

(56) 軟弱地盤を利用した免震効果の可能性について

電源開発(株) 正員 有賀 義明

【1】 まえがき

都市の再生・活性化、新しい都市空間の創造等をテーマに、最近では、ウォーターフロント開発等、さまざまな開発構想が提案されているが、臨海域平野部の開発利用は、将来的にも、進展して行くことが予想される。我が国の臨海域平野部の表層地盤は、第四紀沖積地盤、埋立地盤等により構成されていることが多く、基本的には、臨海域平野部の地盤構成を「表層の軟い地盤＝基部の硬い地盤」の二層構造として解釈することが可能であろう。また、図-1に示したように、臨海域軟弱地盤の表面を硬質の人工地盤で被覆して利用する場合には、「人工硬質地盤＝軟弱地盤＝基礎地盤」の三層構造として捕えることが可能であろう。このように、硬い地盤の間に軟い地盤が介在する地盤構造では、地下に介在する軟い地盤が、一種のダンパーとしての役割を果たす可能性があるものと推察される。以下、本稿では、軟弱地盤の表層を、硬質の人工地盤で被覆することによる、軟弱地盤を利用した免震効果の可能性について検討した結果を紹介する。

【2】 軟弱地盤を利用した免震構造

2.1 人工硬質地盤による被覆効果

軟弱地盤は、荷重を受けた際に変形しやすくまた、強度が低いために破壊しやすいという力学的特徴を持つ。そのため、軟弱地盤に対しては、沈下対策、支持力・安定対策、地震時対策等の、さまざまな改良目的に応じた、数多くの地盤対策工法が提案されている。ところで、硬い人工地盤で軟弱地盤の表面を被覆するということは、軟弱地盤に対して、既存の軟弱地盤対策工法としての、表層被覆工法・表層載荷工法・表層固化工法を複合的に施工するのと等価な効果を及ぼすものと考えることができよう。すなわち、軟弱地盤の表面を硬質の人工地盤で被覆することにより、静的には、図-2に示したように、構造物建設前の圧密の促進、構造物建設後の残留沈下量の低減、圧密の進行に伴う軟弱地盤の強度増加の促進、すべり破壊の抑制、構造物基礎面での支持力の確保、軟弱地盤に作用する構造物荷重の分散、トラフィカビリティーの確保等を図ることができる。また、動的には密度・弾性波速度が小さく軟い地盤が、地下下方に介在する地盤構成となるため、地盤の動的応答特性の長周期化、波動エネルギーの吸収、地表部に建設された構造物に作用する地震力の低減等の効果を引出すことが可能になるものと推定することができる。

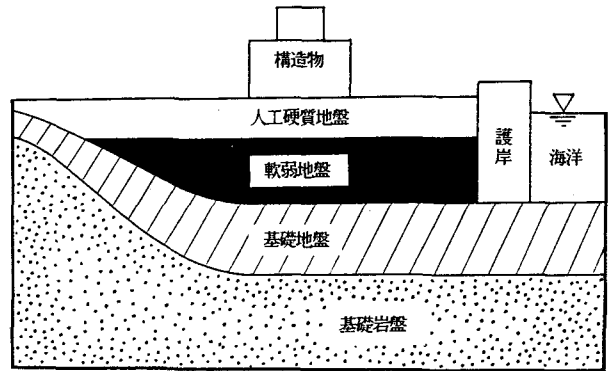


図-1 臨海軟弱地盤域の利用模式

【想定事例】 【対策工法との関連性】 【効果】

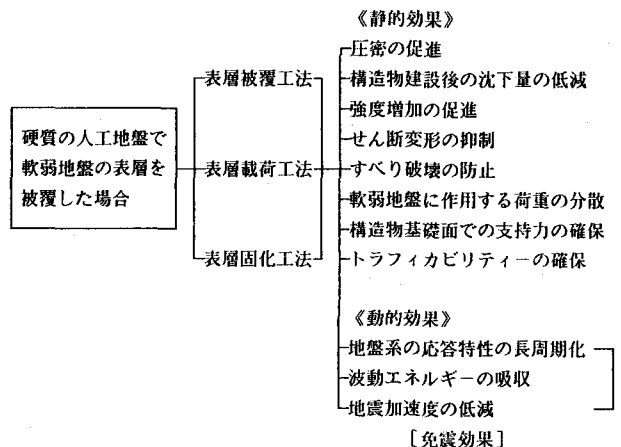


図-2 人工硬質地盤による被覆効果

2. 2 免震効果の可能性

地盤の中を地下下方から地表に向かって伝播する地震動の伝播特性は、地盤の波動インピーダンス（地盤の密度×せん断波速度）により支配的な影響を受けると考えることができる。すなわち、波動インピーダンスの大きい地盤（硬い地盤）から波動インピーダンスの小さい地盤（軟い地盤）へと伝播する時、地震動は増幅し、波動インピーダンスの小さい地盤（軟い地盤）から波動インピーダンスの大きい地盤（硬い地盤）へと伝播する時、地震動は減衰する。軟弱地盤の表面を人工の硬質地盤で被覆した場合の地盤構造は、極めて単純化すれば、図-3に示したような三層構造地盤モデルとして表現することができる。このように、上部に位置する地盤よりも、波動インピーダンスの小さい地盤が、地下下方に介在する場合には、地震動は、地下から地表へと伝播する際に減衰すると考えられ、重複反射理論に基づく数値計算では、これを確認する結果を得ることができた。このような現象に関して、概念的には、地下に介在する軟弱地盤を一種の免震材料として、また、「硬=軟=硬」の三層構造を一つの免震構造として解釈することが可能であろう。一般的な地盤・構造物系では、概ね1(Hz)～30(Hz)の周波数帯が、耐震安定性評価上、重要な解析対象となるが、この周波数領域に関しては、免震効果を期待することが、十分に可能であるように推定される。軟弱地盤を活用することによる地震力低減効果・免震効果の主な影響要因としては、地表面形状、地層構成、人工硬質地盤・軟弱地盤・基礎地盤の層厚・起伏形状・密度・S波速度・減衰特性・非線形性、地震動の周波数特性、構造物の固有周期等が考えられる。

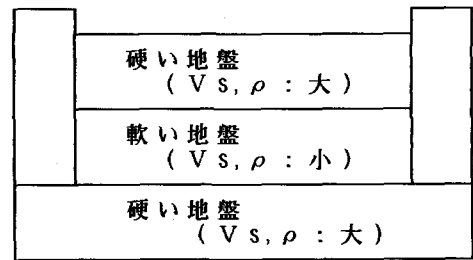


図-3 免震効果を有する地盤構造の例

【3】 数値解析による検討例

3. 1 解析対象

解析対象は、厚さ20mの軟弱地盤 ($V_s=50\text{m/s}$) の上部を、厚さ10mの人工硬質地盤 ($V_s=400\text{m/s}$) で被覆した仮想地盤を想定した。解析に使用した有限要素分割モデル（要素数756）は図-4に示すとおりである。境界条件は、側方境界・下方境界ともに粘性境界とした。

3. 2 解析用物性値

解析用物性値は、表-1に示した値を用いた。なお、第II層（軟弱地盤）に関しては、地震時の軟弱地盤内のひずみレベルをある程度想定し、せん断波速度、減衰定数の値を仮定した。

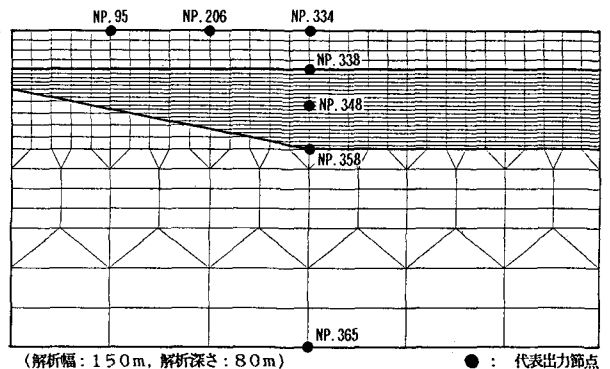
3. 3 解析用入力地震動

地震力の低減効果、免震効果は、短周期成分が卓越する地震動ほど顕著な傾向を示すが、本解析に用いた入力地震動は、軽水炉改良標準化耐震設計小委員会提示の標準用地震動の中から比較的長周期成分を多く含む、高地震地帯用：S1地震動 (M8.4, $\Delta=90(\text{km})$, 位相:TAFT EW $A_{\max}=286.15(\text{gal})$, 解析使用区間:0~20秒) を選定し、下方粘性境界の下端より入射した。

表-1 解析用物性値-A [免震効果検討例]

層NO	地盤種類	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	V_s (m/s)	減衰定数 (%)	ポアソン比 (ν_d)
I	人工地盤	10	2.0	400	5	0.42
II	軟弱地盤	20	1.5	50	12	0.46
III	基礎地盤	20	2.0	400	5	0.42
IV	基礎岩盤	30	2.0	700	3	0.40

注 1) 免震構造例、2) 層厚は解析モデル中心位置の値



(解析幅: 150m, 解析深さ: 80m)

図-4 有限要素分割モデル

3.4 解析コード

解析プログラムは“FLUSH”を使用し、解析は線形解析として実施した。

3.5 解析結果

最大加速度振幅の深度分布を図-5に示す。また、解析モデル中央深さ方向の代表点（節点NO. 334, 338, 348, 358）における加速度時刻歴を図-6に示す。両図より、軟弱地盤の表面を硬い人工地盤で被覆した場合は、第II層の軟弱地盤以深では、地震動の加速度が増幅傾向を示しているのに対して、第II層（軟弱地盤）以浅では、波動インピーダンスの小さい地盤から大きい地盤へと伝播することになるため、地震動の加速度は減衰することが分る。次に、解析モデル中央（節点334, 338, 348, 358）における速度応答スペクトル（減衰定数：5%）の比較結果を図-7に示す。ここに示した解析例では、概ね周期0.7秒付近を境として、第II層以浅での短周期成分の減衰が顕著であり、周期0.8~1.5秒付近の周期成分は増幅する結果となった。なお、第II層（軟弱地盤）のセン断ひずみの大きさは、層中間部で、約0.0035となった。

3.6 比較検討例

波動インピーダンスの小さい地盤が地下に介在するような地盤構造を実現した場合に、前述のように、地表部における地震動の加速度を低減させることが可能になると考えられるが、比較検討のために、第II層の解析用物性値を、表-2のように変更した場合の解析結果（解析ケース=B：比較検討例）を以下に紹介する。

表-2 解析用物性値-B [比較検討例]

層NO	地盤種類	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	減衰定数 (%)	ポアソン比 (νd)
I	表層地盤	30	2.0	400	5	0.42
	表層地盤					
III	基礎地盤	20	2.0	400	5	0.42
IV	基礎岩盤	30	2.0	700	3	0.40

注1) 比較検討例、2) 層厚は解析モデル中心位置の値

解析ケース=Bに関する、最大加速度振幅の深度分布を図-8に示す。また、解析モデル中央の代表点（節点NO. 334, 348, 358）における加速度時刻歴を図-9に示す。図-5と図-8の

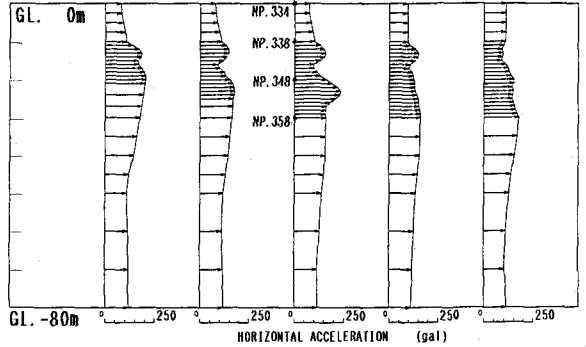


図-5 最大加速度の深度分布
[解析例-A：免震効果検討例]

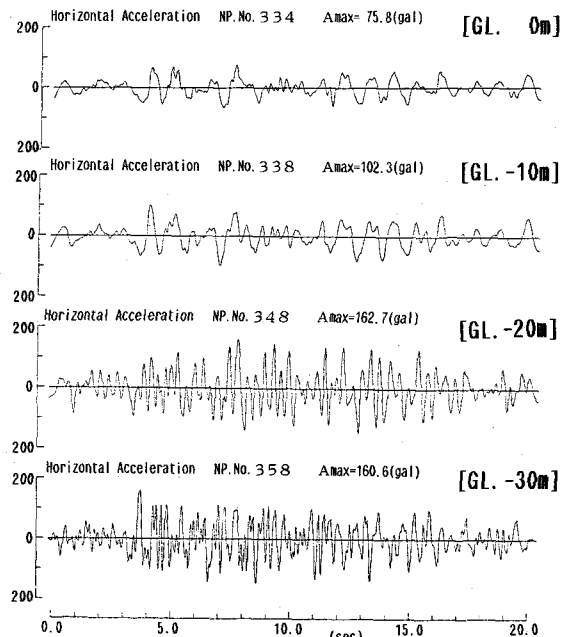


図-6 代表節点の加速度時刻歴
[解析例-A：免震効果検討例]

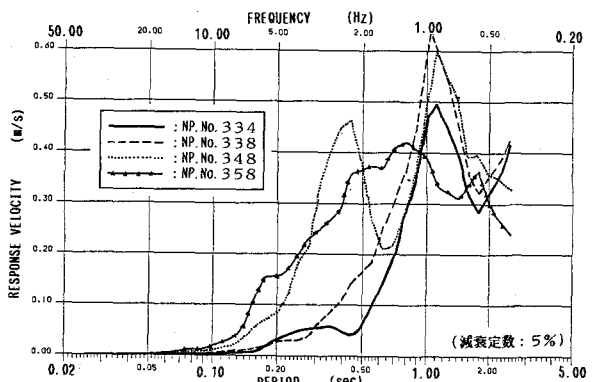


図-7 速度応答スペクトル
[解析例-A：免震効果検討例]

比較から、波動インピーダンスの小さい地盤を地下に介在させた場合には、地震動の加速度を大きく低減させることが可能であることを理解することができよう。因みに、解析モデル地表中央（節点334）での最大加速度は、第Ⅱ層を軟弱地盤として想定した解析例では、75.8(gal)であったのに対して（図-6参照）、地下に低波動インピーダンス帯を介在させなかった、解析ケース=Bでは234.9(gal)であった。最後に、図-10に、解析モデル地表中央（節点334）における速度応答スペクトル（減衰定数：5%）の比較結果を示す。地下に低波動インピーダンス帯を介在させることによる、短周期成分の減衰が顕著である。ただし、長周期成分に関しては、増幅する成分が派生してくるため、評価対象とすべき周期領域、重視すべき評価量を明確にしておくことが肝要と考えられる。

【4】 あとがき

数値解析による検討の結果から、耐震安定性の評価を行う上で、短周期成分の重要性が高い構造物系を対象とする場合は、軟弱地盤の表面を硬質の人工地盤で被覆することにより、自然地盤を活用した免震構造を実現することが可能であると考察することができた。今後、このような考えかたを実際の場に活用して行くためには、様々な検討が必要であると思われるが、主な検討課題としては、①地下に介在する軟弱地盤の力学的安定性、②地盤の長期変形、③最適な地盤の層厚比、波動インピーダンス比、④人工被覆地盤の適正厚さの検討、⑤長周期地震動に対する応答特性の検討、⑥上下動に対する応答特性の検討、⑦地震力低減効果・免震効果の実証等々があると思われる。

【参考文献】

1) 軟弱地盤ハンドブック編集委員会：土木建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック、建設産業調査会、1982。 2) 有賀義明：地下に低速度層が介在する地盤の地震動伝播特性、土木学会第43回年次学術講演会、I-473, pp996~997, 1988.10。

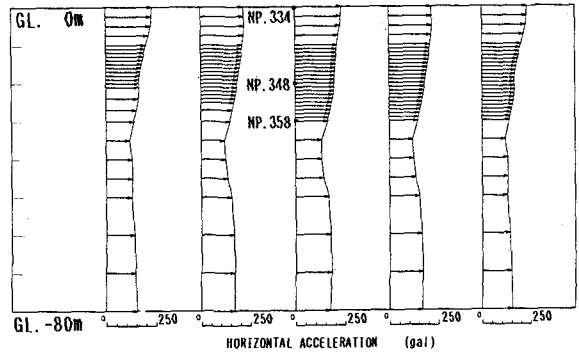


図-8 最大加速度の深度分布
[解析例-B：比較検討例]

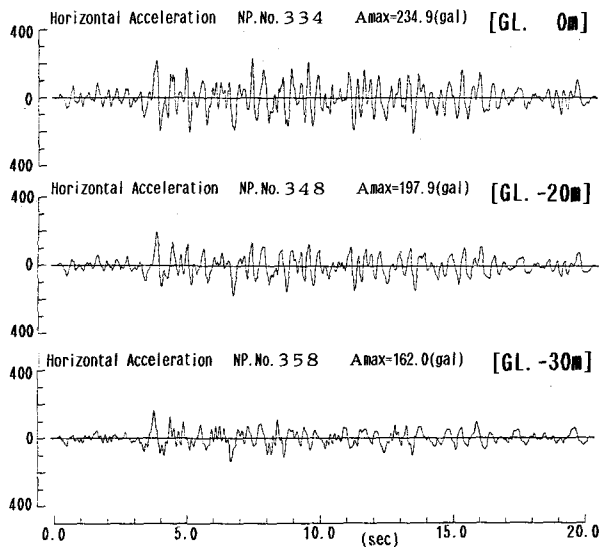


図-9 代表節点の加速度時刻歴
[解析例-B：比較検討例]

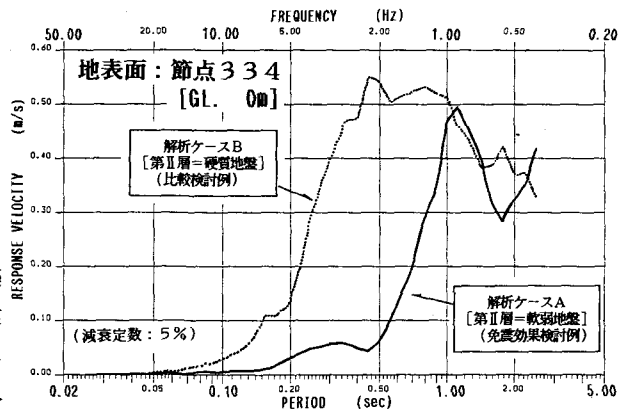


図-10 速度応答スペクトルの比較
[解析例-Aと解析例-B]