

高規格鋼を用いた鋼アーチ支保工の力学的挙動とトンネルの耐荷力の関連性

淡路動太・砂金伸治・日下 敦・河田皓介

1. はじめに

道路トンネル建設のさらなるコスト縮減や工期短縮を目的として、従来に比べて高強度の支保部材を用いて支保パターンを合理化する試みが進められている。これら新しい支保パターンでは、高規格鋼と高強度吹付コンクリートを併用することで、部材自体の耐力を確保しながら、支保部材を薄肉化することが検討されている。また、覆工に外力に起因する変状が発生している場合の補強工法として、鋼アーチ支保工を使用した補強セントル工が採用される場合がある。高規格鋼は、軸力に対してほぼ同様の耐荷力を確保しながら、鋼材の形状が小さくできる可能性があるため、建築限界に対する余裕が従来鋼に比較して大きくなり、管理上の優位性も認められる可能性がある。しかし、アーチ形状を持つ支保部材の集中荷重や等方荷重に対する挙動や耐荷力特性については一部で検討が進められているが^{1), 2)}、十分には明らかになっていない。このため、新支保部材の導入には、施工上の安全性や力学特性、耐久性、さらに適用する地山条件等に関する検討が重要である。

本報告では、鋼アーチ支保工の高規格化に着目し、従来鋼NH150 (SS400) と同程度の降伏時の曲げモーメント (表-1) を有する高規格鋼HH108 (HT590/SS540相当) を用いて製作した実大規模の鋼アーチ支保工に対して載荷実験を行い、それぞれの力学的挙動と耐荷力の関連性について考察を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

検討にあたって実施した実験状況を写真-1に示す。載荷には国立研究開発法人土木研究所内にあるトンネル覆工載荷装置を用いた。覆工載荷装置は、半円形の反力枠と容量500 kNの油圧ジャック



写真-1 実験状況

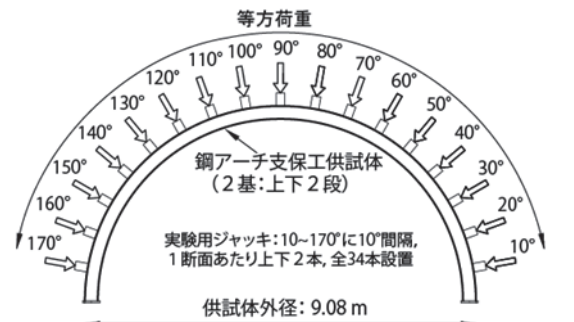


図-1 載荷形式の模式図

表-1 供試体に用いたH形鋼の性能諸元

名称	材質	形状 [mm] A - B - t1 - t2 - r	断面積 [m ²]	単位 質量 [kg/m]	断面2次 モーメント [m ⁴]	降伏 軸力 [kN]	降伏 曲げ [kNm]	降伏 応力 [MPa]
NH150	SS400	150-150- 7-10-8	3.97 × 10 ⁻³	31.1	1.62 × 10 ⁻⁵	971	52.9	245
HH108	HT590 /SS540	108-104- 10-12-8	3.39 × 10 ⁻³	26.6	6.36 × 10 ⁻⁶	1492	51.9	440

きから構成されており、ジャッキは10° ピッチの17断面に設置している。ジャッキは各断面において高さ100 cmの供試体を底面から高さ30 cmと70 cmの位置で載荷板を介して載荷できるように2本設置されている。なお、供試体の脚部は、回転および半径方向の滑動が可能となっており、接線方向には変形できない構造となっている。

供試体は、表-1に示す性能諸元を持つ従来鋼NH150と高規格鋼HH108を用いて、外径9.08 mの半円形の鋼アーチ支保工2基を写真-1のように横に寝かせて、縦断方向に1m間隔となるように互いを鋼管とボルトを用いてウェブ部分で接合し、外側から荷重を作用させた。

図-1に本実験における載荷形式を示す。ここでは、トンネル周辺から一様に土圧が作用した場合

Relationship Between the Load Bearing Capacity and the Mechanical Behavior of Steel Arch Support Using High-Strength Steel

を想定し、10～170度の17箇所全てのジャッキを用いて荷重制御による等方荷重を与えた。

本実験では、図-1に示すように供試体に0～180度で角度を付し位置を定義している。計測項目は載荷荷重、供試体の変位、供試体の軸方向ひずみである。実験は、従来鋼NH150と高規格鋼HH108について、それぞれ1回の載荷を実施した。

2.2 実験結果

実験で得られたジャッキ1本当たりの荷重と最も大きな変位を示した測点（NH150では45度、HH108では天端部）における内空側変位の関係を図-2に示す。また、実験により得られた最大荷重と最大荷重時の変位、荷重－変位曲線の傾きが変化した時点の荷重と変位の一覧を表-2に示す。NH150では、荷重がおよそ192 kN/本に達した時点で荷重－変位曲線の傾きが変化した。その後、変位が急激に増加し、最大荷重204 kN/本を迎えたところで局部的な座屈が発生した（写真-2）。

一方、HH108では、初期載荷時に若干不安定な挙動を示すが（図-2）、NH150に比べて荷重－変位曲線の傾きは緩やかとなり、荷重に対する変位量が大きくなる挙動を示した（図-2）。荷重が146 kN/本、内空側変位が60 mmに達した時点で荷重－変位曲線の傾きが変化した。この時のウェブのひずみは最大-4500 μ程度、天端部が内空側に突出する形状の変形であった。その後、変位が急激に増加したが、局部的な座屈は認められず、最大荷重163 kN/本を超えた時点で、天端部においてH鋼の弱軸方向（鉛直方向）に大きく湾曲した形で座屈が発生し、鋼アーチ支保工の安定性が損なわれたため実験を終了した。

代表的な荷重段階における供試体の周方向ひずみ分布を図-3～図-6に示す。NH150では、荷重の増加とともに供試体全周で周方向ひずみが増加しはじめ、荷重－変位曲線の傾きが変化する192 kNの時点ではすべての測点で周方向ひずみの平均値が降伏ひずみを超過している（図-5）。一方、周方向ひずみのうち、内側と外側の差分ひずみが卓越する点は部分的で不均質に分布し、供試体全体での曲げ挙動は認められない（図-6）。したがって、NH150では、全周に載荷された等分布荷重によって供試体全周で軸方向の圧縮力が卓越し、圧縮による局部的な座屈が生じたと考えられる。最大荷重時の変位はNH150で57 mm（肩部

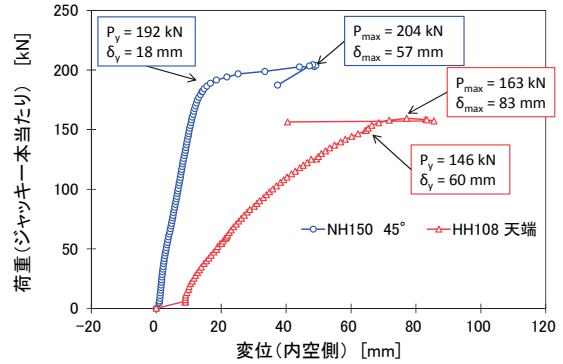


図-2 荷重と変位の関係

表-2 実験結果

実験ケース	荷重 P [kN/本]	変位 δ [mm]
NH150	P-δ 曲線傾き変化時 Py	192 δy 18
	最大荷重時 Pmax	204 δmax 57
	比率 Py/Pmax	94% δy/δmax 32%
HH108	P-δ 曲線傾き変化時 Py	146 δy 60
	最大荷重時 Pmax	163 δmax 83
	比率 Py/Pmax	89% δy/δmax 72%



写真-2 部分座屈の発生状況（NH-150）

45°）となり、最大荷重時に対する荷重－変位曲線の傾き変化時の変位の比率（δy / δmax）は32%である。NH150では、変位の観点から見た荷重－変位曲線の傾き変化後に構造が不安定になるまでの余裕は比較的大きいと考えられる。

一方、HH108では、載荷当初は荷重の増加とともに供試体全周でひずみが増加する挙動が認められたものの、荷重－変位曲線の傾き変化点近傍から、天端と肩部の3点にひずみが集中し、天端部が内空側に突出する形で変形し、安定性を損なう結果となった。最大荷重時に対する荷重－変位曲線傾き変化時の変位比率（δy / δmax）は72%となっている。この最終的な安定性の損なわれ方は曲げの卓越によって構造の不安定化が生じたと考えられる。供試体全周で軸圧縮力が卓越するように実験を進めたものの、全周均等に変形させることが難しく、一部で変形が先行すると、その部位を中心とした曲げが顕著となり、塑性ヒンジを形成する挙動に移行したためと考えられる。

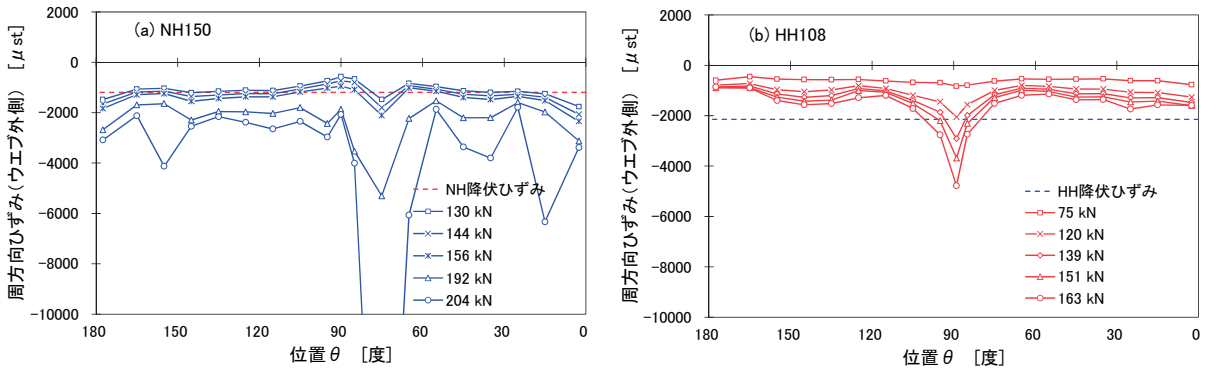


図-3 代表的な荷重段階におけるウェブ外側の周方向ひずみ分布 (a) NH150、(b) HH108)

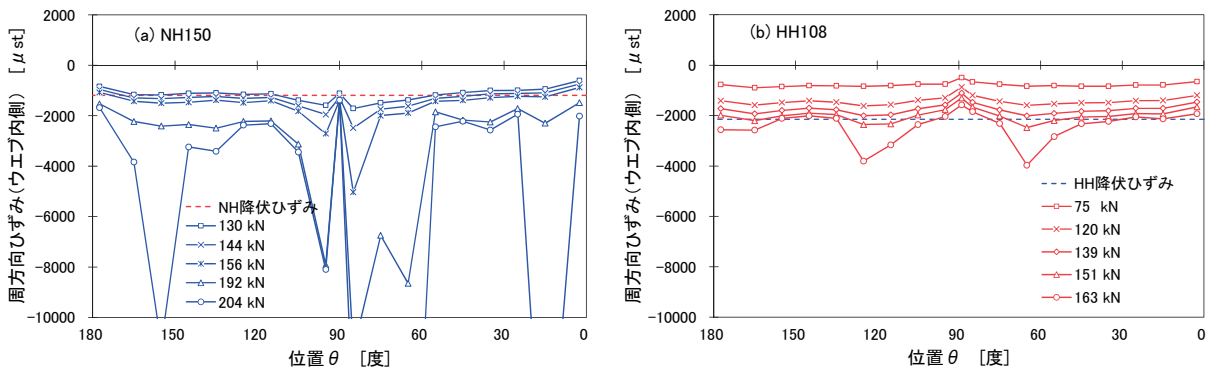


図-4 代表的な荷重段階におけるウェブ内側の周方向ひずみ分布 (a) NH150、(b) HH108)

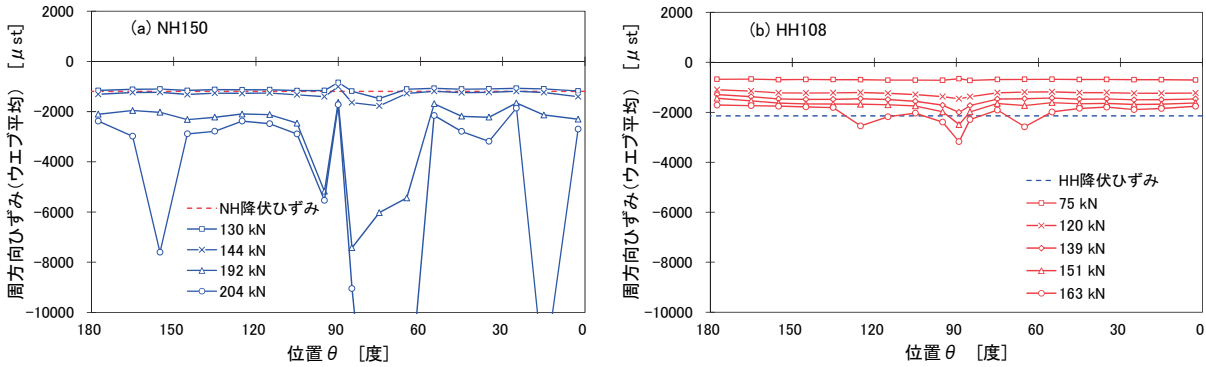


図-5 代表的な荷重段階におけるウェブの周方向ひずみ平均値 $([外+内]/2)$ の分布 (a) NH150、(b) HH108)

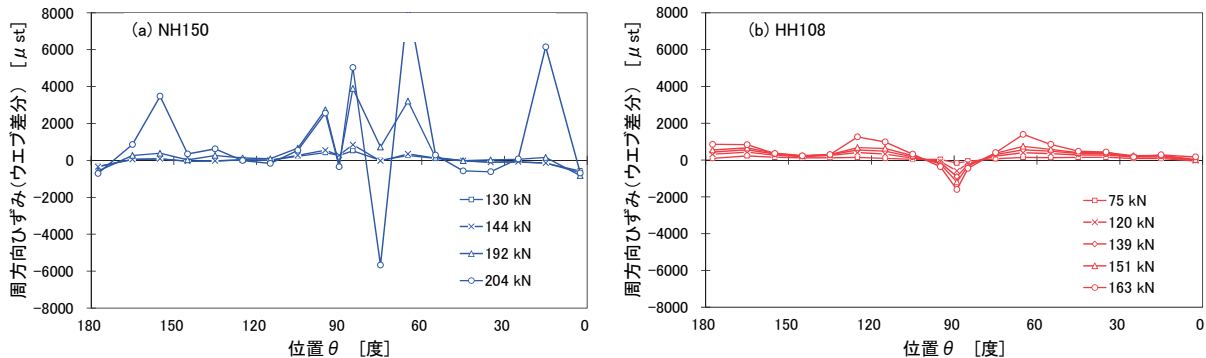


図-6 代表的な荷重段階におけるウェブの周方向ひずみ差分値 $([外-内]/2)$ の分布 (a) NH150、(b) HH108)

3. 考察とまとめ

従来鋼NH150（SS400）と高規格鋼HH108（HT590/SS540相当）を用いて製作した実大規模の鋼アーチ支保工に対して載荷実験を行い、力学的挙動とトンネルの耐荷力の関連性について考察を行った。

3.1 荷重－変位曲線傾き変化後の挙動

最大荷重に対する荷重－変位曲線の傾き変化時の荷重比率（ P_y / P_{max} ）は、NH150で94%、HH108で89%となり、荷重－変位曲線傾き変化後の荷重の観点からの余裕は比較的少ないと考えられる（表-2）。したがって、鋼アーチ支保工は荷重－変位曲線の傾き変化後には、変位についてはある程度の追随性を保持し、即座に構造が不安定に達することはないが、荷重に対しては、耐荷力の観点での余裕は少なく、十分注意する必要があると考えられる。

3.2 断面剛性と耐荷力の関係

表-1に示すようにNH150とHH108は、鋼材の諸元としては降伏曲げモーメントが同等で、降伏軸力についてはHH108の方が大きい特徴がある。しかし、従来鋼と高規格鋼で弾性係数は同等であるため、鋼材としての剛性は断面積と断面2次モーメントの大きさに依存する。このため、HH108はNH150に比べて基本的に剛性は小さくなる。本実験ではHH108の最大荷重 P_{max} はNH150に比べて小さくなっている。HH108の断

面剛性はNH150に比べて小さいため、荷重に対する変位が大きくなる傾向が認められた（図-2）。このことは、鋼アーチ支保工は部材の断面剛性が小さくなると、荷重に対する変形が大きくなり、アーチ形状を保持しづらくなるため、構造としての安定性は損ないやすくなる可能性を示唆している。したがって、鋼アーチ支保工の耐荷力特性を検討する際には、強度特性だけでなく、断面剛性の違いによる変形特性、すなわちアーチ形状の保持力も大きな影響を持つ可能性がある。

3.3 今後の課題

本実験では、限定的な荷重形式、最終変形モードと実現象との整合性、さらに薄肉化による3次元的な挙動に対する健全性等について、検討すべき課題が残っている。今後、他の荷重モードについても検討を進め、高規格鋼を用いた支保部材採用時の留意点等について整理を進める予定である。

参考文献

- 1) 真下英人、森本智、木谷努、角湯克典：損傷を受けたトンネル覆工の内面对策の効果に関する実験的研究、トンネル工学論文集、第18巻、pp.21～32、2008
- 2) 砂金伸治、日下敦、真下英人、角湯克典：鋼アーチ支保工の耐荷力に関する一考察、第64回年次学術講演会、pp.817～818、2009

淡路動太



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員、現 清水建設(株)土木技術本部、博(理)
Dr. Dohta AWAJI

砂金伸治



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム上席研究員、博(工)
Dr. Nobuharu ISAGO

日下 敦



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員
Atsushi KUSAKA

河田皓介



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム専門研究員、現(株)オリエンタルコンサルタンツ関西支店国土技術部
Kosuke KAWATA