

【討 議】

高田至郎著 “埋設管路-地盤系の復元力特性と地震応答解析”
への討議

(土木学会論文報告集第 249 号・1976 年 5 月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

鵜飼 恵三 (新潟大学)
By Keizo Ugai

本論文は、埋設管の軸方向の動的復元力特性に関する実験結果をまとめたものであり、いくつかの興味ある結果が述べられ、それなりに意義のあるものと思われる。しかしながら、実験結果をまとめる際の考え方に問題があり、また論文中にいくつかの誤りがあると思われるので、以下に筆者の意見を述べたい。

(1) 本論文に限らず、軸方向のすべりを考慮した地中埋設管の動的挙動に関する過去の多くの研究では、すべりの条件を管と地盤との間の相対変位により規定している。このような方法は厳密な考察を進める上で支障になるばかりでなく、埋設管の地震応答解析に適用した場合に誤った結果を生じるであろう。なぜなら、本来すべりが生じるか否かは、管の外周上に生じる軸方向のせん断応力が管と地盤との間の摩擦抵抗を越えるか否かによって規定するのがより合理的なはずだからである。このことをさらに詳細に説明するために、以下に筆者の考えを簡単にまとめてみる。正弦 S 波が管軸方向に対し角度 ϕ をなして入射する場合を例にとり議論を進める。

管外周上に作用する管軸方向のせん断応力を τ_{rz} で表わし、軸方向のすべりが生じる条件を次式で規定する。

$$\tau_{rz} > \tau_0 \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 τ_0 は管外壁と地盤との間の最大すべり抵抗応力である。 τ_{rz} は、一般に管の同一断面の外周上においても一定ではないが、 L/a (L : S 波の波長、 a : 管の外半径) が非常に大きい場合にはほぼ一定となる。したがって、実用上はその外周上での平均値 τ_a によって近似することができ、式 (21) の代わりに次式を用いる。

$$\tau_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tau_{rz} d\theta > \tau_0 \dots\dots\dots (22)$$

すべりが生じる以前の管-地盤系の挙動は弾性的であるとすれば文献 13) の式 (2-13)~式 (2-15) より

$$\tau_a = -K_a(U_a - \sin \phi \cdot u_g) / 2\pi a \dots\dots\dots (23)$$

ここで、 K_a は動的地盤反力係数であり、管径、 S 波の入射角 ϕ ・波長 L 、地盤のポアソン比・せん断弾性係

数の関数である。全無限弾性地盤を仮定する場合には、 K_a は文献 13) の式 (2-16) で表わせる。 U_a, u_g はおのおの管の応答変位振幅、 S 波の変位振幅である。式 (23) の右辺の中で $(U_a - \sin \phi \cdot u_g)$ (文献 13) では座標軸の方向の相違により $U_a + \sin \phi \cdot u_g$ となっているが、わかりやすいように $U_a - \sin \phi \cdot u_g$ と表わした) は管と地盤との間の軸方向の相対変位を表わす。

式 (22), (23) より、すべりが生じる際の相対変位振幅 U_R は次式で表わせる。

$$U_R = U_a - \sin \phi \cdot u_g = -2\pi a \tau_0 / K_a \dots\dots\dots (24)$$

式 (24) は、相対変位が、 a および K_a 、したがって、管径、波長および地盤の諸定数の関数であることを示している。特に、 U_R が波長によって変化する点は重要であり、相対変位にもとづいてすべりの条件を規定し、これを埋設管の震動計算に適用するという方法が不適切であることを示していると考えられる。

次に、管軸方向の振動方程式より次式が成立する(ただし、管の慣性力は無視する)。

$$\tau_a = EAk^2 \cos^2 \phi U_a / 2\pi a \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 E, A は管のヤング率、断面積であり、 k は波数 ($=2\pi/L$) である。いま、 L/a がきわめて大きく、管は地盤と同一の挙動をするものとするれば、

$$U_a = u_g \sin \phi \dots\dots\dots (26)$$

が成り立つ。また、管厚 t は管径に比してかなり小さいものとするれば、式 (25), (26) より次式が成り立つ。

$$\tau_a = Et k^2 \cos^2 \phi u_g \sin \phi \dots\dots\dots (27)$$

さらに、管の軸ひずみを ϵ_A 、軸応力を σ_A と書くと

$$\left. \begin{aligned} \sigma_A &= E\epsilon_A \\ &= Ek \cos \phi \cdot U_a \\ &= Ek \cos \phi \cdot u_g \sin \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

が成り立つ¹³⁾。

式 (27) は、管厚が大きいほど τ_a が大、つまりすべりが生じやすいことを示し、逆に、波長が大きいほど τ_a は小、つまりすべりが生じにくいことを示している。一般に、管は管径が大きいほど管厚も大となるようにつく

られているであろうから、管径が大きいほどすべりが生じやすいと言えるであろう。

式 (27) は軸応力が管のヤング率に比例し、波長に反比例することを示す。特に、 σ_A が管径と無関係であることに注意し、式 (26) に関して述べたことと合わせて考えると、一般に管径が小さい場合には、すべりが生じる以前に管に非常に大きな軸応力が生じる可能性があると考えられる。つまり、管厚が小さい（よって管径が小さい）ほどすべりが生じにくいということは弾性領域内にとどまりやすいことを意味し、すべることによって軸応力を緩和する機会が、管厚の大きい（よって管径が大きい）管に比べて少なくなるため、地震時に被害を生じる可能性が大きくなることを意味する。このことは、久保・片山らの述べる震害例¹⁴⁾をうまく説明するのではないかと考えている。

これらの結論は、すべりの条件を式 (21) もしくは (22) によって規定することにより比較的簡単に導くことができたが、相対変位を用いたこれまでの方法によっては導くことのできないものである。

▶ 回答者 (Closure)

著者の論文を詳細に読まれ、ご討議頂き、また著者の意見を述べる機会を与えられたことに謝意を表します。

討議の第 1 の問題点は、埋設管が地震時に滑りを生じるか否かの規範となる条件を何によって与えるかという点にあると思われます。討議者は弾性波動論より計算した平均的なせん断応力が、ある最大滑り抵抗応力よりも大きくなった場合に滑りが生じるとし、せん断応力が、管径・波長・地盤諸定数などの関数となっていることから、相対変位のみで滑りの条件を与えることに問題があることを指摘していると考えられます。討議者による波動論の計算結果を用いれば、応答としての相対変位も上記諸量の関数となることは明らかであり、もし、滑りの条件を相対変位で与えるとしても同様の議論が展開されることを第 1 に指摘しておきたいと考えます。

著者が本論文で行った実験は、静止した地盤中に埋設された特定の管径をもつ管路に強制的に変位を与えて、管周辺に働く摩擦力の合力を測定しており、その結果より管変位の増加割合に対して摩擦力の増加割合が急激に小さくなる点での変位を滑り出しの変位と定義しています。したがって、管路が地震外力を受けて、滑りの応答特性を示すか否かの条件を相対変位で与えることとは意味が異なっています。すなわち、本実験は摩擦復元力の特性を求めようとしたものであり、滑りの条件に関しては、これらの結果をもととして別途検討する必要が

(2) 著者は論文中の式 (8)

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k'_s (U-u)^\alpha = 0$$

を管軸方向の静的な運動のつり合い式として定めているが、復元力 $k'_s (U-u)^\alpha$ は論文中の Fig. 15 のヒステリシスループの最大点を連ねたものであり、これを運動のつり合い式を満たす復元力と考えるには相当の無理があると思われる。種々のヒステリシスループを描く場合の計算結果と比較をするなどして、この復元力の仮定が近似的に正しいか否かを検討することが必要であろう。

(3) 式 (11) から (12) は導けないのではないかと。式 (12) を微分しても式 (11) にならない。

参 考 文 献

- 13) 鶴飼憲三・若林正彦・松野操平：斜め方向より入射する平面せん断波に対する地中埋設管の動的応答特性，第 14 回地震工学研究発表会，pp. 181~184, 1976-7.
- 14) 久保慶三郎・片山恒雄・佐藤暢彦：地中埋設管震害の定量的解析，第 4 回日本地震工学シンポジウム，pp. 655~662, 1975-11.

高田至郎 (神戸大学)

By Shiro Takada

あります。

なお、討議者が検討されているような応力または力で滑りの条件を与える方法については、すでに著者らが文献 1) で解析・計算を行っており、以下簡単にその考え方を述べてみたいと思います。

地震時に埋設管の横断面内半径方向に作用する平均的な土圧 P は次式で推定される。

$$P = (1 + K_0) \rho_s g H / 2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 K_0 、 $\rho_s g$ 、 H はそれぞれ震度を考慮した土圧係数、地盤の単位体積重量、地表面より管の中心までの深さである。さらに、地盤と管の間の動的摩擦係数を f_0 とすれば、管路の長手方向 l 区間に働く摩擦力 F_0 は次式となる。

$$F_0 = f_0 P l \dots \dots \dots (2)$$

一方、著者らが弾性波動論を用いて、管路—地盤系の相互作用を解析し、管路が縦振動を行う場合の軸力 F を演算した結果次式が得られる。

$$\frac{F}{\rho_s \pi a^2 \omega^2 u_g} = \frac{f^*}{(c_0/c)^2 - 1 + (\rho_s/\rho_p) f^* / \{1 - (b/a)^2\}} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 u_g 、 ω 、 c は管路軸方向に伝播する地震波動の変位振幅、振動数、波速である。また、 $\rho_p g$ 、 c_0 は管体の単位体積重量、管体内での縦波速度である。さらに、 v_l 、 v_s を地盤内縦波および横波速度、 $H_n^{(1)}(x)$ を n 次

のハンケル関数とすれば、 f^* は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f^* &= \frac{-2}{Q(h^*a) \{ (c/v_t)^2 - 1 \} + Q(g^*a)} \\ Q(x) &= x \frac{H_0^{(1)}(x)}{H_1^{(1)}(x)} \\ h^*a &= (a\omega/c) \sqrt{(c/v_t)^2 - 1} \\ g^*a &= (a\omega/c) \sqrt{(c/v_t)^2 - 1} \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

式 (3) の軸力 F が式 (2) で与えられる 摩擦抵抗力 F_0 よりも大きければ滑りを生じると考えられる。そして、そのときの F は F_0 より大とはなり得ず、 F_0 に等しいと見なすのが妥当であろう。

すなわち、応答計算に用いる軸力を F_x とすれば、次式で滑り出しの条件を規定することができる。

$$\left. \begin{aligned} |F_x| < F_0; F_x = F, \\ |F_x| \geq F_0; F_x = \pm F_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

滑りが生じる場合の軸力 F_0 は管路と地盤の相対速度の符号によってその方向が変化するので、式 (5) のように正負の両符号をもっている。これより、相対変位に関する管の縦振動運動方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} A_p \rho_p g \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - A_p E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -A_p \rho_p g \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \\ + F_x \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここに、 A_p 、 E は管の断面積およびヤング率である。式 (6) を用いれば、滑りをも含んだ管路の応答計算が可能となる。

なお、討議の文中、式 (21) で与えられている τ_0 は、本文の式 (2) の形で推定するのも一方法であろう。また、本文の式 (3) で与えられる軸力は、入力地震動の特性、管および周辺地盤の物理諸定数の関数となっていることはいうまでもなく、式 (3) を用いて、それぞれが与える影響を評価できる。式 (6) 以降の計算方法および具体的計算結果は文献 1) を参照されたい。

第 2 の討議点は、ヒステリシスループを描く復元力特性を、その最大点曲線で置換することの妥当性の有無であります。著者の論文中的式 (8) には、慣性力項、減衰力項がともに含まれておらず、式 (8) は従来、線形ばねを用いて静的に算定されている相対変位を、同じく

静的に、滑りの特性をもつ非線形ばねを用いて計算したものであり、上記両者の差異を検討しようとしたものがあります。したがって、討議者の指摘されている減衰力はもちろんのこと、慣性力の影響をも別途に検討して、式 (8) の妥当性を調べる必要があります。著者らは、管路—地盤系の多質点系モデルを用いて、滑り特性を示すばねを等価線形系に置換して確率論な取り扱いにより、応答値に与える慣性力、減衰力、復元力の影響を検討しています²⁾。用いる計算パラメーターによりかなりの違いはありますが、文献 2) で対象とした系では、概して慣性力の影響はほとんど無視できる程度であり、減衰力は数%程度といえそうです。詳細な検討は続行中であり、今後発表の機会をもてるものと思っております。

第 3 の討議点に関しては、著者の論文中的式 (11) を積分して、式 (12) を誘導する際に、次に示すような近似を行っており、式 (12) の微分によって、直接に式 (11) を誘導することはできません。すなわち、式 (11) の積分過程で、

$$\begin{aligned} \int \frac{du^*}{dx} \frac{d}{dx} \left(\frac{V}{c_a} \right) dx = \int \epsilon_A^* \frac{d}{dx} \left(\frac{V}{c_a} \right) dx \\ \approx \epsilon_A^* \int \frac{d}{dx} \left(\frac{V}{c_a} \right) dx \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

の近似を行っています。ここに、 $\epsilon_A^* = (du^*/dx)_{\max}$ であります。

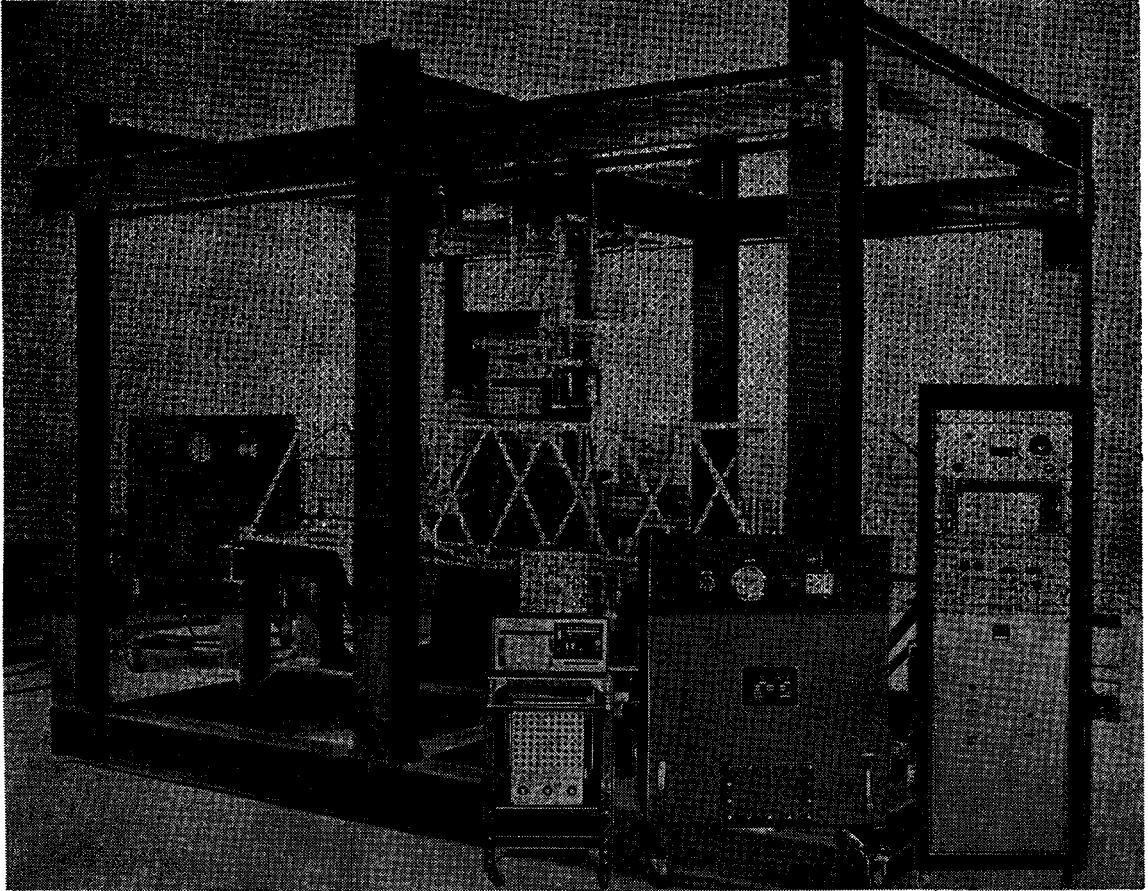
本来、 x の関数であるべき du^*/dx が上式の積分中では、定数 ϵ_A^* として取り扱われています。というのは、式 (13) 以降の展開からも知られるように、本文では、軸ひずみの最大振幅について検討がなされており、式 (12) では、 ϵ_A^* に関する 2 次式を誘導することに目標がおかれています。

参 考 文 献

- 1) 高田至郎・小浜文朗：地震時における管路の滑りに関する一考察，昭和 51 年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp. I-18-1~2，昭 51.5.
- 2) 元山峰夫・高田至郎：地中構造物の地震応答に関する確率論的評価，第 31 回土木学会年次学術講演会，第 1 部，p. 376，昭 51.10.

MARUI MIV-4600 電気油圧サーボシステム

電気油圧式 振動疲労試験機



MIV-4600シリーズは中小規模・材料・構造物・構造物模型
部品等の実働波による振動・疲労試験に最適品です。

特長 ◆ 振動、疲労波形を任意の波形運転することができます。

(正弦・三角・矩形・複合・ランダム・磁気テープ入力による運転も可能)

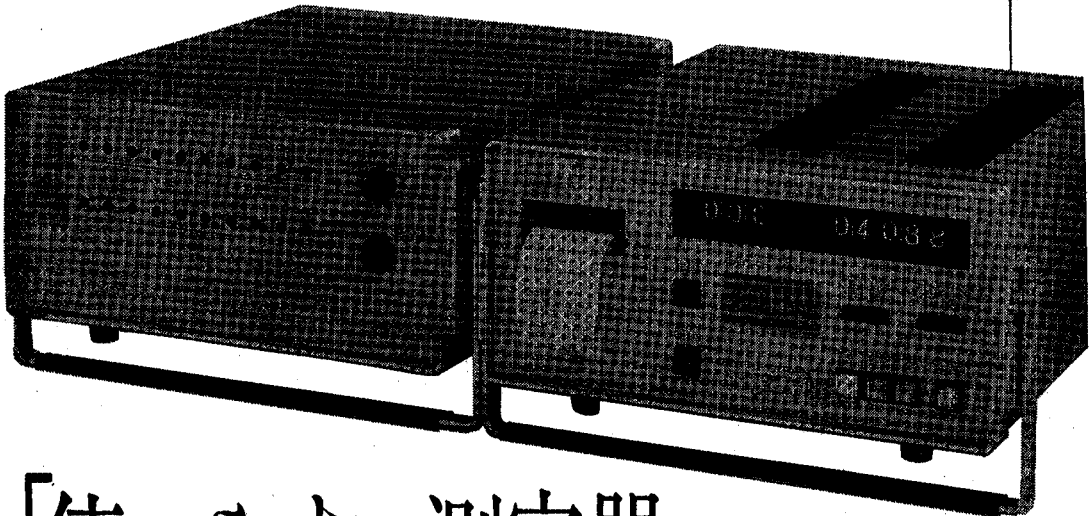
- ◆ 制御方式を広い範囲に選択することができます(荷重・変位・加速度の制御が可能)
- ◆ 複数の加振器を組合せて同時に運転できます(振巾・位相等を変えて運転が可能)
- ◆ 出力は±50ton～±100kg各種製造いたしています。
- ◆ 任意の場所で設置し試験が可能です。



土木建築用材料試験機

株式会社 **マルイ**

東京営業所 東京都港区芝公園2丁目9-12 ☎東京 (03) 434-4717
大阪営業所 大阪市城東区中央1丁目11-1 ☎大阪 (06) 934-1021
名古屋営業所 名古屋市中村区牧野町5丁目10 ☎名古屋 (052) 452-1381
九州営業所 福岡市博多区比恵町4番17 ☎福岡 (092) 411-0950



「使いやすい測定器」と
 ご好評をいただいております。

初期値記憶式—バランス調整不要

共和の携帯型デジタルひずみ測定器
SD-500A, ASB-50A

計測開始時に測定点の初期不平衡出力をコアメモリに記憶し、次に負荷時のひずみを測定し、すでに記憶している初期不平衡分を演算し、真のひずみを求めます。ひずみ値は、デジタル表示すると共に、内蔵プリンタでプリントアウトします。
 小型、軽量、可搬型で現場向。実験室用としてラックタイプもあります。また自動無人計測用のオプション機器の準備があり、データ解析処理のためのパーソナルコンピュータにも接続できます。

- 特長**
- 調整時間が大幅に短縮できる
 - 計測時間は1点あたり0.5秒以下
 - 直流ブリッジ電源採用により、高精度な測定ができる
 - 測定点の開始、終了の任意設定可能
 - オプション機器が豊富

- 仕様**
- 測定範囲.....0—±39999×10⁻⁶ひずみ
 - 計測時間.....0.5秒/点
 - 多点切換点数.....20点(カスケード接続10台)
50点(カスケード接続4台)
 - ゲージブリッジ.....
 - 回路切換.....1、2、4枚ゲージ法、全点共通または単独切換
 - 精度.....±(指示値0.1%+2数値)
 - 電源.....AC100V
 - 寸法.....350×160×400mm

- オプション機器**
- デジタルクロック ASC-50A
 - スタータ AST-50A
 - 紙テープさん孔装置 OPC-50A
 - ケーブルアダプタ

未来をひらく電子計測器メーカー
株式会社 共和電業

本社・工場
 東京都調布市調布ヶ丘3の5の1
 電話=0424-87-2111(大代)

東京営業所
 東京都港区芝西久保明舟町19
 電話=03-502-3551(大代)

大阪営業所
 大阪市東区森之宮東之町544(三双ビル)
 電話=06-942-2661(代)

名古屋営業所
 名古屋千種区田代町字瓶杖1の57(東山大木ビル)
 電話=052-782-2521(代)

福岡営業所
 福岡市博多区博多駅東2の5の20(松永ビル)
 電話=092-411-6744(代)

広島営業所
 広島市東白島町5の9(くにまきビル)
 電話=0822-21-9536

札幌営業所
 札幌市中央区南四条西9丁目(観光ビル)
 電話=011-261-7629

水戸営業所
 水戸市上水戸2の6の5
 電話=0292-25-1074