直下地震時におけるトンネルの挙動に関する一考察（その１）

応用地質（株）　正会員○中村　一樹　　正会員　莖澤絵理架
日本道路公団　正会員　伊藤　哲男　　正会員　馬場　弘二
京都大学　正会員　大津　宏康

１．はじめに

平成 16 年 10 月 23 日，新潟県中越地方に大規模な地震が発生した．震源に近い小千谷地区では，地盤が 23.7cm 隆起し，8.7cm 西へ移動したと国土地理院から発表された．この付近では，比較的地震に強いと考えられてきたトンネルも甚大な被害を受けた．

震源に近い，ある NATM トンネルに発生したひび割れパターンは，これまで地圧や外力による変状で見られたようなものではなく，特殊なパターンであった．状況写真を図-1 に示す．このとき変状が顕著であった区間のひび割れ状況を図-2 に示す．

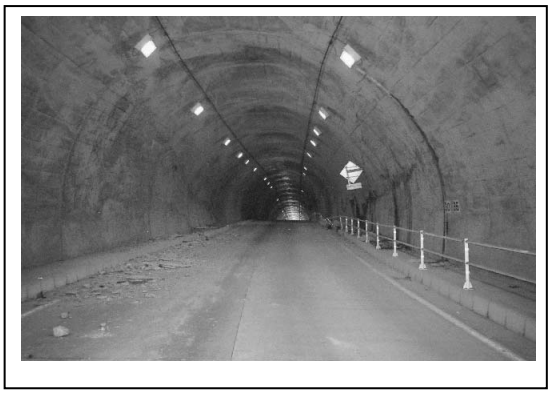

図-1　NATM トンネル被災状況写真

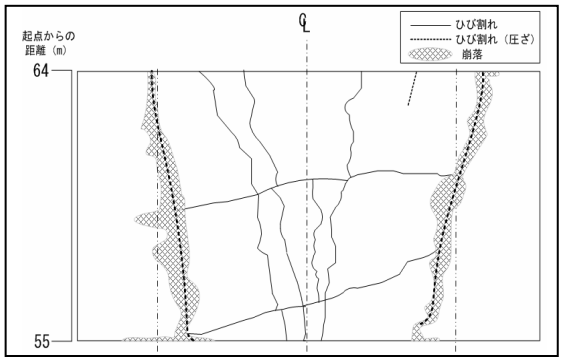

図-2　トンネル展開図

このようなパターンのひび割れは，直下地震時の地盤の隆起による突き上げが原因と考え，1/30 トンネル覆工模型試験機を用いて再現実験を試みた．

２．覆工模型試験装置

再現実験は，図-3 に示す三次元の覆工模型試験装置を用いて行った．この覆工模型試験装置は，外から強制変位を与えて，載荷板を通じてトンネルに力を加え，この力によりトンネルに発生する変状を観察するものである．外枠は，反力枠となっている．載荷板と外枠の間には，地山を模擬した一定の変形係数を有した硬質ゴム（400N/mm）を配置している．

外枠からの載荷のほかに，供試体脚部の昇降が可能であるため，脚部の沈下や上昇の試験も可能である．載荷試験中のトンネル内空変位は，レーザー変位計により非接触で測定し，覆工のひび割れはビデオカメラで撮影することができる．

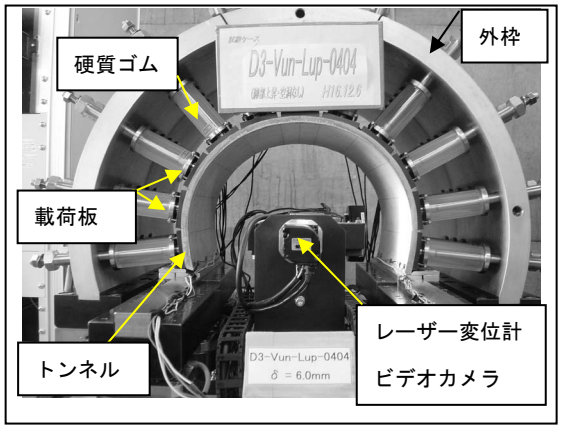

図-3　覆工模型試験装置

３．試験条件設定

供試体は，ＪＨ標準断面のひとつであるトンネル半径 5.1m，覆工巻厚 30cm の 1/30，すなわち半径 170mm，覆工巻厚 10mm のモデルを用いた．地山は均一であると仮定した．なお，載荷は直下地震による突き上げを想定し，脚部を強制的に上昇させた．覆工コンクリートは，モルタルを用い作成し，別途作成したテストピースの一軸圧縮強度が 18N/mm^2 以上に達したことを確認後，試験を実施した．載荷は，地震と同様に数秒で行うべきであると考えたが，詳細な変形挙動を把握できないため，上昇ピッチを 0.125cm，載荷間隔は，載荷後に変位計測とビデオ撮影を行う時間を確保して 3 分間隔とした．

４．試験結果

試験結果を図-4 に示す．脚部上昇量－天端荷重（トンネル天端と載荷板の間に設置した荷重計の読み）曲線は，側壁に大きな圧ざが発生するまで上昇を続け，その後急激に下降を始めた．試験体の崩壊が危惧されたため，こ

キーワード　トンネル，地震，模型実験
連絡先　〒331-8688 さいたま市北区土呂町 2-61-5　TEL048-667-9396　FAX048-667-9340

の時点で試験を終了した．ひび割れ展開図作成（スケッチ）は，顕著なひび割れ発生が確認できた時点で随時行った．スケッチを行った時点の内空変位計測の結果を変形図に示す．地山の変形係数は一定であるにも関わらず，上方向より横方向に変位が進んでいる．試験終了後の供試体のひび割れ展開図を図-5 に示す．

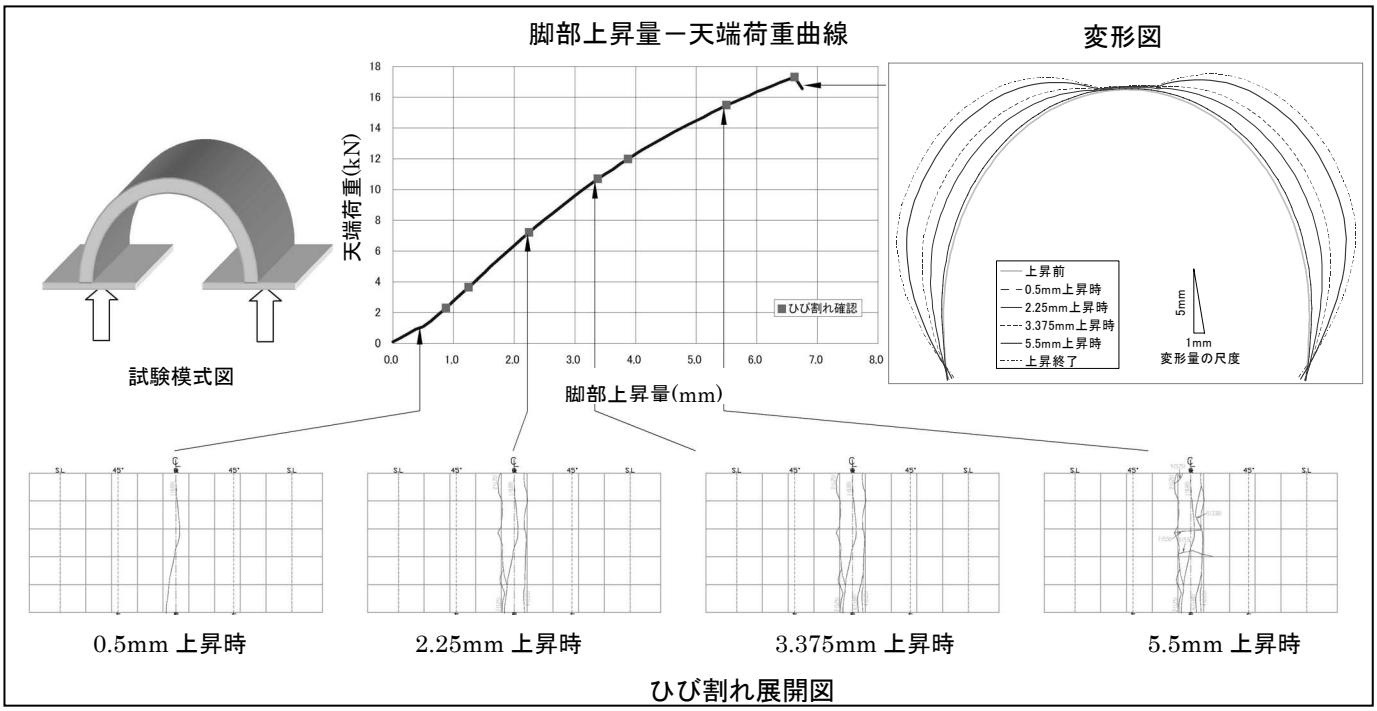

図-4 試験結果

５．考察および破壊モードの推定

実際のトンネルのひび割れパターンは，本試験結果のひび割れパターンとよく似ており（図-2 および図-5 参照），直下地震による突き上げで破壊される様子を再現できたと考える．直下地震を受けたトンネルは，次のような破壊形態をたどると推定される．

①天端で初期ひび割れ発生→②天端付近で縦断方向のひび割れが増加→③天端で縦断方向のひび割れをまたぐように横断ひび割れが発生→④側壁部に大きな圧ざが発生→⑤荷重の減少が始まりトンネル崩落が始まる．

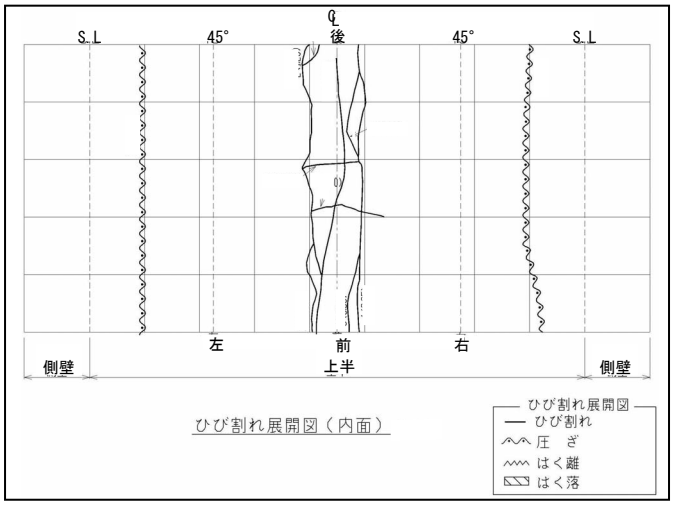

図-5　供試体ひび割れ展開図＜試験終了後＞

６．実物と模型試験の相似率について

本トンネルに近い小千谷地区における鉛直方向の移動量は，上向き 23.7cm であった．1/30 模型試験機においては，トンネル脚部を 8mm 程度上昇することとなり，約 1:30 となっている．さらに，有限要素法解析ソフト MSC.Marc を用いて数値解析を行った結果，図-6 に示すように天端から載荷した際に発生する覆工崩落前の肩部ひび割れの開口幅は，1/30 モデルで 0.055mm に対し，1/1 モデルの解析結果では，1.66mm の開口幅となり，ここでも約 1:30 となった．しかしながら，現実のトンネルで 1.66mm 程度のひび割れは覆工崩落前でなくとも多く存在する．したがって，さらなる検討が必要と考え，現在も数値解析等により検討を重ねている．

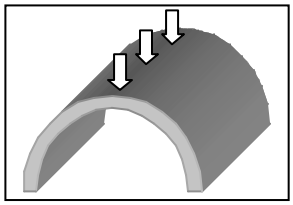

図-6　解析モデルの載荷方法

７．おわりに

本試験により，直下地震時にトンネルが示す挙動の一例を確認できた．ひび割れパターンから残存耐力が推定可能となれば，効果的，効率的な対策工や，耐震の検討に有用なデータ，さらに避難時期を提供できるようになると考えられる．