

(104) 地中線立坑の地震時挙動の解析

東電設計(株) 正会員○大木 晴雄, 安中 正
東京電力(株) 正会員 海津 信廣

1. まえがき

都心部では地中送電用洞道の深層化に伴い、併設される立坑も30~40mと大深度化する傾向にある。このような大深度地中構造物の適切な耐震設計法を確立するためには、地震観測記録を収集し、構造物の地震時挙動を把握するとともに、設計手法の検証を行うことが重要な課題となっている。

このような状況から、筆者らは東京都足立区に建設された立坑を対象に、昭和60年4月から地震観測を実施してきた。本報では、昭和60年10月4日の茨城県南部地震の記録をもとに、一次元波動理論に基づく地盤の地震応答解析、二次元複素応答解析法による立坑~地盤連成系の動的解析を行い、解析手法の適用性を検証したのでその結果について報告する。

2. 地震観測概要

PS検層、室内土質試験により得られた観測地点の微小歪レベルでの地盤物性、立坑の構造、計測器の配置は文献1)に示したとおりである。

3. 地盤の地震応答解析

後述する立坑~地盤連成系の複素応答解析に適用する入力地震動は、観測された加速度記録を用いて、一次元波動理論に基づく自由地盤の地震応答解析により求めている。そこで複素応答解析法による解析に先立ち、一次元波動理論に基づく解析手法の適用性について検証した。

地盤の加速度記録のスペクトル比(地表/GL-44.8m)のピーク振動数は、別途求めた微小地震のスペクトル比と一致していることから、観測された加速度レベルの地震動に対しては地盤の剛性の低下はないものと判断した。そこで解析においては、文献1)に示した微小歪レベルにおける地盤の物性値を用いて線形解析を行った。また入力地震動としては地表で観測されたGL-2.0mにおける観測記録を用いた。観測記録のシミュレーションにおいて、地表波形を入力した方が地中波形を入力するより実測値との一致度がよいことは文献2)に示したとおりである。

図-1に解析と観測記録から求めた加速度フーリエスペクトル比(地表/GL-44.8m)を対比して示す。地盤・立坑の挙動に大きく影響する10Hz以下の振動数に着目すると、一次、二次のピーク振動数とも解析結果は観測記録から得られたスペクトル比とよく一致している。

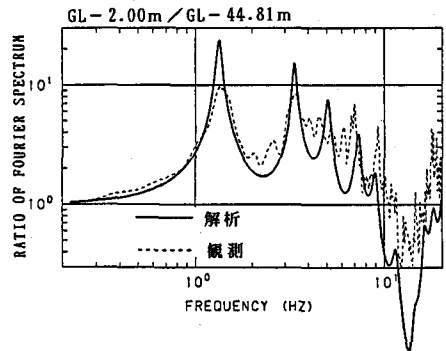


図-1 地盤の加速度フーリエスペクトル比の比較

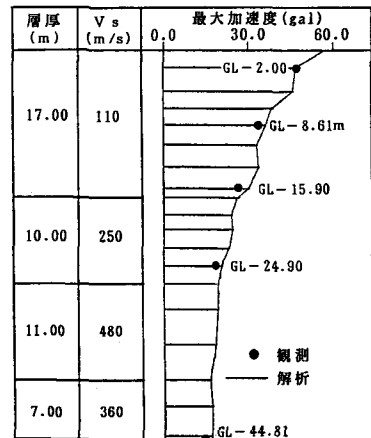
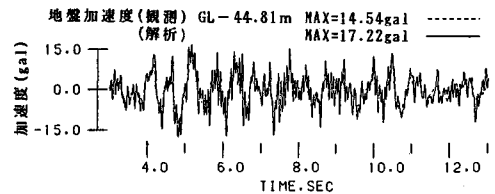


図-2 地盤の加速度時刻歴波形, 最大加速度分布の比較

図-2は、GL-44.8mでの加速度時刻歴波形および最大加速度の鉛直方向分布について、解析値と観測記録を比較して示したものである。解析から求めた加速度波形は、波形の形状、位相とも観測波形とよく対応している。最大加速度については、図-1に示したように高振動数成分において解析と観測記録のフーリエスペクトル比に差が生じているため、解析値の方が観測記録を上回っているがその差は小さく、全体としては最大加速度分布は観測結果に近い値となっている。

このように自由地盤の動的挙動は、地表記録を入力波とし一次元波動理論に基づき解析することによりシミュレートできることから、一次元波動理論に基づく解析手法の適用性を確認することができた。

4. 立坑の地震応答解析

立坑の耐震設計の方法としては各種の解析手法が提案されているが、ここでは二次元複素応答解析法 (FLUSH) により立坑の地震観測記録の数値シミュレーションを行い、解析手法の適用性について検討した。

(1) 解析方法

立坑短辺方向の解析モデルを図-3に示す。立坑本体、連壁、地盤ともソリッド要素でモデル化した。解析モデルのメッシュサイズはせん断波速度、解析で採用した最大振動数 $f=15\text{Hz}$ を考慮し設定した。モデル化にあたっては、局所的な鉄筋の応力を算出する部分など、応答値をできるだけ正確に把握するため、各計器付近の要素は細分化した。

立坑本体ならびに連壁は立坑の中心軸に対して対称であり、地盤は水平成層とみなせることから、解析モデルは半断面のみをモデル化するものとし、解析モデル領域は、幅 35m、深さGL-82.6mとした。境界条件については、対称軸の立坑中心における側方境界は水平ローラー、周辺地盤の側方境界はFEM領域からの波動エネルギーを吸収するエネルギー伝達境界、そして下方境界は基盤入射波を入力するため粘性境界とした。

地盤の解析用物性値は、前述の地盤の地震応答解析の結果、微小歪レベルの物性値を用いれば地盤の応答特性を良く再現できることを確認したため、本解析においても地盤に関してはこの値を使用した。立坑本体、連壁のコンクリートの物性値は設計時に設定した設計基準強度から推定した。実際の立坑の三次元的な形状を二次元モデルで置き換えるのに際して、この影響を物性値で考慮するものとし、立坑本体・連壁の要素に適用する物性値は、(1)式に示すようにコンクリート本来の物性値を立坑の奥行きに対する立坑の壁厚の割合で均した値を使用するものとした。なお、減衰定数は5%とした。

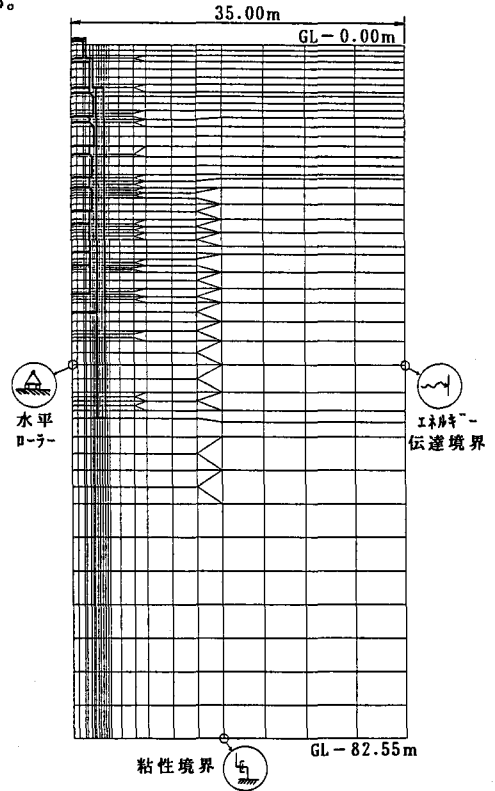


図-3 二次元複素応答解析に用いる解析モデルおよび境界条件

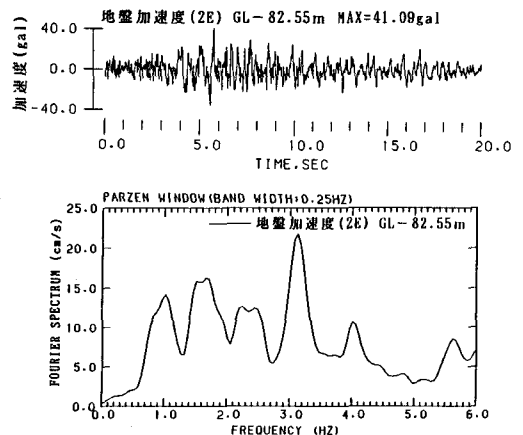


図-4 二次元複素応答解析に用いる入力地震動 (基盤入射波)

$$G_c' = G_c(2t/l_s) \quad (1)$$

G_c' : 換算したコンクリートの物性値

t : 立坑の壁厚

G_c : コンクリート本来の物性値

l_s : 立坑の奥行き

また鉄筋応力については、鉄筋とコンクリートの弾性係数の比を用いて要素応力を鉄筋応力に換算した。

二次元動的応答解析モデルの下方境界(GL-82.6m)に入力する地震動は以下の方法で設定した。自由地盤の地震応答解析の結果、最浅部(GL-2.0m)の観測波形を用いて解析すると観測結果を良く再現できることがわかったので、本解析においても最浅部(GL-2.0m)の観測波形を用いて一次元波動理論に基づく地盤の動的応答解析を行い、GL-82.6mにおける入射波(2E)を取り出した。解析モデルの下方境界で設定した入力地震動の時刻歴波形およびそのフーリエスペクトルを図-4に示す。

(2) 観測記録と解析結果の比較

地盤および立坑の最大加速度について、解析値と観測記録を比較して図-5に示す。ここで自由地盤の解析値は、立坑の存在しない解析モデルを用いて算出したものである。この図より、解析により求めた立坑・地盤の最大加速度は観測結果とほぼ一致していること、地盤の加速度は立坑に近づくに従って立坑の加速度と同程度の値となっていくことが読み取れる。

鉄筋応力および地震時土圧の解析値と観測記録の最大値を比較して図-6に示す。GL-29mおよびGL-35m付近で観測記録を下回っている他は、いずれの解析値も観測記録とよく一致している。鉄筋応力および地震時

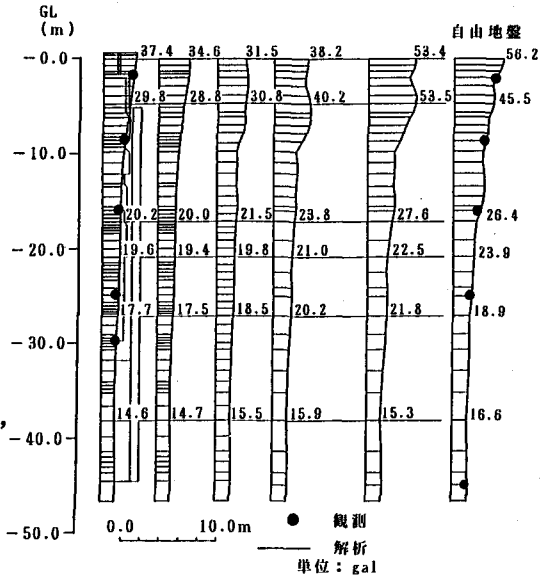


図-5 最大加速度分布の比較

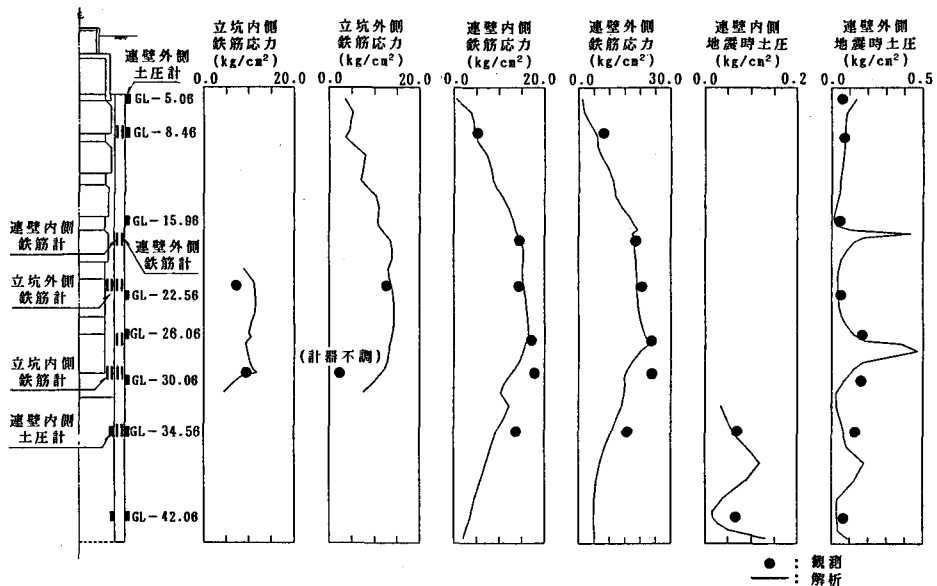


図-6 最大鉄筋応力・地震時土圧の比較

土圧は、観測記録、解析値とも沖積層と洪積層の層境界付近で最大となっており、観測された最大鉄筋応力はGL-29.5mで 23.9kgf/cm²、地震時土圧はGL-26.1mで 0.167kgf/cm²であった。解析で求めた地震時土圧は各地層の境界部で急激に増加している。この現象は解析上地盤の剛性の急激な変化が影響しているものと考えられる。

図-7は立坑の加速度・変位、鉄筋応力、地震時土圧について解析から求めた時刻歴波形と観測記録を比較したものであるが、いずれの解析値も観測記録とよく一致している。図-8は立坑頂部の加速度のフーリエスペクトルについて、解析値と観測記録を比較したものである。地盤と立坑の地震時挙動はおもに 2Hz以下の振動数成分に支配されているが、図からわかるように 2Hz以下の範囲においては、解析値は観測記録のスペクトルとよく対応している。

これらの結果より、立坑の加速度、地震時土圧、鉄筋応力は二次元複素応答解析法によりほぼシミュレートできることがわかった。特にこの解析においては、各応答の最大値だけでなく時刻歴の応答も求めることができることから、詳細な検討を行う場合有効な手法であると考えられる。

5. まとめ

地震観測記録をもとに地盤および立坑の地震時挙動について数値シミュレーションした結果、一次元波動理論に基づく地盤の地震応答解析法、立坑～地盤連成系の二次元複素応答解析法は、それぞれ地盤および立坑の動的解析に十分適用できることがわかった。

今後は、地盤応答震度法、応答変位法による地震観測記録の数値シミュレーションを行い、これらの簡易な耐震設計法の適用性について検証していく予定である。

参考文献

- 1) 海津, 安中, 大木: 地中線立坑の地震時挙動の観測, 第20回地震工学研究発表会, (1989).
- 2) 野沢, 大木, 安中: 減衰の周波数依存性を考慮した1次元波動理論による地盤の増幅特性の解析方法, 第19回地震工学研究発表会, (1987).
- 3) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., Seed, H.B., "FLUSH A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," No. EERC 75-30, (1975).

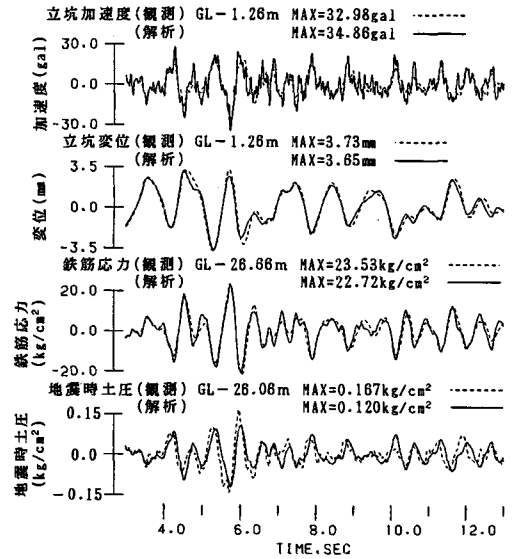


図-7 立坑の加速度・変位、鉄筋応力、地震時土圧の時刻歴波形の比較

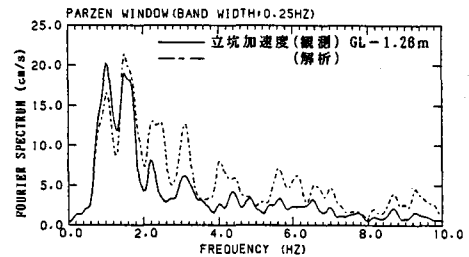


図-8 立坑頂部の加速度フーリエスペクトルの比較