

覆工コンクリートの崩落の防止に関する実験的検討

小出孝明・日下 敦・砂金伸治

1. はじめに

山岳トンネルは、基本的には堅固な地山の中に構築されることから、一般に地震による被害が比較的少ない構造物として認識されている。しかしながら、割合としては少ないものの断層・破砕帯の存在などにより地山が急変するような不安定な箇所の一部では、文献^{1),2)}などで報告されているように、路盤の隆起や、覆工コンクリートのひび割れ、剥落、崩落が発生するなどの様々な地震被害が発生している。例えば、平成28年の熊本地震においては、俵山トンネルでは写真-1に示す覆工コンクリートの大規模な崩落を伴う被害が発生した。これらの事例に共通する特徴は、無筋の覆工コンクリートが崩落したものの、地山は概ね自立しており、トンネル内の空間は確保されていることである。

覆工コンクリートは坑口部などで、将来の荷重の変化などに備えて単鉄筋による補強を行う場合があるが、一般部では原則として外力が作用しないことが前提となっており、無筋コンクリートとなっている。このような区間で、地震の影響が大きいと考えられる箇所では、大きなコンクリート塊の落下を防止し、利用者の安全を確保することが重要であると考えられる。

そのため、筆者らはまず覆工コンクリートが破壊され、大きなコンクリート塊の落下に至る過程を模擬する実験を行い、落下の防止が可能となる方法について検討した。本稿ではこの検討内容と得られた技術的知見について報告する。

2. 実験の概要

2.1 覆工コンクリートが崩落に至る状況

地震時に覆工コンクリートが崩落する過程に関して、目撃された情報や計測データなどがほとんど無いため、覆工コンクリートの挙動や作用する荷重などは不明確な部分が多い。得られている情



写真-1 俵山トンネルのスパン 167 付近の覆工コンクリート崩落状況

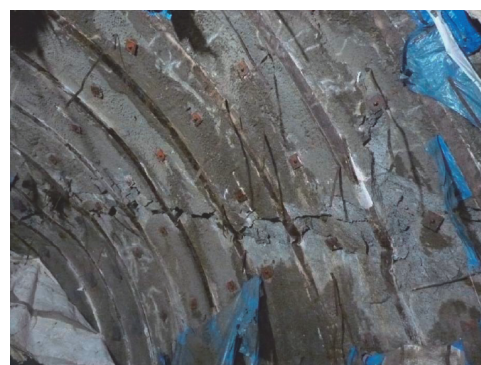


写真-2 スパン 167 付近の支保工の状態 (覆工撤去後)²⁾

報の一例として、写真-2に写真-1の覆工コンクリートが崩落した箇所の支保工の状態を示す。断層のずれに起因すると推定されるせん断破壊が確認されており、ずれの大きさは100mm程度であった。また、この事例以外にも、掘削時に観察された断層・破砕帯に沿って覆工コンクリートの崩落が発生³⁾している。そして、崩落の発生は全て無筋コンクリート区間であった。これらの情報から、局所的に大きな変形が発生する地山状態が存在し、覆工コンクリートがその変形に追随できない場合には分断されてコンクリート塊となり、落下に至ることが推定される。

2.2 実験の目的

破壊自体を完全に抑制することは困難であったとしても、大規模なブロックとしての落下を防止することを考えれば、写真-2に示される破壊された支保工が対策の考え方の1つを示唆している例といえる。すなわち、大変形により分断されて

100mm程度のずれが生じているが、鋼アーチ支保工の延性を発揮して変形に追随し、支保工全体を繋ぎ止めている。覆工コンクリートにおいても同様に、鉄筋や鋼繊維などの補強材の延性により地震時の局所的な大変形に追随できればコンクリート塊の落下防止対策として有効であると考えられる。そのため、本実験では無筋コンクリート、鉄筋による補強コンクリート、鋼繊維による補強コンクリートを用いた供試体に载荷する実験を行い、変形に対するそれぞれの追随性を確認した。

2.3 実験の条件

(1) 供試体

図-1に示すように実験で用いる供試体の形状は、载荷装置の制約からアーチではなく直線とした。寸法は覆工模擬部の長さを80cmとし、载荷方向に対して厚さを35cm、奥行きは50cmとし、全てのケースで統一した。また、せん断破壊を誘導するために覆工模擬部の両端に曲げ変形を抑制するための厚さ70cmの固定部を設けて鋼棒で締め付けた。表-1に示すようにコンクリートは覆工に使用される無筋、鉄筋による補強および鋼繊維による補強の3種類のコンクリートを用いて、各種2体ずつの供試体を作成した。なお、鋼繊維による補強コンクリートについては鋼繊維混入率0.3%の2体に加えて0.5%の供試体を1体作成した。また、コンクリートの配合や補強材の配置(図-2)などは実績を参考に決定した。

(2) 载荷方法

载荷装置は2000kNまでの载荷重と300mmのストロークが可能なものを用いた。载荷は鉛直下方に行い、载荷過程における制御については表-1に示すように CASE1、3、5では供試体が破壊されて落下する瞬間的な現象について、可能な限り実際に近い再現をして観察する目的から、荷重制御により载荷装置の動きを止めないように押し下げた。また、この方法で载荷ができなくなる場合には変位制御に切替える方針とした。一方で CASE2、4、6、7では荷重と変位の関係を確認するために変位制御により载荷した。

(3) 測定と観察

測定項目は荷重と変位とし、荷重は载荷装置の出力を記録した。変位は変位計を2つの観察面における覆工模擬部の両端と中心位置の計6箇所に設置して測定した。

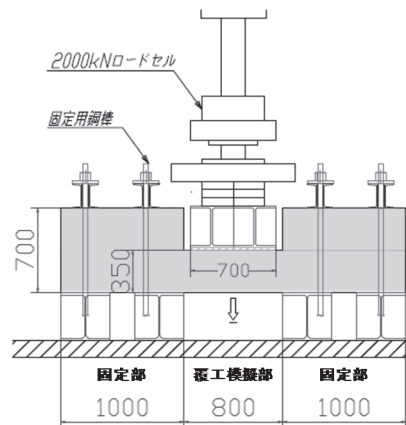


図-1 実験概要図

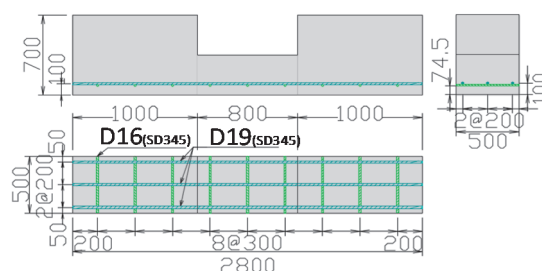


図-2 鉄筋配置図

表-1 実験ケース一覧

CASE	コンクリート配合	実験時の供試体強度(N/mm ²)	補強材料	
1 無筋(荷重制御→変位制御)	22.5-15-40	30.3	-	
2 無筋(変位制御)		31.5		
3 鉄筋(荷重制御→変位制御)		30.3		主筋:D19@200
4 鉄筋(変位制御)		30.1		配力筋:D16@300
5 鋼繊維0.3%(荷重制御)	24-18-20	25.9	スチールファイバー L=60mm, φ=0.75mm	
6 鋼繊維0.3%(変位制御)		24.2	混入量W=28.6kg/m ³	
7 鋼繊維0.5%(変位制御)		22.6	スチールファイバー L=60mm, φ=0.75mm 混入量W=46.5kg/m ³	

3. 実験の結果

CASE3、5で荷重制御により供試体の落下までの過程を観察すると、覆工模擬部の片側端部にせん断破壊が発生すると、ほぼ同時に反対側にもせん断破壊が発生し、速度は低下することなく押し下げられた。その結果、CASE3では覆工模擬部が鉄筋により吊り下げられ、CASE5では覆工模擬部が落下した。また、CASE1では途中で荷重制御が不能となった。荷重と変位の関係については各種コンクリートで荷重制御と変位制御の結果が概ね一致していたため、過程の詳細については図-3に示す変位制御によるCASE2、4、6、7の結果により報告する。

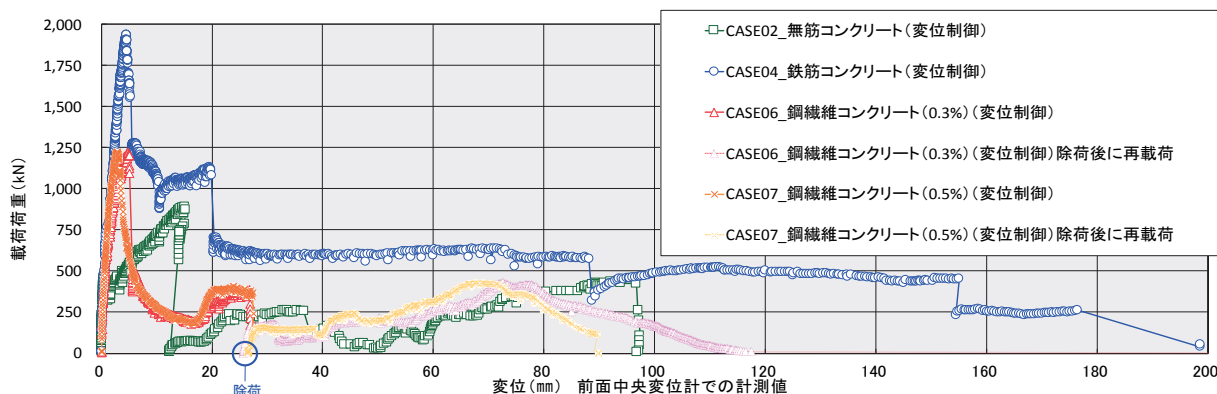


図-3 無筋、鉄筋による補強、鋼繊維による補強コンクリート(CASE2、4、6、7)の測定結果の比較

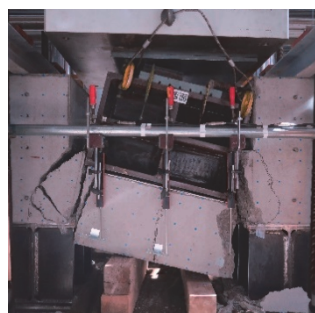


写真-3 無筋コンクリートの落下状況



写真-4 鉄筋による吊り下げ状況



写真-5 鋼繊維補強コンクリートの落下状況



写真-6 破壊面の鋼繊維の状況

3.1 無筋コンクリート

CASE2では荷重が466kNの時点で載荷面の端部から斜め下方にひび割れが発生すると、荷重-変位曲線の傾きが緩やかになり、最大荷重888kN、変位15mmに達すると、右端部で鉛直方向のせん断破壊が発生した。しかしながら、ブロック化したコンクリートは左側の架台を中心に回転して右側固定部との接触により支持され、この時点での落下は模擬出来なかった。更に変位を増加させると96mmになった時点でバランスが崩れて抜け落ちた(写真-3)。

3.2 鉄筋による補強コンクリート

CASE4では荷重-変位曲線の傾きはほぼ一定のまま、最大荷重1935kN、変位4mmに達すると荷重の減少と変位の増加が急激に進み、変位9mmで右端部に鉛直方向のせん断破壊が生じた。続いて変位20mmで左端部にもせん断破壊が生じ、ブロック化した覆工模擬部は水平を保った状態で押し下げられ荷重がほぼ一定のまま変位のみが増加する状態になり、変位が155mmに達した時点で被りコンクリートが剥がれて鉄筋が現れ、ブロックが吊り下げられた状態(写真-4)で荷重が260kNになった。更に押し下げると変位が199mmに達しても落下せず、この時点で載荷板と供試体の固

定部が接触するため終了した。

3.3 鋼繊維による補強コンクリート

CASE6、7の荷重-変位曲線では、載荷開始から傾きがほぼ一定を保った状態で荷重が増加していき、最大荷重は1220kN程度に達した。間もなく覆工模擬部の片側端部にせん断破壊が発生し、この影響で荷重は400kN程度まで急激に減少した。その後、無筋コンクリートと同様に回転する状態となり、荷重の低下を伴いながら変位とともに覆工模擬部の傾きも増加し、変位25mm前後で載荷不能となり除荷した。載荷板を水平にする処置をして再度載荷すると、変位の増加とともに荷重が増加する過程をたどり、CASE6では変位が117mm程度で逆側端部にもせん断破壊が発生して、CASE7では変位90mm程度でバランスが崩れてそれぞれ抜け落ちた(写真-5)。

3.4 補強材による落下を防止する効果

せん断破壊によりコンクリートが分断されると、ブロック化したコンクリート塊に定着する補強材によってコンクリート塊どうしが結合された状態となる。その後は載荷重に対して、補強材やコンクリート塊どうしの接触部分から伝達される力が抵抗することが推定される。これを踏まえて図-3を確認すると、無筋コンクリートと鋼繊維による

補強コンクリートのせん断破壊後の挙動や落下時点の変位量などに明確な差は現れていないこと。また、本実験の載荷方法においては、鋼繊維混入率の違いによるせん断破壊後の挙動の明確な差が現れないことから、鋼繊維の抵抗力が確認できなかった。また、実験後の破壊面の観察では、ほぼ全ての鋼繊維がコンクリートから引抜けた状態(写真-6)で確認されており、せん断破壊面のずれが増加する過程では、鋼繊維がコンクリートから引抜けることにより補強効果が失われる可能性が示唆される。これらの結果から、せん断破壊面に大きなずれが生じる場合には、鋼繊維による落下を防止する効果は限定的であると考えられる。

一方で、鉄筋による補強コンクリートのせん断破壊発生後の挙動は、無筋コンクリートや鋼繊維による補強コンクリートとは大きく異なる。変位が20～88mmの区間では600kN、88～155mmの区間では400～500kN、155～176mmの区間では260kNの荷重をそれぞれ保持しながら変位のみが増加している。この結果は、延性を有する鉄筋がコンクリートとの定着を保持し、引張力を伝達しながら伸びていき、増加する変位に追随する状態を示唆している。また、変位が150mm程度で、荷重が260kNで保持されている状態について、単純に1スパン(L=10.5m)あたりに換算すると $W=260 \times (10.5/0.5) \approx 5500\text{kN}$ となり、覆工1スパンの全自重 $W_s=0.35 \times 22 \times 10.5 \times 23 \approx 1900\text{kN}$ の約3倍に相当する。この結果は、例えば俵山トンネルで確認された100mm程度の地山の大きな変形により、覆工が分断されて大きなコンクリート塊になった場合にも、鉄筋による十分な支持力が作用して落下が防止されることを示唆している。最

終的には変位が200mm程度に達しても落下せず、鉄筋による補強は落下防止効果を有することが確認された。

4. まとめ

地震などにより覆工コンクリートが大きな荷重の作用や変形を受けて破壊されるような、設計において完全に防止することが困難といえるリスクに対して、ブロック化した大きなコンクリート塊の落下防止に資する要素実験から得られた技術的知見は以下の通りである。

- ・ 鋼繊維による補強コンクリートにせん断破壊が発生し、せん断面に大きなずれが生じて鋼繊維とコンクリートの定着が切れる場合には、落下が防止される可能性は高くない。
- ・ 鉄筋による補強コンクリートにせん断破壊が発生し、せん断面に大きなずれが生じる段階でも、ずれが150mm程度であれば鉄筋の定着は保持されて引張力が伝達し、落下が防止される可能性が高い。ただし、被りコンクリートの落下は防止できない。

これらの技術的知見は、参考文献2)に記載されており、道路トンネルにおいて耐震対策を行う場合の考え方として、現場で活用されている。

参考文献

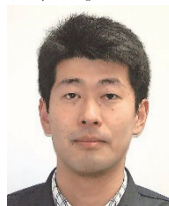
- 1) 例えば、真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害、トンネルと地下、第36巻、第11号、pp.55～63、2005
- 2) 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム：山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書、土木研究所資料第4358号、2017.3
- 3) 日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編）平成18年度改訂版、pp.359～364、2007.3

小出孝明



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
Takaaki KOIDE

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 上席研究員
Atsushi KUSAKA

砂金伸治



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上席研究員、現 公立大学法人首都大学東京都市環境学部 教授、博士(工学)
Dr. Nobuharu ISAGO