

地盤反力の有無に着目した 繊維補強覆工コンクリートの耐荷特性の把握

岡野法之¹・嶋本敬介¹・小島芳之¹・生駒末年馬²・高橋源太郎²

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:nokano@rtri.or.jp

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

地盤と覆工の相互作用を考慮できる縮尺1/5の大型トンネル覆工模型実験装置を用いて、鋼繊維補強コンクリート、非鋼繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートについて載荷試験を実施し、耐荷性能やひび割れ性状、変形挙動等の比較検討を行った。ひび割れが局所に集中し、ひび割れ幅が広がりやすい状況における繊維補強コンクリートの性能を評価するために、地盤反力の得られないという極端な条件の実験を実施し、地盤反力が得られるケースと比較した。その結果、地盤反力の得られないケースでは、第2ひび割れ発生後、載荷重が低下し、十分な構造耐力、変形性能が得られないため、繊維補強コンクリートの使用に際しては、覆工背面の地盤反力が得られることが必要であることなどがわかった。

Key Words tunnel, tunnel lining, loading test, model experiment, fiber reinforced concrete

1. はじめに

山岳トンネルの覆工は、アーチ構造であることから、覆工に荷重が作用しても、覆工コンクリート内の応力分布は圧縮側に偏り、引張応力は発生しにくい。このため、山岳トンネルの二次覆工には一般的には無筋コンクリートが使用されることが多い。

しかし、局所的な荷重が作用した場合や、塑性圧、緩み圧、偏圧、地震時荷重等が作用した場合などには、覆工に引張応力が作用し、ひび割れ等の変状が発生することが考えられる。

このような状況に鑑み、覆工コンクリートに引張強度を付加させるため、鉄筋や繊維の混入により補強を行うことがある。また、最近の傾向としては、鉄筋の組立て作業と比較してその作業性の良さから、また、繊維による剥落防止効果を期待して繊維補強コンクリートを用いる場合が多くなっている。

しかし現状では、鉄道の山岳トンネルでは、繊維補強コンクリートの仕様は、トンネルごとに地質条件や覆工打設直前の内空変位量および変位速度等の条件に応じて個別に決められており、統一された設計手法は確立されていない。また、繊維補強コンクリートによ

る山岳トンネル覆工の耐荷特性についても十分に検証されているとはいえない状況である。今後さらに繊維補強コンクリートに対する需要が高まることが予想されることから、非鋼繊維も含めた山岳トンネルの繊維補強覆工コンクリートの耐荷特性を把握し、膨張性地山等の覆工に繊維補強コンクリートを適用する場合の設計法を確立することが望ましいと考えられる。

そこで筆者らは、その目的に資するため、地盤と覆工の相互作用を考慮できる縮尺1/5の大型トンネル覆工模型実験装置¹⁾を用いて、鋼繊維補強コンクリート、非鋼繊維補強コンクリートおよび無筋コンクリートについて載荷試験を実施し、耐荷性能やひび割れ性状、変形挙動等の比較検討を行った²⁾。

これにより、鋼繊維、非鋼繊維ともに、耐荷性能の向上が見られたこと、鋼繊維にはひび割れ分散効果が見られること、鋼繊維、非鋼繊維ともに剥落防止効果が見られることなどを確認した。

本稿では、さらに、ひび割れが局所に集中し、ひび割れ幅が広がりやすい状況における繊維補強コンクリートの性能を評価するために、地盤反力の得られないという極端な条件の実験を実施した結果、得られた知見について報告する。

2. 実験装置¹⁾

載荷試験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置を図-1に示す。実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺1/5であり、反力フレーム、載荷用油圧ジャッキ、反力用油圧シリンダからなっている。載荷は天端部の載荷用油圧ジャッキのみで行い、地盤ばねを模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねで、地盤反力を模擬している。地盤反力は、第四紀洪積層を想定して、地盤反力係数換算16MN/m³となるように皿ばねを調節している。

各装置の仕様を以下に示す。

- ・載荷用油圧シリンダ
 - 最大載荷圧：500kN
(載荷板面積当り 5.6MPa)
 - ストローク：250mm
 - 載荷板：300mm×300mm
- ・反力用油圧シリンダ
 - 内径：φ125
 - ストローク：200mm
- ・皿ばね
 - 寸法：外径 200mm×内径 102mm×厚さ 12mm
 - ばね定数：3000kN/m (皿ばね 20 枚/1 ケ所)
 - 地盤反力係数換算：16MN/m³

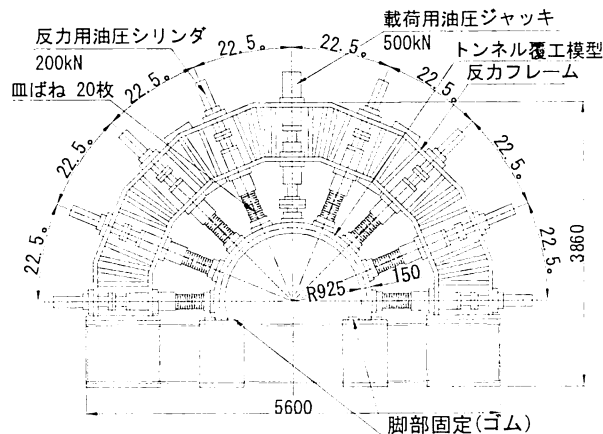


図-1 模型実験装置の概要

3. 実験条件

(1) 検討ケース

今回は、鋼繊維および非鋼繊維（ポリプロピレン繊維）それぞれについて、地盤反力の得られないケースを実施し、以前実施した地盤反力ありのケース^{2),3)}と併せて検討した。検討ケースを表-1に示す。ここで、地盤反力が得られないケースについては、載荷用油圧ジ

ャッキの載荷板のみを覆工コンクリートに接触させ、反力用の載荷板を接触させないことで表現している。実験に使用したコンクリートの配合を表-2に示す。また、実験に用いた繊維の諸元を表-3に示す。なお、繊維の幾何的な縮尺は1/5となっておらず、実トンネルサイズで考えた時、繊維の径、長さが大きい状況を模擬していることになるが、体積混入率を0.5%と、実際と同程度としており、繊維の極端な過大評価にはならないと考える。

(2) 供試体の作成

実験に使用したコンクリート供試体の寸法を図-2に示す。コンクリート供試体は巻厚150mm（実物換算750mm）、内径925mmで、奥行き方向は載荷板寸法と同じ300mm、スプリングラインから下は250mmとなっている。

繊維を混入は、ミキサーに所定量のフレッシュコンクリートと繊維を投入し90秒間練混ぜることにより実施した。

覆工コンクリート模型の打設は、鋼製の型枠に両脚部からの高さが均一となるように流し込み、パイプレータで締め固めながら行った。また、供試体作成時に一軸圧縮試験用のテストピースを採取し、圧縮強度の確認を行った。そして、所定の強度が得られるまでの期間、型枠を付けたまま養生を行った。

表-1 検討ケース

実験ケース	繊維の種類	混入率 (vol%)	地盤反力
ケース1	無筋	—	あり
ケース2	鋼繊維	0.5	あり
ケース3	非鋼繊維	0.5	あり
ケース4	鋼繊維	0.5	なし
ケース5	非鋼繊維	0.5	なし

表-2 実験に使用したコンクリートの配合

設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)
21	普通ポルトランドセメント	20	15±2.5

表-3 実験に使用した繊維の諸元

繊維種類	繊維径	繊維長	比重	形状
鋼繊維 (タフグリップ)	0.75mm	43mm	7.85	両端フック付
非鋼繊維 (バルチップ J-K)	0.78mm	48mm	0.91	インデント形

() 内は商品名

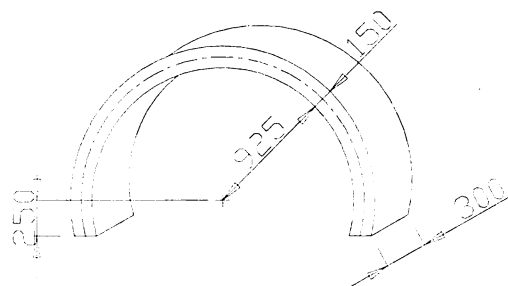


図-2 実験に使用した供試体

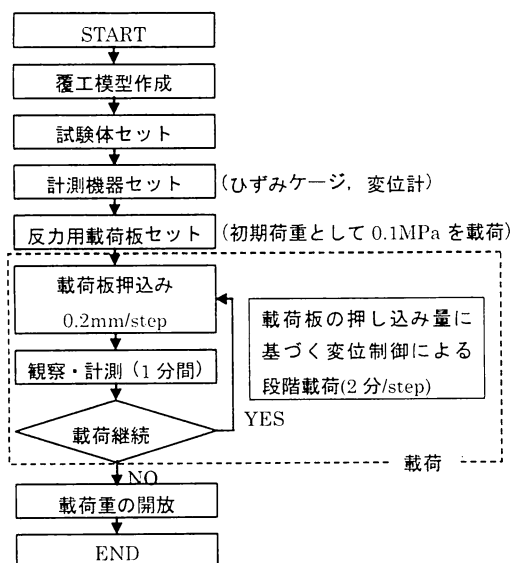


図-3 載荷実験フロー

(3) 載荷方法

載荷は、天端背面の載荷用油圧ジャッキにより、300mm×300mm の載荷板を介して、変位制御による段階載荷により実施した。「0.2mm/分で1分間載荷、載荷を停止し、1分間観察・計測」を1ステップとし、このステップを載荷板変位 80mm または載荷重がピークを迎えた時の荷重の値（ピーク荷重）の 1/3 となるまで繰り返した。図-3 に載荷実験のフローを示す。

計測項目はトンネル内空変位 9 箇所、ひずみゲージ 9 箇所×内外=18 箇所および載荷荷重である。変位計、ひずみゲージの配置を図-4 に示す。

4. 実験結果

実験結果として、曲げ引張ひび割れ（以下、単に「ひび割れ」と称す）および曲げ圧縮破壊（以下、「圧ざ」と称す）の発生状況、荷重－変位曲線について示し、考察する。

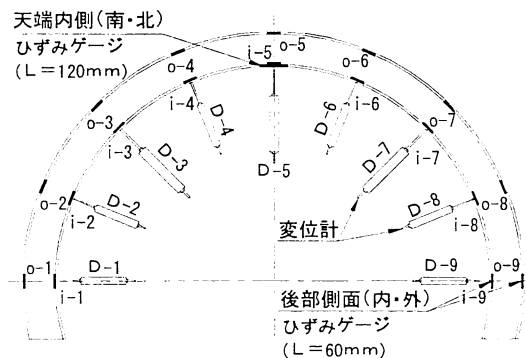


図-4 計測機器の配置

(1) ひび割れおよび圧ざについて

各実験ケースの試験終了時の状況を、地盤反力ありのケースも含めて写真-1～5 に示す。試験終了は、載荷板変位 80mm または載荷重がピーク荷重の 1/3 となった時としているが、地盤反力ありのケースは 80mm 押し込んでも載荷重はそれほど落ちなかったのに対し、地盤反力なしのケースでは、ひび割れが 2, 3 箇所入った段階で載荷重が低下していき、載荷板変位 20mm で試験終了となった。なお、ケース 2 の鋼繊維、地盤反力ありのケースは載荷板変位 70mm で天端部がせん断破壊したため、試験終了としている。

各実験ケースのひび割れおよび圧ざの発生数を表-4 に示す。地盤反力のないケースでは、圧ざは発生しなかった。圧ざが発生するほどの軸圧縮力が作用していなかったためと考えられる。ひび割れの発生数は、地盤反力ありの場合は、ケース 2 の鋼繊維補強コンクリートのケースにおいて多く、ひび割れの分散効果が確認された。

地盤反力なしのケースでは、載荷板を押込むことにより、ひび割れの幅が拡大していくものの、分散はしなかった。繊維によるひび割れ分散効果よりも、地盤反力がないことにより、ひび割れの局所化しやすい影響が上回ったと考えられる。

なお、表-4 より、ケース 1 の無筋とケース 3 の非鋼繊維のひび割れの個数は同一であり、非鋼繊維のひび割れの分散効果は確認できない。しかし、表-5 より、載荷板押し込み量 20mm のときの各ケースの代表的なひび割れ幅は、ケース 3 の非鋼繊維の方が、ケース 1 の無筋と比較して小さいことがわかる。これより、非鋼繊維にも鋼繊維ほどではないものの、ひび割れ開口幅を抑え、ひび割れを分散させる効果があることが想定される。

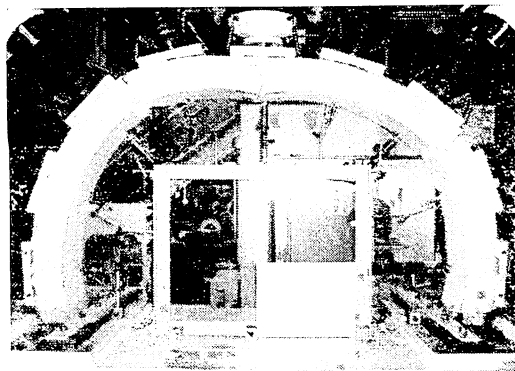


写真-1 破壊状況（ケース1：無筋，地盤反力あり）
 載荷板押込み量80mm

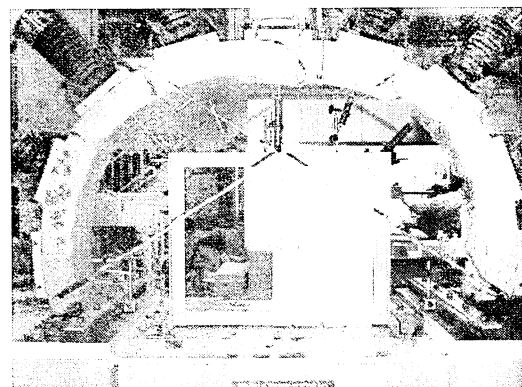


写真-2 破壊状況（ケース2：鋼繊維，地盤反力あり）
 載荷板押込み量70mm

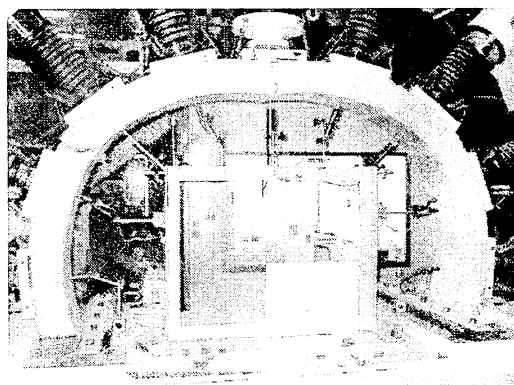


写真-3 破壊状況（ケース3：非鋼繊維，地盤反力あり）
 載荷板押込み量80mm

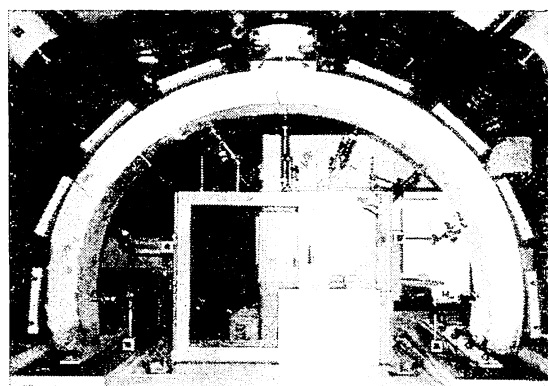


写真-4 破壊状況（ケース4：鋼繊維，地盤反力なし）
 載荷板押込み量20mm

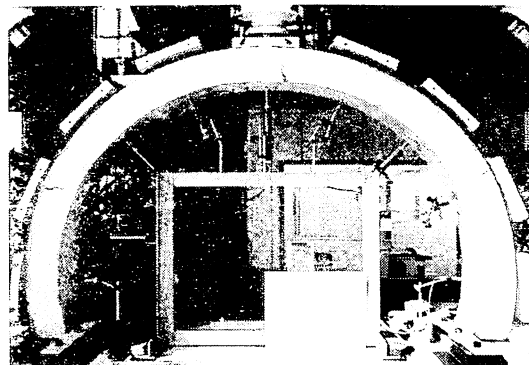


写真-5 破壊状況（ケース5：非鋼繊維，地盤反力なし）
 載荷板押込み量20mm

表-4 ひび割れおよび圧ぎの発生数

ケース No.	実験ケース	発生位置および発生数			
		内空側		地山側	
		圧ぎ	ひびわれ	圧ぎ	ひびわれ
ケース1	無筋 地盤反力あり	2	1	1	6
ケース2	鋼繊維 地盤反力あり	2	2	1	11
ケース3	非鋼繊維 地盤反力あり	2	1	1	6
ケース4	鋼繊維 地盤反力なし	0	1	0	2
ケース5	非鋼繊維 地盤反力なし	0	1	0	2

表-5 ひび割れ幅（載荷板押込み量20mm）

ケース No.	実験ケース	ひび割れ幅(mm)		
		天端内側	左肩部	右肩部
ケース1	無筋 地盤反力あり	10.0	7.0	6.5
ケース2	鋼繊維 地盤反力あり	10.0	5.0	5.0
ケース3	非鋼繊維 地盤反力あり	9.5	7.5	3.5
ケース4	鋼繊維 地盤反力なし	10.0	8.0	8.0
ケース5	非鋼繊維 地盤反力なし	11.0	10.0	10.0

(2) はく落に対する抵抗性²⁾

地盤反力ありのケースの試験終了時の圧ぎ発生状況（アーチ左肩部内側）を写真-6～8に示す。

無筋コンクリートのケースでは圧ぎ発生部分のコンクリートが大きく破壊し、供試体からはがれ落ちていたのに対し、鋼繊維およびポリプロピレン繊維補強コンクリートの場合、はく落片は小さく、はく離はしているものの落下せず供試体に止まっていることが確認された。この実験結果は繊維補強コンクリートのはく落防止効果を裏づけるものである。



写真-6 圧さ発生状況 (ケース1: 無筋, 地盤反力あり)



写真-7 圧さ発生状況 (ケース2: 鋼繊維, 地盤反力あり)



写真-8 圧さ発生状況 (ケース3: 非鋼繊維, 地盤反力あり)

(3) 荷重－変位曲線

実験により得られた荷重－変位（天端沈下量）曲線を図-6に、また、特に天端沈下量10mmまでを取り出したものについて、地盤反力ありのケースを図-7に、地盤反力なしのケースを図-8に示す。図-7、図-8にはひび割れ発生時期も併せて示している。

図-6～図-8より、載荷直後の荷重－変位曲線の傾きは、全ケースほぼ等しいことがわかる。そして、最初のひび割れが入る荷重は、鋼繊維の地盤反力ありの場合だけが他のケースと比べて3倍程度大きいという結果になった。すなわち、鋼繊維は地圧によるトンネルの変形を抑える効果が大きいことがわかる。

また、鋼繊維と非鋼繊維の耐荷特性の差は、地盤反力がある場合は、図-6より、載荷初期では、鋼繊維の方がある変位を与える時の載荷重は大きいですが、その後、載荷変位が大きくなるにつれて、その差が縮まり、最

大載荷重としては、鋼繊維も非鋼繊維もそれほど差がないという結果になった。これらのことは、鋼繊維はひび割れ発生直後から補強効果を発揮し、覆工コンクリートの曲げ引張剛性が向上しているのに対し、非鋼繊維は覆工コンクリートの初期のひび割れに対する抵

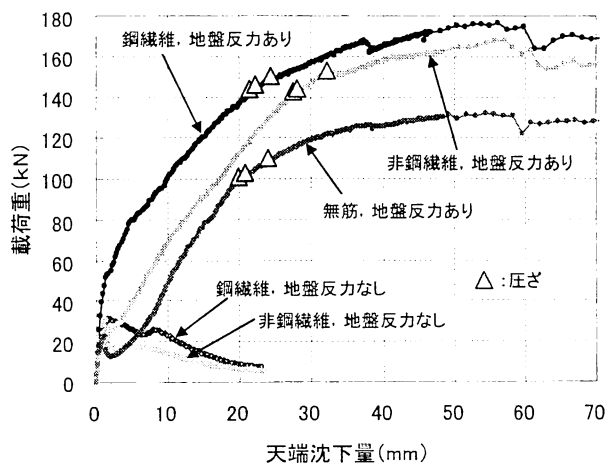


図-6 荷重－変位曲線

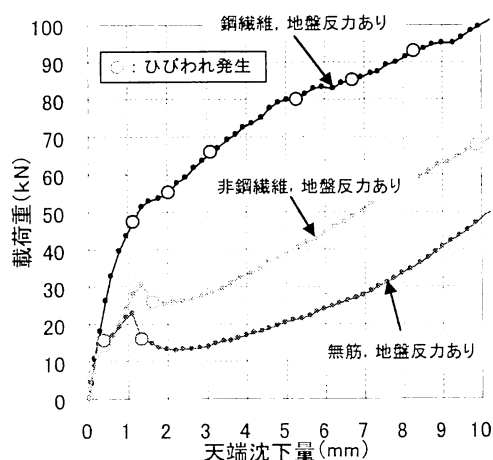


図-7 荷重－変位曲線（地盤反力ありケース）
（天端沈下10mmまで）

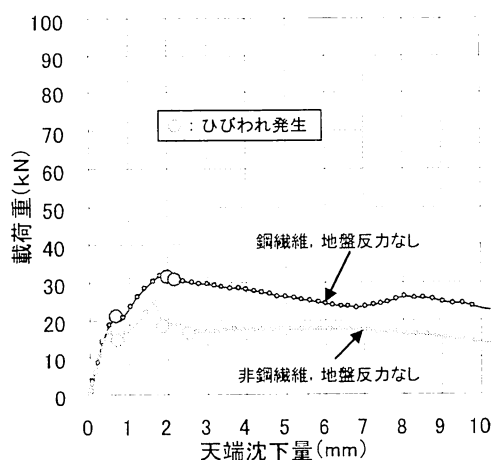


図-8 荷重－変位曲線（地盤反力なしケース）
（天端沈下10mmまで）

抗性の向上にはさほど効果がなく、ある程度変状が進んだ（ひび割れが開口した）状態からその効果を発揮することを示している。この違いは、鋼繊維とポリプロピレンの剛性の違いによるものと考えられる。

図-7、図-8 より、地盤反力があるケースではひび割れが発生した後も荷重が上がり続けたのに対して、地盤反力のないケースにおいては、2 つ目のひび割れが入った後、鋼繊維、非鋼繊維ともに荷重が低下し始めた。また、鋼繊維では、地盤反力があるなしに関わらず、荷重-変位関係が連続的に変化するのに対して、非鋼繊維、無筋の場合は、第 2 ひび割れ発生時に荷重がやや低下した。

また、地盤反力がない場合は、図-8 より、初期ひび割れが生じる載荷重は、鋼繊維の方がやや大きいものの、地盤反力がある場合ほど顕著ではない。また、最大荷重についても同様に、鋼繊維の方がやや大きいものの、地盤反力がある場合ほど顕著ではない。これは、軸力が発生しにくい載荷パターンであるため、ひび割れ部がヒンジ構造として働き、わずか 2mm 程度の天端沈下量で荷重がピークを迎えたものと思われる。これより、地盤反力が得られない場合のようなひび割れが局所化しやすい条件下では、繊維補強コンクリートであってもひび割れ分散効果を発揮できず、十分な変形性能を有さないことがわかった。

5. おわりに

鋼繊維、非鋼繊維補強覆工コンクリートの耐荷特性を把握することを目的として、縮尺 1/5 の大型トンネル覆工模型実験を実施した。本稿では、昨年度実施した地盤反力ありのケースに追加して地盤反力なしのケースの結果を追加し、検討を行った。

実験により得られた知見を以下に示す。

- ・繊維補強コンクリート覆工は、無筋と比較して、トンネルの耐荷性能が向上しており、特に鋼繊維補強コンクリート覆工は、地圧に対して、ひび割れを防ぎ、変形を抑制する効果大きい。
 - ・繊維補強コンクリート覆工は、無筋と比較して、ひび割れを分散させる効果、圧さ箇所からの剥落を防ぐ効果がある。
 - ・地盤反力がないような条件の場合は、繊維補強コンクリートであっても、第 2 ひび割れ発生後、載荷重が低下し、十分な構造耐力、変形性能が得られないため、繊維補強コンクリートの使用に際しては、覆工背面の地盤反力が得られることが必要である。
- 筆者らは、山岳トンネル覆工に繊維補強コンクリートを用いる場合の設計手法の確立を目的に種々の検討を行っているところである。本稿ではその一環として実施した大型トンネル覆工模型実験結果について示した。今後は現在進めている要素実験や解析的検討の深化を進め、設計法の提案に繋げる予定である。

参考文献

- 1) 高橋幹夫, 津野究, 小島芳之: 大型トンネル覆工模型実験装置の開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, III-070, pp.139-140, 2006.9
- 2) 岡野法之, 植村義幸, 小島芳之, 生駒末年馬, 磯谷篤実: 大型覆工模型実験による繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握, トンネル工学報告集, Vol.18, pp.143-148, 2008
- 3) 岡野法之, 小島芳之, 植村義幸: 大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 132, pp.909-914, 2008.

A STUDY OF THE WITHSTAND LOAD CHARACTERISTIC OF FIBER REINFORCED CONCRETE FOCUS ON GROUND REACTION FORCE

Noriyuki Okano, Keisuke Shimamoto, Yoshiyuki Kojima
Minema Ikoma and Gentaro Takahashi

Using test machine with a large tunnel lining model, steel, non-steel fiber reinforced concrete and plain concrete are examined from the aspects of withstand load, crack state, deformation behavior and so on. The test machine can simulate the reaction between ground and lining concrete. The cases without ground reaction force have also carried out, and compared with the cases which simulate ground reaction force. As the results, in the case without ground reaction force, applied force has declined when the second crack has generated, and the lining didn't have enough deformation and withstand load performance even it was fiber reinforced concrete cases.