

(株) 竹中土木 正員 西信一郎
早稲田大学 大学院 学生員 小泉 淳
早稲田大学 理工学部 正員 村上博智

1. まえがき 上水道用埋設管はその曲がり部分において水圧による不平衡力が外向きに作用する。そのため従来より一般的に用いられている鑄鉄管路では、曲がり部をコンクリートで防護し、管の移動による継手部の離脱や漏水を防いでいる。これに対して上水道用埋設管として鋼管を用いれば、その材質的寸長や地盤との相互作用を考慮に入れることによって、継手部の問題が解決されコンクリートによる防護も不要となる可能性がある。この報告は以上の考えに基づき埋設管を棒構造およびシェル構造にモデル化して数値実験を行い、その結果から鋼管を上水道用埋設管として使用することの可否を検討したものである。

2. 埋設鋼管モデルの引抜き試験 埋設管と地山との摩擦を定性的かつ定量的に把握する目的で、鋼管モデルを砂箱中に埋設した上で引抜き試験を行い、管軸方向の摩擦カ分布を調べた。(図1) その結果は図2に示す通りで、横軸には砂箱の入口からの距離を、縦軸には各円筒部分において生じる平均的な軸向抵抗力 N と作用荷重 P との比 N/P をとって整理してある。これによると入口からわずか15cm(≒1.5D)のオー円筒では、 $N/P \approx 0.5$ であるので作用荷重の半分が砂の摩擦抵抗で分理されていることを示している。このことは、綿の固めを行った乾燥砂とこの円筒との摩擦抵抗が予想以上に大きく、載荷直に一層高い円筒をさすべりを起していないことを示している。そこでこのような荷重段階では、円筒の移動量 δ と生じる摩擦力 F はほぼ比例関係にあると仮定することができる。 $(F = k_u \delta)$ 図2に示す曲線はこのような考えで図3のモデルの k_u を変化させて得られたものである。図2の実験値と計算値を比較して見ると、 $k_u = 10 \sim 14 \text{ kg/cm}^2$ がよく合うようである。この結果実際の埋設管を考えた場合も管と砂との摩擦が切れて管が大きく変位するより以前に、少なくとも $k_u = 10 \sim 14 \text{ kg/cm}^2$ と評価されるせん断抵抗が働くことがわかる。

3. 埋設鋼管 および周辺地山のモデル 埋設鋼管の曲がり部の曲率半径 R が鋼管の径 D に比べて大きく、又鋼管の長さ L が D に比べて充分長い場合には、これを梁部材に置換して解析を行うことはさほど問題がないと考えられる。そこでこの埋設鋼管を図4に示すような弾性床土の深にモデル化した。

しかしながら曲がり部の曲率半径 R が鋼管の外径に等しい場合には、これを梁部材に評価することは若干問題がありそうなので、比較のためのこのようなケースについては図5に示すようなシェル構造にモデル化して解析を行った。この場合も図4地山は弾性バネとして評価し、三角形要素の各節点に取り入れた。計算に用いた条件は、内圧 $P = 15 \text{ kg/cm}^2$ 、地盤反力係数 $k_v = 0, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 \text{ kg/cm}^2$ 、接線方向のバネ定数 $k_u = 10, 12, 14 \text{ kg/cm}^2$ 、鋼管の呼び径: 500A, 1500A, 曲がり部中心角 $2\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 、曲がり部曲率半径 $R = D, 2D, 3D, 4D, 5D$ 、直線部分の長さ $L = 10 \text{ m}$ (予備的な数値実験による)。

4. 数値実験結果 計算結果のうちのいくつかの例を図6, 7に示す。図6は棒構造モデルの場合の曲げモーメント図および鉛直方向変位図である。図7はシェル構造モデルで計算した曲り部中央断面の変位図であ

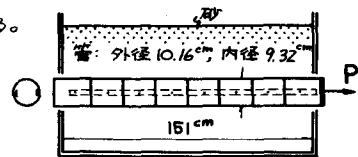


図1 鋼管引抜き試験

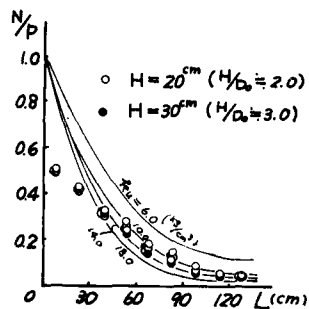


図2 引抜き試験結果

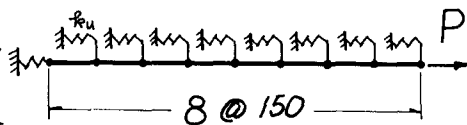


図3 引抜き試験解析モデル

る。一方表1は各ケース毎の曲り部中央断面に生ずる最大垂直応力度を示したものであり、断面変形を考慮した曲り部に対する Kármán の次式などから求めた。

$$\sigma = k_1 \cdot \frac{MD}{2I} + \frac{N}{A}, \quad k_1 = \frac{2}{3k_2\sqrt{\beta}}, \quad k_2 = 1 - \frac{9}{10+12\lambda^2}$$

$$\beta = \frac{6}{5+6\lambda^2}, \quad \lambda = \frac{4tR}{D^2}$$

ここに M , N は曲げモーメントおよび軸力, I , A は断面二次モーメントおよび断面積, D は管径, t は管厚, R は曲り部曲率半径である。図8はこの Kármán の一次近似式によって求めた応力と地盤反力係数 k_v の関係の一例を示したものである。

5. 系 論 鋼管の径と曲り部曲率半径が等しい場合にはこれを棒構造モデルで解析を行い、Kármán の式を用いて応力を算出する

ことには疑問があるが、鋼管内は圧力をもった水で満たされていることを考えると、断面は扁平化しにくく(図7の中央断面変形図を参照されたい)、シェル構造モデルで解析した場合の最大主応力も 1000 kg/cm^2 程度であることから、上水道用埋設管として鋼管を用いることはほぼ可能と考えられる。しかしながらこのようなケースではシェル構造で解析を行うなどして安全を確認するか(曲り部の管厚を増す場合も含めて)、又は従来の工法どうりコンクリート防護工を行うのが妥当と思われる。一方鋼管の径 D と曲り部の曲率半径 R との関係が $R \geq 2D$ となれば、一部の例外を除いては応力は 1000 kg/cm^2 程度が、それ以下であり、鋼管を上水道用管径に用いることによって、コンクリート防護工を省略しても安全であると結論される。この場合には、棒構造モデルとして解析を行い、管の扁平化を考慮した Kármán の一次近似式で応力の Check をすればよいと考えられる。

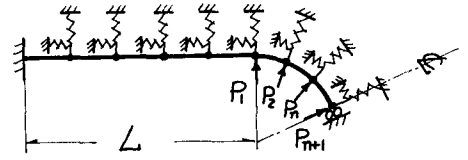


図4 棒構造モデル

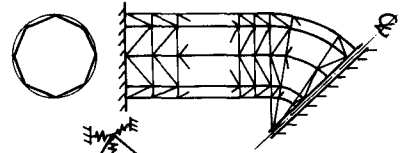


図5 シェル構造モデル

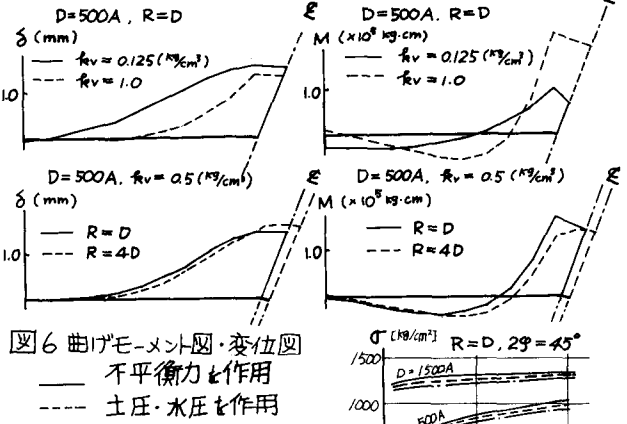


図6 曲げモーメント図・変位図
—— 不平衡力と作用
---- 土圧・水圧と作用

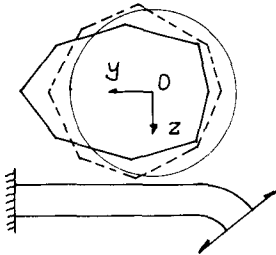


図7 曲がり部中央断面変形図

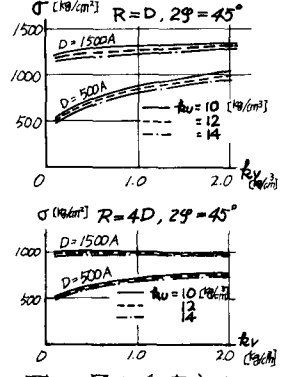


図8 最大垂直応力

表 1 最大垂直応力

		$R = D$									$R = 2D$									$R = 4D$								
		k_v			k_v			k_v			k_v			k_v			k_v			k_v			k_v			k_v		
		1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM	1次	3次	FEM
500A	β																											
	45°	10	532	1195	865	745	2060	750	1048	3339	930	554	831	742	1256	988	1834	574	617	648	833	787	1076					
	14		493	1042		682	1811		963	2992		519	393	687	1134	917	1673	489	575	609	771	742	1002					
	90°	10	368	546		478	979		674	1762		389	466	487	680	642	1030	343	344	413	457	497	598					
1500A	14		350	478		448	859		622	1556		371	426	458	617	599	933	323	312	389	417	489	551					
	10	1234	4530		1271	4797		1361	5483		1167	2522	1194	2639	1243	2901	1005	1416	1006	1442	976	1453						
	14	1158	4137		1196	4401		1291	5101		1101	2331	1130	2450	1187	2729	957	1330	962	1361	945	1391						
	90°	10	789	2171		823	2400		951	3116		723	1222	759	1339	851	1653	577	668	596	708	612	775					
	14	747	1977		784	2188		902	2353		688	1116	721	1225	811	1528	541	599	562	645	586	723						

応力の単位 $[\text{kg/cm}^2]$
バネ定数の単位 $[\text{kg/cm}^3]$

1次 : Kármán の1次近似式による
3次 : Kármán の3次近似式による
F.E.M. : 有限要素法による解