

強震記録に基づく地盤の振動特性と地動の 基礎への入力特性の検討

A STUDY OF GROUND RESPONSE AND FOUNDATION INPUT MOTION ON THE OBSERVED EARTHQUAKE RECORDS

石井 清*・山原 浩**・小山 和夫***

By Kiyoshi ISHII, Hiroshi YAMAHARA and Kazuo KOYAMA

1. はしがき

著者らは大型地下タンクの地震時挙動を把握することを目的として実在地下タンクにおいて地震観測を行っている¹⁾。この観測において1980年9月25日、千葉県中部で発生した地震の加速度波形を得た(表-1)。記録は地表において200 gal 近くあり観測を開始して以来最大の地震である。この記録と振幅レベルの小さい1978年宮城県沖地震を用いて、表層地盤の振動特性および地盤から基礎への入力特性²⁾について加速度レベルによる影響について基礎的な考察を行った。その結果を以下に紹介したい。また、観測記録には水平2成分(X, Y)があるが検討の結果、両方向とも結果にあまり差がないことから、ここではY方向のみの結果を示す。測定点および方向については図-1を参照されたい。

2. 表層地盤の振動特性

図-2に示されるように1980年千葉県中部地震の主要動はその継続時間がわずか2~3秒という衝撃的な地震である。これに対して1978年宮城県沖地震の記録は図-3に示すようにその最大振幅は地表で22.8 galと小さいが継続時間は長くなっている。これには地震のマ

表-1 千葉県中部で発生した地震
(1980年9月25日)

発生日時	1980年9月25日 2時54分
マグニチュード	M 6.1
発震地点	35°31'N, 140°13'E
震央距離	Δ 22.4 km
震源深さ	H 80 km
各地の震度	館山IV, 千葉IV, 東京IV

* 正会員 工修 清水建設(株) 大崎研究室 研究員

** 工博 清水建設(株) 大崎研究室 部長

*** 正会員 東京ガス(株)

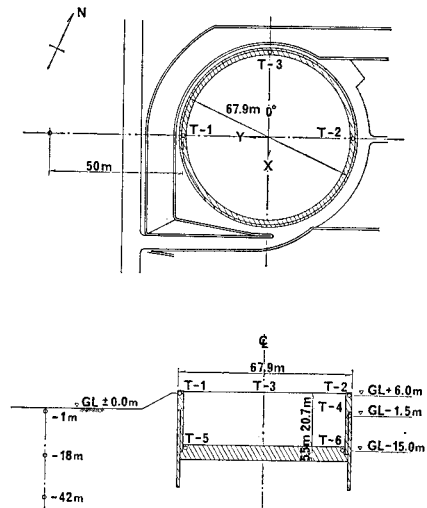


図-1 地下タンクの概形寸法と地震計の配置

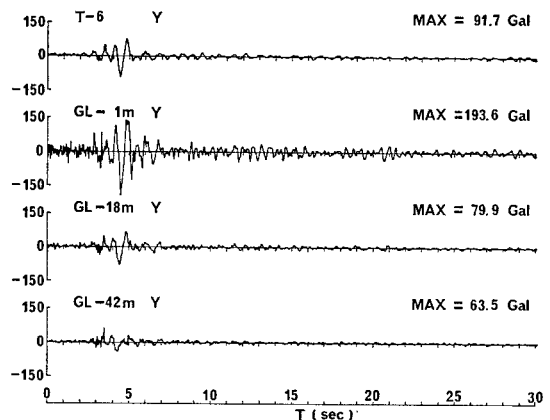
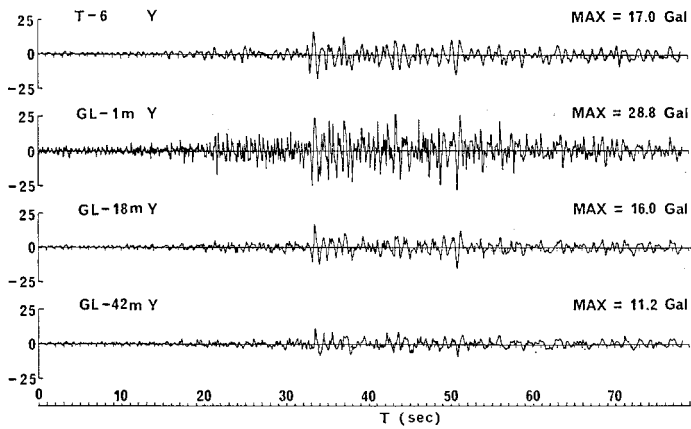


図-2 1980年千葉県中部地震の加速度観測波形

グニチュードと震央距離が大きく関係している。

表-2に地盤における最大加速度の値および計算より求めた最大速度の値を示す。また、表中のカッコ内の値は最大速度をその位置におけるせん断波速度で割った値



図—3 1978年宮城県沖地震の加速度観測波形

表—2 地動の最大加速度と推定最大速度

深 度	方 向	1978年宮城県沖地震 (1978.6.29)		1980年千葉県中部地震 (1980.9.25)	
		Acc. (gal)	Vel. (cm/s)	Acc. (gal)	Vel. (cm/s)
GL -1 m	X	23.0	3.65 (2.61×10^{-3})	182.4	22.7 (1.62×10^{-3})
	Y	22.8	4.46 (3.19×10^{-3})	193.6	25.5 (1.82×10^{-3})
GL -18 m	X	15.0	2.74 (6.85×10^{-3})	92.6	10.3 (2.58×10^{-3})
	Y	16.0	2.56 (6.40×10^{-3})	79.9	10.8 (2.70×10^{-3})
GL -42 m	X	—	—	113.5	7.32 (1.53×10^{-3})
	Y	11.2	2.49 (5.19×10^{-3})	63.5	6.72 (1.40×10^{-3})

() Vel./ V_s 値

であり、地動をせん断波動と考えたときの最大せん断ひずみに相当する。表からは1978年宮城県沖地震のひずみレベルが $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度とおおむね弾性範囲と考えられるのに対して、千葉県中部地震ではひずみレベルが $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のオーダーになっており、短い時間ではあるがそのひずみレベルが弾塑性域に入り、土の剛性が相当に下がった可能性があることがわかる。

次にひずみレベルによる地盤の影響を調べるために地

盤GL-42mとGL-1mの周波数応答倍率曲線を求めた。結果を図—4に示す。

図からは宮城県沖地震による表層地盤の卓越振動数が1次1.7Hz、2次3.6Hz、3次5.6Hzとなっているのに対して、千葉県中部地震では1次1.5Hz、2次3.4Hz、3次5.7Hzとなっており、千葉県中部地震の1次の卓越振動数が小さくなっていることがわかる。

また、この卓越振動数の低下が完全に土の非線形性によるものと仮定すれば、表層地盤のせん断剛性は23%近く低下していることになる。

また、土のひずみを表—2の地中観測点3点の平均値で与えるならば、平均ひずみは宮城県沖地震で 1.45×10^{-4} 、千葉県中部地震で 7.43×10^{-4} となる。土質動力学の既往の研究例³⁾からはこれらのひずみレベルによる砂の剛性低下の差は30~40%と推定され、観測より得られた数値とおおまかには一致する。

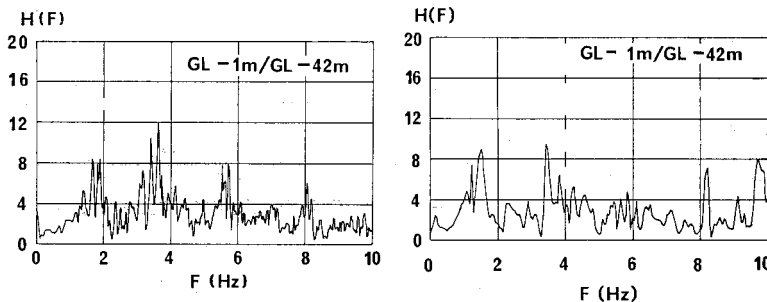
この点をさらに別の視点より調べるために、時間方向における表層地盤の周波数応答倍率曲線の変化を検討した。これは千葉県中部地震の記録が衝撃的な波形であることから、その主要動部分では卓越振動数の低下がみられるにしても、他の部分では中小地震の卓越振動数が卓越しているのではないかという考えによる。

ここで、時間 t における周波数応答倍率曲線は次式により定義した⁴⁾。

$$|H(\omega, t; W)| = |S_{xy}(\omega, t; W) / S_x(\omega, t; W)| \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $|H(\omega, t; W)|$ は時間 t における周波数応答倍率曲線、 $S_x(\omega, t; W)$ はMarkにより定義された物理スペクトラム (physical spectrum)、 $S_{xy}(\omega, t; W)$ は星谷により物理スペクトラムを拡張定義された非常相相互スペクトラムである。また、時間ウィンドウ W にはフィルター時間 $T_F=5$ 秒のガウス型ウィンドウを用いている。

図—5に計算結果を示す。ここで、横軸は時間、縦軸は振動数(0~10Hz)であり、図中のコンター(等高線)がGL-42mとGL-1mの波形の振動数成分ごとの振幅比を表わしている。図のコンターは2のピッチとなっている。いま、式(1)で定義される周波数応答倍率曲線が時間方向に変動しなければ



(a) 1980年千葉県中部地震

(b) 1978年宮城県沖地震

図—4 表層地盤 (GL-1m/GL-42m) の周波数応答倍率曲線

コンターは時間軸に平行な直線となる。実際の地震では図のコンターははるかに複雑になっている。しかしながら、図の (b) をよくみると 図-4 (b) の卓越振動数に対応して、1次 1.7 Hz, 2次 3.6 Hz, 3次 5.6 Hz 近辺において時間軸方向にほぼ連続した峰をたどることができる。また、図の (a) と (b) との比較では 1978 年宮城県沖地震の方が単純なコンターとなっている。

次に図の (a) より千葉県中部地震の主要動部分と他の部分の卓越振動数の違いについて検討してみよう。

1 次の卓越振動数に着目してみると、図からは 1 次の卓越振動数が 1~6 s の主要動にあたる部分では 1.5 Hz が中心となっているのに対し、それ以後の振幅レベルの小さい部分、たとえば 19~26 s では予想どおり中小地震と同じ 1.7 Hz 近辺が卓越振動数となっていることがわかる。このことから、図-4 (a) の 1 次卓越振動数の低下がこの主要動によるものであり、前後の振幅レベルの小さい部分は必ずしもこれに寄与していないということが判断できる。そして、この振動数の低下には当然地動の振幅レベルが大きく影響しているよう。

なお、上記の振幅レベルのほかにも以下に述べるような不確定な要素があることを指摘しておきたい。すなわち、千葉県中部地震はごく近距離で発生したことから、遠距離大規模地震の地動と比べればその波動の性質はより複雑になり、波動特性自体の問題や方向性たとえば斜め入射といった問題が入ってくる可能性がある。そして、これらの点を総合的に評価するためには GL-18 m の記録や他の方向成分の記録を含めた波動分析や地盤振動のシミュレーション解析が必要となる。これについてはさらに検討を進め、別に報告したい。

3. 基礎への地動の入力特性について

基礎上の地震観測波動には地表の観測波形と比べて短周期成分が大幅にカットされたものが多い^{2),5)}。これは地動の短周期成分の波動が基礎の各点で位相ずれ、振幅差をもって入射するのに対して、剛な基礎版がこれを幾何学的に拘束することによって生じる現象として説明されている。そして、この現象は地震波の入力機構の中でも、従来の動的相互作用 (Dynamic Interaction) とは異なる基礎版の幾何学的な相互作用 (Kinematic Interaction) として区別されている⁶⁾。

また、著者らの研究からは本地下タンクの場合には後

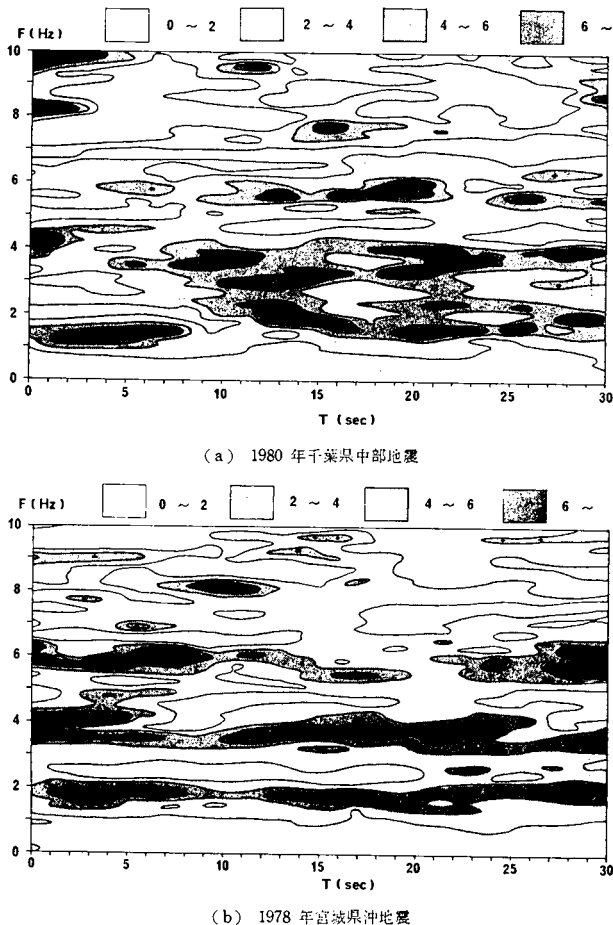


図-5 表層地盤 (GL -1 m/GL -42 m) の周波数応答倍率曲線の経時変化

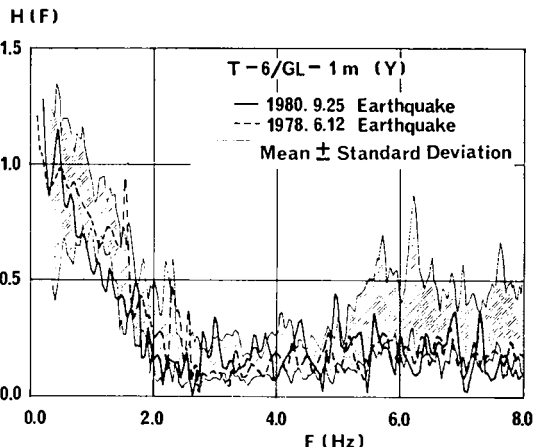


図-6 基礎底版と地盤 (GL -1 m) との周波数応答倍率曲線

者の効果が基礎の剛体的な動きを決める大きな要素となっていることが指摘できる²⁾。本章では前章と同様に振幅レベルによる地動の地盤から基礎への入力特性の変動

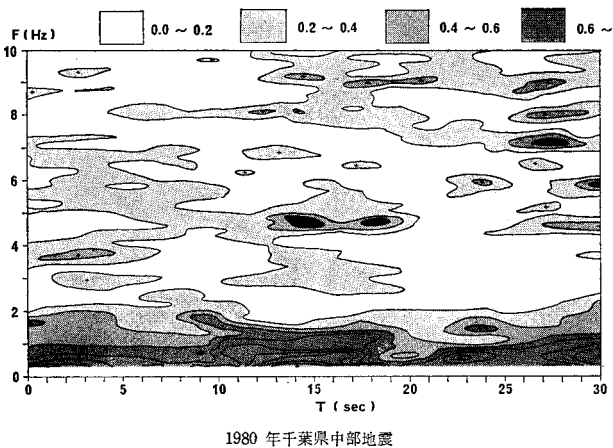


図-7 基礎/地盤 (GL -1 m) との周波数応答倍率曲線の経時変化

について先の2地震を用いて検討する。

図-6には地動の地盤から基礎への入力特性をみるためにタンク底版水平動と地盤 (GL -1 m) 水平動との周波数応答倍率曲線を示した。図の実線が今回の千葉県中部地震、破線が1968年宮城県沖地震である。また、同図には地震による振幅比のばらつきを示すためにデータのそろった11の中小地震の伝達関数の平均値±標準偏差の領域を示している。図からは千葉県中部地震の結果が2.5 Hz近辺でわずかに小さくなることを除けば両者の結果に大きな差はない。

さらに前章と同様に周波数応答倍率曲線の時間方向の変動を千葉県中部地震について求め、図-7にマッピングした。図の振動数軸はデータ解析上の精度より0.0~0.3 Hzの振動数を無視している。図からはコンターの時間方向の変動は小さく、波形の振幅レベルが大きくなる時間 $t=4\sim 6$ 秒周辺においても大きな変化はないことがわかる。これより、地動の地盤から基礎への入力特性には地動の振幅レベルによる影響は小さいことがわかる。

4. 結 論

本報告では1980年9月25日千葉県中部で発生した地震と1978年宮城県沖地震の2つの観測波形を用いて、その比較検討より地盤の振動特性および地動の基礎への

入力特性について検討を行った。結果はほぼ常識どおりといえる。すなわち、地盤振動についてはGL -42 m と GL -1 m の応答倍率曲線からは千葉県中部地震について1次の卓越振動数に低下があることがわかった。また、この低下が地震の主要動で著しいことなどを確認した。これらの性質は地盤の非線形性を考えることによって説明づけられる。しかし、9月25日の地震がごく近距離で発生した地震のため、波動の性質、斜め入射の可能性などさらに詳細に検討する必要がある。

また、地動の基礎への入力特性については地盤 (GL -1 m) と基礎底版水平動の周波数応答倍率曲線より検討したが、2つの地震の間で大きな差は見出し得なかった。また時間方向の変動は小さく、地動の基礎への入力特性は入力地動の振幅レベルにあまり依存していないことがわかった。

なお、上記の結論は1978年宮城県沖地震と1981年千葉県中部地震の2地震の記録を用いた検討結果であり、GL -18 m また、他の中小地震についても結果に整合性があるかについては今後の研究課題としたい。

最後に本地震観測において東京ガス(株)、石川島播磨重工(株)ならびに清水建設(株)の関係者の方々の多くのご支援、ご協力を得たことを記して感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 竹脇尚信・倉橋君夫・中根 新・石井 清: 地下タンクの地震応答解析と地震観測, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 985~992, 1978.11.
- 2) 石井 清・山原 浩: 大型地下タンクの実測データに基づく地震波の入力損失の検討, 日本建築学会論文報告集, 312号, 1982.2.
- 3) 石原研而: 土質動力学の基礎, 第7章, 7.5 変形定数のヒズミ依存性(図7-51), 鹿島出版会, p. 197, 1978.
- 4) 星谷 勝: 多次元非定常確率過程の相互スペクトルとシミュレーション解析, 土木学会論文報告集, 第253号, pp. 29~35, 1976.9.
- 5) 石井 清: 設計用の入力損失フィルターの提案, 清水建設研究所報, Vol. 34, 1980.10.
- 6) Kausel, E., R.V. Whitman, F. Elsasabee and J.P. Morray: Dynamic Analysis of Embedded Structures, Trans. of the 4th SMIRT, Vol. K(a), K2/6, Aug. 1977.

(1981.6.8・受付)