

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

THE PIPE FORMULA WING RIB WHICH EXPECTED IMPROVEMENT IN THE EARLY ADHESION NATURE OF A NATURAL GROUND AND STEEL ARCH SUPPORT

木下 泰範¹⁾・進士 正人²⁾・中川 浩二³⁾・山本 稔⁴⁾

Yasunori KINOSHITA, Masato SHINJI, Koji NAKAGAWA and Minoru YAMAMOTO

The anti-power of the leg of the steel arch support on tunnel constructions in low bearing capacity of ground is needed to be installed in order to support loads of the ground. In such case, the stress concentration on the ground acting on the leg of the steel arch support and local destruction of the natural ground of the leg are induced. This research is focused on the raising of the adhesion nature of the natural ground where the leg of the steel support was installed. Moreover, the effects of the wing rib support of the new steel arch support leg on controlling the subsidence of the measures were clarified.

Key Words : ground support, steel rib, wing rib, wing pipe

1. はじめに

鋼アーチ支保工脚部の安定対策は、支保工脚部の支持地盤の地耐力が不足し、脚部沈下と地山への応力集中により地山に塑性化が生じてトンネルの安定を損なうことへの対策を主目的としておこなわれるものである。一般には、支保工脚部の支持面積の拡大、吹付けコンクリートによる上半仮インバートの施工、支保工脚部に下向きにロックボルトやパイルを打設し支持力を増強する方法などがある。支保工脚部の安定対策のひとつであるウイングリブ付鋼アーチ支保工（以下「従来型ウイングリブ」と称する）は、支保工の耐力を底板面積の拡大によって向上させるため、支保工にリブを取付けて軸力の伝達を図るとともに、底板付近の曲げモーメント耐力を増強している。しかし、通常の鋼アーチ支保工でも、吹き付けコンクリートに埋め込まれて一体的に挙動するから、取り囲む吹き付けコンクリートの拘束圧によって、曲げモーメント耐力が増加するはずである。したがって、より大きな軸力を伝達できるような補強材を考案することで、支保工の耐力を発揮することができると考えられる。しかし、現状のウイングリブは、その構造上、底板下の地山の敷き均しをいかに丁寧に行っても、支保工と地山との間に空隙が生じ、軸力を伝達するまでに、ある程度地山沈下を許容してしまう問題点があると考えた。

このような地山状況において、著者らは、鋼アーチ支保工の支保効果を最大限に発揮させるために、支保工の脚部設置面積の拡大と地山との密着性を向上させることにより、支保工の脚部沈下を速やかに抑制することを目的としたウイングパイプ付き鋼アーチ支保工（以下「パイプ式ウイングリブ」と称する）を開発した。本研究は、そのパイプ式ウイングリブの荷重支持効果に関して室内試験により明らかにするものである。

-
- 1) 正会員 マシノスチール株式会社 技術部
 - 2) 正会員 学博 山口大学 工学部社会建設工学科 助教授
 - 3) フェロー会員 工博 山口大学 工学部社会建設工学科 教授
 - 4) 名誉会員 工博 東京都立大学 名誉教授



写真-1 パイプ式ウイングリップ

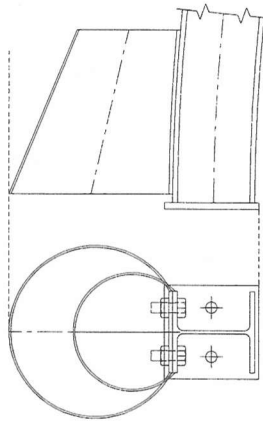


図-1 パイプ式ウイングリップ概観

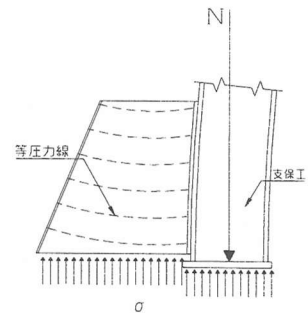


図-2 地山支持機構

2.パイプ式ウイングリップの開発

(1) 従来型ウイングリップの問題点・着目点

鋼アーチ支保工の脚部沈下を抑制するために、一般によく用いられている従来型ウイングリップは、支保工のフランジ外側面にリブ材を取付けて底板の支持面積を大きくして地耐力を得る。しかし、このタイプのウイングリップでは、ウイングリップの形状に合わせて掘削することはきわめて困難であるだけでなく、形状の特殊性により掘削自体が作業上の危険性がともなう。さらに、地山との一体化を図るために吹付けコンクリートが実施されるがウイングリップ部の底板下まで入り込まないため、ウイングリップと地山との間に空隙や緩みが発生し、リブ全体が地山と密着するまで沈下抑制ができにくい。従って、鋼アーチ支保工の支保剛性を最も期待している支保工建て込み直後にウイングリップによる支保効果の向上が期待できない問題点がある。それを避けるため、ウイングリップ下の地山を丁寧に敷き均すことは可能であるが、作業の危険度がさらに増す結果となる。

(2) パイプ式ウイングリップの開発とその考え方

図-1 ならびに写真-1 に示すとおり、パイプ式ウイングリップは、薄鋼板を円錐台状に加工し、ウイングリップのリブ材として用いたものである。この薄鋼板は着脱式で、現場状況に応じて鋼アーチ支保工脚部のフランジプレート、ウェブプレートに直接あるいは接合板を介してボルトで取付けられるため、従来型ウイングリップのように工場で事前に製作する必要がない。さらに、吹付けコンクリートをそのパイプの中に吹き込むことにより鋼アーチ支保工本体と地山との早期密着性を図ることができるよう工夫した。

パイプ式ウイングリップの円錐台パイプ内に吹き付けコンクリートを吹込み、充填することにより、パイプ式ウイングリップに作用する反力は、支保工の底板反力とパイプ式ウイングリップ底面を横切る吹き付けコンクリート断面の反力を加えた合反力になる。これは図-2 に示すように、パイプ式ウイングリップ内のコンクリートが未だ固まらない状態でも、パイプ式ウイングリップ内壁による拘束によって閉塞され、パイプ内にコンクリートによるアーチアクションが発生して地山荷重を支持するからである。一方、反力によってパイプ式ウイングリップには軸力と同時に曲げモーメントとせん断力とが作用するが、パイプ式ウイングリップ周辺の吹付けコンクリート（コンクリート）がパイプ式ウイングリップと一体的に挙動する事で、これらの力に対抗する。

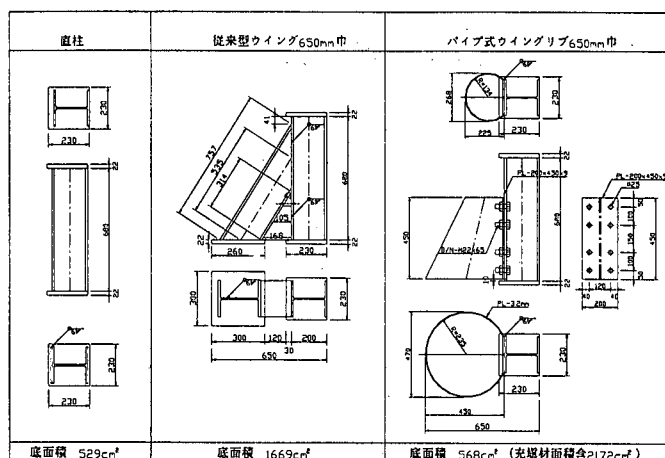


図-3 脚部供試体3タイプ

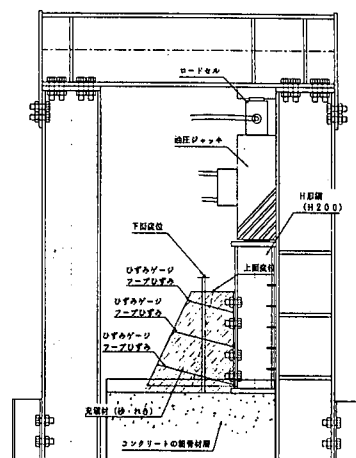


図-4 載荷試験

		底面積	充填材	地盤材
ハ°ター-1	単柱	529cm ²	—	碎石 (10mm以下)
ハ°ター-2	従来型ウイングリブ	1,669cm ²	—	碎石 (10mm以下)
ハ°ター-3	パイプ式ウイングリブ	568cm ² (※2,172cm ²)	山砂 (洗砂)	碎石 (10mm以下)
ハ°ター-4	パイプ式ウイングリブ	568cm ² (※2,172cm ²)	碎石 (10mm以下)	碎石 (10mm以下)

※充填後の充填材も含めた総底面積

表-1 載荷試験パターン

パイプ式ウイングリブを設置するためには、支保工脚部回りの空間を形成する必要があるが、地山を丁寧に敷き均す必要が無いため、作業性に優れている。そして、パイプ式ウイングリブは、軽量で扱いやすく、その空間内に吹付けコンクリートや新鮮なコンクリート等を投入することにより地山との密着性と支持面積の確保とにより地山支持力を得ることができる。しかし、脚部沈下抑制効果、支保荷重増加によって明らかになる支保効果、特に初期荷重におけるそれらの効果をより明確にするため、比較試験を室内で実験し、それぞれの効果を確認した。

3. 試験方法

3. 1 支保効果の確認

(1) 試験方法

パイプ式ウイングリブの支保効果を検証するために、図-3に示すような鋼アーチ支保工脚部を模した供試体として、従来型ウイングリブ、パイプ式ウイングリブの2種類のウイングリブを製作し室内実スケール試験を実施した。製作にあたって、両タイプ共に底面巾を650mmで一定とした。なお、パイプ式ウイングリブには、充填材料として吹付けコンクリートを模して礫（碎石10mm以下）を充填したものと、山砂（洗砂）をパイプ内に充填する2種類を試験した。パイプ式ウイングリブはH形鋼に鋼板3.2mmで作成したウイングパイプをボルトにて取付けたもので、その場合、底面積は直柱部と合わせて2,172cm²となる。試験では、地盤は径10mm以下のコンクリートの粗骨材を供試体の下に敷詰め、その上に供試体を接地した。供試体を設置した後、図-4に示すようにH形鋼に直接軸力がかかるようにロードセルを介して油圧ジャッキにて5tf毎2分間で載荷し1回目の計測を行い、3分後に2回目の計測、その後3分後に3回目の計測を行い計8分間で沈下が収束していることを確認し0～50tfまで載荷した。その際、パイプ式ウイングリブでは薄肉鋼板の応力（円周応力）、充填材の挙動、沈下変位等5tf毎に計測し、パイプ式ウイングリブとしての機能を調べる試験を行った。パイプ式ウイングリブとの比較の為に、

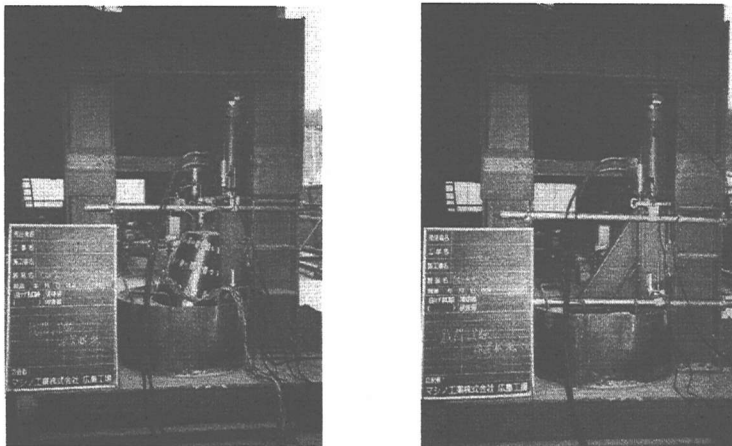


写真-2 載荷試験状況

従来型ウイングリブタイプでは沈下変位の計測を行った。

(2) 比較試験結果

図-5 に、従来型ウイングリブと充填材を変化させたパイプ式ウイングリブの沈下量と載荷荷重の比較結果を示す。図から明らかなように、従来型ウイングリブに比べ、パイプ式ウイングリブは、より小さい沈下量から荷重が増加し始めることがわかる。すなわち、パイプ式ウイングリブは、パイプ内の砂・礫の閉塞に伴う三次元応力状態により、見かけ上地山と早期に密着して支保反力が発生し始めるものと考えられる。同様に、同じだけ沈下した場合を比較すると、礫充填、山砂充填のそれぞれのパイプ式ウイングリブ、従来型ウイングリブの順に支持荷重が小さくなる。この結果から、充填材は充填材同士の流動性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-3 にも示したように、パイプ式ウイングリブの底面鋼材面積は 568cm^2 であるのに対し従来型ウイングリブの底面積は 1669cm^2 である。すなわち、底面の鋼材面積は従来型の方が約 3 倍大きい、支持力はパイプ式ウイングリブのほうが大きい。これは、パイプ式ウイ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ていたためと考えられる。そのため、パイプ式ウイングリブは、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（載荷面応力）で、沈下比較した結果を図-6 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はほぼ等しくなる。

図-7 に示す充填材の圧密変位と荷重の関係からは、荷重の増加に従ってパイプ内の充填材が圧密されており、碎石よりも充填材同士の流動性の高い山砂材のほうがより圧密される事がわかる。これらの結果を総合的に解釈すると、パイプ式ウイングリブは、図-2 のようにパイプ内壁による拘束によって閉塞され、リブ内に充填材によるアーチアクションが発生していることは、上記の考察を裏付けるものである。また、図-8 に示す円周応力（フープストレス）と荷重の関係からも同様に、礫のケースは荷重の増加と円周応力がほぼ一様に増大するにも関わらず、山砂の場合は、最初荷重が増加してもパイプにはほとんど応力が作用しないことがわかり、山砂の場合は充填材そのものが荷重を分担していることがわかる。

3. 2 設置直後の沈下抑制効果の比較

(1) 試験方法

先に述べた支保効果試験の結果からも明らかなように、従来型ウイングリブは、施工時において、従来型ウ

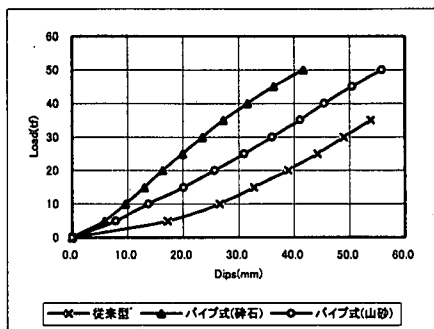


図-5 沈下変位と荷重の関係

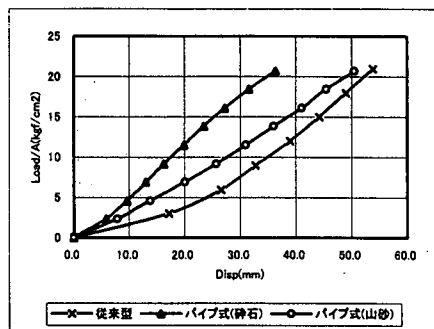


図-6 沈下変位と載荷面応力の関係

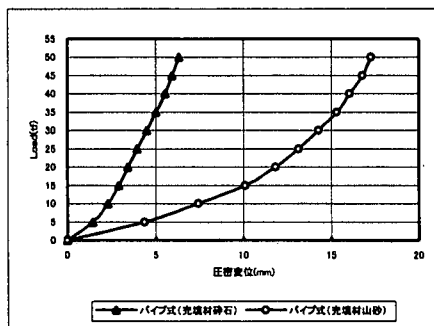


図-7 圧密変位と荷重の関係

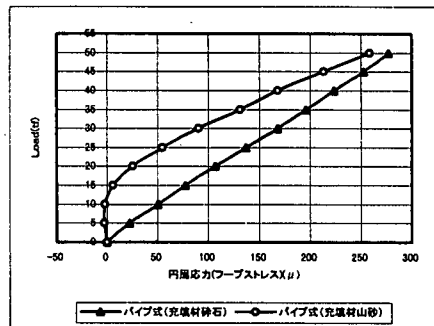


図-8 円周応力(フープストレス)と荷重の関係

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イングリブとパイプ式ウイングリブとの沈下抑制効果について比較検証した。

試験は3、1と同じ荷重装置を用い、供試体は通常の鋼アーチ支保工(H-200x200x8x12)、従来型ウイングリブタイプ、パイプ式ウイングリブタイプの3タイプを用いた。なお、パイプ式ウイングリブには、吹き付けコンクリートを模して礫(砕石10mm以下)を充填したものをパイプ内に充填した。供試体を設置した後、図-4のようにH形鋼に直接軸力がかかるようにロードセルを介して油圧ジャッキにて載荷し、3パターンにおける沈下変位の測定を行った。計測方法は、0~1tf, 0~2tf, 0~4tf, 0~18tfと4段階に分け連続して荷重計測した。

(2) 試験結果

図-9に、それぞれのウイ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(ウイ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。この図からあきらかなように、パイプ式ウイングリブは、従来型ウイングリブと比較して微少な沈下でも荷重が増加し始め、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イングリブよりもパイプ式ウイ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(ウイ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もその効果は明らかである。

これは、パイプ式ウイ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、従来型ウイ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イングリブ部の底板下に入り込まないため、従来型ウイングリブ

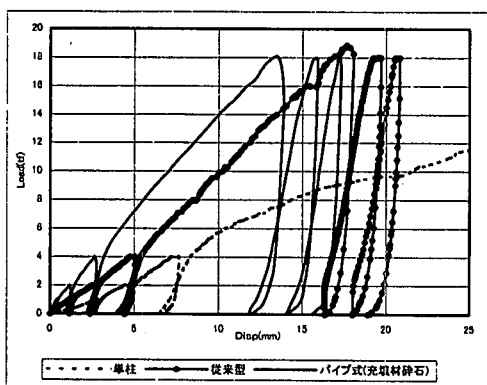


図-9 初期荷重に対する沈下比較(0～18tf)

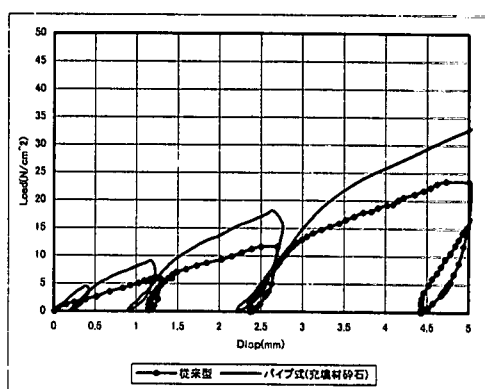


図-10 初期応力に対する沈下比較

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する傾向を示している。

図-10 に、単位面積あたりの支圧応力に換算した結果を示す。図から明らかなように、従来型ウイングリップとパイプ式ウイングリップ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。この関係は地盤により決まるのもであるため、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。

4. まとめ

パイプ式ウイングリップの考え方と支保効果確認の為、载荷試験結果を報告した。パイプ式ウイングリップが充填材の閉塞効果（アーチング）によって支持面積が増大し、従来型ウイングリップ同様の支保材として効果を発揮出来る事が確認できた。又、設置直後の初期荷重に対しパイプ式ウイングリップは直接地山と接することが出来る点から、従来型ウイングリップよりも沈下を抑制できる結果となった。

今後は、この試験結果や工事現場での実測結果を解析する事によってパイプ式ウイングリップを地耐力に対応してパターン化したいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、山口大学臨床トンネル工学研究所の各位に多大の協力を受けました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：トンネル標準示方書
- 2) 木下、竹田、西原：薄鋼板を用いたウイングリップの開発、土木学会第 55 回年次学術講演概要集 VI-282
- 3) 安部、伊藤、木下：薄鋼板を用いたウイングリップ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
- 4) 木下、竹田、西原：鋼アーチ支保工のウイングリップを代替するウイングパイプの载荷試験、土木学会第 56 回年次学術講演概要集 VI-206