

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760384

研究課題名(和文)小土被りと地質不良地山に掘削するトンネルに対する耐震補助工法の設計基準の提案

研究課題名(英文)Effect of the auxiliary method on the seismic behavior of tunnel excavated in low overburden or soft ground condition

研究代表者

崔 瑛(CUI, YING)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：60583797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：小土被り地山と軟弱地盤を含んだ地質不良区間に掘削するトンネルにおいては、地震時に覆工が被害を受けた事例が報告されている。さらに、これらの現場では掘削時に補助工法を適用しているが、その効果およびトンネルの地震時挙動に及ぼす影響は明確でない。本研究では模型実験と数値解析を行い、トンネルの地震時挙動、補助工法の効果とそのメカニズムについて検討した。結果、地震時トンネル覆工に作用する荷重は大きく増加し、土被りが大きい場合でも地震により影響されることが分かった。また、補助工法はトンネル掘削時における地山の变形を抑制できるものの、地震時は応力集中等により覆工の被害を卓越させる可能性もあることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Tunnels are thought as excel in seismic adequacy, there for the seismic behavior of the tunnels are did not clearly discussed. However, earthquake damages of the tunnel lining are reported in the field, which with the low overburden or which excavated tunnel in soft ground. Therefore, a series of the model experiments and numerical analyses are carried out to make clear the seismic behavior of the tunnel lining and ground which excavated in the above mentioned ground. Thereafter, effect of the auxiliary method including the ground improvement method and foot reinforcement method, and the mechanism of the effect are discussed. Experimental results show that, the load act on the tunnel lining is increasing during earthquake, even in the high overburden condition. Moreover, the deformation of the tunnel lining and the ground can be prevented by installing the auxiliary method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：トンネル 耐震性 小土被り 不良地山 数値解析 模型実験

1. 研究開始当初の背景

日本では 2000 年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が国会で成立し、高レベル放射性廃棄物を含む特定放射性廃棄物の最終処分の方針として、地下 300 m 以深の地層中に埋設することを正式に決定している。地層処分施設は地下岩盤中に処分坑道を掘削し、その底部の処分坑に廃棄物を収納したガラス固化体を埋設していくことになっており、処分坑の他に廃棄材の搬入と作業用の通路、換気用の各種坑道の建設も必要である。各種坑道の地上施設に近い部分は、小土被りトンネルとなる。また、地下 300 m 以深までの広範囲にわたって建設するため、やむをえず軟弱な地層が混在する不良地山にトンネルを掘削する場合も多々ある。

一般に、トンネルは耐震性に富む構造物とされており、その耐震性に関する研究は十分に行われていない。しかしながら、図-1 に示すように、①坑口部や小土被り部分、②不良地山区間、③断層が介在する部分は地震による被害を受けやすく、兵庫県南部地震 (1995) と新潟県中越地震 (2004) でも甚大な被害が多数報告されている。また、地層処分施設はその使用目的から絶対的な耐震性が求められる。近い将来その発生が確実視されている東海・東南海地震に備え、地層処分施設のトンネル部分の耐震性能の評価方法とその地震対策工法の提案は急務となっている。

一方、現場ではトンネル掘削時の安全性を確保するため、地山改良工や補強パイル工など補助工法を採用したケースが報告されている。しかしながら、トンネル掘削時における各補助工法の効果とメカニズムについては十分な検討がなされておらず、補助工法がトンネルの耐震性に及ぼす影響についても更なる検討を行う必要がある。

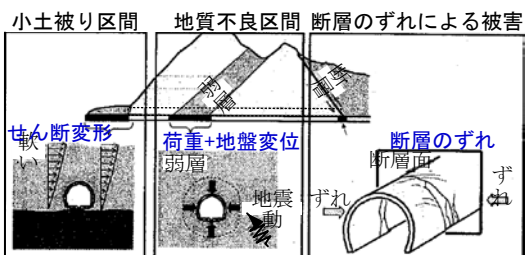


図-1 地震によるトンネルの被害パターン (橘ら (2007) トンネル工学報告集)

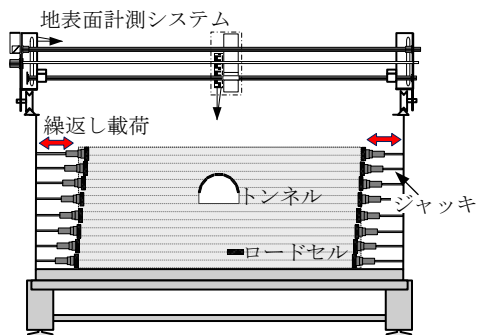


図-2 模型実験装置の概要

2. 研究の目的

以上の背景により、本申研究では、地層処分施設の小土被り区間と弱層が混在する地質不良地盤に掘削するトンネルに着目し、地震時におけるトンネルおよび周辺地山の力学挙動について検討を行う。また、トンネル掘削時および地震時における、地山改良工と補強パイル工を含む補助工法の効果とそのメカニズムについて議論する。

3. 研究の方法

(1) トンネルの地震時挙動に関する検討

ここでは、地震中におけるせん断変形をモデル化できる二次元アルミ棒積層体せん断土槽を作製し、地震時におけるトンネルおよび周辺地山の地震時挙動について検討を行った。図-2 および写真-1 に実験装置の概要を示す。アルミ槽は幅 120cm、奥行き 7cm、高さ 2.5cm の「コ」の字型のアルミブロックを 24 個積み重ねた構造で、各ブロックの間にはベアリングを設置することで、抵抗なく水平方向にスライドできるようになっている。なお、トンネル覆工模型は実トンネルを 1/100 に縮小した馬蹄形模型である。覆工模型には、写真-1 に示すようにロードセルを設置しており、トンネル覆工に作用する荷重を計測することができる。本実験では、ジャッキを用いて各ブロックに水平変位を与えることで、地震による地盤のせん断変位を表現し、地震時におけるトンネルおよび周辺地山の力学挙動について検討を行った。地山に与える水平変位は図-3 に示すように逆三角形型であり、最上層の変位は模型地盤高の 5% とした。

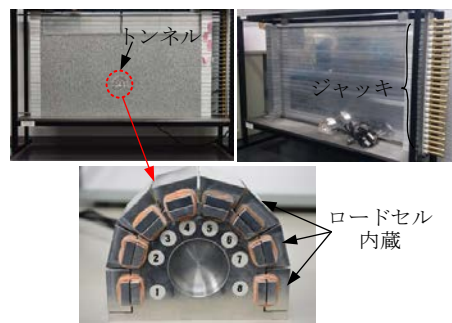


写真-1 模型実験装置とトンネル模型

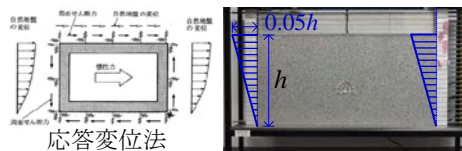


図-3 せん断変位の与え方

(2) 地山改良工の効果に関する検討

ここでは、トンネルの掘削過程を模擬する数値解析を行い、地山改良工がトンネル掘削時における地山および覆工に及ぼす影響について検討し、そのメカニズムの解明を試みた。図-4 に解析領域、地質条件および境界条件を示す。解析領域および地質条件は、東北新幹線・牛鍵トンネルの施工条件を参考に決

定した．実現場での土被りが，最小約 0.2D～最大約 1Dであることを考慮し，解析では 0.5D とした．対象トンネルの掘削地盤は，図-2 に示すように 4 種類の地層が含まれており，トンネル周辺地質は砂質土層 (ts) が主体である．掘削地盤の力学特性は，Nakai & Hinokio (2004)により提案された subloading t_{ij} model を用いて弾塑性体としてモデル化した．

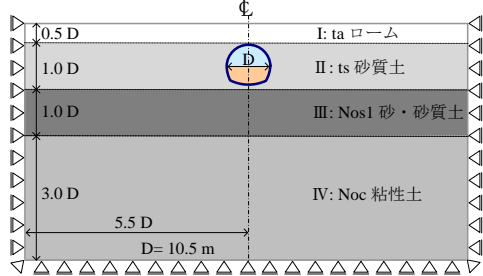


図-4 解析領域および境界条件

4. 研究成果

(1) トンネルの地震時挙動に関する検討

図-5, 6 に，土被り 1.0D (D はトンネル径) のケースにおける周辺地山の変位および覆工に作用する荷重分布を示す．図より，せん断変位が進むにつれ，周辺地山の変位が徐々に大きくなる現象が見られる．なお，地山の左右境界で大きい変位が発生し，右端では地盤が上向きに，左端では地盤が下向きに変位する現象が見られた．これは，本実験装置の載荷装置に起因するものと考えられ，変位の与え方および上部境界に関しては改善が必要であると考えられる．

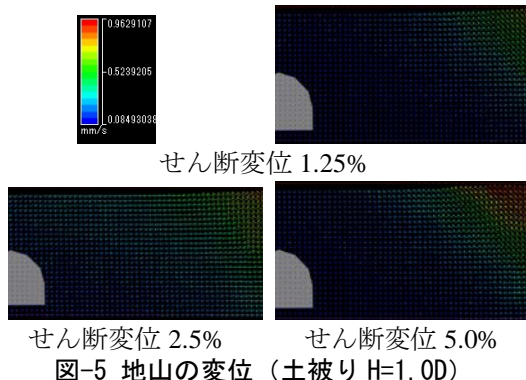


図-5 地山の変位 (土被り H=1.0D)

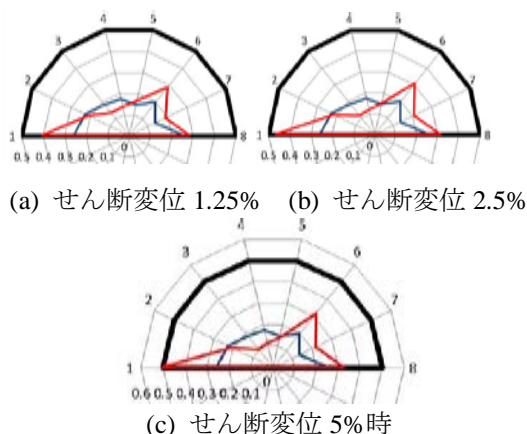


図-6 覆工に作用する荷重分布 (単位 kPa) (土被り 1.0D)

図-6 に示す荷重分布より，周辺地盤にせん断変位を与えることにより，トンネル左右壁面に作用する荷重は徐々に増加する．一方，天端付近に作用する荷重は減少する結果を示している．さらに，せん断変位の増加につれ，それぞれの変化量は増加する傾向を示す．

図-7 に，土被りが異なる諸ケースにおけるせん断変位を与える前の初期荷重 (青線) およびせん断変位を最大まで与えた際の荷重 (赤線) を比較する．初期荷重に着目すると，土被り 0.5D から 1.5D の 3 ケースでは土被りが大きくなるほど覆工に作用する荷重も大きくなる傾向が見られるが，土被り 2.0D のケースでは 1.5D のケースより小さい荷重が計測された．これは，土被りが低い場合は覆工にゆるみ土圧が発生することに対し，土被りが高くなるとアーチ効果が発揮され，荷重が周辺地山に分散されたためであると考えられる．さらに，せん断変位後の荷重分布を比較すると土被りが大きくなるほど荷重および初期荷重からの変化量両方大きくなっている．すなわち，地震時において土被りが深いトンネルでも地震により覆工に作用する荷重が大きく増加し，覆工の安全性に影響を及ぼす恐れがあることが示唆された．

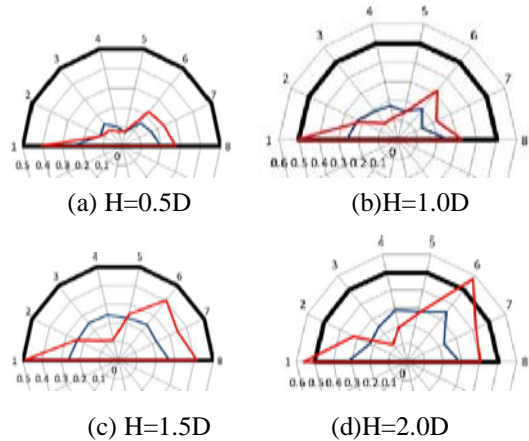


図-7 土被りが荷重分布の変化に及ぼす影響 (5%せん断変位時)

(2) 地山改良工の効果に関する検討

ここでは，未固結地山での小土被りトンネルに対する，事前地山改良工の地盤・トンネル沈下抑制効果について説明する．図-8 に，各検討ケースにおける改良イメージを示す．Case_a_B は上半肩部まで改良した諸ケース，Case_b_B は下半脚部まで改良した諸ケースであり，B は改良領域の幅である．なお，Case_c は天端付近のみ改良したケースである．図-9 に示す地表面沈下形状より，改良範囲が広いほど地表面沈下が抑制される結果が見られる．さらに，改良を施すことにより，地表面沈下が発生する地盤領域が狭くなる結果が見られる．また，解析結果より，改良幅が広くなるほど地表面沈下抑制効果が高くなることがわかった．トンネル掘削時における周辺地山および覆工の力学挙動の検討により得られた知見を以下に示す．

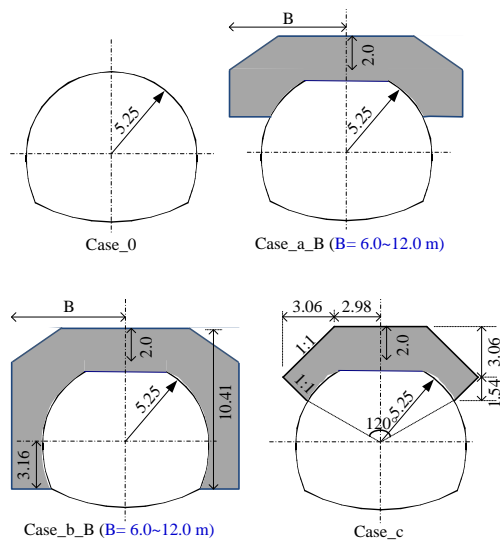


図-8 数値解析による検討ケース

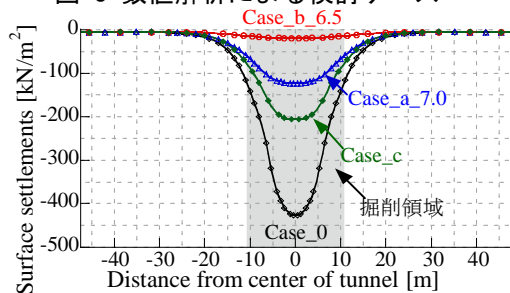


図-9 地表面沈下形状

- ① トンネル上半上部まで改良した場合 (Case_a_B), 地山改良による地表面とトンネルの沈下抑制率は 50%~80% である. 改良幅を広くするほど沈下抑制効果が大きくなるものの, その効果は 80% 以下に収束する.
- ② トンネル下部まで全体的に改良した場合 (Case_b_B), 地山改良による地表面とトンネルの沈下抑制率は 90% 以上である. 改良幅を増やすと沈下抑制効果も大きくなり, ほぼ 100% まで増加する.
- ③ 上半上部のみ広く改良するより, 下部まで全体的に改良するほうが, 狭い改良範囲でも大きい沈下抑制効果が期待できる.
- ④ 天端のみ部分的に改良を施したケース (Case_c) でも 50% 位の沈下抑制効果は得られるものの, 依然として 200 mm 近くの地盤とトンネルの沈下が発生するため, このような改良形式を採用する際には, 他の補助工法と併用することが必要である.
- ⑤ 地山改良工は次に示す効果を発揮してトンネルおよび周辺地山の变形を抑制できることが分かった. 一つ目は地山を改良することにより地盤の剛性が増加し, 周辺地盤の变形を抑制できる地山補強効果である. 次は, せん断補強効果である. 改良を施さずトンネルを掘削する場合, トンネルの脚部付近から大きいせん断ひずみが発達し, 地表面まで発達する. これは, 地盤およびトンネルが沈下する主要因であると考えられる. 改良を施すことにより, 大きいせん断ひずみは改良体

により遮断され, 地表面まで発達できなくなり, その結果地盤とトンネルの沈下が抑制される. 最後は, 改良体に応力が集中し, トンネル掘削により解放される応力をより狭い範囲に配分させ, トンネル掘削により影響される地盤領域を狭くする効果 (荷重再配分効果) である.

⑥ 改良幅が狭いケースでは, 改良体の周辺地盤に応力が集中し, せん断ひずみが卓越する現象が見られたが, その地震時挙動については, 別途検討が必要である.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 野々村政一, 井浦智実, 崔瑛, 岸田潔, 木村亮, 小土被り未固結地山におけるトンネル事前改良工による地山安定性の評価に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, 査読有, Vol.8, No.2, pp165-177, 2013.
- ② 崔瑛, 野々村政一, 井浦智実, 岸田潔, 木村亮, 小土被り土砂地山でのトンネル掘削における事前地山改良工の効果に関する解析的検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル) 特集号, 査読有, Vol.68, No.3, pp.27-38, 2012.

[学会発表] (計 4 件)

- ① Ying Cui, Kyoshi Kishida and Makoto Kimura, Mechanical behavior of shallow conventional tunnels installed the previous improved auxiliary method, Proceedings of World Tunnel Congress 2013, 査読有, Vol.39, pp.1041-1046, 2013.
- ② Ying Cui, Kiyoshi Kishida and Makoto Kimura, Effect of pre-ground improvement method during shallow NATM tunnel excavation under unconsolidated condition, Proc. of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, Vol.18, pp.1691-1694, 2013.
- ③ Ying Cui, Kiyoshi Kishida, Makoto Kimura, Tomomi Iura and Masaichi Nonomura, Effect of ground improvement method on control of ground subsidence occurring in shallow NATM tunnel excavation, Proc. of World Tunnel Congress 2012, 査読有, Vol.38, pp.385-386, 2012.
- ④ Ying Cui, Yurie Hifrasaka, Kiyoshi Kishida and Makoto Kimura, Proceedings of 13th World conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space, 査読有, Vol.13, pp.1027-1034, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崔 瑛 (CUI, Ying)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号: 60583797