

(168) 地中線立坑の時刻歴地震応答

東京大学大学院 学生員 羅 休
 東京大学生産技術研究所 正会員 小長井一男
 東京電力 正会員 佐山 順二

1. はじめに

近年、地下空間の高度利用により地中送電用洞道は大深度化し、併設される立坑も地下40~50mと深くなる傾向にある。結果としてこのような送電用の立坑の地震応答を検討する場合はそのたわみを考慮することが必要になる。このような構造の動的時刻歴応答を応答変位法に則り行なう場合、地盤の相互作用ばねの評価が必要であるが、本来連続している地盤の剛性は他節点での応答の影響も受けるために、これを離散化しマトリックス表示した場合、非対角項にも値が入り、このことが応答解析を煩雑なものにしている。小長井は構造から逸散する波頭が結果として、平面、円筒面、球面といった簡単な幾何学形状を示す場合には、地盤の反力を当該節点のみの応答で評価でき、かつその応答が周波数に依存しないばね、ダッシュポットの複合体である一般化Voigtモデルの応答で精度良く近似できることを示している(1)。野上、小長井はこれを杭基礎の解析に適用し、構造物をWinkler地盤上の梁と仮定し、伝達マトリックス法による極めて簡便な解析アルゴリズムを確立した(2)。野上・小長井のモデルでは地盤の水平方向ばねを地盤と同じ物性の無限平面上の剛体円孔の面内方向の剛性から評価することになるが、地盤の上下動を水平動に比べ小さいものとして無視して得られる波動論解(3)との比較で、野上、小長井はこの平面を平面ひずみ状態とすることで波動論解との良好な一致が得られることを示している。しかし実際には地表面近くでは応力開放の影響を受けるので、地盤の上下動の影響は、特に杭のように地表近くでたわみやすい構造の場合、必ずしも無視できるものではないと考えられる。この影響を調べ、それを野上、小長井のモデルにどのように反映させるか検討するため、構造から地盤に逸散される波動の空間的分布を可視化する実験を行なった。またこの手法を電力地中線立坑の地震応答解析に適用し、実地震応答を検討した。

2. 可視化実験

2.1 実験過程 透明性が良いポリアクリルアミドゲルで作製された地盤模型とポリカーボネート製の杭模型($\phi = 1.0\text{cm}$, $L = 43\text{cm}$)をアクリル製型枠($L \times W \times D = 40 \times 40 \times 40\text{cm}$)に打設して、杭頭(ゲル表面より4cm上部)にインパルスを入力する(図-1)。このインパルスは50 μF のコンデンサーを1.0~2.0kVの電圧で充電した後、これをソレノイドコイル(0.18mH)を通して放電させることにより発生させる。杭頭の

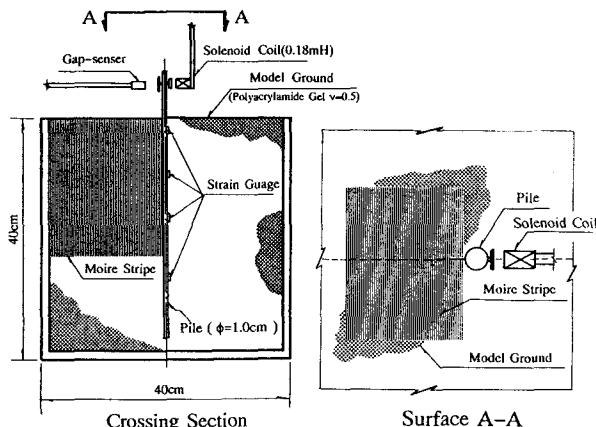


図-1 地盤構造物模型

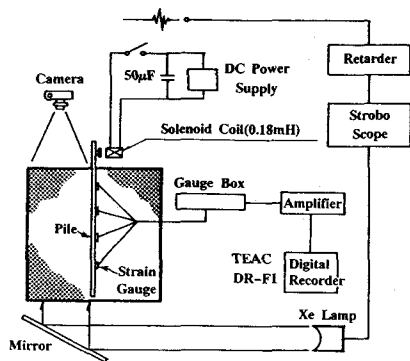


図-2 実験装置

変位と杭の軸線に沿ったひずみ分布はそれぞれキャブセンサーとひずみゲージを用いて測定される。杭から放射された波動の空間的分布を観測するためにモアレ法を用いる。このモアレ格子は黒色トナーをオブラートシートの上に静電吸着（乾式コピー）させて作製したものである。オブラートはゲル中の水分吸収し溶解して、トナーの縞だけが残ることから、ゲルの変形を拘束しない。

こうして転写された縞の静止状態と波動が伝播している状態を重ね撮りすることでモアレフリンジが現れる。このフリンジは縞の直線と直交する方向の変位の等高線を表わすことになる。モアレの撮影はモデルを暗室に置き、カメラを開放状態としてストロボを発光させて行なった。ストロボ発光のタイミングは打撃時のインパルストリガーとしてリターダーで任意の遅れ時間を生じさせることで制御している（図-2）。

2. 2 実験結果 模型表面でのモアレ写真は写真-1の上段に、鉛直断面のモアレを下段に示す。縞の間隔が0.3mmであるから、0.15mm、0.45mm、0.75mmと0.3mm間隔の等変位線がフリンジとして現れる。Poisson比がほぼ0.5のゲルを伝播する縦波速度は本来著しく大きいものであるが、地表面に現れた打撃方向の波頭はせん断波頭の2倍強の位置に現れている。縦断面に現れたフリンジも、地表面の応力解放の影響を受けてあまり遠方に達していない。

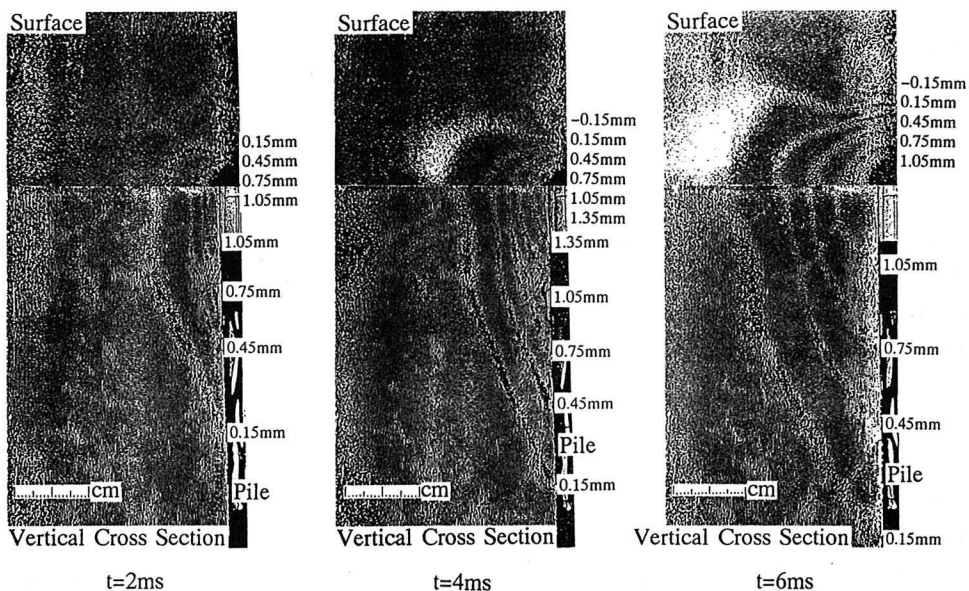


写真-1 杭基礎模型から逸散する波動によるモアレ(打撃方向水平変位)

3. 数値解析における評価

野上、小長井のモデルでPoisson比が0.5の無限平面を厚さ方向の応力を開放して、平面応力状態とすると縦波速度は横波速度の2倍（等価なPoisson比=0.33）になり、実験で観測された地表付近の見掛けの波動伝播との整合がとれるようになる。そこでPoisson比の深さ方向分布を3ケース（図-4）想定してそれぞれの場合について杭頭の変位応答、ならびに杭軸に沿ったひずみの時刻歴応答を試算した。図-3には杭頭部の変位応答の計算結果と実験結果を示している。ケース1は全ての層でPoisson比を0.499としたものであるが実験結果に比べて振幅が小さく周期も短くなり、地盤の剛性を幾分過大評価していることになる。これに対し地盤のPoisson比を地表付近のみ0.33としたケース2、および全層で0.33としたケース3では、計算値と観測結果の符合が良い。ケース2と3の両者の間には顕著な差違は認められないが、これはたわみややすい杭基礎の応答を評価するうえで、地表面付近の物性を適切に評価することが重要であることを示している。

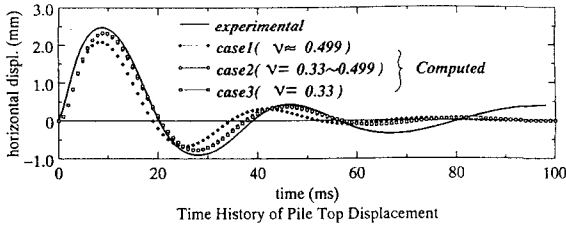


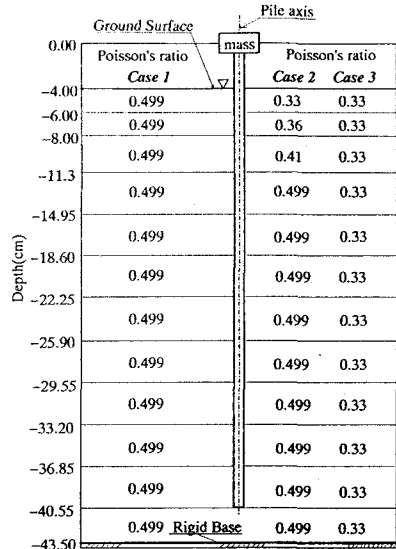
図-3 模型杭頭の変位応答

4. 地中線立坑地震時の時刻歴応答解析

野上、小長井の方法を電力地中線立坑に用い実地震観測記録との比較を試みた。応答変位法の考えに従って、まず構造を除外した地盤だけの動きを解析した後、その変位を立坑-地盤系のモデルに入力し立坑の応答を解析している。立坑の周辺地盤は平坦な成層地盤であるので、これを一次元せん断梁としてその応答を計算した。

この立坑で得られた平成4年2月2日に東京湾を震源とするM5.9の地震記録データを用いて応答計算を行なった(4)。観測地点の地盤、立坑の構造、観測計器の配置及び解析に用いた物性値を図-5に示す。立坑-地盤系の応答解析に用いる入力地震動にはGL-44.81mで観測された加速度応答データを用いている。この記録を、計器の周波数特性を考慮して0.1~35Hzのバンドパスフィルターを通した後これを積分し変位波形(図-6)に換算して基盤(GL-44.81m)に入力した。入力地盤から地表面までは図-5に示すように9層に分割した。時間増分は0.01secとし、40secまでの4000stepの計算を行なった。

観測記録より得られた最大のせん断歪みは 10^{-5} のオーダーであるため線形計算のみを行っている。構造物を除外した地盤のみの変位の時刻歴の計算結果と該当する地点の観測結果を図-7に示す。(1)はGL-24.90m、(2)はGL-8.61mの応答である。両者は良く一致しており、観測地点における地盤応答解析では、水平成層を仮定した簡便な一次元せん断梁モデルを用いることが可能であることが示された。



Distribution of Poisson's Ratio in Ground

図-4 模型地盤のPoisson比の分布

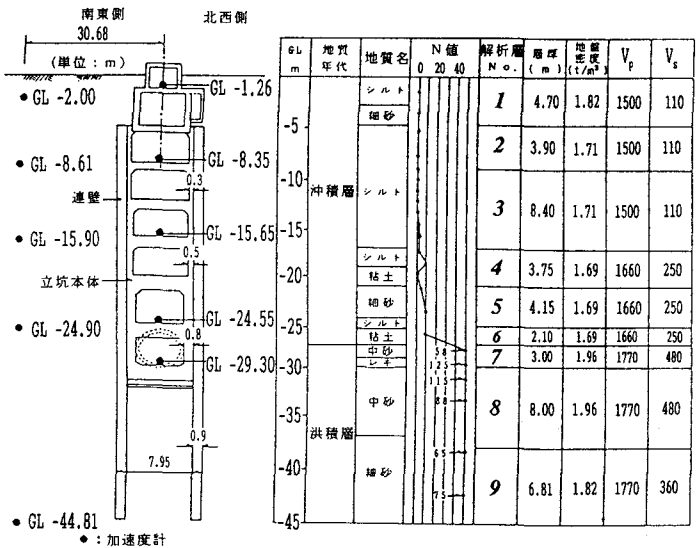


図-5 観測地点の地盤、立坑構造、観測機器の配置

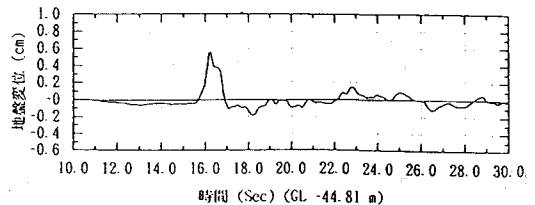


図-6 入力地震動

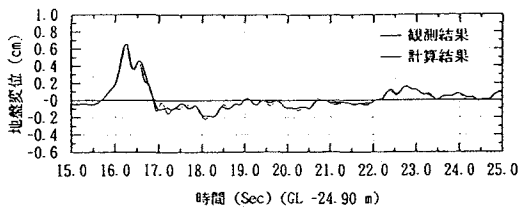


図-7 (1) 地盤変位応答比較 (GL -24.90m)

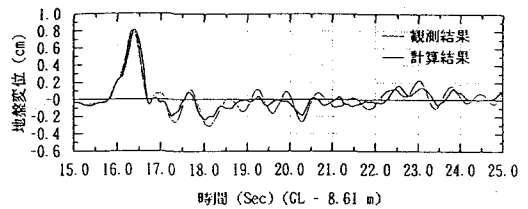
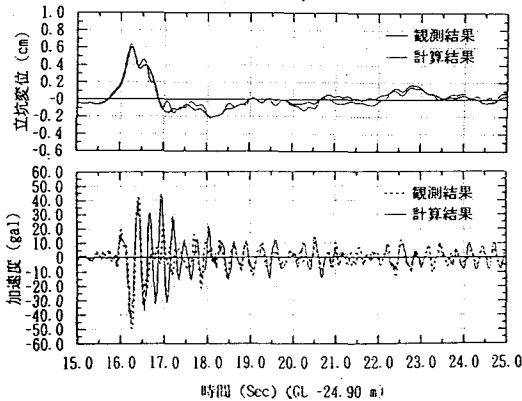
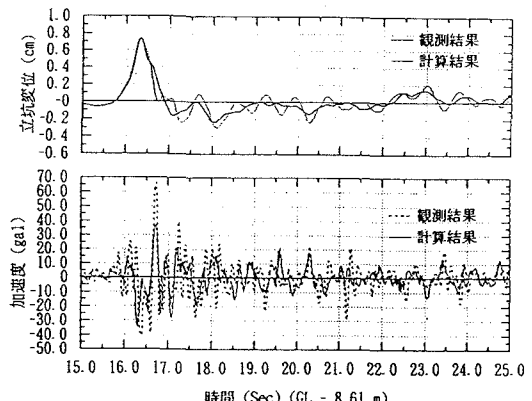


図-7 (2) 地盤変位応答比較 (GL -8.61m)



(1) GL -24.90 m



(2) GL -8.61 m

図-8 立坑変位、加速度応答比較

立坑の変位応答及び加速度応答の解析解を観測記録と比較した(図-8)。図中の(1),(2)は図-7の(1)(2)と同じ位置に対応する。計算値は概ね観測値に重なっているが、その手法の妥当性を結論づける前に、地上に大きな慣性力を生ずる構造を持たない立坑の変位はほぼ地盤変位と等しく、一般化Voigtモデルで表現される相互作用ばねの変形が全体変位の約1割程度と小さいことに留意しておく必要がある。

4. あとがき

(1)可視化模型実験と数値解析結果により、地表面での応力開放がたわみ易い地中構造物を支持する地盤ばねに与える影響は無視できない。野上、小長井のモデルでは、この影響を杭を支える地盤の薄層(無限平面)を平面応力状態とすることによって考慮することができる。

(2)本手法を用いることにより、地中線立坑の地震時刻歴応答解析を容易にしかも短時間に処理することが可能である。しかし、地上に大きな構造を持たない立坑変位は地盤変位にはほぼ追従しておりその場合地盤変位応答を正確に予測することが解析上重要であることが示された。

(参考文献)

- (1)小長井一男：基礎構造物と地盤の動的相互作用の簡便な解析法について、生産研究、第40巻、第7号 pp.1-8,1988
- (2)Nogami, T. and Konagai, K.: Time Domain Flexural Response of Dynamically Loaded Single Piles, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.114, No.9, pp.1512-1525, 1988
- (3)M. Novak and T. Nogami: Soil-Pile Interaction In Horizontal Vibration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, 263-281, 1977
- (4)大木、安中、海洋：地中線立坑の地震時挙動の解析、第20回地震工学研究発表会講演概要、pp. 413-416, 1989