

埋設管の地震被害と管路網の変形特性

SEISMIC DAMAGE TO WATER DISTRIBUTION PIPES AND
RESPONSES OF NETWORK ELEMENTS TO GROUND DEFORMATIONS

鈴木 信久* 浜田 政則**

Nobuhisa SUZUKI and Masanori HAMADA

Seismic damage to water distribution networks are analyzed for focusing location of damaged points within the network. Also analytically studied are responses of piping elements in the network to ground deformations. The damage of pipes discussed have been observed during the 1964 Niigata earthquake and the 1989 Loma Prieta earthquake. The water distribution networks are idealized with four piping elements in order to compare with their responses to ground deformations and the damage property of the networks, which elements involve a straight, an elbow, a tee junction and a cross junction. Closed form linear solutions are deduced to express strains induced in the four piping elements assuming a uniform ground strain with an arbitrary encounter angle.

1 緒 言

本論文は、ライフライン供給システムのうち、低圧・小口径の埋設配水管路網を対象に、地震被害の特徴を分析し、管路網を構成する配管要素の変形特性を解析したものである。被害事例の分析は、1964年新潟地震および1989年ロマ・プリエタ地震によって発生した配水管路網の被害を対象としている¹⁻⁴⁾。

既往の地震による管路網の被害をみると、曲管、T字管および十字管のような異形管やそれらの近傍に比較的多く発生している⁵⁾。これらは何れも管路の構造特性が変化しているところで、ひずみが集中し易いためである。このような埋設管路の被害特性を、管路網の構造と関連づけて検討するため、直線モデル、直角モデル、T字分岐モデル、十字分岐モデルの4種類の基本モデルを考え、これらの応答特性を解析している。この基本モデルの代表寸法は、地震波動および側方流動によって発生する地盤のひずみがほぼ一定と見なせる区間の長さよりも一般的に小さいことを考慮して、基本モデルへは一律な地盤ひずみを入力している⁶⁾。

変形解析では、何れも異形管に接続する直管に発生する管体ひずみを表す線形解を求め、地盤ひずみの入射角度をパラメータとして基本モデルの応答特性を比較している。また、異形管類についてはたわみ係数を考慮するととどめ、破壊強度を議論するためのひずみ集中係数については考慮していない。

* NKK 応用技術研究所 川崎第一研究部 (〒210 神奈川県川崎市南渡田 1-1)

** 東海大学 教授 海洋学部 海洋土木工学科 (〒424 静岡県清水市折戸 3-20-1)

2 埋設管路網の被害の特徴と管路網のモデル化

2.1 埋設管路網の地震被害の特徴

新潟地震による新潟駅前地区およびロマ・ブリエタ地震によるサンフランシスコ市マリーナ地区の配水管路の被害発生位置をそれぞれ図1、2に示す。地震発生当時、新潟駅前地区の管路はねずみ鋳鉄管および石綿セメント管で構成されており、マリーナ地区の管路はねずみ鋳鉄管で構成されていた^{2,3)}。

二つの管路網の規模を比較するため、異形管に挟まれたリンクの長さとしリンク数を図3、4に示す。図中、斜線は1つ以上の被害が発生したリンク、白抜きは無被害のリンクを表している。また、*はリンクの被害発生率を表している。新潟駅前地区では、長さが50~60mのリンクが12本と最も多く、50~150mでは2~5本とほぼ同程度の数であるが、リンクが長くなるに従って数は漸減している。また、マリーナ地区では、長さが100~110mおよび150~160mのリンクがそれぞれ22本と集中して多くになっている。他は、150m以下のリンクは平均して5本程度

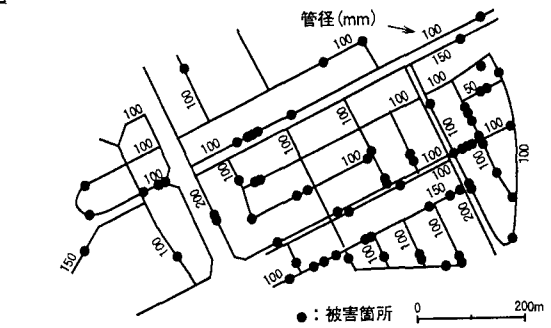


図1 1964年新潟地震による新潟駅前地区配水管路の被害

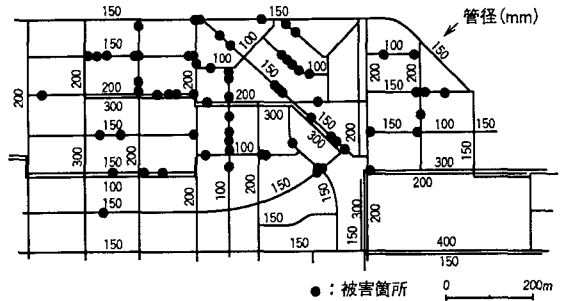


図2 1989年ロマ・ブリエタ地震によるマリーナ地区配水管路の被害

リングの被害発生率を見ると、定性的にはリンクが長いほど被害発生率が増加している傾向が認められる。新潟駅前地区の場合、リンク長の増加にしたがって被害発生率も増加し、100mで100%に達しており、110~160mにおける被害発生率はやや変動するが、170m以上では全て100%となっている。マリーナ地区の被害発生率にも同様な傾向が見られ、リンク長の増加とともに発生率は増加し、110mで100%に達している。そして、110~160mではやや変動し、160~180mでは再度100%に達している。

各リンクの被害発生地点を、異形管からの距離をリンク長で無次元化して図5、6に示す。無次元化距離が0の場合、被害は異形管あるいはその直近に発生し、1/2の場合にはリンクの中央に発生していることになる。新潟駅前地区では、異形管の直近とリンク中央の被害数が相対的に多くなっている傾向が認められる。

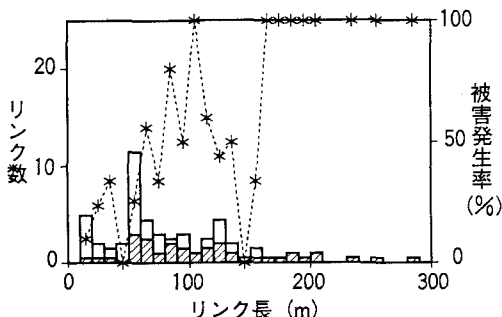


図3 新潟駅前地区配水管路網のリンク構成

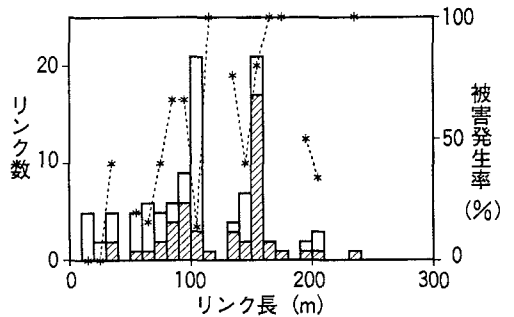


図4 マリーナ地区配水管路網のリンク構成

一方、マリーナ地区でも同様な傾向が認められるが、新潟駅前地区の場合よりも全般的に発生している。これは、マリーナ地区の方が全体的に長いリンクが多く、長さが150~160mのリンクに被害が集中しているため、被害発生位置の分布傾向が異なっているものと考えられる。

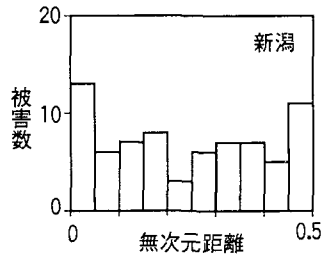


図5 リンク内の被害発生位置

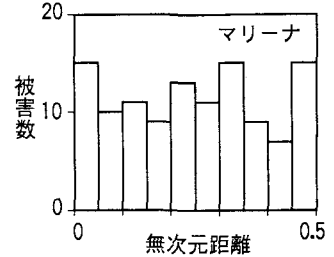


図6 リンク内の被害発生位置

また、1985年メキシコ地震によるメキシコ市内の配水管路についても、全被害の約2/3が異形管やバルブボックス、あるいはその近傍に発生していることが報告されている⁵⁾。

2.2 管路網を構成する基本モデルの定義

図1、図2に示すように、配水管路網は直管、曲管、T字分岐管、十字分岐管を接続して構成されている。したがって、本論文ではこの4種類の管路要素を基本として、管路網をモデル化する基本形状として、直線モデル、直角モデル、T字分岐モデル、十字分岐モデルの4つの基本モデルを定義する。これを図7に示す。

直線モデルは、直線管路の軸変形に着目したもので、無限長の直管、半無限長の直管、有限長(長さL)の直管の3タイプを考える。さらに、これらが直管のみで構成されるモデルと、直管のなかに異形管が入ったモデルを考える。すなわち後者では、無限長の直管にジョイント要素、半無限と有限長の直管の管端に境界ばねをつけたモデルを考える。直角モデルでは、直交する2本の半無限長の直管が90°エルボで接続されたモデルを考える。また、T字分岐モデルおよび十字分岐モデルでは、直角モデルと同様にT字分岐管、十字分岐管に半無限長の直管を接続したモデルを考える。

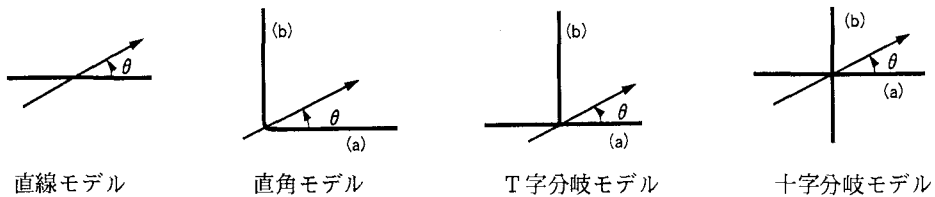


図7 管路網を構成する基本モデル

ここに、ジョイント要素は分岐モデルの分岐管部分をモデル化したもので、分岐管の軸剛性、曲げ剛性が直管とは異なっていることを考慮するための要素である。T字分岐モデルを例に、ジョイント要素の概念を図8に示す。

また、境界ばねは上述のように、半無限および有限長の直管の端部の境界条件をモデル化するためのばね要素である。すなわち、T字分岐モデルの分岐管の変形解析において、分岐管の管端に接続する分岐管自身の剛性を表すジョイント要素と、本管そのものが分岐管の変形を拘束する特性を表すばね要素を直列に配置したものと考えることができる。

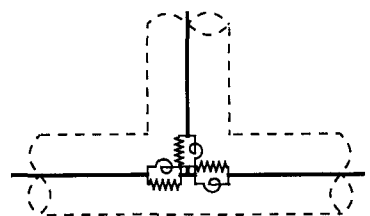


図8 ジョイント要素の概念図

3 基本モデルの変形解析

3.1 解析の前提条件

前述のように、被害を受けた管路網は、ねずみ鑄鉄管および石綿セメント管のように機械式継手で接続された関節式管路であるが、当時の継手は最近のものとは構造が異なり、比較的剛性が高く十分な変形性能を備えたものではない。したがって本論文では、継手部の変形特性を具体的にモデル化せず、管路は鋼管路と同様に連続式管路としてモデル化する。また、管路の被害は異形管そのものよりも異形管に近接する直管部分に比較的多く発生している傾向が認められるため、本論文では異形管本体の強度については言及しない。

管路網の全ての変形は線形領域にあるものとする。地盤の変位は線形分布とし、管路の基本モデルは地盤のひずみが一定と見なせる領域に埋設されているものと仮定する。この仮定は、管路の基本要素の代表寸法が地盤の変位分布を線形変化と見なせる長さよりも十分に小さい場合に有効である。配水管路網では、管路要素の代表寸法が一般的には数10~100 m程度であるため、本解析方法は地震波動の伝播によって発生する地盤ひずみを始めとして、側方流動による地盤ひずみに対する管路の変形特性も調べることができる⁷⁾。本文中で使用する記号の一覧を表1に示す。また、表1以外の記号については本文中に適宜示す。

表1 本文中の記号一覧および地盤ひずみの座標変換

D : 管外径	N : 軸力
R : 曲管(エルボ)の曲げ半径	M : 曲げモーメント
A : 管の断面積	η : $E A_j / E A$
I : 管の断面二次モーメント	ξ : $E I_j / E I$
E : 管の弾性定数	a : 本管を表すワックス
K_1 : $\pi k_t D$	b : 分岐管を表すワックス
K_2 : $k_n D$	e : 曲管(エルボ)を表すワックス
k_t : 管軸方向地盤ばね係数	j : ジョイント要素を表すワックス
k_n : 管軸直角方向地盤ばね係数	g : 地盤を表すワックス
α : $(K_1 / E A)^{1/2}$	X, Y : 地盤座標系
β : $(K_2 / 4 E I)^{1/4}$	x, y : 管路座標系
ε : ひずみ	θ_e : X軸とx軸の交角(入射角)

$\varepsilon_{sx} = \varepsilon_{sx} \cos^2 \theta_e + \varepsilon_{sy} \sin^2 \theta_e + 1/2 \gamma_{sxy} \sin 2\theta_e$	(1.1)
$\varepsilon_{sy} = \varepsilon_{sx} \sin^2 \theta_e + \varepsilon_{sy} \cos^2 \theta_e - 1/2 \gamma_{sxy} \sin 2\theta_e$	(1.2)
$\gamma_{sxy} = -(\varepsilon_{sx} - \varepsilon_{sy}) \sin 2\theta_e + \gamma_{sxy} \cos 2\theta_e$	(1.3)

3.2 直線モデルの解析

図9に示すように、管軸方向に地盤変位 $u_g(x)$ が発生している場合、管の微小要素に作用する力の釣合条件から(1)式が得られる。(1)式と(2)式を連立して管の変位 $u_p(x)$ に関する一般解を求め、さらに特殊解を求めると(3)式が一般解として得られる。したがって、管のひずみは(4)式で与えられる。

$$\frac{dN}{dx} dx + \pi D k_1 (u_g(x) - u_p(x)) dx = 0 \quad (1)$$

$$N = E A \varepsilon_p = E A du_p/dx \quad (2)$$

$$u_p(x) = A_a \exp(\alpha x) + B_a \exp(-\alpha x) + \varepsilon_{sx} x \quad (3)$$

$$\varepsilon_p(x) = A_a \alpha \exp(\alpha x) - B_a \alpha \exp(-\alpha x) + \varepsilon_{sx} \quad (4)$$

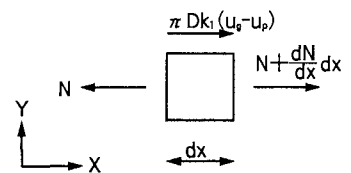


図9 直管の微小要素の力の釣合

ここに、 A_a, B_a は未定係数で、それぞれ解析モデルの境界条件によって決定される。

一様な地盤ひずみに対する直線モデルの解析解を表2に示す。無限長の直管については、管の軸ひずみが一定になることから(2.1)式が得られる。また、半無限長の直管は管端で管の軸ひずみが0となり、無限遠方で地盤ひずみと等しくなることから(2.2)式が得られる。そして、長さLの有限長の直管は座標原点を管中央に置くと、構造の対称性のために原点で管の変位が地盤の変位と等しくなることと、管端において管のひずみが0となることから(2.3)式が得られる。

また、管径に等しい長さのジョイント要素を一つ配置した無限長の直管モデル、および管端に管径の半分の長さの境界ばねをつけた半無限および有限長の直管モデルでは、境界ばねあるいはジョイント要素と直管の軸力の連続性を考慮して、(2.4)～(2.6)式が得られる。ここに、境界ばねおよびジョイント要素の軸剛性は、直管の軸剛性に η を乗じて ηEA で与えられる。

表2 一様な地盤ひずみに対する直線モデルのひずみの解

管 路 形 状	直 管	境界ばねまたはジョイント付き直管
① 無 限 直 管	ϵ_{sx} (2.1)	$\{1 - \frac{(1-\eta)\alpha}{\alpha+2\eta/D} \exp(-\alpha x)\} \epsilon_{sx}$ (2.4)
② 半無限直管	$\{1 - \exp(-\alpha x)\} \epsilon_{sx}$ (2.2)	$\{1 - \frac{(1-\eta)\alpha}{\alpha+2\eta/D} \exp(-\alpha x)\} \epsilon_{sx}$ (2.5)
③ 有 限 直 管	$\{1 - \frac{\cosh(\alpha x)}{\cosh(\alpha L/2)}\} \epsilon_{sx}$ (2.3)	$\{1 - \frac{(1-\eta)\alpha}{\alpha C_h + 2\eta/D * S_h} \cosh(\alpha x)\} \epsilon_{sx}$ (2.6)

$$C_h = \cosh(\alpha \delta), S_h = \sinh(\alpha \delta), \delta = 1/2(L-D)$$

3.3 直角モデルの解析

曲管両端の断面力を図10のように定義し、曲管部分の地盤ばね無視する。まず、 ϵ_{sx} によって直管(a)には軸変形と曲げ変形が発生する。軸変形は(4)式を解いて N_a の関数で求められる。また、 M_a による曲げ変形は、弾性支床上の梁の解で表される。すなわち、弾性支床上の梁の曲げ変形は(5)式で表され、その一般解は無限遠方で管の変位が0となることを考慮すると(6)式で与えられる。そして、管端の曲げモーメントが M_a であるため、曲げ変形は M_a の関数で表される。

$$EI \frac{d^4 y_p}{dx^4} = -k_2 D y_p \quad (5)$$

$$y_p = \exp(-\beta x) (A_b \cos(\beta x) + B_b \sin(\beta x)) \quad (6)$$

一方、直管(b)と曲管を連結した系も N_a と M_a によって変形する。直管(b)の変形は直管(a)と同様に Q_b ($=-N_a$)と M_b ($=M_a$)の関数で表される。曲管については曲げ変形のみを考慮すると、曲管の直管(a)側の端部におけるx軸方向変位と回転角は、何れも最終的には N_a と M_a の関数で表される。したがって、曲管端部の変位と直管(a)の変位の連続性から N_a と M_a が地盤ひずみ ϵ_{sx} の関数として求められる。

ϵ_{sy} に対する変形は、 ϵ_{sx} に関する解析結果を参考に、モデルの対称性を考慮して容易に導かれる。また、 γ_{sxy} による変形は曲管に一樣な曲げモーメント M_a が作用することを前提に、曲管の中央の回転角が γ_{sxy} の半分になるような M_a を求めることによって解が得られる。

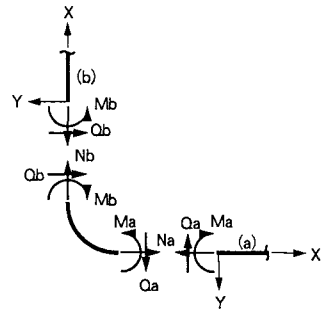


図10 直角モデルの解析

直角モデルの解析解を表3に示す。ただし、ここでは、曲管直近の直管に発生するひずみを示している。表中、直管 (a) の ε_{sx} によって発生するひずみの (3.1) 式、および直管 (b) の ε_{sy} によって発生するひずみの (3.6) 式は何れも軸ひずみを表している。この二つ以外のひずみは何れも曲げひずみである。

表3 一様地盤ひずみに対する直角モデルのひずみの解

	直管 (a)	直管 (b)
ε_{sx}	$\frac{-2I\beta^3C_3}{A\alpha C_4} \varepsilon_{sx} \exp(-\alpha x) + \{1 - \exp(-\alpha x)\} \varepsilon_{sx}$ (3.1)	—
	$\frac{D\beta^2C_2}{\alpha C_4} f(\beta x) \exp(-\beta x) \varepsilon_{sx}$ (3.2)	$\frac{D\beta^2(C_2 - R\beta C_3)}{\alpha C_4} f(\beta x) \exp(-\beta x) \varepsilon_{sx}$ (3.5)
ε_{sy}	—	$\frac{-2I\beta^3C_3}{A\alpha C_4} \exp(-\alpha x) \varepsilon_{sy} + \{1 - \exp(-\alpha x)\} \varepsilon_{sy}$ (3.6)
	$\frac{D\beta^2(C_2 - R\beta C_3)}{\alpha C_4} f(\beta x) \exp(-\beta x) \varepsilon_{sy}$ (3.3)	$\frac{D\beta^2C_2}{\alpha C_4} f(\beta x) \exp(-\beta x) \varepsilon_{sy}$ (3.7)
γ_{sxy}	$\frac{-D}{4/\beta + \pi R/\xi_e} f(\beta x) \exp(-\beta x) \gamma_{sxy}$ (3.4)	$\frac{-D}{4/\beta + \pi R/\xi_e} f(\beta x) \exp(-\beta x) \gamma_{sxy}$ (3.8)

ここに、 $f(\beta x) = \cos(\beta x) + \sin(\beta x)$ 、 $C_1 = 1 + \beta R + \frac{K_2/2\beta}{K_1/\alpha}$ 、 $C_2 = \left\{ \frac{1}{2} + \beta R + \frac{1}{\xi_e} \beta^2 R^2 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right\}$ 、
 $C_3 = 2 + \frac{1}{2\xi_e} \pi \beta R$ 、 $C_4 = C_2 - C_1 C_3$ である。

3.4 T字分岐モデルの解析

T字分岐モデルの解析解を表4に示す。 ε_{sx} によってT字分岐管の本管に発生する軸ひずみは、ジョイント要素付きの無限直管の解(2.4)式を参考に(4.1)式のように表される。 ε_{sy} によって分岐管に発生する軸ひずみは境界ばねを付けた半無限直管の解(2.5)式から(4.4)式のように表される。ただし、境界ばねの特性は分岐管のジョイント要素のばねと、分岐管の軸力によって発生する本管の変形量で表されるばねを直列に配置したものである。また、分岐管の軸力によって本管に発生する曲げひずみは、本管のジョイント要素の曲げ合成を ξEI で表して解析すると(4.2)式のように得られる。

さらに、 γ_{sxy} による曲げひずみは、分岐管の管軸を γ_{sxy} だけ強制回転させ、本管との回転変位の連続条件を考慮すると本管が(4.3)式、分岐管が(4.5)式のように求められる。

表4 一様地盤ひずみに対するT字分岐モデルのひずみの解

	本管	分岐管
ε_{sx}	$\left\{ 1 - \frac{(1-\eta_a)\alpha_a}{\alpha_a + 2\eta_a/D_a} \exp(-\alpha_a x) \right\} \varepsilon_{sx}$ (4.1)	—
ε_{sy}	$\frac{D_a/(2EI_a) * C_{Ma} \{ \xi_a \cos(\beta_a x) - (\xi_a + \beta_a D_a) \sin(\beta_a x) \} \exp(-\beta_a x)}{2EI_a(2C_a + C_b)}$ (4.2)	$\left\{ 1 - \frac{(1-\xi_{ab})\alpha_b}{\alpha_b + 2\xi_{ab}/D_b} \exp(-\alpha_b x) \right\} \varepsilon_{sy}$ (4.4)
γ_{sxy}	$\frac{-D_a C_a C_b}{2EI_a(2C_a + C_b)} \cos(\beta_a x) \exp(-\beta_a x) \gamma_{sxy}$ (4.3)	$\frac{D_b C_a C_b}{EI_b(2C_a + C_b)} \cos(\beta_b x) \exp(-\beta_b x) \gamma_{sxy}$ (4.5)

ここに、 $\xi_{ab} = \frac{D_b K_a K_b}{2EA_b(K_a + K_b)}$ 、 $K_a = \frac{K_{2a}(2\xi_a + \beta_a D_a)}{\beta_a(\xi_a + \beta_a D_a)}$ 、 $K_b = \frac{2EA_b}{D_b}$ 、 $C_a = \frac{K_{2a}}{2\beta_a^3(1 - \beta_a D_a/\xi_a)}$ 、
 $C_b = \frac{K_{2b}}{2\beta_b^3(1 - \beta_b D_b/\xi_b)}$ 、 $C_{Ma} = \frac{EA_b}{2\beta_a(2\xi_a + \beta_a D_a)} \left(1 - \frac{(1-\xi_{ab})\alpha_b}{\alpha_b + 2\xi_{ab}/D_b} \right)$ 。

3.5 十字分岐モデルの解析

十字分岐モデルの解析解を表5に示す。十字分岐モデルは、T字分岐モデルにさらにもう一本の分岐管を接続したものと考えることができる。したがって、分岐管の軸力によって本管には曲げ変形は発生せず、本管、分岐管ともに軸ひずみは(2.4)式のジョイント要素付きの無限直管の解でそれぞれ(5.1)式および(5.3)式のように表される。ただし、地盤のひずみはそれぞれ対応する成分 ε_{ax} 、 ε_{ay} となる。

また、 γ_{axy} による曲げ変形は、分岐管が2本あるものとして、T字分岐モデルの解で分岐管の曲げ剛性を2倍し、本管軸と分岐管軸の相対回転を γ_{axy} として、分岐部分で回転変位の連続性を考慮すると(5.2)式、(5.4)式の解が得られる。

表5 一様地盤ひずみに対する十字分岐モデルのひずみの解

	本 管	分 岐 管
ε_{ax}	$\left\{1 - \frac{(1-\eta_a)\alpha_a}{\alpha_a + 2\eta_a/D_a} \exp(-\alpha_a x)\right\} \varepsilon_{\text{ax}}$ (5.1)	-
ε_{ay}	-	$\left\{1 - \frac{(1-\eta_b)\alpha_b}{\alpha_b + 2\eta_b/D_b} \exp(-\alpha_b x)\right\} \varepsilon_{\text{ay}}$ (5.2)
γ_{axy}	$\frac{-D_a C_a C_b}{2EI_a(C_a + C_b)} \cos(\beta_a x) \exp(-\beta_a x) \gamma_{\text{axy}}$ (5.2)	$\frac{D_b C_a C_b}{2EI_b(C_a + C_b)} \cos(\beta_b x) \exp(-\beta_b x) \gamma_{\text{axy}}$ (5.4)

(表中の各定数は表4と同一。)

4 基本モデルの変形特性

4.1 数値計算の諸元

(1) ねずみ铸铁管 (CIP)

ねずみ铸铁は引張強度が1200~2400kgf/cm²、弾性係数が0.6~1.0*10⁶kgf/cm²である⁸⁾。継手は図11に示す印籠型で、受口と挿口の間にヤーン(唐麻)を詰め、ヤーンの後部に溶融鉛を流し込んでコーキングする構造となっている。印籠継手の変形性能は引張が1~2mmと小さく、曲げ変形も0.1°と小さい。このため、管の軸ひずみが0.02%程度に達すると管内の流体が漏洩する⁸⁾。

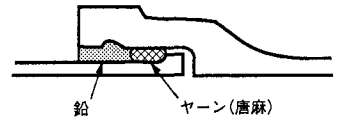


図11 ねずみ铸铁管の印籠型継手⁸⁾

数値計算では、材料の弾性係数を8*10⁵kgf/cm²、管内径を100mm、管厚7.5mmとする。

(2) 石綿セメント管 (ACP)

石綿セメント管の強度は経年劣化することが知られており、管体の曲げ強度 σ_b 、引張強度 σ_t 、圧縮強度 σ_c はそれぞれ次式のように与えられる⁹⁾。

$$\sigma_b = 0.43d - 1.93y + 133.7, \quad \sigma_t = 0.62d - 4.57y + 176.1, \quad \sigma_c = -9.75y + 617.2 \quad (7)$$

ここに、d;呼び径(mm)、y;使用年数(年)であり、各強度はkgf/cm²で表されている。したがって、呼び径100mmで、使用年数が20年を経過した管は $\sigma_b \doteq 138$ 、 $\sigma_t \doteq 147$ 、 $\sigma_c \doteq 422$ kgf/cm²となる。また、石綿セメント管の継手はねずみ铸铁管の印籠継手と同型式で、変形性能は極めて小さい⁹⁾。

数値計算では、材料の弾性係数を1*10⁵kgf/cm²、管内径を100mm、管厚10mmとする。

(3) 地盤のばね特性

地盤のばね特性は、ガス導管耐震設計指針¹⁰⁾を参考にして、管軸方向に $k_1=0.47\text{kgf/cm}^3$ 、管軸直角方向に $k_2=1.57\text{kgf/cm}^3$ とする。

4.2 基本モデルの変形特性

(1) 直線モデル

長さ L の有限長の直管および無限長の直管に、一軸の地盤ひずみ ϵ_{sx} を $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で θ_e （入射角）を変化させた計算結果を図12,13に示す。図12がCIP、図13がACPの結果で、縦軸は管の中央に発生する最大ひずみと地盤ひずみの比率（以降ひずみ比と言う）をとり、横軸は地盤ひずみの入射角を表している。また、有限長の直管の長さは10, 20, 30, 50, 100mとした。

θ_e の変化に対して、ひずみ比は $\theta_e=0^\circ$ で最大値を示し $\theta_e=-90^\circ \sim 90^\circ$ で0となるように変化している。CIPについて最大ひずみ比の変化を見ると、 $L=10\text{m}$ で0.10であったひずみ比は管路が長くなるとともに増加し、 $L=30\text{m}$ で0.53、 50m で0.80、 100m で0.98となり、無限長直管で1.0となり地盤ひずみと等しくなっている。同様に、最大ひずみ比の変化をACPについてみると、CIPよりも早く無限長直管のひずみ比に漸近しており、 $L=50\text{m}$ で0.99となっている。

(2) 直角モデル

曲げ半径が管径の1.5倍の曲管を対象とした直角モデルの解析結果を図14,15に示す。解析では、曲管の曲げ剛性を直管と同じ曲げ剛性となる $\xi=1$ の状態から、 $\xi=1/2, 1/3, 1/4$ と低減させてひずみ比の変化を調べた。地盤ひずみの入力方法および計算結果の図の表現は直線モデルと同様である。ただし、管のひずみは軸ひずみと曲げひずみの絶対値の和で求めている。

$\xi=1$ についてひずみ比の変化を見ると、CIPの場合、 $\theta_e=-5^\circ$ でひずみ比は最大値0.57を示し、 θ_e の増加および減少ともなって漸減しており、 $\theta_e=90^\circ$ および -90° では最大値のおよそ45%にまで減少している。また、ACPの $\xi=1$ について見ると、CIPとほぼ同様に変化しているが、最大ひずみ比は0.60とACPよりもやや大きくなっているのに対し、 $\theta_e=90^\circ$ および -90° では最大値のおよそ15%にまで減少している。したがって、 θ_e の変化に対しては、ACPの方が敏感であると言える。

また、 ξ をパラメータとしてひずみ比分布の変化をみると、CIPおよびACPともに ξ の低減にしたがって、ひずみ比の分布パターンは相似形を保ちながら全体的に減少している。しかし、 ξ の変化はひずみ比の減少率に比較的鈍感であると言える。

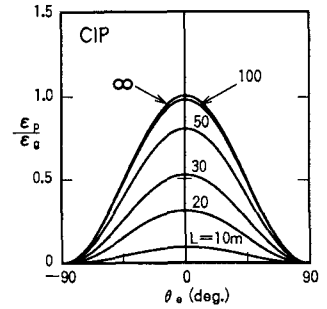


図12 直線モデルの最大ひずみ

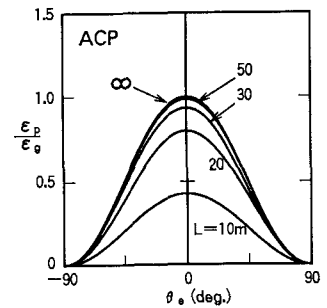


図13 直線モデルの最大ひずみ

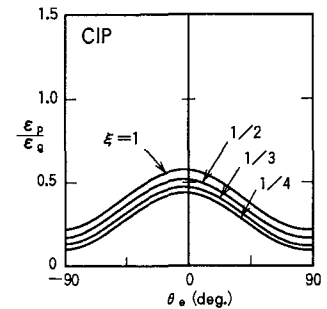


図14 直角モデルの最大ひずみ

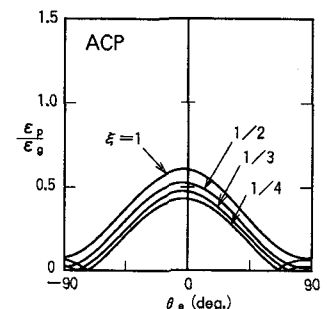


図15 直角モデルの最大ひずみ

(3) T字分岐モデル

T字分岐モデルの解析結果を図16～19に示す。図16がCIPの本管、図17がCIPの分岐管、図18がACPの本管、図19がACPの分岐管をそれぞれ表している。解析では、本管と分岐管を同形状とし、本管および分岐管部分のジョイント要素の軸剛性と曲げ剛性を $\eta, \xi=1$ から $1/2, 1/3, 1/4$ まで変化させてその影響を調べた。

$\eta, \xi=1$ のCIP本管のひずみ比を見ると、 θ_e に対して余り大きく変化せず、 $1.00 \sim 1.12$ の範囲を変動している。また、 η, ξ の低減に関してもひずみ比は余り変化せず、 $\eta, \xi=1/4$ の場合でもひずみ比は $0.95 \sim 1.02$ の範囲を変動している。さらに、CIPの分岐管のひずみ比は本管の値と比較して小さく、最大でも約 0.3 である。また、 η, ξ の影響も小さくなっている。

ACPの計算結果をみると、 $\eta, \xi=1$ のひずみ比分布はCIPと類似しているが、 η, ξ の低減にしたがってCIPよりも大きな範囲で変化し、 $-60^\circ < \theta_e < 0^\circ$ の範囲で複雑な変化を示している。また、分岐管のひずみ比は η, ξ の低減によって大きく変動し、 $\eta, \xi=1/4$ の場合に最大 0.65 まで増加している。

T字分岐モデルにとって最も特徴的な傾向は、CIP、ACPともに、本管には地盤ひずみの入射方向とはほぼ独立に地盤ひずみと同程度のひずみが発生していることである。

(4) 十字分岐モデル

十字分岐モデルの解析結果を図20, 21に示す。解析では、T字分岐モデルと同様に、本管と分岐管を同形状とし、本管および分岐管部分のジョイント要素の軸剛性と曲げ剛性を $\eta, \xi=1$ から $1/2, 1/3, 1/4$ まで変化させてひずみ比分布の変化を調べた。したがってここでは、本管の計算結果のみを示す。

$\eta, \xi=1$ におけるCIPのひずみ比分布は無限直管の計算結果と類似しているが、分岐部分に曲げモーメントによる小さな曲げひずみが発生しているため、全体的に少し大きくなっている。しかし、CIPのひずみ比の変化は η, ξ の変化に極めて鈍感で、少なくとも図18の計算結果では一本の曲線に重なっているように見える。

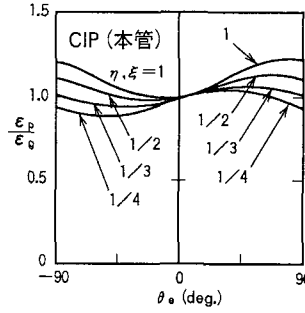


図16 T字分岐モデルの最大ひずみ

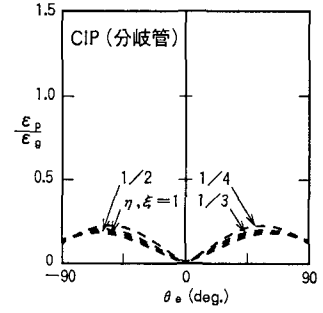


図17 T字分岐モデルの最大ひずみ

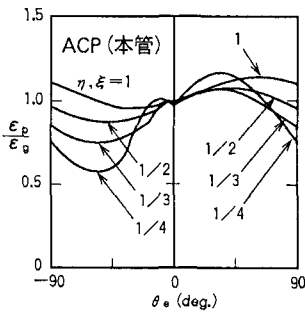


図18 T字分岐モデルの最大ひずみ

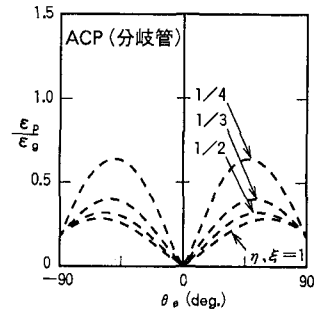


図19 T字分岐モデルの最大ひずみ

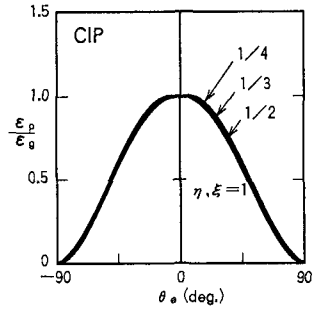


図20 十字分岐モデルの最大ひずみ

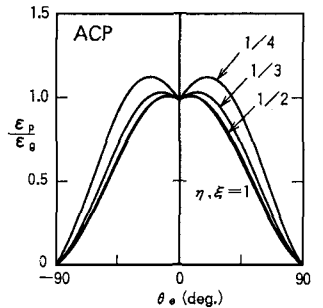


図21 十字分岐モデルの最大ひずみ

ACPの $\eta, \xi=1$ の結果はCIPよりもやや外側に膨らみ、曲げひずみの影響が明確に認められる。また、 η, ξ の低減の影響についても、1/3, 1/4と変化するに従ってはっきりと影響が認められる。

5 結 言

1964年新潟地震および1989年ロマ・ブリエタ地震によって発生した配水管路網地震被害を分析し、被害が異形管の直近に発生していることや、管路が長いほど被害の発生率が高いことを示した。そして、このような被害特性を管路網の幾何学的な形状から説明するため、パターン化した4種類の基本管路モデル要素の1様な地盤ひずみに対する変形を表す解析解を求めた。さらに、被害発生当時の管路の力学的特性を変形特性を考慮して、管路に発生するひずみの計算例を示した。その結果を要約すると以下ようになる。

- ① 有限長の直管の最大ひずみは、管が長くなるに従って増加し、CIPでは約100m、ACPでは約50mで無限長の管路のひずみとほぼ等しくなる。
- ② 直角モデルでは、曲管に隣接する直管にひずみが集中するが、最大でも地盤ひずみの半分程度である。
- ③ T字分岐モデルの本管には、地盤ひずみがどの方向から入射しても、地盤ひずみと同程度のひずみが発生する。この傾向はT字分岐管モデルに特有で、管に発生するひずみは他の解析モデルよりも大きい。
- ④ 十字管モデルの本管と直管のひずみは、無限直管のひずみと類似している。しかし、十字管の場合、管のひずみが最大となるような入射方向が本管軸と分岐管軸の2方向であることから、大きなひずみが発生する確率は直管よりは高く、T字分岐管に次いでおおきなひずみが集中することになる。

なお本研究は、日米共同研究「地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究」(事務局：(財)地震予知総合研究振興会)の一環として行ったものである。末筆ながらここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浜田政則, 安田 進, 磯山龍二, 恵本克利: '液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究', 土木学会論文集III, No. 376, pp. 221-229, 1986.
- 2) O'Rourke, T. D., Stewart, H. E., Blackburn, F. T. and Dickerman, T. S.: "Geotechnical and Lifeline Aspects of The October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake in San Francisco," Tech. Rep. NCEER-90-0001, 1990 January.
- 3) (財)地震予知総合研究振興会: 「1989年ロマ・ブリエタ地震被害調査報告書」, 236p., 平成2年4月.
- 4) 鈴木信久, 大保直人: '1964年新潟地震による水道管路の被害と地盤の永久変位', 第8回日本地震工学会シンポジウム, 平成2年12月.
- 5) Ayala, G. and O'Rourke, M. J.: "Effects of the 1985 Michoacan Earthquake on Water Systems and Other Buried Lifelines in Mexico," National Center for Earthquake Engineering Research Report, NCEER-89-0009, 1989.
- 6) O'Rourke, M. J. and Bouabid, J.: "Seismic Wave Propagation Behavior of Elbows in Buried Segmented Pipelines," ASME-PVP-Vol. 162, pp. 243-248, 1989 July.
- 7) 鈴木信久, 中根宏行: '埋設パイプラインの耐震性評価における地盤の永久変位分布のモデル化', 土木学会, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1365-1376, 1990年3月.
- 8) 日本ダクタイル鉄管協会: 「地震と管路について」, 日本ダクタイル鉄管協会技術資料, JDDA-T-05, 81p.
- 9) 厚生省生活衛生局水道環境部監修: 「水道用石綿セメント管診断マニュアル」, (財)水道管路技術センター, 213p., 平成元年10月.
- 10) (社)日本ガス協会: 「ガス導管耐震設計指針」, 1982年3月.

(1990年10月12日受付)