

(151) 液状化時大変形を防止するための管体補剛の効果

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正員 湊田邦彦
 熊本大学工学部 学生員 ○田中博徳

1. まえがき これまで地盤の液状化により、埋設管等には多くの被害が出てきたが、極端な場合は管体の地表面までの浮上や側方への流動が見られた。そのため液状化を起りにくくする工法が種々考案され、施工されつつあるが、その効果についてはそれほど明確ではない。また管体間の継手の改良によって、地震時の被害を軽減してきたが、上述の管体の浮上や側方流動という大変形にはこの耐震継手も対応しきれないこともあろう。そこで本研究では、S型またはGM型継手を持った補剛用の連続管を、主管と平行に結合することにより、主として管の曲げ変形時の継手部の引抜け・回転角を許容値以下に抑えられるか否かを静的に検討したので、ここに報告する。

2. 埋設管路のモデル化と解析手法 ここで提案する、補剛された埋設管は図1のような概念であり、浮力と側方流動に対して、それぞれ主管の上下および左右の補剛用の連続管と、これらの管路を緊結する補剛板とによって抵抗しようとするものである¹⁾。ここで、埋設管の慣性力や減衰力の影響は小さいものとして無視し、外力は液状化時の浮力や側方流動による地盤の強制変形とし、管体は変形後も弾性範囲内にあるものとする。さらに主管は、伸縮ばねと回転ばねによる継手で連結され、かつ各管体は地盤ばねにより支持されているものとする。そこで、管軸方向・管軸直角方向の変位を連成させずに、2次元平面における3本一組のうちの1本の管体について釣合方程式を書くと次のようになる²⁾。

a) 管軸方向

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} + k_{sx} \cdot u = k_{sx} \cdot u_{sx} \quad \dots(1)$$

b) 管軸直角方向

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + k_{sy} \cdot v = k_{sy} \cdot v_{sy} + P \quad \dots(2)$$

ここに、 E, I, A = 管体の弾性定数、断面2次モーメント、断面積、 k_{sx}, k_{sy} = 地盤の管軸方向、管軸直角方向の単位長さ当りのばね定数、 u, v および u_{sx}, v_{sy} = それぞれ管軸方向、管軸直角方向の管体および地盤変位、 P = 浮力などの管に作用する力。

ところで、本解析は伝達マトリックスによっているが、数値誤差の累積を防ぐため、中村による修正伝達マトリックス法³⁾を利用している。

すなわち、変位に関するベクトル y と力に関するベクトル z の間には、次の関係が成り立つ。

$$\vec{a}y + \vec{b}z = \vec{c} \quad \dots(3)$$

$$\vec{a}y + \vec{b}z = \vec{c} \quad \dots(4)$$

ここに、 \rightarrow は左から右への伝達を、 \leftarrow はその逆方向への伝達を意味する。

ここで、一本の管体の端部における状態量ベクトル V として次のように定義する。

$$V' = [y', z'] \quad \dots(5)$$

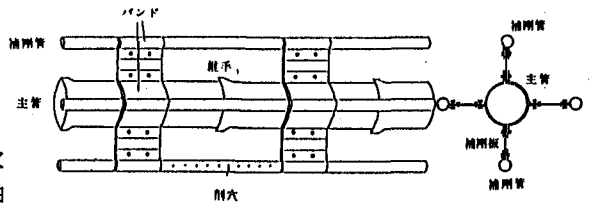


図1 提案する補剛管の概念図

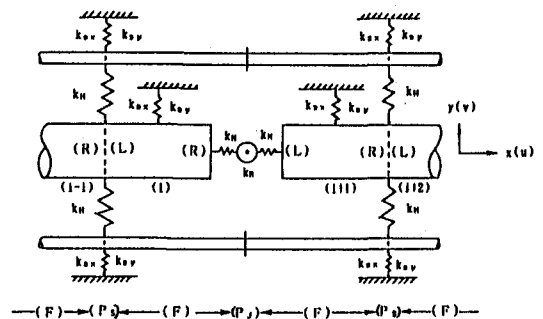


図2 補剛管路のモデル化

ただし、 $y' = [u, v, \psi]$, $z' = [N, M, Q]$, $\psi, N, M, Q =$ 管端部のたわみ角, 軸力, 曲げモーメント, せん断力。
 そこで、(1), (2) 式を状態方程式の形に書き直すと、次のようになる。

$$\frac{dV}{dx} = AV + f(x) \quad (6)$$

ここに、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/EI & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/EI & 0 \\ -k_{sx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -k_{sy} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad f(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ q(x) \\ 0 \\ 0 \\ p(x) \end{bmatrix}$$

$q(x) = k_{sx}u_{sx}$
 = 管軸方向の分布荷重
 $p(x) =$ 管軸直角方向の分布荷重

ここで、(6) 式より得られる格間伝達マトリックスを、3本の平行管よりなる全体系のマトリックス F に統合すると、管の左端より右端へ、 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ が伝達される；

$$[\vec{a}, \vec{b}]_{i,R} = [\vec{a}, \vec{b}]_{i+1,L} \cdot F, \quad \vec{c}_{i,R} = \vec{c}_{i,L} + [\vec{a}, \vec{b}]_{i+1,L} \cdot g_{i,L} \quad (7)$$

さらに、格点の左側の $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ をその右側へ伝達するときは、格点伝達マトリックス \vec{P}_J (継手部；図2の P_J) または \vec{P}_S (補剛板部；図2の P_S) を用いる；

$$[\vec{a}, \vec{b}]_{i+1,L} = [\vec{a}, \vec{b}]_{i,R} \cdot \vec{P}_k \quad (:k = J \text{ or } S), \quad \vec{c}_{i+1,L} = \vec{c}_{i,R} \quad (8)$$

ただし、

$$\vec{P}_J = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & \vec{P}_2 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad \vec{P}_2 = \begin{bmatrix} -1/k_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/k_R & 0 \end{bmatrix} \quad \vec{P}_S = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ K_1 & K_2 & 0 & I & 0 & 0 \\ K_3 & K_4 & K_5 & 0 & I & 0 \\ 0 & K_6 & K_7 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}$$

以上のようにして、 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ および $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ を伝達していくと、各管端ごとに (3), (4) 式が成立するので、その連立方程式を解くことにより、管端の状態量 $[y', z']$ が得られることになる。なお、伝達の途中で、 a, b, c のノルムを低下できるので、数値計算上の桁落ちを防ぐことができる。

3. 解析結果 本研究での解析用モデルは、図3に示すように、 $20@5m=100m$ の長さで、その両端は構造物やマンホール等に剛結されているものとし、さらに補剛された管路の効果と比較するため、単管(主管)のものも検討している。また主管は、口径 500mm のダクタイル管、補剛管は口径 100mm のダクタイル管、さらに補剛板は $500 \times 500 \times 10mm$ の鉄板を標準値として採用し、表1に掲げた。また、液状化時の地盤のばね定数は、平常時の 1% 程度として、図4のような非線形特性を持たせ、 k_{sx} と k_{sy} は同じものとし、浮力を考えるときは地表面以上に管が浮上しないように、剛性を急増させた。

一方、継手は、S型とGM型について考えたが、その復元力特性は伸縮ばね k_T と回転ばね k_R

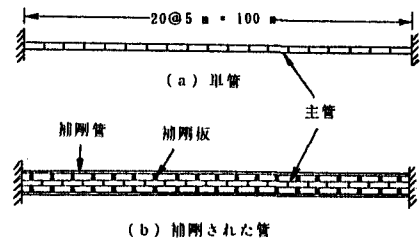


図3 解析用モデル (20@5 m = 100 m)

表1 埋設管の諸元

	呼び径 (mm)	外径 (mm)	管厚 (mm)	弾性定数 (kgf/cm ²)	単位体積重量 (gf/cm ³)
主管	500	528.0	9.5	1.0×10^8	7.15
補剛管	100	118.0	7.5	1.8×10^8	7.15
	縦 (mm)	横 (mm)	板厚 (mm)	弾性定数 (kgf/cm ²)	単位体積重量 (gf/cm ³)
補剛板	500	500	10	1.8×10^8	7.15

[図5, 6の(a),(b)]で見ると、S型は非常に剛で、GM型は極端に軟らかい特徴がある^{1),2)}。

外力としては、浮力と側方流動のいずれか一方が作用する場合を対象とし、ここでは2mの側方流動に対する管の応答を、図7(S型継手)および図8(GM継手)に示している。図中の実線・点線・破線は、それぞれ補剛した管と単管の応答および地盤(外力)の変位に対応している。

まず、管体の側方変位については、地盤変位が2mであるときに、S型継手では[図7(a)]、無対策の単管でも最大46cmであり、この継手の剛性が効いていることがうかがわれるが、そのため補剛した管路は21cmと効果は出ているにもかかわらず、それほど目立たない。しかし、剛性の小さいGM継手では[図8(a)]、単管の側方変位は、地盤の2mと同じ値となっており、そのため両端の固定部に近いところでは管路が大変形をもたらしている。それに対して、補剛した管路では28cmであり、その液状化対策の効果は顕著に認められる。

継手の回転角[両図(b)]および継手伸縮量[両図(c)]は、上述の管体変位を反映したものであるから、S型継手の場合は、単管の場合でも、この程度の側方流動に対して回転角は1°以内かつ継手伸縮量も1mm以内となっており、どちらも許容値以内であり、液状化対策はそれほど必要ではないことを示している。

しかし、GM継手の単管の場合、固定部に近い継手の回転角は10°近くに達し、さらに継手の伸縮量も8cm程度にもなり、吸収能力を大きく越えており、明らかに破損の段階にあるのに対し、補剛された管路では図上に表われない程その変形は小さく、その効果がきわめて顕著である。

ところで、管体の最大曲げ応力は[両図(d)]、当然両固定部に発生しており、S型継手の単管の500kgf/cm²に対し、補剛した管では750kgf/cm²とやや増加するが、許容応力に対してそれほど大きい訳ではない。しかるに、GM継手では、単管は曲げ応力が低下し、逆にGM型では800kgf/cm²と若干増えているが、S型の場合と同程度である。またせん断応力[両図(e)]は主管にはほとんど発生せず、考慮する必要がないことを示している。

一方、補剛管には、両継手とも800kgf/cm²前後の引張り軸応力が発生しているが、もともと施工し易さを考えて、補剛管と補剛板の大きさをひかえめなものにしていたもので、これらの改良により主管および補剛部の応力などは相当低下させることは明らかである。

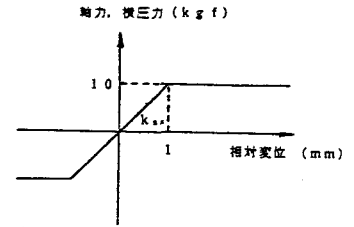


図4 地盤ばね; k_{sx} , k_{sy}

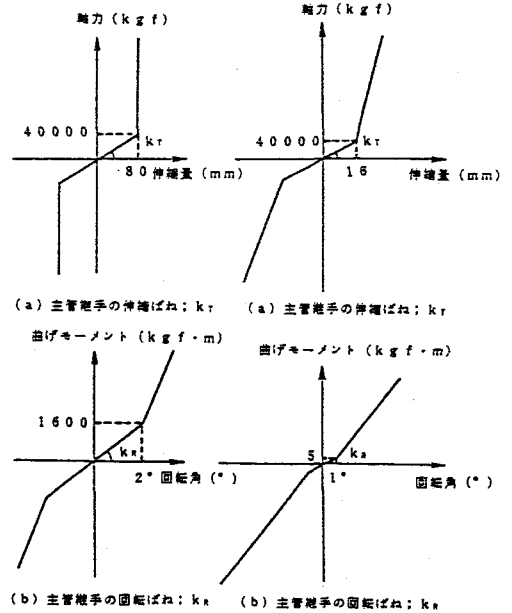
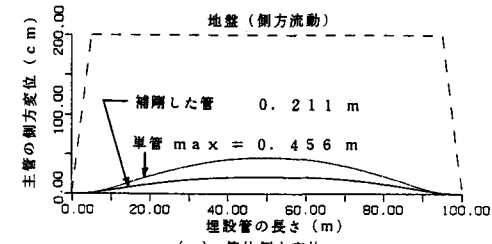
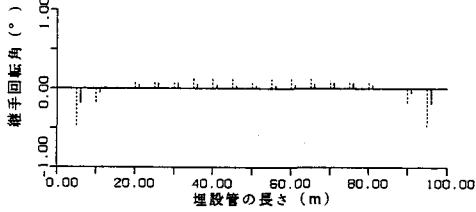


図5 主管継手のばね定数 (S型継手)¹⁾ 図6 主管継手のばね定数 (GM型継手)²⁾

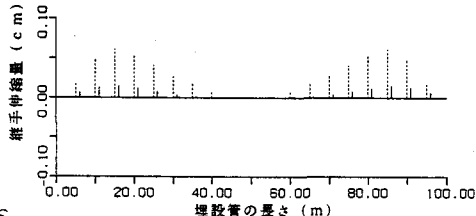
参考文献 1) 秋吉卓・他2名：液状化地盤中の管路の地震応答解析について、昭和63年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1989。 2) 高田至郎・他2名：硬質塩化ビニール管の地震時挙動シミュレーション、水道協会雑誌、第547号、1980。 3) 中村秀治：数値誤差の改善を考慮した伝達マトリックス法の提案、土木学会論文報告集、第289号、1979。



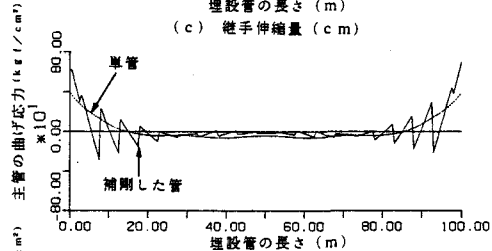
(a) 管体側方変位



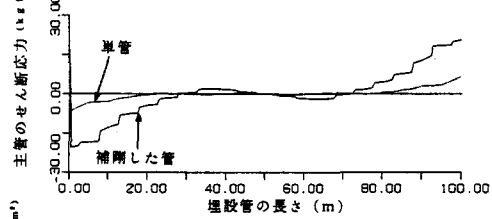
(b) 継手回転角 (°)



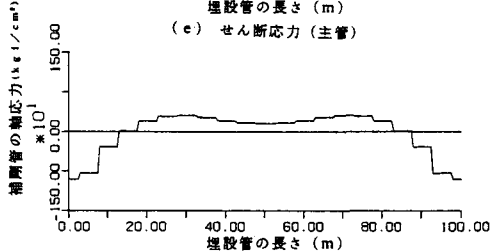
(c) 継手伸縮量 (cm)



(d) 曲げ応力 (主管)

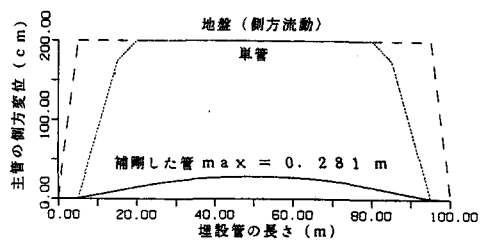


(e) せん断応力 (主管)

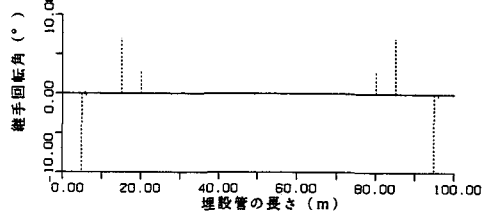


(f) 軸応力 (補剛管)

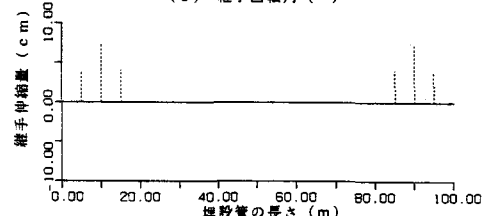
図7 側方流動による管応答 (S型継手)



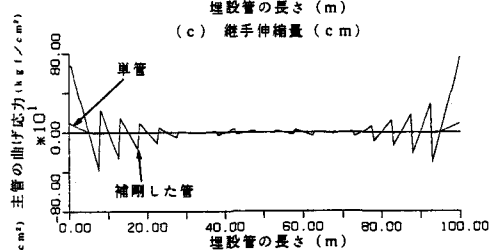
(a) 管体側方変位



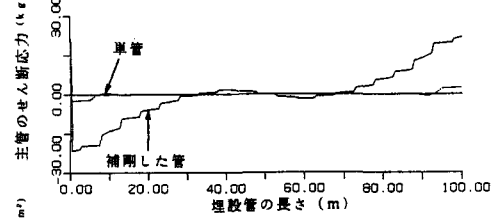
(b) 継手回転角 (°)



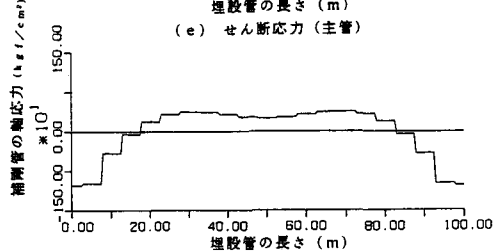
(c) 継手伸縮量 (cm)



(d) 曲げ応力 (主管)



(e) せん断応力 (主管)



(f) 軸応力 (補剛管)

図8 側方流動による管応答 (GM型継手)