

(109) 地中埋設剛体構造物の地震応答特性に関する一考察

運輸省港湾技術研究所

正会員

風間基樹

〃

正会員

稲富隆昌

1. まえがき

近年、地下タンク、橋脚・橋合のケーソン基礎、深層混合処理工法による改良地盤の様に、周辺地盤に比較して剛性の著しく大きい構造物が地下に構築される例が多くなって来た。地下に埋設された剛構造物の特徴は、構造物の周面にも地盤が存在することであるが、周面の地盤は構造物に地震力を伝えると同時に構造物の振動を拘束する役割がある。すなわち、地中埋設剛体構造物の地震時挙動を検討するときは、地盤-構造物の動的相互作用が重要な課題となる。構造物の存在する地盤においては、図-1の様に構造物の存在の影響を強く受ける領域Aと受けない領域Bを考慮することが出来る。構造物と地盤の動的相互作用を考慮するためには、図-1の様な領域全体をモデル化し、動的解析を行えばよいが設計レベルにおいては、動的解析をおのおのの構造物-地盤系について実施するのは一般的でないと言える。地震観測結果によると、地中の剛構造物は周辺地盤に比較して地震応答が小さいこと、構造物周面の地盤の存在により回転成分が出て来ることが報告されている。原田らは、地中埋設剛体の地震応答の考え方を明らかにし、剛体の地震応答は構造物が地震動の場所的な位相ずれを拘束する効果(入力損失効果または有効入力と呼ばれている。)と構造物の慣性力の効果(ここでは質量効果と呼ぶ。)によって表現されることを示した。また、石井らは地下タンクの地震観測結果を用いて、前者の効果を実証的に説明し、さらにFEMによる感度分析で剛基礎の寸法や地盤定数、質量の効果などの様に応答に影響するかを調べている。本論の目的は、(1)簡易なモデルで解析解を求め、地中埋設剛体の地震応答特性を定性的に評価すること。(2)横浜港大黒埠頭における深層混合処理工法による改良地盤の地震観測結果から、質量効果の入った形での応答特性を検討するところにある。

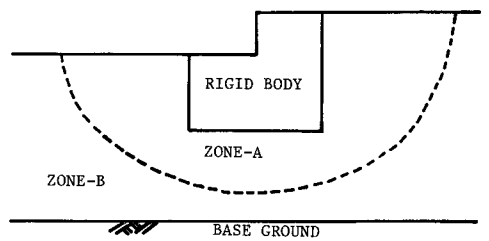


Fig.1 Soil-Structure System

2. 解析モデル

モデルは、図-2(a)に示す様に、左右対称の矩形の剛体が地中に埋設されている平面2次元状態を考慮する。ここで、地盤は線形の弾性体とし、構造物周面には単位長さ当たりの鉛直バネとせん断バネを考慮する。外力は、水平成層構造を持つ自由地盤の変位を重複反射理論で求め、構造物周面のバネを介して与える。また、地震動は鉛直下から入射するSH波のみを考慮する。なお、以下の解析ではダンピングは考慮しないものとする。これらの条件を図示すると、図-2(b)の様になる。以上の条件のもとで剛体の運動方程式を求めると、剛体の重心点における絶対変位(X_g, Y_g)、回転角 θ を根とする運動方程式 $M\ddot{X} + KX = Y$ が作られる。自由地盤を構成する各層のバネ定数が一定であると考えるとき各マトリックスの各項は次の様になる。

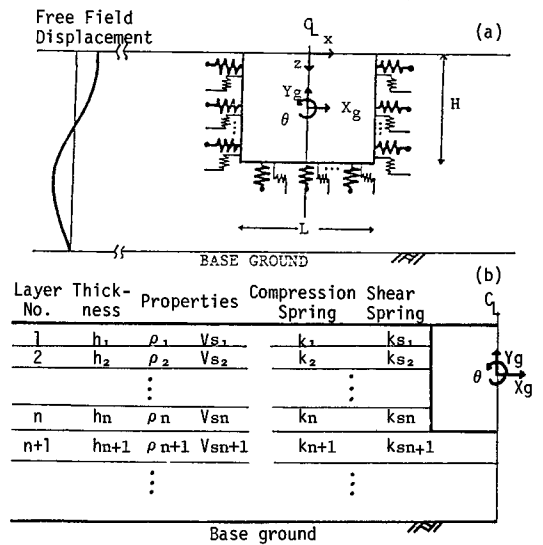


Fig.2 Coupled Translation and Rotation Model of Rigid Body-Spring System.

$$M = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ \text{Sym.} & 0 & I \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ \theta \end{pmatrix} \quad K = \begin{pmatrix} 2 \sum_{j=1}^n R_{se} h_{ej} + R_{S_{n+1}} \cdot L & 0 & 2 \sum_{j=1}^n R_{se} \left\{ f \left(\frac{0}{j} h_j \right) - f \left(\frac{L}{j} h_j \right) \right\} + R_{S_{n+1}} \cdot \frac{HL}{2} \\ R_{n+1} \cdot L + 2 \sum_{j=1}^n R_{se} h_{ej} & 0 & 0 \\ 2 \sum_{j=1}^n R_{se} \left\{ g \left(\frac{0}{j} h_j \right) - g \left(\frac{L}{j} h_j \right) \right\} + \sum_{j=1}^n R_{se} h_{ej} \frac{L^2}{2} + \frac{HL}{4} R_{S_{n+1}} + \frac{L^3}{12} R_{n+1} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 2 \sum_{j=1}^n R_{se} \left(\frac{R_{se}}{V_s^2} \right) \left\{ E_x(e^{i\varphi_j} - 1) - F_x(e^{-i\varphi_j} - 1) \right\} + R_{S_{n+1}} \cdot L \cdot U(H) \\ 0 \\ 2 \sum_{j=1}^n R_{se} \left(\frac{R_{se}}{V_s^2} \right) \left\{ \left(\sum_{j=1}^n h_j - \frac{H}{2} \right) \left[E_x(e^{i\varphi_j} - 1) - F_x(e^{-i\varphi_j} - 1) \right] + \left(\frac{R_{se}}{V_s^2} \right) \left\{ E_x(e^{i\varphi_j} (i\varphi_j - 1) + 1) - F_x(e^{-i\varphi_j} (i\varphi_j + 1) - 1) \right\} \right\} + \frac{HL}{2} R_{S_{n+1}} U(H) \end{pmatrix}$$

ここで、 M ；剛体の質量
 I ；剛体の慣性2次モーメント
 $U(z)$ ；自由地盤の変位
 $f(x) = \frac{1}{2} \left(x - \frac{H}{2}\right)^2$, $g(x) = \frac{1}{3} \left(x - \frac{H}{2}\right)^3$
 E_x ；自由地盤の層における入射波の振幅
 F_x ；" 反射波の振幅
 $\varphi_j = \frac{\omega h_j}{V_s}$ ；自由地盤の層の上端と下端の位相差
 ω ；地震動の角振動数

なお、運動方程式からわかる様に系が左右対称でかつ、地盤の上下動を考慮していないので、並進上下成分 Y_g については非連成の自由振動方程式となる。以下では、 Y_g についての検討は省略する。

2.1 有効入力に対する検討

有効入力とは、運動方程式で $M=0$ とした場合の剛体の応答であり、運動方程式からわかる様に、剛体の慣性力やバネ定数の値によらず、剛体の寸法形状、自由地盤の変位分布、バネ定数の分布形に依存する。

(1) 剛体の寸法形状の影響 剛体幅 L と高さ H の比 $\beta = L/H$ をパラメータにして有効入力の变化を調べたのが図3である。(a)が並進水平成分 X_g 、(b)が回転成分 θ を表わしている。 X_g および θ が図の様に変化するの、同位相で入力する底面からの地震力と場所的な位相差を持つ側面からの地震力のバランスとして説明される。例えば、図の(a)で $\pi < \varphi$ の領域では、側方の強制変位による力が剛体側面で相殺され、底面から同位相で入力する地震力の影響が顕著になることがわかる。また、図の(b)では $\beta \rightarrow$ 大となると回転成分が小さくなることがわかる。

(2) 底面バネの強さの影響 軟弱な地盤中に構造物を造るとき、支持力の十分にある地盤をその基礎とする

ことが多い。図-4は、底面バネの強さを側面バネの α 倍に強くしたときの有効入力の変化を示している。並進成分(a)では、底面バネを強くする効果は幅を広げる効果と等しい。そして、その効果は底面バネを強くする方が顕著だと言える。また、回転成分(b)では底面剛性を強くすると、オービークは小さくなるが、オービーク以降は大きくなり、幅の効果と異なる特性を持つ。なお、ここでは、せん断バネは鉛直バネの $1/3$ として計算している。

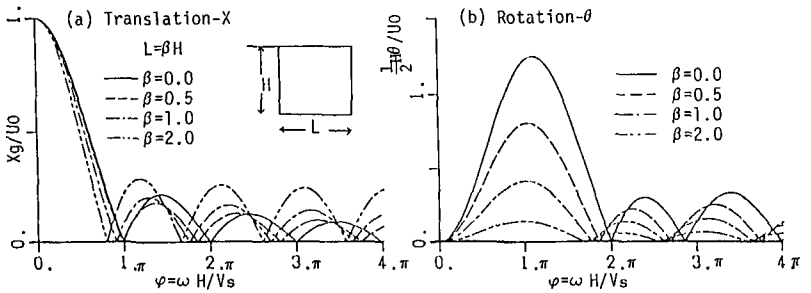


Fig.3 Effective Seismic Input (Effect of $\beta=L/H$)

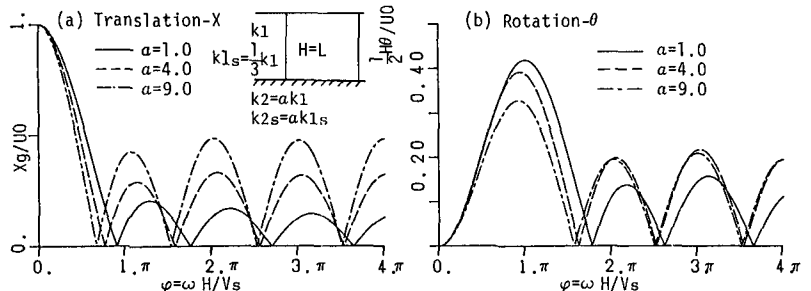


Fig.4 Effective Seismic Input (Effect of $\alpha=k2/k1$)

2.2 質量効果に対する検討

質量効果を検討するためには、運動方程式をマトリックスのまま解けばよい。まずオーに、図-5に示す条件で剛体の単位体積重量を増して行くことを考える。図-6は、単位体積重量の変化に伴う固有振動数の変化を示している。質量の増加に伴い、固有振動数は低くなる。つまり、 $M=0$ としたときの有効入力、剛体の固有振動数が無限に大きくなった状態であり、外力が静的に入力されたものと等価である。よって、質量効果を検討するためには、固有振動数付近の応答を調べてやればよい。図-7は、剛体の単位体積重量を 1.6 tf/m^3 としたときの(a)並進と(b)回転の u_0 (自由地盤地表面の変位)に対する応答曲線を示している。図の点線は、 $M=0$ とした有効入力、一点鎖線が剛体側面から与える変位を深さの関数とせず一定とした場合の応答を示す。剛体側面の各点で位相差を持って入射する波に対する応答(実線)は固有振動数からはずれた領域では有効入力とほぼ等しく、また、共振点近くでも有効入力に引きずられた形となり、側面に入射する波の位相差を考慮しない場合(一点鎖線)と大きく異なる。

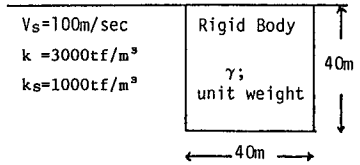


Fig.5 Example Problem

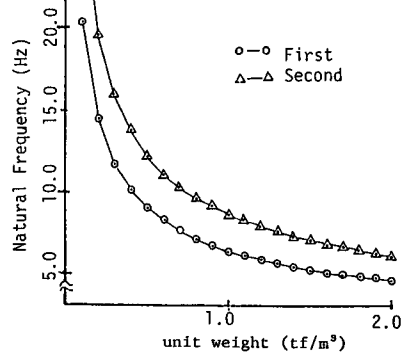


Fig.6 Relation between unit weight and natural frequency

3. FEMによる解析
2. で示した簡易なモデルでは、剛体に一次元の弾性波動理論から求めた自由地盤の変位をバネを介して与えて動的計算をしている。しかし、剛体と周辺地盤にはエネルギーのやりとりが

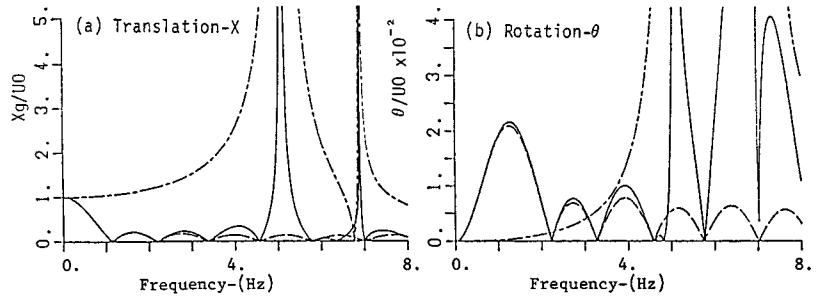


Fig.7 Response Curve

あり、剛体は剛体を含めた周辺地盤系で相互作用を行った結果振動するので、自由地盤の変位を単純にバネを介して与えた振動とは異なると思われる。そこで、図-8に示すFEMモデルで相互作用の入った応答を調べてみた。図-9に、剛体の並進と回転の自由地盤表面に対する伝達関数を示す。実線が $\gamma=1.6$ 、点線が $\gamma=0$ 、一点鎖線が先の簡易モデルによる結果である。5Hzまでの領域では、顕著な卓越はみられず、その形は先の簡易モデルによる有効入力の形とよく一致している。しかし、質量のある方が質量のない場合よりも高い振動数領域で応答が小さくなり、図-7の結果と異なる。これは、剛体自身を振動させるためにエネルギーが使われたと考えられ、相互作用に伴う相違と思われる。

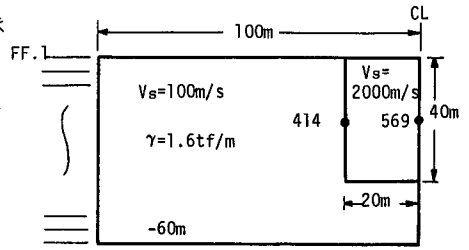


Fig.8 Finite Element Mesh

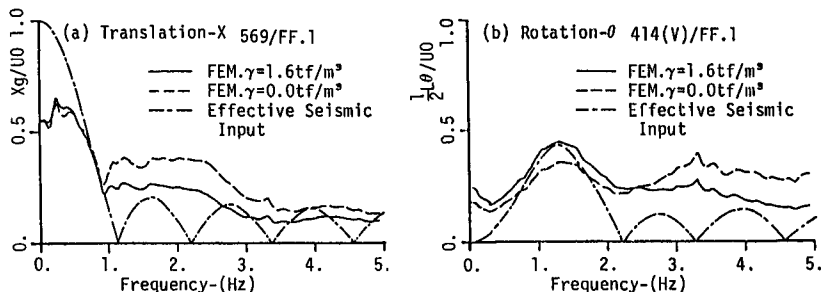


Fig.9 Comparison of Computed Response Using FEM and Simple Analytical Model

総合して、固有振動数の十

分に高い構造物に対しては、簡易なモデルで十分説明可能と考えられる。

4. 横浜港大黒埠頭における地震観測結果との対応

横浜港の大黒埠頭では、深層混合処理工法で改良された地盤の耐震性を検討するために地震観測が実施されている。図-10に地震計の配置を示す。図の様に地震観測は、改良範囲、深さ、着床地盤の剛性の異なる2つの断面について実施されている。深層混合処理工法によって改良された地盤は、周辺粘性土地盤と比較して著しく剛な地盤となり、地中の剛体構造物とみなすことが出来る。ここでは、観測から得られた原地盤最上層に対する改良地盤の伝達関数と、先のモデルから得られる有効入力を比較検討する。使用した記録は、1983年8月8日の神奈川・山梨県境の地震で得られた加速度記録である。図-11に、それぞれの断面における両者の比較を示す。ここで、簡易モデルによる計算においては改良地盤より上のゲートンと裏込め土は無視し、また計算に用いる自由地盤各層の V_s は、別途観測地震に対する一次元等価線形計算を実施し、その収束値から求めている。また、A断面については、改良地盤内各点の上下・水平成分から改良地盤重心の並進成分を分離し、その時刻歴を用いて伝達関数を求めている。図を見ても、簡易モデルによる有効入力は大きな仮定にもかかわらず、質量効果の入った観測値とよい対応を示している。しかし、観測波の伝達関数に大きなピークが見られないのは、系の固有振動数が4Hz以上にあるため、それとも系の減衰によるためなのかは別途の検討が必要となる。また、

A断面とB断面の寸法と底面剛性の違いによる特性も先の解析による結果と一致する。モデルは、剛体の左右非対称性やバネの非線形性を考慮することで、更に精度のよいものになると考えられる。

5. あとがき

本論では、地中埋設剛体構造物の応答性状を評価する手法として、自由地盤の変位の時刻歴を構造物と地盤の間のバネを介して与える方法が、地中埋設剛体構造物の応答を十分評価できる可能性があることを示した。この手法の 実用上の最重要課題は地盤と構造物の間のバネの評価にあると考えられ、地盤バネを精度よく設定するための詳しい研究が必要である。

- 参考文献) 1) 澤田他, セメント系改良地盤の耐震効果に関する研究-地震記録から見た改良地盤の耐震効果(2) 電力中央研究所報告 381032 (57.4) 2) 梶富他, 深層混合処理工法による改良地盤の地震時挙動, 港湾技術研究所報告 Vol.21, NO.4 (1982.12) 3) 風間他, 深層混合処理工法による改良地盤の地震観測, 工学会 79回年次学術講演会(57.10), 4) 原田他, 地震波の有効入力の考え方とその実測例による検討, 第15回地震工学研究発表会(1979.7), 5) 石井他, 大型地下タンクの实測記録による地震波の入力損失の検討, 日本建築学会論文報告集 7312号(57.2), 6) 田中他, FEMを用いたパラメータスタディによる入力損失の定量的評価, 第6回日本地震工学シンポジウム(1982.12) 7) 風間他, 地震時の地中埋設剛体構造物の回転運動に関する一考察, 第40回工学会年次学術講演会(86.9)

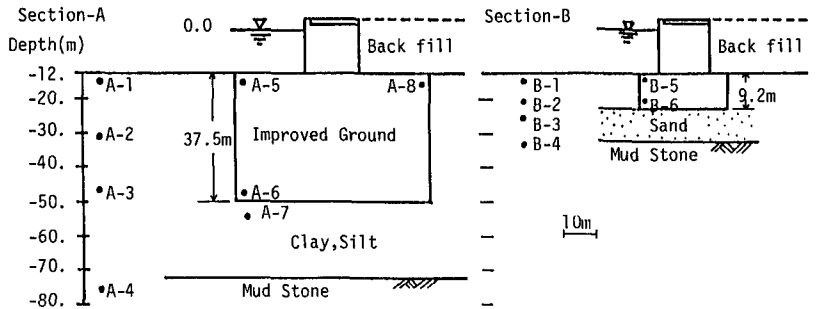


Fig.10 Arrangement of Seismograph

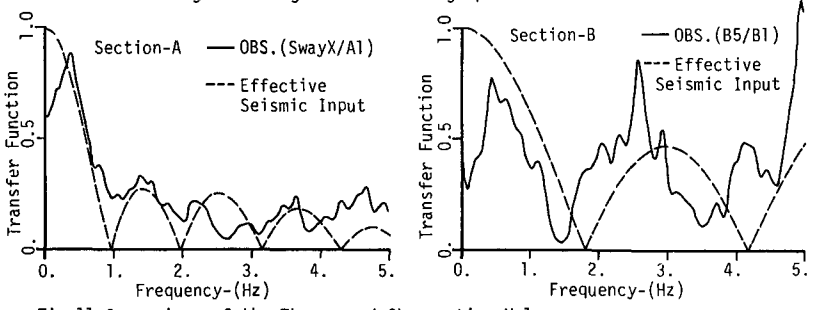


Fig.11 Comparison of the Theory and Observation Value.