

## 埋設下における馬蹄形管の挙動解析

Behavior Analysis of Buried Horseshoe-shaped Pipes

井上孝治\* 裕昌也\* 毛利栄征\*\* 田中忠次\*\*\*

Kouji Inoue, Masaya Hazama, Yoshiyuki Mohri Tadatsugu Tanaka,

地盤中のとう性管の挙動として、円形管についてはこれまでにさまざまな検証がなされてきた。一方、馬蹄形管については、検証例が少なく未解明な部分が多い分野である。そこで、本研究では円形管との挙動の違いを明らかにするため、土槽試験装置を製作し、土圧荷重および外水圧に対する埋設管の挙動の違いを確認した。またFEM解析プログラムを用いて、各種試験について解析計算を行い、試験結果との比較、検証を行ったところ、同様の挙動を示す結果が得られ、本問題に対し、FEM解析プログラムの有効性が確認された。

Various methods of verification have been studied in order to understand the sagging behavior of round-shaped pipes. On the other hand, there are many unclear points and only a few examples concerning the behavior of horseshoe-shaped pipes. In this paper, in order to clarify the differences in behavior between horseshoe-shaped pipes and round-shaped pipes, loading tests and water pressure tests were conducted using the soil equipment of the model tunnel. In addition, an FEM program was used for the analysis of the aforementioned tests. As a result of comparing this analytical (calculated) data against test (experimental) data, the effectiveness of the FEM program was verified.

## 1. はじめに

コンピュータの進歩によって、今日では有限要素法(FEM)が構造計算として有効な手段の1つとなっている。その中でも1968年Clough&Woodwardがアースダムの有限要素解析を行って以来、FEMによる地盤の応力、変形解析に関する研究が活発になされるようになった。従来、解析が困難であると考えられてきた非線形問題などに対しても適用する事が可能となってきており、土質工学分野の構造物基礎、トンネル、ダム、斜面などの非線形問題に対しても適用されている。

しかしながら、実際の土質工学の諸問題に有限要素法を適用するにあたっては、ほとんどが破壊問題と結びついているため非線形性が著しくなる。また、限界荷重はピーク荷重のみで常に決定されるわけではなく、ピーク荷重以降における応力-ひずみ関係(ひずみ軟化)を解析に取り入れる事が重要である。例えば、過圧密粘土・密詰め砂等ではピーク荷重値を示した後、ひずみ軟化を示す。そのため、FEMによって適切な崩壊荷重の評価を行うには、ひずみ軟化等を考慮に入れる必要がある。また、ひずみ軟化が生じるとせん断帯が形成されるため、せん断帯を考慮に入れた解析モデルを用いる必要がある<sup>1)</sup>。

さらに、地盤・土質構造物の変形様式には、材料の非線形性に加えて有限変形に起因する幾何学的非線形性が付随しているのが実態である。実際の解析では、材料の非線形性のみを考慮しているに過ぎない場合が多いが、大変形に伴う幾何学的非線形性を無視すると得られた結果が実際の現象から大きく外れてしまう場合がある。通常

は、微小変形による解析結果で十分な場合が多いが、せん断帯の発生機構の解明、擁壁構造物に関する受動土圧問題、埋設構造物の座屈破壊問題では、幾何学的非線形性を無視することはできない。

そこで本研究では、とう性管である強化プラスチック複合管を用いた2R馬蹄形管の鞘管工法における、土被りや外水圧に対する挙動についてFEM解析を行い、模擬土槽試験結果との比較、検証を行った。

## 2. 模擬土槽試験

地盤中のとう性管の挙動として、円形管についてはこれまでにさまざまな検証がなされてきた。一方、馬蹄形管については、検証例が少なく未解明な部分が多い分野である。そこで、本試験では円形管との挙動の違いを明らかにするため、模型管(呼び径150)を製作し、埋設時の挙動の違いを検証した。

試験に使用した土槽試験装置を図1および図2に示す。呼び径150の模型管(円形および馬蹄形)を土槽中央に配置し、周囲を豊浦標準砂で充填した。充填に際しては、地盤の相対密度が90%になるように重力落下式五段ふるいを用いて一定高さから投入する手法を用いた。また、土槽壁面と標準砂との摩擦を低減するために、シリコングリスを塗布後、ラテックスメンブレンを貼り付けた。

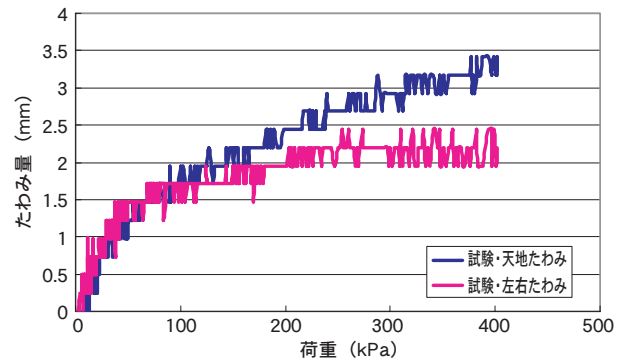
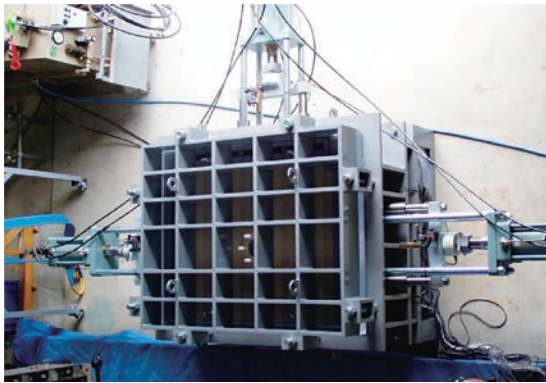
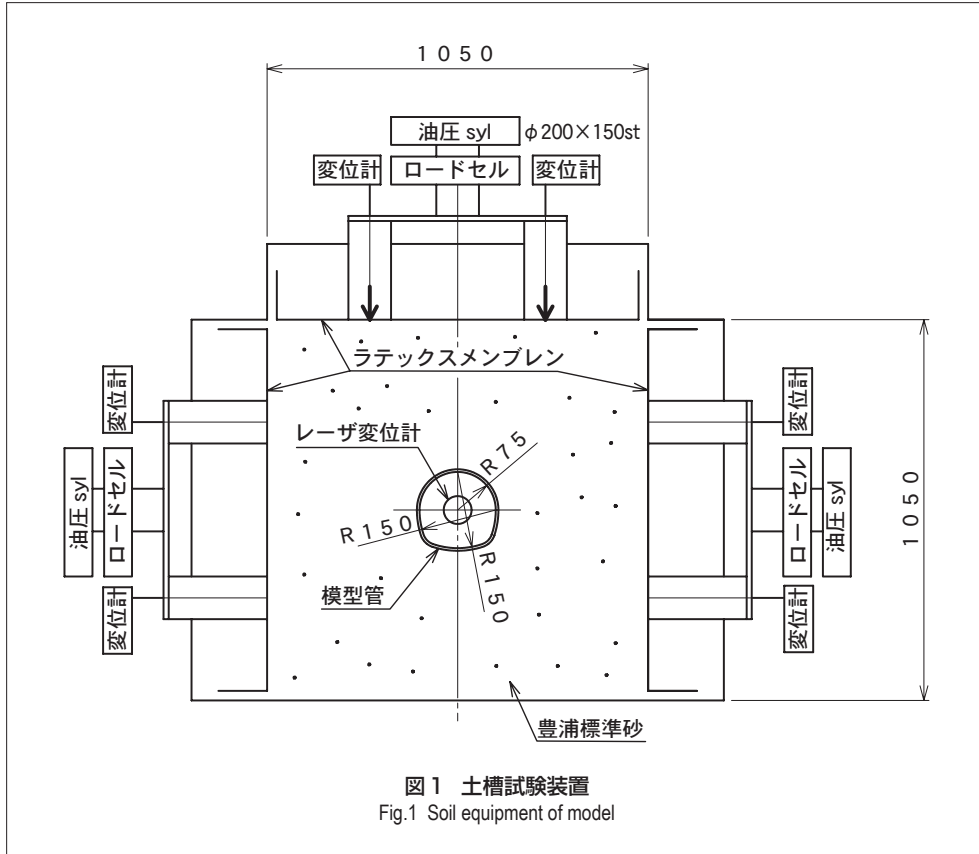
## 2.1 土圧荷重試験

載荷重は管上部から油圧シリンダによる一定変位量(0.05mm/sec)の速さとし、管の挙動測定は管に発生するひずみ量および変位量(レーザー変位計で測定)と管壁に作用する土圧(載荷重)を測定した。なお、模型管は厚みを呼び径の2%、長さを土槽高さと同じ400mm、

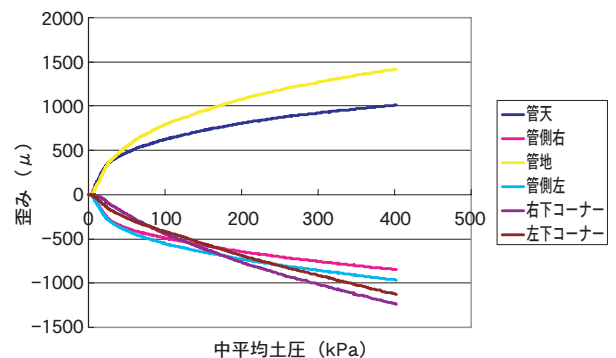
\* 栗本化成工業(株)技術部

\*\* (独)農業工学研究所

\*\*\* 東京大学大学院農学生命科学研究科



材質をFRPとした。載荷重の最大値については垂直土圧公式で土被り約20mに相当する400kPaとした。試験結果として、荷重-たわみ線図を図3に、管に発生したひずみの状態を図4にそれぞれ示す。図3を見ると、通常円形管では天地たわみと左右たわみがほぼ同じ値を示すのに対し、馬蹄形管においては天地方向たわみが大きく、左右たわみが小さくなっている事が確認された。これは馬蹄形の2R部分に当たるインバート部および側面下部において砂地盤からの反力が大きいためであり、その影響によって、インバート部ではたわみが大きくなり、側面下部ではたわみが抑えられたと考えられる。また、図4より管天・管地部分に加えて、コーナーR部においても大きなひずみが発生している事が確認された。



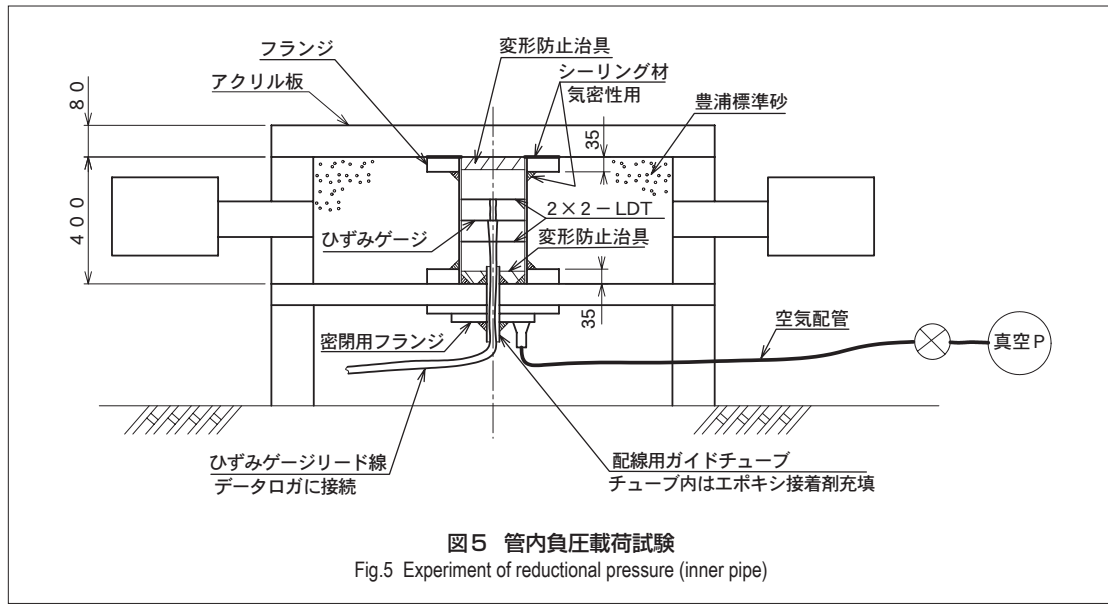


図5 管内負圧荷重試験

Fig.5 Experiment of reductional pressure (inner pipe)

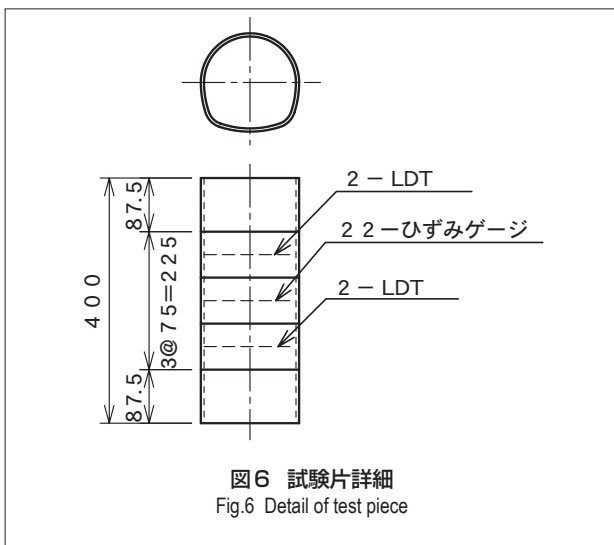


図6 試験片詳細

Fig.6 Detail of test piece

2.2 座屈試験

管に作用する外力として、荷重以外に外水圧が挙げられる。ここでは前節と同じ模型土槽試験機を用いて座屈挙動の確認を行った。

試験は水圧ではなく、真空ポンプを使用して、管内面に負圧荷重を与える事により座屈挙動の確認を行った。装置全体は図5のとおりであるが、管は両端の拘束力の影響をなくすため、5分割したものを使用した(図6)。また、密閉状態を保持するために、管体の周囲はラテックスメンブレンを被せた。

管のひずみ量は前節同様に測定するものとし、たわみ量についてはLDTを使用して、管の天地、水平およびクロス方向(両側)を測定した。

試験では座屈はインバート部のみが急激に管内面側に

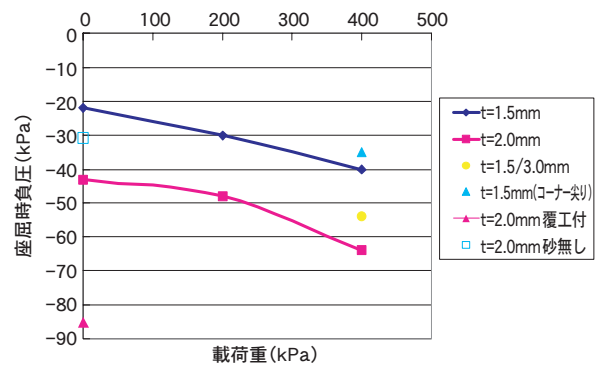


図7 荷重 - 負圧関係(座屈時)

Fig.7 Relation of load reductional pressure (Buckling mode)

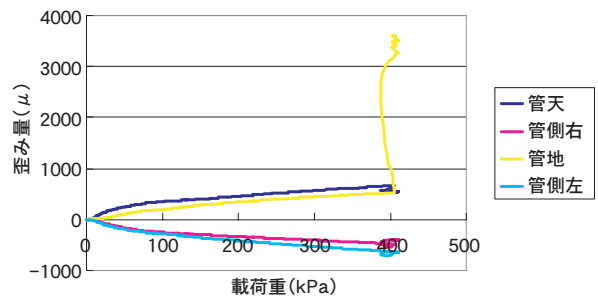


図8 荷重 - ひずみ関係(400kPa荷重時)

Fig.8 Relation of load reductional pressure (400kPa Loading)

膨らむ現象が確認でき、厚みが1.5mmのものは大半が割裂的に破壊する現象が確認された。また、座屈挙動は図7および図8に示すように管内に取り付けたひずみゲージとLDTの計測結果から、前述したインバート部の現象を裏付けしている。

表1 解析パラメータ  
Table 1 Parameter of analysis

メッシュパラメータ	
メッシュ形状	縦10.5cm, 横 5 cm
メッシュ数	要素数9, 節点数16
要素種類	4 節点アイソパラメトリック要素
豊浦標準砂パラメータ	
相対密度	$D_r = 90\%, 60\%, 30\%$
初期せん断弾性係数	$G_0 = 78.5\text{MPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
密度	$\rho = 1.6\text{g/cm}^3$
ピーク時の内部摩擦角	$\phi_p = 48^\circ$
残留内部摩擦角	$\phi_r = 34^\circ$
荷重条件	
荷重増分	$\sigma_1 = \sigma_3 = 4.9\text{kPa}$
荷重上限	$\sigma_1 = \sigma_3 = 98\text{kPa}$
強制変位増分	0.00005 cm
強制変位上限	1.0 cm

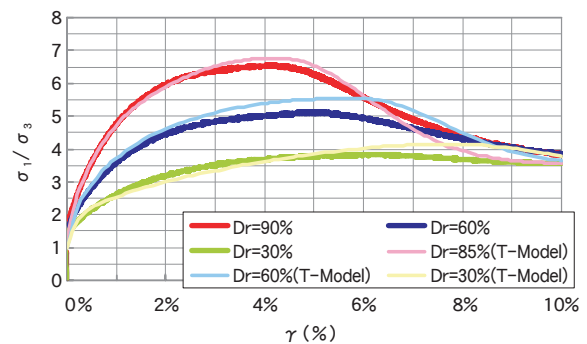
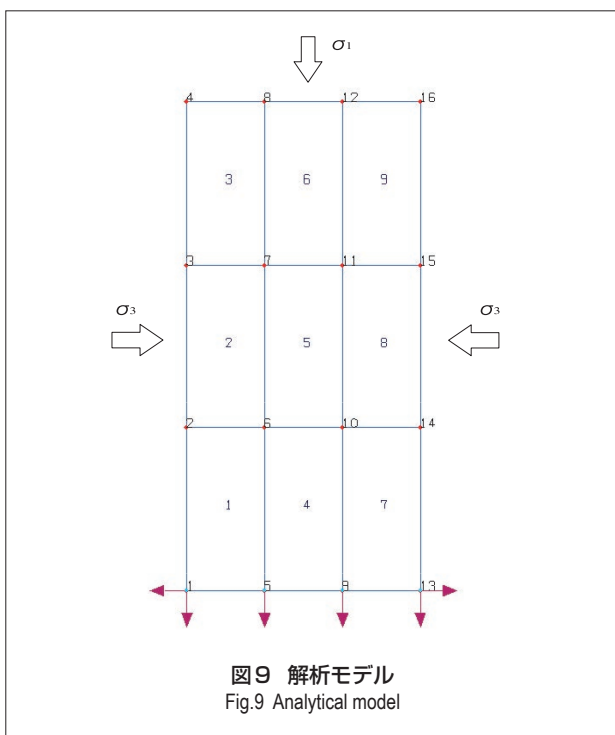


図10 応力比 - せん断ひずみ線図(拘束圧98kPa)  
Fig.10 Stress ratio shear strain diagram

浦標準砂の要素試験をモデリングした三軸圧縮試験問題およびFRP管の外圧試験について解析を行い、その後模型土槽試験モデルにおける砂地盤を介したFRP管の載荷問題について検討を行った。

### 3.1 予備解析

#### 3.1.1 平面ひずみ圧縮問題

豊浦標準砂の三軸圧縮試験を二次元にてシミュレートした平面ひずみ圧縮問題を検討した。解析モデルおよび解析条件を図9に示す。また、解析に使用したパラメータを表1に示す。境界条件は、図9における下面(節点番号1、5、8、13)を赤色の矢印が示すように鉛直方向拘束し、下面両端(節点番号1、13)については、水平方向も拘束している。上面及び左右両面より5.0kPa刻みにて100kPaまで面荷重を与え、その後100kPaの拘束圧を保持した状態で上面(節点番号4、8、12、16)に鉛直方向の強制変位を与えた。解析結果として、応力比 - せん断ひずみ関係について図10に示す。解析結果より相対密度が高い程、応力比が高くなり、実験より導かれた構成式による値<sup>3)</sup>(T-Model)と同様の傾向を示す結果が得られた。

## 3. FEM解析

FEM解析プログラムは「Nonsolan」<sup>2)</sup>を使用した。本プログラムでは、通常のFEM解析で行う剛性マトリックスを構成した後、大規模な連立方程式を解くという方法を用いず、剛性マトリックスを使用しない動的緩和法を適用している。また、リターンマッピング法を併せて用いる事により、非線形解析において安定した解を得る事ができ、計算効率が向上するというメリットを持つ。さらに材料非線形に加え、大変形問題に伴う幾何学的非線形にも対応している。

本研究では、まず予備解析として砂地盤に使用する豊

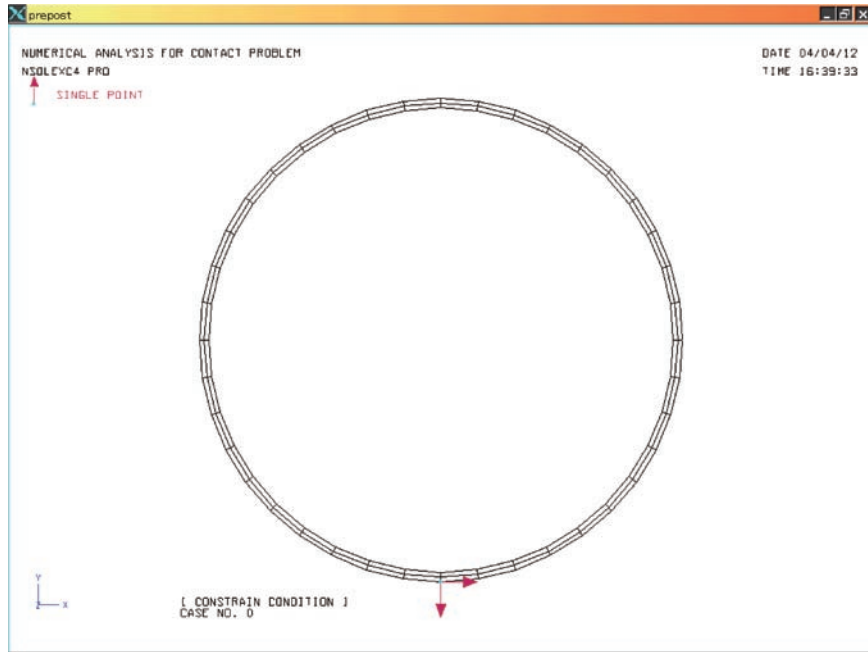


図11 解析モデル  
Fig.11 Analytical model

表2 解析パラメータ  
Table 2 Parameter of analysis

弾性係数	14.7G Pa
ポアソン比	0.3
密度	1.8 g/cm <sup>3</sup>
形状	φ 150 (管厚 = 3mm)
メッシュ分割数	周方向分割 40, 径方向分割 2

表3 解析結果と理論解との比較 (最大左右たわみ)  
Table 3 Comparison of analysis and theory

解析番号	解析結果 (mm)	理論解 (mm)	Error (%)
en1-1	10.279	9.631	6.7

### 3.1.2 FRP管外圧試験

管体圧縮試験をモデル化して解析を行い、理論解との比較を行った。解析モデルおよび解析条件を表2および図11に示す。また水平方向たわみの理論解  $\delta$  は以下に示す式より求めている。

$$\delta = -0.137 \cdot \frac{P \cdot r^3}{E \cdot I} \quad (1)$$

ここで、P：荷重

r：管圧中心半径

E：弾性係数

I：断面2次モーメント

荷重は10kPaごとに最大500kPaまで載荷し、下端1点のみ鉛直および水平の両方向の変位を拘束した。以上の条件にて行った解析結果として、理論解との比較を表3に、荷重 - 変位図および変位モード図を図12および図13に示す。表および図をみると、理論値との比較においては左右たわみ量で数%と小さな誤差となっており、たわみのモードにおいても表現できている事が確認された。

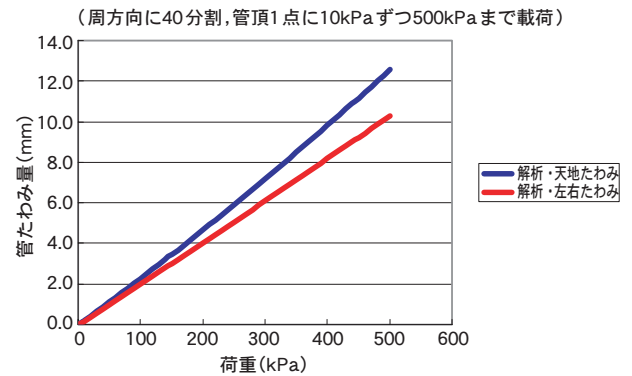


図12 荷重 - たわみ線図  
Fig.12 Load displacement diagram

### 3.2 模型土槽試験モデルの解析

前節までの結果を踏まえて、模型土槽試験をモデル化し、砂地盤を介したFRP管の載荷問題として土圧載荷問題および外水圧問題について検討を行った。

#### 3.2.1 土圧載荷問題

模擬土槽試験モデルによる土圧載荷試験をモデル化して解析を行い、試験結果と比較、検証を行った。解析モデルは呼び径150の2R馬蹄形FRP管で図14に示すように、左右対称な構造である事から、半断面のみをモデル化している。本モデルに対し、上面より、10kPa刻みにて400kPaまで面荷重を与えた。また拘束条件は、図14

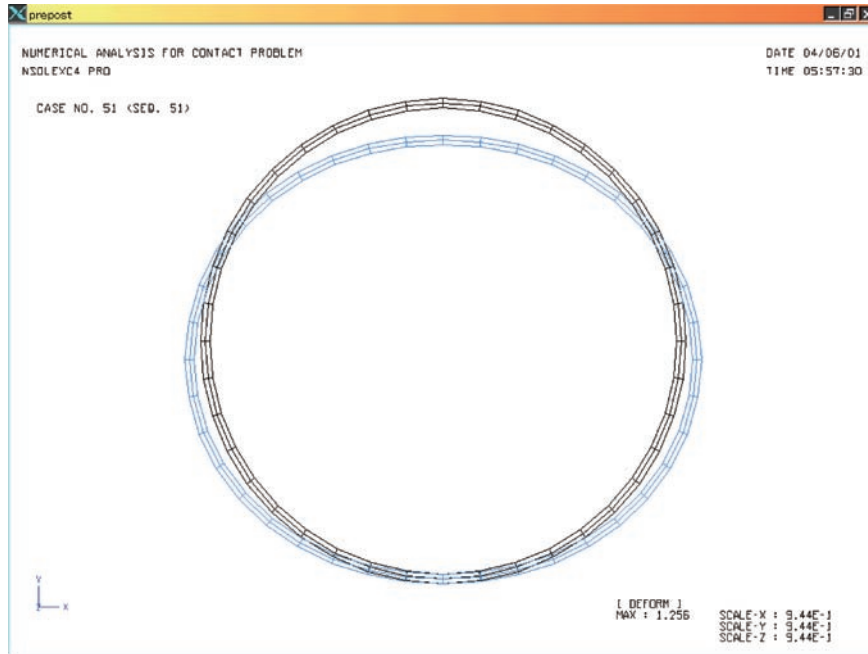


図13 変形モード  
Fig.13 Transformation mode

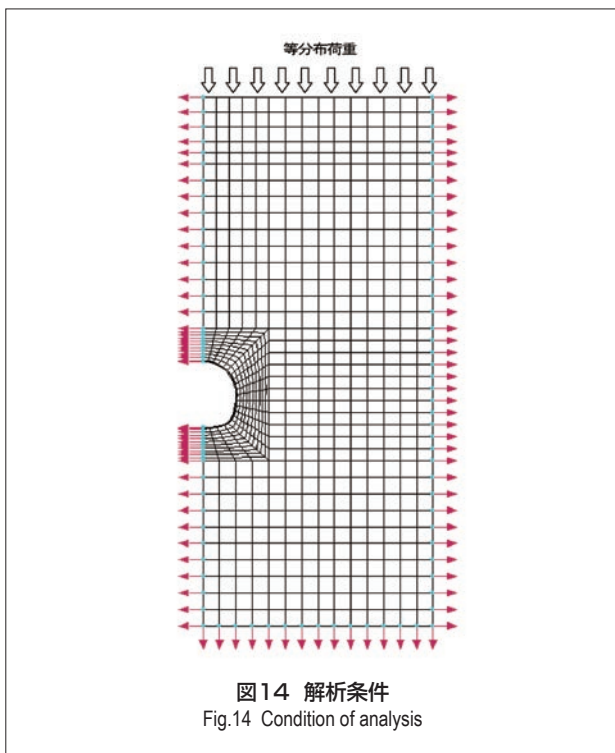


図14 解析条件  
Fig.14 Condition of analysis

における赤色の矢印で示しており、半断面部および上面以外の各周囲を矢印の方向に拘束している。

解析結果として、図15に合成変位モード図を示すが、載荷面での変位がFRP管に到達するまでに砂地盤に載荷重が吸収され、管体付近ではおよそ半分程度の変位量となっている事が確認できる。また管体周辺の砂地盤は、FRP管の変形に追随する形で変化する様子が確認された。次に最大主応力のコンター図を図16に示すが、FRP

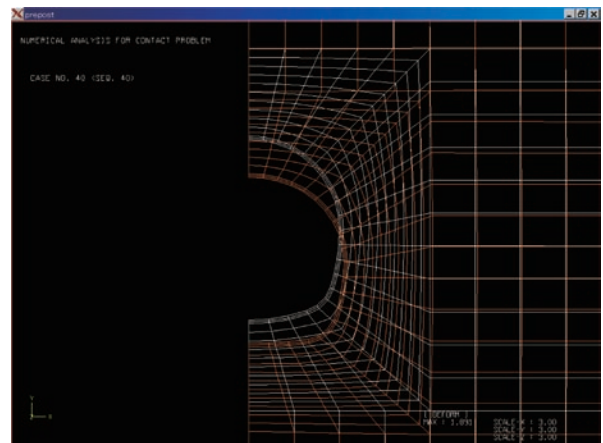


図15 変形モード図  
Fig.15 Transformation mode



図16 主応力コンター図  
Fig.16 Principal stress diagram

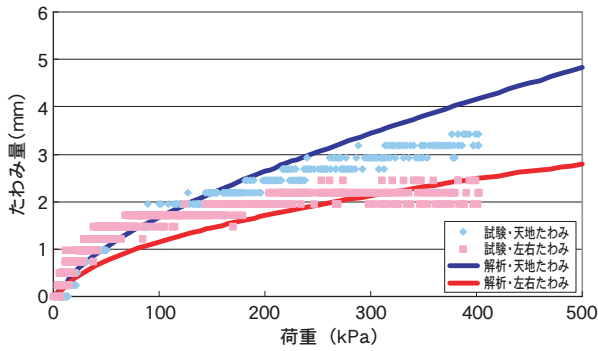


図17 荷重-たわみ線図  
Fig.17 Load displacement diagram

表4 解析パラメータ  
Table 4 Parameter of analysis

豊浦標準砂パラメータ	
相対密度	$D_r = 90\%$
初期せん断弾性係数	$G_0 = 9.8\text{MPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
密度	$\rho = 1.6\text{ g/cm}^3$
ピーク時の内部摩擦角	$\phi_p = 48^\circ$
残留内部摩擦角	$\phi_r = 34^\circ$
馬蹄形塩ビ管パラメータ	
呼び径	150mm
弾性係数	$E = 2.9\text{GPa}$
ポアソン比	$\nu = 0.3$
密度	$\rho = 1.4\text{g/cm}^3$
管厚	$T = 1.5\text{mm}$

管およびその周辺に応力が分布しており、特にコーナーR部周辺に集中して応力が発生している事が確認された。またFRP管のクラウン部及びインバート部においても応力の発生が確認された。さらに図17に荷重-変位関係における試験および解析結果の比較を示す。グラフをみると、模擬土槽試験結果である点が帯状を示しているが、これは測定時のばらつきによるものである。本グラフより、試験結果と解析結果が同様の曲線を描いており、近い値を示している事から、砂地盤を介したFRP管の載荷問題に対して本解析プログラムが有効である事が確認された。

### 3.2.2 外水圧問題

前章にて行った管内負圧載荷試験をモデル化して解析を行い、試験結果と比較検証し、管の座屈挙動について確認した。解析モデルは、要素数695、節点数762で4点アイソパラメトリック要素にて構成されている。解析に用いたパラメータを表4に示す。載荷条件および拘束条件は図18に示すとおりで、下面を鉛直方向拘束し、側面を水平方向拘束している。また、水平方向に軸対称な形状である事から、半断面形状のみのメッシュとし、対称軸面を水平方向拘束している。上面より、10kPa刻みにて400kPaまで等分布荷重を与え、保持した状態で負圧荷重として管外面に対し管中心方向に5kPa刻みに

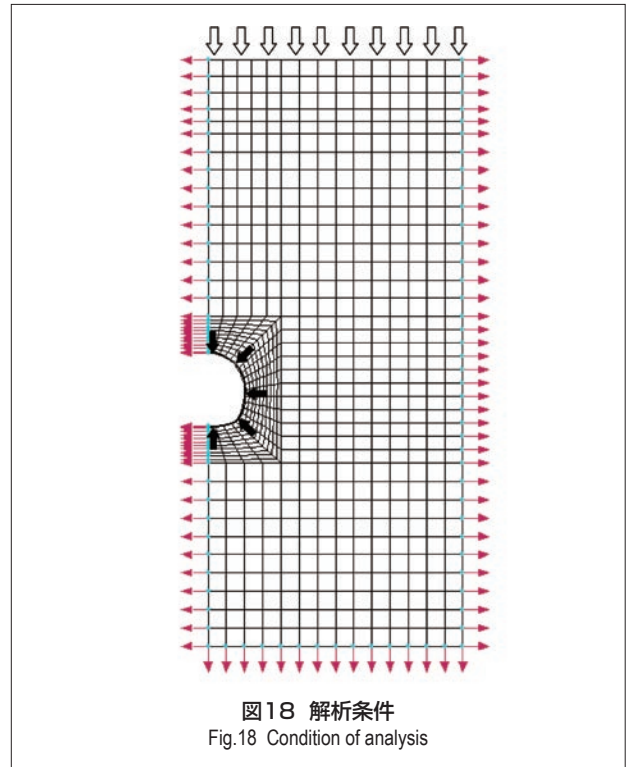


図18 解析条件  
Fig.18 Condition of analysis

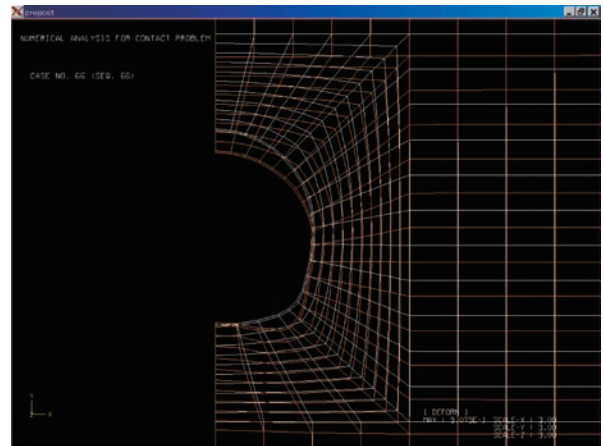


図19 変形モード図  
Fig.19 Transformation mode

て100kPaまで荷重を与えた。図18における赤色の矢印が拘束方向を、白抜き矢印が上載荷重を、黒矢印が管外面荷重をそれぞれ示している。

解析結果として、図19に合成変位図を示す。上載等分布荷重400kPaを載荷後、管外面荷重95kPaを負荷した塩ビ管の座屈破壊直前状態における合成変位であるが、上載荷重による変位については、図21に示すようにFRP管のたわみと同様の傾向を示している。外水圧荷重による塩ビ管周辺の変位を見ると、曲率半径の大きいインバート部において管内面への凹みが見られ、座屈モードを示している事が確認された。また、最大主応力コンター図を図20に示すが、塩ビ管およびその周辺に応力が分布しており、特にコーナーR部周辺に集中して応力が発生している事が確認された。また、塩ビ管のインバート部においても座屈モードによる応力の発生が確認された。

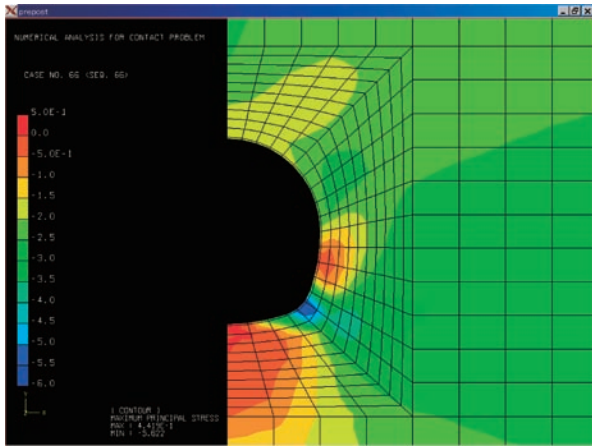


図20 主応力コンター図  
Fig.20 Principal stress diagram

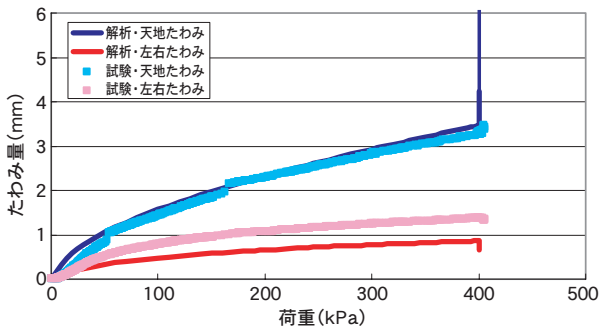


図21 荷重 - たわみ線図  
Fig.21 Load displacement diagram

#### 4. まとめ

前述の試験結果および解析結果より次の事が明らかとなった。

- 1) 土槽試験装置にて馬蹄形FRP管の土圧载荷試験を行ったところ、インバート部において大きな変形を生じる傾向が確認された。
- 2) 外水圧を考慮した負圧载荷試験を馬蹄形塩ビ管を使用して行ったところ、インバート部において座屈破壊が確認された。
- 3) 豊浦標準砂による平面ひずみ圧縮問題について解析を行い、実験により導かれた構成式の値と比較および確認を行った。その結果、相対密度が高い程応力比が高くなり、ひずみ軟化状態についても構成式による値と同様の傾向を示す結果が得られた。
- 4) FRP管の外圧試験をモデル化し解析を行ったところ、左右たわみ量において理論解と数%の誤差となり、たわみのモードにおいても表現できている事が確認された。
- 5) 土槽試験装置による土圧载荷試験をモデル化し、解析を行った。解析結果より、荷重 - 変位関係において試験結果と解析結果が同様の曲線を描いており、近い値を示す事が確認された。また、馬蹄形の特徴であるコーナーR部周辺に応力が集中する事も確認

された。

6) 外水圧問題を検討するため、管内負圧载荷試験をモデル化し解析を行った。解析結果と試験結果を比較したところ、インバート部における座屈モードの表現および、荷重 - 変位線図にて同様の傾向を示す事が確認された。

#### 5. おわりに

砂地盤を介した2R馬蹄形管への载荷問題において、模擬土槽試験における管の挙動を解析によって確認することができた。また、外水圧による管の座屈現象についても、馬蹄形特有の座屈モードを確認することができた。今後、実際の施工環境下と同様に既設トンネル覆工や中込材も考慮して解析を行い、実験との対比による評価を継続して行っていく。

#### 参考文献

- 1) 田中忠次：有限要素法による変形・安定解析(主として砂質土を対象として)、わかりやすい土質力学原論(第1回改訂版)、社団法人地盤工学会(1992)、pp.109-154
- 2) 田中忠次：“Nonsolan”FEMによる弾塑性構造解析プログラム、東京大学水利環境工学研究室
- 3) Bolton, M.D.: The Strength and Dilatancy of Sands, Geotechnique 36(1) (1987), pp.65-78

#### 執筆者

井上孝治

Kouji Inoue

平成9年入社

FRPM管の研究、開発に従事



裕 昌也

Masaya Hazama

平成元年入社

FRPM管の研究、開発に従事



毛利栄征

Yoshiyuki Mohri

農業工学研究所 土質研究室室長



田中忠次

Tadatsugu Tanaka

東京大学教授

