

取放水管の合理的な断面方向の 設計手法に関する研究

川島正史¹・津田守²・金子雄一³・原田光男²

¹正会員 工修 東電設計株式会社 地盤・構造部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

²正会員 工修 東京電力株式会社 建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

³正会員 工修 東電設計株式会社 火力・原子力土木部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

本研究では、火力発電所構内に埋設される取放水管の断面方向の設計に関し、限界状態設計法を導入し、要求機能と限界状態、考慮する荷重作用の組み合わせについて整理するとともに、それらに対する部分安全係数を設定した。また、構造解析には地盤の非線形性や管と地盤の相互作用を考慮した非線形FEMの適用を提案した。さらに、この構造解析の適用性を、土槽を用いた模型試験や実管の計測結果に基づき検証した。

Key Words : cross sectional design, buried steel pipe, limit state design, partial safety factors, non-linear FEM analysis

1. はじめに

取放水管とは、火力発電所構内に埋設される大口径薄肉鋼管であり、復水器冷却用の海水を復水器まで導水する取水管と、復水器を通過した海水を海域へ導水する放水管の総称である。

埋設管はその力学特性から、剛性管とたわみ性管に分類され、取放水管は水道管と同様にたわみ性管の範疇に入るものである。そのため、従来から取放水管の設計は、WSP（日本水道鋼管協会）の規準¹⁾などに準拠し、許容応力度設計法により行われている。

許容応力度設計法では、想定された荷重のもとで部材断面に生じる応力を計算し、その値が許容値以内であることで設計の妥当性が確認できるため、比較的簡便に設計できる利点を有している。しかしながら、荷重、部材寸法、材料強度、構造解析などが有するばらつきに対し、主に経験的に定められた安全率に基づいて許容応力度が設定されており、その設定根拠が曖昧であるといった課題がある。

一方、種々の構造物の設計において、許容応力度法から限界状態設計法への移行がなされており、最近の構造設計の趨勢となっている。限界状態設計法では、構造物に生じる限界状態と設計に用いる部分安全係数の関係を明確化することにより、限界状態ごとに所要の安全裕度を確保できるため、設計の合理化が図れるという利点を有している。

また、取放水管は周囲の埋戻し地盤と一体となって土荷重や上載荷重に抵抗するたわみ性管である。そのため、特に入念な締固めにより埋戻される場合には、管の周囲の地盤による拘束効果、すなわち管と地盤の相互作用を適切に考慮することにより、管に生じる断面力や変形を抑制することができ、設計の合理化が図れると考えられる。これまで、たわみ性管の構造解析では、管と地盤の相互作用は、図-1に示すSpanglerの土圧モデル²⁾により考慮されている。このモデルは管の変形により生じる受動土圧に着目した合理的なモデルである反面、管頂や管側の土圧分布形状を管や地盤の剛性にかかわらず一義的に決定する簡便なモデルであり、既往の研究においても、いくつかの問題点が指摘されている³⁾。

このような背景のもと、本研究では取放水管の合理的な設計手法構築のため、限界状態設計法の適用について検討した。すなわち、取放水管に要求される機能を明確にし、種々の荷重ケースに対応する限界状態を取放水管の模型実験に基づき設定した。また、部分安全係数については、既往の材料試験や品質管理試験などのデータを可能な限り反映し、定量的に評価した。さらに、構造解析では、地盤の非線形性や、管と地盤の相互作用を適切に再現するため、非線形FEMの適用を提案した。FEMの適用性については、土槽を用いた模型実験および実管での計測結果に基づき、埋戻し時ならびに上載荷重載荷時の挙動に対して検証した。

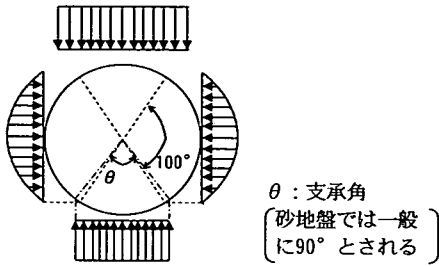


図-1 Spanglerの提唱する土圧モデル

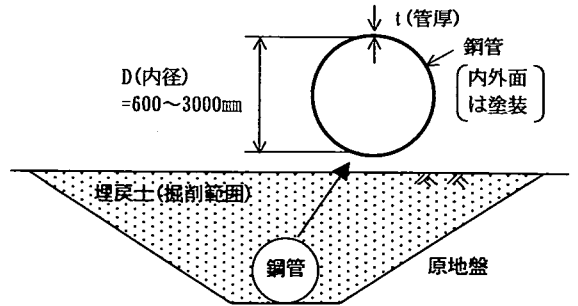


図-2 取放水管の構造概要および埋戻し状況

表-1 取放水管の断面方向の設計で考慮する荷重の組合せ

		常時	搬入時*1	点検時*2	最大内圧時
永久荷重	土荷重*3	○	○	○	○
	管自重	○	○	○	○
	管内水重	○		○	○
変動荷重	内圧*4	○		○	○
	上載荷重*5	○	○	○	○

*1: 発電所建設時等における大物搬入時。*2: 発電機等の保守点検時。

*3: 要素の単位体積重量として考慮する。*4, *5: 考慮する荷重ケースにより値が異なる。

2. 取放水管の概要

取放水管の構造概要および埋戻し状況を図-2に示す。その特徴は以下のとおりである。

- ①内径(D)と管厚(t)の比で表す径厚比(D/t)は100～250程度であり、ガス管や水道管の50～100に対して大きく、たわみ易い
- ②管内面には防食と貝付着防止を目的として、高い硬度(一般の塗料は鉛筆硬度がB程度であるのに対し、本塗料は5H程度)を有するガラスフレーク含有不飽和ポリエステル樹脂塗料を塗布

また、管の埋戻し方法は作業エリアなど工事の制約条件により異なるが、本研究では、取放水管の施工において代表的な以下の方法を対象とした。

- ③管の施工方式は施工エリアが十分に確保される状況を想定し、地山を法面状に掘削した後管を設置し、管の周辺地盤を埋戻す方法
- ④埋戻しは砂質土を用いた密な締固め(通常施工管理基準は締固度85%以上)

なお、上記方法以外にも、良質な地盤で掘削面が自立する場合に適用する溝掘や、狭隘な場所で施工する場合に適用する矢板による土留がある。特に矢板を用いる場合には、矢板引抜時の地盤の緩みにより、管の変形が他の方法と比較して大きくなることが報告されている³⁾。このような条件下で施工される埋設管を対象とする場合には、解析モデル等の設定において別途検討が必要であると考えられる。

3. 考慮する荷重

取放水管の断面方向の設計では、以下の各荷重を、表-1に示す組合せにより考慮する。

- ①埋戻し土の土圧(土荷重)
- ②管自重および管内水重
- ③内圧
- ④上載荷重
- ⑤地震時荷重(応答変位など)

地震時の荷重ケースは、一般のパイプラインでは管軸方向の設計で考慮されており、断面方向の設計では考慮されることは少ない^{4),5)}。一方、ボックスカルバートのような矩形断面の構造物では、断面方向に地震時荷重として応答変位を作用させた設計が行われている⁶⁾。この違いは、矩形断面と比べパイプは円形であり、応答変位を作用しても断面力が集中し難いことが要因と考えられる。本研究では断面方向の設計を対象とするため、表-1に示すとおり地震時以外の荷重ケースを抽出し、それらを対象とした。

常時の荷重ケースは通常運用時に想定される荷重であり、①～④全ての荷重を考慮する。上載荷重については一般的にT-25荷重等が考慮される。

また、表中の搬入時と点検時は、発電所特有の荷重ケースであり、上載荷重は非常に大きいとその作用する期間が短いものである。搬入時では、発電所の建設の際に管上を通過する大型機器を積載したトレーラーの走行荷重(総重量5000kN程度)を考慮する。点検時と

表-2 断面方向の設計における限界状態とその限界値

限界状態	限界値
終局限界状態	・管体の断面降伏 (作用応力が所要の安全裕度を確保して降伏応力度以下)
使用限界状態	・内面塗装の損傷 (塗装のひずみが所要の安全裕度を確保して2500 μ 以下) ・管体の過大な変形 (変形量が所要の安全裕度を確保して直径の5%以下)

は、発電機などの保守点検時に相当し、発電機を吊り上げるための大型トラッククレーンの走行荷重（総重量1500kN程度）やそのアウトリガーの反力（設置範囲に50kPa程度）を考慮する。

4. 限界状態の明確化

(1) 要求機能と限界状態

限界状態の検討では、対象構造物に求められる機能を明確にし、耐用期間中にその機能を果たさなくなるすべての状態を考慮する必要がある。取放水管には、「作用するあらゆる荷重条件下で、所定の運用水準で冷却水を通水する機能」が求められる。これを踏まえ、要求機能を確保するための限界状態として、終局限界状態と使用限界状態を設定した。表-2に限界状態とその限界値を示す。なお、疲労限界状態については、埋設鋼管では振動荷重のような繰返し荷重は作用しないことから検討を省略することとした。

(2) 終局限界状態とその限界値

終局限界状態は鋼管の耐荷力を確保するための限界状態である。

鋼管の断面方向の耐荷力は、断面において一箇所が塑性化しても低下することなく、数カ所に塑性ヒンジが発生した時点で最大耐力に達することが知られている。このため、荷重レベルが大きく、作用頻度の少ない搬入時や点検時については、鋼材の塑性域を考慮した限界状態を設定できる可能性がある。しかしながら、本研究で対象とする搬入時や点検時の荷重は、発電所の供用前および供用中に必ず作用する性質を有しており、このような荷重に対して鋼材の一部が塑性化するという状態は好ましくないと考えられる。そのため、発電所の社会的重要性も勘案し、常時と同様に搬入時や点検時についても、健全であること（損傷なし）を保証することとし、断面降伏を限界状態として設定した。

(3) 使用限界状態とその限界値

使用限界状態は供用時の使用性および耐久性を確保

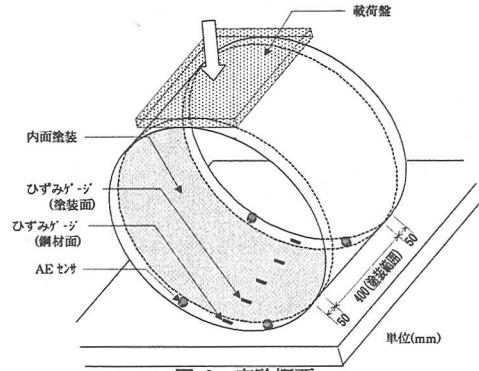


図-3 実験概要

するための限界状態である。

取放水管は、内外面に防食用の塗装が施されており、内面塗装には、防食に加え貝付着を防止するため、一般塗装と比較して高い硬度を有するガラスフレーク含有不飽和ポリエステル樹脂塗装（塗装厚500 μ m）が使用される。この塗装は「硬いがもろい」性質を持っているため、一般の塗装と比較して、変形に対する追従性が劣ることが予想される。

また、過大な変形は通水断面の縮小、すなわち、使用性の低下を招くことになるが、径厚比が200程度になると、耐荷力の照査を満足しても、管体に過大な変形が生じ使用性を満足できない可能性がある。

これらより、本研究では使用限界状態として、「内面塗装の損傷」および「管体の過大な変形」を設定した。

a) 内面塗装の損傷の検討⁷⁾

内面に取放水管で用いるガラスフレーク含有不飽和ポリエステル樹脂を塗装した鋼管の扁平試験を行い、内面塗装のはく離や亀裂といった損傷の発生限界について検討した。図-3に実験の概要を示す。実験に用いた鋼管の径厚比 D/t (D : 直径, t : 管厚) は77 (CASE1), 160 (CASE2) の2種類である。

実験結果を表-3に示す。塗装のはく離の発生は、鋼材面と塗装面のひずみが追従しなくなった時点と定義した。表-3より、塗装のはく離や亀裂は、径厚比の大きさにかかわらず両試験体ともほぼ同じ塗装ひずみ（はく離: 2700~3000 μ , 亀裂: 9600~10700 μ ）で発生していることが分かる。一方、その時点における変形

表-3 実験結果

		CASE1* (D/t=77)	CASE2* (D/t=160)
はく離発生	塗装ひずみ(μ)	3000	2700
	鋼材ひずみ(μ)	2950	2650
	変形率** (%)	5.0	6.3
亀裂発生	塗装ひずみ(μ)	10700	9600
	鋼材ひずみ(μ)	8700	8600
	変形率* (%)	10.5	18.5

* : 直径Dは, CASE1 : 609mm, CASE2 : 720mm

管厚tは, CASE1 : 7.9mm, CASE2 : 4.5mm

** : 変形率=変形量δ / 直径の初期値D₀

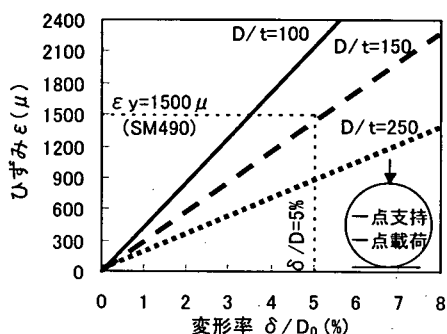


図-4 鋼管の変形率とひずみの関係

率は, 径厚比により異なっている. このように, 塗装のはく離や亀裂の発生点は, 管の変形でなく, ひずみにより定義できる.

この結果から, 塗装の損傷(はく離)の限界値を管体および塗装のひずみで2500μとした. ただし, 内面塗装の損傷に関する照査は, 終局限界状態となる断面降伏に対する照査(例えばSM490の場合, 1500μ以下)に包含されるため, 一般に省略可能である. 今回試験した以外の塗装については, 試験した塗装に比べ延性に富むことから同様の限界値を用いれば安全であると考えられる.

b) 管体の過大な変形に関する検討

上述の鋼管の扁平試験では, 鋼管の変形率が5%程度であれば視覚的にも管体の扁平が顕在化せず, 通水性(特に通水断面の確保)に支障をきたさない範囲であると判断された. 従って, 扁平試験の結果に基づき, 変形の限界値を直径の5%とした.

鋼管(SM490)の変形率とひずみの関係を図-4に示す. なお, 同図は, ヤング率を一定とした場合の計算結果である. 径厚比により, 変形率5%に対する管の最大ひずみは異なっており, 径厚比が大きい場合には変形の使用限界状態が, 径厚比が小さい場合には終局限界状態がそれぞれクリティカルとなる.

表-4 終局限界状態に対する部分安全係数

	常時	搬入時	点検時	最大内圧時	
材料係数 γ_m	1.1	1.1	1.1	1.1	
部材係数 γ_b	1.0	1.0	1.0	1.0	
荷重係数 γ_f	土荷重	1.05	1.0	1.0	1.0
	管自重	1.0	1.0	1.0	1.0
	管内水重	1.0	—	1.0	1.0
	内圧	1.0	—	1.0	1.0
上載荷重	1.0	1.0	1.0	1.0	
構造解析係数 γ_a	1.1	1.0	1.0	1.0	
構造物係数 γ_i	1.1	1.0	1.0	1.0	

表-5 使用限界状態に対する部分安全係数

	常時	搬入時	点検時	最大内圧時	
材料係数 γ_m	1.0	1.0	1.0	1.0	
部材係数 γ_b	1.0	1.0	1.0	1.0	
荷重係数 γ_f	土荷重	1.05	1.0	1.0	1.0
	管自重	1.0	1.0	1.0	1.0
	管内水重	1.0	—	1.0	1.0
	内圧	1.0	—	1.0	1.0
上載荷重	1.0	1.0	1.0	1.0	
構造解析係数 γ_a	1.1	1.0	1.0	1.0	
構造物係数 γ_i	1.1	1.0	1.0	1.0	

5. 部分安全係数の設定

(1) 提案する安全係数

部分安全係数は, 限界状態設計法で一般に考慮されているもの⁹⁾を用いる. すなわち, 材料係数 γ_m , 部材係数 γ_b , 荷重係数 γ_f , 構造解析係数 γ_a , 構造物係数 γ_i の5種類である. ここで提案する終局限界状態および使用限界状態の部分安全係数を, 表-4, 表-5に, それらの設定根拠を以下に示す.

(2) 終局限界状態の部分安全係数

a) 材料係数

材料係数は, 鋼材の降伏点のばらつきを考慮して設定した. 設計では, 一般にJIS等の規格値に基づいて材料特性を設定することが有用である. JISでは降伏点と引張強度が規定されているが, 終局限界状態の照査では, 降伏点を材料特性の限界値として用いる. ここでは, 鋼材の降伏点のばらつきとJISの規格値との関係に基づいて材料係数を設定した. すなわち, 鋼材の降伏点は載荷速度に影響されること, 静的載荷では降伏点の95%保証値がJISの規格値を10%程度下回る場合があることが報告されている^{9), 10), 11)}ことから, 材料係数として1.1を設定した.

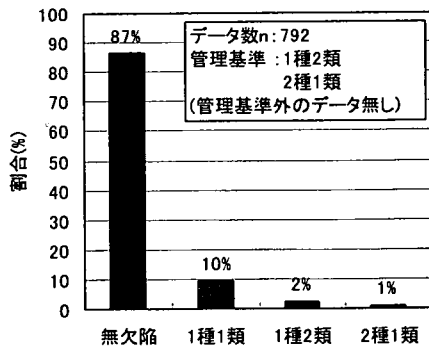


図-5 工場溶接部の放射線透過試験結果

表-6 埋戻土の単位体積重量のばらつき

	データ数 n	変動係数 δ	95%上限値/平均値 ($1+1.65\delta$)
A地点	72	0.029	1.048
B地点	99	0.028	1.046

なお、鋼管には溶接部が存在するため、現行の埋設鋼管の設計では溶接効率として安全率を考慮しているものが多い。これに対し、断面方向の検討で対象となる製管時の溶接は工場で行われる自動溶接であり、図-5に示すこれまでの品質管理(放射線透過試験)結果によると、全数の90%程度が無欠陥であることに加え、発生している欠陥の種類も、1種2類および2種1類以上と高い品質が確保されていることが分かる。水門鉄管技術基準¹²⁾などにも、この程度の欠陥は静的強さにほとんど影響がないとされており、鋼管の断面方向の設計では溶接部が降伏点に与える影響は無視できる範囲であると考え、材料係数に考慮しないこととした。

b) 部材係数

部材係数は、加工による残留応力と部材寸法のばらつきの影響を考慮して設定した。一般に、大口径管にはロールベンダー管が用いられる。これは、鋼板を曲げた後、応力を解放(スプリングバック)し、溶接することで製管される。そのため、管の弾性挙動には影響しないと考えられる。また、部材寸法のばらつきについても、取放水管の場合、板厚の公差にマイナス側を認めていないため、安全係数に考慮する必要はない。これより、部材係数は1.0と設定した。

c) 荷重係数

荷重係数は、荷重のばらつきを考慮して設定した。取放水管の断面方向の設計で考慮する荷重の組合せは表-1に示すとおりである。永久荷重のうち、管自重、

管内水重はそのばらつきがほとんど無いのに対し、土荷重は地盤のばらつきを無視できない。上載荷重は、考慮する荷重ケースに応じて荷重の値は異なるが、発電所内を通行する車両重量は十分に管理されており、設計で想定した以上の荷重は作用しないと考えられる。以上を踏まえ、荷重係数には土荷重のばらつきのみを反映した。このうち、土被り厚については十分な精度で管理されているため、単位体積重量のばらつきに着目した。既往の建設地点の埋戻し地盤での材料試験データの統計分析によると、表-6に示すとおり、単位体積重量の95%上限値は、平均値を5%程度上回ることが判明したため、常時の荷重ケースについては土荷重の荷重係数を1.05とした。常時以外の搬入時等、短期の荷重ケースについては、荷重の作用頻度を勘案し、土荷重の荷重係数を1.0とした。

d) 構造解析係数

構造解析係数では、構造解析の不確実性を考慮した。本研究では現行の解析手法に替えてFEMの適用を提案している。後述のように、短期荷重が作用する場合、今回提案したFEMによる解析結果は実現象と比較して安全側の評価になることから、短期の荷重ケースについては、構造解析係数を1.0とした。

また、地中埋設管では、埋戻し後に管の変形が進行(変形に比例して作用応力も増加)する、いわゆる遅れ変形が生じることが計測³⁾されている。常時の荷重状態における遅れ変形を解析的に評価することは困難であり、一般に変形遅れ係数(砂地盤では1.1が用いられる¹⁴⁾)を解析結果に乗じることで考慮されている。今回提案するFEMにおいても、現時点ではこの遅れ変形を再現することができないため、常時の荷重ケースについては、構造解析係数を1.1とした。

e) 構造物係数

構造物係数 γ_1 は、一般に構造物の重要度、限界状態に達した時の社会的、経済的影響を考慮して定められ、1.0~1.2としてよいとされている⁸⁾。ここでは、常時の設計では構造物係数を1.1とし、それ以外の短期の荷重ケースでは1.0とした。

(3) 使用限界状態の部分安全係数の設定

a) 材料係数

鋼材の降伏点のばらつきは、使用限界状態に影響を与えないため、材料係数は1.0とした。

b) 部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数

部材係数、荷重係数、構造解析係数および構造物係数は、先に述べた設定根拠をそのままに適用できることから、終局限界状態と等しく設定した。

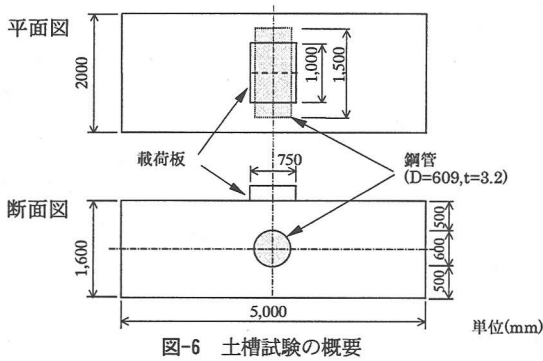
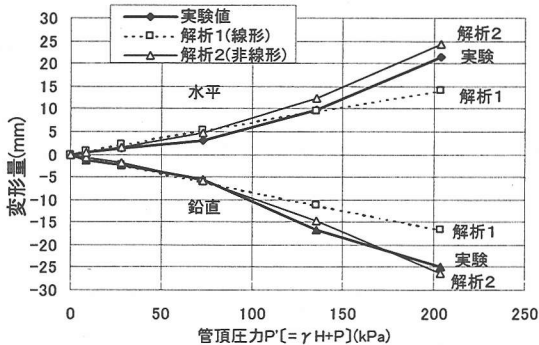


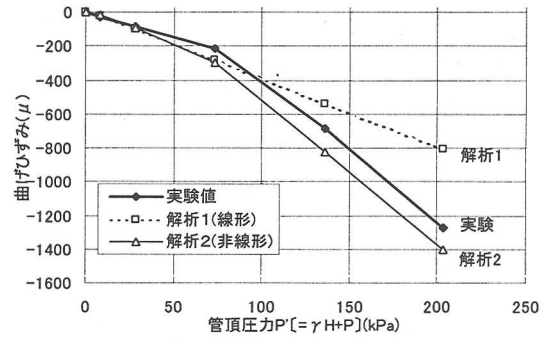
図-6 土槽試験の概要



a) 管頂圧力と変形量の関係

表-7 土槽試験の解析条件

		解析1 (地盤線形)	解析2 (地盤非線形)										
鋼管	ヤング率 E_p	206 (GPa)	同左										
	ポアソン比 ν_p	0.3	同左										
地盤	単位体積重量 γ_s	16.7 (kN/m ³)	同左										
	解析1) 変形係数 E_s 解析2) DC法パラメータ	10.8 (MPa)	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>c</td><td>11kPa</td></tr> <tr><td>ϕ</td><td>34.1°</td></tr> <tr><td>K</td><td>250</td></tr> <tr><td>n</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>Rf</td><td>0.8</td></tr> </table>	c	11kPa	ϕ	34.1°	K	250	n	0.3	Rf	0.8
	c	11kPa											
	ϕ	34.1°											
K	250												
n	0.3												
Rf	0.8												
ポアソン比 ν_s	0.35	同左											
ジョイント要素	粘着力 c_j 摩擦角 ϕ_j	0 (MPa) 20 (°)	同左 同左										



b) 管頂圧力と曲げひずみ変化量の関係

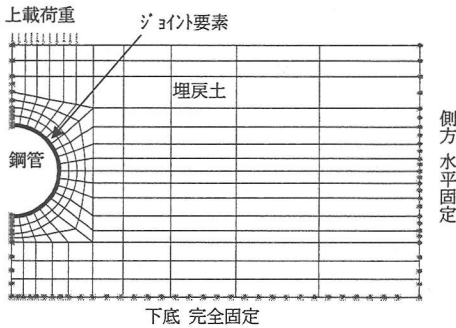


図-8 解析モデル(土槽試験)

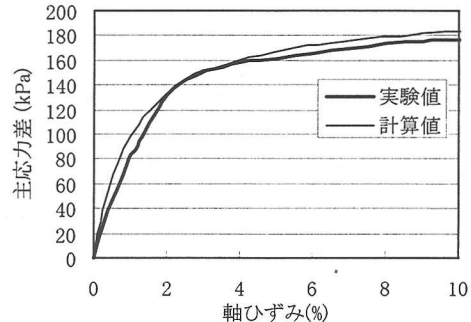


図-9 3軸試験に基づく地盤の非線形モデルの設定 ($\sigma_3=50\text{kPa}$)

6. 構造解析へのFEMの適用

(1) 土槽試験に基づくFEMの適用性評価¹⁵⁾

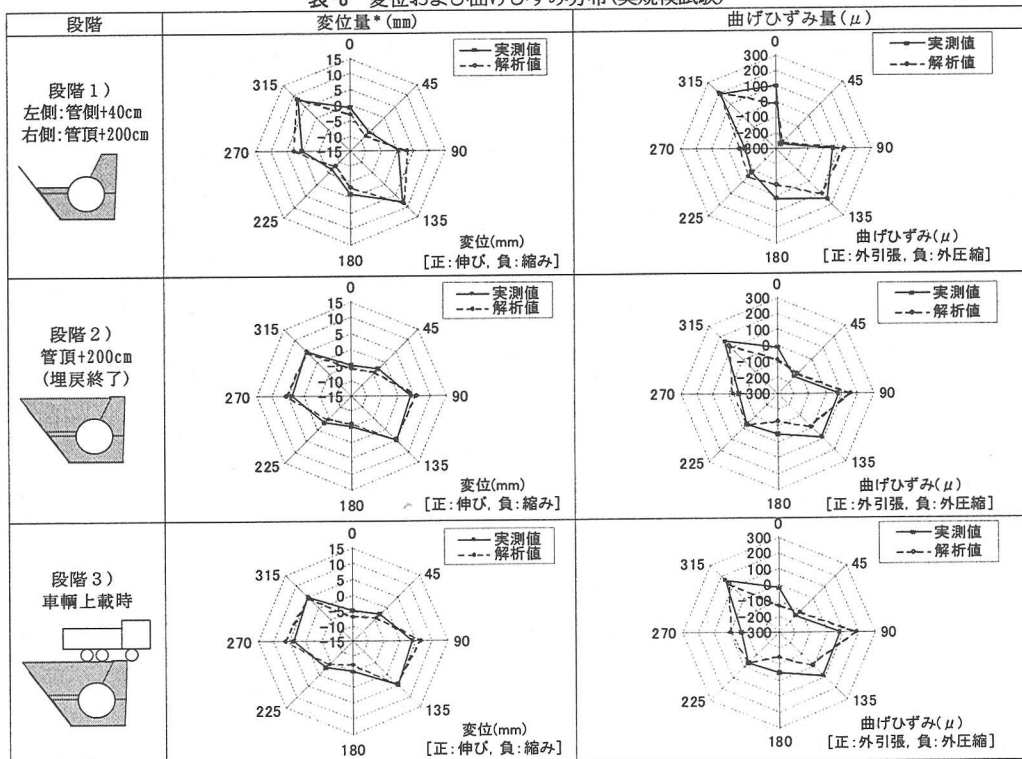
土槽試験の概要を図-6に示す。鋼管は、材質:SS400、直径 D :609mm、管厚 t :3.2mm(径厚比 $D/t=190$)とし、1600×5000×2000(mm)の土槽に土被り500mmで埋戻した。埋戻し土には細粒分混り砂($F_c=7\%$)を用い、締固めは締固度100%となるようパイプレータにより行った。埋戻し終了後に鋼製の載荷板(750×1000mm)を用い、取放水管で想定される荷重レベルを考慮して管頂圧力で200kPaまで載荷した。計測項目は、管のひずみおよび変形とした。

実験結果を図-7に示す。これらの図の横軸は管頂圧力 P' ($=\gamma H+P$ 、 γ :土の単位体積重量、 H :土被り厚、

P : 載荷圧力)を、縦軸はそれぞれ変形量および曲げひずみを示している。なお、曲げひずみは、載荷時に管全周で最大となる管頂部におけるもので、外引張を正とした。図-7から、管頂圧力が小さい範囲では管の変形量および曲げひずみ量の増加率が一定であるのに対し、75kPa以降ではそれらの増加率が急激に大きくなることが分かる。このとき鋼材は降伏ひずみに達しておらず弾性範囲内にあることから、この原因として地盤のひずみ増加にともなう剛性の低下が考えられる。

本試験に対し、図-8に示す解析モデルを用いてFEM解析を行った。地盤および管は8節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。取放水管の表面は滑面であり、管と地盤の境界に作用する摩擦は小さいと考えられるため、管と地盤の境界に6節点のジョイント要

表-8 変位および曲げひずみ分布(実規模試験)



*: 変形量の半分を計測位置両端の変位とした

素¹⁰⁾を設けることにより、管表面に生じる滑りを考慮した。

解析条件を表-7に示す。解析1が地盤の非線形性を考慮しない線形解析、解析2が地盤の非線形性を考慮した解析である。解析1では、地盤剛性を管側位置での応力レベルに相当する地盤剛性とした。解析2では、地盤の非線形性をDuncan-Changモデル¹⁷⁾を用いて考慮した。このモデルのパラメータk, n, Rfは、模型試験の締固め状況(締固度100%)を再現した3軸試験結果に基づいて設定した。ここで解析に用いたパラメータの適合性は、図-9の主応力差と軸ひずみの関係に示すとおりである。

図-7に解析結果を試験結果と併記した。これより、地盤の非線形性を考慮した解析2は、管頂圧力が大きい段階を含めて実験値を良好に再現していることが分かる。一方、地盤を線形とした解析(解析1)は、 $P=75\text{kPa}$ 程度まではよく一致しているが、管頂圧力が大きくなると管の応力や変形を過小に評価する傾向となっている。

これらの結果から、上乗荷重が大きい場合、地盤が非線形化すること、またその影響が管の挙動に表れることから、取放水管のように重量物を想定する埋設管の設計では、構造解析において地盤の非線形性を考慮

する必要があると考えられる。

なお、本試験は取放水管より土被りが浅く、低拘束圧条件での結果である。ただし、地盤の剛性および強度の拘束圧依存性はDuncan-Chang法で考慮されるため、低拘束圧の影響は解析に反映されており、シミュレート上は問題ないと考えられる。

(2) 実規模試験に基づくFEMの適用性評価

実規模試験は火力発電所の取水管を対象として行った。鋼管は、材質:SM490、直径D:2800mm、管厚t:24mm(径厚比D/t=110)とし、土被り2.0mで埋戻した。

埋戻し状況は図-2に示す通りである。埋戻し土には細粒分混じり砂($F_c=9\%$)を用い、締固度90%以上となるよう水締めや転圧ローラーにより締固めた。計測は、管の変形量(4方向)およびひずみ(8方向)について、管設置時から1時間ごとに行い、埋戻し過程における管の挙動を詳細に把握した。さらに、埋戻し後に地表面に簡易舗装(碎石層:20cm、アスファルト舗装:5cm)を施し、車輛(トラック総重量300kN)上載時の管の挙動も併せて計測した。車輛は図-10(a)に示す輪荷重分布であり、後輪位置下が計測断面の直上となるように配置した。

管の変位分布および曲げひずみ分布の推移を表-8に

表-9 解析モデル(実規模試験,段階1~段階2)

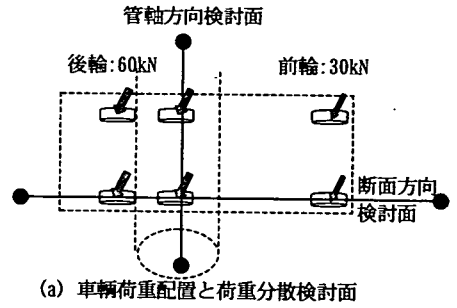
段階	状況	メッシュ図
1	左側:管側+40cm, 右側:管頂+200cm	ジョイント要素 埋戻土 原地盤
2	管頂+200cm (埋戻し完了)	

表-10 実規模試験の解析条件

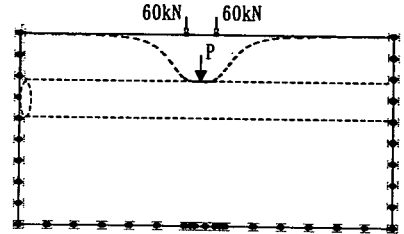
鋼管	剛性	206 (GPa)									
	ポアソン比	0.3									
地盤	剛性	埋戻土	DC法								
			<table border="1"> <tbody> <tr><td>c</td><td>6.9 (kPa)</td></tr> <tr><td>ϕ</td><td>34.3 (°)</td></tr> <tr><td>K</td><td>484</td></tr> <tr><td>n</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>Rf</td><td>0.91</td></tr> </tbody> </table>	c	6.9 (kPa)	ϕ	34.3 (°)	K	484	n	0.87
	c	6.9 (kPa)									
	ϕ	34.3 (°)									
K	484										
n	0.87										
Rf	0.91										
	原地盤	6.0 (MPa)									
	ポアソン比	0.35									
	単位体積重量	19.1 (kN/m ³)									
ジョイント要素	c	0.0 (MPa)									
	ϕ	20 (°)									

示す。変位分布では変形量の半分を計測位置両端の変位とした。本試験では片側が先行して埋戻されたため偏圧が作用し、45° および315° 方向の変位や曲げひずみが大きくなっている(段階1)。また、埋戻し終了後(段階2)も偏圧の影響が残っており、均等に埋戻す場合とは異なる挙動を示している。車輛上載時(段階3)では、埋戻し終了後から管頂ひずみがわずかに(10 μ 程度)変化した以外は、変位、ひずみともほとんど変化しなかった。

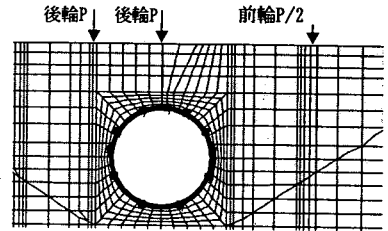
この実規模試験を対象にFEM解析を行った。厳密に埋戻し過程(段階1~段階2)を再現するため、表-9に示すモデルによるステップ解析とした。車輛上載時(段階3)には、図-10(c)に示す解析モデルを用いた。なお、ここでは、輪荷重が3次元的に分散すると考えられるため、次のように奥行き方向の分散を考慮した。図-10(b)に示すように、管軸方向を対象に後輪同軸の2輪分の荷重を与えたモデルを別途作成し、管頂位置での鉛直圧力を求め、この圧力を図-10(c)に示す断面方向のモデルの輪荷重位置に作用させた。また、前輪の荷重は後輪荷重の1/2となっている。



(a) 車輛荷重配置と荷重分散検討面



(b) 管軸方向の荷重分散検討モデル



(c) 管断面方向の解析モデル(荷重載荷位置拡大)

図-10 車輛荷重配置と段階3の解析モデル

解析条件を表-10に示す。本解析も、埋戻し地盤の非線形性をDuncan-Changモデルを用いて考慮した。非線形パラメータは、実規模試験の締固め状況(締固度92%)を再現した3軸試験結果に基づいて設定した。

解析結果を計測結果と併せて表-8に示す。本表より、変位分布は全段階で計測値を良好に再現している。一方、曲げひずみ分布では、計測値と比較してやや差異がある箇所も見られる。しかしながら、変化の大きい45°や315°の方向では計測値をほぼ再現しており、FEMの設計への適用性は十分であると考えられる。

(3) 現行設計手法との比較によるFEMの有効性の検討

ここでは、現行設計の構造解析手法に沿って実規模試験の車輛上載時での管の変形とひずみを算定し、実測値やFEMによる解析値と比較した。現行設計手法には図-1に示すSpanglerの提唱する土圧モデルを用いた。その際、管頂部の鉛直荷重には図-10に示すFEMにより得られた管頂鉛直土圧を、地盤反力係数には実規模試験での管側位置の応力レベルに相当する地盤剛性(=16.5MPa)を用いた。

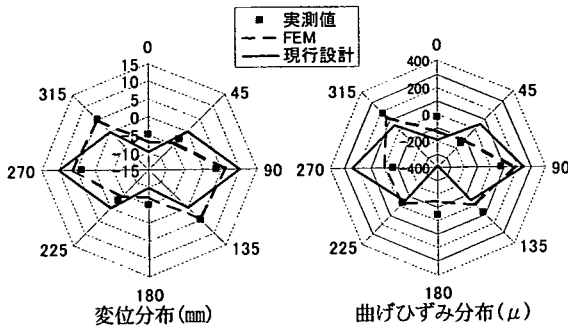


図-11 現行設計手法とFEMの比較(実規模試験, 車輛上載時)

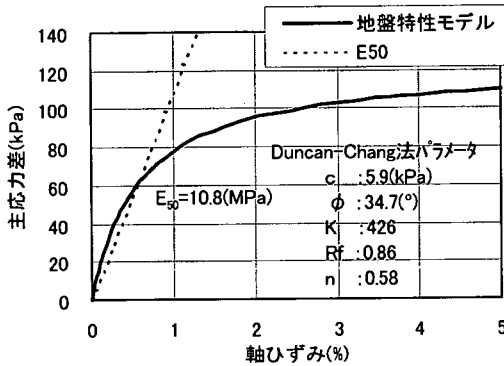


図-12 設計で考慮する地盤特性

現行設計手法による算定結果を、先に述べた実測値およびFEM解析結果と併せて図-11に示す。現行設計では全体的に計測値との乖離が大きいことに加え、管底でひずみが最大となるなど、ひずみの分布形状も異なっている。一方、FEMでは現行設計と比較して実測値により近い状態が再現されており、FEM解析の有効性が確認されたと考えられる。

7. 試設計による合理化の検証

今回提案する設計手法(以下提案設計手法とする)により取放水管の試設計を行うとともに、その結果と現行設計手法による結果を比較し、その合理性を検証した。ここでいう提案設計手法とは、これまで述べてきたとおり、設計体系を限界状態設計法とし、構造解析には非線形FEM解析を用いた手法を指している。試設計の条件を表-11に示す。荷重ケースは大物搬入時を想定した。

提案設計手法では地盤の非線形性を考慮するため、図-12に示す主応力差-軸ひずみ関係を、管と地盤の境界には、表-10に示すジョイント要素を用いた。照査は表-2に示すとおりとした。

試設計結果を表-12に示すが、提案設計手法では管

表-11 試設計の条件

鋼管	直径	2.8m
	材質	SS400
荷重	荷重ケース	搬入時
	上載荷重 (載荷エリア)	4500kN (3m×9m)
埋戻地盤	土被り	2.0m
	土質	砂質土
	単位体積重量	19.1kN/m ³
	締固度	90%

表-12 提案設計手法の概要および試設計結果

設計法	設計体系	限界状態設計法
	構造解析手法	非線形FEM解析
試設計結果	設計管厚	16mm
	終局限界状態の照査結果	発生応力 σ : 213 Mpa (管頂) 降伏応力 σ_y : 235 Mpa $\therefore \gamma_i \times \gamma_a \cdot \sigma / (\sigma_y / \gamma_u)$ $= 1.0 \times 1.0 \times 213 / (235 / 1.1)$ $= 0.99$ OK
	使用限界状態(管の変形)の照査結果	発生変形量 δ : 12.6cm 限界変形量 δ_u : 14.0cm $\therefore \gamma_i \times \gamma_a \cdot \delta / \delta_u$ $= 1.0 \times 1.0 \times 12.6 / 14.0$ $= 0.90$ OK

厚16mmで終局限界状態および使用限界状態(管の変形)の照査を満足した。なお、管体に作用する応力は管頂部分で最大となり、土槽試験と同じく上載荷重が卓越する場合の特徴を再現している。

現行設計手法ではSpanglerの土圧モデルを用い、管頂部の鉛直荷重はFEMから求めた管頂鉛直土圧を設定し、地盤反力係数は図-12に示す E_{50} とした。照査は許容応力度法(常時の安全率1.7に割増係数1.5を考慮)に基づいて行った。その結果、管厚30mmで発生応力度 σ (=206MPa)が許容応力度 σ_a (=207MPa)以下となった。なお、管体に生じる応力は管底で最大となっており、FEMの結果とは異なっている。

両手法により算定された必要管厚は、以下のとおりである。

①提案設計手法による必要管厚 : 16mm

②現行設計手法による必要管厚 : 30mm

提案設計手法による必要管厚は、現行設計手法のおよそ半分となっている。これは、「取放水管に固有の条件を反映した限界状態や部分安全係数の設定」および「構造解析手法の高度化」によって達成できた結果であるといえる。本例では、特にFEMを用いることにより、取放水管の発生応力および変形を精度良く解析した効果が顕著に現れていると考えられる。

8. 結論

取放水管の断面方向の設計合理化を目的とし、限界状態設計法を導入した。その基本的な考え方を示すとともに、構造解析手法としてFEMの適用性について検討した。また、提案する手法を用いて試設計を行い、合理化の検証を行った。本研究で明らかとなった事項は、次のようにまとめられる。

- ①取放水管の要求機能を満足できる限界状態を明確化した。すなわち、取放水管の特徴を考慮し、終局限界状態として断面降伏を、使用限界状態として内面塗装の損傷および管体の過大な変形をそれぞれ設定した。また、照査に用いる限界値は、取放水管を模したモデル実験に基づき設定した。
- ②部分安全係数は、設計における各段階の不確実性を要因別に分離し、5種類の安全係数(材料 γ_m 、部材 γ_b 、荷重 γ_l 、構造解析 γ_a 、構造物 γ_i)を設定した。既往の材料試験、品質管理試験のデータを定量的に評価し、取放水管固有の値として設定した。
- ③取放水管では、発電所特有の重量物が荷重として作用するため、地盤が非線形化するとともに、管挙動にもその影響が表れることを、土槽モデル試験に基づき明らかにした。
- ④構造解析として非線形FEMの適用性を、土槽モデル試験や実規模試験の結果に基づいて評価した。その結果、適切なモデルを用いて地盤の非線形性を考慮することにより、上載荷重が大きい場合も含め、埋戻し時から載荷時の管挙動(変形、応力)を良好に再現できることを確認した。
- ⑤取放水管のように、特に綿密な締固めにより埋戻される埋設管では、現行設計で用いているSpanglerの土圧モデルとは異なる土圧分布を示すと考えられ、管の変形モードが異なるなど、現行設計での解析結果と実現象との乖離が大きいことが認められた。
- ⑥提案設計手法を用いた試設計により、現行設計法と比較して大幅に管厚が削減でき、合理化が達成できる可能性を示した。

ここで達成した合理化は、構造解析手法としてFEMを用いるとともに地盤特性を適切に評価していることに起因しているところが大きい。したがって、本手法を適用する場合には、埋戻し地盤の特性に対する施工時の品質管理が重要となる。換言すれば、綿密な締固め管理など高い水準の施工を行う見返りとして、このような合理化が実現されるものである。

今後、これらの品質管理データの蓄積を図るとともに、さらに合理的な地盤特性の設定法についても検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本水道鋼管協会：水道用埋設鋼管の管厚計算規準，WSP 030-99，pp.1-30，1999.
- 2) Spangler, M.G.: Stresses in Pressure Pipelines and Protective Casing Pipes, *Journal of Structural Div.*, ASCE, Vol.82, No.ST5, pp.1054-1-1054-33, 1956.
- 3) 吉村洋，東田淳，李黎明：遠心模型によるたわみ性埋設管の土圧・変形挙動の検討，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.245-255，1997.
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，pp.71-81，1997.
- 5) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，JGA指-206-00，pp.1-50，2000.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編，pp.70-97，1996.
- 7) 川島正史，金子雄一，原田光男，津田守：鋼管に対する内面塗装の変形追従性に関する実験的検討，第44回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集，pp.161-162，2000.
- 8) 鋼・コンクリート共通構造設計基準小委員会：鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則，土木学会論文集，No.450/I-20，pp.13-20，1992.
- 9) 土木学会：座屈設計ガイドライン，pp.37-41，1987.
- 10) 日本建築学会：鋼構造物限界状態設計基準案，pp.204-209，1990.
- 11) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計，pp.158-162，1994.
- 12) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 溶接・接合編，pp.79-83，1994.
- 13) 古川園健朗，福田聡之，山本義昭：たわみ性埋設管の現場変形計測による挙動分析，土木学会第55回年次学術講演会第III部，III-B166，pp.330-331，2000.
- 14) 猿渡良一：パイプラインシステムハンドブック，山海堂，pp.313，1998.
- 15) 川島正史，野本高憲，高橋守男：たわみ性埋設管の埋戻し時および載荷時の挙動に対するFEM解析，土木学会第54回年次学術講演会第III部，III-B141，pp.282-283，1999.
- 16) Sharma, H. D., Nayak, G. C. and Maheshwari, J. B.: Generalization of sequential nonlinear analysis A study of rockfill dam with joint elements, *ASCE 2nd Int. Conf. of Numerical Methods in Geomechanics*, pp.662-685, 1970.
- 17) Duncan, J. M. and Chang, C. Y.: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, *Journal of Soil Mech. Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653, 1970.

(2001.8.21 受付)

RATIONAL CROSS SECTIONAL DESIGN METHOD FOR BURIED WATER SUPPLY PIPELINE OF POWER STATION

Masashi KAWASHIMA, Mamoru TSUDA, Yuichi KANEKO and Mitsuo HARADA

The cross sectional design method for buried water supply pipeline of thermal power stations is studied. Limit state design is introduced to establish rational design method, and the design requirements as well as related limit states for the pipeline are investigated. Moreover several partial safety factors are proposed under the consideration of the loads combination and the uncertainties for load action, material property, and construction. In addition, non-linear FEM, in which soil property and interaction of steel pipe and surrounding ground are adequately calculated, is also introduced as rational analysis procedure. Finally the proposed design method is verified based on the data of experiments and field measurements.