

羽田空港における地震動増幅特性と 表層地盤S波速度構造の関係

AMPLIFICATION CHARACTERISTIC OF EARTHQUAKE MOTION AT
HANEDA AIRPORT AND ITS RELATIONSHIP TO S-WAVE VELOCITY PROFILE

長尾 毅¹・紺野克昭²

Takashi NAGAO and Katsuaki KONNO

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 工博 芝浦工業大学助教授 土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)

Amplification characteristic of earthquake motion at Haneda Airport is ascertained with strong-motion array observation records and linear earthquake response analyses. It is shown that correlation between amplitude ratio and mean S-wave velocity is low, whereas amplitude ratio with 0.5-1 Hz band pass filter is highly correlated with mean S-wave velocity of 30m thick surface ground.

Key Words : Amplitude ratio, S-wave velocity, array observation

1. まえがき

地震動の増幅特性は, 表層地盤のS波速度構造に大きく依存する. 特定の地盤構造について特定の地震動に対する地震動増幅特性を詳細に検討する場合は地震応答計算を行うこととなるが, 地震応答計算を伴わない耐震・防災判定においては, 表層地盤S波速度構造などをもとに地震動増幅特性をはじめとする耐震安全性を分類する必要がある. 例えば, 走時で重み付けした表層30mの平均S波速度 (以下, 表層 x (m)の平均S波速度を V_{sx} と呼ぶ) はアメリカ合衆国において耐震設計における地盤種別分類に用いられる動きがある¹⁾.

平均S波速度と地震動増幅率の相関に関する既往の研究として翠川ら²⁾は, 1987年千葉県東方沖地震の際の173地点における強震記録をもとに, 最大加速度増幅率については V_{s10} が, 最大速度については V_{s30} の相関が高いことを示した. また, 田村ら³⁾は, 823地点におけるK-NET地震記録をもとに, 最大加速度増幅率と V_{s8} , 最大速度増幅率と V_{s20} の相関が高いことを示した. しかしながら, これら既往の研究における地震動増幅特性と V_{sx} の相関係数は, 0.6-0.7程度であり, ややばらつきが大きい. 特に V_{sx} が300m/s程度以下の場合に, 相関が低いことが特徴である. 筆者が研究対象とする港湾地域の地盤や埋立空港地盤においては, 地盤が軟弱であり V_{s30} が300 m/sを上回することはほとんどないことから, 軟弱地盤における地震動増幅特性と表層地盤のS波速度の関係性を精査する必要がある.

このような背景のもと, 本研究においては, 羽田

空港地盤における強震アレー観測記録を用いて, 地震動増幅特性と地盤のS波速度構造の関係について検討を行った. その際, 地震動増幅特性については周波数特性を考慮した検討を加えた. 周波数帯としては, 各種構造物の耐震設計において重要と考えられる2Hz以下の周波数成分に注目し, 0.2-2.0Hzと0.5-1.0Hzの2種類の周波数帯について検討した.

2. 検討対象地点地盤構造

検討対象としたのは, 羽田空港アレー強震観測地点のうち, 地盤を対象とした新A滑走路周辺の観測地点No.1~No.8である. 図-1および図-2に強震観測地点の平面図および断面図を示す. No.1, No.4, No.6を例として, S波速度深度分布を図-3に示す.

表-1に各観測地点におけるSH波重複反射理論による固有周期および平均S波速度を示す. 本地点の特徴は基盤層(Ds)の深さがNo.1観測地点(-65m)からNo.6観測地点(-40m)に向かって1%程度の勾配で変化していることで, このため地盤固有周期はNo.1で1.8秒, No.6では0.9秒と大きく異なっている. なお本研究で扱う平均S波速度は走時により重み付けした値であり, 表層 x (m)の平均S波速度 V_{sx} は式(1)により算出される.

$$V_{sx} = \frac{\sum_i H_i}{\sum_i \frac{H_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

ただし、

$$\sum_i H_i = x \quad (2)$$

ここに、 H_i : i 番目の土層の層厚(m)

V_{s_i} : i 番目の土層のS波速度(m/s)

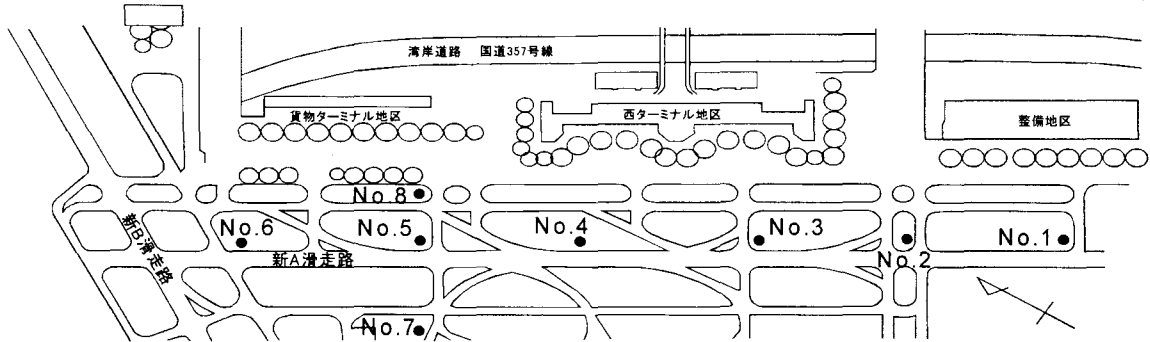
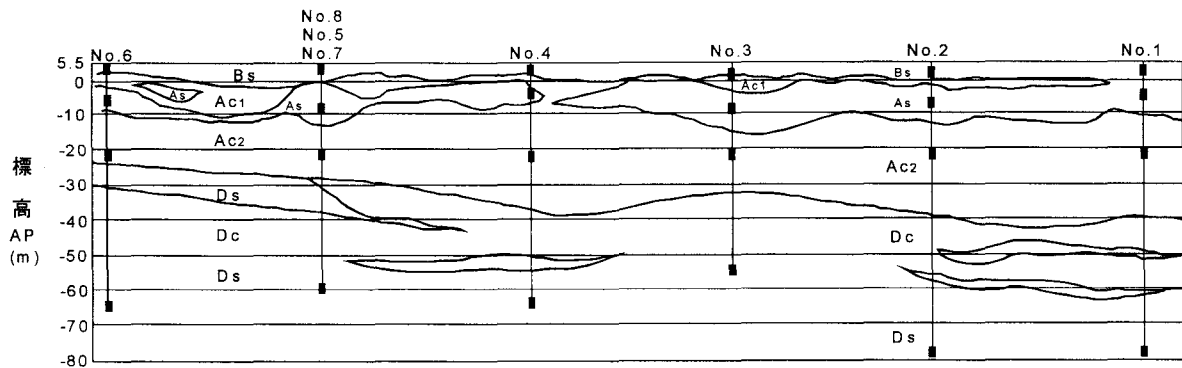


図-1 強震観測地点平面図



凡例 Bs 建設残土 As 沖積砂 Ds 洪積砂 ■ 強震計
 Ac1 粘性土 Ac2 沖積粘性土 Dc 洪積粘性土

図-2 強震観測地点断面図

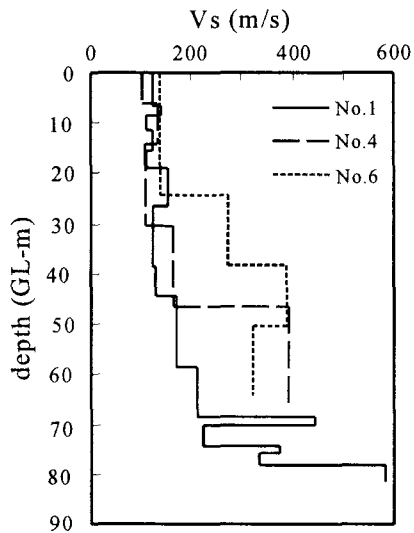


図-3 観測地点地盤構造

表-1 地盤構造

	固有周期 (s)	Vs10 (m/s)	Vs20 (m/s)	Vs30 (m/s)
No.1	1.8	122	119	125
No.2	1.7	116	116	116
No.3	1.4	80	96	103
No.4	1.3	110	114	112
No.5	1.3	90	96	105
No.6	0.9	130	130	145
No.7	1.5	86	100	106
No.8	1.0	80	99	108

3. 強震記録に基づく地震動増幅特性

(1) 解析方法

羽田空港における強震観測システムは1988年より観測が開始されており、解析においては1988年9月～2000年10月に観測された記録のうち、地表のいずれかの地点において10Gal以上の最大加速度が記録された55地震を対象とした。55地震のうち3つの地震を除いては羽田空港を中心とした関東近郊を震源とする記録であり、観測記録における最大の加速度振幅は、No.4地表面における133Galで、東京湾を震源とする地震によるものである。

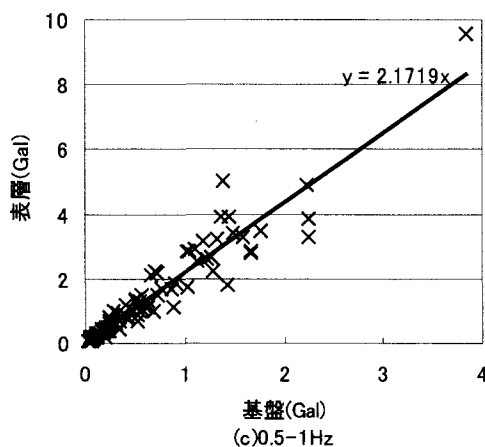
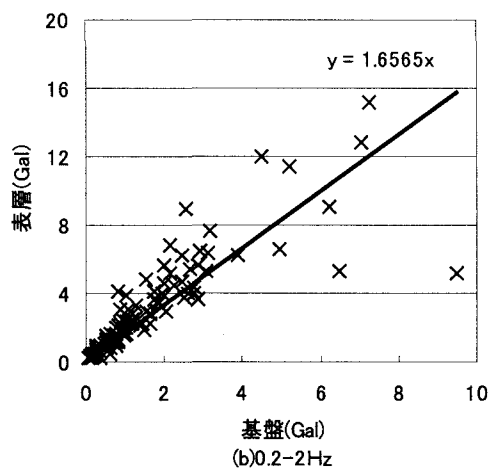
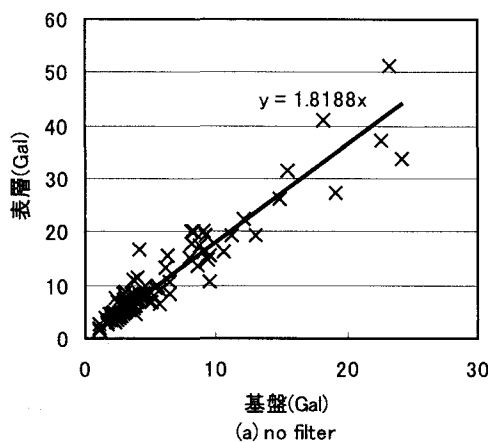


図-4 平均増幅率の算出(No.1)

地震計は鉛直方向に地表面、沖積砂層、沖積粘土層、工学的基盤の計4箇所に設置されているが、本研究では工学的基盤と地表面における観測記録に着目し、NS、EWの各方向成分について加速度及び速度最大値を整理した。さらに、0.2-2.0Hzおよび0.5-1.0Hzの2種類のバンドパスフィルターを用いて周波数帯に着目した検討を行った。この周波数帯域は、野津ら⁴⁾が有効応力解析によって、ケーソン式岸壁の変形量と入力地震動の周波数成分の関係を検討し、2Hz以上の高振動数成分は変形量に寄与しないこと、さらにケーソンの変形量に最も寄与する成分は1Hz以下であることを示したことを考慮して設定したものである。次に、平均的な増幅率を求める観点から、各測点について線形回帰により増幅率を求めた。観測点No.1を例に、フィルターなし、0.2-2.0Hzおよび0.5-1.0Hzバンドパスフィルター処理後の平均加速度増幅率を図-4に示す。

(2) 表層地盤S波速度構造と増幅率の関係

a) 固有周期と増幅率の関係

強震記録による平均増幅率と地盤構造の関係について考察する。まず、地盤固有周期 T と加速度増幅率の関係を図-5に示す。フィルターなし、および0.2-2.0Hzバンドパスフィルター処理の結果からは固有周期と増幅率に明瞭な相関は認められず、固有周期をもとに増幅率を分類することは困難である。ただし、0.5-1.0Hzの周波数帯については、固有周期1.3秒以上の地盤において固有周期の長周期化に伴って増幅率が低下する傾向が認められる。これは一般的に考えられる傾向とは逆の傾向であり、減衰などの影響を受けた結果であると考えられ、注意が必要である。No.6およびNo.8を除いては、地盤の固有周期が着目している周期帯内にあることから、No.6およびNo.8以外の増幅率は、地盤固有周期の周期帯における増幅率を表していると考えられ、固有周期が長いほど増幅率が低下する傾向は、レイリー型の減衰の影響を強く受けた結果として解釈することが可能と考えられる。なお、速度増幅についても、加速度増幅と同様の傾向が認められた。

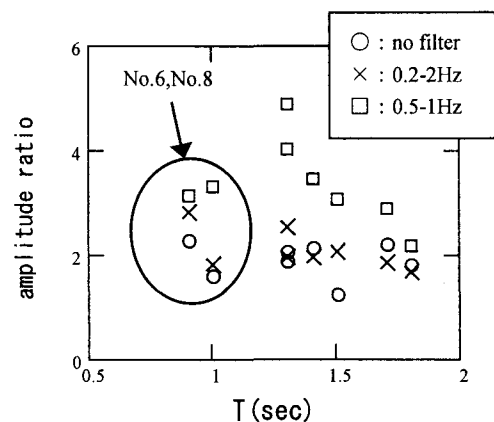
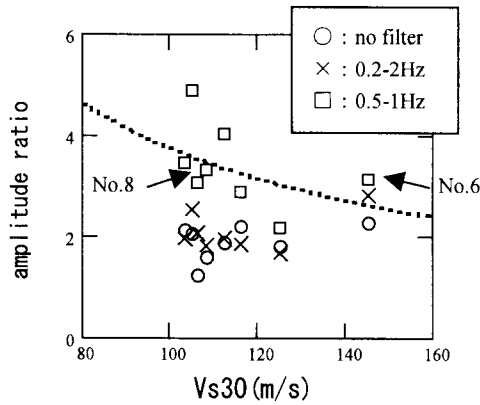


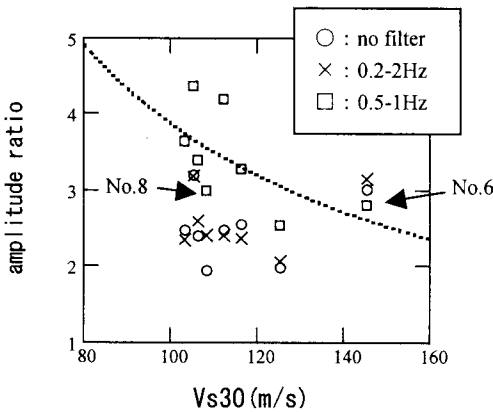
図-5 固有周期と加速度増幅率の関係

b) Vs30と増幅率の関係

次に、平均増幅率とVs30の関係を図-6に示した。固有周期に関する相関と同様に、フィルターなしおよび0.2-2.0Hzバンドパスフィルターによる増幅率とVs30との相関は低い。しかしながら、0.5-1.0Hzバンドパスフィルターによる増幅率については、比較的強い相関が認められる。図-6には0.5-1.0Hzについて両対数回帰による回帰曲線を併せてプロットしているが、標準誤差は0.07-0.10程度であった。なお、Vs20についても0.5-1.0Hzバンドパスフィルター処理後の増幅率との相関は良好であったが、以下ではVs30を中心に議論を進める。



(a)加速度増幅率



(b)速度増幅率

図-6 Vs30と平均増幅率の関係

0.5-1.0Hzの結果におけるNo.6およびNo.8以外の増幅率が地盤固有周期における増幅率を表していると考え、Vs30と地盤固有周期における増幅率の相関が高いことが示唆される。得られた回帰式は式(3)に示すとおりである。上述のように地震動の0.5-1.0Hzの周波数帯域はケーソン式岸壁の耐震安定性に強い影響を及ぼすため、ケーソン式岸壁などの耐震分類をVs30などの平均S波速度を用いて分類することが考えられる。

$$\begin{aligned} \log(AMP_a) &= 2.477 - 0.953 \log(Vs30) \\ \log(AMP_v) &= 2.703 - 1.058 \log(Vs30) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

AMP_a : 加速度増幅率

AMP_v : 速度増幅率

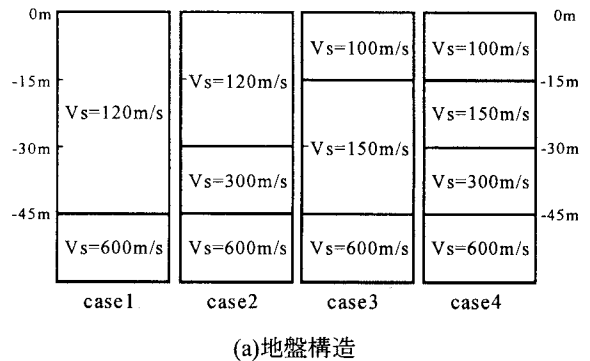
c) S波速度構造を反映した平均S波速度と増幅率の関係

これまで検討したように、羽田空港地盤においては0.5-1.0Hzの周波数帯における地震動増幅率と表層地盤の平均S波速度との間に比較的相関が高いことがわかった。しかしながら、S波速度構造のうち、地震動の増幅特性に関係すると考えられる次の情報については、単一の厚さの表層地盤の平均S波速度に反映されているとは必ずしもいえない。

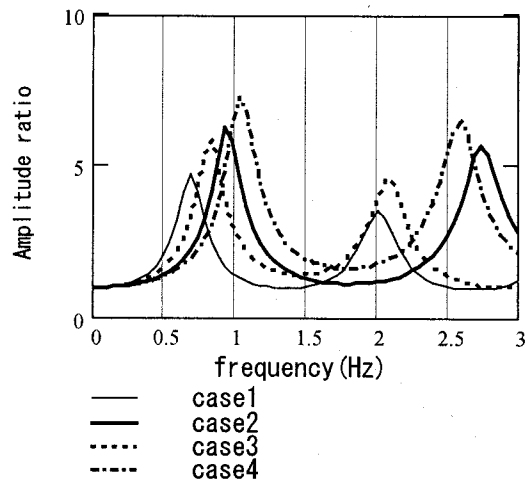
- ①ある深さの表層地盤とそれ以深の地盤とのインピーダンスコントラスト
- ②表層地盤中のインピーダンスの変化

図-7(a)に示すように、Vs30 = 120m/sの等しいVs30をもち、かつインピーダンスコントラストが異なる4ケースの地盤構造を考える。各ケースの平均S波速度および固有周期を表-2に、伝達関数を図-7(b)に示す。減衰定数については式(1)を用いている。

設定した各ケースの地震動増幅特性を線形重複反射理論により検討する。入力地震波形は、港湾地域強震観測により得られた八戸波、大船渡波、秋田波、神戸波のそれぞれ水平方向2成分とした。



(a)地盤構造



(b)伝達関数

図-7 case1-4の地盤構造と伝達関数

表-2 各ケースの平均S波速度と固有周期

	固有周期 (s)	Vs15 (m/s)	Vs30 (m/s)	Vs45 (m/s)
Case1	1.46	120	120	120
Case2	1.08	120	120	150
Case3	1.20	100	120	129
Case4	0.98	100	120	150

検討の結果、最大加速度の平均増幅率は、フィルターなしの場合1.4-3.3、0.2-2.0Hzバンドパスフィルター処理の場合1.8-3.4、0.5-1.0Hzバンドパスフィルター処理を行った場合でも2.7-4.1と大きくばらつく結果となった。4ケースのVs30は同一であるため、Vs30のみで地震動増幅特性を議論することには限界があることが示唆される。このため、Vs30にS波速度構造を反映させた値を用いて地震動の増幅を分類することが考えられる。

S波速度構造を反映した指標として、表層地盤と基盤のインピーダンスコントラストを指標とすることが考えられるが、羽田空港地盤を例にVs30および観測基盤より上部の表層の平均S波速度(Vss)と、観測基盤のVs(Vsb)との比を算出し、これと増幅率の関係を取ると、図-8に示すように、明瞭な相関は見られない。これは、単純なS波速度の比を指標としたのでは、基盤のVsの値の影響が実際以上に反映されてしまうためと考えられる。

地震動は、減衰の効果を無視すれば、表層30mとそれ以深のインピーダンスコントラストが高いほど、また表層30mのうち最表層地盤が軟弱であるほど強く増幅することが予測できる。これより、表層30m前後の平均S波速度勾配を用いたVs30の補正を検討する。S波速度構造の特徴を反映した表層30mの平均S波速度の修正値として、式(4)により定義されるVs30modについて検討を行う⁹⁾。

同式中、平方根の第一項は表層30mのうちの最表層15mと表層30mの平均S波速度コントラストを、第二項は表層30mとそれ以深の情報を含んだ表層45mの平均S波速度コントラストの影響を考慮するための項である。

$$Vs30\ mod = Vs30 \cdot \sqrt{e \frac{Vs15-Vs30}{Vs30}} \sqrt{e \frac{Vs30-Vs45}{Vs45}} \quad (4)$$

図-9(a)にcase1-4のモデル地盤についてのVs30modと増幅率の相関を示す。フィルターなし、0.2-2.0Hz、0.5-1.0Hzのいずれについても、Vs30modが増加するにつれて平均増幅率が減少することが分かる。このため、Vs30modは地震動増幅率を表すパラメータとして有力な候補となり得る可能性がある。0.5-1.0Hzにおけるcase4(Vs30mod=97m/s)のみ若干傾向が異なるが、これはcase4の固有周期が0.98秒であり、注目している周波数帯から外れていることが原因と考えられる。なおcase1-4について、地盤固有周期と増幅率の相関を示すと図-9(b)のとおりとなり、case4を除いては固有周期が長いほど増幅率が低下することがわかる。

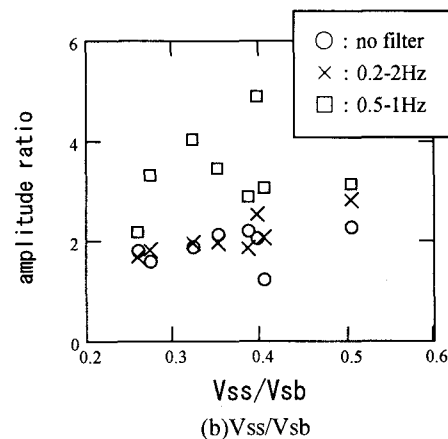
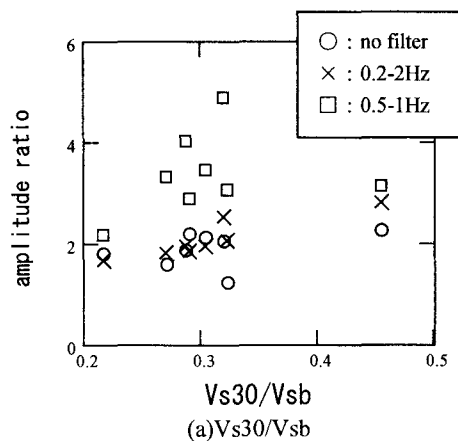


図-8 表層と基盤のS波速度比と増幅率の関係

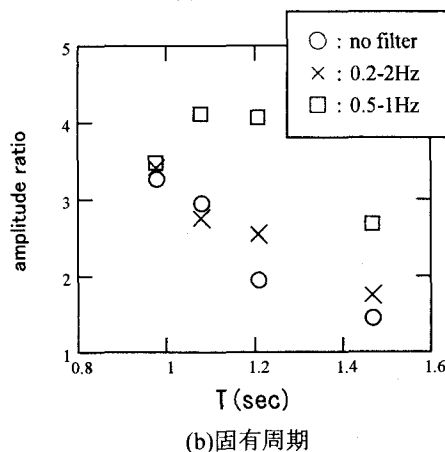
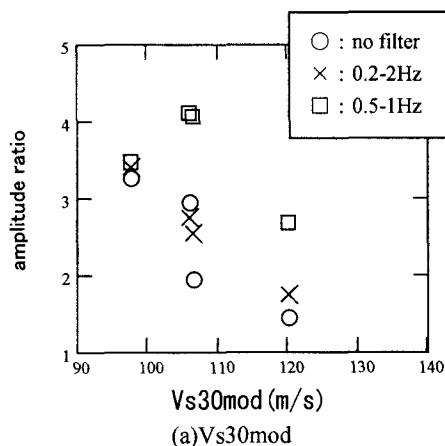


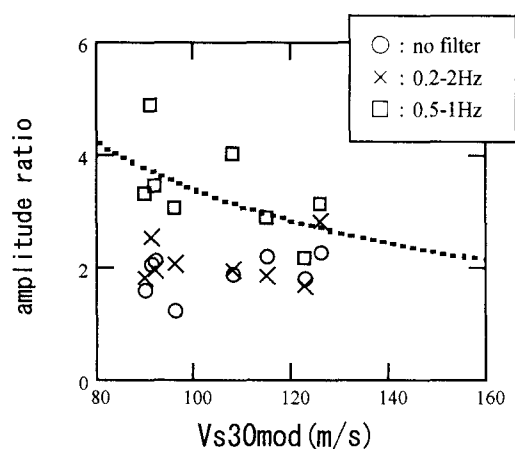
図-9 増幅率 (Case1-4)

羽田空港地盤についてVs30modと平均増幅率の相関を図-10に示す。Vs30modと増幅率の相関は比較的強いが、図より明らかなようにVs30と比較して相関がより強くなる効果は認められなかった。図-10には0.5-1HzのVs30modに関する両対数回帰による回帰式(式(5))を併せてプロットしているが、標準誤差は加速度に関して0.09、速度に関して0.08であった。

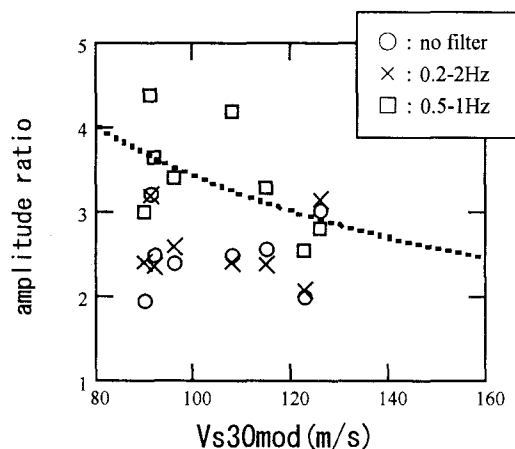
$$\log(AMP_a) = 2.512 - 0.992 \log(Vs30 \text{ mod})$$

$$\log(AMP_v) = 1.947 - 0.707 \log(Vs30 \text{ mod}) \quad (5)$$

Vs30modを用いてもVs30と比較して相関の強さに明瞭な変化がなかった理由としては、減衰の影響などが考えられる。このため、今後さらにモデル地盤などを用いて、地震動増幅特性を分類する上において減衰の効果をより適切に考慮しうるS波速度構造パラメータについて検討する必要がある。



(a) 加速度



(b) 速度

図-10 Vs30modと増幅率の関係 (羽田空港)

4. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると次の通りである。

①羽田空港埋立地盤においては、Vs30は100-150m/sの範囲にあり、そのような軟弱地盤においては最大加速度および最大速度の増幅特性と平均S波速度の間の相関は低い。また、増幅特性と地盤固有周期の相関も低い。ただし、地盤固有周期が0.5-1.0Hz周波数帯内にある地点が多く、0.5-1.0Hzの周波数帯における増幅特性については、Vs30との相関性は比較的強く、Vs30の増加に伴って平均増幅率の低下が認められる。0.5-1.0Hzは重力式岸壁の変形にもっとも支配的な地震動の周波数帯域であることから、重力式岸壁などの構造物の耐震安定性分類指標としてVs30を用いることが考えられる。また、地盤固有周期と増幅率の相関としては、0.5-1.0Hzにおける増幅率は、地盤固有周期が長周期化するほど低下する傾向が認められた。

②Vs30などの単一の平均S波速度にはインピーダンスコントラストなどの情報が必ずしも含まれているとはいえないため、S波速度構造の特徴を反映した表層30mの平均S波速度の修正値として、Vs30modを提案し、モデル地盤を対象にVs30によるよりもVs30modを用いた方が地震動増幅率の相関が強い場合があることを示した。しかしながら、羽田空港地盤に関してはVs30とVs30modについて、増幅率との相関の強さにほとんど変化はなかった。これは、本研究で提案したVs30modにおいては減衰の効果を必ずしも適切に考慮できない可能性を示唆していると考えられ、今後さらに検討の必要がある。

本研究は鉄道建設・運輸施設整備支援機構の基礎研究制度の助成を受けて行ったものである。末尾ながら、強震記録の取得に当たり、国土交通省関東地方整備局東京空港工事事務所に便宜を図っていただいたことを感謝します。

参考文献

- 1) Building Seismic Safety Council(BSSC) : NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings, part I :Provisions, developed for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1994.
- 2) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一 : 1987年千葉東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集No.442, pp.71-78, 1992.
- 3) 田村 勇, 山崎文雄, ホスロウTシャベスタリ : K-NET地震記録を用いた地盤増幅度と平均S波速度の関係, 生産研究52巻12号, pp.12-15, 2000.
- 4) 野津 厚, 井合 進, 一井康二, 沼田淳紀 : ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, pp.311-318, 2000.
- 5) Nagao T., N. Iwata, M. Ishida and K. Konno : Probabilistic evaluations of seismic motion amplification with mean S-wave velocities, Proc. of ICASP9, pp.1537-1544, 2003