

(190) 部分的な液状化による地盤の動的応答が埋設管に及ぼす影響に関する検討

東京ガス(株)基礎技術研究所

安藤 広和

佐藤 栄

島村 一訓

1. はじめに

地盤の液状化により、埋設管などの地中構造物に少なからずの影響を及ぼすことは過去の震害事例¹⁾から明らかになっているが、十分な対策法および耐震設計法は確立されていないのが現状である。近年、浜田ら^{2) 3)}により、液状化発生後、地盤に大規模な永久変位が生じ、埋設管被害の一因になっていることが明らかにされた。しかし、この地盤変状のみでは埋設管に静的な引張りまたは圧縮変形しか生じないため、繰返し変形が作用した痕跡のある埋設管の被害事例を十分に説明し得ない。そのため、部分的な液状化により発生する地盤の動的応答のメカニズムおよびそれが埋設管に与える影響を解明するための実験を行い、併せて理論解析⁴⁾および有限要素法による数値解析から動的応答変位および埋設管に生じるひずみ量の算定を行ったので報告する。

2. 実験内容

図1に示すように、実験用地盤構成は緩詰め珪砂からなる液状化層およびその周囲を開東ロームからなる非液状化層とした。非液状化層については液状化層上のみ含水させ十分練り返した軟弱層、それ以外は含水させず十分締固めた硬質層である。地盤条件は液状化層の相対密度 $D_r = 20 \sim 50\%$ 、軟弱層のせん断波速度 $V_{s1} = 2.0 \text{ m/sec}$ 、単位体積重量 $\gamma_{t1} = 12 \text{ kN/m}^3$ 、硬質層で $V_{s2} = 7.0 \text{ m/sec}$ 、 $\gamma_{t2} = 14 \text{ kN/m}^3$ 度に調節し、実規模の2.5分の1である地盤模型を作成した。管は外径 $D_o = 13 \text{ mm}$ 、内径 $D_i = 11 \text{ mm}$ 、弾性係数 $E = 2352 \text{ MN/m}^2$ のポリカーボネイトパイプを使用した。

実験は液状化層厚 $z_1 = 0.3 \text{ m}$ 、軟弱層厚 $z_2 = 0.15 \text{ m}$ 一定、液状化範囲を $\ell = 0.6, 0.8$ および 1.2 m と変えた計3ケースとした。図に示すx方向に周期 $T = 0.2 \text{ sec}$ の正弦波を加速度 200 gal から 100 gal 毎に液状化発生まで順次入力し、A2～A3での地盤加速度、P1～P3での間隙水圧およびPS1～PS6での管上下側のひずみを収録した。

3. 実験結果および考察

液状化範囲 $\ell = 1.2 \text{ m}$ における地盤加速度、過剰間隙水圧比および管軸ひずみの時間変化を図2に示す。地盤加速度は硬質層(A2)では入力加速度(A1)とはほぼ一致しているが、軟弱層(A3)では加振開始約40

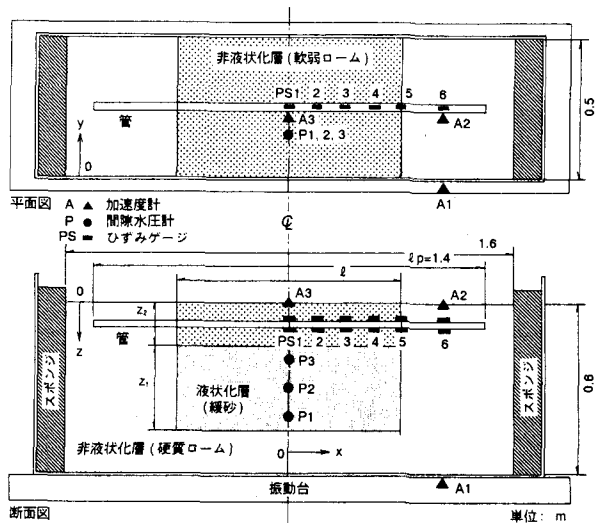


図1 実験に用いた地盤模型

秒後に、入力に対する応答倍率で1.5倍程度増幅した。ほぼ同時刻に過剰間隙水圧比 $\Delta U/\sigma'_v$ も液状化層上部(P2およびP3)で1.0に達しており、管軸ひずみが液状化発生前と比較して著しく増幅し、PS5では5倍程度となった。この傾向は程度の差こそあるものの、液状化範囲 $l=0.6$ および 0.8 m関してもほぼ同様であった。

全ケースについて、液状化発生前および発生時における管軸ひずみの分布を図3に示す。ここで、液状化前は、P3における過剰間隙水圧比 $\Delta U/\sigma'_v=0.5$ 、液状化発生時は $\Delta U/\sigma'_v=1.0$ となる時刻での管軸ひずみとし、比較のため入力加速度(A1)で除して正規化した。全ケースとも液状化発生時において液状化発生前と比較して管ひずみが増幅し、その分布は硬質層との境界(PS6)に近いほど増大する傾向となった。管ひずみは $l=1.2$ mで最大 $1.2\mu/gal$ 、 $l=0.8$ mで $0.8\mu/gal$ 、 $l=0.6$ mでは $0.1\mu/gal$ (発生前とあまり変化なし)程度となり、液状化範囲が長くなると大きくなった。以上の理由は部分的な液状化発生により、液状化層と軟弱層の間で著しくせん断剛性が低下することで軟弱層独自の動的応答により非液状化表層において、液状化前と比較して地盤の不均一性が大きくなったためと考えられる。そのため、管ひずみは増幅し、特に境界付近で大きくなった。また、この地盤の不均一度は液状化範囲に依存するものと考えられる。

3. 解析結果および考察

3.1 解析方法

部分的な液状化発生時における管の埋設された軟弱層独自の動的応答を、図4に示すように地盤変位 u_{g2} により加振され生じる水平振動と仮定すると、理論解析から軟弱層の地盤変位 u_{g1} は(1)式より(2)式で表される。管に生じる軸ひずみは(3)式により算出される。

$$\frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} = V_c^2 \frac{\partial^2 u_g}{\partial x^2} \quad (1)$$

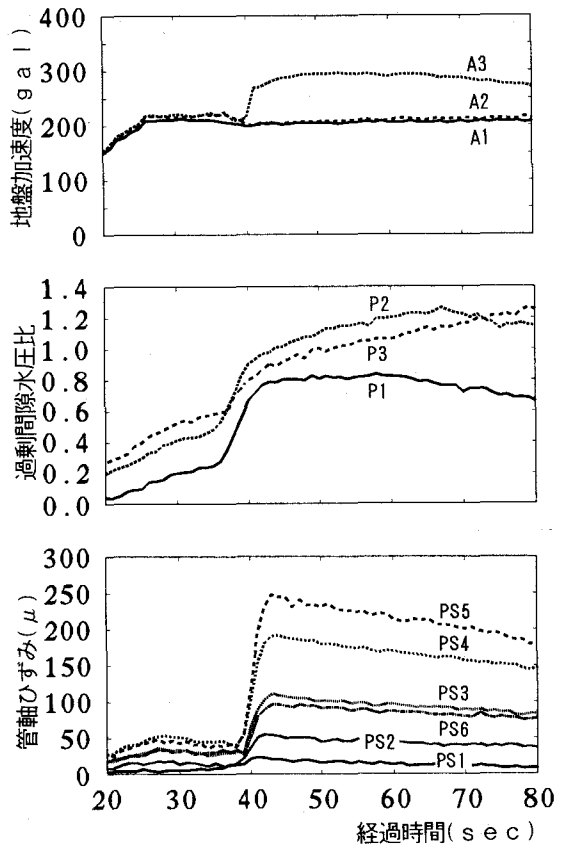


図2 液状化範囲 $l=1.2$ mにおける実験結果

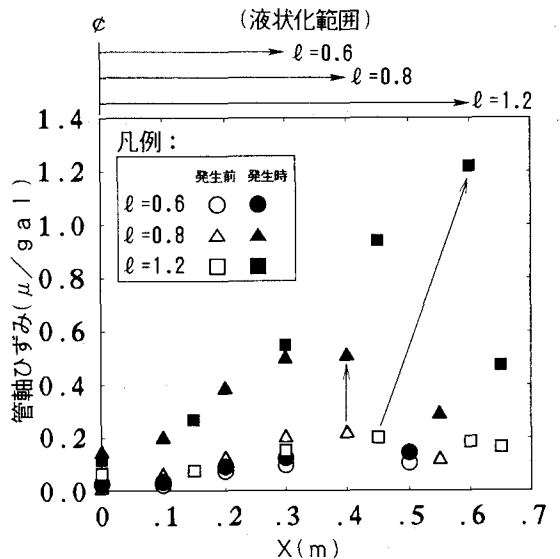


図3 管軸ひずみの分布

$$u_{g1} = u_{g2} \cdot \cos^{-1} \frac{\pi \ell}{V_{c1} T} \cdot \cos \frac{2 \pi x}{V_{c1} T} \quad (2)$$

$$EA \frac{\partial^2 u_p}{\partial x^2} = -K(u_g - u_p) \quad (3)$$

u_g : 地盤の変位 u_p : 管の変位
 V_{c1} : 地盤の波動伝播速度 T : 周期
 E : 管の弾性係数 A : 管の断面積
 K : 管軸方向地盤反力係数

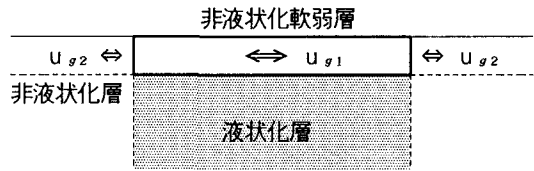


図4 部分的な液状化による地盤の動的応答

加えて、数値解析として2次元地盤応答解析プログラム“FLUSH”を用いて、各ケースにおける地盤構成をモデル化し、応答シミュレーションを行うことにより、理論解析と同様に地盤変位 u_g を求め、(3)式より管ひずみを算出した。

3.2 実験結果との比較

理論解析においては軟弱層のポアソン比を $\nu_1 = 0.48$ (非排水粘土)、波動伝播速度 V_{c1} を模型地盤の応力条件を $\sigma_z = 0$ かつ $\varepsilon_y = 0$ と仮定し、 $V_{c1} = \sqrt{2 / (1 - \nu_1) \cdot V_{s1}}$ で与えた。数値解析に関しては、液状化層のせん断弾性係数を $G = 0$ 、硬質層のポアソン比を $\nu_2 = 0.45$ 、減衰定数 h を軟弱層で $h_1 = 2.0\%$ 、硬質層で $h_2 = 5\%$ とした。また、両解析とも地盤反力係数を $K = G$ と仮定し、地盤の単位体積重量 γ_s およびせん断波速度 V_s は実験と同じ値を用いた。

図5に実験と解析結果の比較を示す。各ケースとも、理論解析と実験結果の分布傾向は概ね一致しており、実験で得られた地盤の動的応答および管ひずみを十分評価できることが分かった。数値解析と実験結果の分布傾向も概ね一致しているが、理論解析と比較すると若干小さくなる傾向がみられた。これは理論解析では地盤の応力条件を $\sigma_z = 0$ と仮定していること、減衰および硬質層における地盤変形を考慮していないためと考えられる。また、範囲 $\ell = 1.2$ mにおいて、両解析とも、実験結果と比較して境界付近(PS5)および硬質層(PS6)ではよく一致したが、軟弱層(PS2~4)では実験結果より小さい値を示したこのことは、地盤と管の間に生じる相対変位 ($u_{g1} - u_{p1}$) が他のケースと比較して大きくなることにより、地盤と管にすべりが生じたためと考えられる。

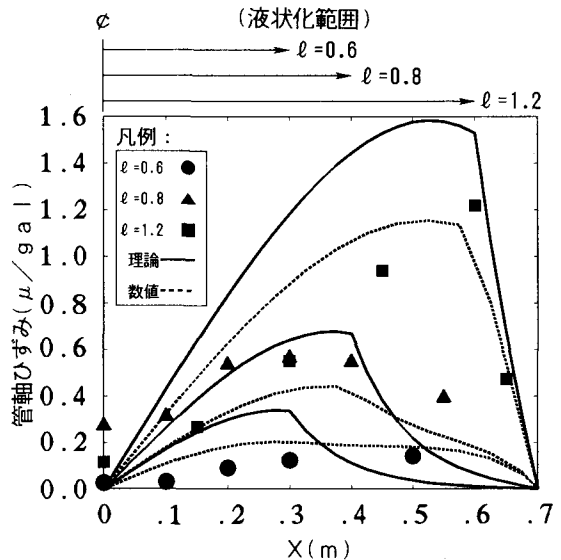


図5 管軸ひずみの解析と実験結果の比較

3.3 実規模における数値解析結果

液状化範囲に加えて、表層地盤のせん断波速度および減衰を考慮した場合の動的応答を評価するため、図4に示す液状化層上の軟弱層を実規模でモデル化し、数値解析を実施した。入力には正弦波および宮城県沖地震(東北大1F NS方向)の主要動波を用いた。地盤のせん断波速度 V_s と動的応答変位の関係を図6に示す。ここで、 V_{scr} は(3)式より求まる共振せん断波速度である。正弦波入力における変位応答倍率 u_{g1} / u_{g2} は、

減衰定数 $h = 10\%$ で最大 7.4 倍程度、 $h = 20\%$ で最大 4.3 倍程度となった。表層地盤のせん断波速度は周期 $T = 1.0$ 秒とした場合、液状化範囲 $l = 30\text{m}$ (実験における $l = 1.3\text{m}$ に相当) で $V_s = 31\text{m/sec}$ 、 $l = 50\text{m}$ で $V_s = 51\text{m/sec}$ 程度となる。共振せん断波速度 V_{scr} における地震波入力結果は、減衰定数 $h = 10\%$ で最大 3.9 倍、 $h = 20\%$ で最大 2.8 倍程度となり、正弦波入力結果と比較してランダム波であるため低い値となった。

以上より、部分的な液状化発生時の地盤の動的応答は、入力波形および卓越周期、管の埋設される表層地盤のせん断波速度および減衰の程度を十分検討する必要があることが示唆された。

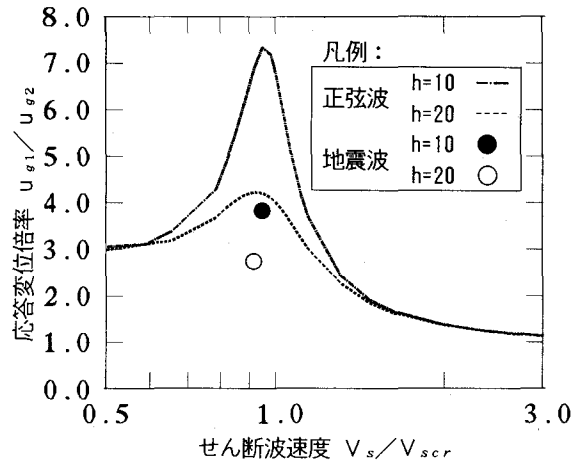


図6 せん断波速度と動的応答変位の関係

4. まとめ

部分的な液状化発生時の地盤の動的応答およびそれが埋設管に及ぼす影響を検討するため、実験および解析を実施ところ、以下に示す知見を得た。

- 1) 部分的な液状化発生時には、表層地盤の不均一な動的応答により、発生前と比較して管に生じるひずみは増大し、液状化層と非液状化層の境界付近で最大値をとる。
- 2) 理論解析および数値解析で求めた管ひずみの結果は実験結果とよく一致したが、動的応答の増加に伴い、管と地盤との間にすべりが生じていると考えられる。
- 3) 実地盤で埋設管の耐震性評価を行う際には、地盤のせん断波速度および減衰、管と地盤との間のすべりに関して十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 例えば、日本ガス協会編、日本海中部地震と都市ガス、1986
- 2) 浜田・安田他、液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集第376号/Ⅲ-6、pp. 211-220、1986
- 3) 浜田・安田他、液状化による地盤の永久変位と地震被害の関する研究、土木学会論文集第376号/Ⅲ-6、pp. 221-229、1986
- 4) 西尾、塚本、羽村、部分的に液状化した地盤中の埋設管挙動に関する実験的研究、土木学会論文集第380号/I-7、pp. 449-458、1987.

(連絡先) 東京ガス(株)基礎技術研究所 〒105 東京都港区芝浦1-16-25 TEL03-5484-4635