

臨海部埋立地盤の地震危険度の 簡易推定法に関する研究

SIMPLE ESTIMATION METHOD OF SEISMIC RISK OF RECLAIMED LAND

長尾 毅¹・岩田直樹²・紺野克昭³

Takashi NAGAO, Naoki IWATA and Katsuaki KONNO

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

²国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³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)

Seismic risk is often discussed with regard to the acceleration amplification characteristic. Taking the soft ground as such seen in the reclaimed land into account, however, acceleration tends not to be amplified because of the large shear stress in the ground under the very strong seismic motion. It implies that the acceleration amplification characteristic is not adequate for the indicator of seismic risk of the reclaimed land. Authors conducted series of earthquake response analyses in order to establish the simple estimation method of seismic risk of reclaimed land in view of the peak ground velocity. Schematic chart of seismic risk evaluation according to the mean S-wave velocities and peak incident acceleration is proposed.

Key Words : Seismic risk, mean S-wave velocity, Reclaimed land

1. はじめに

臨海部埋立地盤は一般に地盤が軟弱であることから、地震時には被害が集中しやすい。地震時の被害程度を大きく左右する要因のひとつに、地盤構造を挙げることができる。このため、各種の耐震設計コードにおいては地盤の種別を何らかの方法で分類し、表層地盤における地震動の増幅特性を設計に反映させている。その具体的な方法としては、地盤の固有周期や、平均 S 波速度を用いることが多い。例えば NEHRP¹⁾では表層 30m の平均 S 波速度である Vs30 によって地盤種別の分類を行っている。Mahdyiar²⁾は、NEHRP に準じた Vs30 によるサイト増幅特性を Los Angeles 地区に適用した結果、盆地構造の端部における大きな増幅を NEHRP では説明できないものの、それ以外の部分においては概ね Vs30 によって増幅率を説明できることを示した。

臨海部埋立地盤の地震危険度を評価する際に、入力地震動レベルに応じた地表面震度が簡易に推定できれば、シナリオ地震に対する被害程度予測などが飛躍的に容易に行える可能性がある。港湾基準³⁾では震度は地表面加速度最大値 (PGA) をもとに評価する。すなわち、PGA が大きいほど震度は大きいと判定されるわけであるが、実際には軟弱地盤に強い地震動が作用した場合、地盤に大きなせん断ひずみが発生するために PGA は大きな値とならないケースがあることはよく知られている。このため本研究では、地表面速度最大値 (PGV) を用いて地震危険

度を評価する。また、地震危険度を表す指標としては、護岸の変形量に着目した検討を行う。

このためまず、全国で観測された強震アレー観測記録などをもとに標準的な卓越周波数特性を有する 23 波形を抽出して、入力加速度最大振幅を 100,200,300,400Gal に調整した地震応答解析を実施した。地盤モデルは Vs30 の異なるモデル地盤を 20 ケース設定した。この結果により、軟弱地盤の Vs30 と速度増幅率の相関関係を求めた。

次に、3 水深、6 地盤種別、3 設計震度の岸壁をモデル化した 2 次元非線形地震応答解析と 1 次元等価線形地震応答解析を実施し、2 次元モデルによる護岸変形量と 1 次元モデルによる PGV を比較し、両者の相関関係を求めた。最後に、2 つの相関関係を用いて、Vs30 の値をもとにして、水深・設計震度・入力加速度最大振幅別の地震危険度を表すチャートを作成した。

2. 平均 S 波速度と地震動増幅特性の相関

(1) モデル地盤

地盤の S 波速度構造が耐震安全性に及ぼす影響を考慮するため、地表面より 60m の深さまでの S 波速度構造を図-1 に示すように 20 種類設定した。検討対象地盤の平均 S 波速度は図-2 に示すとおりである。深さ x(m)までの平均 S 波速度 Vs_x は、走時で重み付けした値であり、式(1)により定義される。

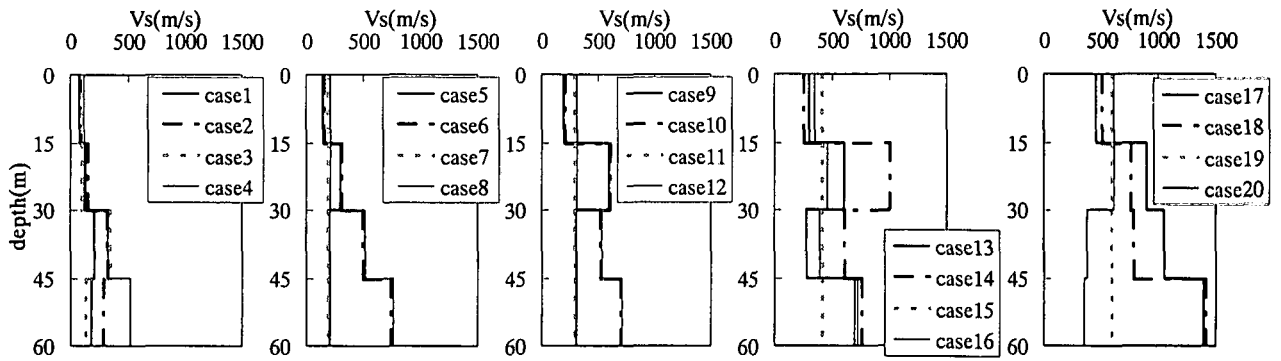


図-1 S波速度構造

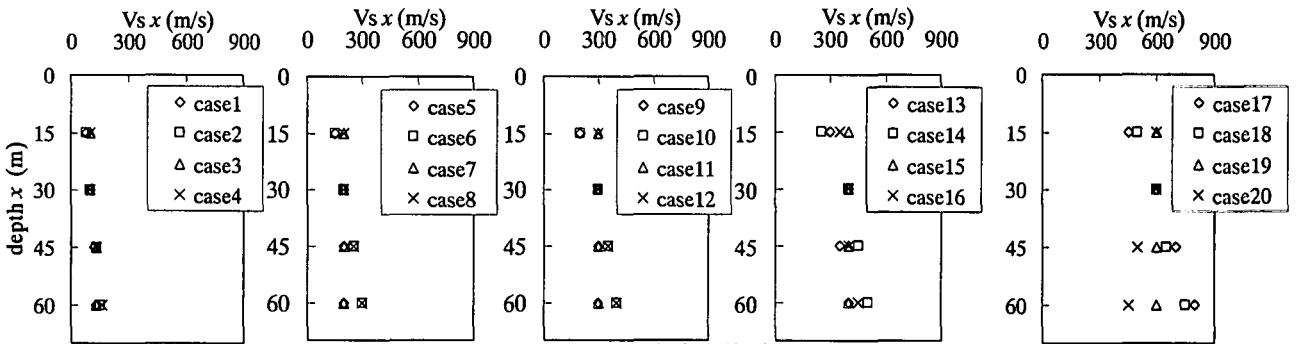


図-2 平均S波速度構造

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

ただし、

$$\sum_i H_i = x$$

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)

検討対象地盤の V_{s30} は 100~600m/s の範囲にあり、同じ V_{s30} の値を持ちながら S 波速度構造の異なる地盤を 4 種類ずつ設定したことになる。なお、-60m 以深の S 波速度は 800m/s とし、全ケース共通とした。

(2) 地震応答解析方法

検討に用いた波形は、基盤強震観測網 kik-net および港湾地域強震観測網において観測され、公表されている鉛直アレー記録のうち、基盤において観測された波形を中心にして、さらに耐震設計で用いられる模擬地震動を加えた。検討にあたり、上記の波形より加速度最大振幅の大きな 432 波形を抽出した。抽出波形のうち基盤において観測された波形の加速度最大振幅は、22.5Gal~262.1Gal であった。抽出波形の卓越周期を読み取り、この卓越周期分布が変化しないようにこのうちの 23 波形を選定し、以後の検討を行った。検討対象波形の卓越周期の相対頻度分布を図-3 に示す。

地震応答計算は 1 次元重複反射理論に基づくプロ

グラム Dyneq⁴⁾ を使い、-60m の深さから入力した。入力地震波形を加速度最大値が 100, 200, 300, 400Gal となるように調整して 2E として入力した。地盤モデルは層厚を 5m 刻みとし、地盤の非線形特性は図-4 に示す通りとした。図中の σ_m は有効拘束圧である。

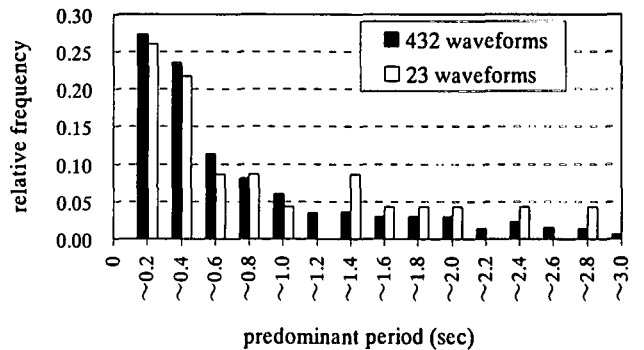


図-3 入力地震動頻度分布

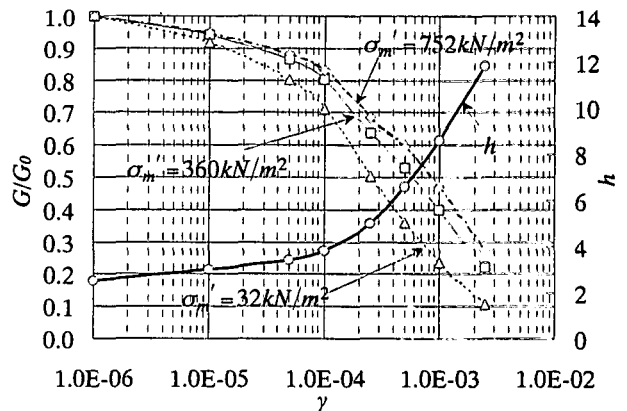


図-4 地盤の非線形特性

(3) 解析結果

全ケースの解析より得られる加速度応答および速度応答を算出し、平均 S 波速度と加速度増幅率および速度増幅率の関係を検討した。平均 S 波速度と増幅率の関係に関する既往の研究としては、これまでに例えば速度増幅率について翠川⁵⁾、加速度増幅率について田村ら⁶⁾の研究がある。既往の研究による増幅関係式は式(2)、式(3)に示すとおりである。ただし、既往の研究式は、基盤入射振幅を実測値ではなく距離減衰式を用いて推定していることに注意が必要である。

$$v_{amp} = 68(Vs30)^{-0.6} \quad (2)$$

$$\log(a_{amp}) = -0.436 \log(Vs8) + 1.21 \quad (3)$$

ここに、

v_{amp} : 速度増幅率

a_{amp} : 加速度増幅率

図-5~図-7に、それぞれ Vs30 と平均速度増幅率、Vs8 と平均加速度増幅率、Vs30 と平均加速度増幅率の関係を示す。図中の◇などの記号は入力加速度最大振幅を表す。増幅率は、いずれも 23 波形の平均値である。それぞれ既往の関係式も重ねて示す。図-5に示した Vs30 と平均速度増幅率の関係式(2)は増幅率を過大に与える。特に、Vs30<400m/s の場合に差が大きい。本研究による Vs30 と平均加速度増幅率の関係は式(4)に示す通りである。

$$v_{amp} = -0.00108 \cdot Vs30 + 1.814 \quad (4)$$

次に図-6に示した Vs8 と平均加速度増幅率の関係については、関係式(3)は Vs8 が 300m/s 以上の範囲では、加速度増幅率の上限として精度良い結果を与えるものの、Vs8 が 300m/s 以下の範囲では過大な増幅率を与える。既往の関係式は臨海部埋立地盤について評価する指標として用いるのは不適當であることがわかる。また、図-7に示した Vs30 と平均加速度増幅率の関係では、同じ Vs30 の地盤でも増幅率にかなりばらつきがあることがわかる。

また、加速度増幅率については、Vs30<300m/s または Vs8<200m/s の場合は地盤が軟弱であるほど加速度増幅率が低下することが分かる。これは、地盤に大きなせん断ひずみが発生したためであり、同じ S 波速度構造でも入力振幅が大きくなるほどひずみが大きくなり、増幅率が低下することが分かる。この大きなせん断ひずみは例えば護岸の大変形をもたらす原因となる。港湾基準³⁾では PGA をもとに震度を算出するが、この結果は臨海部埋立地盤のような軟弱地盤では、加速度最大値は地震危険度を表す指標として必ずしも適切ではない可能性を示唆する。

そこで再び図-5 の速度増幅特性に目を転じると、Vs30<300m/s の軟弱地盤においても、地盤が軟弱であるほど速度が増幅している。臨海部埋立地盤では概ね Vs30 は 300m/s 未満である。このため、臨海部

埋立地盤の地震危険度を示す指標としては PGV の方が PGA よりも適しているといえる。しかしながら、PGV と地震危険度の定量的な相関関係に関する知見は皆無である。このため以下では、護岸変形量に着目して両者の定量的な相関関係を検討する。

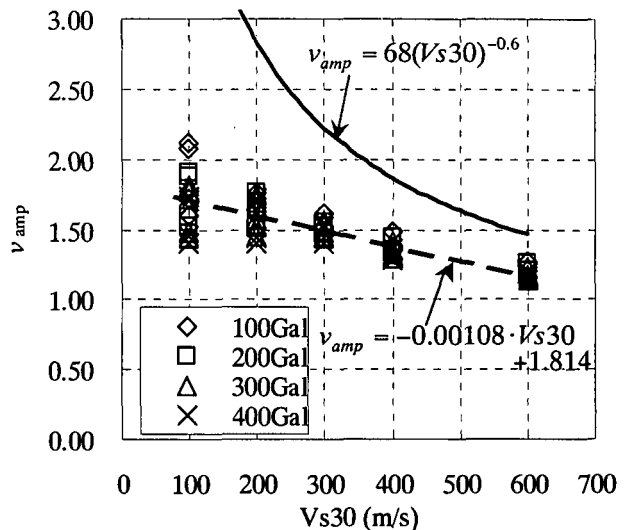


図-5 Vs30 と平均速度増幅率の関係

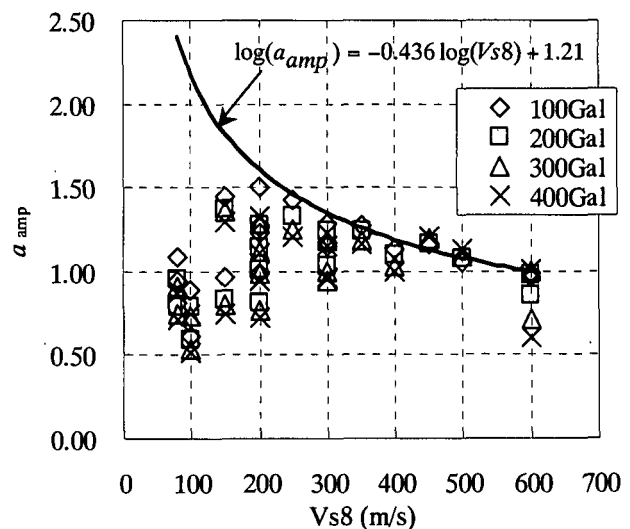


図-6 Vs8 と平均加速度増幅率の関係

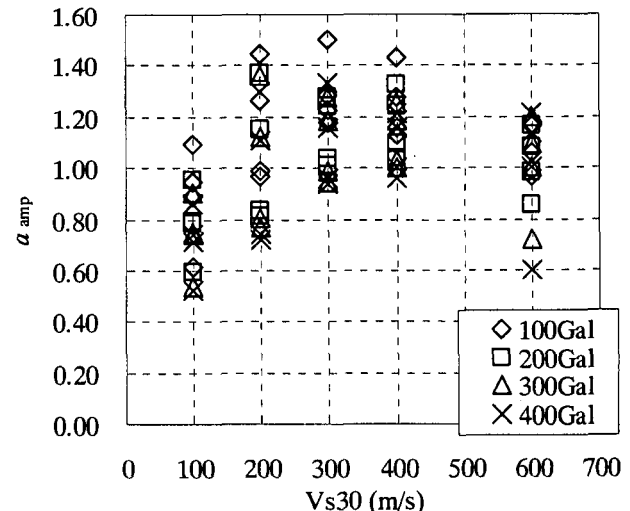


図-7 Vs30 と平均加速度増幅率の関係

3. PGV と地震危険度の相関

(1) 検討条件

図-8 に示すような重力式護岸をモデル化した2次元非線形地震応答計算を実施した。用いたコードはFLIP⁷⁾である。ここで、水深は-7.5m, -11m, -14.5mの3ケースとし、それぞれ設計震度0.10, 0.15, 0.20の3種類に対応した堤体幅を持つ護岸をモデル化した。さらに、背後地盤は、固有周期が0.6-1.2秒となるように表-1 に示す6ケースを設定した。入力地震動は八戸波とし、基盤入射最大振幅を100, 200, 350Gal とした。以上により検討ケースは全162ケースである。さらに、同じ条件で自由地盤部をモデル化した1次元地震応答計算をDyneqにより実施し、2次元解析により得られる護岸天端の水平変形量と1次元解析により得られるPGA(SMAC 加速度)、震度 k_h (野田, 上部らの式³⁾による)、PGVの相関性を水深-11mのケースについて調べた。ここに、SMAC 加速度とはSMAC型強震計の計器特性による加速度であり、震度算出時に用いられる。図-9 にPGAと変形量の関係を示す。図中の□などの記号は設計震度 k_{hd} を表す。PGAと変形量の相関性は低い。特に顕著であったのはcase2で、原地盤が軟弱であるため、2次元解析より得られる変形量は大きい、1次元解析より得られるPGAは小さな値をとる。図-10に震度比と変形量の関係を示す。相関性はPGAに比べやや良いものの、 k_h/k_{hd} が1.5以上であっても変形量が50cm以下となるケースが多く、現在の港湾基準の震度換算法では変形量は説明できない。この背景には、現行設計法で想定している破壊メカニズムと実際の破壊メカニズムとの違いに関する問題があると考えられる。すなわち、現行設計法では慣性力の作用によりケーソンが捨石マウンドの上を滑動すると想定するが、実際にはケーソンの水平変形はケーソン下部の地盤のせん断変形によって生じ、ケーソンと捨石の間の相対的な変形は生じない。このことは例えば兵庫県南部地震の際の神戸港岸壁においても実際に観察されている。

表-1 S波速度構造 (単位: m/s)

	case1	case2	case3	case4	case5	case6
埋土上層	120	210	180	210	210	300
埋土下層	120	210	180	210	250	300
原地盤上層	150	100	190	150	280	210
原地盤下層	150	100	250	270	450	300

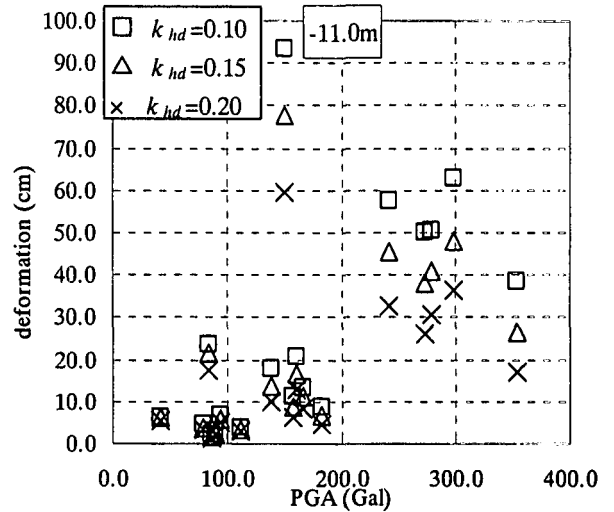


図-9 PGAと変形量の相関(水深-11m)

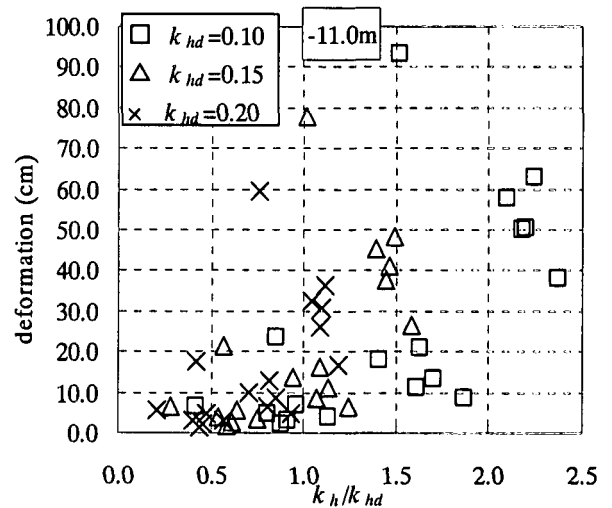


図-10 震度 k_h と変形量の相関(水深-11m)

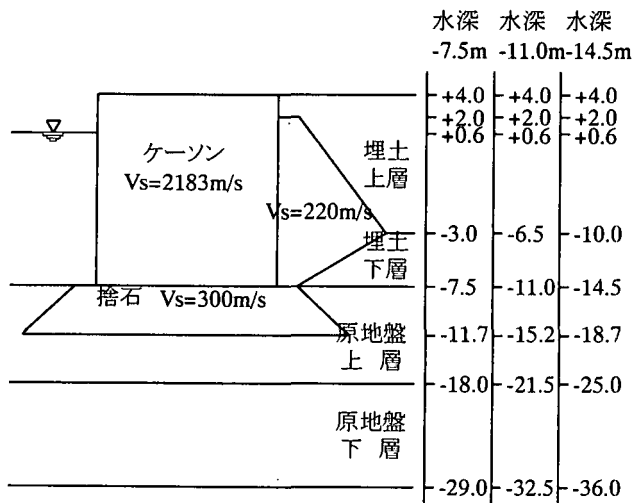


図-8 検討モデル地盤

図-11にPGVと変形量の関係を示す。変形量が大い範囲ではややばらつきが大きいものの、PGVと変形量には相関性がみられる。この理由は、PGVは軟弱な地盤ほど増幅率が大きな値をとるためである。各水深においても同様の傾向がみられた。以上より、PGVと各水深・設計震度での護岸天端変形量の関係を放物線で近似した。なおS波速度構造により変形量が大い領域でややばらつきが大いため、近似曲線はPGV>45kineとなる領域での変形量が平均的な値を与えるようにフィッティングさせている。

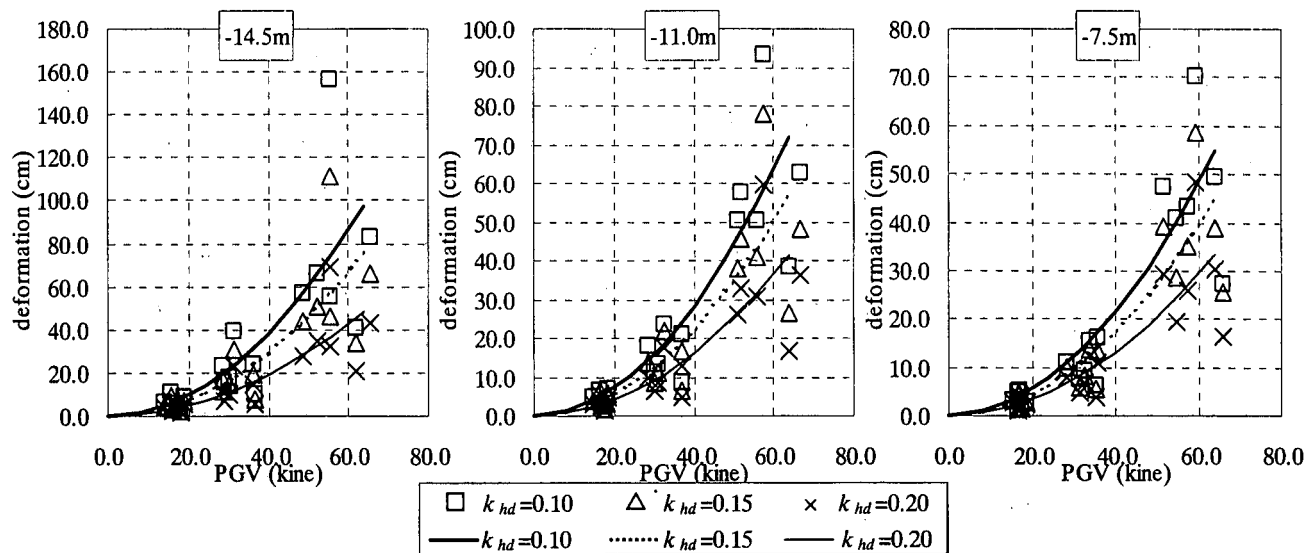


図-11 PGV と変形量の相関

4. 地震危険度の簡易評価法の開発

以上の検討結果を用いて、Vs30 と地震危険度の関係を示すチャートを作成した。地震ハザードは通常、年超過確率と基盤加速度最大振幅の関係で与えられるため、Vs30 と基盤加速度最大値の値から確率変形

量を推定できるチャートとしている。結果を図-12 に示す。このチャートを用いることにより、例えば水深-11.0m で設計震度 0.10 の護岸は Vs30<300m/s であっても設計震度の 2 倍の振幅である 200Gal の地震動の作用を受けても 50cm 以下の比較的軽微な被害にとどまる可能性が高いことなどが読み取れる。

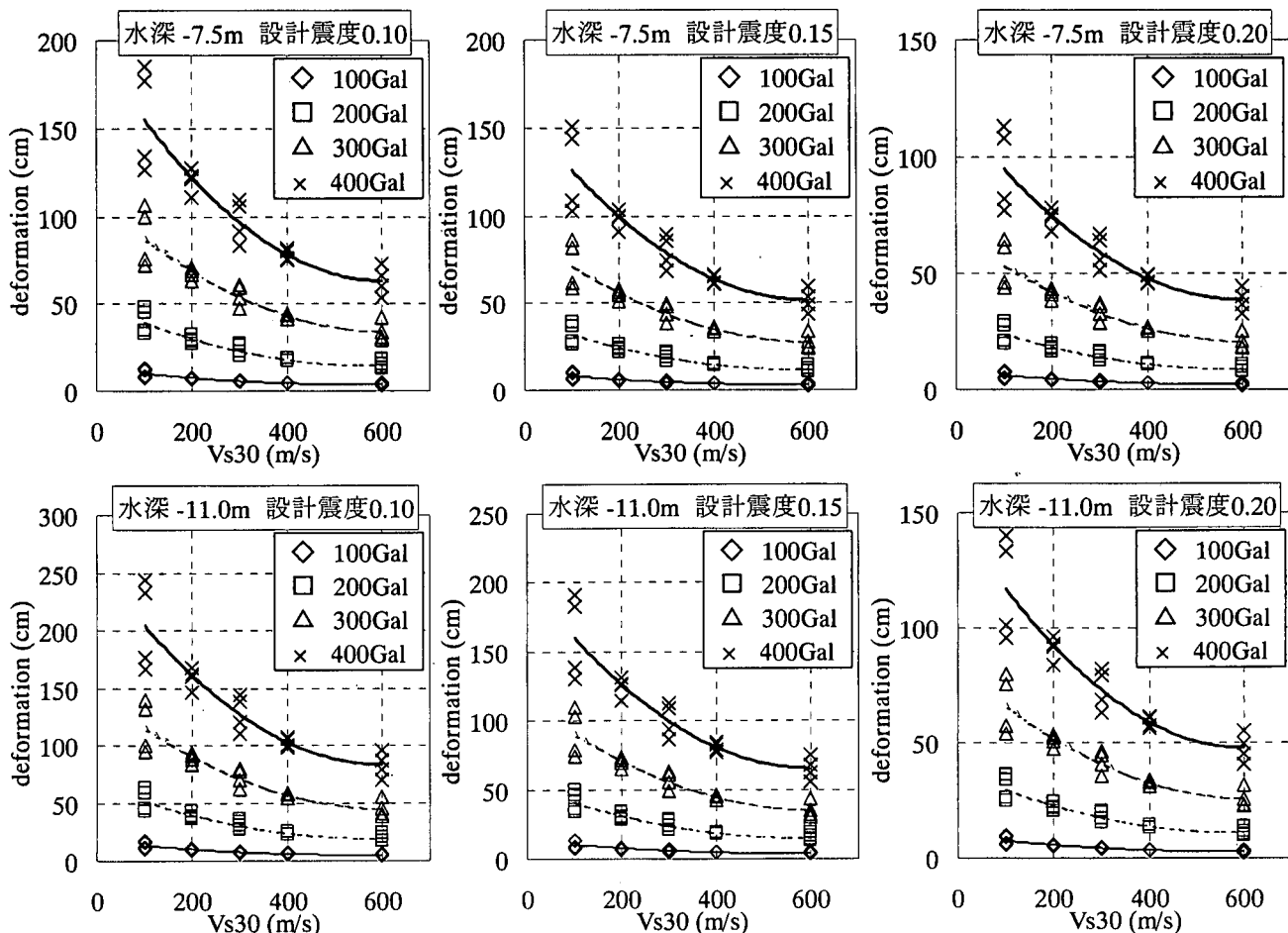


図-12 地震危険度判定チャート(その1)

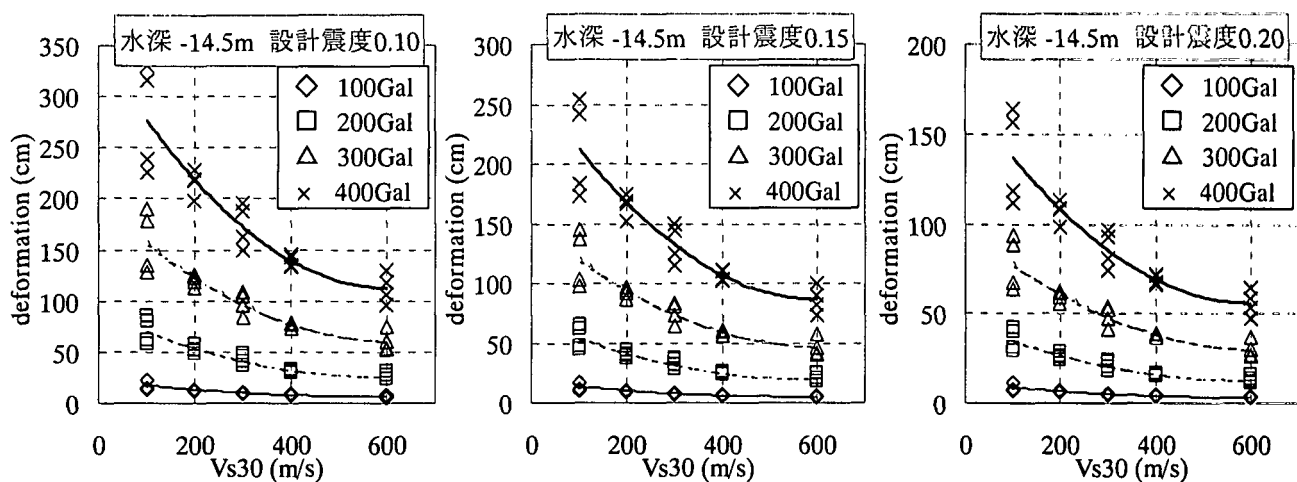


図-12 地震危険度判定チャート(その2)

5. おわりに

本研究による主要な結論は以下のとおりである。

- ① $Vs30 < 300\text{m/s}$ の臨海部埋立地盤に見られる軟弱な地盤では、強震時には地盤が軟弱であるほど PGA の増幅率は低下する。しかしながら、PGV は地盤が軟弱であるほど増幅率は増加する。このため、軟弱地盤の地震危険度評価指標としては PGA よりも PGV の方が適している。
- ② 重力式護岸を対象に、背後地盤 PGV と護岸変形量の相関性を検討した結果、両者は高い相関性を有することが分かった。このため、両者の関係を表す近似式を導入した。
- ③ 以上の結果を用いて、臨海部埋立地盤の地震危険度を簡易に推定する方法を開発した。

本研究で扱った以外の地震危険度としては、液状化危険度があげられる。今後は、液状化危険度についても同様な検討を進める予定である。

謝辞：本研究で用いた強震記録のうち、基盤強震観測網の記録については <http://www.kik.bosai.go.jp> より、また、港湾地域強震観測の記録については <http://www.eq.yokohama.go.jp> よりダウンロードした。

記録を用いた。本研究は運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の助成を受けて行ったものである。

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) Mahdyiar, M. : Are NEHRP and earthquake-based site effects in Greater Los Angeles compatible?, Seismological Research Letters, Vol.73, No.1, pp.39-45, 2002.
- 3) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会, 1999
- 4) 吉田 望, 末富岩雄：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996
- 5) 翠川三郎：関東平野を対象とした震度分布予測, 構造工学論文集, Vol.33B, pp.43-48, 1987
- 6) 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
- 7) Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990