

(54) 軟弱地盤における地震動の増幅特性に関する解析的検討

建設省土木研究所 大塚久哲

〇 “ 金子正洋

建設省北陸地方建設局 常田賢一

建設省道路局 田村敬一

1. まえがき

本研究では軟弱地盤における地震動の増幅特性について検討することを目的として、東京湾岸の埋立て地19地点を対象として統一的に基盤を設定した上で地盤の一次元地震応答解析を行い、最大加速度、最大変位並びに加速度応答スペクトルの地盤内増幅率を算出した。地震応答解析の入力地震動としては、地中もしくは岩盤上で得られた4種類の実測強震記録を最大加速度を3段階に変化させて使用した。各地点の地盤条件は地盤の特性値で代表させることとし、上記の地震動増幅率に及ぼす地盤の特性値、入力地震動レベル等の影響について系統的に検討した。また、設計技術基準類では同一の地盤種別に区分されるものの、地盤の特性値が異なる地点における加速度応答スペクトルを比較することによりそれらの地点のスペクトル特性の差異について検討した。

2. 解析対象地点および入力地震動

解析対象地点は東京湾沿岸の埋立て地の19地点であり、図-1に位置を示す。解析に必要な地盤条件は、No.1~No.11 地点については参考文献<sup>1)</sup>をもとに、また、No.12~No.19地点については東京都港湾局より御教示頂いた資料<sup>2)</sup>をもとに設定した。なお、地点の選定に当っては、埋立て地造成年代<sup>3)</sup> および埋立て地盤分類<sup>4)</sup>を参照し、幅広い地盤条件の地点が含まれるよう配慮した。表-1には解析対象地点の基盤深度および地盤の特性値を示す。ここで、基盤面は、せん断波速度が300m/s以上、もしくは、N値が50以上の地層の上面とした。また、地盤の特性値 $T_G$ [s]は式(1)により算出した<sup>5)</sup>。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{s1}} \quad (1)$$

ここで、

$H_i$  : i 番目の地層の厚さ[m]

$V_{s1}$  : i 番目の地層のせん断波速度[m/s]

なお、表-1に示すように、解析対象地点の大部分は、道路橋示方書耐震設計編の地盤種別では、 $T_G \geq 0.6$ [s]のⅢ種地盤に属する。

地震応答解析では基盤面から地震動波形を入力したが、入力地震動としては表-2に示す4種類の強震記録を用いた。ここで、土木研究所構内の記録は、せん断波速度約400m/sの洪積砂

表-1 解析対象地点の一覧

番号	地点名	基盤深度 $D_b$ (m)	地盤の特性値 $T_G$ (s)
1	夢の島	53.0	1.64
2	江東区東雲一丁目	55.5	1.77
3	中央区晴海一丁目	33.0	1.23
4	中央区勝どき五丁目	17.0	0.46
5	中央区月島四丁目	32.5	0.69
6	港区港南三丁目	18.5	0.60
7	品川区東品川三丁目	21.5	0.81
8	勝島運河	18.5	0.43
9	平和島一丁目	26.5	0.55
10	昭和島	18.0	0.49
11	羽田空港	23.0	0.61
12	十五号地	62.5	1.83
13	中央防波堤	51.5	1.62
14	鉄嶺埠頭	43.5	1.13
15	十三号地	67.5	1.64
16	品川区八潮	32.5	0.99
17	大田区東海	52.0	1.63
18	城南島	68.0	2.18
19	京浜島	46.5	1.31

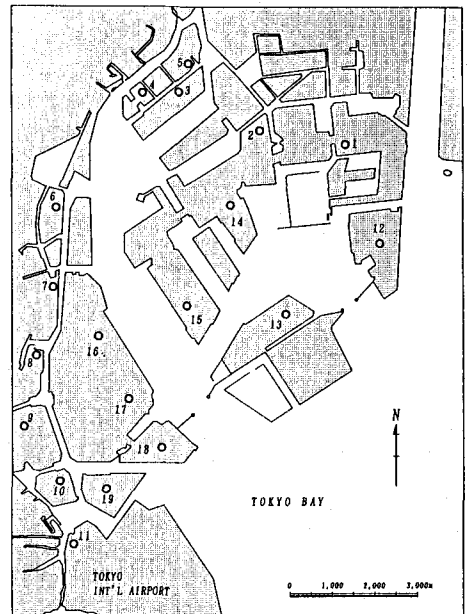


図-1 解析対象地点の位置

礫層中の地中地震記録であり、他の3記録は岩盤上で観測されたものである。地震応答解析では、いずれの記録についても図-2に示す主要動部分の20秒間を使用することとし、また、基盤面上の最大加速度を50、100および150galの3種類に変化させた。なお、入力地震動の選定に当っては種々の周期特性を有する強震記録が含まれるように配慮した。地盤の地震応答解析には一次元の重複反射理論に基づく解析プログラムSHAKEを使用した。地盤の非線形性は等価線形化手法により考慮し、土の動的変形特性は、砂質土については参考文献<sup>6)</sup>、沖積粘性土については<sup>7)</sup>、洪積粘性土については<sup>8)</sup>によるものとした。

### 3. 最大加速度および最大変位の増幅特性

地盤内の最大加速度の増幅特性を検討するために、最大加速度の増幅率 $\alpha_a$ を式(2)で定義する。

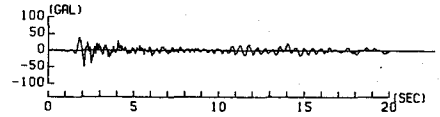
$$\alpha_a = a_s / a_B \quad (2)$$

ここで、 $a_s$  [gal]および $a_B$  [gal]は、それぞれ、地盤の地震応答解析から求めた地表面における最大加速度および基盤面における最大加速度(入力最大加速度)である。図-3に地盤の特性値 $T_G$ と $\alpha_a$ の関係を入力地震動レベル150galについて示す。同一地点でも入力地震動の種類により $\alpha_a$ は若干変動するが、全体としては、同一の入力地震動レベルの場合には $T_G$ が長いほど、 $\alpha_a$ は低下する。すなわち、本解析で対象とした $T_G \geq 0.45$  [s]程度の地盤では、基盤面での加速度レベルが同じであっても、軟弱な地盤ほど地表面での最大加速度は小さいことになる。また、同じ地点でも入力地震動レベルが高くなるにしたがい、 $\alpha_a$ は低下する。これは、地盤の非線形性に起因するものと考えられる。

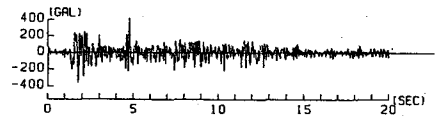
次に、地盤内の最大変位の増幅特性を検討するために、加速度波形より数値積分により算出した変位波形

表-2 入力地震動の一覧

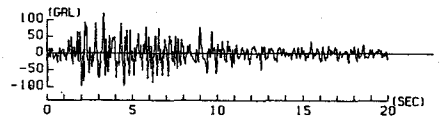
番号	記号	記録地点	地震発生年月日	地震名	マグニチュード	震央距離 (km)	成分
1	PWRI-28	土木研究所構内 (GL-46m)	1983.2.27	茨城県南部	6.0	22	N-S
2	KAIHOKU	開北橋	1978.6.12	宮城県沖	7.4	83	TR
3	KANNON-ZAKI	観音崎	1987.12.17	千葉県東方沖	6.7	69	N-S
4	RINCON	リンカーン・ヒル	1989.10.17	ロマ・プリエータ	7.1	95	N-S



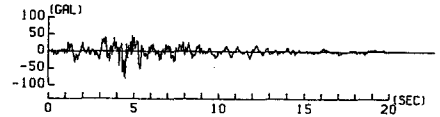
(a) 土木研究所, EQ-28



(b) 開北橋



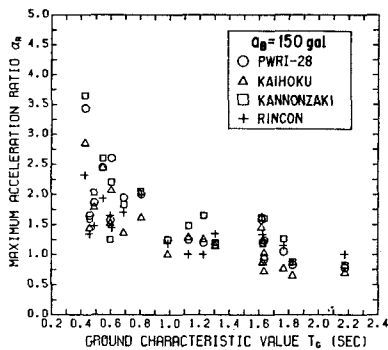
(c) 観音崎



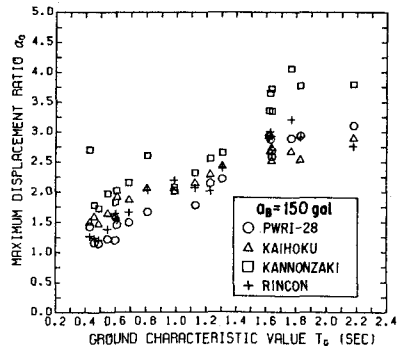
(d) リンカーン・ヒル

図-2 入力地震動波形(解析対象区間)

図-2 入力地震動波形(解析対象区間)



(c) 150gal入力



(c) 150gal入力

図-3 最大加速度の増幅率

図-4 最大変位の増幅率

をもとに、最大変位の増幅率を $\alpha_d$ を式(3)で定義する。

$$\alpha_d = d_s / d_B \quad (3)$$

ここで、 $d_s$ [cm]および $d_B$ [cm]は、それぞれ、地表面および基盤面における最大変位である。図-4に $T_G$ と $\alpha_d$ の関係を入力地震動レベル150galについて示す。図-4より、 $\alpha_a$ の場合とは反対に $\alpha_d$ は $T_G$ が長いほど増加することがわかる。また、入力地震動レベルが高くなるに従って、 $\alpha_d$ は低下するが、その低下の度合いは $\alpha_a$ の場合ほど顕著ではない。

#### 4. 加速度応答スペクトルの増幅特性

最大加速度、最大変位と並び、工学的には加速度応答スペクトルが地震動特性を表す指標として重要である。加速度応答スペクトルの地盤内増幅特性を検討するために、各固有周期 $T$ ごとに次式に示す加速度応答スペクトルの増幅率 $\gamma(T)$ を定義した。

$$\gamma(T) = S_S(T, 0.05) / S_B(T, 0.05) \quad (4)$$

ここで、 $S_S(T, 0.05)$ [gal]および $S_B(T, 0.05)$ [gal]は、それぞれ、地表面および基盤面における固有周期 $T$ [s]、減衰定数0.05の加速度応答スペクトルである。ここで、各固有周期ごとに4入力地震動記録に対する $\gamma(T)$ の平均値および標準偏差を求めると、図-5に示すようになる。 $\gamma(T)$ の平均値に注目すると、ピーク値は、入力地震動レベルが増加するに従ってピーク値が低下しており、この傾向は、最大加速度の増幅特性と整合するものである。また、 $\gamma(T)$ の平均値がピークを示す固有周期は、入力地震動レベルの増加に伴い、長周期側に移行している。これは、地震動レベルが高い場合には地盤的非線形性により地盤が長周期化するによるものと考えられる。

#### 5. 軟弱地盤上の加速度応答スペクトル特性

現行の多くの設計技術基準類では、一般に軟弱地盤は細分化せずに一つの区分としている。例えば、道路橋示方書耐震設計編では、地盤の特性値 $T_G$ [s]に応じて、 $T_G < 0.2$ をI種地盤、 $0.2 \leq T_G < 0.6$ をII種地盤、 $0.6 \leq T_G$ をIII種地盤の3種類に地盤条件を区分しており、III種地盤の範囲が広く設定されている。近年、湾岸部の埋立て地を始めとする極めて軟弱な地盤上に構造物が建設される事例が増加してきたことにも鑑み、軟弱地盤における設計用入力地震動特性、地盤条件の細分化の必要性の有無について検討することが必要とされる。このような見地から、以下では地震応答解析結果をもとに、特に軟弱な地盤に対する地盤条件

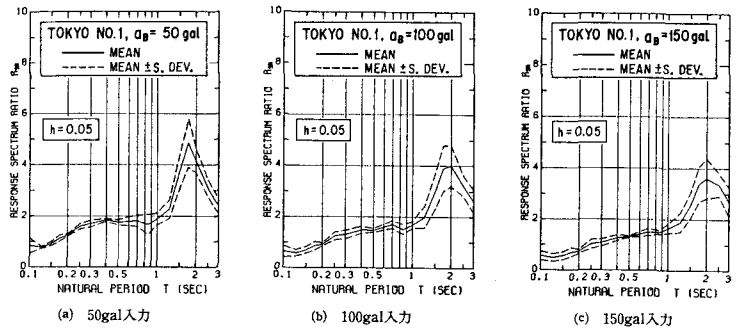


図-5 加速度応答スペクトル比の平均値および標準偏差 (No.1地点)

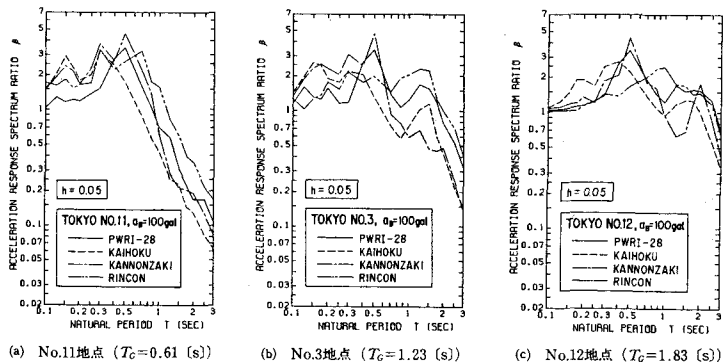


図-6 加速度応答スペクトル倍率

の違いが地表面上の加速度応答スペクトル特性に及ぼす影響について考察する。

図-6は、No.11地点、No.3地点およびNo.12地点の地表面上の加速度波形から算出した減衰定数0.05の加速度応答スペクトル倍率(=加速度応答スペクトル/最大加速度)を示す。ここで、基盤面上における入力最大加速度はいずれも100galである。これら3地点の地盤の特性値 $T_G$ は、No.11地点が0.61秒、No.3地点が1.23秒、No.12地点が1.83秒であり、道路橋示方書によればすべてⅢ種地盤に分類される。3地点の加速度応答スペクトル特性の差異は、特に固有周期1秒以上程度の長周期領域において顕著であり、No.11地点では当該周期領域でスペクトル値が急激に低下するのに対して、No.3地点では固有周期1.5秒付近から、また、No.12地点では固有周期2秒付近からスペクトル値が低下する。3地点における加速度応答スペクトルをそれぞれ短周期側ではスペクトル値一定、長周期側ではスペクトル値が固有周期に反比例するように、概ね包絡すると図-7のようになる。図-7より、 $T_G=1.23[s]$ のNo.3地点と $T_G=1.83[s]$ のNo.12地点とは著しい差はないものの、これらの2地点に比較して $T_G=0.61[s]$ のNo.11地点では加速度応答スペクトル特性が異なっていることがわかる。図-6および図-7の結果は、現行の設計技術基準では単一の地盤種別とされている軟弱地盤でもその軟弱さの程度により地震動特性が異なることを示唆しているものと考えられる。

#### 6. まとめ

本検討から得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 本解析で対象としたような軟弱地盤では、最大加速度の増幅率は地盤の特性値が長くなるに従い低下するのに対して、最大変位の増幅率は地盤の特性値が長くなるに従い増加する。最大加速度および最大変位の増幅率は、いずれも入力地震動レベルが高くなると低下する。これは地盤の非線形性に起因するものと考えられる。
- 2) 加速度応答スペクトルの増幅は、地盤の特性値付近の固有周期帯域で大きく、増幅率がピークとなる固有周期は入力地震動レベルが高くなると長周期側に移行する。これは地震動のレベルが高い場合には地盤の非線形性により地盤が長周期化することによるものと考えられる。
- 3) 現行の設計技術基準類では単一の地盤種別とされている軟弱地盤でも、地盤の特性値により加速度応答スペクトル特性には、特に長周期領域において差異が認められる。

#### 【参考文献】

- 1) 東京都土木技術研究所：東京都総合地盤図Ⅰ、技報堂出版、昭和52年
- 2) 清水恵助：私信、平成3年
- 3) 陶野郁雄、清水恵助：東京湾岸における埋立て地盤の地質工学的性質、地学的特性を考慮した地震動災害予測の研究、昭和55年
- 4) 清水恵助：東京湾の埋立地について—埋立地の地質学的考察—、地質学論集、第23号、昭和58年
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅴ耐震設計編、平成2年2月
- 6) 岩崎敏男、龍岡文夫、高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ)、土木研究所報告、153号の2、昭和55年3月
- 7) 岩崎敏男、常田賢一、吉田精一：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会、昭和55年6月
- 8) 横田耕一郎、龍岡文夫：不攪乱洪積粘土のせん断変形係数について、土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第3部、昭和52年10月

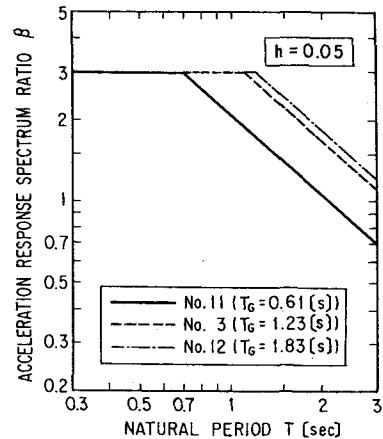


図-7 加速度応答スペクトル倍率と地盤の特性値