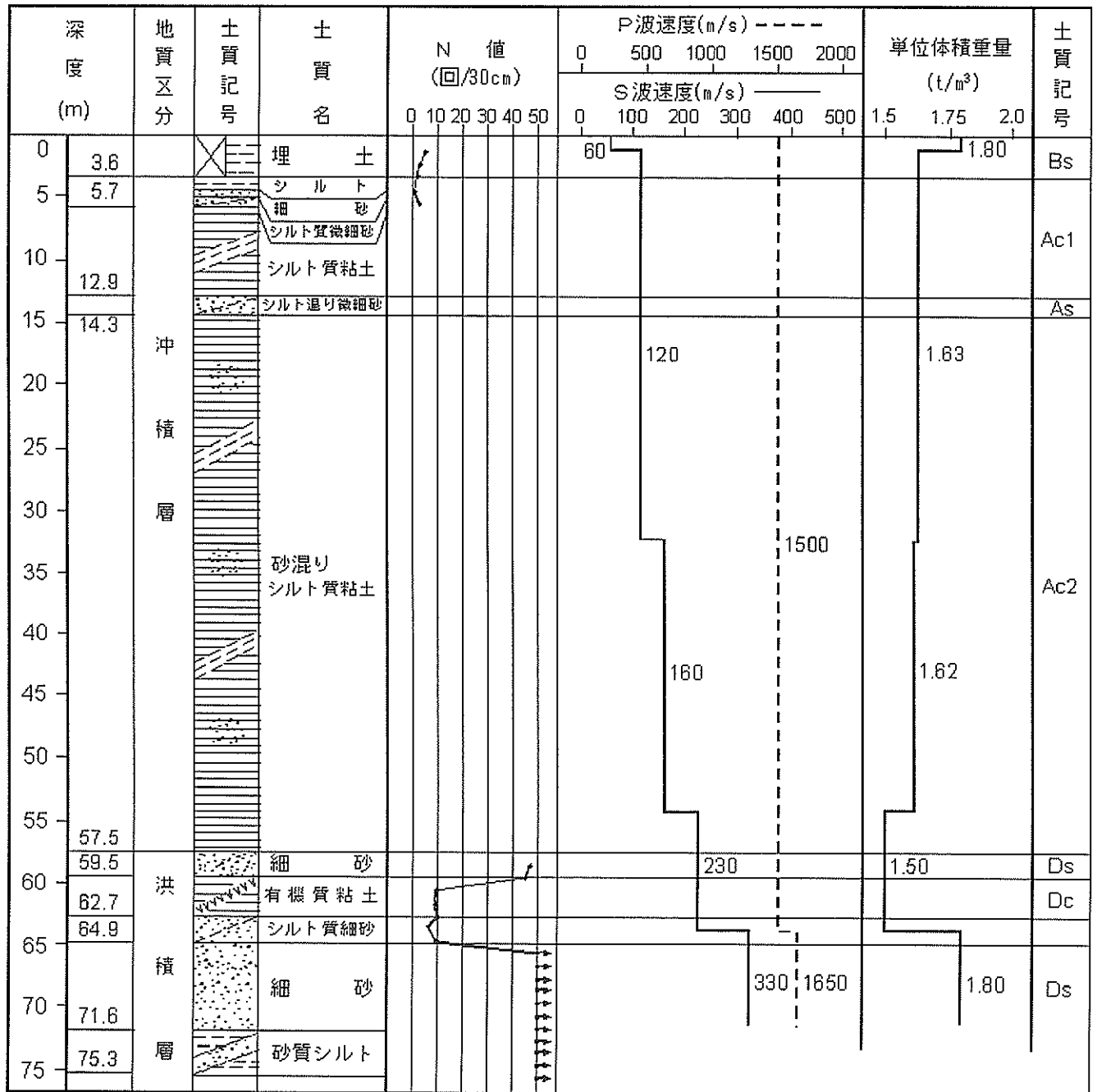
図-4(e) No.5 地点のボアホール A における土質柱状図

No.6



地盤高 A.P. +5.5m  
 孔内水位 G.L. -2.6m

図-4(f) No.6 地点のボアホール A における土質柱状図

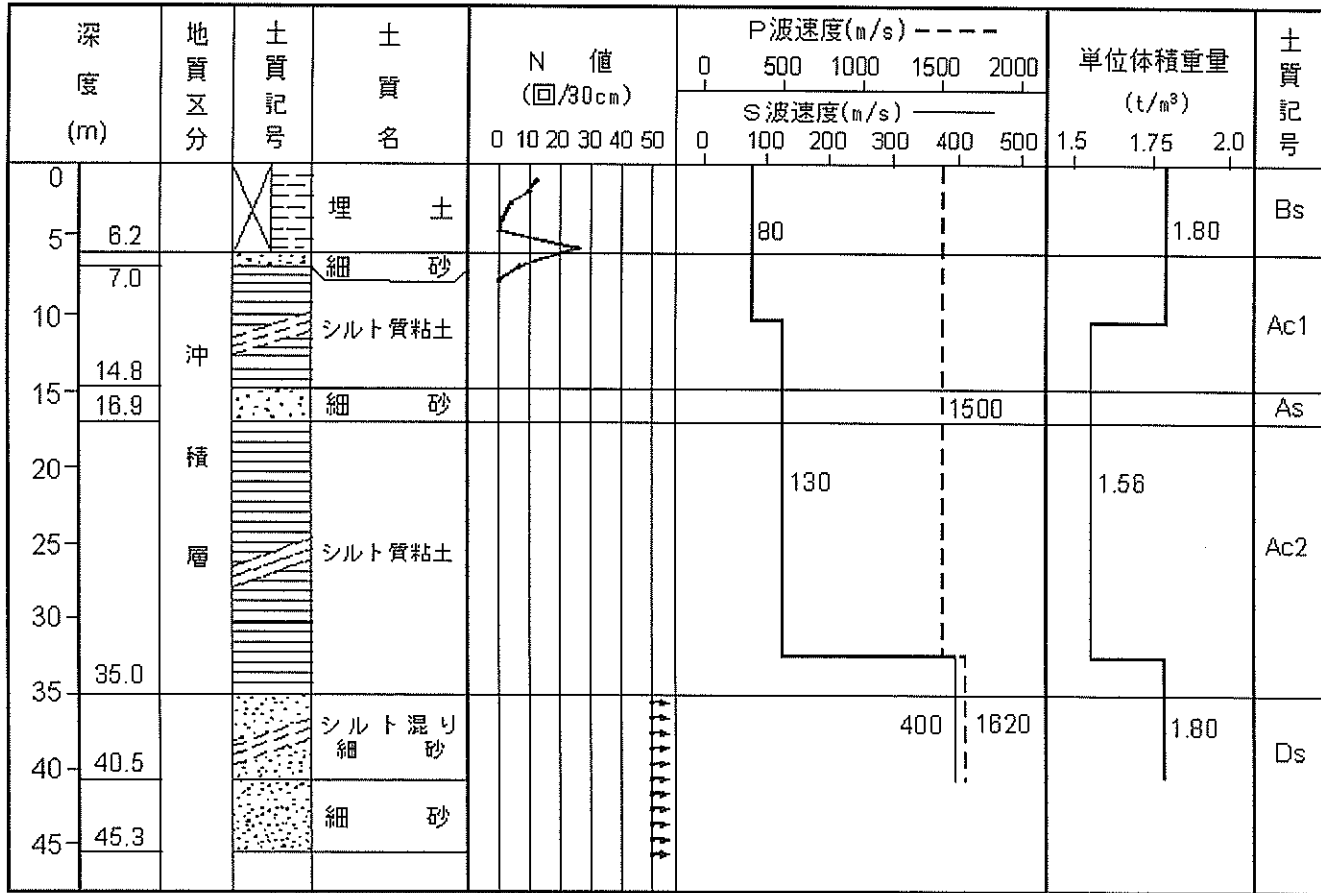


地盤高 A.P. +3.6m  
 孔内水位 G.L. -8.2m

図-4(g) No.7 地点のボアホール A における土質柱状図

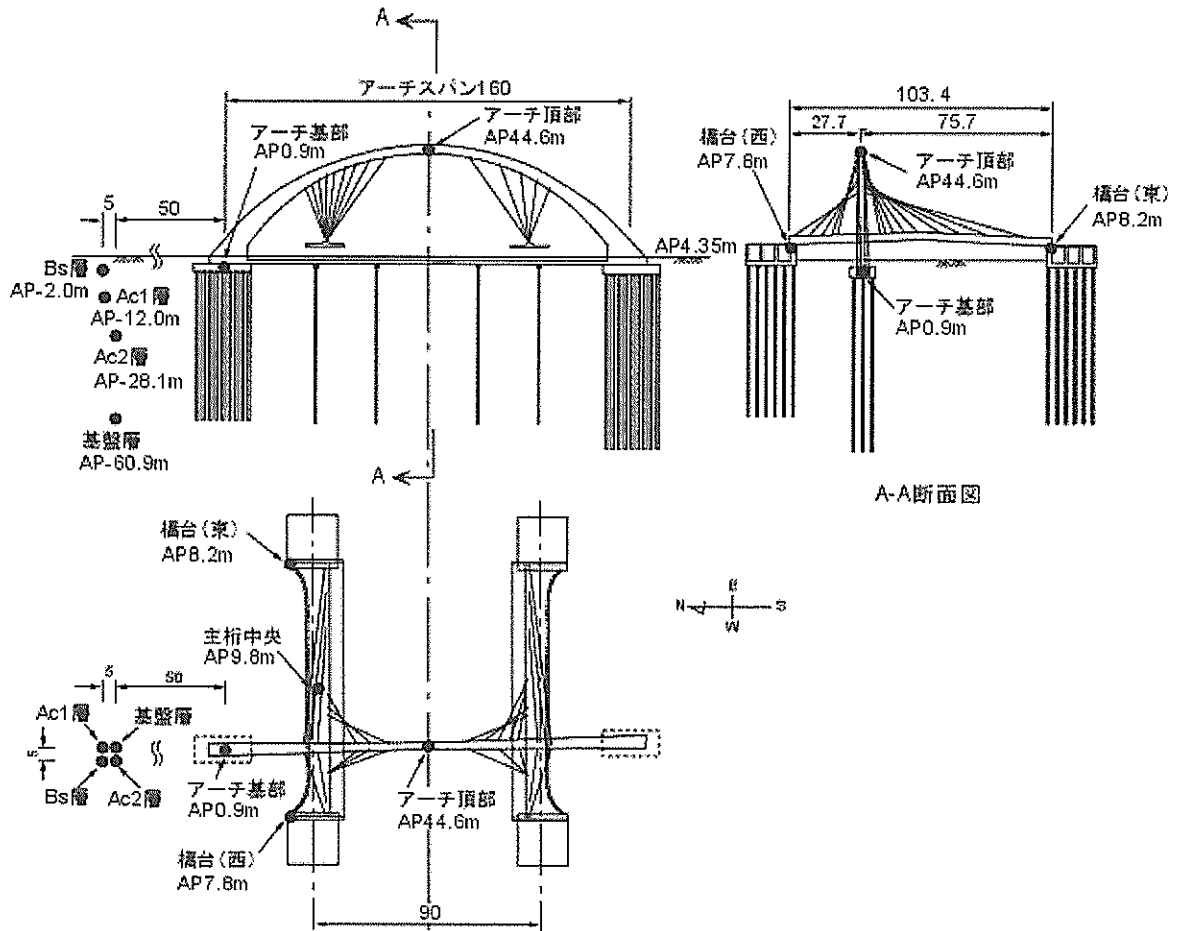


No.8



地盤高 A.P. +5.1m  
孔内水位 G.L. -4.2m

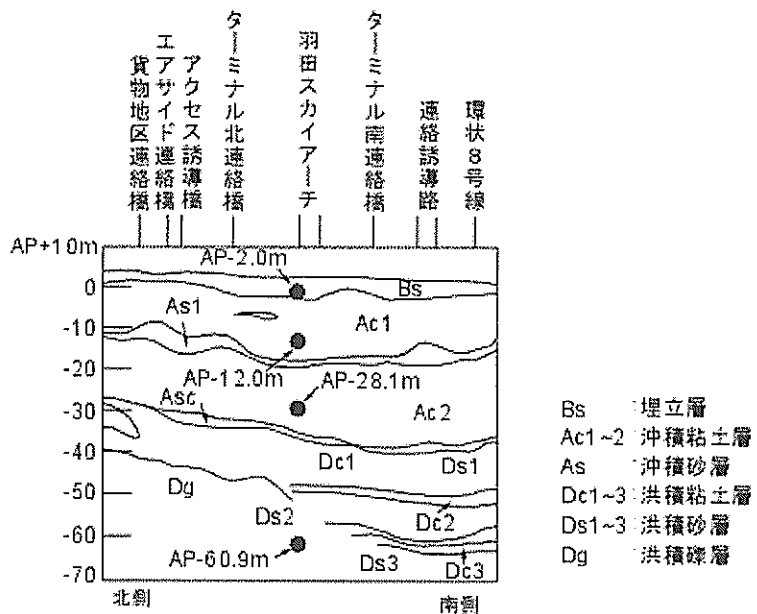
図-4(h) No.8 地点のボアホール A における土質柱状図



A-A断面図

単位：m

羽田スカイアーチと地震計の設置箇所



地層断面図と地震計設置深度

図-5 スカイアーチでの地震観測

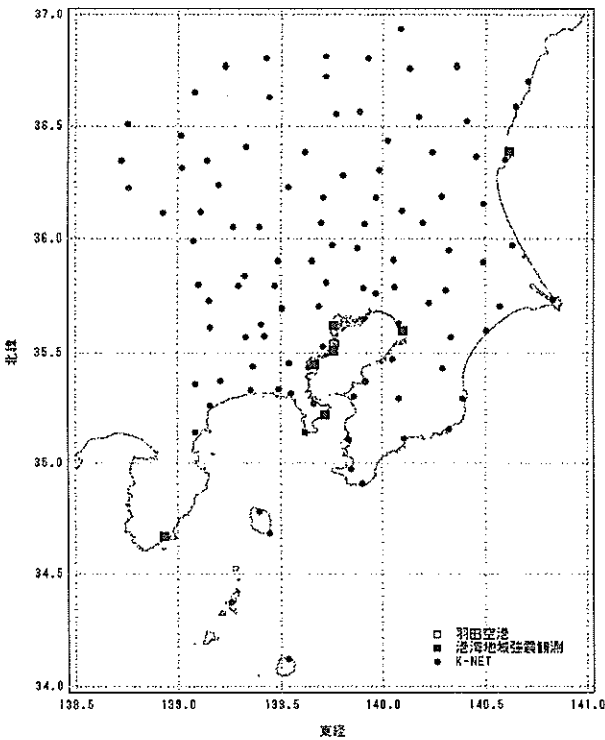


図-6 解析対象地点

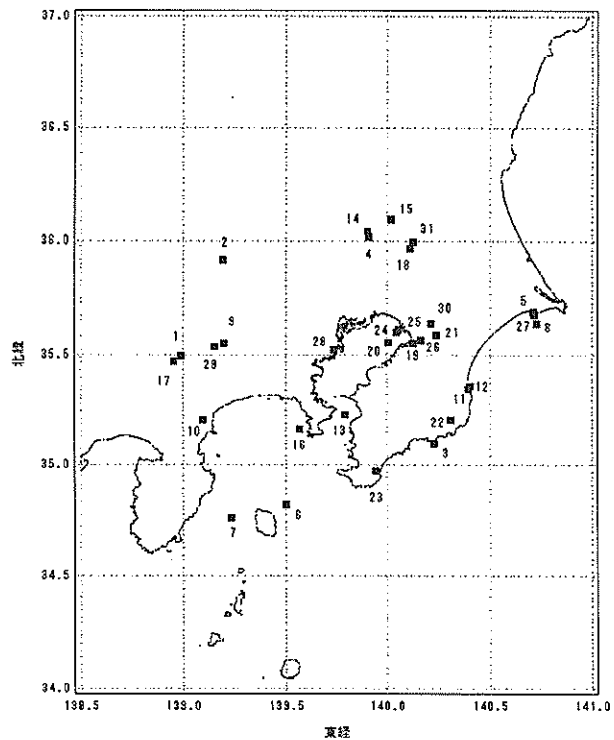


図-7 解析対象地震の震央

幅の大きな記録を用いる。また、今回の解析では後述するように解析対象周波数を比較的低いところに設定している。従って、強震記録の特に低周波側での精度が重要である。このことを考慮して、マグニチュードの比較的大きな記録を選択して用いることとした。このようにして選択された地震の数は40であった。次に、本研究では後述するように解析対象周波数を0.125Hz以上(対象周期を8秒以下)と比較的低いところに設定している。従って、特定の地震について、周波数0.125Hz以上の範囲で解析可能な記録がどの観測点でも得られていなければ、当該地震は解析対象とすることができない。このような観測点から解析不可能な地震を除外したところ、31の地震が残った。これらの地震の震央を図-7に示す。対象地震の震央は、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。また対象地震の震源深さを東西断面にプロットしたものが図-8である。東経139.5度付近を境に、西側では浅い地震が、東側では深い地震がそれぞれ多いことがわかる。

### 2.3 解析対象記録

解析対象記録は122の観測点で得られた31の地震による記録である。解析対象記録の一覧を付録に示す。数字は最大加速度(水平2成分の大きい方、単位Gal)を示す。空欄は、記録がないか、または記録の精度の

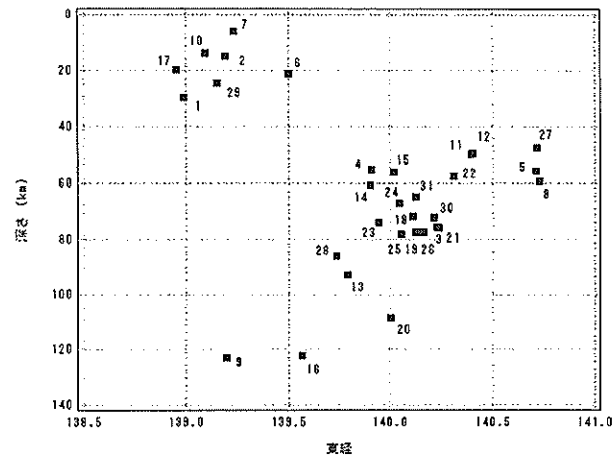


図-8 解析対象地震の震源深さ(東西断面)

関係で解析対象としなかったことを示す。後に3.で詳しく述べるが、本研究で、地震波の減衰の取り扱い、 $r^{-1}$ に比例する実体的な幾何減衰を仮定している( $r$ は震源距離)。ところが、遠方の観測点では、地殻内を反射しながら伝播するLg波等の影響で、実体的な幾何減衰はあてはまらなくなる(例えばStreet et al., 1975)。このことを避けるため、遠方で発生した地震は除外することとした。そこで、付録の記録から震源距離が200kmを越える記録を削除し、最終的には1384の記録(2768成分)を解析の対象とした。

### 3. 解析手法

#### 3.1 フーリエスペクトルの算出

まず、すべての解析対象記録についてフーリエスペクトルを FFT により算出した。このとき、あらかじめ、必要に応じてリサンプリングを行い、サンプリング周波数を 100Hz に統一して解析を進めた。また、すべての記録に対し、データの末尾に 0 を加え、データ長を 32768 データに統一してから FFT を実行した。先に述べたように、本研究では S 波や表面波を含む波形全体を解析の対象とするので、特に S 波部分だけを抜き出すということはない。水平 2 成分のフーリエスペクトルを計算し、そのベクトル和を求めた。

次に、各々の記録について、低周波側での信頼限界を検討した。この検討は次のように行った。まず、両対数軸上にフーリエスペクトルをプロットする。例えば図-9 (a) は港湾地域強震観測の観測点 (常陸那珂-F) で得られた 1989/2/19 の記録のフーリエスペクトル (水平 2 成分のベクトル和) である。この図のように、低周波側に  $f^{-2}$  に比例する直線区間が認められる場合には、その区間の下端を低周波側での信頼限界  $f_{min}$  とした (この場合  $f_{min}=0.125\text{Hz}$ )。しかしながら、図-9 (b) に示すように、両対数軸上にプロットしたフーリエスペクトルの低周波側に  $f^{-2}$  に比例する直線区間が認められない場合もある (常陸那珂-F で得られた 1990/6/5 の記録の例)。この場合、フーリエスペクトルの傾きが  $f^{-2}$  より小さい部分と、それより大きい部分との境を低周波側での信頼限界  $f_{min}$  とした (この場合  $f_{min}=0.3\text{Hz}$ )。

次に、フーリエスペクトルに Parzen ウィンドウ (例えば大崎, 1994) を作用させた。まず、適切なバンド幅を定めるために試行錯誤を行った。図-10 (a) ~ (c) は、羽田空港新 A 滑走路 No.1 地点において得られた 1990/2/20 の記録のフーリエスペクトルに様々なバンド幅の Parzen ウィンドウを作用させた状況を示す (バックグラウンドに薄く示されているのがもとのスペクトル)。バンド幅が 0.02Hz の場合、高周波側でスペクトルの山谷が十分に緩和されない (a)。しかし、バンド幅を 0.1Hz とすると、低周波側でスペクトルの形状にゆがみが生じる (c)。総合的に判断するとバンド幅として 0.05Hz が適切であるように思えたので (b)、1384 の記録すべてに対してバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを作用させることとした。

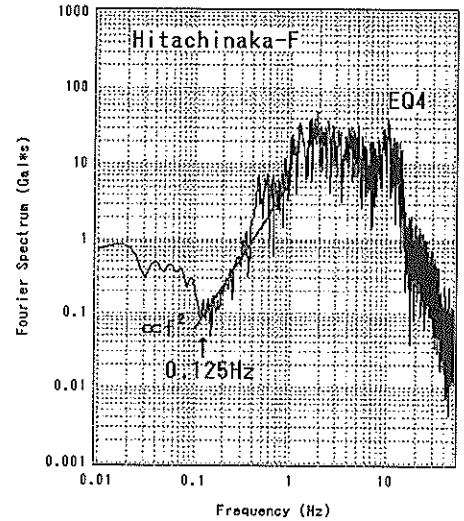


図-9 (a) 低周波側での信頼限界の読みとり (1)

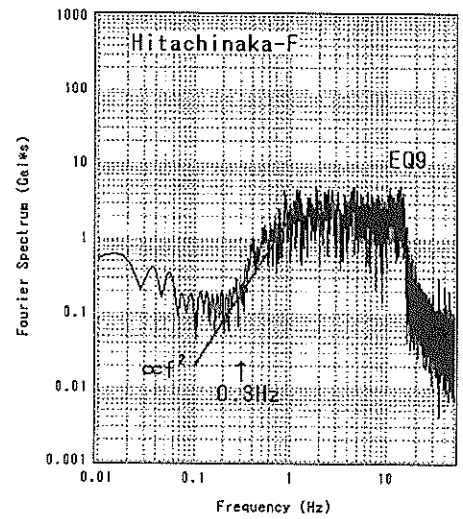


図-9 (b) 低周波側での信頼限界の読みとり (2)

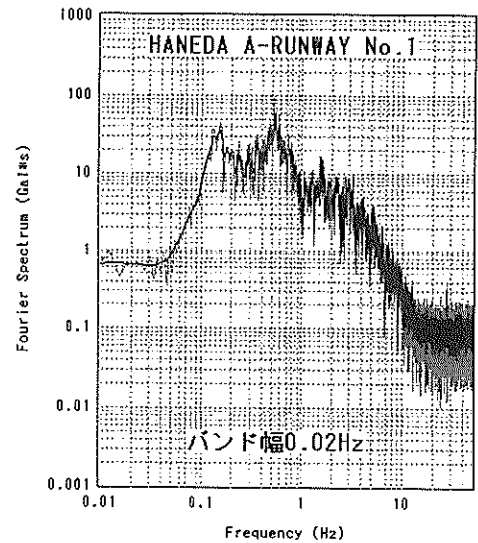


図-10 (a) Parzen ウィンドウ - バンド幅 0.02Hz の例

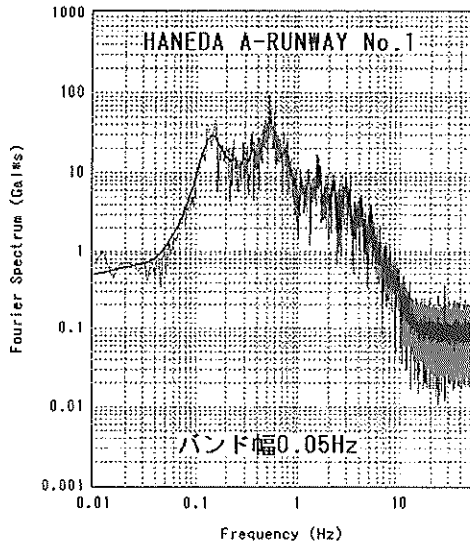


図-10 (b) Parzen ウィンドウ - バンド幅 0.05Hz の例

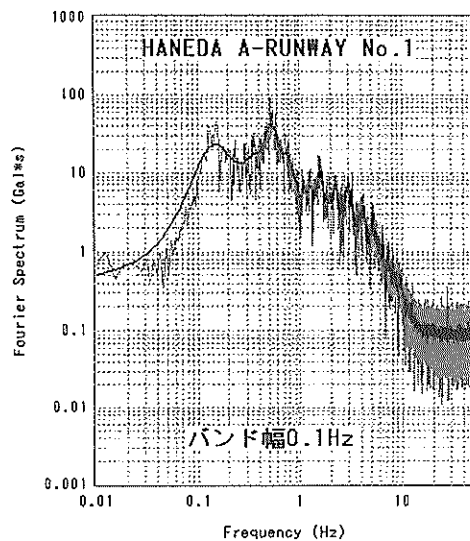


図-10 (c) Parzen ウィンドウ - バンド幅 0.1Hz の例

### 3.2 スペクトルインバージョン

スペクトルインバージョンは基本的には岩田・入倉 (1986) の方法に基づいて実施する。ただし、サイト特性の基準については、あらかじめ選定した岩盤観測点(基準観測点という)において、すべての周波数に対してサイト特性は1であるとした。

スペクトルインバージョンの定式化は次の通りである(岩田・入倉, 1986)。式(1)において、伝播経路特性  $P_{ij}(f)$  は次の形に書けると仮定する。

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{r_{ij}} \exp\left(-\frac{\pi f r_{ij}}{Q_s(f) \beta}\right) \quad (2)$$

ここに  $r_{ij}$  は震源距離、 $Q_s(f)$  は地震基盤の  $Q$  値 ( $\equiv 1/2h$ )、 $\beta$  は地震基盤の  $S$  波速度である。式(2)は、震源から

球面状に広がる実体波の幾何減衰 ( $1/r$ ) と、非弾性減衰を仮定したものである。基盤の  $S$  波速度  $\beta$  は佐藤・巽 (2002) を参考に  $3.6\text{km/s}$  とした。地震波が表面波として(円筒状に)広がる場合には、幾何減衰の項は  $r^{-1/2}$  となるはずである。実際の地震波には実体波と表面波がともに含まれるはずであるが、このうち表面波が優勢な場合には、式(2)は幾何減衰を過大評価することになり、結果的に非弾性減衰を過小評価することになるはずである。このことについては、後に解析結果について検討する中であらためて考える。

式(2)を式(1)に代入すると次式を得る。

$$O_{ij}(f) = S_i(f) \cdot \frac{1}{r_{ij}} \exp\left(-\frac{\pi f r_{ij}}{Q_s(f) \beta}\right) \cdot G_j(f) \quad (3)$$

ここで  $O_{ij}(f)$  は3.1で求めた Parzen ウィンドウ通過後のフーリエスペクトルであるとする。ここで次式により距離の補正を行う。

$$\bar{O}_{ij}(f) = \left(r_{ij} / r_{ref}\right) O_{ij}(f) \quad (4)$$

ここに  $r_{ref}$  は基準となる距離(ここでは  $1\text{km}$  とした)である。式(4)を式(3)に代入し、両辺の常用対数を取ると次式を得る。

$$\log \bar{O}_{ij} = -\log r_{ref} + \log S_i + \log G_j - (\log e) \pi f r_{ij} / Q_s \beta \quad (5)$$

この式では、簡単のため、周波数への依存を示す  $f$  を省略した。

本研究では、式(5)に含まれる変数のうち、 $S_i(f)$ 、 $G_j(f)$  および  $Q_s(f)$  を未知数と考える場合と、 $S_i(f)$  と  $G_j(f)$  のみを未知数と見え  $Q_s(f)$  としては既往の値を与える場合の二通りの解析を実施した。前者の場合未知数の数は  $31+122+1=154$  であり、後者の場合未知数の数は  $31+122=153$  である。いずれにせよ、未知数の数は成立する式の数(使用可能な記録の数)よりも少ないので、最小自乗法により式(5)の残差を最小とするような未知数の組み合わせを周波数  $f$  毎に求めることができる。各記録について低周波側の信頼限界  $f_{min}$  をすでに求めているので、各  $f$  に対して、 $f_{min} \leq f$  を満足するような記録だけを用いた。従って、式(5)の本数は周波数毎に異なる。以上がスペクトルインバージョンの基本的な考え方である。

ただし、式(5)だけでは、解は一つには定まらない。なぜなら、震源特性  $S_i$  とサイト特性  $G_j$  の間にトレードオフの関係が成立してしまうからである。例えば、ある  $S_i$

と  $G_j$  の組み合わせ解であるとする、 $S/2$  と  $2G_j$  の組み合わせも解となってしまふ。このことを避けるための一つの方法は、あらかじめ選定した岩盤観測点（基準観測点という）において、すべての周波数に対してサイト特性は1であるとするのである。すなわち

$$\log G_{j0}(f) = 0 \quad (6)$$

ここに  $j0$  は基準観測点の観測点番号である。

### 3.3 解析条件

本研究では、解析対象周波数を 0.125Hz ~ 16Hz（対象周期を 0.0625 秒 ~ 8 秒）とした。解析区間の下端は、この種の解析としては比較的低位に設定している。これは、関東平野において周期 8 秒程度の Love 波が卓越しやすい傾向があることが以前から知られているため（例えば座間, 1993）、周期 8 秒を解析区間を含めたいと考えたためである。

本研究では、式 (5) に含まれる変数のうち、 $S_j(f)$ 、 $G_j(f)$  および  $Q_s(f)$  を未知数と考える場合と、 $S_j(f)$  と  $G_j(f)$  のみを未知数と考慮し  $Q_s(f)$  としては既往の値を与える場合の二通りの解析を実施した。後者の場合、Kinoshita (1994) が求めた  $Q$  値を用いることとした。Kinoshita (1994) は関東地方の深井戸等で得られた記録の S 波部分にスペクトルインバージョンを適用して関東地方の地殻における  $Q$  値を 0.5-16Hz の範囲で求めた。その結果、 $1/Q$  は 0.8Hz 付近に極大値を有する（つまり  $Q$  は 0.8Hz 付近に極小値を有する）との結果を得た。Kinoshita (1994) の得た結果を図-11に実線で示す。本研究では Kinoshita (1994) の結果を低周波側に外挿して用いることとした（図-11の破線部分）。それは、この外挿が正当であると考えたからと言うよりは、 $Q$  値の設定が、本研究の主眼であるサイト特性にあまり影響を及ぼさないことを確認するためである。

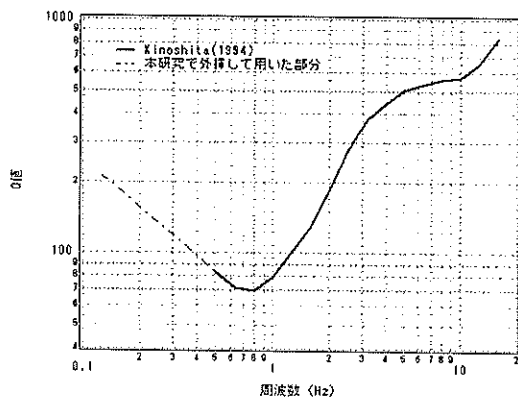


図-11 Kinoshita (1994) の得た  $Q$  値

本研究では、次のことを考慮して K-NET の TKY002（松原）を基準観測点とした。

- ① 予備的な解析を行った結果、TKY002 を基準観測点とすると、他のどの観測点においても、サイト特性は、堆積層内の減衰の影響を受ける高周波数側を除けば、ほぼ1を下回らない結果となった。これは理論的に予想される結果と整合する。
- ② K-NET の土質図を参照したところ表層まで岩盤となっている。
- ③ 岩盤観測点と見なすことのできる観測点の中では羽田空港に比較的近い。

## 4. 解析結果

### 4.1 伝播経路特性

解析の結果得られた震源特性、伝播経路特性、サイト特性について順次説明する。まず、説明の都合上、伝播経路特性について説明する。

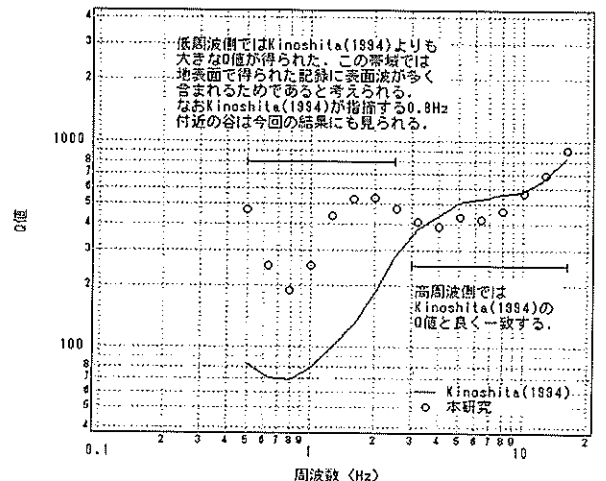


図-12 本研究の  $Q$  値と Kinoshita (1994) の  $Q$  値の比較

本研究で  $Q$  値を未知数とした場合に得られる  $Q$  値を Kinoshita (1994) の  $Q$  値と比較して図-12に示す。同図に示すように、およそ 3Hz よりも高周波側では、本研究で得た  $Q$  値は Kinoshita (1994) の  $Q$  値と良く一致する結果となった。しかし、3Hz よりも低周波側では Kinoshita (1994) よりも大きな  $Q$  値が得られた。さらに、0.5Hz よりも低周波側では、最小自乗法の解としては負の  $Q$  値が得られた。これらの点については次のように解釈できる。本研究では S 波や表面波を含む記録全体を解析の対象としている。その結果、表面波の影響が強いような周波数帯域では、式 (2) の実体的な幾何減衰は実際

よりも過大評価となっており、それを埋め合わせる形で、実際よりも大きな正の  $Q$  値や、場合によっては負の  $Q$  値が求まるものと推察される。3Hz よりも高周波側で本研究の  $Q$  値と Kinoshita(1994)の  $Q$  値が良く一致するのは、この周波数帯域において表面波の影響が相対的に小さいからであろう。

なお、本研究で  $Q$  値を未知数とした場合に得られる  $Q$  値は 0.8Hz 付近に極小値を有している。この点で、本研究の結果は Kinoshita(1994)の得た結果と整合しており興味深い。

#### 4.2 震源特性

次に、本研究で得られたすべての地震の震源スペクトル  $S_s(f)$  を重ね書きしたものが図-13である。この場合、 $Q$  値を未知数とした場合の解析結果を示している。

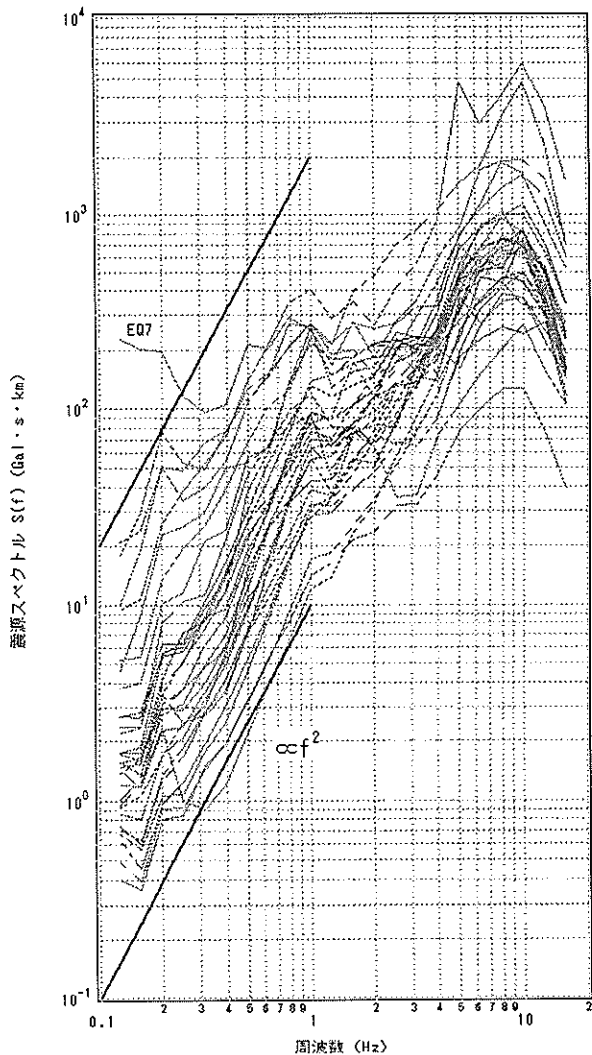


図-13 震源スペクトル

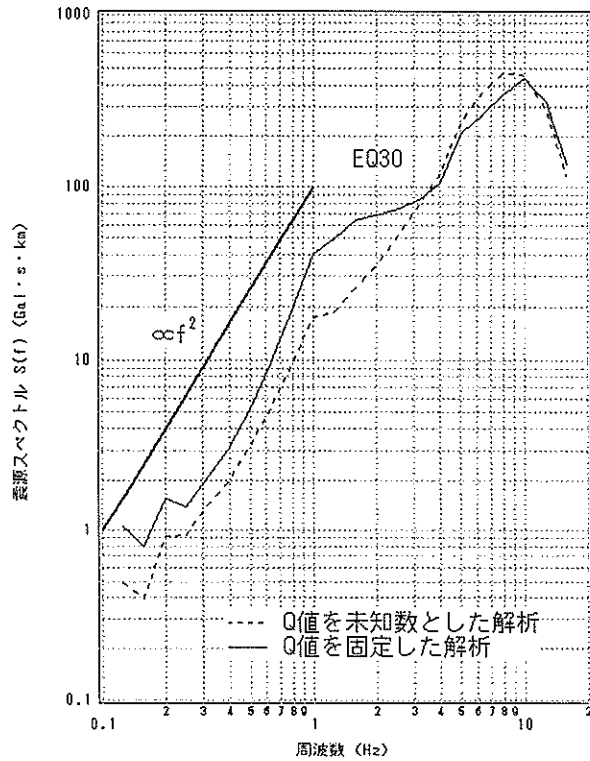


図-14  $Q$  値の固定が震源スペクトルに及ぼす影響

1Hz よりも低周波側では震源スペクトルは概ね  $f^{-2}$  に比例する傾向がある。これは理論的に予想される傾向であるから、好ましい結果であると言える。

ただし、図中に EQ7 と表示してある地震 (1990/2/20 の地震) は、低周波側において、推定された震源スペクトルは特異な形状を示している。この推定結果は非現実的であり、震源スペクトルは周波数 0.125Hz 付近で著しく過大評価されていると考えざるを得ない。この原因は、震源特性とサイト特性とのトレードオフにより説明できるかも知れない。つまり、この地震は、伊豆半島東方沖で発生した浅い地震であり、解析対象地震の中で最も浅い地震である (図-7および図-8で数字7が振ってある地震)。こうした浅い地震の場合、サイト特性が他の地震と比較して異なる挙動を示すことは十分に考えられる。例えば、盆地端部への入射角が浅いために、盆地生成表面波 (例えば川瀬, 1993) を効率よく発生させるといった可能性も考えられる。ところが、本研究ではサイト特性についてやや簡略化した取り扱いをしており、震源の方位に依存しないとしている。つまり、同一の観測点では、サイト特性は地震によらず一定であるとしている。その結果、本来サイト特性であるべきものが震源特性に押しつけられている可能性がある。このことは、以下に示すサイト特性を解釈する上でも注意すべき点であると考えられる。

図-14は  $Q$  値を未知数とする場合と Kinoshita(1994)の値に固定する場合の震源スペクトルの比較である(2002/5/19の地震)。この場合、Kinoshita(1994)の値を用いる方が、3Hz以下の周波数帯域において小さな  $Q$  値を用いることになるので、この帯域で震源スペクトルは大きく評価されることになる。

### 4.3 サイト特性

最後に、本研究の主眼であるサイト特性について述べる。以下においては、まず、 $Q$  値を未知数とした場合の解析結果について述べる。 $Q$  値の取り扱い(未知数とする場合と既知とする場合)によるサイト特性への影響は、後述するようにあまり大きくなかった。

まず、羽田空港のサイト特性を他のすべての観測点と比較して図-15に示す。図-15では、バックグラウンドに羽田空港以外の観測点のサイト特性を示しており、その上に羽田空港のサイト特性を示しているが、羽田空港では、周波数 0.3-1.0Hz の範囲でサイト特性が 10 を上回る地点もあり、この値は関東地方の他のどの観測地点と比較しても大きいものである。スカイアーチ (No.10 地点) の結果は、解析対象記録がさほど多くないこともあり、長周期側の精度が十分でないと判断されるので、図示していない。高周波側を除けば、ほぼすべての観測点でサイト特性は 1 以上となっており、TKY002 (検原) を基準観測点とする選択は妥当であったと考えられる。

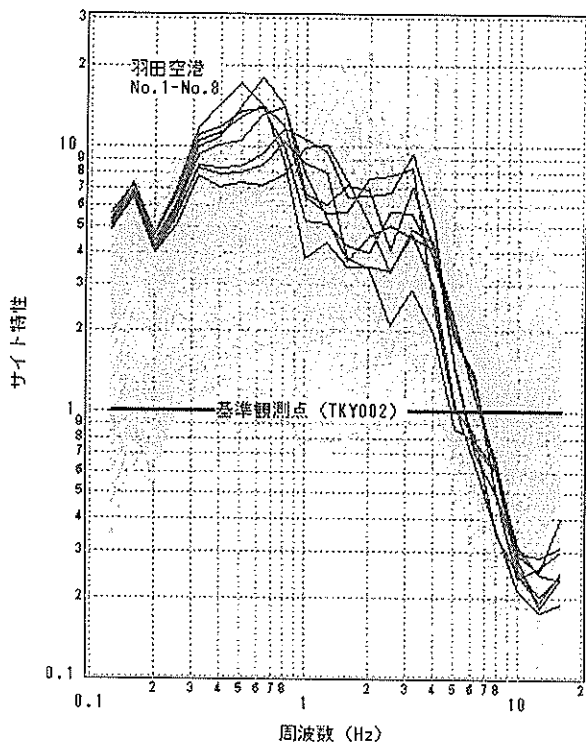


図-15 羽田空港と他の地点のサイト特性の比較

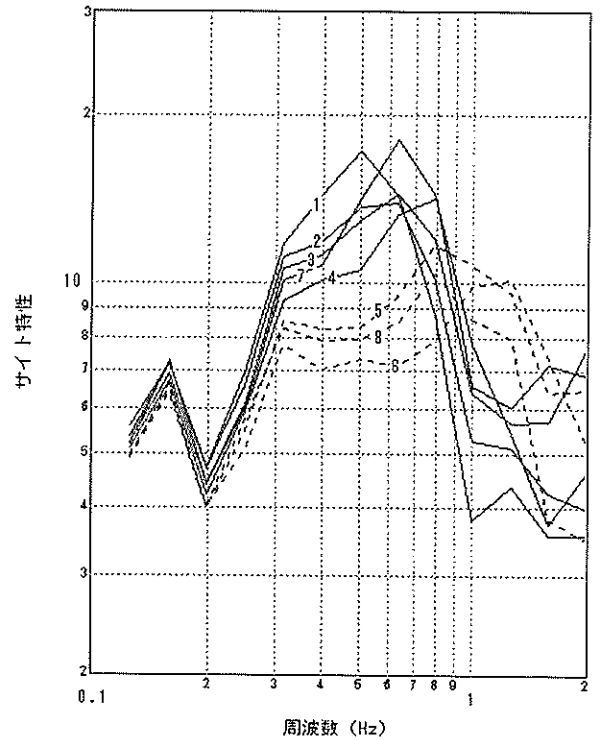


図-16 羽田空港の No.1-8 地点のサイト特性の比較

図-16は羽田空港の No.1-8 地点のサイト特性のクローズアップである。No.1-No.8 地点のサイト特性は、概ね 0.2Hz 以下では共通であるが、それ以上では地点毎にかなり相違のあることがわかる。大別すると二つのグループに分かれる。工学的基盤の深い観測点のグループ (No.1-4 と No.7, 実線で表示) では、周波数 0.3-1.0Hz の範囲でサイト特性は 10 を上回るかなり大きな値を示す。この値は前述のように関東地方の他のどの観測地点と比較しても大きいものであった。それに対して、工学的基盤の浅い観測点のグループ (No.5,6,8, 破線で表示) では、サイト特性のピークはより高周波数側に移動し、そのピークの高さは 10 程度である。

0.2Hz 以下に目を転じると、0.125-0.16Hz 付近にもサイト特性にピークのあることがわかる。このピークは、関東平野において卓越しやすい周期 8 秒程度の Love 波 (例えば座間, 1993) に対応しているものと考えられる。このピークは、0.3-1.0Hz のピークほど目立たない結果となっている。ただし、4.2で考察したように、入射角の浅い地震に対しては、本研究で求めたサイト特性は、周波数 0.125Hz 付近で過小評価となっている可能性もある。現状では、当該空港において入射角の浅い地震の記録がまだ少ないので (図-8)、この点についてさらに詳しい検討を行うことは難しいと言えるが、データの蓄積を待って詳しい解析を行うことが望ましい。



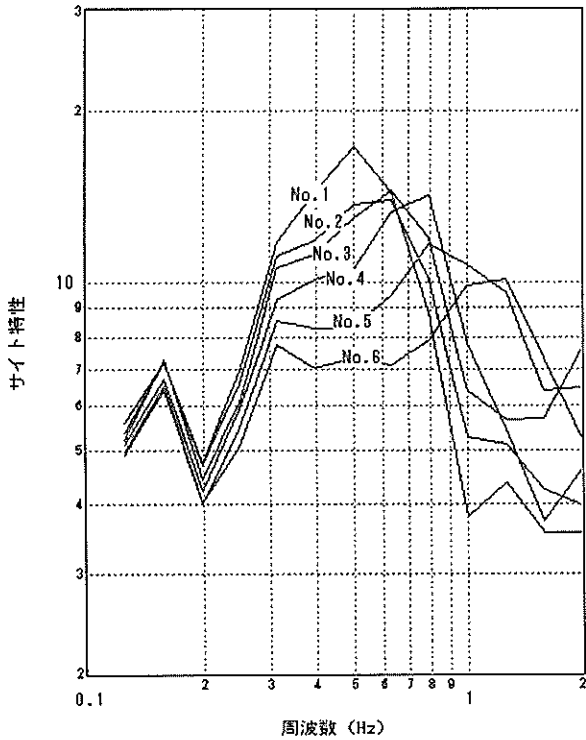


図-17 No.1-No.6 地点のサイト特性の比較

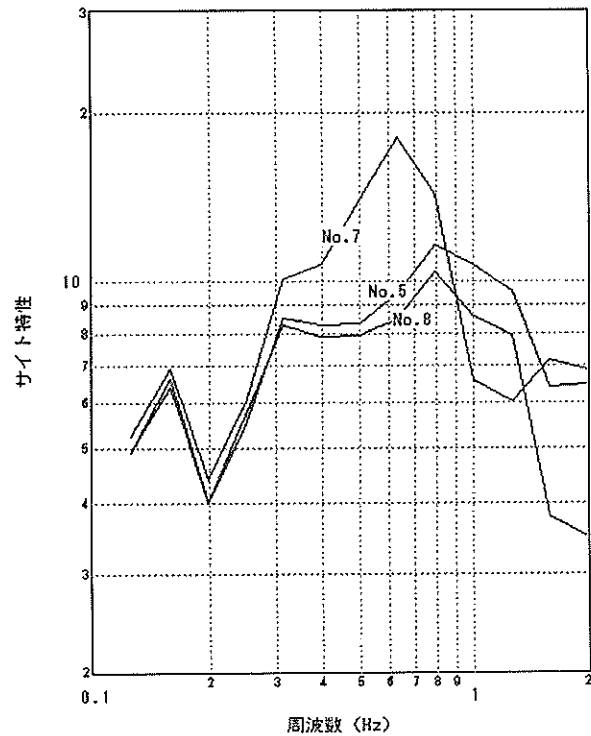


図-18 No.7,5,8 地点のサイト特性の比較

図-17は滑走路縦断方向に一列に並んだ No.1-No.6 地点のサイト特性を比較したものである。また図-18は滑走路横断方向に一列に並んだ No.7,5,8 地点のサイト特性を比較したものである。これらの図から、サイト特性の

ピークは No.1 から No.6 にかけて次第に高周波側に移動していること、また No.7 から No.8 にかけて次第に高周波側に移動していることがわかる。2. で述べたように、N 値 50 以上の工学的基盤の深度は、No.1 から No.6 に向かって次第に浅くなっており、また No.7 から No.8 に向かって次第に浅くなっているため、この空港では、サイト特性と工学的基盤の深度との間には密接な関係のあることがわかる。

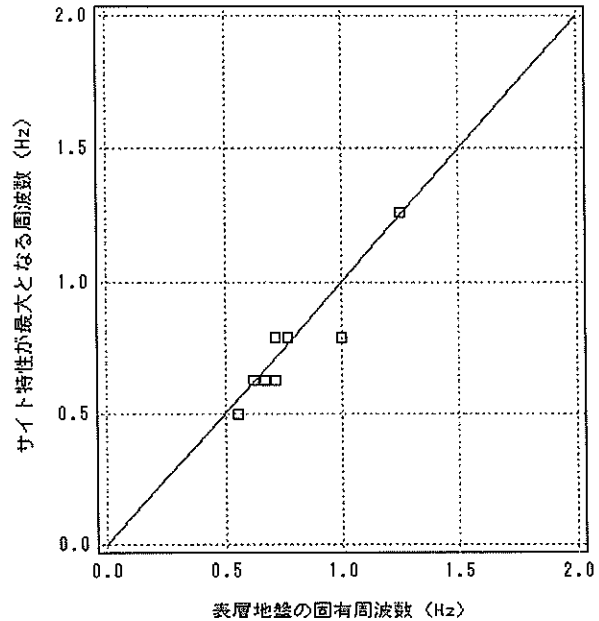


図-18 サイト特性が最大となる周波数と表層地盤の固有周波数

No.1-No.8 地点においてサイト特性が最大となる周波数を求め、これを表層地盤の固有周波数(表-1 に示した値の逆数)と比較すると、図-18 に示すように両者はほぼ 1:1 の直線に乗る。

No.1 地点において、上記の解析で求めたサイト特性と、表層地盤の周波数伝達関数(地表/工学的基盤)との比較を行った結果を図-19 に示す。ここで、表層地盤の周波数伝達関数は図-4 (a) の表層地盤モデルから求めた。図-18 の結果から予想されるように、サイト特性のピークの位置と周波数伝達関数のピークの位置はともに 0.5Hz 付近で良く一致している。しかし、ピークの高さは大幅に異なる。これは、強震記録から求めたサイト特性が地震基盤から地表までの増幅特性を意味するのに対し、周波数伝達関数は工学的基盤からの増幅を示すに過ぎないから、当然予想される結果である。

次に、同じく No.1 地点において、上記の解析で求めたサイト特性と、表層地盤+深部地盤の周波数伝達関数

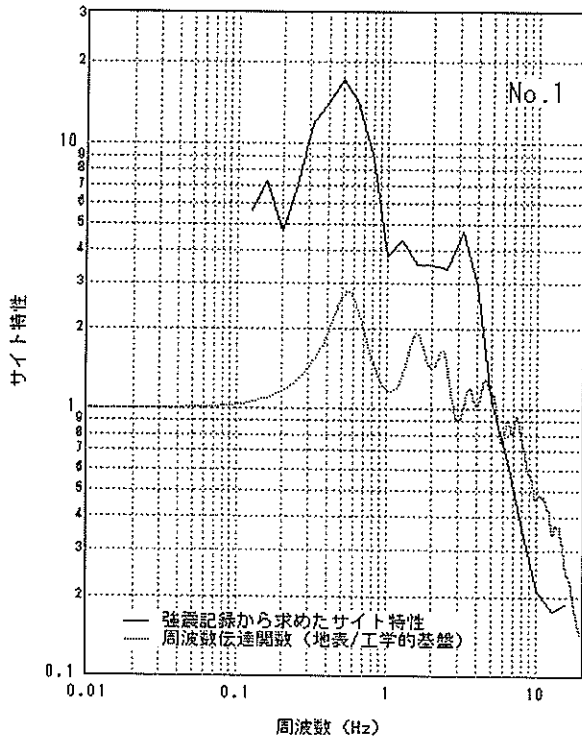


図-19 No.1 地点のサイト特性と周波数伝達関数 (地表/工学的基盤) との比較

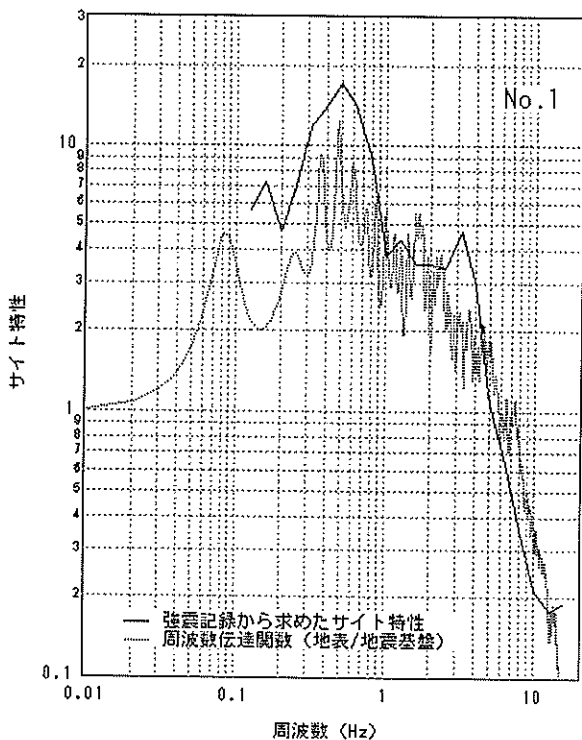


図-20 No.1 地点のサイト特性と周波数伝達関数 (地表/地震基盤) との比較

(地表/地震基盤) との比較を行った結果を図-20に示す。ここで、表層地盤+深部地盤の周波数伝達関数は、図-4

(a)の表層地盤モデルの下に、表面波の解析から推定した当該空港の深層地盤のモデル(野津他, 2002)を接続した地盤モデルに対して計算を行った。計算されたピークの位置は、この場合もサイト特性のピークの位置と良く一致しており、またピークの高さについても、図-19と比較すればサイト特性に近づいてきている。しかし、ピークの高さにはなお差がある。これは、強震記録から求めたサイト特性がS波のみならず表面波を含む波形全体の地震基盤に対する増幅特性に対応するためであると考えられる。つまり、強震記録から求めたサイト特性は2,3次元的な地下構造の影響を含んだ形で地震動の増幅特性を評価できているのに対して、周波数伝達関数の方は地震動の1次元的な増幅のみを考慮しているため、強震記録から求めたサイト特性よりも小さな値を示すものと考えられる。

なお、堆積層の $Q$ 値については十分な情報が得られていないので、ここでは周波数伝達関数を計算する際の $Q$ 値を次式で与えた。

$$Q = \beta / 10 \quad (7)$$

ここに $\beta$ はS波速度(m/s)である。式(7)を用いた根拠は特に存在しないが、図-20においてサイト特性と周波数伝達関数が高周波側で比較的良く一致していること、高周波側では表面波の影響が少ないと考えられるので(図-12)、サイト特性は1次元的な地震動の増幅によりある程度説明可能ではないかと考えられることなどから、式(7)は堆積層内の $Q$ 値を少なくとも近似的には表現し得ているのではないかと考えられる。

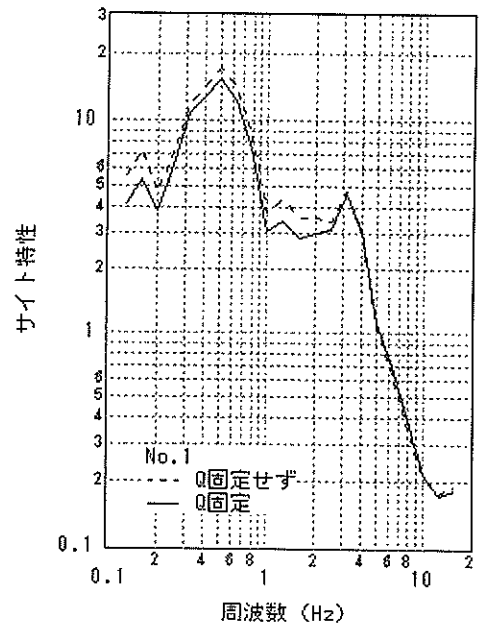


図-21  $Q$ 値を未知数とする場合と固定する場合の No.1 地点のサイト特性の比較

最後に、 $Q$  値の取り扱い(未知数とする場合と既知とする場合)によるサイト特性への影響を検討するため、 $Q$  値を未知数とした場合と  $Q$  値を固定した場合のサイト特性の推定結果の比較を図-21に示す。同図に示すように、 $Q$  値の取り扱いによるサイト特性への影響あまり大きくないことがわかる。 $Q$  値を未知数とした解析では特に低周波側で安定した  $Q$  値が求まらない傾向にあったが、得られたサイト特性については比較的信頼して用いて良いものと思われる。

## 5. 結論

本報ではスペクトルインバージョン手法を適用し、羽田空港のサイト特性、すなわちフーリエ振幅スペクトルの地震基盤に対する増幅率を明らかにすることを試みた。インバージョンには、羽田空港で得られた記録に加え、港湾地域強震観測や K-NET など、関東地方の他の地点で得られた記録を用いた。使用した記録は 122 の観測点で得られた 31 の地震による 1384 の記録である(2768 成分)。推定した未知数は 31 の地震による震源スペクトルと 122 の観測点のサイト特性、それに伝播経路の  $Q$  値の併せて 154 である。なお伝播経路の  $Q$  値は、未知数とする場合と、Kinoshita(1994)の得た  $Q$  値を与える場合の二通りの検討を実施した。スペクトルインバージョンでは基準観測点(サイト特性がすべての周波数に対して 1 であるような観測点)を与える必要がある。ここでは試行錯誤により K-NET の TKY002(桧原)を基準観測点とした。

本研究で得られた羽田空港の No.1-No.8 地点のサイト特性は、概ね 0.2Hz 以下では共通であるが、それ以上では地点毎にかなり相違のあることがわかった。大別すると二つのグループに分かれる。工学的基盤の深い観測点のグループ(No.1-4, No.7)では、周波数 0.3-1.0Hz の範囲でサイト特性は 10 を上回るかなり大きな値を示す。この値は関東地方の他のどの観測地点と比較しても大きいものであった。それに対して、工学的基盤の浅い観測点のグループ(No.5,6,8)では、サイト特性のピークはより高周波数側に移動し、そのピークの高さは 10 程度である。なお  $Q$  値の取り扱い(未知数とする場合と既知とする場合)によるサイト特性への影響は大きくなかった。

## 6. あとがき

本研究で実施したスペクトルインバージョンの結果はシナリオ地震による強震動の予測に活用することができる。特に、震源位置の関係で経験的グリーン関数法を適用できないような場合には、本研究で得られたサイト特性を統計的グリーン関数法(釜江他, 1991)と組み合わせることで用いることにより(例えば古和田他, 1998; 野津・井合, 2001)、地表での揺れを大略評価することができる。

しかしながら、本文中でも述べたように、本来サイト特性は震源の方位に依存する性質があるものと考えられる。本研究ではそこまで踏み込んだ解析ができなかったが、今後、さらにデータの蓄積を待って、サイト特性が震源の方位に依存する性質についても解明していきたいと考えている。

(2003年2月14日受付)

## 謝辞

本研究では羽田空港に設置された地震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。また本研究では K-NET の記録を利用させていただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986) : 観測された地震波から震源特性, 伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, 39, pp.579-593.
- 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.
- 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長 (1991) : 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報告集, 第 430 号, pp.1-9.
- 川瀬博 (1993) : 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, 地震, 第 2 輯, 第 46 巻, pp.171-190.
- 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.
- 木下繁夫 (1993) : 地震観測に基づく観測点特性と経路減衰特性の評価, 地震 2, 46, pp.161-170.
- 佐藤智美・巽誉樹 (2002) : 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.15-24.
- 座間信作 (1993) : やや長周期の地震動, 地震, 第 2 輯, 第 46 巻, pp.329-342.
- 鶴来雅人・田居優・入倉孝次郎, 古和田明 (1997) : 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震 2, 50, pp.215-227.
- 鶴来雅人・澤田純男・宮島昌克・北浦勝 (2002) : 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.577-586.
- 野津厚・安中正・佐藤陽子・菅野高弘 (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.
- 野津厚・井合進 (2001) : 経験的サイト増幅特性に基づくシナリオ地震の地震動の試算, 港湾技術研究所資料, No.991.
- 深澤清尊・佐藤陽子・野津厚・菅野高弘 (2002) : 港湾地域強震観測年報 (2001), 港湾空港技術研究所資料, No.1019.
- Kinoshita, S. (1994): Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of Southern Kanto area, Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.84, No.5, pp.1387-1396.
- Kinoshita, S. (1998): Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, Vol.69, pp.309-332.
- Street, R., R. Herrmann and O. Nuttli (1975), Spectral characteristics of the Lg wave generated by central

United States earthquakes, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol.41, pp.51-63.

付録

～解析対象記録一覧～





表-A.4 解析対象記録一覧 (その4) K-NET 観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET															
						GNM001	GNM003	GNM006	GNM007	GNM008	GNM009	GNM010	GNM013	GNM014	GNM015	GNM016	IBR001	IBR002			
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	13.0	10.0	5.0	4.0	2.0	28.0	22.0	5.0	12.0	7.0					
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	5.9	5.5	2.9	2.3	10.3	9.9	2.7	4.1	4.2						
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	15.0	11.0	4.0	4.0	18.0	11.0	6.0	9.0	15.0						
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	5.0	5.0	2.0	2.0	9.0	4.0	4.0	4.0	4.0						
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6															
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8															
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	23.0	9.0	5.0	5.0	18.0	13.0	11.0	10.0	19.0	6.0					
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6	9.0	10.0	2.0	2.0	13.0	9.0	5.0	7.0	4.0	4.0					
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	8.8	5.9	2.7	2.3	10.2	7.7	5.0	4.2	3.5	3.5					
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	5.0	6.0	3.0	3.0	9.0	5.0	3.0	13.0	12.0	12.0					
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5								3.3							
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5								2.8							
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6		3.1				2.7		3.6							
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8	11.7	10.3	2.8	2.4	2.3	16.2	28.2	3.4	13.4	6.4					

表-A.5 解析対象記録一覧 (その5) K-NET 観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET															
						IBR003	IBR004	IBR005	IBR006	IBR007	IBR008	IBR009	IBR010	IBR011	IBR012	IBR013	IBR014	IBR015			
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	15.0	40.0	45.0	11.0	14.0	17.0	11.0	51.0	24.0	42.0	43.0	32.0	43.0		
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	5.5	13.4	12.6	4.8			4.0		9.7	9.7		8.1	12.1		
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	17.0	33.0	25.0	12.0	9.0		6.0	14.0	12.0	15.0	31.0	16.0	18.0		
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	6.0	9.0	11.0	5.0		4.0	4.0	6.0	5.0	7.0	16.0	8.0	9.0		
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6	3.7	5.4	5.2					2.5	3.8	4.3	9.1	6.2			
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8		7.0	5.7				3.3	4.0	3.6	3.6	7.7	4.9	8.0		
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	11.0	36.0		9.0	7.0	11.0	10.0	14.0	20.0	18.0	51.0	24.0	22.0		
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6	5.0		26.0	6.0		7.0	6.0	11.0	9.0	25.0	21.0	12.0	22.0		
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	5.6		12.5	4.6		6.1	4.1	7.3			19.8				
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	21.0	26.0	33.0	10.0	23.0	8.0	6.0	16.0	17.0	20.0	37.0	21.0	16.0		
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5			3.8												
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5															
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6	2.6	10.3	7.8	2.9	2.7			3.8	5.3	5.6	14.7	6.8	7.5		
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8	13.9	41.7	35.1	8.9	10.1	22.3	9.8	42.2	35.3	25.7	49.1	37.5	34.7		



表-A.6 解析対象記録一覧 (その6) K-NET観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET													
						IBR016	IBR017	IBR018	KNG001	KNG002	KNG003	KNG004	KNG005	KNG006	KNG007	KNG008	KNG009	KNG010	
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	67.0	32.0	10.0	20.0	17.0	10.0	30.0	12.0	14.0	11.0	17.0	9.0	
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	14.2	8.1		38.6	13.5	9.8	10.6	9.0	9.3	9.0		4.2	
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	27.0	17.0	6.0	25.0	11.0	11.0	55.0	17.0	11.0	6.0	13.0	20.0	
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	12.0	9.0	7.0	16.0	10.0	8.0	16.0	15.0	9.0	4.0	14.0	13.0	
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6	8.4	11.9	7.5	9.6	12.2	11.5	47.4	27.9	21.3	8.5	7.5	16.7	
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8	10.7	5.7		35.8	35.1	16.7		29.6	9.0	8.9	13.6	35.3	
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1		28.0		52.0	38.0	40.0	87.0	43.0	24.0	12.0	36.0	34.0	
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6		15.0		55.0	26.0	9.0	13.0	13.0	26.0	5.0	26.0	16.0	
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	13.3	9.5		46.5	23.6	16.3	23.4	25.2	22.1	8.0	24.5	26.6	
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	28.0	53.0	36.0	26.0	23.0	7.0		16.0	10.0	10.0	13.0	9.0	
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5		2.9		20.9	16.3	6.0		16.4	8.5	8.6	11.0	32.7	
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5				8.1	13.0	14.1	29.6	22.5	6.8	11.1	35.4	77.4	
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6	9.9	7.2	2.8	17.3	17.7	8.4	10.0	9.9	14.6	4.2	7.0	7.8	
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8	95.5	37.1	9.0	10.2	8.1	4.7	13.7	8.0	7.3	7.4	9.2	3.2	

表-A.7 解析対象記録一覧 (その7) K-NET観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET													
						KNG011	KNG012	KNG013	KNG014	SIT001	SIT003	SIT004	SIT005	SIT006	SIT007	SIT008	SIT009	SIT010	
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	3.0	8.0	12.0	12.0	5.0	19.0	20.0	11.0	9.0	11.0	29.0	9.0	21.0
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	2.5	5.8	8.1			13.5	4.7			5.5	16.0	6.6	
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	4.0	10.0	14.0	13.0	3.0	11.0	12.0	6.0	5.0	9.0	14.0	13.0	
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	3.0	7.0	9.0		2.0	14.0			4.0	5.0		7.0	14.0
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6	4.0	8.2	15.4		1.8		2.7					3.3	
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8	5.3	18.0	17.2	13.8	4.7	4.7	4.3		2.7	4.2	5.3	11.0	10.7
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	18.0	17.0	36.0	24.0	4.0	18.0	11.0	11.0	10.0	20.0	22.0	26.0	
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6	5.0	7.0	8.0	10.0	4.0	15.0	11.0	6.0	5.0	10.0	15.0	27.0	23.0
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	5.2	8.8	16.0	11.4		16.2	8.0		5.7	8.1		9.6	
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	3.0	6.0	17.0	9.0	3.0	11.0	3.0		3.0	4.0	15.0	7.0	14.0
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5	3.4	11.6	14.9	53.9			5.3		3.7	2.8		5.0	3.8
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5							6.3		4.4	3.8		2.8	6.3
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6	2.8	6.4	7.2			4.6	3.8		3.1	6.2	4.7	4.5	
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8		3.2	6.4		2.9	15.3	8.6	7.4	5.6	7.2	18.6	7.8	9.1

表-A.8 解析対象記録一覧 (その8) K-NET 観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET												
						SIT011	SIT012	SIT013	ISZO01	TCG001	TCG003	TCG004	TCG005	TCG006	TCG007	TCG008	TCG009	TCG010
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	26.0	4.0	11.0	14.0	13.0	19.0	6.0	11.0	36.0	44.0	20.0	
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	17.4	9.0	7.9	6.0	3.6	6.4	2.7	2.8	9.5	19.1	6.2	
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	16.0	4.0	7.0	33.0	7.0	11.0	7.0	10.0	18.0	27.0	8.0	
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	14.0	5.0	9.0	14.0	4.0	4.0	2.0	3.0	10.0	14.0	4.0	
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6	5.1			17.9								
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8	12.1	4.1		20.4	2.2	2.9				8.0	3.9	
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	45.0	12.0	19.0	66.0	3.0	11.0	6.0	6.0	14.0	31.0	8.0	
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6	26.0	6.0	21.0	12.0	5.0	9.0	5.0	4.0	12.0	21.0	6.0	
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	22.9		11.2		6.1	5.7	2.7	3.4	9.1	17.0		
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	15.0	3.0	7.0	5.0	3.0	6.0	5.0	5.0	9.0	24.0	7.0	
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5	4.9	3.0		14.6								
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5	2.9	5.2	6.2	37.2								
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6	9.2			12.7	3.4	2.4	3.3			10.2	2.8	
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8	18.3	2.9	7.0	6.4	3.1	24.2	7.5	12.7	6.5	37.9	39.5	

表-A.9 解析対象記録一覧 (その9) K-NET 観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET													
						TCG011	TCG012	TCG013	TCG014	TKY001	TKY002	TKY003	TKY004	TKY005	TKY006	TKY007	TKY008	TKY009	
18	1997/3/23	14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	12.0	20.0	33.0	37.0	4.0		14.0	13.0	11.0	21.0	17.0	14.0	6.0
19	1997/7/9	18:36	35.552	140.128	77.3	4.6	5.6	4.8	7.1	19.8		4.3	11.2	18.5	10.0	13.2	13.3	11.2	4.4
20	1997/9/8	8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	12.0	9.0	18.0	52.0	4.0	6.0	16.0	13.0	12.0	8.0	20.0	27.0	18.0
21	1998/1/14	2:17	35.587	140.240	75.9	4.9	3.0	5.0	6.0		3.0	4.0	16.0	15.0	14.0	8.0	20.0	16.0	5.0
22	1998/1/16	10:57	35.205	140.307	57.5	4.6				5.6		3.0	5.9	13.3	7.7		8.0	40.4	14.6
23	1998/5/16	3:45	34.970	139.943	73.9	4.8	4.7	3.0	3.0	9.6	5.2	5.2	18.5	22.5	15.7	10.6	13.3	28.5	35.1
24	1998/8/29	8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	10.0	10.0	14.0	32.0	9.0	16.0	25.0	47.0	28.0		89.0	64.0	32.0
25	1998/11/8	21:40	35.610	140.053	78.0	4.6	7.0	7.0	12.0	43.0		4.0	14.0	40.0	38.0		40.0	13.0	4.0
26	1999/9/13	7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	8.2	6.6	9.7	29.3	3.4	7.2	15.5		23.6	21.3	29.2	29.6	10.6
27	2000/6/3	17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	5.0	9.0	13.0	18.0		3.0	11.0	14.0	10.0	9.0	13.0	6.0	6.0
28	2000/9/29	8:56	35.522	139.735	85.8	4.5				4.7		2.9	9.4	12.2	20.5	4.6	8.4	10.4	4.6
29	2001/12/8	4:07	35.538	139.148	24.4	4.5					6.5	11.6	22.1	34.9	16.1	10.8	6.8	25.3	
30	2002/5/19	5:00	35.642	140.213	72.0	4.6	2.6		4.5	10.0			7.3	7.6	5.5	12.6	13.2	5.8	
31	2002/7/13	21:45	35.995	140.127	65.0	4.8	8.2	19.7	28.1	96.0		2.4	9.7	9.4	6.4	8.6	15.4		

表-A.10 解析対象記録一覧 (その10) K-NET観測点

No.	地震発生時刻	緯度	経度	深度 (km)	M	K-NET TKY010	TKY011
18	1997/3/23 14:58	35.965	140.110	71.5	5.0	2.0	
19	1997/7/9 18:36	35.552	140.128	77.3	4.6		
20	1997/9/8 8:40	35.555	140.005	108.6	5.2	3.0	4.0
21	1998/1/14 2:17	35.587	140.240	75.9	4.9		3.0
22	1998/1/16 10:57	35.205	140.307	57.5	4.6		4.4
23	1998/5/16 3:45	34.970	139.943	73.9	4.8	3.6	7.7
24	1998/8/29 8:46	35.603	140.045	67.1	5.1	7.0	13.0
25	1998/11/8 21:40	35.610	140.053	78.0	4.6		
26	1999/9/13 7:56	35.567	140.160	77.1	5.0	3.0	3.0
27	2000/6/3 17:54	35.678	140.720	47.7	6.0	5.0	
28	2000/9/29 8:56	35.522	139.735	85.8	4.5		
29	2001/12/8 4:07	35.538	139.148	24.4	4.5		
30	2002/5/19 5:00	35.642	140.213	72.0	4.6		
31	2002/7/13 21:45	35.995	140.127	65.0	4.8		