(62) 埋設管異形管部の地震時ひずみ解析

川崎製鉄(株)　小池 武

1. まえがき

埋設管路は直管・曲管・分岐管・人孔・バルブ室など多種類の要素構造物が直列に連結する形で一つの管路系を構成している。したがって，最弱要素構造物を見極め，その地震時安全性を検討することが，埋設管路システムの耐震安全性を論じる上で基本的に重要な作業となる。従来の震害例によると，地変を伴わない地盤震動区域では直管部に比較して異形管部に被害が集中していることから，異形管部の地震時挙動に関するいくつかの研究報告がなされてきた。[1), 2), 3), 4), 5)] 筆者もまた文献(4)において90°曲管・T字管の地震時ひずみ算定式を提案してきた。

本研究は文献(4)において論じられなかった任意の角度をもつ曲管についてその地震時ひずみ算定式を提案するものである。埋設管は弾性床上の梁としてモデル化し，曲管部のたわみ性，応力集中を評価するためにたわみ性解析を実施した。

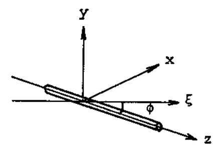

Fig.1

2. 埋設管と周辺地盤間の相対変位

埋設管路直管部に発生する軸方向地震時ひずみ ε_S は，自然地盤のひずみ ε_G と変換係数 β_S により次式で与えられる。[4)]

$$\varepsilon_S = \beta_S \varepsilon_G \qquad \cdots\cdots (1)$$

上式は，埋設管と周辺地盤との間にすべりが発生しない条件下での関係式である。一方，地震波入力振幅がかなり大きく，埋設管と周辺地盤の間にすべりが発生する場合，管ひずみは逓減する。その効果をパラメータ q を用いて表現するならば，管ひずみおよび相対変位（管・自然地盤間）Δ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_S = q_S \cdot \beta_S \cdot \varepsilon_G \qquad \cdots\cdots (2)$$

$$\Delta = (1 - q_S^* \beta_S) v_G \qquad \cdots\cdots (3)$$

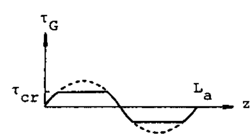

Fig.2

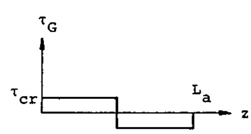

Fig.3

ここで，v_G は Fig.1 に示す ξ 軸に沿って入射した地震波の管軸（z 軸）方向の変位振幅である。q_S，q_S^* はそれぞれ管ひずみ，埋設管・地盤間の相対変位を求めるための逓減係数であり以下のように求められる。すなわち，Fig.2 に示すように入力波が正弦波の場合，すべり限界せん断応力 τ_{cr} を超える地盤内せん断応力は管に伝達されないとすると，宮内の方法[6)]に従って最終的に次式を得る。

$$q_S = 1 - \frac{S(1+\kappa^2) - \sin\eta_{cr}}{\kappa \sinh(\kappa\eta_{cr})} \qquad \cdots\cdots (4)$$

$$q_S^* = \left(1+\frac{1}{\kappa^2}\right)\left\{\sin\eta_{cr} - S\left[1-\left\{\frac{\pi^2}{8}+\left(\frac{\eta_{cr}^2}{2}-\frac{\pi}{2}\eta_{cr}\right)\right\}\kappa^2\right]\right\} \qquad \cdots\cdots (5)$$

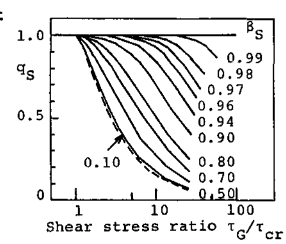

Fig.4

ここで，　$\kappa = \lambda^*/(k_\nu \sin\phi)$，$\lambda^* = \sqrt{K_A/Ed \cdot 1/\{1-(c_a/c_A)^2\}}$

$$S = \frac{1}{1+\kappa^2}\,\frac{\kappa\cos\eta_{cr}\tanh(\kappa\eta_{cr}) + \sin\eta_{cr}}{\kappa\left(\frac{\pi}{2}-\eta_{cr}\right)\tanh(\kappa\eta_{cr})} \qquad \cdots\cdots (6)$$

ただし，k_ν：入力波の波数，ϕ：入力波の埋設管に対する入射角，K_A：埋設管と周辺地盤間の軸方向バネ定数，E：ヤング率，d：管厚，c_a：入力波の管軸に沿った見かけの伝播速度，c_A：管材の伝播速度，η_{cr}：すべり開始点を示すパラメータ。η_{cr} は次式を満足する値としてパラメトリックに決定される。

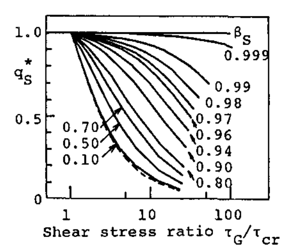

Fig.5

$$\tau_G/\tau_{cr} = (1 - q_S^* \beta_S)/S \qquad \cdots\cdots (7)$$

式(7)を用いると，τ_G/τ_{cr}とq_sおよびq_s^*の関係がFig.4，5のように求められる。同図によると，q_s，q_s^*共に変換係数の関数であり，β_sが1より小さくなるに従い急速にある下限値曲線（破線）に収束する。この下限値曲線は筆者が文献(4)に示したq_s，q_s^*の解析式に一致する。

地震波のランダム波形を上述のすべり問題で厳密に考慮するには，複雑なシミュレーション手法が必要となるが，ここでは簡便にランダム波の影響を評価するためFig.3に示す矩形波について考察する。この波形は，埋設管が全面的にすべっている状況を模擬したものである。すなわち，限界せん断応力を大きく上回る入力波振幅が与えられた時には入力波形が正弦波であるとランダム波であるとを問わず，限界せん断応力が管表面に作用することになるから，得られる管ひずみは波形に依らない最大管ひずみを与えることになる。このときのすべり逓減係数は次式で求められる。

$$q_R = \pi/2 \cdot (1+\kappa^2) S \qquad \cdots\cdots (8)$$

$$q_R^* = \pi^2/8 \cdot \kappa^2 S/\beta_S \qquad \cdots\cdots (9)$$

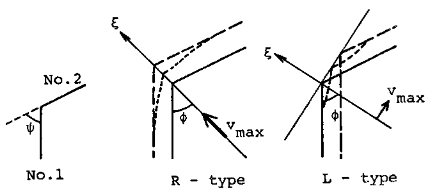

Fig.6

3. 曲管部のひずみ解析

Fig.6は曲管部に入力波が入射角ϕで入射した場合である。入力振幅の方向がξ軸方向に一致する入力波をRータイプ，逆に，ξ軸直角方向に一致する入力波をLータイプと呼ぶことにすると，同図にはRータイプ，Lータイプそれぞれの入力波が入射した場合の曲管部の変形状態が破線で示されている。入力波によるξ軸方向の最大地動がv_{max}で与えられるとき，曲管部分枝①，②にはそれぞれΔ_1，Δ_2の大きさの相対変位が各管軸方向に発生する。したがって，分枝①方向の相対変位Δ_Rは結局次式で与えられる。

$$\Delta_R(\phi) = |\Delta_1| - |\Delta_2| \cos\psi \qquad -\psi \leqq \phi \leqq \pi-\psi \qquad \cdots\cdots (10)$$

ここで，

	R - type	L - type
	$\Delta_1 = \{\cos\phi - \beta_D(\phi)\} v_{max}$	$\Delta_1 = \{\sin\phi - \beta_D(\phi)\} v_{max}$
	$\Delta_2 = \{\cos(\pi-\psi-\phi) - \beta_D(\pi-\psi-\phi)\} v_{max}$	$\Delta_2 = \{\sin(\pi-\psi-\phi) - \beta_D(\pi-\psi-\phi)\} v_{max}$

$\cdots\cdots (11)$

ただし，
$$\beta_D(\phi) = q_S^* \beta_S \qquad \cdots\cdots (12)$$

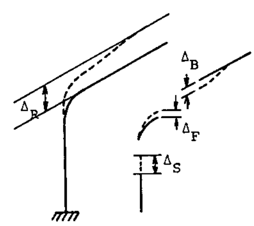

Fig.7

このとき，式(10)の相対変形はFig.7に示すように曲管部の分枝①方向の変形Δ_F，分枝①の伸びΔ_S，分枝②の分枝①方向の曲げ変位Δ_Bによって吸収される。すなわち，

$$\Delta_R(\phi) = \Delta_F + \Delta_S + \Delta_B \qquad \cdots\cdots (13)$$

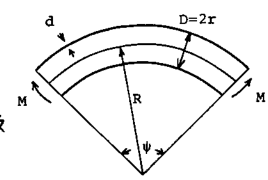

Fig.8

水道・ガス用に一般に用いられる管径・管厚比のパイプで製作された曲管では，Fig.8に示すように材端の曲げモーメントMに比例して管が偏平し応力集中が発生する。その度合をたわみ係数n，応力集中係数iを用いて表現するならば，次の関係を得る。

$$\Delta\psi/\psi = nMR/(EI), \qquad \sigma_B = iM/Z \qquad \cdots\cdots (14)$$

ここで，I：曲管の断面2次モーメント，Z：曲管の断面係数，R：曲率半径，$\Delta\psi$：曲管の角度変化

さて，Fig.9に示すように曲管部材端のせん断力，曲げモーメントを仮定すると，両材端での連続条件から次式を得る。

$$v_1(0) = 0, \; v_2(0) = 0, \; \theta_1(0) - \theta_2(0) = \theta_B, \; M_1 = -M_2 + RS_1\sin\psi + RS_2(1-\cos\psi) \qquad \cdots\cdots (15)$$

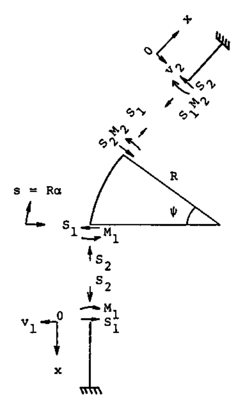

Fig.9

ここで，θ_Bは曲管部のたわみ角であり次式で与えられる。

$$\theta_B = \psi\frac{nR^2}{EI}\left[\frac{M_2}{R} + S_1\left(\frac{1-\cos\psi}{\psi} - \sin\psi\right) + S_2\left(\cos\psi - \frac{\sin\psi}{\psi}\right)\right] \quad \cdots\cdots (16)$$

さらに，曲管部の分枝①方向のたわみΔ_Fは次式で与えられる。

$$\Delta_F = \frac{nR^3}{2EI}\left[\frac{2M_2}{R}(\psi\cos\psi-\sin\psi)+2S_1\left\{\cos\psi-\cos2\psi - \frac{\psi}{2}\sin2\psi + \left(1+\frac{I}{nR^2A}\right)\frac{\cos2\psi-1}{4}\right.\right. \quad \cdots\cdots (17)$$

$$\left.\left.+2S_2\left\{\psi\cos^2\psi-\sin2\psi+\left(1+\frac{I}{nR^2A}\right)\frac{2\psi+\sin2\psi}{4}\right\}\right]$$

式(16)，式(17)を式(13)に代入し，さらにΔ_Sを分枝①に沿う1/4波長に亘る一様な伸びで与えられるものとすると，分枝②の分枝①方向の曲げ変形は次式で求められる。

$$\Delta_{B_1} = \frac{\Delta_R(\phi)}{1+\dfrac{L_{a_1}I\lambda^3}{2A}\left|\dfrac{1+C_2+C_1\cos\psi}{\sin\psi}\right|+C_3} \quad \cdots\cdots (18)$$

ここで，　$\lambda = \sqrt[4]{k/(4EI)}$　；kは埋設管周辺の地盤反力係数，A：管断面積，L_{a_1}：分枝①方向のみかけの波長。

$$C_1 = (C_{22}a_1-C_{12}a_2)/(C_{11}C_{22}-C_{21}C_{12}),\ C_2 = (C_{11}a_2-C_{21}a_1)/(C_{11}C_{22}-C_{21}C_{12})$$

$$C_3 = nR^3\left[\frac{2}{R}(\psi\cos\psi-\sin\psi)\lambda^2C_2-2\lambda^3C_1\left\{\cos\psi -\cos2\psi- \frac{\psi}{2}\sin2\psi+\left(1+ \frac{I}{nR^2A}\right)\frac{\cos2\psi-1}{4}\right\}\right.$$

$$\left.- 2\lambda^3\frac{1+C_2+C_1\cos\psi}{\sin\psi}\left\{\psi\cos^2\psi-\sin2\psi+\left(1+\frac{I}{nR^2A}\right)\frac{2\psi+\sin2\psi}{4}\right\}\right] \quad \cdots\cdots (19)$$

$$C_{11} = 1+2nR^2\lambda^2(1-2\cos\psi+\psi\cos2\psi/\sin\psi),\ C_{12} = -1-2nR^2\lambda^2\{1+\psi/(R\lambda)-\psi\cot\psi\}$$

$$C_{21} = 1+R\lambda(\cot\psi-\cos2\psi/\sin\psi),\qquad C_{22} = 1+R\lambda(1-\cos\psi)/\sin\psi$$

$$a_1 = -\sin\psi- 2nR^2\lambda^2(\psi\cos\psi-\sin\psi),\qquad a_2 = -\lambda R(1-\cos\psi)$$

Δ_{B_1}を用いると，せん断力，曲げモーメントは次式で求められる。

$$M_1 = 2EI\lambda^2C_1\Delta_{B_1},\ M_2 = 2EI\lambda^2C_2\Delta_{B_1},\ S_1 = -2EI\lambda^3C_1\Delta_{B_1},\ \ S_2 = -2EI\lambda^3(1+C_2+C_1\cos\psi)\Delta_{B_1}/\sin\psi \quad \cdots\cdots (20)$$

曲管内の任意点αにおける曲げモーメント，せん断力

$$M(\phi,\alpha) = M_2-S_1R(\sin\psi-\sin\alpha)-S_2R(\cos\alpha-\cos\psi) \quad \cdots\cdots (21)$$

$$S(\phi,\alpha) = S_1\sin\alpha-S_2\cos\alpha \quad \cdots\cdots (22)$$

より，分枝①方向の相対変位による曲管部ひずみは次式となる。

$$\varepsilon_{B_1}(\phi,\alpha) = i\frac{D}{2EI}|M(\phi,\alpha)|+\left|\frac{S(\phi,\alpha)}{AE}\right| \quad \cdots\cdots (23)$$

分枝②方向の相対変位に対しても同様の解析を行うことにより，式(18)，(23)に対応する式として次式を得る。

$$\Delta_{B_2} = \frac{\Delta_R(\psi-\phi)}{1 + \dfrac{L^*_{a_2}I\lambda^3}{2A}\left|\dfrac{1+C_2+C_1\cos\psi}{\sin(\psi-\phi)}\right|+C_3} \quad \cdots\cdots (24)$$

$$\varepsilon_{B_2}(\phi,\alpha) = i\frac{D}{2EI}|M(\psi-\phi,\alpha)|+\left|\frac{S(\psi-\phi,\alpha)}{AE}\right| \quad \cdots\cdots (25)$$

ここで，　$L^*_{a_2} = L/\cos(\psi-\phi)$　，Lは入力波の波長。

したがって，最終的に曲管部ひずみは，式(23)と(25)の和として次式で求めることができる。

$$\varepsilon_B(\phi,\alpha) = \varepsilon_{B_1}(\phi,\alpha)+\varepsilon_{B_2}(\phi,\alpha) \quad \cdots\cdots (26)$$

そして，曲管に対する変換係数は

$$\beta_B(\phi,\alpha) = \varepsilon_B(\phi,\alpha)/\varepsilon_G \quad \cdots\cdots (27)$$

となる。

4. 数値計算例

数値計算は水道・ガスの導管として汎用される溶接鋼管を対象とした。使用鋼管の諸特性を Table 1 に示す。

Table 1　パイプ諸元

諸　元		
管径	D_{mm}	600
管厚	d_{mm}	6
曲率半径	R	1.5 x D
パイプファクター	h	0.06
応力集中係数	i	9.38
たわみ係数	n	27.5

埋設地盤は Table 2 に示す3種類の地盤を対象とし，埋設管表面での限界せん断応力τ_{cr}は地盤種別と無関係に$\tau_{cr}=0.1 kgf/cm^2$と仮定した。また，基盤入力加速度は150galとし，新耐震設計法[7]の応答変位法に基づいて地盤ひずみを算定した。

Table 2　地盤条件

地盤諸元			表層地盤 A種	表層地盤 B種	表層地盤 C種
単位体積重量	ρ_G	kgf/cm^3	$1.8x10^{-3}$	$1.8x10^{-3}$	$1.8x10^{-3}$
卓越周期	T	sec	1.0	0.5	0.2
限界せん断応力	τ_G	kgf/cm^2	0.1	0.1	0.1
地盤反力係数	k	kgf/cm^2	1.5 πD	1.5 π	1.5 πD

Fig.10は入力波波長に対する直管・曲管のひずみの関係を検討したものである。同図によると，地盤ひずみε_Gと直管ひずみε_sとの関係は長波長領域（300m以上）でほぼ等しい大きさとなるが，短波長領域（300m以下）ではすべりによる逓減効果のため直管ひずみは短波長になる程小さい傾向を示す。図中100m～400m区間に亘って直管ひずみがある上下幅を持っているが，この上限部分は式(8)，(9)に示す矩形波の場合の値を示している。

この図によると，直管ひずみに与えるランダム波形の影響は限定的であり，むしろ波長の大小が与える影響の大なることを示唆している。同図中には，90°，67.5°，45°，22.5°の曲管のひずみと波長の関係も示されている。曲管ひずみは，短波長領域で増加傾向を示し，67.5°曲管（Rタイプ入力波）は100m前後の波長で地盤ひずみ程度の大きさに達し，その管ひずみは最大0.2%に達している。

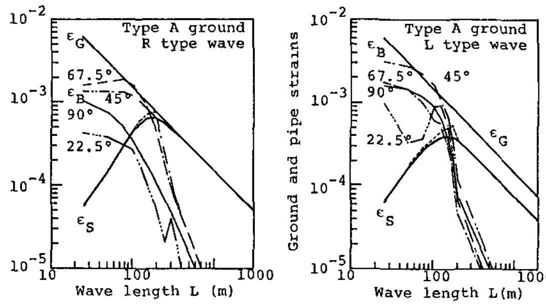

Fig.10

Fig.11は入射角ϕを種々に変化させた場合の各曲管の変換係数式(27)の値を算定したものである。入力波のタイプによりその傾向は大いに異なるが，両者ともに各曲管の最大値は入射角により移動し，90°曲管は必ずしも常に最大値を与えないことがわかる。むしろ，67.5°，45°曲管の方が90°曲管よりもより広い入射角の範囲で大きな変換係数の値を与えている。

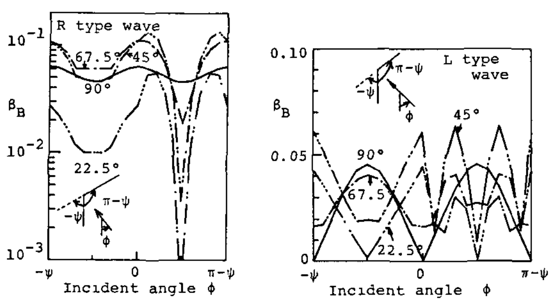

Fig.11

5. あとがき

本研究は任意の曲げ角度をもつ埋設曲管の地震時ひずみを算定する手法を提案したものである．数値計算結果より，曲管部の管内ひずみは隣接する直管のすべりによる相対変形の増加によって弾性限界の0.2%ひずみを越える可能性のあることが判明した。一方，直管・曲管のひずみが波長に大きく依存しており，とくに300m以下の短波長領域ではすべりの影響が著しいことを上記の計算結果は示しているが，より精確な管ひずみを算定するには実地震波の卓越波長に関するデータの集積・研究の進展が望まれる。

参考文献

1) 桜井他：電中研報告 No.72004，昭和47年11月
2) SHAH, CHU：ASCE, po1, pp.53-62, 1974
3) SHINOZUKA, KOIKE：ASME Publication, pp.31-48, 1979
4) 小池：土木学会論文報告集 No.331, pp.13-24, 1983
5) NYMAN：US-Japan Workshop on Buried Pipelines, Tsukuba '84
6) 宮内：相模原技術センター報告，No.86，1974
7) 建設省：新耐震設計法，東京，p.156，1981