

1. はじめに

地震時における地盤の液状化現象を把握することは、地中埋設管の液状化対策を考える上で重要である。従来から、地盤の液状化による過剰間隙水圧の発生・消散過程に関する研究¹⁾や、これを用いた地中埋設管の液状化地盤中での動的応答に関する研究²⁾が数多くなされている。これらの地中埋設管の液状化対策に関する研究においては、地中埋設管は地下水位下の飽和領域に位置するとの前提条件でなされている。しかし、液状化した地盤でしばしば見られる噴砂噴水現象から明らかなように、地盤の液状化によって飽和層の間隙水が不飽和層へ浸透し、液状化する区域が上層へ拡大する可能性が十分考えられる。そこで本研究では、不飽和領域への間隙水の浸透を考慮して液状化時における地盤と地中埋設管の応答解析を行った。

2. 解析方法

液状化時の間隙水浸透による過剰間隙水圧の消散を考慮する方法として、従来からの研究では、Terzaghiの圧密方程式やBiotの多孔質物体変形理論が用いられてきた。しかし、これらはともに地下水位下の飽和領域のみを議論する場合には有効であるが、液状化時での不飽和領域への間隙水の浸透を議論するには適切でない。このため本研究では、不飽和領域への間隙水の浸透を考慮するために、飽和-不飽和領域の透水方程式³⁾を用いて、液状化時における間隙水の浸透現象を解析した。飽和-不飽和領域の透水方程式は

飽和領域の透水場では、

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{1}{\alpha \gamma_w} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right\} \quad (1)$$

不飽和領域の透水場では、

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x^* \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y^* \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z^* \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right\} \quad (2)$$

である。ここで、 h ；全水頭、 h_p ；圧力水頭、 $k_{x,y,z}$ ；飽和領域での透水係数、 $k_{x,y,z}^*$ ；不飽和領域での透水係数、 α ；土の圧縮率、 c ；比水分容量、 γ_w ；水の単位重量である。ところで、式(1)において、鉛直方向のみを考え、透水係数を定数とし、 $\alpha = m_v$ とすると、Terzaghiの圧密方程式となる。なお、 m_v は体積圧縮係数である。比水分容量 c および不飽和領域の透水係数 k は、Brooks・Coreyの式⁴⁾を用いると、

$$\frac{k^*}{k} = \left(\frac{P_b}{S} \right)^{3\lambda+2} \quad (3)$$

$$c \equiv \frac{\partial \theta}{\partial h_p} = \lambda (n - \theta_r) \frac{P_b^\lambda}{S^{(\lambda+1)}} \quad (4)$$

となる。ここで、 θ ；土の体積含水率、 n ；間隙率、 θ_r ；浸透、排水によって移動しない含水状態での体積含水率、 P_b ；Bubbling Pressure、 S ；サクション、 λ ；間隙径分布指数である。式(3)、(4)では、間隙水の浸透による地下水位の上昇でサクション S が低下することに伴い、 c 、 k^* が時々刻々と変化することを意味している。

過剰間隙水圧の発生・消散過程の解析は、①Martin, Finn and Seedの提案した式⁵⁾によって、地震動による過剰間隙水圧の発生量を求める、②式(1)、(2)の差分式を用いて、過剰間隙水圧の消散量を求め、これにより、各地点での間隙水圧を求める、③間隙水圧がゼロになる地点を地下水位面とする、④新たな地下水位面をもとに、ある時刻での過剰間隙水圧を決定する、という手順で行ない、これを地盤の地震応答解析に組み込んだ。

図-1は、飽和-不飽和領域の浸透解析を組み込んだ地盤および地中埋設管の応答解析のフローチャートである。解析には、有限要素法を用いて有効応力法による地盤の応答解析を行った。また、地中埋設管の応答解析は、数値誤差が改善された伝達マトリックス法を用い、2次元平面内での擬似静的問題として取り扱った。地中埋設管は、伸縮ばね、回転ばねから成る継手モデルによって連結された弾性床上の梁とみなし、地盤ばねを介して地盤変位が地中埋設管に作用するものとした。

3. 解析例

解析には、新潟地震(1964年)の際、液状化の発生が顕著であった新潟市川岸町の地盤を用い、図-2のようにモデル化し、土質定数は各層一定と仮定した(Model-I)。これの他に、川岸町の地盤よりさらに軟弱な地盤を想定し、Model-IIとした。Model-IIは、Model-Iの第6層までのせん断弾性定数を小さくしたモデルであり、地表付近のN値が1前後であるような地盤に相当する。地下水位はともに深さ2mとした。また、入力地震動には、Taft記録波を用い、解析ピッチを0.02秒とした。

<他の方法との比較> 不飽和領域への間隙水の浸透を考慮した本解析と他の解析とを比較するために表-1に示すような3ケースについて、Model-Iの地盤モデルを対象に解析を行った。図-3は、第4層における過剰間隙水圧比の時間的变化を示している。Case-1では、間隙水の浸透による過剰間隙水圧の消散を考慮していないため消散せずに完全液状化に至っている。しかし、間隙水の浸透による過剰間隙水圧の消散を考慮したCase-2,3では、完全液状化にまでは至っていない。また、Case-2の方が、Case-3より消散している。本解析では、Case-2において不飽和領域への浸透が考慮されていないので、地下水位面直下での過剰間隙水圧は、飽和・不飽和領域の境界部で自由に消散するという仮定を設けている。そのため、Case-2の方がCase-3に比べ過剰間隙水圧の消散が促進されるという結果になったものと考えられる。

<過剰間隙水圧比の時間的变化> 次に、Case-3の解析条件でModel-Iを対象に、入力最大加速度を40, 45, 50galと変化させて解析を行った。このときの過剰間隙水圧比の時間的变化を図-4に示す。入力最大加速

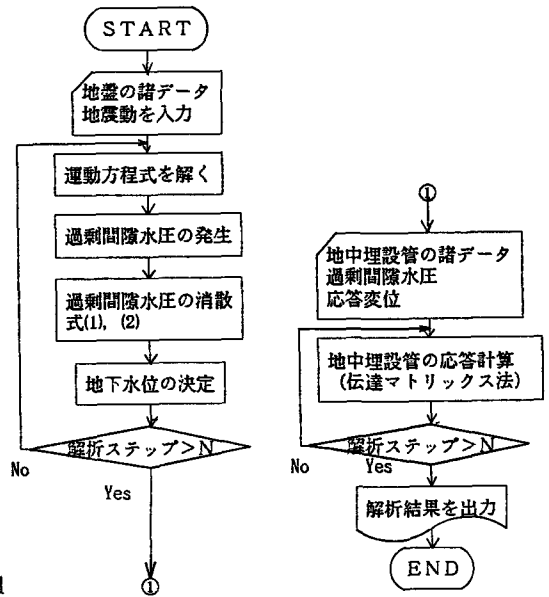


図-1 地盤および地中埋設管の応答解析のフローチャート

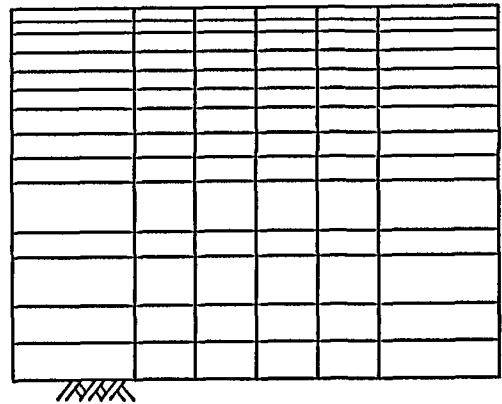


図-2 地盤モデル

表-1 解析条件

	入力最大加速度	応力-ひずみモデル	過剰間隙水圧の発生	過剰間隙水圧の消散
Case-1	40 gal	Hardin-Drnevich	Martin, Finn, Seed ⁵⁾	—
Case-2	40 gal	Hardin-Drnevich	Martin, Finn, Seed	Terzaghiの式
Case-3	40 gal	Hardin-Drnevich	Martin, Finn, Seed	式(1), (2)

度、地下水位面直下での過剰間隙水圧は、飽和・不飽和領域の境界部で自由に消散するという仮定を設けている。そのため、Case-2の方がCase-3に比べ過剰間隙水圧の消散が促進されるという結果になったものと考えられる。

<過剰間隙水圧比の時間的变化> 次に、Case-3の解析条件でModel-Iを対象に、入力最大加速度を40, 45, 50galと変化させて解析を行った。このときの過剰間隙水圧比の時間的变化を図-4に示す。入力最大加速

度を大きくしていくと、過剰間隙水圧比のピーク値が大きくなり、ピーク値の継続時間が長くなる。入力最大加速度が50 gal のときには、完全液状化状態に至り、約17秒後から消散が始まっている。

<地下水位の時間的変化と地中埋設管との位置関係> 図-5, 6は、Case-3の解析条件で入力最大加速度40, 45, 50 gal と変化させたときの地下水位の時間的変化と地中埋設管との位置関係を示している。ここで、図-5はModel-I、図-6はModel-IIを対象に解析を行ったものである。地中埋設管は、管体が不飽和層に埋設されている埋設中心深さ1.5mの場合と、管体の下半分が地下水位下の飽和層にある埋設中心深さ2.0mの場合の2ケースを考えた。Model-Iでは、地下水位が最大約0.3m上昇しており、埋設中心深さ2.0mの地中埋設管は約15秒後には管体全部が地下水位面下の飽和層に位置している。これに対し、埋設中心深さ1.5mの地中埋設管は、地下水位が上昇しても管体のほとんどは不飽和層にある。また、Model-IIの場合、地下水位は最大約1.4m上昇している。このため、埋設中心深さ1.5, 2.0mの地中埋設管とも、地震時には、飽和層に位置することになる。したがって以上のことから、地中埋設管が地下水位面より浅い不飽和層に埋設されていたとしても、地震時に地下水位が上昇することにより地中埋設管の付近の地盤が飽和し、液状化の発生する可能性が十分高いと考えられる。言い換えれば、不飽和層に地中埋設管が埋設されていたとしても、地盤の液状化による被害を受ける危険性があるといえる。

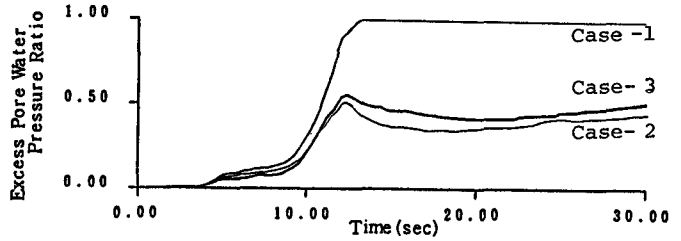


図-3 各ケースにおける第4層の過剰間隙水圧比の時間的変化

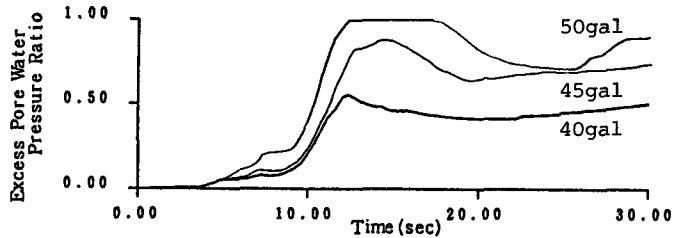


図-4 各入力加速度における第4層の過剰間隙水圧比の時間的変化

Model-Iでは、地下水位が最大約0.3m上昇しており、埋設中心深さ2.0mの地中埋設管は約15秒後には管体全部が地下水位面下の飽和層に位置している。これに対し、埋設中心深さ1.5mの地中埋設管は、地下水位が上昇しても管体のほとんどは不飽和層にある。また、Model-IIの場合、地下水位は最大約1.4m上昇している。このため、埋設中心深さ1.5, 2.0mの地中埋設管とも、地震時には、飽和層に位置することになる。したがって以上のことから、地中埋設管が地下水位面より浅い不飽和層に埋設されていたとしても、地震時に地下水位が上昇することにより地中埋設管の付近の地盤が飽和し、液状化の発生する可能性が十分高いと考えられる。言い換えれば、不飽和層に地中埋設管が埋設されていたとしても、地盤の液状化による被害を受ける危険性があるといえる。

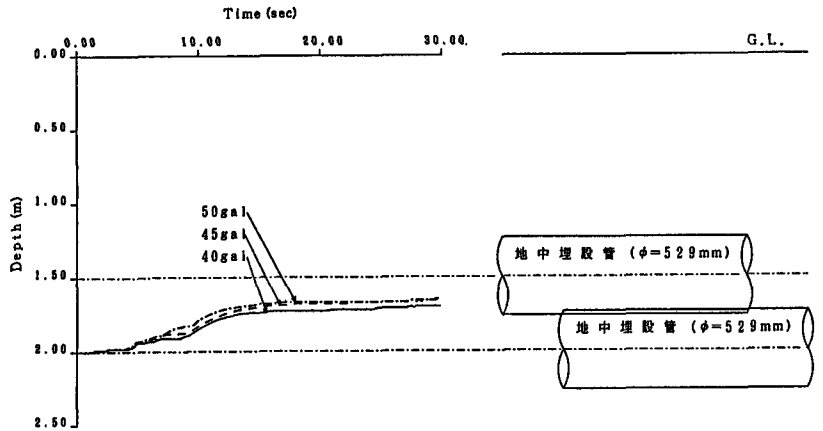


図-5 地下水位の時間的変化と地中埋設管の埋設深さとの位置関係 (Model-I)

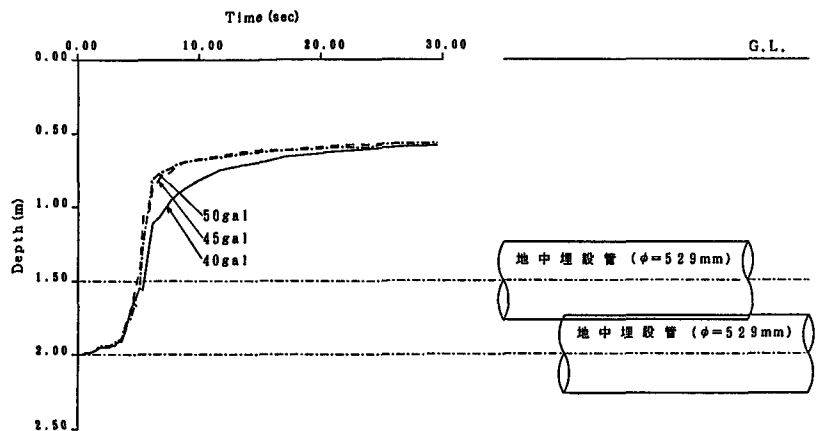


図-6 地下水位の時間的変化と地中埋設管の埋設深さとの位置関係 (Model-II)

<地中埋設管の応答特性> 図-7, 8は, それぞれModel- I, IIの地盤に埋設された地中埋設管の継手部における応答の最大値を示している。Model- Iでは継手の回転が生じておらず継手の回転量はゼロとなるので, 継手の回転量のグラフは省略した。なお, 本研究において対象とした地中埋設管は, 上水道配水施設の主要幹線に用いられている口径 529mmのダクタイル鋳鉄管 (5m×20本) であり, 地中埋設管の両端は構造物に接合しているものとした。図-7より, 不飽和層に埋設されている埋設中心深さ 1.5mの地中埋設管の方が, 地下水位の上昇により管体全体が飽和層に位置することになる埋設中心深さ 2.0mの地中埋設管より伸縮量が大きくなる。飽和層では, 液状化しているために, 地中埋設管と地盤との摩擦力が低下することがこの原因として考えられる。Model- IIでは, Model- Iよりさらに地盤の液状化が進行しているために, 継手の最大伸縮量は低下している。しかし一方では, 浮力による上向きの力が作用するので, Model- Iでは生じなかった継手の回転が図-8に示されるように生じている。

3. 結論

本研究では, 不飽和領域への間隙水の浸透を考慮することにより, 液状化時における地下水位面上昇と過剰間隙水圧の消散を明らかにした。また, 地中埋設管の応答解析より, 地中埋設管の応答特性を明らかにした。以上のことから, 地中埋設管の地震対策として, 次のことが考えられる。①本研究において提案した手法を用いて, 地震時の地下水位の上昇を把握し, 地中埋設管の周辺の地盤が地震時に飽和しているか否かを判断する必要がある。②地中埋設管が始めから飽和層に埋設されていたり, 地下水位の上昇によって飽和する場合, 液状化対策を地中埋設管に施す必要がある。③地震時においても不飽和層にある地中埋設管の場合, 伸縮によって破損しないような対策を地中埋設管に施す必要がある。

参考文献 1) たとえば, Finn, W.D.L., Lee, K.W. and Martin, G.R.: An Effective Stress Model for Liquefaction, Proc. ASCE, GT6, pp.517 ~533, 1977. 2) 柿谷敏久, 北浦勝, 宮島昌克: 地盤の液状化を考慮した地中埋設管の地震応答特性, 第39回年次学術講演会講演概要集, pp.655~656, 1984. 3) 吉国洋, 宇野尚雄, 柳澤栄司: 新体系土工学17 土の力学 (II), 技報堂出版, pp.215~224, 1984. 4) Brooks, R.H and A.T. Corey: Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, Proc. ASCE., Vol.92, No.1R2, pp.61~88, 1966. 5) Martin, G.R. Finn, W.D.L. and Seed, H.B.: Fundamentals of Liquefaction Under Cyclic Loading, Proc. ASCE, Vol.101, GT5, pp.423~438, 1975.

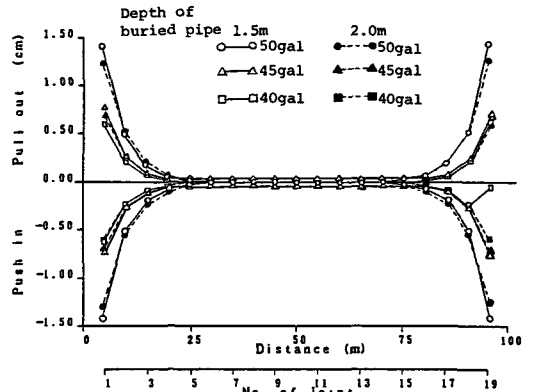
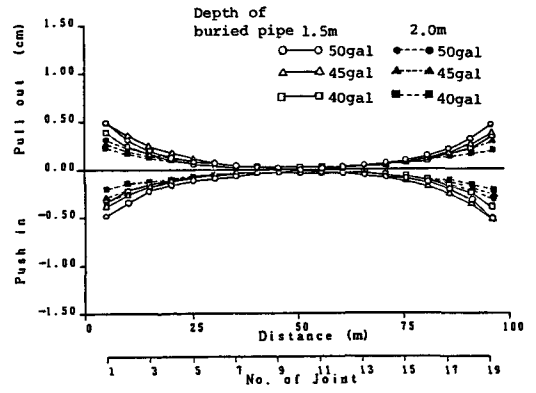
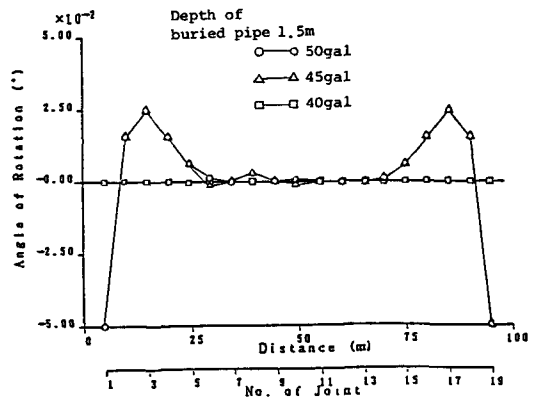


図-7 埋設管の継手の最大伸縮量 (Model- I)



(a) 継手の最大伸縮量



(b) 継手の最大回転角

図-8 地中埋設管の応答 (Model- II)