

軸方向すべりを考慮した場合の地中埋設管の 震動応答解析

DYNAMIC ANALYSIS OF UNDERGROUND PIPELINES UNDER THE CONDITION OF AXIAL SLIDING

鷓 飼 恵 三*
By Keizo UGAI

1. ま え が き

大きな地震の際には地中埋設管と地盤との間に軸方向のすべりが生じるといわれており、それを考慮にいれた埋設管の地震応答解析に関する研究が数多くなされてきた^{1)~5)}。これらの研究では、実験的に、管と地盤との間に生じる軸方向力と、(管と地盤との間の) 相対変位との関係を求め、それを弾塑性型の変形曲線などに置き換えて動的解析を行う場合が多いようである。

これら過去の研究では、ある特定の地盤—管のモデル(管や地盤の特性や諸元がある特定の値に指定されたモデル)を用いているため、すべりが生じる条件と、管や地盤の特性・諸元との間の関係が明確にならなかったきらいがある。さらに、実験的に導いた力と相対変位との関係を直接応答解析に用いているため、すべりの条件を相対変位によって表わすことが多かった。このため、厳密な考察が妨げられていたようである。なぜなら、すべりが生じるか否かは管の外面に作用す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決定するのが合理的なはずであり、すべりの条件を表わすために相対変位に着目する方法は一般的でないと考えられるからである。

本研究では「管壁に作用する管軸方向のせん断力が管と地盤との間のすべり抵抗(摩擦抵抗)(ただし、地盤のせん断強度がすべり抵抗より小さい場合にはせん断強度で代用する)を越えるか否か」によって「すべりの条件」を規定する⁶⁾。ただし、すべりが生じるまでは管と地盤との相互作用は弾性的であるとする。この弾性限度を越えると、正弦的な入力に対して、相対変位とせん断力とは履歴曲線を描くと仮定する。本研究では、バイリニア型の履歴曲線を仮定し、正弦波入力に対する埋設管の応答を解析した。また、この結果を用いて現実

の埋設管—地盤系の地震時挙動に関する簡単な考察を試みた。なお、解析において管の慣性力は無視した^{1), 3), 8)}など。

本研究では、入力地震波を管軸方向に伝播する定常正弦波と仮定している。このような仮定は、地盤が水平に堆積した層から成り、かつ比較的長い定常的な強震動部分を有する地震波が水平方向に伝播する場合には有効であると思われる。また、入力波が管軸斜め方向から入射する場合にも、入力波を管軸・管直角方向の2成分に分けると、管直角方向の成分波は埋設管の軸方向の挙動に直接影響を及ぼさないため、管軸方向に伝播する成分波のみを考慮すればよいことになる。現実の地盤は地形、地質が複雑に変化し、特にその変化が顕著である場所において埋設管の震害が多いことが知られている。この種の問題を究明していく場合、まず地盤そのものの地震時挙動を調べることが第1であるが、さらに進んで埋設管と地盤との相互作用を解明しようとするときには、本研究で得られた考え方や結果が大いに参考となるであろう。

2. すべりの条件およびすべり出し時の相対変位位置

管と地盤との間に軸方向すべりが生じるための条件は文献 7) より次式で表わされる。

$$\tau_a = \int_0^{2\pi} \tau_{r2} d\theta / (2\pi) > \tau_0 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 τ_{r2} は管外面上に作用する管軸方向のせん断応力、 τ_a は外周上での τ_{r2} の平均値、 τ_0 は管外面と地盤との間のすべり抵抗応力である。この式を用いて軸方向すべりが生じる際のいくつかの関係式が導かれるが、その詳細は文献 6) および 7) に譲るものとし、ここでは管と地盤との間の相対変位の計算例のみを示す。文献 7) より、すべり出し時の相対変位振幅 U_R は次式で表

* 正会員 工修 新潟大学助手 工学部土木工学科

わせる。ただし、入射波の波長は管径に比べ相当大きいものとする。

$$U_R = -2\pi a \tau_0 / K_a \dots \dots \dots (2)$$

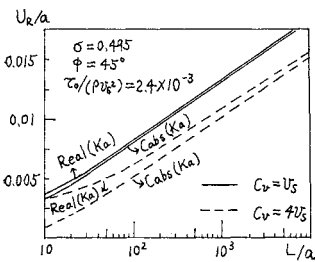
ここで、 a は管外半径、 K_a は単位管長あたりの軸方向の動的地盤反力係数である。管軸方向のみかけ上の波速を c' 、みかけ上の波数を k' とすると、 K_a は次のように表わせる^{8),9)}。

$$K_a = \frac{2\pi\mu(k'a)^2(c'/v_s)^2}{F(g'a) + F(h'a)/\{(c'/v_p)^2 - 1\}} \dots (3)$$

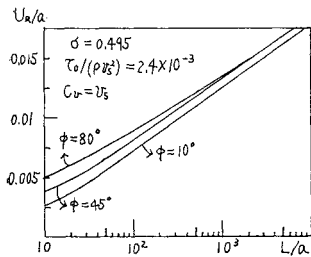
ここで

$$\begin{aligned} F(x) &= xH_0^{(1)}(x)/H_1^{(1)}(x) \\ (h'a)^2 &= (k'a/v_p)^2(c'^2 - v_p^2) \\ (g'a)^2 &= (k'a/v_s)^2(c'^2 - v_s^2) \end{aligned}$$

であり、 μ は地盤のせん断弾性係数、 $v_s \cdot v_p$ は地盤の S 波・P 波速度、 $H_0^{(1)}(\)$ 、 $H_1^{(1)}(\)$ は Hankel の第一関数である。横波が、波速 c_v 、波数 k 、管軸方向に対して角度 ϕ で入射する場合の K_a は、式 (3) 中の c' 、 k' のかわりに $c_v/\cos\phi$ 、 $k\cos\phi$ を代入することによって得られる。式 (2) は、相対変位が入射波の性質および管・地盤の諸定数の関数であることを示している。特に、 U_R が入射波の性質（波長など）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、これを埋設管の地震応答解析に適用するという方法があまり合理的なものではないことを示している。このことを具体的な計算によって示す。一例として管が深さ 1.5 m の地点に埋設され横波が $\phi = 45^\circ$ で入射する場合を考える。 $v_s = 50$ m/s、 $c_v/v_s = 1$ および 4、地盤のポアソン比 $\sigma = 0.495$ 、地盤の密度 $\rho = 1.8$ g/cm³、管と地盤



図一 すべり出し時の相対変位と波長との関係



図二 すべり出し時の相対変位と入射角との関係

との間の摩擦係数 $\delta = 0.4$ とする。図

1,2 は以上の条件のもとで U_R を計算したものである。図

1 では、波速 c_v を v_s と $4v_s$ に変え、地盤反力係数として K_a の実部および複素絶対値をそれぞれ用いた場合について計算した。図

2 では、 $c_v = v_s$ とし、 ϕ を 10° 、 45° 、 80° に変えた場合を示した。ただし、地盤反力係数として K_a の実部を用いた。両図ともに、グ

ラフの横軸は L/a であり、縦軸は U_R/a である。両図より次のようなことがわかる。

(i) すべり出し時の相対変位振幅 U_R は、入射波の波長、波速および入射角の影響を受けるが、入射角の影響は比較的小さい。

(ii) $c_v = v_s$ の場合、地盤反力係数として K_a の実部を用いても複素絶対値を用いても U_R はあまり変化しない。 $c_v = 4v_s$ の場合には、低波長域において両者の差がかなり出るが、 L/a の増大とともにその差は小さくなる。

(iii) 両図より U_R は $\log(L/a)$ の一次の増加関数によって近似できることがわかる。故に、

$$U_R/a \approx A \log(L/a) + B \dots \dots \dots (4)$$

と表わせる。ここで、 A 、 B は a に無関係である。管外半径 a の U_R に対する影響は $\log(L/a)$ によってはあまり大きく表われないので、上式より U_R は近似的に a に比例するとみなしうる。つまり、すべり出し時の相対変位振幅は管径にほぼ比例するといえる。

図一を用いて簡単な計算を行う。いま、 $a = 12.5$ cm、 $c_v = v_s$ とし他の条件は同一であるとする。同図より $L/a = 1000$ ($\therefore L = 125$ m) のとき $U_R/a = 0.0135$ であるので $U_R \approx 0.17$ cm となる。この値は $v_s = 50$ m/s の場合のものであるが、 v_s が 100 m/s であり、他の条件は以前と同一である場合には、 U_R は上の値の 1/4 となり、 $0.17/4 \approx 0.004$ cm 程度となる。この例からわかるようにすべり出しに必要な相対変位はオーダーとして mm 前後のものであることがわかる。この値は他の文献^{10),11)}の実験結果などより得られる数値と同程度のものではないことを示している。

τ_0 は Coulomb 摩擦で表わされるものとすれば、それは接触面上の垂直圧 p に比例する。この比例定数を δ とすると

$$\tau_0 = \delta p \dots \dots \dots (5)$$

p は他の諸元（たとえば K_a ）の大きさに影響を与えないものとすれば、式 (2), (5) より

$$U_R = -2\pi a \delta p / K_a \dots \dots \dots (6)$$

よって、すべり出し時の相対変位振幅は管壁に作用する垂直圧 p に比例する。このことは、高田¹⁾の実験結果の一部を説明するものと思われる。

3. 管と地盤との相互作用がパイリニア型の履歴曲線によって表わされる場合の解析

本章では、管と地盤との間に生じる力と相対変位との関係がパイリニア型の履歴曲線によって表わされる場合を解析する。入射波は定常正弦波で、軸方向に伝播、振

動する縦波であるとした。入射波が入射角 ϕ をもつ横波である場合には、以下の解析において、入射波の変位振幅 u_g および波数 k の代わりに $u_g \sin \phi$ および $k \cos \phi$ を用いれば対応する解が得られる。管は無限に長いものとし、地盤の弾性ばね係数として式 (3) によって表わされる K_a を用いた。ただし、解析上は K_a の実部もしくは複素絶対値を用いた。

(1) 完全塑性型の履歴曲線を描く場合

もっとも簡単な場合として 図-3 のような完全塑性型の履歴曲線を描く場合を解析する。この図で、 f は単位管長あたりに作用する

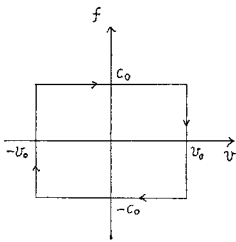


図-3 完全塑性型の履歴曲線

力、 v は管と地盤との相対変位、 $c_0 (=2\pi a r_0)$ は単位管長あたりのすべり抵抗力、 v_0 は v の振幅である。地盤および管の変位をおの、 u_s および u で表わすと、相対変位 v は次式で表わされる。

$$v = u_s - u \quad \dots\dots (7)$$

管軸方向に x 軸をとると管の運動方程式は次のように表わせる。ただし、管の慣性力は無視する。

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_0 = 0 \quad (\dot{v} = \dot{u}_s - \dot{u} > 0 \text{ のとき}) \quad \dots\dots (8)$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - c_0 = 0 \quad (\dot{v} = \dot{u}_s - \dot{u} < 0 \text{ のとき}) \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 E, A は管のヤング率、実断面積であり、 $\dot{}$ は時間微分を表わす。

$$c = c_0 / (EA) \quad \dots\dots (10)$$

とおき、式 (7) を式 (8), (9) に代入すると

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - c = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (\dot{v} > 0) \quad \dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + c = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (\dot{v} < 0) \quad \dots\dots (12)$$

となる。入射波は管軸方向に伝播するものとし

$$u_s = u_g \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad \dots\dots (13)$$

と表わせるものとする。ここで、 Φ は位相差を表わし、定常的な状態を考えているので、 x, t には無関係である。履歴曲線のうち $\dot{v} > 0$ の部分のみを考え、式 (11) を次のような条件のもとで解く。

$$v = -v_0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (kx - \omega t = 0) \quad \dots\dots (14)$$

$$v = v_0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (kx - \omega t = -\pi) \quad \dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} > 0 \quad (-\pi < kx - \omega t < 0) \quad \dots\dots (16)$$

v は $kx - \omega t$ の関数であることを考慮すると、式 (11) の一般解は次のようになる。

$$v = c(kx - \omega t)^2 / (2k^2) + c_1(kx - \omega t) + c_2 + u_g \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad \dots\dots (17)$$

ただし、 c_1, c_2 は積分定数である。式 (17) を式 (14), (15) に代入し整理すると次式が得られる。

$$c_1 = c\pi / (2k^2), \quad c_2 = 0 \quad \dots\dots (18)$$

$$\sin \Phi = c\pi / (2k^2 u_g) \quad \dots\dots (19)$$

$$v_0 = -u_g \cos \Phi \quad \dots\dots (20)$$

$u_g > 0, v_0 > 0$ であることを考慮すると、式 (19), (20) より

$$\pi/2 < \Phi < \pi \quad \dots\dots (21)$$

であることがわかる。式 (18) を式 (17) に代入すると

$$v = c(kx - \omega t)^2 / (2k^2) + c\pi(kx - \omega t) / (2k^2) + u_g \cos(kx - \omega t + \Phi) \quad \dots\dots (22)$$

よって、管の変位 u および軸ひずみ ϵ_a は次のようになる。

$$u = u_s - v = -c(kx - \omega t)^2 / (2k^2) - c\pi(kx - \omega t) / (2k^2) \quad \dots\dots (23)$$

$$\epsilon_a = \frac{\partial u}{\partial x} = -c(kx - \omega t) / k - c\pi / (2k) \quad \dots\dots (24)$$

$-\pi < kx - \omega t < 0$ であるので、 ϵ_a の絶対値は $kx - \omega t = 0, -\pi$ のときに最大となる。故に $|\epsilon_a|$ の最大値は

$$|\epsilon_a|_{\max} = c\pi / (2k) = cL / 4 = c_0 L / (4EA) \quad \dots\dots (25)$$

となり、これは桜井が同様な条件のもとで導いた式と一致する。管の変位 u は $kx - \omega t = 0, -\pi$ のとき 0 であり、 $-\pi/2$ のとき最大となる。故に

$$|u|_{\max} = c\pi^2 / (8k^2) \quad \dots\dots (26)$$

となる。したがって、 $|u|_{\max}$ と入射波の変位振幅 u_g との比は

$$|u|_{\max} / u_g = c\pi^2 / (8k^2 u_g) \quad \dots\dots (27)$$

で与えられる。式 (19) より

$$c\pi / (2k^2 u_g) \leq 1 \quad \dots\dots (28)$$

が成り立つので、

$$|u|_{\max} / u_g \leq \pi/4 \quad \dots\dots (29)$$

が得られる。また、式 (25), (28) より

$$|\epsilon_a|_{\max} / (ku_g) \leq 1 \quad \dots\dots (30)$$

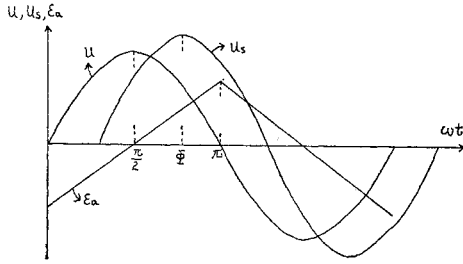
が成り立つ。すなわち、管の応答軸ひずみは入射波によって生じる地盤の軸方向ひずみより小さくなる。

いま、式 (23), (24), (13) において $x=0$ とおくと

$$\left. \begin{aligned} u &= c\omega t(\pi - \omega t) / (2k^2) \\ \epsilon_a &= c(\omega t - \pi/2) / k \\ u_s &= u_g \cos(\omega t - \Phi) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (31)$$

となる。ただし、 $0 < \omega t < \pi$ である。図-4 に上式で与えられる u, ϵ_a, u_s の時間的变化曲線を示す。図-4 より次のようなことがわかる。

(i) 管の変位 u と入射波の変位 u_s との位相差は



図—4 入射波の変位 u_s , 管変位 u および管軸ひずみ ϵ_a の時間的变化 (完全塑性型の履歴曲線を描く場合)

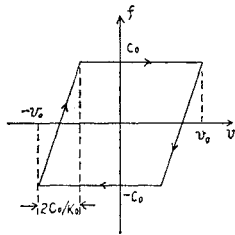
$\phi - \pi/2$ である。よって両者の位相差は $0 \sim \pi/2$ の間にある。

(ii) u と管の軸ひずみ ϵ_a との位相差はピーク値に関して $\pi/2$ である。これはすべりが生じない場合と同一である。

(iii) ϵ_a は時間的に直線的に変化し、 u は放物線的に変化する。

(2) 弾塑性型の履歴曲線を描く場合⁶⁾

次に、図—5 のような弾塑性型の履歴曲線を描く場合



図—5 弾塑性型の履歴曲線

を解析する。図中、 K_0 は地盤のばね特性であり、他の諸変数は前節と同様である。 f と v との関係が図中の矢印の回転方向によって与えられるものとする、 $\dot{v} > 0$ の部分に関して次のような運動方程式が成り立つ。

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_0(u_s - u + v_0 - c_0/K_0) = 0 \quad (-v_0 < v < -v_0 + 2c_0/K_0) \dots\dots(32)$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_0 = 0 \quad (-v_0 + 2c_0/K_0 < v < v_0) \dots\dots(33)$$

ここで K_0 は式 (3) の K_a によって与えられる。ただし、解析上は K_a の実部もしくは複素絶対値をとる。いま、

$$c_0/(EA) = c, \quad K_0/(EA) = K \dots\dots(34)$$

とおき、 $u = u_s - v$ を代入すると、式 (32), (33) は

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - Kv - Kv_0 + c = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (-v_0 < v < -v_0 + 2c/K) \dots\dots(35)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - c = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (-v_0 + 2c/K < v < v_0) \dots\dots(36)$$

となる。ここで u_s は入射波の変位であり、前節と同様に

$$u_s = u_g \cos(kx - \omega t + \phi) \dots\dots(37)$$

とおく。 v は $kx - \omega t$ の関数であることに注意すると、式 (35) および (36) の一般解 v_1 および v_2 は次のようになる。

$$v_1 = c_3 \sinh \frac{\sqrt{K}}{k} (kx - \omega t) + c_4 \cosh \frac{\sqrt{K}}{k} (kx - \omega t) - v_0 + c/K + u_g k^2 \cos(kx - \omega t + \phi) / (k^2 + K) \dots\dots(38)$$

$$v_2 = c(kx - \omega t)^2 / (2k^2) + c_1(kx - \omega t) + c_2 + u_g \cos(kx - \omega t + \phi) \dots\dots(39)$$

式 (38), (39) を条件式 (14), (15) に代入し、未定係数 c_i ($i=1 \sim 4$) を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= c\pi/k^2 - u_g \sin \phi \\ c_2 &= v_0 + c\pi^2/(2k^2) - \pi u_g \sin \phi + u_g \cos \phi \\ c_3 &= u_g k^3 \sin \phi / \sqrt{K} / (k^2 + K) \\ c_4 &= -c/K - u_g k^2 \cos \phi / (k^2 + K) \end{aligned} \right\} \dots\dots(40)$$

v_1 と v_2 は、 $kx - \omega t = -\psi$ ($0 < \psi < \pi$) において一致するものとするれば

$$v_1 = v_2 = -v_0 + 2c/K, \quad \dot{v}_1 = \dot{v}_2 (kx - \omega t = -\psi) \dots\dots(41)$$

が成り立たねばならぬ。式 (41) に式 (38), (39) を代入し整理すると次の3式が得られる。

$$v_0/u_g = -\alpha^2 \beta (\pi - \psi)^2 + (\pi - \psi) \sin \phi / 2 - \cos \phi / 2 - \cos(\phi - \psi) / 2 + \beta \dots\dots(42)$$

$$D1 \sin \phi + D2 \cos \phi = D3 \dots\dots(43)$$

$$E1 \sin \phi + E2 \cos \phi = E3 \dots\dots(44)$$

ここで、

$$\alpha = \sqrt{K}/k, \quad \beta = c/(Ku_0) \dots\dots(45)$$

$$\left. \begin{aligned} D1 &= -(\cosh \alpha \psi + \alpha^2 \cos \psi) / (1 + \alpha^2) - 1 \\ D2 &= (-\alpha \sin \alpha \psi + \alpha^2 \sin \psi) / (1 + \alpha^2) \\ D3 &= \alpha \beta \sinh \alpha \psi - \alpha^2 \beta (\pi - 4), \quad E1 = D2 \\ E2 &= \alpha^2 (-\cosh \alpha \psi + \cos \psi) / (1 + \alpha^2) \\ E3 &= \alpha^2 \beta (\cosh \alpha \psi + 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots(46)$$

である。故に、式 (43), (44) より

$$\left. \begin{aligned} \sin \phi &= (D3 E2 - D2 E3) / (D1 E2 - D2 E1) \\ \cos \phi &= (D1 E3 - D3 E1) / (D1 E2 - D2 E1) \end{aligned} \right\} \dots\dots(47)$$

さらに、 $\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$ であることを利用すると

$$(D3 E2 - D2 E3)^2 + (D1 E3 - D3 E1)^2 = (D1 E2 - D2 E1)^2 \dots\dots(48)$$

が得られる。式 (48) は ψ を求めるための式である。この式より得られる ψ を式 (47) に代入すると ϕ が得られ、さらにこれらを式 (42) に代入すると相対変位振幅 v_0 が得られる。ただし、 $0 < \psi < \pi$, $v_0 > 0$ に注意せねばならない。以上の諸式を用いると、管の変位 u_i ($i=1, 2$)、管の軸ひずみ ϵ_{ai} ($i=1, 2$) は次のように表

わされる。

$-\psi < kx - \omega t < 0$ において

$$\begin{aligned} u_1/u_g &= u_s/u_g - v_1/u_g \\ &= \alpha^2 \cos(kx - \omega t + \Phi)/(1 + \alpha^2) \\ &\quad - \sin \Phi \sinh \alpha(kx - \omega t)/\alpha/(1 + \alpha^2) \\ &\quad + \{\beta + \cos \Phi/(1 + \alpha^2)\} \cosh \alpha(kx - \omega t) \\ &\quad + v_0/u_0 - \beta \dots \dots \dots (49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{a1}/(u_g/a) &= a \frac{\partial}{\partial x} (u_1/u_g) \\ &= -\alpha^2 ka \sin(kx - \omega t + \Phi)/(1 + \alpha^2) \\ &\quad - ka \sin \Phi \cosh \alpha(kx - \omega t)/(1 + \alpha^2) \\ &\quad + \alpha ka \{\beta + \cos \Phi/(1 + \alpha^2)\} \\ &\quad \times \sinh \alpha(kx - \omega t) \dots \dots \dots (50) \end{aligned}$$

$-\pi < kx - \omega t < -\psi$ において

$$\begin{aligned} u_2/u_g &= u_s/u_g - v_2/u_g = -\alpha^2 \beta (kx - \omega t)^2/2 \\ &\quad - (\alpha^2 \beta \pi - \sin \Phi)(kx - \omega t) \\ &\quad - (v_0/u_0 + \alpha^2 \beta \pi^2/2 - \pi \sin \Phi + \cos \Phi) \\ &\quad \dots \dots \dots (51) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{a2}/(u_g/a) &= a \frac{\partial}{\partial x} (u_2/u_g) \\ &= -\alpha^2 \beta ka (kx - \omega t) \\ &\quad - ka(\alpha^2 \beta \pi - \sin \Phi) \dots \dots \dots (52) \end{aligned}$$

となる。上式からわかるように、管の軸ひずみは $-\pi < kx - \omega t < -\psi$ において直線的に変化するので、 $-\psi < kx - \omega t < 0$ において最大値をとる。なお、式 (50) の右辺第一項はすべりが生じない場合の弾性的なひずみを与える。

なお、軸方向のすべりが生じるための条件式 (1) は、 α, β を用いることにより

$$1 > \beta(1 + \alpha^2) \dots \dots \dots (53)$$

と表わすことができる。

(3) バイリニア型の履歴曲線を描く場合

図-6 のようなバイリニア型の履歴曲線を描く場合を解析する。図中、 K_1, K_2 は各直線部分の傾斜を表わす。上側の2つの直線の方程式はおの

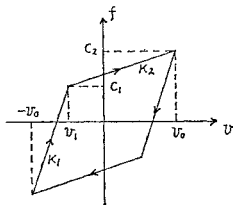


図-6 バイリニア型の履歴曲線

$$\left. \begin{aligned} f - c_1 &= K_1(v - v_1) \\ f - c_1 &= K_2(v - v_1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (54)$$

であり、両式より

$$v_1 = \{2c_1 + (K_2 - K_1)v_0\}/(K_1 + K_2) \dots \dots \dots (55)$$

$$c_2 = \{(K_1 - K_2)c_1 + 2K_1K_2v_0\}/(K_1 + K_2) \dots \dots \dots (56)$$

が得られる。 f と v との関係は図中の矢印の回転方向

によって与えられるものとする、 $\dot{v} > 0$ の部分に関して次のような運動方程式が成り立つ。

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_1(v - v_1) + c_1 = 0 \quad (-v_0 < v < v_1) \dots \dots \dots (57)$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_2(v - v_1) + c_1 = 0 \quad (v_1 < v < v_0) \dots \dots \dots (58)$$

いま、式 (57), (58) において

$$K_I = K_1/(EA), \quad K_{II} = K_2/(EA), \quad c_I = c_1/(EA) \dots \dots \dots (59)$$

とおき、 $u = u_s - v$ を代入すると次のようになる。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - K_I v + K_I v_1 - c_I = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (-v_0 < v < v_1) \dots \dots \dots (60)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - K_{II} v + K_{II} v_1 - c_I = \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} \quad (v_1 < v < v_0) \dots \dots \dots (61)$$

ここで u_s は入射波の変位であり、以前と同様に

$$u_s = u_g \cos(kx - \omega t + \Phi) \dots \dots \dots (62)$$

とおく。 v は $kx - \omega t$ の関数であることに注意すると、式 (60) および (61) の一般解 v_I および v_{II} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v_I &= A_3 \sinh \frac{\sqrt{K_I}}{k} (kx - \omega t) \\ &\quad + A_4 \cosh \frac{\sqrt{K_I}}{k} (kx - \omega t) + v_1 - c_I/K_I \\ &\quad + u_g k^2 \cos(kx - \omega t + \Phi)/(k^2 + K_I) \dots (63) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{II} &= A_1 \sinh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} (kx - \omega t) \\ &\quad + A_2 \cosh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} (kx - \omega t) + v_1 - c_I/K_{II} \\ &\quad + u_g k^2 \cos(kx - \omega t + \Phi)/(k^2 + K_{II}) \dots (64) \end{aligned}$$

式 (63), (64) を条件式 (14), (15) に代入し、未定係数 A_i ($i=1 \sim 4$) を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= u_g k^3 \sin \Phi / \sqrt{K_I} / (k^2 + K_I) \\ A_4 &= (K_{II} - K_I) c_I / K_I / (K_I + K_{II}) - 2 K_{II} v_0 / (K_I + K_{II}) \\ &\quad - u_g k^2 \cos \Phi / (k^2 + K_I) \\ A_1 &= \{(K_I - K_{II}) c_I + 2 K_I v_0\} \sinh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} \pi / (K_I + K_{II}) \\ &\quad - u_g k^3 \sin \Phi \cosh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} \pi / \sqrt{K_{II}} / (k^2 + K_{II}) \\ A_2 &= \{(K_I - K_{II}) c_I + 2 K_I v_0\} \cosh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} \pi / (K_I + K_{II}) \\ &\quad - u_g k^3 \sin \Phi \sinh \frac{\sqrt{K_{II}}}{k} \pi / \sqrt{K_{II}} / (k^2 + K_{II}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (65)$$

v_I と v_{II} は、 $kx - \omega t = -\psi$ ($0 < \psi < \pi$) において一致するものとすれば

$$v_I = v_{II} = v_1, \quad \dot{v}_I = \dot{v}_{II} \quad (kx - \omega t = -\psi) \dots \dots (66)$$

が成り立たねばならぬ。式 (66) に式 (63), (64) を代入し整理すると次の 3 式が得られる。

$$\frac{v_0}{u_g} = \frac{r-1}{2r} \beta - \frac{1+r}{2r(1+\alpha^2)} \cos \phi - \frac{1+r}{2r} \left\{ \frac{\sinh \alpha \psi}{\alpha(1+\alpha^2)} \sin \phi + \beta - \frac{\cos(\phi-\psi)}{1+\alpha^2} \right\} / \cosh \alpha \psi \dots\dots\dots (67)$$

$$D1 \sin \phi + D2 \cos \phi = D3 \dots\dots\dots (68)$$

$$E1 \sin \phi + E2 \cos \phi = E3 \dots\dots\dots (69)$$

ここで

$$\alpha = \sqrt{K_I/k}, \quad \beta = c_1/(K_I u_g), \quad r = K_{II}/K_I \dots\dots\dots (70)$$

$$\begin{aligned} D1 &= -\alpha \cosh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) \tanh \alpha \psi / (1 + \alpha^2) \\ &\quad + \alpha \sqrt{r} \sinh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / (1 + \alpha^2 \sqrt{r}) \\ &\quad + \alpha^2 \sin \psi \cosh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / (1 + \alpha^2) / \cosh \alpha \psi \\ &\quad + \alpha^2 r \sin \psi / (1 + \alpha^2 r) \\ D2 &= \alpha^2 \cosh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) (-1 + \cos \psi / \cosh \alpha \psi) / (1 + \alpha^2) \\ &\quad + \alpha^2 r \cos \psi / (1 + \alpha^2 r) \\ D3 &= \alpha^2 \beta \{1 + \cosh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / \cosh \alpha \psi\} \\ E1 &= \{1 + \sinh \alpha \psi \sinh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / (1 + \alpha^2) / \cosh \alpha \psi \\ &\quad + \cosh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / (1 + \alpha^2 r) \\ &\quad + \cos \psi \{-1 / (1 + \alpha^2) + 1 / (1 + \alpha^2 r)\} \\ &\quad + \alpha \sin \psi \{ \tanh \alpha \psi - \sinh \alpha \\ &\quad \times \sqrt{r} (\pi - \psi) / \sqrt{r} / \cosh \alpha \psi \} / (1 + \alpha^2) \\ E2 &= \alpha \{ \sinh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) + \sqrt{r} \cos \psi \tanh \alpha \psi \\ &\quad - \cos \psi \sinh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / \cosh \alpha \psi \} / \sqrt{r} / (1 + \alpha^2) \\ &\quad - \sin \psi \{-1 / (1 + \alpha^2) + 1 / (1 + \alpha^2 r)\} \\ E3 &= \alpha \beta \{ \tanh \alpha \psi - \sinh \alpha \sqrt{r} (\pi - \psi) / \sqrt{r} / \cosh \alpha \psi \} \\ &\quad \dots\dots\dots (71) \end{aligned}$$

である。式 (68), (69) より式 (47), (48) が導かれ、前節と同様な手順により ψ, ϕ を求めることができる。さらに、管の変位 u および管の軸ひずみ ϵ_a も前節と同様な手順により導くことができる。

4. 計算結果と考察

(1) 計算のために必要な入力データ

計算のために用いた主な入力データは次のようである。地盤は、ポアソン比 $\sigma=0.495$, 密度 $\rho=1.8 \text{ g/cm}^3$, S 波速度 $v_s=50 \text{ m/s}$ とした。入射波は横波であり、速度比 $c/v_s=1$, 入射角 $\phi=45^\circ$, 変位振幅 $u_g=20 \text{ cm}$ とした。管は鋼管, 外半径 $a=30 \text{ cm}$, 管厚 1 cm (管内外径比 $b/a=0.967$) であり, 深さ 2 m の地点に埋設されており, また管と地盤との間の摩擦係数 $\delta=0.2$ とした。計算はすべて無次元化して行われているため, 計算

結果は以上の値のみに限定されることはない。なお, 条件が種々変化する場合の応答の変化を調べるため, $v_s=250 \text{ m/s}$, $\phi=10^\circ, 80^\circ$, $c/v_s=4$, $u_g=1 \text{ cm}$, $a=5 \text{ cm}$ ($b/a=0.967$), $\delta=0.5$, コンクリート管の場合についても計算した。

(2) 完全塑性型の履歴曲線を描く場合

管と地盤との相互作用が完全塑性型の履歴曲線によって表わされるものとする, 横波が入射角 ϕ で入射する場合の管の最大軸ひずみは式 (25) を用いると次式で示される。

$$\frac{|\epsilon_a|_{\max}}{u_g/a} = \frac{c_0}{Eu_g} \frac{L/a}{4\pi(1-b^2/a^2)\cos\phi} \dots\dots (72)$$

上式を種々の入力条件のもとで計算し, 図-7~12 に示した。図の説明は次節で行う。

(3) 弾塑性型の履歴曲線を描く場合

図-7~12 に入力条件を種々変化させた場合の管の軸ひずみ (正確には軸ひずみ振幅) ϵ_a と, 波長と管外半径との比 L/a との関係を示す。図中, 実線は弾塑性型の履歴曲線を仮定した場合 (式 (50) もしくは式 (51) によって表わされる), 一点鎖線は軸すべりを考慮しない場合 (文献 8) 中の式 (2-20) によって表わされる), 破線は完全塑性型の履歴曲線を仮定した場合 (式 (72) によって表わされる) の曲線である。図の横軸は, 図-11 以外は L/a であり, 図-11 では波長 $L(\text{m})$ をとった。縦軸は, 図-7~10 では $\epsilon_a/(u_g/a)$ であり, 図-11, 12 では ϵ_a そのものである。図-5 に示される地盤のばね特性 K_0 として, 式 (3) で表わされる K_a の実部および複素絶対値を用いた場合についてのおのおの計算を行ったところ, 両者の軸ひずみ曲線にはほとんど差違はなく, 複素絶対値を用いた場合の方が多少値が大きくなり安全側の配慮になるため, K_a の複素絶対値を用いて計算した。

図-7~12 にわたって成り立つ事項をまとめると次のようになる。

(i) 弾塑性型の場合の軸ひずみ曲線は, L/a が小さい場合には完全塑性型の場合の曲線によって近似され, L/a が大きい場合にはすべりが生じないと仮定した場合の曲線により近似される。また, 後二者の曲線は前者の上界となる。

(ii) すべりが生じる場合の曲線は, すべりが生じないと仮定した場合の軸ひずみより相当小さい。このことは L/a が小さいほど顕著である。

(iii) 弾塑性型の場合の軸ひずみ曲線は, ある L/a でピーク値をとる。このピーク値の上界は, 上記 (i) より, 完全塑性型の場合の式 $\epsilon_a=c_0L/(4EA \cos \phi)$ と,

地盤内に生じる軸方向のひずみ $\epsilon_a = 2\pi u_g \sin \phi \cos \phi / L$ によって表わされる曲線の交点で与えられる。したがって、この交点での波長および軸ひずみは次式で与えられる。

$$L = \cos \phi \sqrt{8\pi EA u_g \sin \phi / c_0} \dots\dots\dots (73)$$

$$\epsilon_a = \sqrt{\pi c_0 u_g \sin \phi} / (2EA) \dots\dots\dots (74)$$

上式は入射波が横波の場合の式であるが、縦波が管軸方向に入射する場合には両者は次のようになる。

$$L = \sqrt{8\pi EA u_g / c_0} \dots\dots\dots (75)$$

$$\epsilon_a = \sqrt{\pi c_0 u_g} / (2EA) \dots\dots\dots (76)$$

式 (74) で与えられる ϵ_a は $\phi=90^\circ$ のとき最大となり、式 (76) と一致する。このとき、式 (73) より $L=0$ となり現実的ではないが、最大値としての有効性は保持する。したがって、式 (76) は入射波が縦波、横波いずれであっても有効である。実地震波の諸性質に関して不明確な点が多い現在、入射波の変位振幅のみにより軸ひずみのピーク値を推定できる点は重要である。

次に各図の考察に移る。

図-7 は波速比 c_0/v_s を 1 および 4 に、摩擦係数 δ を

0.2 および 0.5 におおの変化させた場合の軸ひずみ曲線を示す。この図より、すべりが生じないと仮定した場合の曲線は c_0/v_s の影響を受けるのに対し、弾塑性型の場合の曲線はその影響をほとんど受けない（図ではその差違を見分けることができない）ことがわかる。 c_0/v_s の変化により動的地盤反力係数 K_a の値も変化する（式 (2) および 図-1 を参照）ため、 K_a の影響もほとんど受けないことになる。また、図より摩擦係数 δ の値は軸ひずみの大きさに大なる影響を与えることがわかる。このことは式 (25) から明らかである。

図-8 は入射角 ϕ を 10° 、 45° および 80° に変化させた場合の軸ひずみ曲線を示す。この図より、実線で表わされた曲線の中のすべりが生じている部分（式 (72) によって近似される部分）では ϕ が大ほどひずみが大きくなり、また曲線全体のピーク値もそれにつれて大きくなることがわかる。このことは式 (72) および式 (74) から明らかである。

図-9 は地盤内の S 波速度 v_s が 50 m/s および 250 m/s の場合の軸ひずみ曲線である。弾塑性型の場合の曲

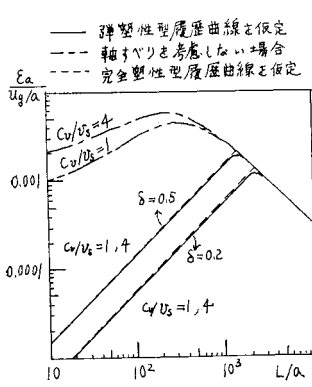


図-7 管の軸ひずみ (C_0/v_s および δ を変化させた場合)

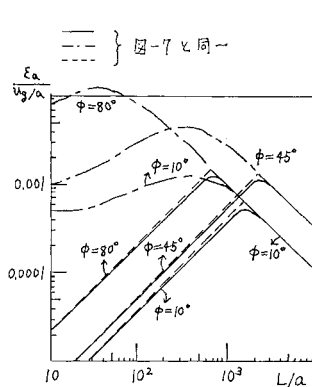


図-8 管の軸ひずみ (入射角 ϕ を変化させた場合)

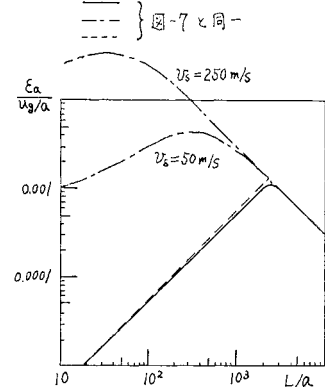


図-9 管の軸ひずみ (v_s を変化させた場合)

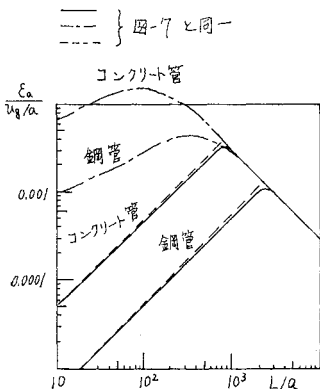


図-10 管の軸ひずみ (管材料を変化させた場合)

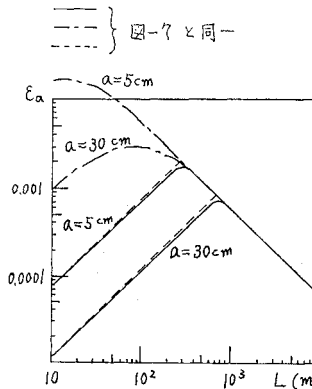


図-11 管の軸ひずみ (管径を変化させた場合)

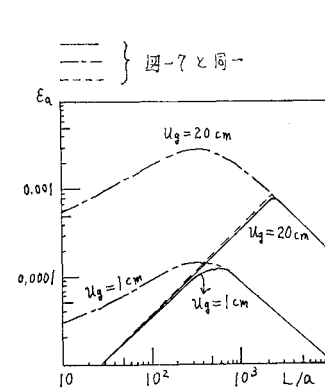


図-12 管の軸ひずみ (入射波の変位振幅を変化させた場合)

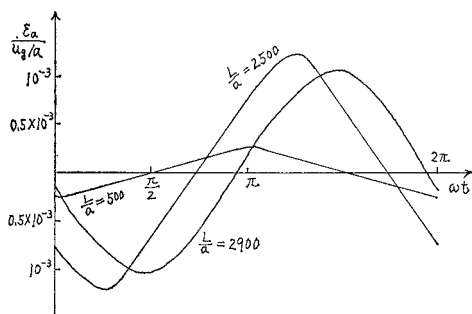
線に関しては、 $v_s=250$ m/s の場合の方がやや大きめに軸ひずみを与えるがその差は非常に小さい。したがって、すべりを考慮する場合には、軸ひずみは v_s の相違、つまり地盤の硬軟の影響をほとんど受けないことがわかる。 v_s が変化することにより、 K_a も変化するので、 K_a の影響もほとんど受けないことになる。一方、図からわかるように、軸すべりを考慮しない場合には軸ひずみは v_s の影響を大きく受け、対照的である。

図一10 は、管材料を鋼およびコンクリートとした場合の軸ひずみ曲線を示す。図より、軟らかい材料（ヤング率が小さい材料）の方がひずみが大きくなるのがわかる。ただし、すべりが生じないような L/a の範囲では両者の軸ひずみは一致し、地盤内に生じる軸方向のひずみと同一の値をとる。曲線のピーク値のみに着目する場合には式 (74) よりわかるようにヤング率がほぼ軸ひずみは小さくなるが、軸応力は大きくなる。

図一11 は管外半径 a が相違する場合の軸ひずみ曲線の変化を調べたものである。 a として 5 cm および 30 cm の値を用い、管内外径比は一定 (0.967) とした。この図より、管径が小さいほど軸ひずみが大きくなること、およびすべり出し時の波長 L が小さくなること、つまりすべりが生じにくくなることがわかる。このことは、管径が小さいほど地震時に被害が生じやすいことを示す⁷⁾。

図一12 は入射波の変位振幅 u_g の相違による軸ひずみ曲線の変化を調べたものであり、 u_g は 1 cm および 20 cm の 2 種類とした。この図より、当然のことであるが、 u_g が小さいほど軸ひずみは小さくなること、またすべりが生じにくくなることがわかる。特に、両者の差違はすべりを考慮しない場合の曲線において顕著である。

図一13 は弾塑性型の履歴曲線を描く場合の軸ひずみの時間的変化曲線を描いたものである。 L/a は 500, 2500, 2900 の 3 種類とし、他の入力条件は本章の (1) に主な入力データとして示した。グラフの縦軸は $\epsilon_a / (u_g/a)$ であり、横軸は $\omega t - kx$ である。管がすべっていることを示す部分は曲線の直線部分であり、この部分

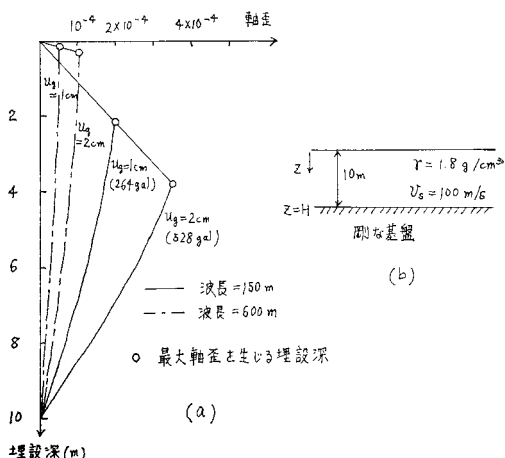


図一13 管軸ひずみの時間的変化 (弾塑性型の履歴曲線を描く場合)

は L/a が大になるほど範囲が狭くなり曲線は正弦曲線に近づく。 $L/a=500$ の場合、曲線はほぼ三角形であり、完全塑性型を仮定している場合の軸ひずみ曲線 (図一4 を参照) とほぼ一致する。宮本ら¹¹⁾ は実験において位相差を持つ縦波を発生させ、埋設管に生じる軸ひずみの時間的変化を調べている。彼らの実験は有限長の管に対するものであり、端部の影響が効いてくること、与えられた条件は本研究のものとは異なることから、本理論計算結果により実験結果を直接検証することはできないが、たとえば、すべりが生じていると思われる場合の軸ひずみの波形は非対称であり正弦波がくずれたような形になっていることは図一13 と傾向的に一致する。また、すべりが生じることによって生じる曲線の直線部分が軸ひずみの実測波形の中に見られる。

次に本研究の結果を用いて管に生じる軸ひずみと埋設深との関係を調べる。管と地盤との間に生じる力と相対変位との関係は弾塑性型の履歴曲線によって表わされるものとする。いま、図一14 (b) に示したように、剛な基盤上に層厚 $H=10$ m, S 波速度 $v_s=100$ m/s, 単位体積重量 $\gamma=1.8$ g/cm³ の一様な土層を想定し、入射波としてこの地盤内に存在しうるラブ波の一次モードを考え、入射角 ϕ を 45° にとる。管は鋼管であり、管外半径 $a=30$ cm, 管厚 1 cm, 管と地盤との間の摩擦係数 $\delta=0.2$ とする。入射波の波長 L は 150 m および 600 m とし、変位振幅 v_g は 1 cm および 2 cm とした。本章、(3) の (i) で述べたように、弾塑性型の場合の軸ひずみ曲線は完全塑性型の場合の曲線とすべりが生じないと仮定した場合の曲線によって近似され、後二者は前者の上界となるため、後二者の関係式を用いて管の軸ひずみと埋設深との関係を調べる。

完全塑性型の場合の管の軸ひずみは式 (72) を用いると



図一14 管の軸ひずみと埋設深との関係

$$\epsilon_a = c_0 L / (4 EA \cos \phi) \dots\dots\dots (77)$$

となる。いま、埋設深を z とすると

$$c_0 = 2 \pi a r z \delta \dots\dots\dots (78)$$

と表わせる故、式 (77) は次のようになる。

$$\epsilon_a = \pi a r \delta L z / (2 EA \cos \phi) \dots\dots\dots (79)$$

軸すべりが生じないと仮定した場合の軸ひずみは近似的に

$$\epsilon_a = k u \cos \phi \sin \phi \dots\dots\dots (80)$$

と表わせる。 u はある埋設深におけるラブ波の一次モードの変位振幅であり

$$u = u_g \cos \frac{\pi}{2H} z \dots\dots\dots (81)$$

と表わされる。ここで、 u_g は地表面における変位振幅である。上式を式 (80) に代入すると

$$\epsilon_a = k u_g \cos \phi \sin \phi \cos \frac{\pi}{2H} z \dots\dots\dots (82)$$

となる。なお、ラブ波の一次モードに関して、波数 k と角振動数 ω との間に次のような関係が成り立たねばならない。

$$\omega = v_s \sqrt{\{\pi / (2H)\}^2 + k^2} \dots\dots\dots (83)$$

式 (79) と式 (82) のうち値の小さい方を選び曲線を描いたのが 図-14(a) である。図中の○印は最大軸ひずみが生じる地点を表わす。この図より、ある埋設深で軸ひずみは最大となること¹²⁾、地表面付近に埋設された管には大きな軸ひずみは生じないこと、および入射波の変位振幅が大きくなるほど最大軸ひずみを生じる埋設深は大きくなり、かつ最大軸ひずみの値も増大することがわかる。最大軸ひずみを生じる埋設深とそのときの軸ひずみの値は、式 (79) と式 (82) を等置することにより得られる。

(4) バイリニア型の履歴曲線を描く場合

図-15 はバイリニア型の履歴曲線を描く場合の管の軸ひずみ曲線を示す。入力条件としては、本章 (1) に主

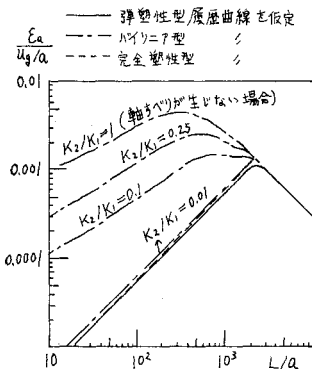


図-15 管の軸ひずみ (バイリニア型の履歴曲線を描く場合)

な入力データとして示したものをを用いた。この場合、すべり出し時の摩擦係数を無次元化すると $c_i / (E u_g) = 0.323 \times 10^{-6}$ となる。 K_1 としては、前節と同様に K_a の複素絶対値を用い、 K_2 と K_1 の比は 0.001, 0.1, 0.25, 0.5 の 4 種類に変えた。比較のために、同様な条件の

もとで、弾塑性型の履歴曲線を描く場合 ($c_0 / (E u_0) = 0.323 \times 10^{-6}$ とした) の軸ひずみ曲線と軸すべりが生じないと仮定した場合の軸ひずみ曲線を同時に示した。この図より、 K_2 / K_1 が増大するにつれて、弾塑性型の場合の曲線から、軸すべりが生じないものとした場合の曲線に変化してゆく様子がよくわかる。 $K_2 / K_1 = 0.1$ 以上の場合の軸ひずみ曲線は弾塑性型の場合のものよりかなり大きくなっており、軸ひずみのピーク値を簡単に推測することはできない。

5. 理論の現実問題への適用

他の文献の実験結果によれば、管と地盤との間に生じる力と相対変位との関係はバイリニア型の履歴曲線によって近似することができ、特に相対変位が大きくなるとほぼ弾塑性型によって表わされることが知られている。埋設管に大きな被害を生じうるような大地震時には管と地盤との相対変位もかなり大きくなると考えられるので弾塑性型の履歴曲線を仮定すればよいであろう。この場合、動的ばね係数の大きさの相違は管の軸ひずみの大きさにあまり影響しないことがわかっている (本章 (3) を参照) ので、理論的に導出した動的地盤反力係数 K_a を用いても大きな誤差は生じないであろう。また、完全塑性型の履歴曲線を仮定するか、もしくはすべりが生じないものとして管の軸ひずみを計算し小さな値の方を採用すれば、安全側の近似にもなり計算も簡便になろう。

本章においてこれまで述べてきたことがらはすべて無限長の直管に関するものであった。現実の埋設管は継手部、分岐部、曲管部などを有する故、以上の結果を直接適用することはできないが、定性的な考察を行うことは可能である。

一例として 図-16 のような T 字部を考える。図中の矢印の方向に縦波が入射するとすれば、 AA' は横方向に地盤と同一に変位するが、 BB' は地盤との間に軸方向の相対変位を生じやすく、特に軸す

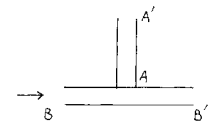


図-16 分岐部などに応力集中が生じやすいことを説明するための図

べりが生じる場合には相対変位がさらに大きくなるため A 点に応力集中が生じ管の破壊を招きやすい状態となる。また、 AA' 方向に縦波が入射する場合には AA' 部分が BB' 部分に突っこむような形になり、やはり危険である。このようなことを避けるための一つの方法として、 AA' 、 BB' の運動が A 点に伝達されないような構造にすることが考えられる。たとえば、A 点付近に伸縮性およびたわみ性のよい継手を用いると、T 字部は他の部分から分離され地盤と同一に運動するようになり応

力集中も避けられるであろう。上記のことは、AA' が立ち上がり部である場合、および A'AB が曲管部をなす場合にもあてはまる。

現在、石油パイプラインの設計基準として、「石油パイプライン技術基準」^{13),14)}なるものが施行されており、その中にパイプラインの耐震設計基準が規定されている。この基準は、地震時に管と地盤との間に軸方向すべりが生じないものと仮定して定められたものであり、長い直管部に適用する場合には安全側の値を与えるが、入射波の波長が小さい場合には軸ひずみを過大評価する可能性が大きく不経済となる（本章、(3)を参照）。また、軸方向すべりが生じる場合、マンホールとの接合部、曲管部、分岐部などが剛結されているとその部分に過大な応力集中が生じる可能性があり、これはすべりを仮定しない計算からは評価することができない。したがって、埋設管路の耐震設計にあたっては、必ず軸方向すべりを考慮した解析を行う必要がある。

6. 結 論

本研究では、まず「管壁面上に作用する軸方向のせん断力が管と地盤との間のすべり抵抗（摩擦抵抗）（ただし、地盤のせん断強度がすべり抵抗より小さい場合にはせん断強度で代用する）を越えるか否か」によってすべりの条件を規定した。次に、軸方向すべりが生じる場合に関して管外壁に作用する軸方向のせん断力と、管と地盤との相対変位との間に、完全塑性型、弾塑性型およびバイリニア型の履歴曲線を仮定し、定常正弦波に対する無限長管路の動的挙動を理論的に解析した。この際、地盤反力係数として式(3)で表わされる K_a を用い、また管の慣性力を無視した。この解析に基づき管の軸ひずみに関する簡便な計算式を導出した。また、曲管部、管路分岐部などに対して、軸方向すべりが生じる場合の検討を加えた。最後に、本研究の結果に基づいて従来の研究結果および設計基準を再検討し、いくつかの問題点を指摘した。

本研究において得られた結果を列挙すると次のようになる。

(1) すべり出し時の管と地盤との相対変位は摩擦抵抗および入射波の変位振幅に比例し、動的地盤反力係数に反比例する。したがって、地盤のせん断弾性係数・ポアソン比、管径、波長、入射角、波速にも関係する。すべり出し時の相対変位の大小は管のすべりにくさ、すべりやすさとは直接関係しないためすべりの条件を相対変位によって規定すべきではない。

(2) 完全塑性型の履歴曲線を仮定した応答計算より簡便な管軸ひずみの計算式が得られ、これは桜井が同様

な仮定のもとで導いた式と一致した。また、その適用範囲を明確にすることができた。

(3) 弾塑性型の履歴曲線を仮定した応答計算より次のような結果が得られた。

a) 管の軸ひずみ曲線は、完全塑性型の場合の軸ひずみ曲線とすべりが生じない場合の軸ひずみ曲線の2つによってほぼ近似することができ、また軸ひずみはある波長でピーク値をとる。これより、管の軸ひずみの上界となる値を、管の諸元および入射波の変位振幅のみ（入射角・波長に無関係）によって簡便な式で表わすことができた。

b) 管の軸ひずみ曲線は波速および地盤内のS波速度にほとんど無関係である。したがって、動的地盤反力係数の値が変化してもほとんど影響されない。

c) 管の軸ひずみ曲線は、入射角、管径、入射波の変位振幅の影響を大きく受ける。特に、管径が小さいほどすべりが生じにくく軸ひずみは大きな値をとるため、管径が小さいほど地震時に被害が生じやすいことになる。

d) 適当な地盤モデルを仮定することにより、ある埋設深で軸ひずみは最大となることがわかった。

e) 管の軸ひずみの時間的変化曲線は、完全塑性型の場合には三角波をなす。弾塑性型の場合には、波長が小さいうちは三角波に類似し、波長が大きくなるとすべりが生じない場合の曲線つまり正弦曲線に近づく。ただし、曲線は一般に非対称であり正弦波形がくずれたような形となる。この結果は、宮本らの実験において得られた軸ひずみ曲線を定性的に説明すると思われる。

(4) バイリニア型の履歴曲線を仮定した場合の管の軸ひずみ曲線は、弾塑性型の場合の曲線とすべりが生じないと仮定した場合の曲線との中間的な性質を示す。

(5) 軸方向すべりが生じる場合、管と地盤との間の相対変位が大きくなるため、曲管部、分岐部などに過大な応力集中が生じる可能性がある。したがって、現実の埋設管路系の地震時応答計算においては必ず軸方向すべりを考慮すべきである。

本研究を遂行するにあたり、終始適切なご指導をいただいた東京工業大学山口柏樹教授に深謝の意を表します。また、研究を進めるにあたって適切な助言をいただき数多くの便宜をお計りいただいた新潟大学松野操平教授、埋設管の震動問題に関して貴重な御意見をいただいた東京大学地震研究所伯野元彦助教授、電力中央研究所桜井彰雄博士に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 桜井彰雄：地盤の震動解析に基づく埋設パイプラインの耐震性の研究，(1971)
- 2) 北出浩三・白木万博・福沢 清：地中埋設管の耐震強度，三菱重工技報，Vol. 11, No. 4, pp. 490~506, (1974)
- 3) 高田至郎：埋設管路-地盤系の復元力特性と地震応答解

- 析, 土木学会論文報告集, No. 249, pp. 1~12, (1976)
- 4) 高田至郎・長尾貞夫: 埋設導管の耐震性に与える継手の影響について, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp. 678~685, (1975)
 - 5) 土岐憲三・安田明己: 埋設鑄鉄管路の地震時挙動についてのシミュレーション, 第31回土木学会年次講演会第I部, pp. 416, (1976)
 - 6) 鵜飼恵三・鈴木政義・高橋義信: 地中埋設管の地震時挙動に関する二, 三の考察(第II報), 第4回土木学会関東支部年次研究発表会, pp. 37~38, (1977)
 - 7) 鵜飼恵三: 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, No. 267, pp. 135~137, (1977)
 - 8) 鵜飼恵三・松野操平・若林正彦: 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)
 - 9) 後藤尚男・土岐憲三・高田至郎: 地中埋設管の動特性について, 第12回地震工学研究発表会, pp. 103~106, (1972)
 - 10) 宮島信雄・宮内二郎・上野和栄: 埋設導管の地震時応力, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp. 662~669 (1975)
 - 11) 宮本 宏・北條貞宗・古庄健次: 地震時の埋設管路挙動握のための振動実験について, 第13回地震工学研究発表会, pp. 129~132, (1974)
 - 12) 金井 清: 地震工学, 共立出版, pp. 146~147, 昭和44年
 - 13) 通産省・運輸省・建設省・自治省: 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令(昭和47年通産省・運輸省・建設省・自治省令第2号), 1972.12
 - 14) 通産省・運輸省・建設省・自治省: 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示(昭和48年通産省・運輸省・建設省・自治省告示第1号), 1973.9

(1977.8.1・受付)