

建設省土木研究所	正会員	○ 宮川 順一
同	正会員	真下 英人
同	正会員	池口 正晃

1. はじめに

道路トンネルは社会のニーズを受け年々施工されているが、高成長時代に供用されたトンネルをはじめ補修を必要とするほど変状がでているトンネルの数も増加している。そのなかで、とくに著しい変状を伴わず、あるいは軽微な変状のみ観察されているトンネルの天端が突発的に崩壊する事故が発生した¹⁾ (以下このような崩壊現象を突発性崩壊と呼ぶ)。突発性崩壊の発生機構は現在十分に解明されていないが、道路トンネル維持管理便覧(日本道路協会)によると²⁾、① 地下水の流れによる土砂流出などによりトンネル上部に大きめの空隙が発生(図-1(a)) ② 空隙上部の岩塊が地山と分離し覆工に衝突(図-1(b)) ③ 覆工の強度が十分でないとき岩塊が覆工を破壊しトンネル内空へ落下(図-1(c))というものである。

突発性崩壊は、以下の問題点があり、この現象を究明する必要がある。

- ・トンネル変状を観察する時間的余裕がない。
- ・崩壊に関する予測がおこないにくい。
- ・人身事故などの重大被害に至る恐れがある。

本研究では、突発性崩壊の発生要因のうち落下する岩塊の規模、落下高さ、トンネルの覆工厚、崩壊の有無、または崩壊メカニズムの関係を、長さスケール1/40の衝撃載荷実験装置を用いて調べた。

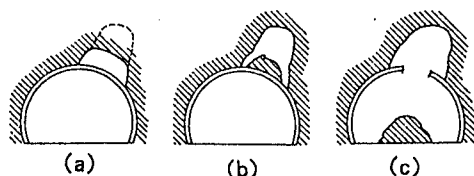


図-1 突発性崩壊²⁾

2. 実験条件

衝撃載荷実験装置の概要を図-2に示す。実験土槽は内寸 60cm (幅) × 50cm (高さ) × 20cm (奥行き) の鋼製で、前方側面部にはアクリル板を貼っており、トンネル模型の破壊状況を目視で確認できる。内部は、重錘をトンネル模型の天端部に落下させるために、覆工背面の空隙を模擬したガイドパイプが垂直に立っている。重錘は直径5cm、重量4.32kgfと3.04kgfの鉄製の円柱で、覆工天端部に自由落下させる。トンネル天端には重錘の力を覆工の一部に分布荷重として伝えるため載荷板を設置した。載荷板はφ30mmおよび50mmの鉄製の円錐で、覆工との接触面は凹曲面状である。実験に用いた模型トンネル覆工は厚さ7.5、10.0、15.0mm、奥行き方向の延長20cm、半径10cmの単芯円で、水：セメント：砂 = 1：2：3で配合したモルタル製で、材令は7日のものを用いた。地山材料にはφ11mmの鉄球を使用し、その単位体積重量は $\gamma = 4.65 \text{gf/cm}^3$ 、土被り30cm (1.5D) である。

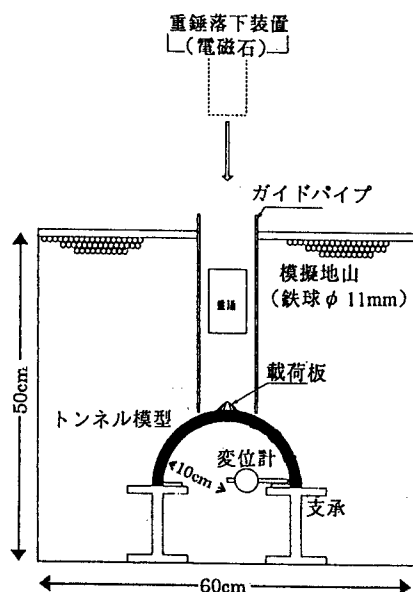


図-2 実験装置の概略

3. 実験結果

表-1に模型実験ケースと破壊状態の一覧を示す。破壊状態は、図-3に示すように3つのパターンに分類される。Aパターンは模型が破壊せずクラックのみが発生、Bパターンは載荷板の径より広範囲の覆工天端部が亀の甲状に割れ内空に落下、Cパターンは押し抜きせん断による破壊であり、載荷板底面と接していた部分が円錐台状に抜け落ちる、というパターンである。A、Bパターンは曲げ応力に基づく破壊、Cパターンはせん断破壊であり、異なるメカニズムで破壊が発生している。またBパターンは、覆工厚 $t=7.5\text{mm}$ の重錘落下高さが低いケースで発生し、Cパターンは、落下高さが高いケースで発生している。落下高さは、重錘が覆工へ衝突する速度に影響を与え、衝突速度が低いとBパターン（曲げ破壊）が発生し、衝突速度が高いとCパターン（押し抜きせん断破壊）が発生するというように、衝突速度が破壊を支配しているとも推測される。また表-1は破壊による脚部の水平方向の変位量を示しているが、落下高さが大きくなるにつれ脚部変位は大きくなる傾向にある。しかし覆工厚 7.5mm 重錘重量 3.04kg のケースでは、落下高さ 35cm でBパターンが生じたとき脚部変位が 1.65mm に対し、落下高さ 40cm でCパターンが生じたときの脚部変位が 0.37mm と小さくなる逆転現象が見られる。これは重錘の衝突速度が低い場合トンネル覆工模型は衝撃力を覆工全体で吸収しようとするが、衝突速度が高くなるとトンネル覆工全体への変位の伝搬よりも先に

表-1 実験ケースとその結果

重錘 4.32(kg) 載荷板径 $\phi 30\text{mm}$					
覆工厚 1.5mm		覆工厚 1.0mm		覆工厚 7.5mm	
No.	落下高 (cm)	結果 脚部変位(mm)	No.	落下高 (cm)	結果 脚部変位(mm)
I-1	4.0	クラック ---	II-1	3.0	クラック 0.50
I-2	5.0	クラック 0.84	II-2	3.5	クラック 0.78
I-3	5.5	クラック 0.92	II-3	4.0	押抜きせん断 0.17
I-4	6.0	押抜きせん断 ---	II-4	5.0	押抜きせん断 0.80

重錘 3.04(kg) 載荷板径 $\phi 30\text{mm}$					
覆工厚 1.0mm		覆工厚 7.5mm		覆工厚 7.5mm	
No.	落下高 (cm)	結果 脚部変位(mm)	No.	落下高 (cm)	結果 脚部変位(mm)
IV-1	5.0	クラック 0.47	V-1	3.0	クラック 0.35
IV-2	6.0	クラック 0.81	V-2	3.5	曲げ破壊 1.65
IV-3	6.5	押抜きせん断 0.92	V-3	4.0	押抜きせん断 0.37
IV-4	7.0	押抜きせん断 0.16	V-4	5.0	押抜きせん断 0.00

載荷部の覆工が衝撃に耐えられなくなり、せん断破壊が発生したからと考えられ、重錘の衝突速度が低いと覆工を押し抜くことができずBパターンが生じるが、衝突速度が高いと曲げ破壊が生じる前にCパターンが発生しているとも考えられる。

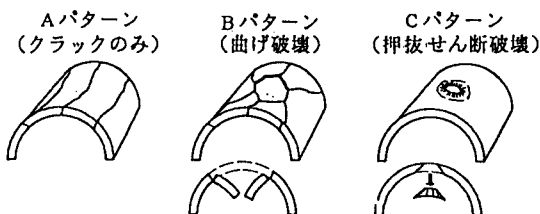


図-3 破壊形態のパターン

4. 現場への適用と今後の課題点

どの無次元量が破壊現象に支配的なのかは、いまのところ確認されておらず、今後さらに実験ケースを増やして考察を続ける必要がある。またどの地山物性またはトンネル諸元に関するパラメータが破壊現象に効いているかを広く調べるためにも、さらに多くのパラメータが変えられるように実験装置を改良する必要がある。

今後実験結果をとりまとめ、崩壊現象を支配すると思われるパラメータについて調べ、それを用いた現場での危険予測について検討していきたい。

5. 参考文献

- 1) 猪熊 明; 道路トンネルの緊急点検と今後の維持管理、トンネルと地下、日本トンネル技術協会、1990
- 2) 道路トンネル維持管理便覧、(社)日本道路協会、1985