

パイプ式ウイングリブの耐荷性能に関する 基礎的実験

Fundamental Experiment about load-proof Performance of the Pipe Wingrib

中村貴章¹・木下泰範²・吉武勇³・進士正人⁴・山本稔⁵
Takaaki Nakamura, Yasunori Kinoshita, Isamu Yoshitake,
Masato Shinji and Minoru Yamamoto

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail:nakamura@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 マシノスチール株式会社 技術部 (〒733-0822 広島県広島市西区庚午中1丁目19-23)

³正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵フェロー会員 工博 東京都立大学名誉教授 (〒194-0041 東京都町田市玉川学園)

A comparison was made between examination and numerical analysis they placed and filled up with concrete in a steel pipe in conditions of restraining in the direction of its circumference. It has shown that the load performance is improved remarkably. In this research, the examination of the structure of corn-like steel pipe placed and filled up with concrete was conducted by applying a direct stress and circumferential stress (hoop stress) on it. Results of the experiment were considered to be used in design and construction of a pipe wing-rib in which it is one of auxiliary methods for reducing leg subsidence of the tunnel support.

Key Words : corn pipe, steel-concrete composite structure, hoop stress, wingrib

1. はじめに

トンネル施工において、地盤の地耐力不足から鋼製支保工脚部の沈下が生じる場合がある。その対策工として、ウイングリブによる支保工脚部の支持面積の拡大、吹付けコンクリートを使用した上半仮インバートによる仮閉合、脚部地盤へのフットパイルなどが挙げられる^{1)~2)}。

それらの対策工の中で、ウイングリブは最もよく採用される対策工であるが、事前加工が必要である上、支保工自身の重量が大きくなる欠点を有している。これに代替するものとして、著者らは、軽量で着脱可能な薄鋼板を用いた「パイプ式ウイングリブ」を提案している。これは、ウイングリブの代替としてコーン状の薄鋼板を支保工脚部に取付け、内部に吹付けコンクリートを充填することにより地山と早期支保工の密着性と脚部補強工法である支持面積の確保により地山支持力の増加を期待する(写真-1 参照)。

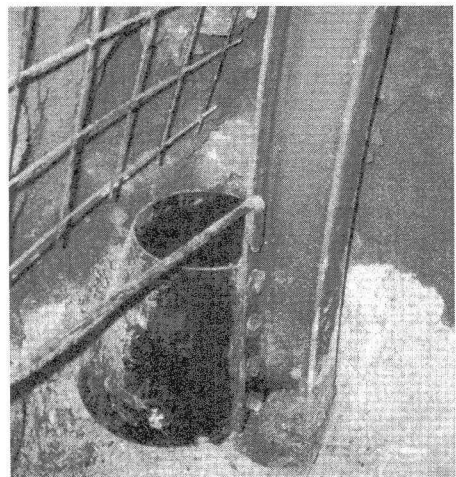


写真-1 パイプ式ウイングリブ

筆者らはこれまでに、パイプ式ウイングリブが従来型ウイングリブと同様以上の地山支持力を発揮することを確認してきた^{3)~7)}。本報告では、室内実験により、パイプ式ウイングリブそのものの支持メカ

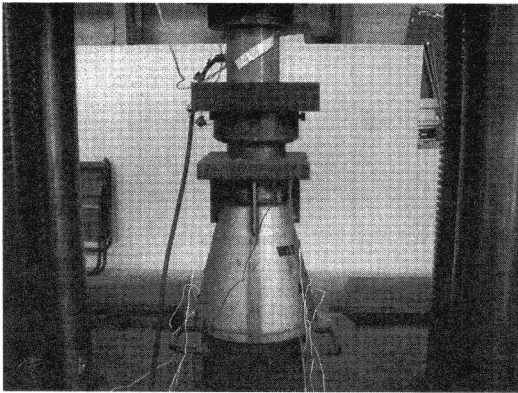


写真-2 コーン状鋼管の載荷状況

ニズムの把握を試み、さらなる合理的な形状、寸法に関する可能性について考察したものである。

2. 室内実験の概要

室内実験では、パイプ式ウイングリップと同形状のコーン状鋼管を作成し、その耐荷性能について検討を実施した。

(1) 実験供試体

一般的にパイプ式ウイングリップに吹付けコンクリートが充填材として用いられている。しかし、室内実験で吹付コンクリートを使用することは容易でないので、ベースコンクリートの配合条件をほぼ吹付けコンクリートと同一とした（表-1参照）。具体的には早強ポルトランドセメント、海砂（密度 2.6g/cm^3 ）及び安山岩碎石（密度 2.7g/cm^3 ）から構成される。加えて、パイプ式ウイングリップでは、充填材が十分に強度を発揮していない若材齢時においても、本構造が適切な支持耐力を発揮できるかを確認するため、材齢1日にて実験を試みた。

実験に用いたコーン状鋼管の寸法は、一般に用いられるパイプ式ウイングリップの1/2モデルとし、厚さ1.6mm、底面部直径250mm、同上面部125mmの円錐台形（パイプ式ウイングリップ）の供試体を採用した（図-1参照）。材質は実際に使用されるSS400材よりも低剛性なSPHC鋼板（引張強度 344N/mm^2 ）を用いた。

室内実験では、コーン状鋼管の上面部で反力を受ける構造として、本体上面部に同じ直径で、高さ50mm、厚さ6.0mmの薄肉円筒管を取り付けた。さらに補強用として長さ100mmのスティフナーを対角部4箇所に取り付けた。従って、コーン状鋼管上部の応力-ひずみ状態は現実と異なるものとなる。

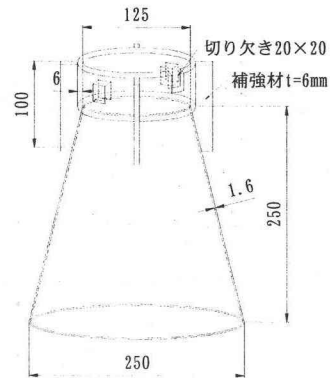


図-1 実験供試体 (mm)

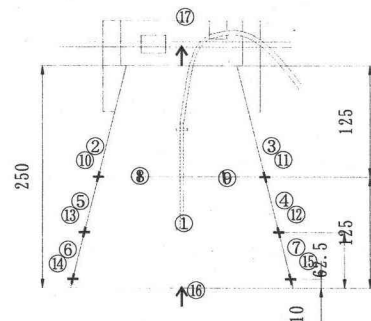


図-2 計測位置

①	充填材内部のひずみ測定
②～⑦	周方向ひずみ測定
⑧～⑮	軸方向ひずみ測定
⑯	鋼管底面の変位測定
⑰	充填材の変位測定

表-1 充填コンクリートの配合条件 (kg/m³)

W/C	C	W	S	G
0.53	396	210	1070	681

表-2 充填コンクリートの強度(材齢1日)

圧縮強度	N/mm ²	24.6
割裂引張強度	N/mm ²	1.8
ヤング係数	kN/mm ²	32.1

また、上面部には、浮き上り変位を計測するため、開口部内に通した鋼棒と充填材上面を密着させ、鋼棒の両端部に設けた変位計（1/1000mm）より計測した。さらに、埋込モールドゲージが鉛直になるように設置し、リード線を取り出した。なお、充填材と鋼材間の応力伝達には、充填材のくさび作用に伴う円周応力の応力伝達のみを得るため、鋼管壁面には、グリスを充分塗布することで、両者間の付着・摩擦力を出来るだけ低減した。

鋼管のひずみ及び、充填材変位の計測位置を図-2に示す。図中、⑯で示す充填材底面の変位測定は、

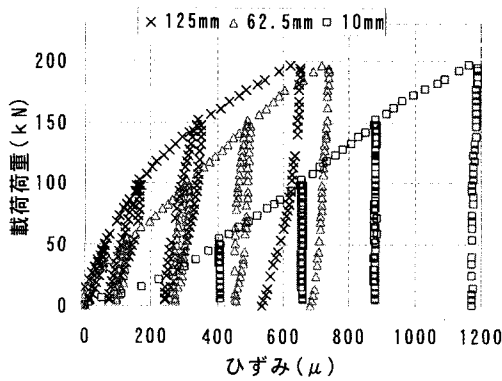


図-3 周方向ひずみ

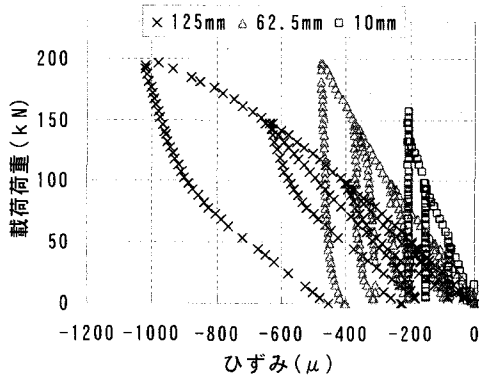


図-4 軸方向ひずみ

鋼管底部（高さ10mm位置）の変位量を計測した。

(2) 実験方法

載荷状況を写真-2に示す。本研究では、底面側の充填材に対して下から上へ荷重を与えた。載荷は、アムスラー型載荷装置（Max:980kN）を用いて、予備実験にて得られた降伏荷重240kNを考慮し、50kNごとの載荷－除荷サイクルを最大200kNまで実施し5kNピッチで、ひずみ及び変位を計測した。

試験に先立ち、円柱供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）によって求めた充填材の圧縮強度・割裂引張強度・ヤング係数を表-2にまとめて示す。

(3) 実験結果

a) 鋼管ひずみ

図-2に示す供試体の下端より10mm及び62.5mm、125mm位置における、周方向及び軸方向のひずみと載荷荷重の関係を図-3、4に示す。図中、正は伸びを、負は縮みを表す。なお、同位置にあるひずみ計は、その平均値を示している。

図-3より、周方向の引張ひずみは、低荷重段階から10mm、62.5mm、125mmの順に大きく発生し

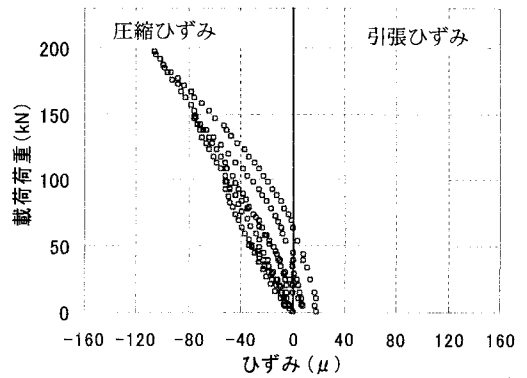


図-5 充填材内部ひずみ

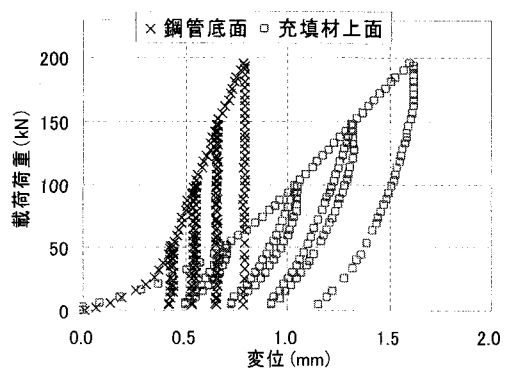


図-6 軸方向変位(鋼管底面、充填材上面)

ていることが分かる。これは、充填材のくさび作用による円周応力が供試体の下端により強く発生するためと考えられる。

一方、図-4より、軸方向ひずみは、すべての計測箇所で圧縮ひずみとなる。その大きさは、125、62.5mm、10mmの順となる。これは、載荷面積の違いによるものである。除荷過程において鋼管に生じたひずみは、周方向と軸方向ともに下端部に近いほど、最大ひずみ量が保持される傾向がみられる。これは、除荷時における充填材のくさび効果が下端ほど大きいために、鋼管の円周応力が供試体下部ほど大きく発生し、その応力による充填材の締付け効果が表れると考えられる。

b) 充填材内部ひずみ

図-5に埋込ゲージによる充填材の軸方向ひずみと載荷荷重の関係を示す。この図より、載荷過程における軸ひずみは、荷重に対してほぼ線形の立ち上がりを示すことが分かる。

除荷過程では、載荷ステップごとに非線形性が強くなる傾向を示す、低荷重領域では、充填材は引張ひずみに推移する傾向を示す。これはくさび状に押

し込まれた充填材にコーン状鋼管による周方向締付作用が働き、それにより軸方向の伸びが発生しているものと考えられる。

c) 変位挙動

充填材の上面変位、コーン状鋼管底面変位と載荷荷重の関係を図-6に示す。各ステップの最大変位量に着目すると、底面変位に対して上面変位はおおよそ2倍変位している。さらに、底面変位は応力履歴に応じて最大変位量を保持する傾向がみられるが、上面変位は除荷時の変位回復傾向が認められる。これは、これまで述べてきたようにコーン状鋼管による、充填材の締付け効果により、変位が回復しないからと考えられる。

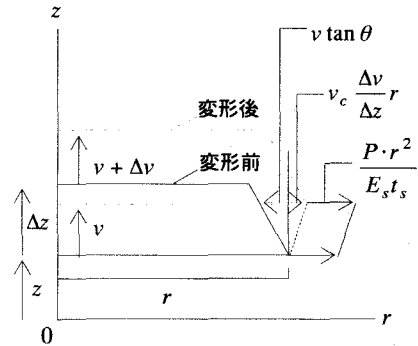


図-7 充填材の微小つりあい

(1)式と(2)式を σ_{c0} と P で解けば σ_{c0} 、 P は

$$\sigma_{c0} = -E_c \frac{dv}{dz}, \quad P = \frac{\frac{1}{1-\nu_c} \frac{E_c v}{r} \tan \theta}{1 + \frac{1}{1-\nu_c} \frac{E_c v}{E_s t_s}} \quad (3)$$

3. 理論式と数値解析による室内実験の検証

コーン状鋼管の耐荷性能に関する室内実験を、力学的理論式と軸対称有限要素解析を用いて検証した。

(1) 理論式

コーン状鋼管の設定条件は z 軸回りの軸対称台形の構造とする(図-7参照)。コーン状鋼管は図中の底面に作用する軸方向応力に対し、軸対象の周方向応力として取扱う。充填材は、鋼管内だけに存在し、鋼管外側面は自由面とする。また、充填材は均質で等方性の弾性体と仮定する。そのため、充填材のヤング係数 E_c は載荷過程にかかわらず一定値とした。充填材と鋼管には表-2に示す実験と同じ物性値を用いた。

a) 軸方向応力に対する条件方程式

変位から定まる全ひずみは、図-7から微小要素の z 方向の変位とこれに伴う r 方向の変位、鋼管の圧力からのひずみの和で与えられ、次式のようになる。

$$\varepsilon_z = -\frac{dv}{dz} - \frac{2\nu_c}{1-\nu_c} \frac{v}{r} \tan \theta + \frac{2\nu_c}{1-\nu_c} \frac{p \cdot r}{E_s t_s} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \nu_c \frac{dv}{dz} + \frac{v}{r} \tan \theta - \frac{p \cdot r}{E_s t_s}$$

ここで、

r_0, z : 円筒座標 r_0 : 底面の半径
 r_1 : 上面の半径 h : 高さ
 θ : 鋼管の傾斜 t_s : 肉厚
 E : ヤング係数 σ_{c0} : 作用応力

一方、(1)式は、図-7の要素に y 方向の圧縮応力 σ と境界面の圧力 P との作用によって生ずるひずみである。軸対称の平面応力状態として、

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_c} (\sigma_{c0} - 2\nu_c p), \quad \varepsilon_r = \frac{1}{E_c} \{ (1-\nu_c) p - \nu_c \sigma_c \} \quad (2)$$

となる。 z 方向の要素のつりあいは、 P に係数 k を乗じて充填材と鋼管内壁との間に発生する抵抗力とし、図-7の釣り合い式を考えれば次式となる。

$$\frac{r}{2} \frac{d\sigma_c}{dz} - \tan \theta \sigma_c + kP = 0 \quad (4)$$

(4)式に(3)式を代入して、変数を z から r に変えたあとの式を線形化すると

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{2k}{(1-\nu_c) \tan \theta} \frac{v}{r^2} = 0 \quad (5)$$

となるため、以下(5)式の取り扱いを考えればよ

い。 $t = \log r$ の変換によって

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{dv}{dt} - \frac{2k}{(1-\nu_c) \tan \theta} v = 0 \quad (6)$$

この微分方程式は、 x に関する次の2次方程式であるので、その根を α 、 β とするとき

$$x^2 + x - \frac{2k}{(1-\nu_c) \tan \theta} v = 0$$

$$\alpha, \beta = \frac{1}{2} \left(-1 \pm \sqrt{1 + \frac{8k}{(1-\nu_c) \tan \theta}} \right) \quad (7)$$

$$v = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} = Ar^{\alpha} + Br^{\beta} \quad (8)$$

となる。ここで、 A 、 B は任意定数である。(8)式を(3)に代入すれば

$$\sigma_c = E_c \tan \theta (A \alpha r^{\alpha-1} + B \beta r^{\beta-1}) \quad (9)$$

$$P = \frac{E_c \tan \theta}{1 - \nu_c} \frac{\nu}{r} = \frac{E_c \tan \theta}{1 - \nu_c} (A c r^{\alpha-1} + B \beta r^{\beta-1})$$

鋼管の周方向応力 σ_{st} は

$$\sigma_{st} = \frac{Pr}{t_s} = \frac{E_c \tan \theta}{1 - \nu_c} \frac{\nu}{t_s} = \frac{E_c \tan \theta}{1 - \nu_c} \frac{1}{t_s} (A c r^{\alpha-1} + B \beta r^{\beta-1}) \quad (10)$$

境界条件として $\sigma_{c0} = \sigma_c|_{r=r_0}$, $\sigma_{c1} = \sigma_c|_{r=r_1}$ のとき

$$A = \frac{1}{E_c \tan \theta} \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma_{c0} r_1^{\beta-1} - \sigma_{c1} r_0^{\beta-1}}{r_0^{\alpha-1} r_1^{\beta-1} - r_1^{\alpha-1} r_0^{\beta-1}}$$

$$B = \frac{1}{E_c \tan \theta} \frac{1}{\beta} \frac{\sigma_{c0} r_1^{\alpha-1} - \sigma_{c1} r_0^{\alpha-1}}{r_0^{\alpha-1} r_1^{\beta-1} - r_1^{\alpha-1} r_0^{\beta-1}} \quad (11)$$

b) 軸方向応力に対する解

鋼管の上面が拘束されず $\sigma_{c1} = 0$ のとき、式(11)を式(8)、式(9)、式(10)に代入し、式(13)を得る。

$$\nu = \frac{\sigma_{c0}}{E_c \tan \theta} \left(\frac{1}{r_0^{\alpha-1} r_1^{\beta-1} - r_1^{\alpha-1} r_0^{\beta-1}} \right) \left(\frac{1}{\alpha} r_1^{\beta-1} r^{\alpha} + \frac{1}{\beta} r_1^{\alpha-1} r^{\beta} \right)$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c0}}{r_0^{\alpha-1} r_1^{\beta-1} - r_1^{\alpha-1} r_0^{\beta-1}} \left(\frac{1}{\alpha} r_1^{\beta-1} c r^{\alpha-1} + \frac{1}{\beta} r_1^{\alpha-1} \beta r^{\beta-1} \right)$$

$$\sigma_{st} = \frac{\sigma_{c0}}{1 - \nu_c} \frac{1}{t_s} \left(\frac{1}{r_0^{\alpha-1} r_1^{\beta-1} - r_1^{\alpha-1} r_0^{\beta-1}} \right) \left(r_1^{\beta-1} r^{\alpha-1} + r_1^{\alpha-1} r^{\beta-1} \right) \quad (13)$$

(13)から、軸方向変位 ν 、軸方向応力 σ_c と周方向応力 σ_{st} を計算し、ひずみに換算した上で実験結果と比較することとする。

(2) 数値解析

数値解析を行うにあたって、拘束箇所や荷重方法、鋼管と充填材の付着などの境界条件の影響などを考慮するため、2ケースの解析を行い最適な組合せを推定した。

図-8に解析モデルを示す。図中(b)に示すように鋼管上端をz方向の拘束とし、コーン状鋼管の下に荷重板を設置し底面から実験と同様の荷重(200kN)を与えた。解析条件の2ケースとは以下に示すとおりである。

- 付着を考慮したケース「以下、solidモデル」。
- 充填材と鋼管の間にすべり面を考慮してヤング係数や厚さを自由に変えられるsolid要素を挿入したケース「以下、solid(中間材)」。

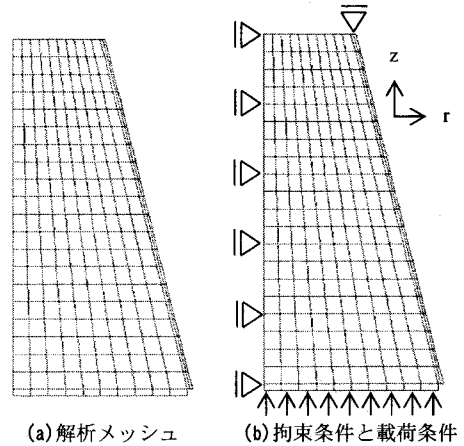


図-8 解析モデル

表-3 入力物性値

solid 要素		
充填材 E	N/mm ²	32,100
鋼管 E	N/mm ²	200,000
ポアソン比	-	0.3
中間材厚	mm	2.0
中間材 E	N/mm ²	5.5

表-4 荷重応力

荷重荷重	N	200,000
底面面積	mm ²	49,087
荷重応力	N/mm ²	4.074

の剛性と厚さは予備解析を行い、充填材の上面変位量が実験結果と一致する条件とした。

予備解析により得られた条件と入力物性値を表-3に、荷重応力条件を表-4に示す。検討項目をコーン状鋼管の荷重試験と同様に、①鋼管の軸方向ひずみ、②鋼管の周方向ひずみ、③充填材内部の軸方向ひずみ、④充填材の軸方向変位とした。

(3) 解析結果

解析結果を図-9～図-13に示す。図には、理論式から求められた鋼管の周方向ひずみと充填材内部ひずみ、変位の計算結果を合わせて図示した。荷重実験において、コーン状鋼管の上半部分はスティフナーの影響を受け様々な応力状態にあるものと考えられるので、コーン状鋼管の高さ0～150mmの範囲のみで比較検討することとした。

鋼管のひずみは最大荷重時におけるコーンのそれぞれの高さ位置の実験結果をy軸上の高さ125、62.5、10mm位置に△印で図示した。

充填材内部のひずみと変位は荷重段階における結果を図示し、そこに実験結果を△印で示した。変位量は、50kN以上の荷重過程のみをとりあげて、数値解析と比較した。

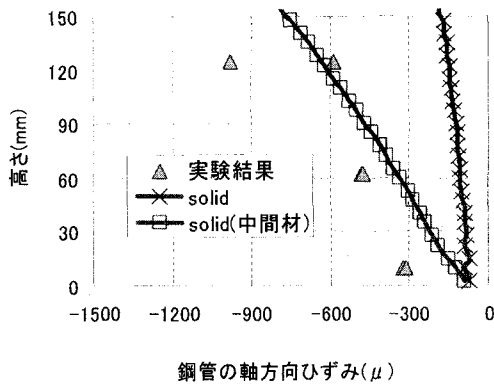


図-9 鋼管の軸方向ひずみ(載荷荷重 200kN)

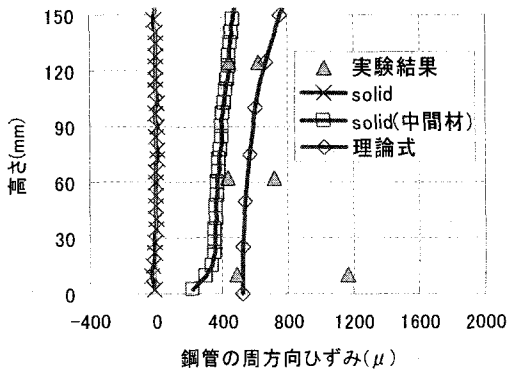


図-10 鋼管の周方向ひずみ(載荷荷重 200kN)

a) 鋼管の軸方向ひずみ

図-9より、どのケースともコーン状鋼管の高さが大きくなるに従って、軸方向ひずみは増加していることが分かる。実験結果との関係では、solid (中間材) のケースは実験結果と比較的相関のある挙動を示している。

b) 鋼管の周方向ひずみ

図-10より、解析の2ケースで付着の影響をみると、solid (中間材) は実験結果に比較的近い値が得られていることが分かる。同様に、理論式も実験結果を追っていることが分かる。

c) 充填材内部の軸方向ひずみ

図-11より、解析結果は線形挙動を示し、実験結果と相関のある挙動を示した。理論計算においても同様である。

d) 充填材の上面変位及び鋼管の底面変位

図-12、図-13より、solid (中間材) の変位量に着目すると、上面は実験値と一致するような解析条件であるが、同程度の変位量であるが、底面変位は実験結果の 1/2 程度の値となった。両図より明らかなように solid のケースと理論式のケースでは、底面が上面より大きい結果である。この点では、上面

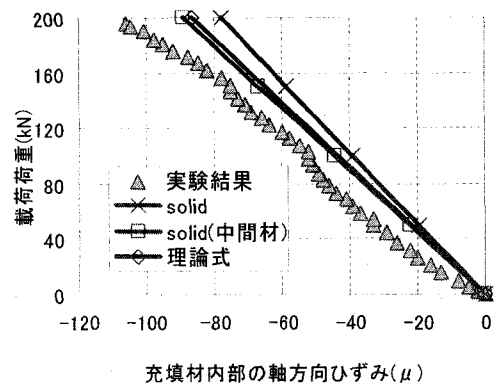


図-11 充填材内部の軸方向ひずみ

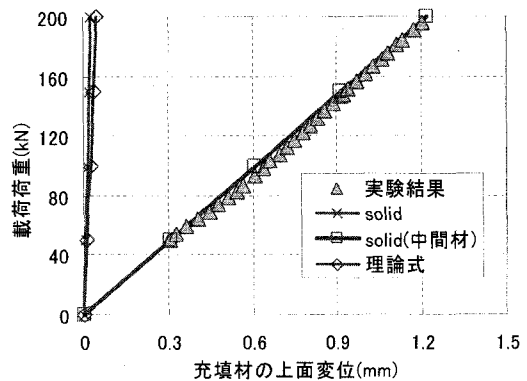


図-12 充填材の上面変位

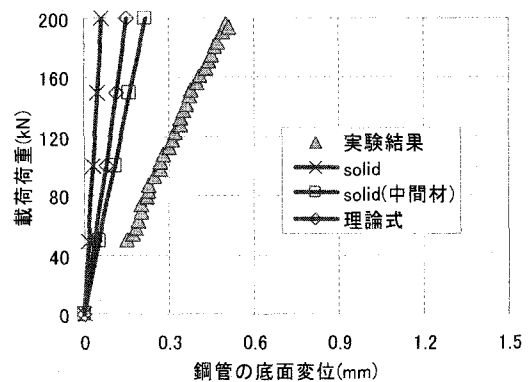


図-13 鋼管の底面変位

が底面の2倍だった実験結果と異なる挙動である。理論式は上述したとおり、充填材に作用する直応力によって微小要素が上方向に押上げられることで、鋼管からの拘束力が発生し、その力の釣合いを解いたものである。充填材内部の軸方向と鋼管の周方向に発生するひずみの実験結果とある程度の一致が見られるにもかかわらず、変位量は 10^2 オーダーで実験結果とかけ離れているのは、載荷実験には充填材の変位に剛体変形が加わったものと考えられる。数

値解析では充填材と鋼管のすべり面を考慮したsolid（中間材）が、充填材のすべりを表現しているために、実験結果を追う動きを示したものと考察する。

2ケースの数値解析により、コーン状鋼管の載荷試験を検討した結果、①鋼管の軸方向ひずみ、②鋼管の周方向ひずみ、③充填材内部の軸方向ひずみ、④充填材の上面、鋼管底面変位において、solid（中間材）と鋼管のすべりを表現することが、現実的なモデルであると考えられる。実際の鋼管と充填材の間には、載荷過程においてはすべりが発生し、除荷過程には鋼管からの拘束によって締付けられるものと考えられる。これが、図-5における引張ひずみの発生につながったものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、トンネル支保工の脚部補強を考慮を目的としたパイプ式ウイングリブの耐荷性能に関する基礎的実験として、コーン状鋼管を作成し、力学的特性の把握を目的に室内実験を行ったものである。そして、理論計算、有限要素解析を用いて、載荷応力によるコーン状鋼管の変形挙動の検討を試みたものである。

本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する。

- ① 十分に強度発現していないコンクリートによってもコーン状鋼管には、載荷によりくさび作用に伴う周方向応力が作用し、周方向に引張ひずみ、軸方向に圧縮ひずみが発生する。
- ② 充填材の上面変位は、コーン状鋼管の変位に対しておよそ2倍に相当するものであった。また、鋼管底面変位は応力履歴に応じて最大変位量を保持する傾向があり、上面変位は除荷時の変位回復傾向が認められた。
- ③ 載荷過程における充填材の軸ひずみは、荷重に対してほぼ線形性を示したが、除荷時には載荷ステップごとに非線形性が強くなる傾向を示しながら、くさび効果により低荷重領域において充填材は引張ひずみに推移する傾向を示した。
- ④ 鋼材及び充填材の応力分担の相違によって、コーン状鋼管には、高さに応じた圧縮ひずみと周方向の引張ひずみが発生する。
- ⑤ 数値解析では、充填材と鋼管のすべりを考慮することで、実験結果とある程度の一致がみられた。

これらの結果から、コーン状鋼管の軸方向ひずみや周方向ひずみなどの実験結果を数値解析を用いて表現できることを確認できた。これは作用する荷重

に応じて、コーン状鋼管寸法を選定することで、鋼アーチ支保工の沈下抑制などに効果が期待できるものと思われる。今後は本試験データに基づいて定量的に支持荷重に対する最適な形状及び設計方法に検討を進めていく予定である。

謝辞：本試験を実施するにあたり、蝦谷祐至氏に御尽力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会：脚部補強工技術資料（2000年改訂版）
- 2) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説
- 3) 木下泰範，進士正人，中川浩二，山本 稔：地山と鋼アーチ支保工の早期密着性向上を期待したパイプ式ウイングリブの支保効果，トンネル工学研究会論文・報告集，第12巻，報告（32）pp.303-308.2002.
- 4) 木下泰範，竹田 稔，西原直哉：薄鋼板を用いたウイングリブの開発，土木学会第55回年次学術講演概要集，VI-282，1999.
- 5) 阿部 茂，伊藤省二，木下泰範：薄鋼板を用いたウイングリブのトンネルへの適用，土木学会第55回年次学術講演概要集，VI-283，2000.
- 6) 木下泰範，竹田 稔，西原直哉：鋼アーチ支保工のウイングリブを代替するウイングパイプの載荷試験，土木学会第56回年次学術講演概要集VI-206，pp.412-413，2001.
- 7) Yasunori Kinoshita, Masato Shinji, Koji Nakagawa, Minoru Yamamoto: The supporting effect of pipe wing rib designed to achieve early contact between ground and steel arch tunnel support, International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration, pp.103-108, 2003.