

# (103) 地中線立坑の地震時挙動の観測

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

**1. まえがき** 都市化の進展に伴い電力設備の地中化が進められてきたが、近年地下利用施設の過密化により地中送電用洞道も深層化しており、これに併設される立坑は30~40mと大深度化している。筆者らは、縦に長い地中構造物の地震時挙動を把握するため、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に基づき、地震時土圧、鉄筋応力および地盤・立坑の変形の関係等について報告する。

**2. 地震観測概要** 観測地点の地盤条件、立坑の構造、計測器の配置を図-1に示す。当地点の地層構成は、GL-27mまでがN値1~10程度の沖積層( $V_s=110\sim250\text{m/s}$ )で、GL-27m以深がN値50以上の洪積層( $V_s=360\sim480\text{m/s}$ )となっている。立坑は7.95×11.40mの矩形断面をしており、厚さ90cmの連壁の内側に壁厚30~80cmの立坑本体が鉄筋コンクリートにより構築されている。連壁の深度はGL-45m、立坑本体の深度はGL-32mである。立坑本体は地下7階よりなり、地下1~6階には幅50cmの横梁が設置されている。また立坑は地下7階のGL-28m付近で洞道と接続している。

地盤内加速度計は、自由地盤内の加速度記録を得るため、立坑の振動の影響を受けないと考えられる立坑から約30m離れた位置に埋設した。鉛直方向には、主に沖積層における加速度の増幅特性を把握するためGL-27m以浅に4台設置し、洪積層中の連壁最深部に対応したGL-44.8mに1台配置した。立坑内の加速度計は、地盤内加速度計とほぼ同じ深さに設置した。土圧計および鉄筋計は、立坑の曲げモーメントが最大となることが予想される沖積層と洪積層との層境界(GL-27m)付近を中心に全深度に分散設置した。

**3. 地盤・立坑の応答特性** 検討の対象とした昭和60年10月4日の茨城県南部地震は、マグニチュード6.1、震源深さ78km、観測地点までの震央距離は32kmであった。ここでは観測計器が多く配置されている立坑短辺方向(X

方向)の地震観測記録に基づき、地盤および立坑の地震時挙動について考察する。

**(1) 地盤・立坑の加速度**

図-2に地表およびGL-25m付近で観測された地盤・立坑の加速度時刻歴波形を示す。加速度記録は、加速度計の周波数特性を考慮して0.1~35.0Hzのバンドパスフィルターを通したものである。最大加速度は地表で46.9gal、立坑頂部で33.0galであつ

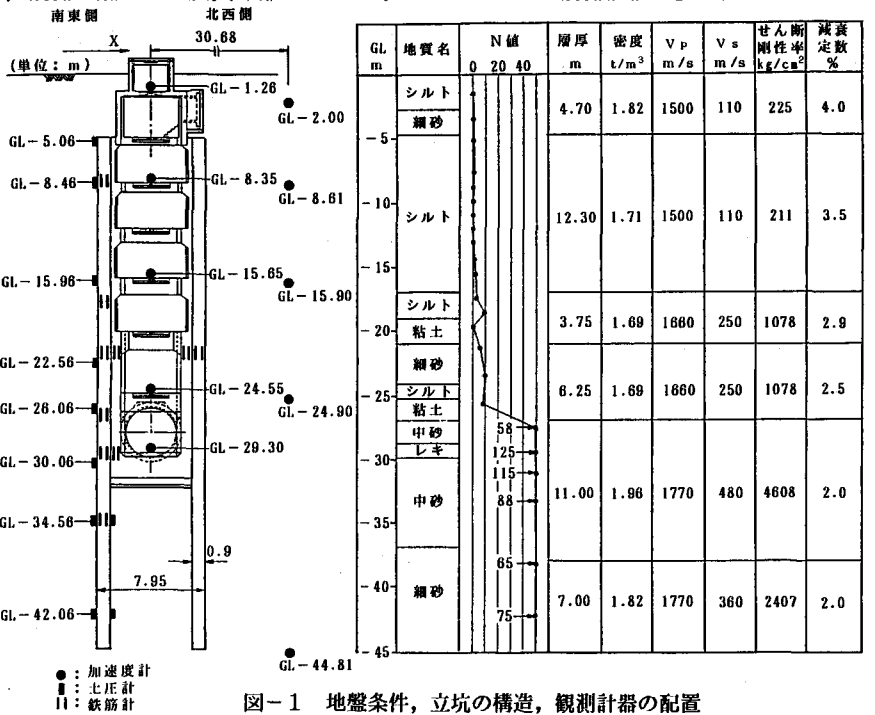


図-1 地盤条件、立坑の構造、観測計器の配置

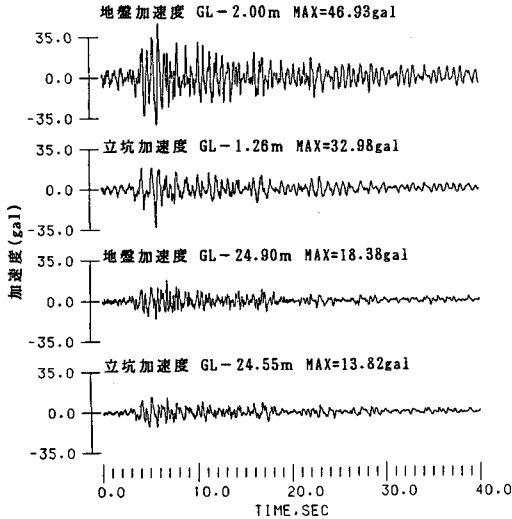


図-2 地盤・立坑の加速度時刻歴波形

た。図-3には、図-2の地盤・立坑の加速度記録のフーリエスペクトルを深度毎に対応させて示す。

地表付近の地盤・立坑の記録の卓越振動数は両者とも1.1,1.6Hzと共通しており、立坑の挙動は地盤の振動特性に影響されていることが推定される。地表記録のフーリエ振幅は、GL-25m付近の地盤・立坑のフーリエスペクトルと比較すると、1.6Hzにおいて大きく増幅している。この1.6HzはGL-17m以浅の沖積層( $V_s=110\text{m/s}$ )の一次の固有振動数と一致しており、地盤の加速度は $V_s=110\text{m/s}$ の沖積層で大きく増幅していることがわかる。立坑頂部のフーリエ振幅は1.3Hz以上の範囲において地盤の振幅の1/2以下となっており、加速度の時刻歴波形からもわかるように立坑は地盤より振動の振幅が小さくなっている。

**(2) 地盤・立坑の変形** 地盤・立坑の変形について、加速度記録を積分して求めた変位記録を用いて検討する。地盤・立坑の変位時刻歴波形を深度毎に対応させて図-4に示す。地盤と立坑の変位時刻歴波形は位相が良く一致しており、この図からも立坑の挙動は周辺地盤の変形の影響を受けていることがわかる。地盤と立坑の時刻歴波形の振幅を比較すると、地表付近では立坑の変位は地盤より30%程度小さくなっている。この現象は立坑頂部の加速度フーリエ振幅が地表の振幅の1/2以下となっていることと符合する。

次に立坑の変形性状について、連壁の鉛直方向鉄筋の観測記録を用いて検討する。図-5の上側は南東側連壁の上下(GL-8.3, GL-34.6m)に位置する鉄筋計の記録であり、二つの記録の位相はほとんど一致している。図-5の下側は同じ深さで反対側(北西側, 南東側)に位置する鉄筋計の記録であり、この図からは両者の振幅が等しく、位相が反転していることが読み取れる。これらのことより、立坑は中心軸に対して対称に、一次モードで振動していることがわかる。

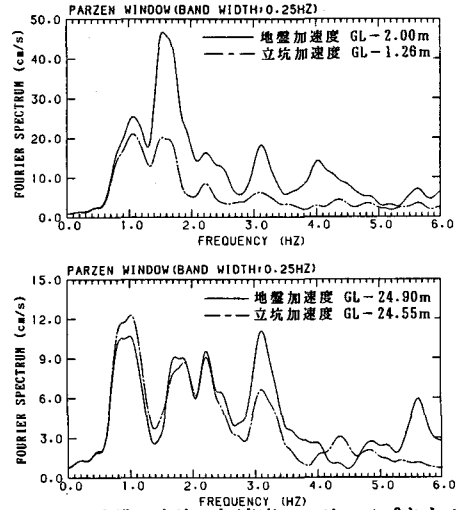


図-3 地盤・立坑の加速度フーリエスペクトル

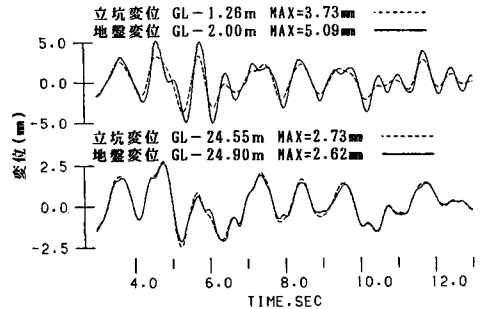


図-4 地盤・立坑の変位時刻歴波形

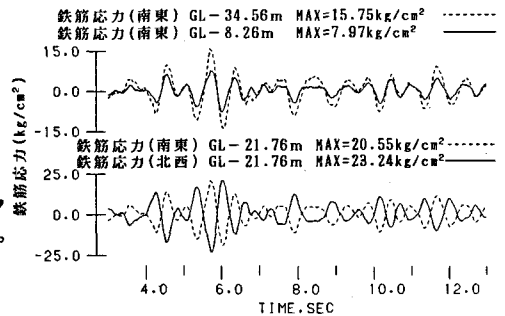


図-5 鉄筋応力の時刻歴波形

(3) 地震時土圧

a) 地震時土圧と相対変位 立坑に作用する地震時土圧と地盤～立坑間の相対変位との関係について検討するため、図-6に示すように地震時土圧と相対変位の時刻歴波形を、それぞれ深度毎に対応させて比較した。地震時土圧は立坑を押す方向を正とし、相対変位は地盤の変位から立坑の変位を差し引いて求めた。地表付近のGL-8.5m, 最大値が観測されたGL-26.1mの地震時土圧波形は相対変位波形の位相に、やや土圧が先行する傾向がみられるがほぼ位相が一致しており、両者の間には強い相関関係が存在していることがわかる。

地震時土圧波形を深さ方向で比較してみると、GL-8.5mの立坑上部とGL-16.0m以深では位相が逆転している。相対変位波形についても地震時土圧と同様に、立坑上部とGL-25m付近では位相が逆転している。

b) 地震時土圧と地盤・立坑の変位分布 地震時土圧と地盤・立坑の変形との関係について、これらの記録の鉛直方向分布により考察する。ここでは、まず変形に大きな影響を与える立坑と地盤の剛性について比較した。立坑の挙動は一次の曲げ変形が支配的であることは前述したとおりである。そこで一つの例として、立坑をGL-27m以深の $V_s=480\text{m/s}$ の洪積地盤に固定された片持梁と仮定し、曲げ振動の一次の固有振動数を算出すると7Hz以上となる。一方、立坑を片持梁と仮定した部分に相当するGL-27m以浅の沖積地盤は、一次の固有振動数が約1.4Hzである。このことは剛性の強さを振動数で表現すると、立坑は地盤に対して約5倍の剛性を有していることになる。

図-7に主要動付近の各時刻における、地盤および立坑の変位分布に地震時土圧を併記して示す。ここで地盤と立坑の変位の差は、図-6に示した相対変位に対応する。地盤の変位は表層で大きく増幅しており、この部分の地盤の変位は立坑の変形に大きく寄与している。しかし立坑の方が地盤より剛性が高いため立坑は地盤の変形に完全には追従していない。よって図-4にも示したように立坑は地盤の変位より振幅が小さくなっており、地盤と立坑の間に相対変位が生じている。一方GL-17m以深の $V_s=250\text{m/s}$ 以上の地盤は立坑の変形を支えることになる。また立坑は地盤より剛性が高いため、立坑の変位振幅は表層部の変形に伴って地盤より大きくなり、GL-25m付近では表層部とは反対方向に相対変位が生じている。

地震時土圧は地盤～立坑間の相対変位と強い相関のあることを示したが、地震時土圧は相対変位に対応して表層部とGL-25m付近では作用方向が反転している。相対変位は地表付近で最大となっているのに対して、地震時土圧はS波速度が急変するGL-27m付近で最大となっている。これは地震時土圧が地盤バネを介して相対変位によって生じていると考え、 $V_s$ 値が大きいGL-27m付近で最大値を示していることと対応する。

これらのことから、立坑の剛性が地盤より高いため地盤と立坑の変位振幅に差が生じ、この相対変位に起因して地震時土圧が生じるものと推定さ

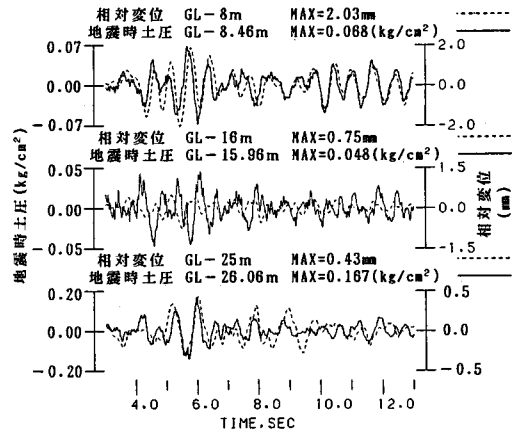


図-6 地震時土圧と相対変位の時刻歴波形

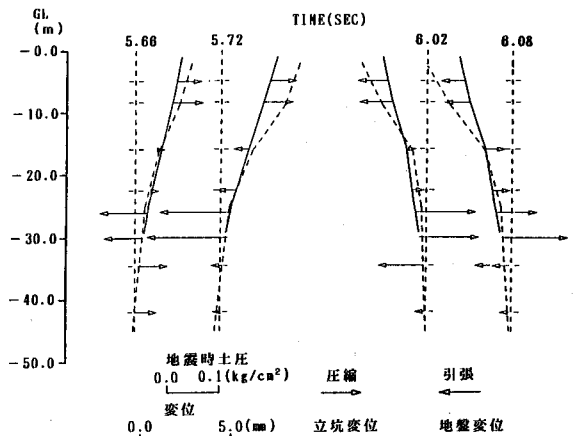


図-7 地震時土圧と地盤・立坑の変位

れる。

### c) 相対変位・地震時土圧・鉄筋応力の関係

相対変位、地震時土圧と立坑の曲げ変形により発生している鉄筋応力との関係について検討するため、これらの記録の時刻歴波形の比較を行った。図-8に相対変位と鉄筋応力波形、図-9には地震時土圧と鉄筋応力波形の重ね書きをそれぞれ深度毎に対応させて示す。

GL-8m付近の相対変位波形と鉄筋応力波形は位相がほぼ一致しており、波形の形状もよく対応している。GL-25m付近については位相が反転しているが振動周期はほぼ一致している。位相が反転しているのは、立坑が一次モードで変形しているのに対して、相対変位の位相が地表部と地中部で逆転していることに起因している。地震時土圧と鉄筋応力の関係についても相対変位と同様の傾向にあり、地表付近では両波形は位相、形状ともよく一致しており、GL-16m以深では位相が反転している。

図-10には図-9に示した地震時土圧、鉄筋応力のフーリエスペクトルを示す。これらの記録はいずれも卓越振動数が1.1, 1.6Hzと共通しており、スペクトルの形状もよく対応している。

これらのことから、地盤～立坑間の相対変位、地震時土圧、鉄筋応力の間には強い相関関係のあることがわかる。

### 4. まとめ

立坑の上部が軟質な沖積層、下部がN値50以上の洪積層中に位置する立坑の地震観測記録に基づき、立坑と地盤の地震時挙動について検討した結果、地盤～立坑間の相対変位、地震時土圧、鉄筋応力の間には強い相関関係のあることがわかった。

今後も地震観測を継続しデータの蓄積を図るとともに、加速度レベルのより大きい地震波入力に対する地盤・立坑の挙動等について検討していく予定である。

### 参考文献

Kaizu, N., Sugi, T., Kuwahara, H., Suzuki, H., "Observation and Numerical Analyses of Dynamic Earth-Pressure of In-Ground LNG Tanks," Proc. of 9WCEE, (1988).

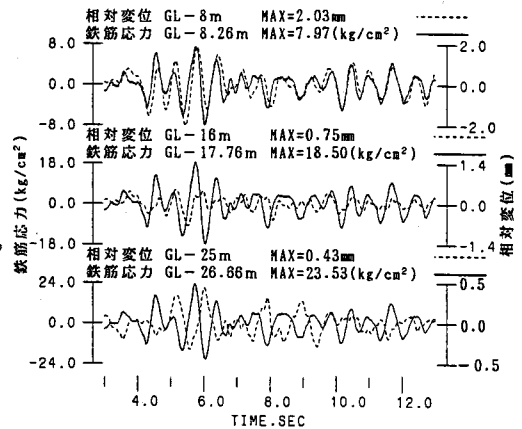


図-8 相対変位と鉄筋応力の時刻歴波形

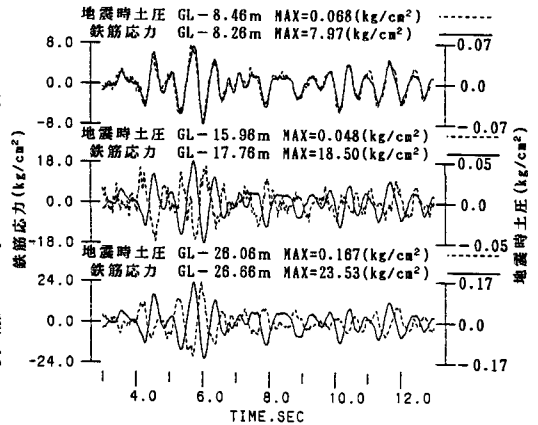


図-9 地震時土圧と鉄筋応力の時刻歴波形

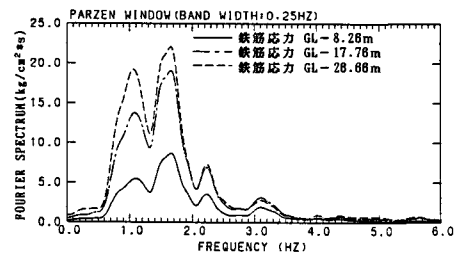
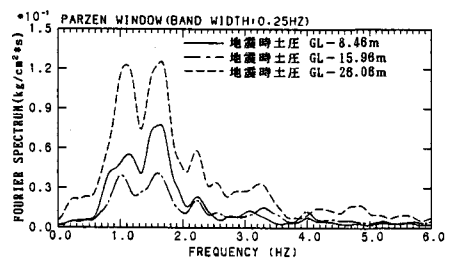


図-10 地震時土圧・鉄筋応力のフーリエスペクトル