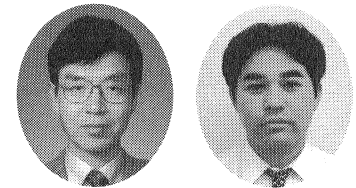


トンネル施工時の鋼製支保工の脚部補強工法

Supporting Methods of Steel Rib at Tunnel Excavation

進士 正人 Masato SHINJI (山口大学大学院理工学研究科)
木下 泰範 Yasunori KINOSHITA (株マシノ)



軟弱な地山におけるトンネル施工では、鋼製支保工は地山の安定に極めて重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、支保工が脚部沈下するために十分な支保効果が発揮できない場合も見られる。脚部沈下の抑制のために、種々の支保工の脚部補強工法が開発されている。

本文では、代表的な脚部補強工法の中で、脚部補強工法の支保効果に関する各種ウィングリブ室内試験を紹介し、支保工の脚部沈下を抑制するには支保工の設置面積を確保することが重要であること、そして、簡易に支保工の設置面積を確保できるパイプ式ウィングリブの支保特性と極限の支保状態について紹介する。

キーワード：トンネル，模型実験，補助工法，地盤支持力（IGC：H-5, E-2, E-12, K-11）

1. はじめに

脆弱な地山におけるトンネル施工では、鋼製支保工は、トンネル切羽のみならず、トンネル全体の安定に大きな役割を果たしていると考えられている（以下、本文中、「鋼製支保工」を、単に「支保工」と呼ぶ。）。しかし、支保工の地山安定効果を必要とする地山であればあるほど、地山自身の地耐力不足により、支保工が脚部沈下を起し、本来の機能が発揮できない事例もよく見受けられる。すなわち、標準的な支保構造であれば、図-1 (a) に示すように、トンネル支保に作用する地山荷重の鉛直成分は、支保脚部だけで支持される。このため脚部地山には応力が集中し、地盤の支持耐力が不足する場合は、脚部地山の局所的破壊や脚部沈下が生じて、支保工脚部が沈下する。脚部沈下が大きくなると天端沈下が発生し内空断面が侵されるだけでなく、これに伴ってトンネル天端周辺地山の緩みを助長することとなり、切羽および地山全体が不安定な状態となる。

脚部補強工法は、この支保工脚部地盤の不安定化を防止するため、地盤の強度や支持力を増加させ、あるいは支持杭を構築することにより支保工脚部に集中する荷重を支持し、トンネル全体の安定化を図る工法である。たとえば、図-1 (b) に示すレッグパイル工法では、脚部に集中する地山荷重をレッグパイルが摩擦杭として支持し、周辺地山に広く荷重伝達して分散させることができる。この例では、下方に打設されたレッグパイルが圧縮材として鉛直方向の地山荷重を支持し、側方のサイドパイルが引張材として水平方向の地山荷

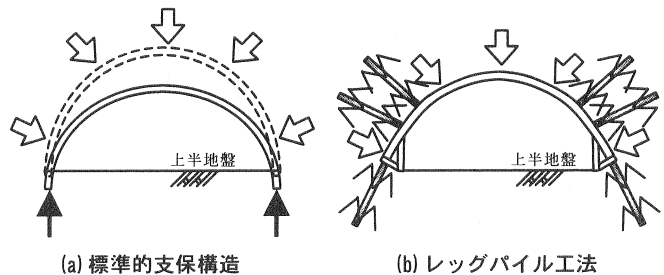


図-1 支保工荷重の発生状況と脚部補強例



写真-1 パイプ式ウィングリブ設置状況

重に抵抗する様子を示している。このほかにも、鋼製支保工の脚部沈下を抑制する対策工としては、吹付けコンクリートによる上半インパート仮閉合、ウィングリブによる支

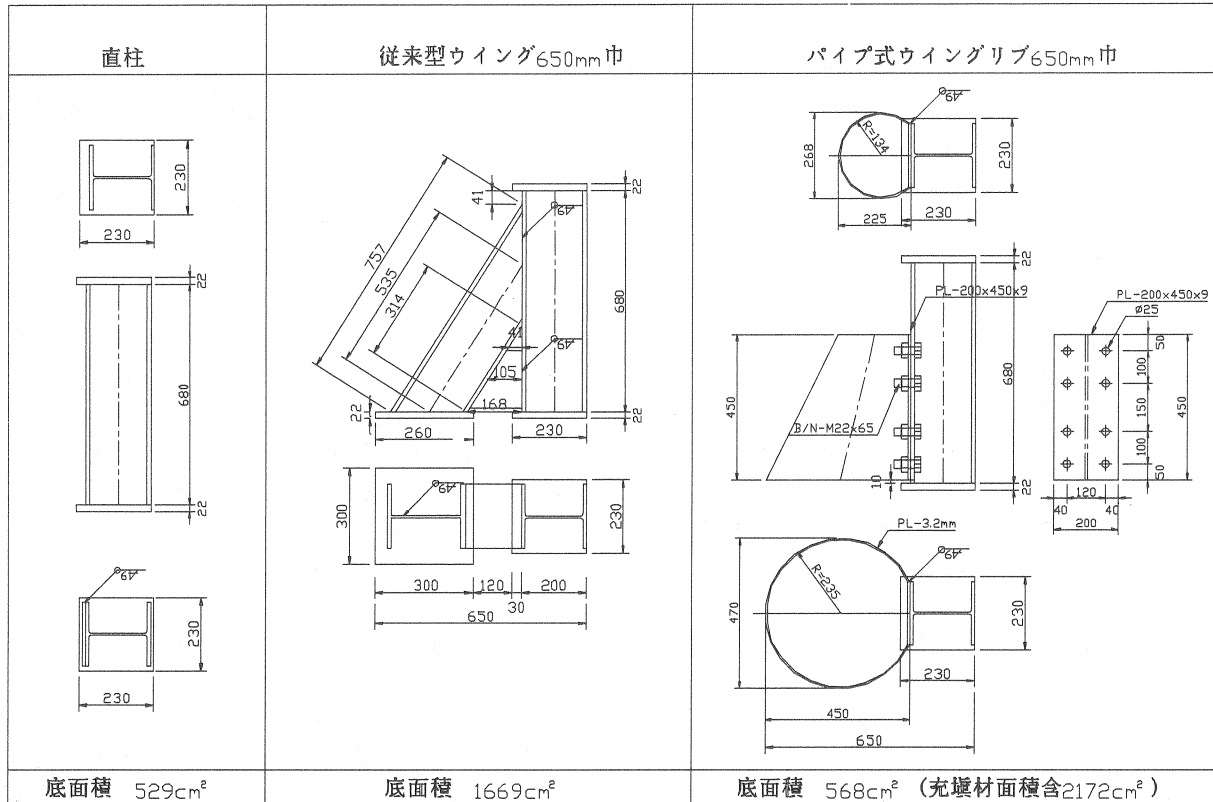


図-2 実験に使用したウングリップ仕様一覧

表-1 実験ケース一覧表

実験ケース	形式	底面積	充填材	地盤材	最大載荷荷重
Case-1	従来式	1,669mm ²	—	碎石 (10mm 以下)	単調裁荷 500kN
	パイプ式	568mm ² (2,172mm ²)	山砂 (洗砂)		
	パイプ式	568mm ² (2,172mm ²)	碎石 (10mm 以下)		
Case-2	単柱	529mm ²	—	碎石 (10mm 以下)	繰返し裁荷 200kN
	従来式	1,669mm ²	—		
	パイプ式	568mm ² (2,172mm ²)	碎石 (10mm 以下)		
Case-3	単柱	529mm ²	—	石見粘土	繰返し裁荷 50kN
	従来式	1,669mm ²	—		
	パイプ式	568mm ² (2,172mm ²)	碎石 (10mm 以下)		

保工脚部補強, フットパイルによる脚部地盤補強などが一般的である. 特に, ウングリップは, 英語名で「エレファントフット (象の足)」とも呼ばれ, それらの対策工のなかでも実績がありその支持効果も確実であるが, 従来のウングリップは, 支保工の支持面積を拡大するために, 支保工を別途加工し, 製作する必要があるため事前にある程度の準備時間を必要とする. 加えて, ウングリップの使用が不必要な場合においても廃棄処分とならないように施工中に使用される場合もある. さらに, ウングリップ施工にあたっては, ウングリップの形状に合わせて地山をさらに大きく掘削する必要があること, ウングリップを精度よく

設置するために十分な整地が必要となることなど, 地山掘削自体に作業の危険性や煩雑さを有している.

このようなウングリップの欠点を打開するために, 著者の一人は写真-1 に示すような薄鋼板を加工した「パイプ式ウングリップ」を考案した¹⁾. このウングリップは, コーン状の底なし薄鋼板を必要に応じて支保工脚部に取り付け設置し, そのコーンの内部に吹付けコンクリートを充填することにより支保工の支持面積を確保し, 支保工脚部の地山支持力の増加を期待するものである. 支保工を建て込んだ直後にコーン内部に吹付けコンクリートを充填するため, 設置面の事前の丁寧な整地が不要で設置直後より

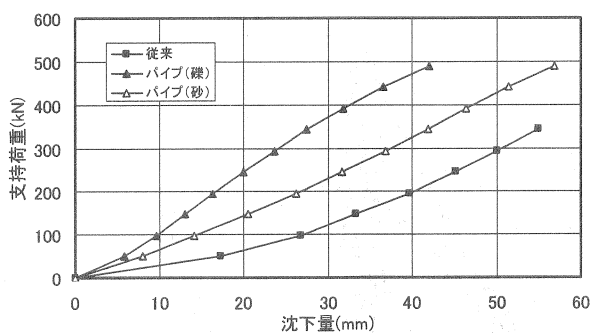


図-3 ウィングリブの沈下と支持荷重の比較

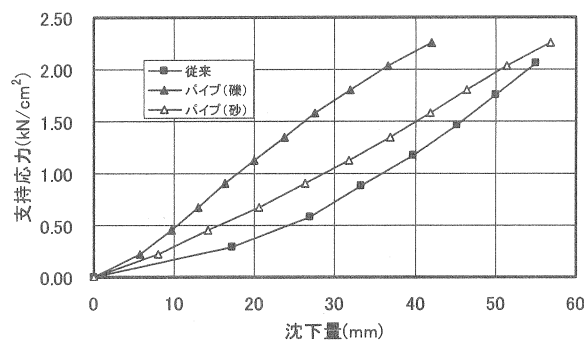


図-4 沈下量と支持応力との比較

地山の支保効果が期待できること、地山状況に即応してパイプ式ウィングリブの着脱が可能でストックが可能であること、支保工とは別に加工することができるため安価に製作できるなどの利点を有している。しかし、支保工の脚部沈下抑制のための補助工法としてどこまで期待できるかなど課題も多い。

本文では、通常の支保工および、ウィングリブおよびパイプ式ウィングリブの荷重支持効果に関する模型比較実験について紹介する。そして、地盤条件と設置断面状況、設置方法の違いによる支持力の発現状況、パイプ式ウィングリブの支保効果の特徴を示す。そして、パイプ式ウィングリブに作用する応力の発生メカニズムをより詳細に説明するため、コーン状に製作した鋼管の載荷荷重試験を紹介する。

2. ウィングリブの支保形式の違いによる支保効果の比較

本章では、実スケール模型実験によりウィングリブの支保形式、地盤および充填材の違いによる支保工荷重と脚部沈下との関係を示す。

2.1 実験概要

実験ケースならびに実験に使用した供試体の諸元、地山材料および充填材の一覧を図-2 及び表-1 に示す。これらに示すように室内実験では、比較的硬質な地山を模した碎石と軟弱地山を模した粘土材料を地山材料として用い、3種類のウィングリブ供試体の下に敷詰め、その上にそれぞれのウィングリブ供試体をセットした。パイプ式ウィングリブの場合には、表に示すように、早期吹付けコンクリートを模した直径 10mm 以下の碎石と山砂（洗砂）のみ2種類を充填材としてパイプ内に充填した。実験に使用したウィングリブは、通常の支保工および、従来のウィングリブおよびパイプ式ウィングリブの3種類である。実験ケー

スは3ケースである。

Case1：充填材の違いによる支保荷重の比較を目的として、支保工荷重は、支保工に直接軸力が作用するようにロードセルを介して油圧ジャッキで 500kN まで単調載荷したケース

Case2：載荷初期の荷重発現状況の把握を目的として、支保工荷重は、支保工に直接軸力が作用するようにロードセルを介して油圧ジャッキで 200kN まで繰返し載荷したケース

Case3：軟弱地盤条件における荷重発現状況の把握を目的として、支保工荷重は、支保工に直接軸力が作用するようにロードセルを介して油圧ジャッキで 50kN まで繰返し載荷したケース

模型実験では、主に載荷荷重と脚部沈下量との関係を調べた。パイプ式ウィングリブではそれ以外に鋼板応力（円周応力）、充填材天端量も合わせて計測した。なお、実験条件を統一するため、従来のウィングリブとパイプ式ウィングリブの支保工からの底面巾は同一（650mm）とした。

2.2 ウィングリブのタイプ別支保効果の比較 (Case1)

図-3 に、碎石を地山材料とした時の、ウィングリブとパイプ式ウィングリブのタイプ毎の沈下量と載荷荷重の比較を示す。図から明らかなように、通常のウィングリブに比べ、パイプ式ウィングリブは、より小さい沈下量の段階からすぐに支持荷重が増加し始めることがわかる。すなわち、パイプ式ウィングリブは、パイプと地山との間の隙間が少なく、荷重が作用する直後から地山と早期に密着して支保反力が発生するため、見掛け上支保剛性が高くなる傾向を示すことがわかる。同様に、沈下量の観点から充填材の種類で比較すると、碎石充填、山砂充填のそれぞれのパイプ式ウィングリブ、ウィングリブの順に支持荷重が小さくなる。この結果から、充填材は、充填材内部での流動の少ない礫材のほうがより効果が大きいこともわかる。

図-2 に示したように、鋼材そのもので比較すると、パ

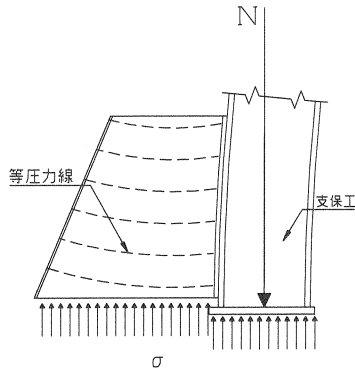


図-5 パイプ式ウィングリブ内想定応力分布

パイプ式ウィングリブの底面積は 568cm^2 であるのに対し従来型ウィングリブの底面積は 1669cm^2 となり、底面の鋼材面積は従来型の方が約3倍大きくなる。しかし、支持力はパイプ式ウィングリブのほうが大きい。これは、パイプ式ウィングリブに充填した砂や礫の閉塞効果によって支持面積が増大したためと考えられる。そのため、パイプ式ウィングリブは、底面鋼材面積と充填材の面積の和 (2172cm^2) として、それぞれの設地面積あたりの支持力で、沈下比較した結果を図-4 に示す。この図からわかるように、単位面積あたりの支持力に換算すると 0.5kN/cm^2 を超えると従来型ウィングリブの初期の各種ウィングリブの単位面積あたりの支持力の勾配はほぼ等しく、支保工の脚部沈下を効果的に抑制するには設置断面積を確保することが重要であることがわかる。しかし、充填材が砂のケースでは、勾配が他のケースと比較して若干低い傾向を示し、パイプ内の充填材の内部流動の影響が現れている。

これらの試験結果を総合的に解釈すると、パイプ内の充填材に図-5 で示すような圧密応力が発生し、総合的に脚部支持力が発生しているものと考えられる。

2.3 ウィングリブの初期状態における支保効果の比較 (Case2)

先に述べた支保効果試験の結果からも明らかのように、従来型ウィングリブは、施工時において、従来型ウィングリブ底面と地山との間に空隙や緩みが発生し、地山とリブ底面が密着するまで沈下抑制効果が期待できない。これは、掘削の早期段階での鋼アーチ支保工の効果を低減させるものである。そこで、設置直後の従来型ウィングリブとパイプ式ウィングリブとの沈下抑制効果について比較検証した。

図-6 に、それぞれのウィングリブの脚部沈下と支保工荷重の実験結果を示す。同図には、単柱（ウィングリブ無し鋼アーチ支保工のみ）の結果も合わせてしめす。この図

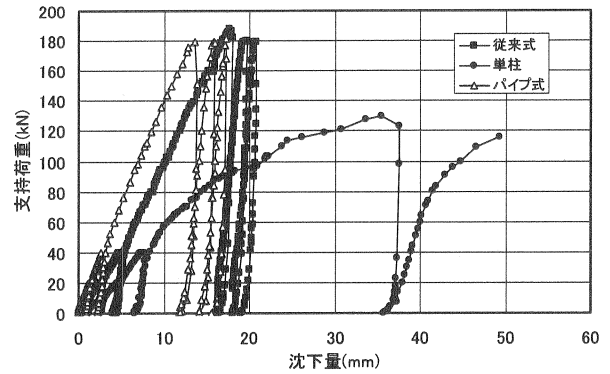


図-6 初期沈下量と支持荷重との比較

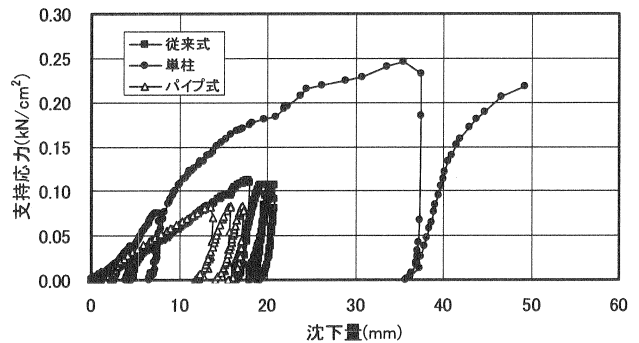


図-7 初期沈下量と支持応力との比較

からあきらかなように、パイプ式ウィングリブは、従来型ウィングリブと比較して微少な沈下でも荷重が発生し始め、マクロな意味での支保工の初期剛性が高く、設置直後から鋼アーチ支保工の剛性が十分期待できる結果を得た。すなわち、鋼アーチ支保工の効果を最も必要とする初期荷重に対しては現行のH形鋼を組み合わせたウィングリブよりもパイプ式ウィングリブのほうがよりよく沈下を抑制できる結果を得た。単柱（ウィングリブ無し鋼アーチ支保工のみ）の場合は、さらに大きく沈下することからその効果は明らかである。

これは、パイプ式ウィングリブが充填材により直接地盤に接しているのに対し、従来型ウィングリブでは地山との一体化を図るための吹付けコンクリートがウィングリブ部の底板下に入り込まないため、従来型ウィングリブと地山との間に空隙や緩みが発生し、地山と密着するまで沈下傾向が続くためである。

図-7 に、単位面積あたりの支圧応力に換算した結果を示す。図から明らかのように、従来型ウィングリブとパイプ式ウィングリブの設地面積あたりの支圧応力で沈下比較をすると、構造上の違いはあまり認められず、ほぼ同等の沈下応力関係を示す。この関係は地盤の強度に強く依存するものであるため、今後地盤材料を変化させた実験を行い効果の違いを確認したいと考えている。

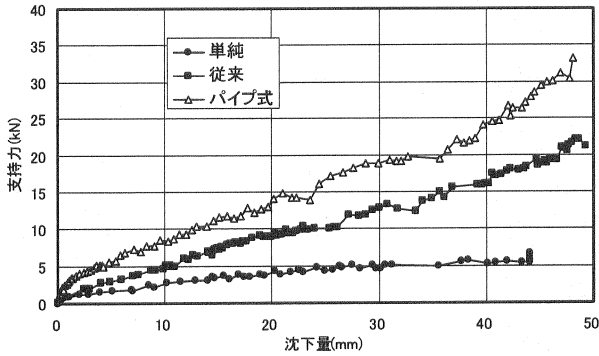


図-8 沈下量と支持力との比較

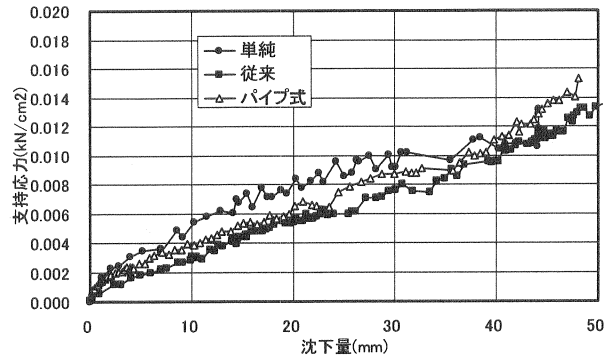


図-9 沈下量と支持応力との比較

2.4 軟弱地山におけるウィングリップの支保効果の比較 (Case3)

図-8に、軟弱な地山材料を想定した時、ウィングリップのタイプ毎の沈下量と載荷荷重の比較を示す。なお、表に示すように、パイプ式ウィングリップの充填材には、より支保効果が期待できる砕石充填とした。この図から明らかのように、軟弱な地山材料の場合においてもウィングリップに比べ、パイプ式ウィングリップは、より小さい沈下量の段階から支持荷重が増加し始めることがわかる。また、除荷時においても沈下変位はほとんどほとんど回復せず、塑性変位となっていることがわかる。図-9に単位面積当たりの指圧応力に換算した結果を示す。図から明らかのように、軟弱な地盤材料であってもこれまでと同様、ウィングリップの違いは少なく、ほぼ同様の沈下特性を示すことがわかる。図-3に示す砕石を地山材料とした同様の実験結果と比較すると同変位における支持荷重が非常に小さくなることがわかる。すなわち、ウィングリップを使用にあたっては、ウィングリップの種類よりも地盤物性により支持荷重が異なるため、平板載荷試験などにより地盤物性を正しく把握することと同時に、目標とする沈下量を満足する設置断面積を確保する必要があることがわかる。

3. パイプ式ウィングリップの作用メカニズムの把握

パイプ式ウィングリップの地盤反力はパイプ内の充填材に圧縮応力として伝達し、その圧縮応力はパイプ鋼管の円周方向の引張応力と釣合うことになる。そのため、パイプの中に十分な充填が行われることによりその支保効果が発揮されることは、充填材の違いによる比較実験からも明らかである。従って、パイプ内の吹付けコンクリートが十分固結していなくても内部流動が小さければ応力が伝達するものと考えられる。

本章では、パイプ部分の要素実験を行い、そのメカニズムの検証と耐荷性能について検討した。

3.1 実験用供試体と実験方法

一般的にパイプ式ウィングリップには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、室内実験で吹付け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-2参照)。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)及び安山岩砕石(密度 2.7g/cm^3)から構成されるコンクリート材料を用いた。加えて、パイプ式ウィングリップでは、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、適切な支持耐力を発揮できるかを確認するため、材齢1日にて実験を実施した。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-3にまとめ示す。

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ィングリップの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(パイプ式ウィングリップ)の供試体を採用した(図-10参照)。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。

実際のパイプ式ウィングリップでは、図-5に示すとおりその反力はウィングリップにねじ止めされた鋼製支保工に作用する。室内実験では、構造の単純化を図り、コーン状鋼管の上面部で反力を受ける構造とし、図-10に示すとおり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一ひずみ状態は現実と若干異なるものとなる。

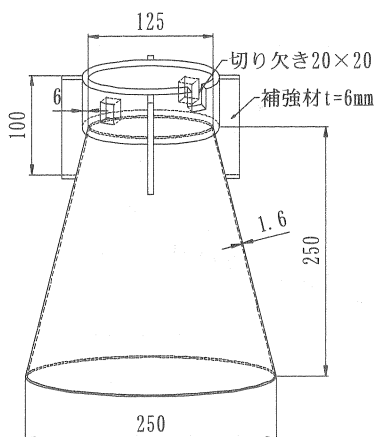


図-10 実験供試体 (単位 mm)

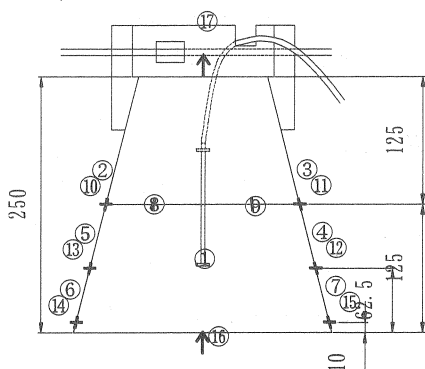


図-11 計測位置図

表-2 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-3 コンクリートの強度 (材齢 1 日)

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

表-4 計測位置と計測項目

①	充填コンクリート内部ひずみ
②, ③	下端から 125mm 部周方向ひずみ
④, ⑤	下端から 62.5mm 部周方向ひずみ
⑥, ⑦	下端から 10mm 部周方向ひずみ
⑧, ⑨, ⑩, ⑪	下端から 125mm 部軸方向ひずみ
⑫, ⑬	下端から 125mm 部軸方向ひずみ
⑭, ⑮	下端から 125mm 部軸方向ひずみ
⑯	充填コンクリート下端面の変位
⑰	充填コンクリート上端面の変位

鋼管のひずみ及び、充填材変位の計測位置を図-10に示す。図から明らかなように、充填材の浮き上り変位を計測するため、供試体上面の補強材に開口部を設け、そこ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

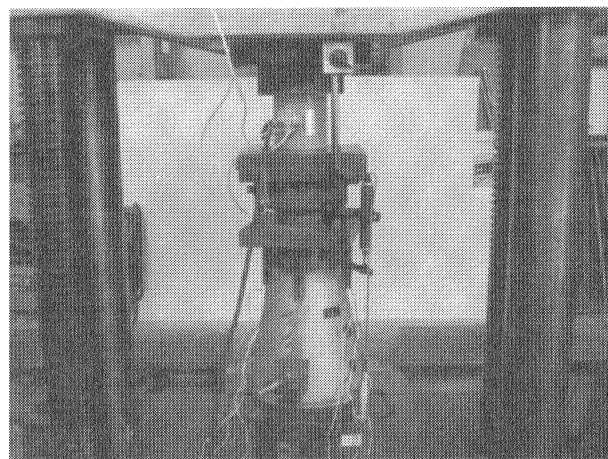


写真-2 載荷試験実施状況

変位計 (1/1000mm) より浮き上がり量を計測した。一方、充填材底面の変位測定は、鋼管底部 (高さ 10mm 位置) の変位量を計測した。さらに、埋込モールドゲージを充填材中央に鉛直に設置した。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。

載荷状況を写真-2 に示す。本実験では、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。

3.2 実験結果

(a) 鋼管ひずみ

図-11 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-12, 図-13 に示す。図中、正は伸びを、負は縮みを表す。なお、ひずみ量は、その平均値を示している。

図-12 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-13 より、軸方向ひずみは、すべての計測箇所にて圧縮ひずみとなる。その大きさは、125, 62.5mm, 10mm の順となる。これは、それぞれの計測位置における載荷面積の違いによるものと考えられる。

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

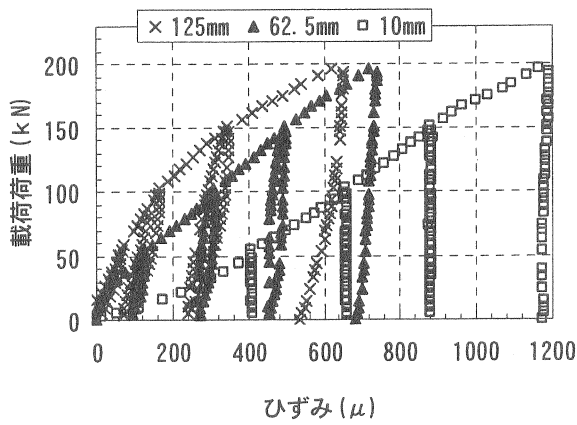


図-12 鋼管の周方向ひずみと載荷荷重

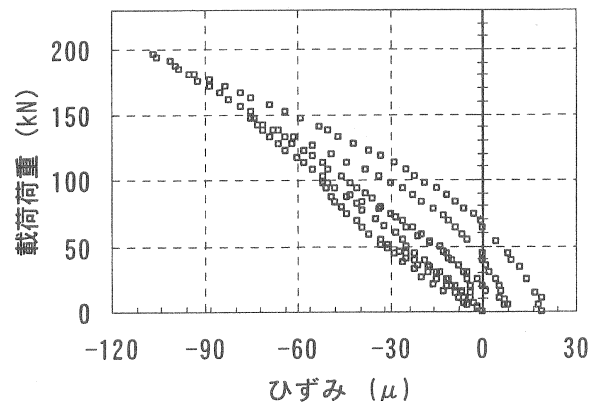


図-14 充填材内部のひずみと載荷荷重

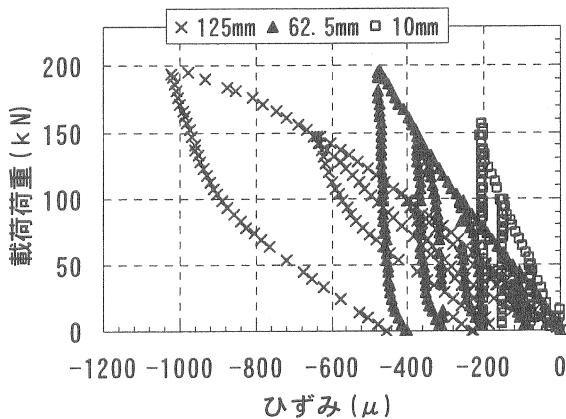


図-13 鋼管の軸方向ひずみと載荷荷重

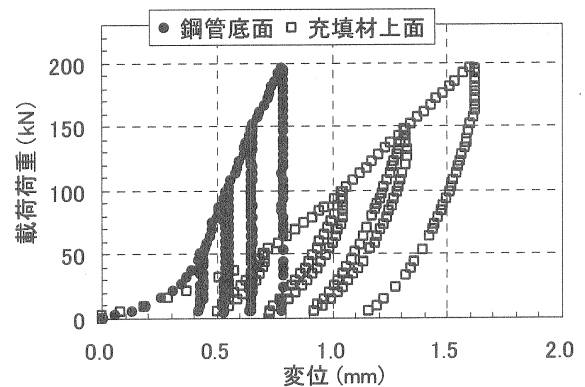


図-15 充填材上下面の軸方向変位と載荷荷重

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-14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りながら、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け作用が働き、それにより軸方向のの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-15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除荷時に発生するコーン状鋼管による充填材の締付け効果により、

変位が拘束されるからと考えられる。

4. まとめ

本文では、支保工の脚部沈下を抑制し、地山の早期安定を図る目的で設置されるウィングリップの脚部沈下抑制のメカニズムの解明を目的とした室内実験、また、パイプ式ウィングリップのコーン状鋼管内を充填し、作用荷重とコーン状鋼管の力学的なメカニズムの把握を目的とした室内実験結果を紹介した。

これらの実験の結果として、以下の点が示されている。

- 1) ウィングリップの支保効果は、設置面積を大きくすればするほど耐荷荷重は大きくなる。従って、事前に平板載荷試験を実施し地盤反力を把握できれば、許容沈下量内にするための設置面積を把握することが可能となる。
- 2) パイプ式ウィングリップは、パイプ内に外部から充填ができるため、支保工と地山の間に空隙や緩みが生じに

くいため、荷重載荷の早期段階から耐荷性能が発揮できる。

- 3) 同様のウィングリブを用いても地山条件によって耐荷荷重は大きく異なる。従って、事前に地山強度、変形特性を把握することによって最適な設置面積を予測することが可能である。
- 4) パイプ式ウィングリブ内の充填材には、載荷荷重により圧縮が生じ、それによりコーン状鋼管には周方向の引っ張り応力が発生する。

謝辞

本実験および実験結果の整理は元山口大学大学院理工学研究科中村貴章氏（JR西日本）が中心となって実施したものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下泰範, 竹田 稔, 西原直哉: 薄鋼板を用いたウィングリブの開発, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, VI-282, 1999.
- 2) 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ィングリブの支保効果, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集「報告」, 第12巻, pp. 303-308, 2002年11月.
- 3) 中村貴章, 吉武勇, 進士正人, 木下康範, 山本稔: パイプ式ウィングリブの耐荷性能に関する基礎的実験, 土木学会トンネル工学研究報告集「報告 I-37」, 第14巻, pp. 251-258, 2004年11月.

(2006年7月28日 受付)