

大深度地下水道の浸透水圧 による座屈挙動に関する基礎研究

The basic study on buckling of water pipe
subject to pressure of seepage water in deep underground

王劍宏¹・渡辺淳²・小泉淳³

Jianhong Wang, Atsushi Watanabe and Atsushi Koizumi

¹学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

As well known, after the infrastructure construction during the past years, it is very difficult to keep enough space to construct new infrastructure in shallow underground. The new water pipelines have to be built in deep underground. To make water pipelines construction more economy and rationalization, the separate-typed segment structure scheme was proposed and studied, which can be simultaneously build outer tunnel and inner pipe, but will leave little gap between the outer RC segment and the inner pipe. In case that great underground water pressure directly acts to pipeline, the pipeline is easily destroyed due to buckling. In this paper, we will study the buckling of water pipeline subjected to the great underground water pressure, and the design method of pipeline bucking built by separate-typed segment structure.

Key Words : separate-typed segment structure, elastic buckling, Timoshenko theory, geometric conditions

1. はじめに

近年の地下部の開発による建設ラッシュを経て、現在の都市の地下の浅い部分は既に混雑した状態になっている。そのため、これからの新しいインフラの建設は地下 40 メートル以下の大深度地下で行われるものと考えられる。しかし大深度地下では高水圧が存在するために、浸透水圧が構造物に大きな影響をあたえる。

一般に、水道などの施設をシールド工法で布設する場合、図-1 に示すような挿入管方式により建設される。挿入管方式とは、1 次覆工としてシールドトンネルを構築した後に、鋼管あるいは铸铁管をシールド内に挿入し、1 次覆工と水道管との間隙をコンクリートなどにより充填して仕上げる工法である。この工法では、水道管として本来求められる断面よ

り大きな断面のシールドトンネルを構築することになる。

一方、最近、財団法人水道技術研究センターらにより、分離型セグメント方式が研究されている。分離型セグメント方式の標準断面は図-2、図-3 に示す。この工法は、シールド断面を限りなく水道管として機能する必要断面に近づける工法であるため、挿入管方式に対して工期短縮、掘削径縮小が可能となる。¹⁾

この工法では、セグメントと鋼板の荷重をそれぞれ相互に作用しない独立した構造にするためと、メンテナンスを減らすために、鋼管とセグメントの間を充填することなく空隙とした。もし、地下水浸透事故が起こった場合、空隙があることにより、高水圧が直接鋼管に作用することになる。鋼管が水で満たされている時は引張力が発生し、鋼管の座屈は起こりにくい。鋼管空虚時は、鋼管は薄肉シェル円

筒構造であるため、座屈が起こり、座屈変形もしくは水道管の破壊により水道の機能が停止することが懸念されている。

そこで、本研究は座屈の防止に着目し、大深度地下での補剛材のない場合の鋼管の等水圧による座屈挙動を研究し、現有の Timoshenko 座屈計算式に波数

の計算式を補充し、鋼管の座屈設計方法を確立するものである。

2. 座屈理論式およびFEM解析

分離型セグメント方式のセグメントと鋼管の間に空隙があるため、鋼管の外圧による座屈の研究には、自由管として研究するのが妥当であると考えられる。一方、座屈については、材料の降伏前に起こった座屈が弾性座屈、降伏以後に起こった座屈が弾塑性座屈と定義されている。現在水道に使用されている鋼管は薄肉構造であり、等分布圧による座屈は弾性座屈の場合が多いと考えられる。従って、本研究は Timoshenko の円筒弾性座屈理論²⁾を用いることにする。しかし、円筒弾性座屈理論では座屈荷重の計算式のみを与え、座屈荷重の算定に必要とする座屈波数の計算式がないので、Timoshenko 座屈式を使いにくい現状である。そこで、本研究は座屈波数の理論式を導き、完全に理論計算できるようにする。

FEM 解析手法は、線形構造物で固有値解析による線形座屈解析、増分剛性マトリックスに基づく非線形固有値解析による非線形座屈解析、および複合非線形を考慮できる経路追跡により座屈荷重を求める弧長増分法が挙げられる。本研究では FEM 線形座屈解析および非線形座屈解析の解析手法を用いて座屈解析を行う。

さらに、座屈発生時の荷重である座屈荷重および座屈時の円周方向の波数である座屈波数の理論値と解析値の比較を通して、座屈解析手法および理論式について検討する。

(1) Timoshenko の理論式および座屈波数の導出

本研究では大深度地下に建設された水道管を想定しているため、地下水圧が高く、鋼管の径による地下水圧の変化を無視できると考え、等分布圧とする。等分布外圧による鋼管の座屈において、Timoshenko らは、図-4に示すような円筒モデルに対して、図-5に示すような等分布外圧を荷重として、中央面の曲げを考慮し、シェルの釣り合い方程式を導いた。変位 u , v , w を導入によって、釣り合いの変位表現式を導いた。座屈が起こる時に境界条件を満たし、かつ釣り合い式を解ける変位導関数を用い、座屈荷重を求める Timoshenko 式を導いた。Timoshenko 座屈理論式は式(1)に示す。本研究では実際の鋼管座屈変形の波形を考えると式(2)が得られ、さらに座屈波数と長径比の関係を考えると、式(3)に示すような関係式が得られる。これを用いて式(1)を簡略し座屈荷重が最小値を

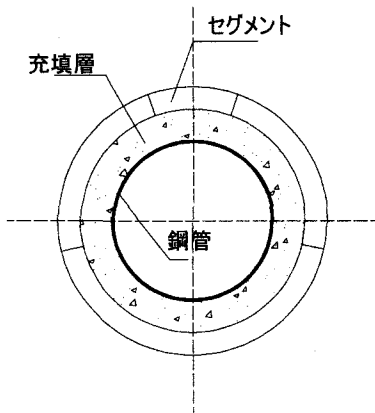


図-1 挿入管方式の管路断面

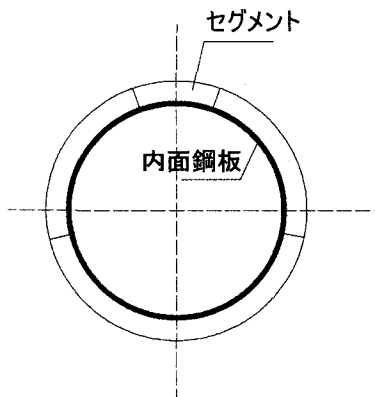


図-2 分離型セグメントの管路断面

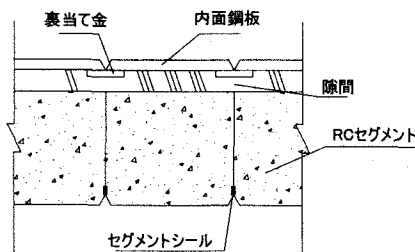


図-3 分離型セグメントの断面

得る条件である $\frac{\partial P_{cr}}{\partial n} = 0$ より、座屈荷重が最小値なる時の座屈波数が得られる。座屈波数の計算式は式(1)のようになる。

$$\frac{P_{cr}(1-\mu^2)R}{Et} = \frac{(1-\mu^2)}{(n^2-1)\left(1+\frac{n^2 l^2}{\pi^2 R^2}\right)^2} + \frac{t^2}{12R^2} \left\{ (n^2-1) + \frac{2n^2-1-\mu}{1+\frac{n^2 l^2}{\pi^2 R^2}} \right\} \quad (1)$$

ここに、 P_{cr} : 座屈荷重 (kN/m²)

R : 円筒半径 (m)

t : 円筒の厚さ (m)

μ : ポアソン比

n : 座屈時の円周方向の波数

l : 円筒の長さ (m)

$$n \geq 2 \quad (2)$$

$$\frac{n^2 l^2}{\pi^2 R^2} \gg 1 \quad (3)$$

$$n = \sqrt[3]{\frac{3\alpha^t}{K}} \quad (4)$$

$$\text{ここに、} K = \frac{t^2}{12(1-\mu^2)R^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\pi R}{l} \quad (6)$$

ここで、円筒は軸対称構造であるため、波数は必ず整数であり、式(4)により算定した n 値は小数第一位を四捨五入し整数として求める。従って、座屈設計する時、座屈荷重は式(1)と式(4)で計算ができると考えられる。

(2) FEMによる座屈解析手法³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

a) 線形座屈解析

線形座屈解析は荷重による構造物全体の接線剛性マトリックスに基づいて、式(7)のような固有値問題の方程式に変形し、構造物の固有値を求める解析手法である。

$$[K + \lambda K_G(P_0)]\phi_i = 0 \quad (7)$$

ここに、 K : 構造の剛性マトリックス

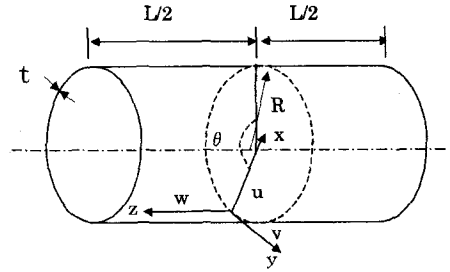


図-4 円筒モデル
外圧P

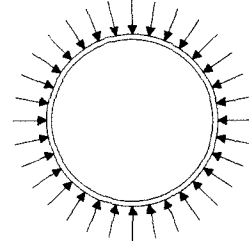


図-5 荷重図

K_G : 幾何剛性マトリックス

λ : 座屈荷重係数

P_0 : 初期荷重

ϕ_i : i 次座屈モードの変位ベクトル

そして、座屈荷重は次の式(8)で算定される。

$$P_{cr} = \lambda \times P_0 \quad (8)$$

ここに、 P_{cr} : 座屈荷重

b) 非線形座屈解析

非線形座屈解析は線形座屈解析と同じように構造物全体の接線剛性マトリックスに基づいて行われているが、接線剛性マトリックスが増分法によって求められる。そのため、幾何学非線形を考慮できる。その固有値方程式は次ようになる。

$$[K + \lambda \Delta K_G(\Delta u, u, \Delta \sigma)]\phi_i = 0 \quad (9)$$

ここに、 K : 構造の剛性マトリックス

ΔK_G : 幾何剛性マトリックス

λ : 座屈荷重係数

ϕ_i : i 次座屈モードの変位ベクトル

ここで、 ΔK_G は座屈を生じるまで荷重増分 ΔP の線形関数と仮定する。座屈荷重計算で使用される

幾何剛性マトリックス ΔK_G は、直前の増分開始時における応力および変位状態の変化によって決まる。ただし、座屈解析の過程で、応力や変位状態が更新されることはない。従って、座屈荷重は次の式(10)によって推定できる。

$$P_{cr}^i = P_i + \lambda_i \Delta P \quad (10)$$

ここに、 P_{cr}^i : 第 i 増分ステップの座屈荷重

P_i : 第 i 増分ステップ時の荷重

ΔP : 増分荷重

λ_i : 第 i 増分ステップ時の座屈荷重係数

ここで、増分ステップが1以後であれば、 P_i は増分開始時に作用した荷重となる。また、 λ_i は逆べき乗法またはランチョス法で求めた値である。線形座屈解析には線形項のみの接線剛性を用いるが、非線形座屈解析には大変形オプションを用いることにより、幾何学的非線形を考慮できる非線形項を含む接線剛性を用いる。

(3) 座屈解析および理論式の考察

ここで、解析には有限要素法で線形座屈解析および非線形座屈解析により座屈荷重および座屈波数の解析値を求め、理論計算には式(1)および式(4)により、座屈荷重および座屈波数の理論値を算定する。求めた解析値と理論値の比較することによって、解析手法および理論計算を検討する。

a) 解析モデルおよび解析ケース

鋼管座屈研究において、鋼管構造の特徴を踏まえ、図-6に示すような鋼管を研究対象とし、その長さは支持間隔とする。FEM解析モデルは、事前に鋼管の座屈時の変形状態が分からないため、対称性を利用しなく、鋼管全体をモデル化する。要素は4節点四辺形のシェル要素とし、アスペクト比が長短比1.5以下とし、図-7に示す。また、境界条件は両端単純支持とする。物性値は表-1に、解析ケースは表-2に示す。

b) 解析結果およびその考察

座屈解析結果について、本研究では1次座屈モードを検討対象とする。Case1 および Case3 の座屈解析結果はそれぞれ図-8(a)、図-8(b)および図-9(a)、図-9(b)に示す。図-8(a)および図-9(a)は円周方向の座屈波形を示し、図-8(b)および図-9(b)は軸方向の座屈波形を示す。

円筒状構造物の等分布荷重による座屈研究には円周方向の座屈波数を座屈波数 n とする。従って、Case1 および Case3 の座屈波数は図-8(a)、図-9(a)

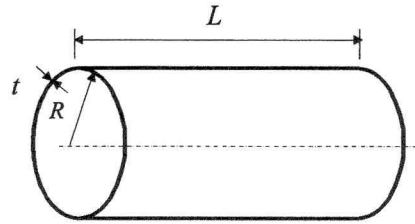


図-6 力学モデル

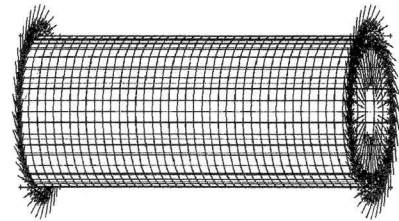


図-7 FEM 解析モデル

表-1 鋼管の物性値

(一般配管用ステンレス鋼管 JIS G 3448)

Yong's Modulus	Poisson's Ratio	Yield Stress
E(N/mm ²)	ν	σ_y (N/mm ²)
2.1+E5	0.3	325

表-2 解析ケース

解析ケース	モデル寸法 (L×R×T) (m)	解析手法	理論値の算定
Case1	6.0×1.5×0.010	線形座屈	式(1) 式(4)
Case2	6.0×1.5×0.010	非線形座屈	
Case3	6.0×1.5×0.015	線形座屈	

から得られる。また、座屈荷重係数 λ は図中の λ_{cr} であり、それぞれの図から得られる。座屈解析の初期荷重は 100kN/m^2 の等分布圧であり、座屈荷重は式(8)より算定される。Case2 の結果は各荷重増分ステップにおける座屈荷重係数および座屈波数を表-3に示し、式(10)より各増分ステップの座屈荷重を算定する。表-3 から座屈荷重係数がゼロに一番近いステップの座屈荷重は Case2 の座屈荷重とする。座屈の理論値は式(1)および式(4)により計算された。各ケースの座屈結果をまとめ、表-4 に示す。

表-4 から、線形解析値と理論値がほぼ一致していることが分かった。これによって、本研究で導いた。

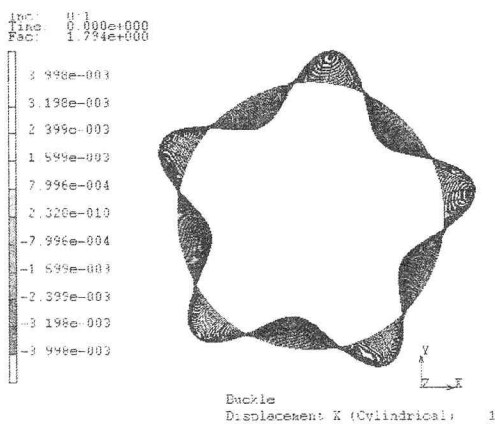


図-8(a) 円周方向の座屈波形 (Case1)

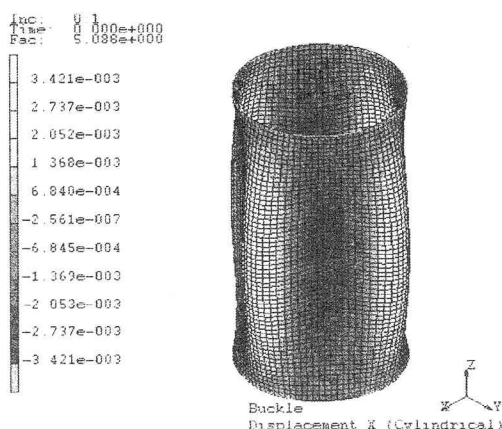


図-9(b) 軸方向の座屈波形(Case3)

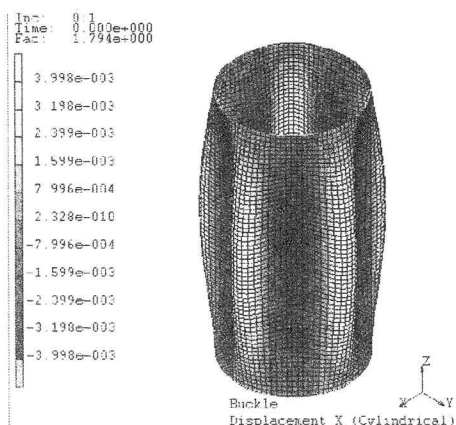


図-8(b) 軸方向の座屈波形(Case1)

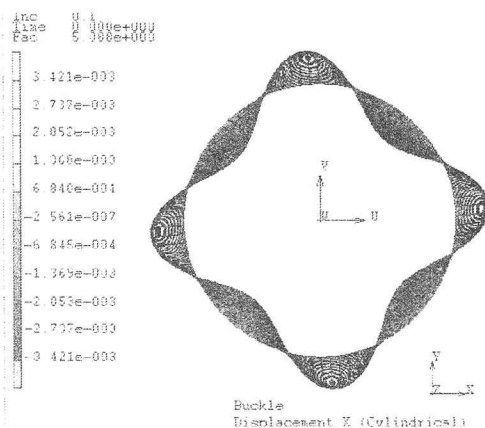


図-9 軸方向1次座屈モードの波形(Case3)

表-3 非線形座屈解析の結果

(Case2 荷重増分 $\Delta P=10\text{kN/m}^2$)

増分 番号	増分前 荷重	座屈荷重 係数	座屈 荷重	波数
	P_i (kN/m^2)	Fac	P_{cr} (kN/m^2)	n
1	0	17.91	179.1	5
5	40	12.02	160.2	5
10	90	6.588	155.9	5
15	140	2.522	165.2	5
16	150	2.222	172.22	5
17	160	1.577	175.77	5
18	170	0.9601	179.60	5
19	180	-0.060	179.40	5
20	190	-0.6326	183.7	5

表-4 座屈解析値および理論値

解析 ケース	座屈波数		座屈荷重 (kN/m^2)	
	解析値	理論値	解析値	理論値
Case1	5	5	179.4	177.3
Case2	5	5	179.4	177.3
Case3	4	4	506	503.3

座屈波数の計算式は妥当であることが検証され、それにより弾性座屈の理論設計を確立した。また、座屈荷重および座屈波数は非線形座屈解析による値と線形座屈解析による値と同じである。これは幾何学的非線形性があまり強くないではないかと考えられる。

実際に図-8(a)、図-8(b)から、座屈の最大変形はわずか4mmであり、つまり大変形が生じられていないことがわかる。そのため、鋼管の弾性座屈解析には線形座屈解析法を用いるのが妥当であると考えられる。

以上の考察により、鋼管の弾性座屈において、式(1)および式(4)により座屈理論値、線形座屈解析により座屈の解析値を得ることができる。

3. 浸透水圧による鋼管の座屈挙動

一般的に水道管施設には、各荷重に対する断面の応力を照査することが設計の主な内容である。浸透水圧の場合、浸透水圧による鋼管の座屈が起こる可能性が高いであるため、応力と座屈を両方ともに照査しなければいけない。しかし、浸透水圧による鋼管の座屈は弾性座屈であることを確認できれば、座屈照査のみをすることによって安全性を確保できる。そのため、座屈と降伏との関係を調べることが必要となる。

また、鋼管の座屈は鋼管の幾何学条件(R , t , L)によって、座屈挙動が違いため、座屈と鋼管の長さ、厚さおよび半径との関係を調べる必要がある。これらの関係は座屈設計にとって欠かせないものである。特に、水道施設は長距離であるので、設計の段階では鋼管座屈と鋼管長さの関係に基づいて、支持形式および支持間隔を決める必要がある。

(1) 鋼管の座屈と降伏との関係

一般的に構造物の座屈を考えると、座屈の形態、すなわち弾性座屈か、弾塑性座屈かを判断する必要

表-5 検討ケースおよび算定方法

解析 Case	モデル 形状寸法			解析 手法	理論 計算式
	R (m)	t(mm)	L(m)		
Case1	1.5	5, 10, 15, 30, 50, 70.	3.0	線形座屈 解析と静 的解析	座屈:式(1) と式(4) 降伏:式 (11)と式 (12)
Case2			5.0		
Case3			7.0		
Case4			10.0		

がある。そこで、本研究では浸透水圧に作用される鋼管に対して、理論と解析の二つの手法を用い、座屈と降伏の荷重の比較検討を行うことによって、座屈形態を判断する。

FEM 解析モデルおよび物性値は前に示した図-7、表-1と同じとして、検討ケースおよび算定方法は表-5に示す。また降伏荷重の理論値は式(12)、座屈荷重の理論値は式(1)および式(4)により算定される。降伏荷重の解析値は静的解析を行い、式(11)により算定され、座屈荷重の解析値は線形座屈解析を行い、式(8)で求められる。

a) 降伏荷重の解析値の算定

静的解析により最大相当破壊応力を得て、降伏応力度により降伏荷重に換算し、降伏荷重の解析値を求めることができる。換算式は式(11)に示す。

$$P'_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} P_0 \quad (11)$$

ここに、 P'_y : 降伏荷重の解析値(浸透水圧) (kN/m²)

σ_y : 降伏応力度 (3.25E5 kN/m²)

P_0 : 初期荷重(浸透水圧) (kN/m²)

σ_{max} : P_0 における最大相当破壊応力(kN/m²)

b) 降伏荷重の理論値の算定

「鋼構造物の設計指針」の鋼管応力の設計式に基づいて、降伏荷重の理論値 P_y は以下の式により計算される。

$$P_y = \frac{\sigma_y t}{R} \quad (12)$$

ここに、 P_y : 降伏荷重理論値(浸透水圧) (kN/m²)

σ_y : 降伏応力度 (kN/m²)

R : 鋼管の半径(m)

t : 鋼管厚さ(m)

c) 座屈と降伏との関係の考察

座屈と降伏の考察は座屈荷重と降伏荷重の比を調べることによって行われた。座屈荷重と降伏荷重の比と半径厚比(R/t)および長さ(L)との関係は図-10に示す。

図-10から鋼管の半径厚比が大きい方は、座屈荷重と降伏荷重の比が小さい、材料降伏より座屈が早く起こる。つまり、薄い鋼管の方がより弾性座屈が起こりやすいことが分かった。長さ3.0mのCASE1の場合、半径厚比が50のとき、座屈と降伏がほぼ同時に起こったが、150となると、座屈は降伏荷重の1/4程度の荷重で起こった。また図-10から座屈と降伏の関係には鋼管の長さによる影響もあることが分かった。長い鋼管の方は座屈が材料降伏より早く起こる。長い鋼管の方がより弾性座屈が起こりやすい。

以上の考察により、水道管の座屈には、座屈形態を

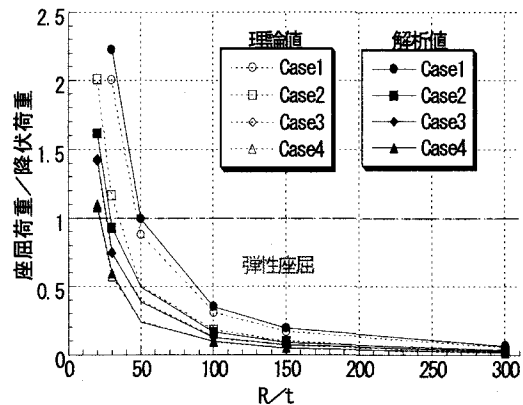


図-10 座屈と降伏の関係

表-6 座屈波形と半径厚比の関係

R/t	理論値				解析値			
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
20	4	3	3	2	4	3	3	2
30	5	4	3	2	5	4	3	3
50	5	4	3	3	5	4	3	3
100	6	5	4	3	6	5	4	3
150	7	5	4	4	7	5	5	4
300	8	6	5	4	8	6	5	4

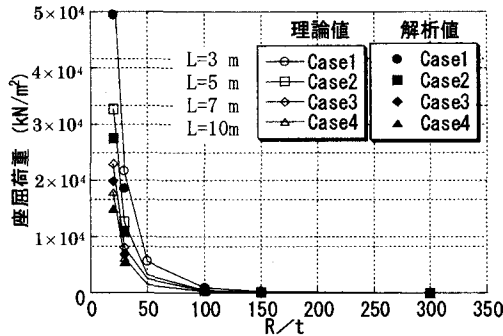


図-11(a) 座屈荷重とR/tの関係図

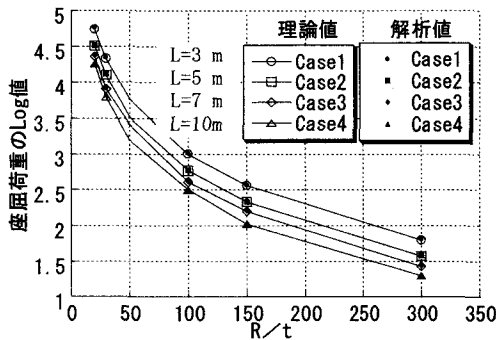


図-11(b) 座屈荷重のLog値とR/tの関係図

決めるのは鋼管半径と厚さのみではなく、鋼管の長さを考えなければいけない。また大深度地下水道管は長距離であり、半径厚比が特に大口径の場合、常に大きいので、座屈は弾性座屈であると判断できる。

(2) 鋼管の座屈と幾何形状との関係

鋼管の座屈と鋼管の半径、厚さおよび長さとの関係について、従来Flügge, Timoshenkoなどは研究を行ったが、彼らにより有数の鋼管形状に対する座屈荷重、座屈波数の計算用のグラフのみを示した。鋼管の半径、厚さおよび長さとの関係がはっきりと示されていない。

そこで、(1)で述べたモデルおよび解析ケースに対して、座屈荷重、座屈波数の解析値および理論値を考察し、座屈と鋼管形状との関係を明らかにする。

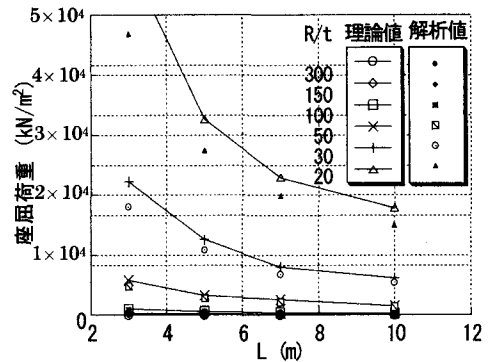


図-12(a) 座屈荷重とLの関係図

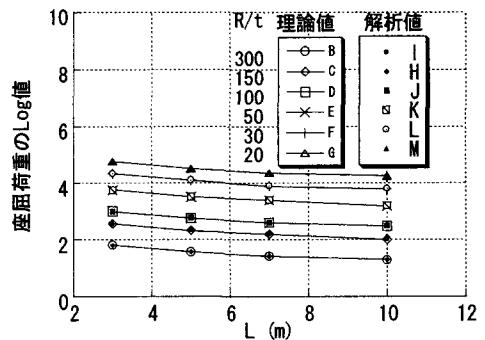


図-12(b) 座屈荷重のLog値とLの関係図

さらに、鋼管の座屈の理論式を再検討し、設計にのびる設計理論を検討する。

a) 鋼管の座屈と鋼管幾何形状との関係

鋼管の座屈と鋼管幾何形状との関係をまとめ、座屈波数と半径厚比の関係は表-6に、座屈荷重と半径厚比の関係は図-11(a)および図-11(b)に、座屈荷重と長さとの関係は図-12(a)および図-12(b)に示す。

座屈波数については、表-6から鋼管の長さを一定とすると、鋼管の半径厚比が大きくなるにつれて波数は増加し、半径厚比を一定とすると、鋼管長さが長くなるにつれて波数は減少することが示された。これによって、鋼管座屈の波数は鋼管の断面形状のみに決められではなく、鋼管の長さとの関係があることが分かった。さらに、Case 1およびCase 2は理論値と解析値が完全に一致しているが、Case 3およびCase 4は完全に一致していない。これは $\frac{n^2 l^2}{\pi^2 R^2} \gg 1$ という

仮定条件を満たせば満たすほど、理論値と解析値が一致することが証明された。

一方で、座屈荷重において、図-11(a)および図-11(b)から、座屈荷重は鋼管の半径厚比が大きくなるにつれて小さくなることを示された。また、図-12(a)および図-12(b)は座屈荷重が鋼管の長さが長くなる

表-7 検討モデルおよびケース

CASE	形状寸法		
	t(mm)	L(m)	R(m)
CASE5	10.0	3, 5, 6, 7, 10, 18, 30, 50, 80	1.5
CASE6	15.0		
CASE7	30.0		

につれ小さくなることを示した。

座屈荷重の理論値と解析値については、半径厚比が大きな場合、ほぼ一致しているが、図-10に示した弾性範囲を超えると、解析値と理論値の差がかなり広がった。これは前述した座屈理論式は弾性座屈の式であることと、線形値解析は降伏以後の塑性範囲に適用できないことが改めて検証された。

b) 無限長鋼管

以上の考察によって、長い鋼管は座屈が起こりやすい、また鋼管の長さは座屈波数、座屈荷重に大きな影響を及ぼすことがよく分かった。実に分離型式の水道管を建設するとき、確実の支持を設けない場合が多い。それに対して、鋼管を無限長管として考える必要がある。無限長管の座屈については、Timoshenko らは式(13)を提案した。²⁾また、Garman は短い鋼管の座屈荷重を導いたとき、無限長管の有限長さを管の直径の6倍に等しいと仮定して、実験値とよく合う座屈荷重の計算式を得られた。これらに対して、表-7に表すケースを理論と線形座屈解析により検討し、無限長鋼管の等価有限長さを考察する。

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{R} \right)^3 \quad (13)$$

ここに、 P_{cr} : 座屈荷重 (浸透水圧) (kN/m²)

R : 鋼管の半径(m)

t : 鋼管厚さ(m)

μ : ポワソン比

E : ヤング係数

鋼管の座屈荷重の理論値および解析値は前述したように求める。ただし、無限長管の理論値は式(13)を用いて算定する。座屈荷重と長さの関係は図-13(a)、図-13(b)に示す。図-13(a)および図-13(b)から、鋼管の長さが径の6倍である12R以上になると、座屈荷重は鋼管の長さを長くするにつれて多少変わるが、変化幅がわずかである。これによって、

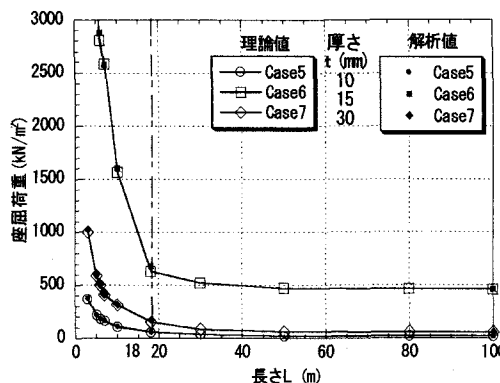


図-13(a) 座屈荷重とLの関係 (Case5, 6)

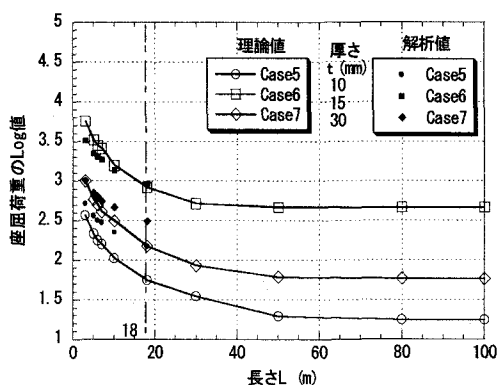


図-13(b) 座屈荷重のLog値とLの関係

TimoshenkoおよびGarmanの理論が改めて検証され、無限長鋼管の設計には数値解析および理論計算により実施できると考えられる。

c) 大深度水道管における座屈設計⁸⁾

以上の座屈研究により、座屈設計には鋼管の支持条件、鋼管の幾何学形状が重要であることが分かった。実は大深度地下水道管を建設するとき、経済性を求めるために、大口径化し、長距離で支持を設け、途中で簡単な支持材を使う場合が多い。そのため、浸透水圧による座屈設計においては、多くの場合弾性座屈として考えるのが妥当である。そこで、以上の座屈挙動の考察に基づいて、座屈設計は、まず支持状況に応じて鋼管の長さを決め、その長さによって、座屈荷重の算定式を選択する。鋼管の長さは直径の6倍以下の場合、式(1)および式(4)により座屈荷重を算定する。それ以外の場合、無限長の設計式を使わなければならない。ただし、実際は、鋼管の長さは直径の6倍以下の場合、厚い鋼管は式(4)により算定した座屈波数が2以下になる可能性があり、その場合には、座屈波数は2をとって計算すれば良

い。また、鋼管の長さは直径の6倍以上の場合、薄い鋼管の座屈波数は2以上である可能性があるが、鋼管の安全を考え、無限長式で計算する。

(3) 本研究の応用

a) 設計条件

分離型方式により地下50mに建設される大深度地下水道トンネルを想定し、それに対して座屈設計を行う。トンネル標準断面および設計条件は以下に示す。

内 径：Φ4500mm

内 管：鋼管材質 SM490,

降伏応力度 $\sigma_y = 3.25E5 \text{ kN/m}^2$

厚さ $t=21\text{mm}$

浸透水圧： 500kN/m^2

b) 座屈設計

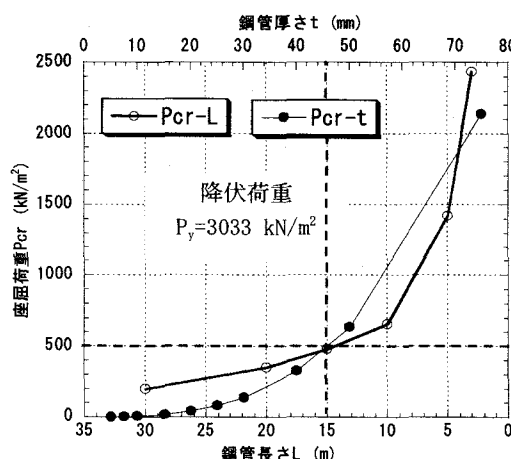


図-14 座屈荷重と長さ、厚さの関係図

座屈設計は支持なしの場合と支持ありの場合二つの状況に対して行う。まず座屈荷重と降伏荷重の比較をすることにより座屈の形態を判定する。降伏荷重は式(12)により以下に計算する。

$$P_y = \frac{t \cdot \sigma_y}{R} = \frac{325000 \times 0.021}{2.25} = 3033 (\text{kN/m}^2)$$

座屈荷重は支持ありの場合、式(1)および式(4)、支持なしの場合、式(13)で算定した。算定した結果を図-14に示す。

図-14 から、支持なしの場合、浸透水圧により現有の鋼管は降伏前に座屈が起こる。座屈荷重を浸透水圧 500kN/m^2 より大きな値を得るために、必要な鋼管の厚さは現有の 21mm から 46mm 以上に厚くしなければならない。一方、支持ありの場合、支持間隔は 15m 以下にしない限り、設計する鋼管は弾性座屈が起こる。

また、材料のコストのみを考えると、支持ありの場合はかなり経済性が有利であることが分かったが、施工コストを高めるため、総合的に判断する必要がある。

4. 結論

本研究により、FEM 解析手法および理論計算式で、分離型水道に使われる鋼管の等水圧による座屈の課題を解決することができた。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 大深度水道管は、高い地下水圧に作用され、また長距離、薄肉、大口径という特徴があるため、弾性座屈が起こりやすい。
- 2) 大深度水道管の座屈は鋼管の断面形状のみではなく、支持間隔との関係もある。短い間隔の支持することにより、浸透水圧による座屈の防止に有利となる。
- 3) 大深度水道管の座屈設計には、線形座屈解析により数値解析で行われる。また理論設計においては、支持なしと支持ありで行われる。支持なしの場合、無限長座屈式(13)により行う。支持あり場合、支持間隔は長さが直径の6倍以下に、設計は Timoshenko の座屈式および式(4)を用いる。
- 4) 大深度水道管の建設する時、経済性について総合的に評価する必要がある。

5. 今後の課題

本研究は大深度地下水道などの鋼管の等水圧による座屈について考察を行ったが、実際の鋼管の加工による残留応力や初期変形を考慮しなかった。また浸透水圧を等水圧として考えた。さらに、水道管を布設するときに、補剛材を設けた鋼管と等間隔で支持する補剛材設けない鋼管の経済性の比較をする必要がある。

これらについて、今後の課題は、

- 1) 鋼管の加工による残留応力および初期変形などの初期不整を考慮して研究を進めていくこと。
- 2) 分離型式水道トンネル中に鋼管の支持形式、支持を設ける施工方法について研究すること。
- 3) 補剛材を設ける鋼管の座屈挙動を研究し、補剛材がない場合の鋼管と経済性を比較すること。

参考文献

- 1) 財団法人 水道技術研究センターら：平成15年度 大深度水道管のコスト縮減に関する研究・報告書 pp1-23
- 2) Timoshenko & Gere : Theory of Elastic Stability pp 474-482
- 3) 日本マーク株式会社 : MARC VOLUME A User Information(K-6) pp43-46
- 4) 池田清宏, 室田裕久: 構造系の座屈と分岐, コロナ社,
- 5) 土木学会 : 鋼構造物設計指針 PARTB 特定構造物
- 6) 久田 俊明, 野口 祐久: 非線形有限要素法の基礎と応用, pp. 304-322, 丸善, 2002.
- 7) 土木学会 : 鋼構造物設計指針 PARTB 特定構造物 pp43-46
- 8) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 土木学会, 1987.