

(89) 埋設構造物の耐震解析

岡山大学 工学部 竹宮 宏和
 岡山大学 大学院 横山 勝彦
 岡山大学 大学院 福井 智
 (株)日本鋼管技術研究所 大石 博
 (株)東洋建設 赤本 弘文

1. まえがき

本研究は、地盤-構造物系の動的耐震解析システム：SUBSSIP-2D¹⁾⁴⁾を使用して、地中構造物の地震応答解析を試みたものである。地中埋設構造物の挙動は、その設置地盤の振動に支配されるという観点から、一般には応答変位法が採用されている。ここで対象とした構造物は、貯水施設用の立抗近傍の管路部(図1参照)であって、地盤と立抗との慣性力による相互作用もあり、その管路部へ与える影響を調べることにある。地震入力としては、管路の応答性状にとって重要な水平方向への進行性の地震波、つまり斜め入射の実体波および表面波を考慮している。

2. 解析対象系のモデル化

(1) 地震波動伝ばのシミュレーション：自然地盤内の地震波動伝ばとして、実体波と表面波が存在する(図2参照)。実体波には、さらにSV波とP波があるが、ここでは基盤面への任意の入射角のSV波を考えていく。成層地盤の波動伝ば解析には、SUBSSIP-2Dでは、まず、任意断面での1次波動方程式を解くにあたり、表層地盤に対しては有限要素法し、基盤層に対しては波動論解を採るハイブリッド方式から対処している。そして水平方向への伝ばに関しては、この解を次式で示される波数で波形の距離による移しを行なっている。

$$k = \frac{\omega \sin f}{V_s} \quad (1)$$

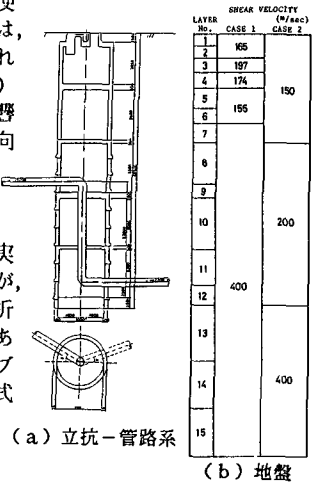


図1 地中埋設構造物

ここに、 ω は振動数、 f は鉛直方向から測った波動の入射角、 V_s は基盤層のせん断波速度である。

つぎに、表面波としてのレーリ波については、ここでは数値計算上、表層地盤下にもそのモード振幅が十分に近似できる深さまで基盤層を導入した剛基盤モデルを採用している。従って、 x 方向への伝ば波については波数に関する固有値問題から各次固有モードの伝ばに展開している。

$$\{u\} = \sum_{s=1}^{2n} \alpha_s \{V\}_s e^{-ik_s x} e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここに、 α_s は s 次の固有振動モード寄与係数、 $\{V\}_s$ は同モード振幅、 k_s は同モードでの波数である。

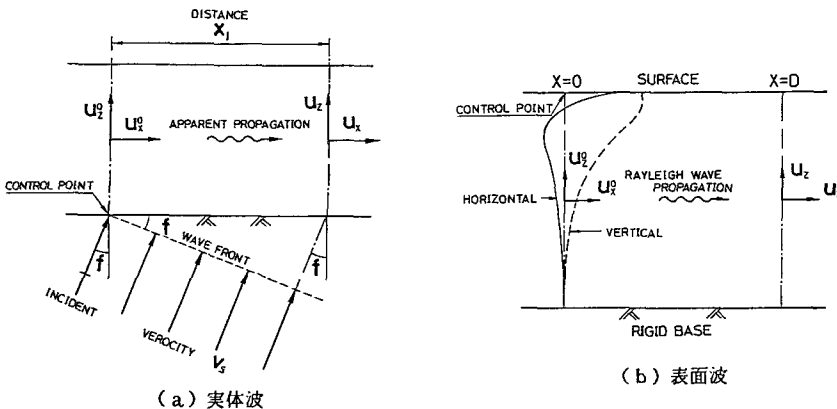


図2 地震波動伝ば

(2) 動的サブストラクチャ法による埋設構造物の解析： 埋設構造物を含む不規則地盤領域を有限要素解析するにあたり、平面歪モデル化を行なう。地盤は2次元ソリッド（アインパラメトリック）要素、管ははり要素、立抗は前後壁面（紙面内）はソリッド要素、そして奥行き方向の側壁はソリッドあるいははり要素とした。はり要素とする場合は、立抗の断面2次モーメントを等価とするはり剛性を使用した。地盤の仮想境界には応力伝達境界要素を導入している。SUBSSIP-2Dは、上記の有限要素モデルに対して、一体解析も可能であるが、動的サブストラクチャ法を主体としている。同手法は、入力地震波の種別を変えた解析、また埋設構造物の断面諸元を変更した解析に容易に対応し、既に計算済みの地盤インピーダンスを有効に活用できる利点がある。いま、そのうちでも、接触モデルを採れば、埋設構造物と地盤との共有節点についての地盤インピーダンス $[K_F]$ および同節点への有効地震入力が増減操作を経て決定できる。そして、後者は自然地盤の応答 $\{U_F^0\}$ が上記(1)より求まっていると、これと地盤インピーダンスとの積から算出される。つまり、対象系の動的剛性マトリックス $[\hat{K}] = [K] - \omega^2 [M]$ ($[K]$ $[M]$ はそれぞれ剛性および質量マトリックス) を定義して、動的つりあい式を書き表せば

$$([\hat{K}_{BS}] - [\hat{K}_{SS}] + [K_F])\{U_{BS}\} = [K_F]\{U_F^0\} \quad (3)$$

ここに、 $[\hat{K}_{BS}]$ $[\hat{K}_{SS}]$ はそれぞれ埋設構造物、地盤に関するもので、 $\{U_F^0\}$ はそれらの共有節点における自然地盤応答変位である。

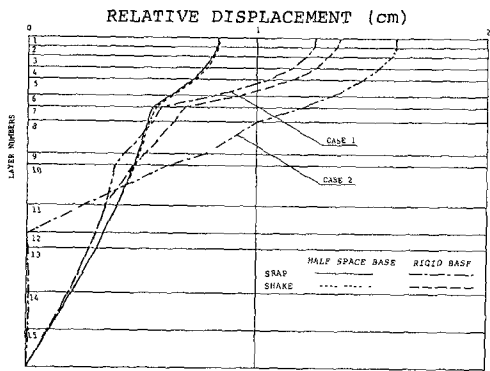
3. 解析結果およびその考察

まず、SUBSSIP-2Dによる自然地盤の応答解析結果を、変位および加速度について図3、4に示す。図3は、実体波としての地震入力の場合で、基盤面で100 gal としている。CASE 1, 2は図1の地盤種別である。同図では、SHAKE との比較からその解析精度の検討をしている。図4はレーリ波の1次モード伝ばを仮定したときの $x=0$ での深さ方向水平および鉛直方向の分布を描いたものである。入力強度としては、地表面で30gal と設定している。

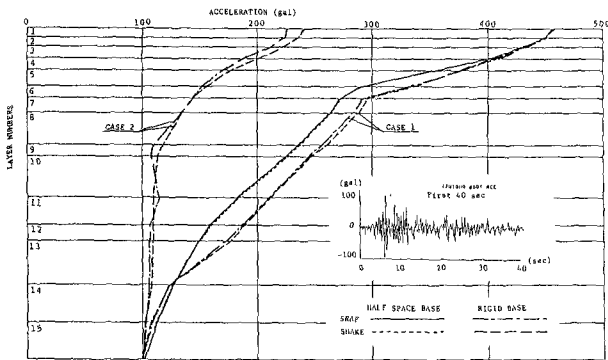
つぎに、基盤面入力状態で地盤との動的相互作用解析による立抗-管路系の振動数応答を図5に示す。これより、立抗から離れた管路の応答をみれば、低次振動数領域ではほとんど地盤に追随した挙動をしている。そして立抗の近傍になると、その影響を受けて高振動数領域ではある程度地盤と異なってくる。その度合いは軟弱地盤の方が大きい。

地盤-立抗-管路系の動的性状を、特に立抗の挙動に関してみるため、側方境界を単純境界として固有モード解析を実施した。そのうちの寄与係数の高いものについて図6に示した。同図からも明らかなように、立抗は地盤の1次振動に非常に大きく支配されていると同時に、地盤の高次固有振動とともに剛体としてのロッキング振動がかなり卓越してくる様子が判かる。なお、本研究の解析モデルでは、側方境界の差は高振動数領域に現れるので、低次地盤振動数領域では伝達境界を導入したときとそれほど差は見られなかった。

さて、埋設管路系の振動数特性として、通常、解析は軸歪に着目して行なわれる。これまでにも表面波による応答の方が実体波よりも大きい軸歪を与えていると言われていた。しかし本研究で対象とした立抗近傍の管路部は上で見た立抗の剛体的な挙動のため曲げを受けることになる。以下、これに注目した解析を実施した。今回は伊豆東方沖地震(1980.6)を入力地震波として、しかもこの前半部を実体波、後半部をレーリ波の1次伝ばモードとして取り扱って、一応、地震波の水平方向の伝ば性を仮想的に考慮してみた。入力強度として、前者では地表面で最大加速度100gal に、後者では同面で30gal としている。この結果を図7に示す。これらの比較より、表面波の方が実体波より大きな軸歪応答を与えている。また曲げ歪応答も立抗近傍でのみかなり発生している。曲げ歪は、表面波入力ときは軸歪ほど大きくはならないが、実体波入力では軸歪応答を越えた値を与えている。いま、立抗の存在しない場合を想定して管路応答を求めてみると、軸歪についてはその存在するときとはほぼ同じ応答値であり、立抗近傍についてもそれほど違わない。つまり立抗の影響は曲げ歪に大きく関与してくるが、軸歪にはそれほど影響を与えないと結論付けられる。地盤種別による管路応答の差は、実体波入力では立抗近傍の曲げが、地盤が軟かくなると大きくなっているが、一方、表面波入力では、却って軸歪応答は低下している。



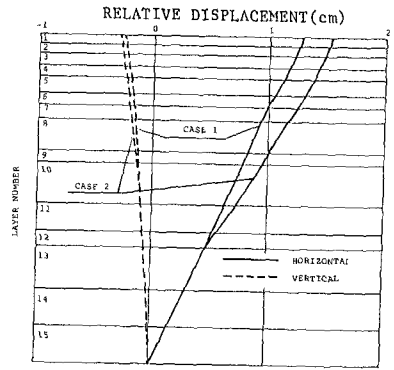
(a) 変位



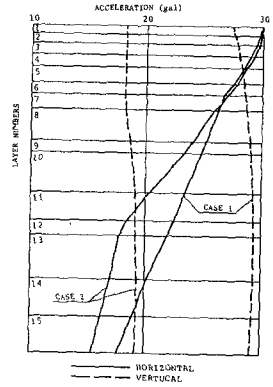
ABSOLUTE MAXIMUM ACCELERATION DUE TO SV WAVE

(b) 加速度

図3 自然地震応答 (実体波入力)



(a) 変位



ABSOLUTE MAXIMUM ACCELERATION DUE TO RAYLEIGH WAVE

(b) 加速度

図4 自然地震応答 (表面波入力)

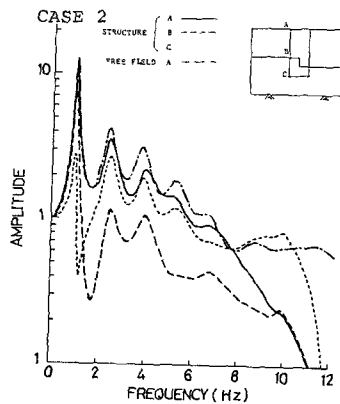
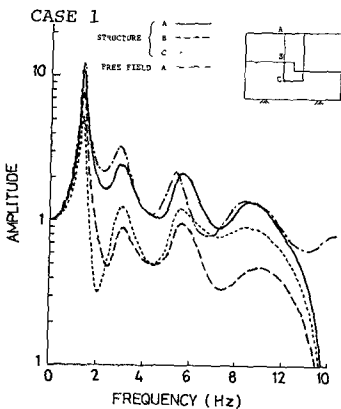
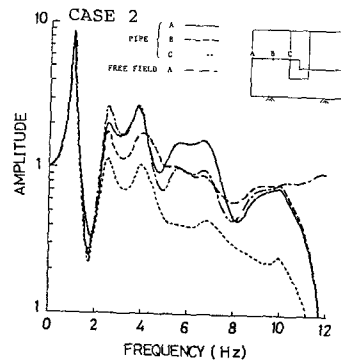
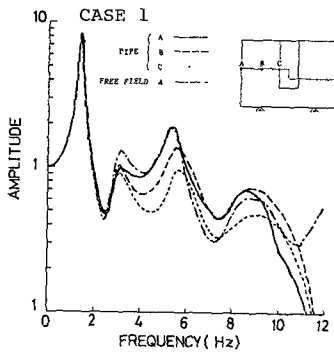


図5 立杭-管路系の振動数応答

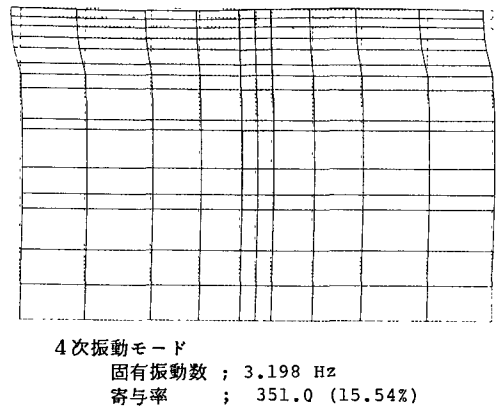
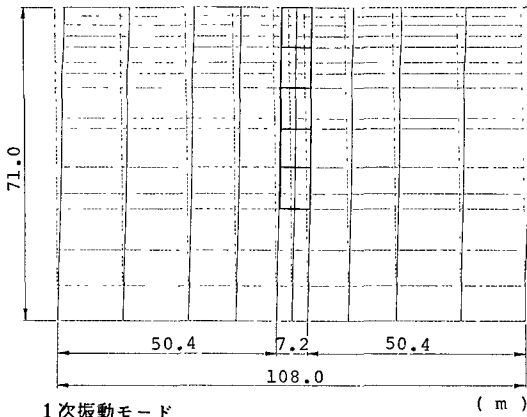
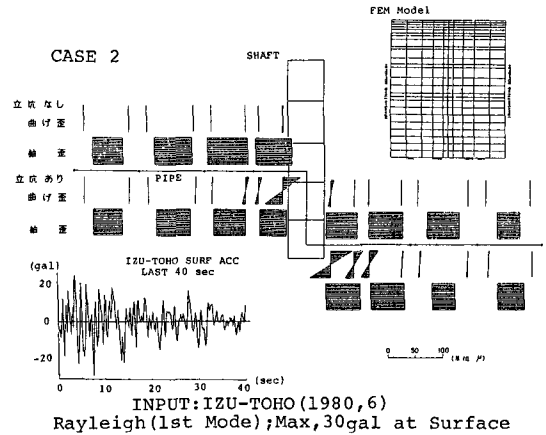
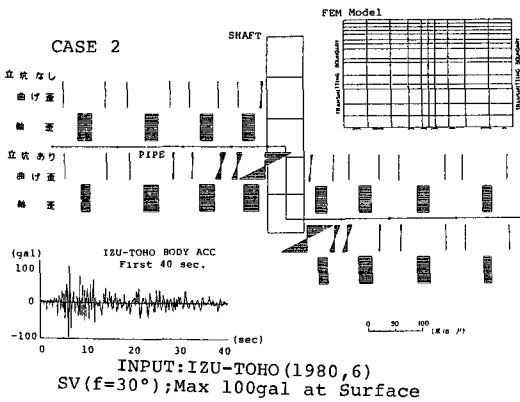
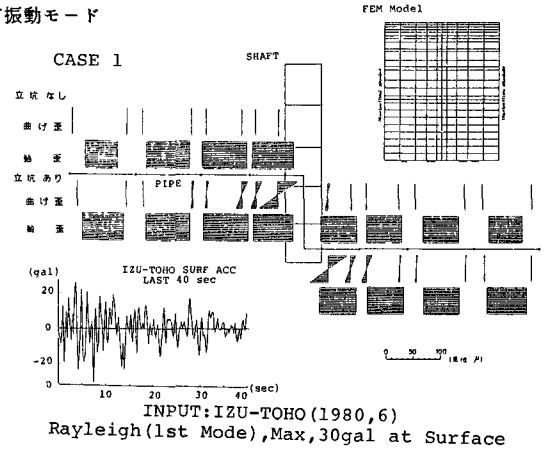
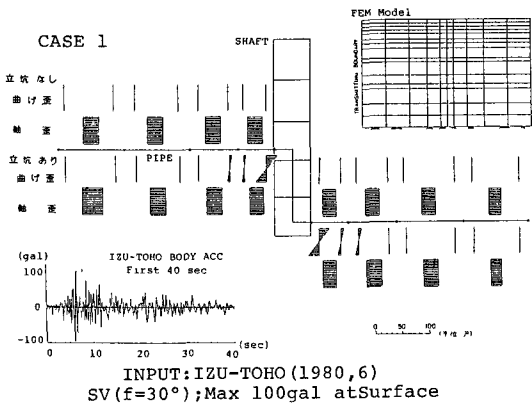


図6 固有振動モード



(a) 実体波

(b) 表面波

図7 立杭-管路系の地震応答

参考文献

1. 竹宮：地盤-基礎-上部構造物の地震応答解析-動的サブストラクチャ法の適用, 土と基礎, Vol. 20-9, 1982, pp. 27-34
2. 竹宮他：動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物の耐震解析システム, 第37回土木学会年次学術講演会概要, 1-265, 昭57年10月
3. 竹宮他：地盤と構造物の動的相互作用解析法の現状, 基礎工, Vol. 10, No. 12, 1982, pp. 13-25
4. 竹宮他：地盤と構造物の耐震解析システム-SUBSSIPの開発, 地盤と基礎の地震災害に関するシンポジウム論文集, 土質工学会, 昭58年5月 pp.61-70