

埋設管路の座屈破壊に対する耐震安全性照査法

東京都市大学 学生会員 和田 脩平
 東京都市大学 正会員 小池 武

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震で小口径埋設鋼管の直線管路で座屈破壊が発生した。並行に埋設された管路のうち、100mm 管路で座屈破壊が発生¹⁾し、200mm 管路では発生しなかった。そこで、本研究では両者の破壊モードの違いが発生した原因について検討した。

2. 埋設管の座屈解析

2.1 座屈強度

弾性支承上の梁に軸方向圧縮力が作用した場合の埋設管の座屈強度 P_{cr} は次式で算定²⁾できる。

$$P_{cr} = \left(\frac{\pi \cdot n}{l}\right)^2 \cdot EI + \frac{K_v}{\left(\frac{\pi \cdot n}{l}\right)^2} \quad (1)$$

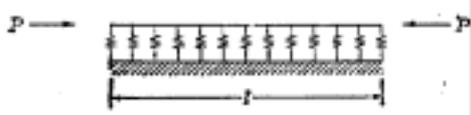


図1.弾性支承上の梁

ここで、 EI は断面曲げ剛性、 l は導管長、 K_v は軸直角方向の地盤ばね定数である。また、 n は l 区間内座屈波長の数を表す。最小の P_{cr} を与える n の値は以下のように求める。 n の極小値付近では K_v に変化がないとして次式が得られる。

$$n^2 + \frac{K_v l^4}{n^2 \pi^4 EI} = (n+1)^2 + \frac{K_v l^4}{(n+1)^2 \pi^4 EI} \quad (2)$$

これを变形すると、次の式が得られる。

$$\frac{K_v l^4}{\pi^4 EI} = n^2 (n+1)^2 \cong n^4 \quad (3)$$

式(3)を变形すると、軸直角方向地盤ばね定数を算定できる。

$$K_v = EI \cdot \left(\frac{\pi}{l/n}\right)^4 \quad (4)$$

2007年新潟県中越沖地震の被害事例では、100mm 管路の座屈長 l/n が 2.5m 前後であったことから、図2と仮定する。

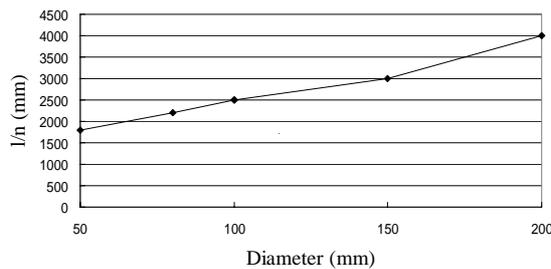


図2.座屈長さ

図2と式(4)から得られる K_v は日本ガス協会耐震設計指針³⁾のバネ定数の約半分の大きさとなった。

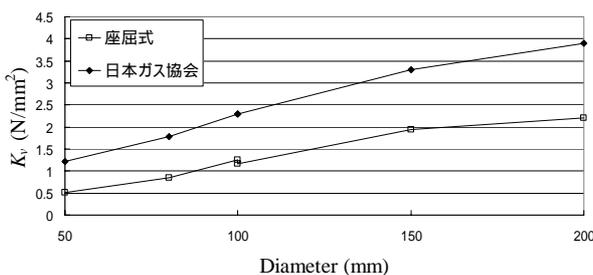


図3.軸直角方向地盤ばね定数

次に、式(1)と(4)から座屈強度が次式で得られる。

$$P_{cr} = 2EI \cdot \left(\frac{\pi}{l/n}\right)^2 \quad (5)$$

2.2 座屈限界ひずみの簡略推定

管体が弾性的であれば、座屈限界応力 σ_{cr} 、座屈限界ひずみ ϵ_{cr} はそれぞれ次式が得られる。

$$\sigma_{cr} = \frac{2EI}{A} \cdot \left(\frac{\pi}{l/n}\right)^2, \quad \epsilon_{cr} = \frac{2I}{A} \cdot \left(\frac{\pi}{l/n}\right)^2 \quad (6)$$

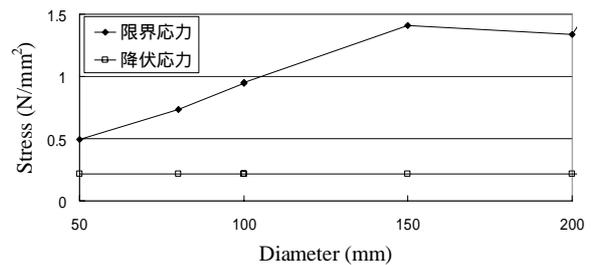


図4.限界応力図

しかし、図4に示すように座屈限界応力は、常に降伏応力を上回っており、塑性状態にある。そこで、座屈限界ひずみを推定するために図5の簡易モデルを導入する。塑性域の限界ひずみが少なくとも降伏ひずみ ϵ_y のA点より右側にあり、弾性条件での限界ひずみ ϵ_{cr} であるB点より左側にあると想定される。その間のC点を修正限界ひずみ ϵ_{cr}^* と設定する。 $AC : CB = n : m$ とすると修正座屈限界ひずみは次式より求められる。

$$\epsilon_{cr}^* = \frac{m\epsilon_y + n\epsilon_{cr}}{n+m} \quad (7)$$

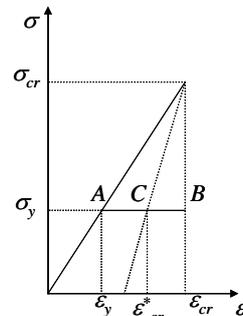


図5.座屈限界ひずみ

次に、上記の方法より、 $\{(n,m)=(1,1),(1,0),(0,1)\}$ について口径別に算定した修正座屈限界ひずみのグラフを、図6に示す。

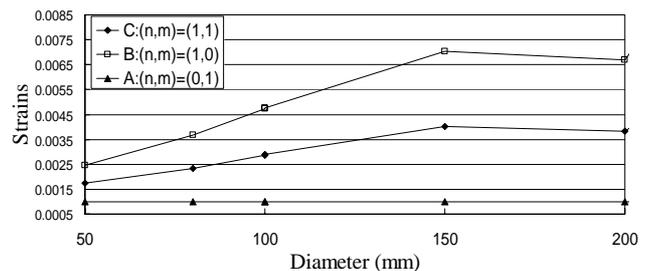


図6.A,B,C点における修正座屈限界ひずみ

キーワード：座屈強度，修正限界ひずみ，直管軸方向ひずみ

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学工学部都市基盤工学専攻 TEL:03-5707-0104

2.2 直管軸方向ひずみ

直管の地震時軸方向ひずみは、日本ガス協会耐震設計指針³⁾より、以下のように求められる。

(1)弾性域の場合($\alpha_0 \cdot \varepsilon_G < \varepsilon_y$)

$$\varepsilon_p = \alpha_0 \cdot \varepsilon_G \tag{8}$$

(2)塑性域の場合($\alpha_0 \cdot \varepsilon_G > \varepsilon_y$)

$$\varepsilon_p = \varepsilon_G \tag{9}$$

ここで、 ε_G は表層地盤ひずみ、 α_0 はひずみ伝達係数である。それぞれ以下の式より得られる。

$$\varepsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \tag{10}$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + (2\pi / \lambda L)^2} \tag{11}$$

ただし、 U_h 、 L はそれぞれ、表層地盤変位、パラメーター、地震波の見かけの波長である。軸方向の地盤ばね定数 K_l は以下の式から求められる。

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v(T_G) \cdot T_G \tag{12}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_l}{EA}}, \quad K_l = \pi D k_l \tag{13}$$

L と S_v は、それぞれの表層地盤の固有周期 (T_G) に対応する図7と図8の応答速度と伝播速度から求められる。

$$L = V \cdot T_G \tag{14}$$

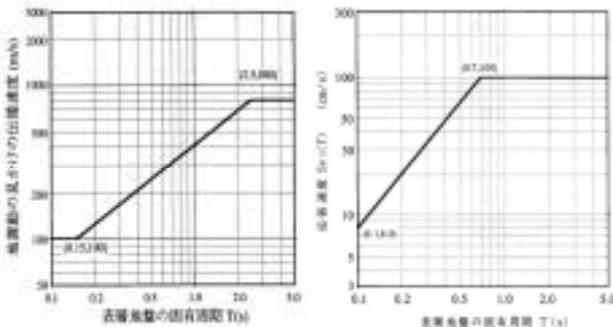


図7.地震波の見かけの伝播速度 図8.速度応答スペクトル

3. 解析結果と考察

3.1 数値解析条件

対象とする100mm管路と200mm管路のそれぞれの材料特性及び、諸特性を表1に示す。

表1. 材料特性及び地盤特性

データ	記号	単位	100mm 管路	200mm 管路
直径	D	mm	114.3	216.3
板厚	t	mm	4.9	8.2
内径	d	mm	104.5	199.9
断面積	A	mm ²	1684.1	5360.9
弾性係数	E	kN/mm ²	200	200
断面2次モーメント	I	mm ⁴	2524517	29064562
固有周期	T_G	sec	2.1	2.1
降伏応力	σ_y	KN/mm ²	0.215	0.245
降伏ひずみ	ε_y	/	0.001	0.001
地盤ばね定数(軸方向)	k_l	N/mm ³	0.006	0.006

一般の直線管路は、両端に曲管部を持つことが多く、図9のように、直線区間長 W より地震波のみかけの半波長 $L/2$ が長い場合の地盤ひずみは以下の式より得られる。

$$\varepsilon_A = \alpha_0 \cdot \varepsilon_G \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{W}{L}\right) \tag{15}$$

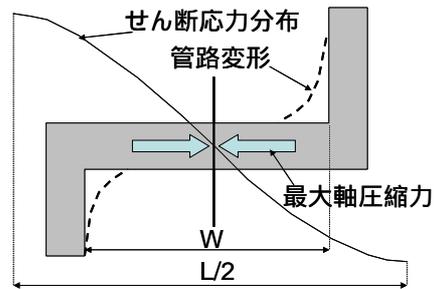


図9.地震時せん断応力分布

座屈破壊が発生した直線区間長は約650mであった。また、式(14)より算定した半波長が700mであり、直線区間長とほぼ等しく、なおかつ直線区間長が若干短いことから、中間点で最大軸圧縮力が作用し座屈破壊が発生したと考えられる。

3.2 解析事例と考察

100mm 管路と200mm 管路について、地盤固有周期 T_G に対するそれぞれの地盤ひずみ、直管ひずみ、管路の修正座屈限界ひずみを算定した結果を図10、図11に示す。

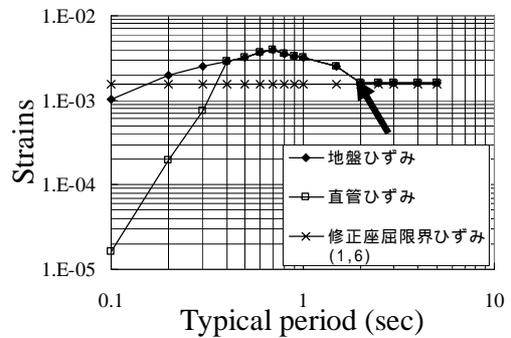


図10. 管径100mm

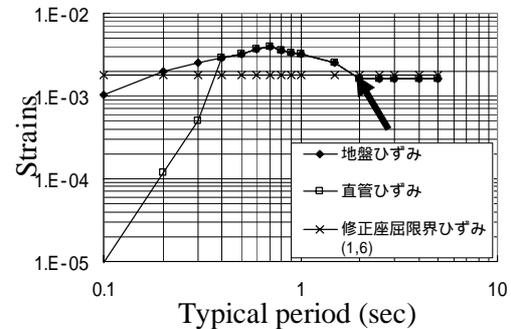


図11. 管径200mm

対象とする被害が生じた地域の表層地盤の固有周期はほぼ2秒ほどであり、 $(n,m)=(1,6)$ の場合の修正座屈限界ひずみを図中に描くと、100mm 管路で座屈被害が発生し、200mm 管路では発生しない結果となり、今回の被害事例を説明することができる。

4. まとめ

小口径埋設管の座屈破壊に対する地震時安全性の照査をする簡易式を提案した。同式は、新潟県中越沖地震で発生した100mm 管路と200mm 管路の破壊モードの違いを説明できた。

参考文献

- 1) 経済産業省原子力保安院：<http://www.nisa.meti.go.jp/>
- 2) 土木学会：構造力学公式集 P115 ~ 116
- 3) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針 P25 ~ 41