

分割式アーチトンネルの耐震性に関する実験的研究 AN EXPERIMENT ON A TWO HINGED ARCH-CULVERT FOR ENHANCED SEISMIC PERFORMANCE

馬杉吉晃* 中野雅弘** 西 邦夫*** 金 声漢****
Yoshiaki UMASUGI, Masahiro NAKANO, Kunio NISHI, Seong Han KIM

The two hinged arch-culvert treated in this paper, is a specific structural type with contacting joint between roof and side-wall, was devised in France. However the seismic performance of the two hinged arch-culvert is not yet conformed.

The aim of this paper is to verify the seismic performance of this structural type in order to use in Japan.

An experiment of static cyclic-shear-deformation for this surrounded by sand soil, was carried out for examining the ductility of this due to soil deformation under the earthquake. The test result show there, is sufficient seismic performance even though the relative displacement between roof and footing is more than 3% of the specimen's height.

Keywords; underground-structure, two-hinged arch, seismic-design, cyclic horizontal loading test, ductility

1. はじめに

本論が対象とする分割式アーチトンネルは、フランスで考案され実用化された2ヒンジアーチ構造であり、日本においてこれまでボックスカルバートが用いられてきた箇所、例えば高速道路等における盛土部のアンダーパスや単スパンの水路ボックス等への適用が期待されている。特にアーチ構造であることからボックス構造に比べて、部材厚さを小さくすることが可能であり、比較的土被りの大きな箇所への適用が有利となることが予想される。

しかしながら、本構造はもともと常時荷重のみを対象として設計されているために日本へ広く導入するためには、所定の耐震性を確保する事が必要である。さらに、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震における地下構造物の被災は、地中構造物においても大規模地震に対して設計を行う必要のあること、また、大地震に対して壊滅的な崩壊を生じさせないためには、各部材が十分な変形性能を持ち、構造全体として大きな地盤変位に抵抗しうることが必要であることを認識させられた。

これら背景から、本論文は標記構造を日本で適用するに際して必要と考えられる耐震性能の向上を目的として実施した一連の研究の中から、構造物の水平方向の変形特性を把握するために実施した実物の1/2サイズの模型による静的交番せん断変形実験について報告するものである。

*正会員 モジュール工法協会 技術委員会委員長、**正会員 工博 (財) 土木研究センター

正会員 (株) 間組 技術研究所、*正会員 日本技術開発(株) 土木本部総合技術部

2. 分割式アーチトンネルの概要

研究対象としたアーチ構造の概要を図-1に示す。同図は土被り5mに対して設計されたフーチング型の例である。構造体は土被り荷重を支持する上部円弧部材（以降「ボルト」と称す）、水平土圧に抵抗するとともにボルトを支持する側壁部材（以降「サイドウォール」と称す）および底盤部材（構造形式により「フーチング」もしくは「インバート」が使い分けられる）とによって構成されている。

本構造の最大の特徴は、アーチ部材の曲げモーメントの符号の変化点付近、すなわちボルトとサイドウォールとの接合部にヒンジが設けられていることである。これにより部材の断面力を低減するとともに、盛土や基礎地盤のある程度の変形は許容しようとするものである。さらに、その継ぎ手構造は図-2に示すように、ボルト側は凸型の、またサイドウォール側では凹型の互いに微妙に曲率の異なる噛み合わせ形状となっており、目違いを起こしながら回転を許容する構造となっている。また、このジョイント（リングジョイントと称す）部は単なる接触接合となっており、何ら逸脱防止構造を有していない。

このように特殊な構造形式であるために、研究開始時点において①構造体の水平方向の変形挙動は如何なるものであるのか、②継ぎ手部はどのような挙動をするのか、また大変形に対して継ぎ手部は逸脱することはないのか、さらに、③フーチングタイプについてはフーチングの滑動に起因する倒壊が生ずる可能性はないのかどうか等 について把握することが必要であった。

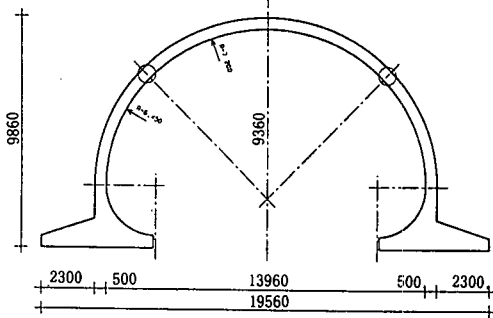


図-1 構造概要（土被り5mの例）

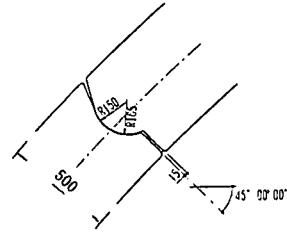


図-2 継ぎ手構造の例

3. 実験概要

(1) 実験に際しての前提条件

実験に際して想定した前提条件は以下の通りである。

- ①トンネル横断方向の変形挙動のみを対象とする。
- ②トンネルが設置される盛土本体は地震に対して健全であり続けるとし、地震力によるスベリ破壊や、偏土圧の作用は考えない。
- ③検討の対象とする地震動としては1995年兵庫県南部地震レベルを想定する。
- ④トンネルは直接基礎としての設計が可能なN値30程度の堅固な表層地盤上に設置されるものとし、いわゆる軟弱地盤は対象としない。
- ⑤実際に施工される盛土地山の剛性をN値や締め固め度から評価し、盛土が連続する水平成層地盤であると想定した2次元等価線形動的解析（FLUSH）によれば、駐車場指針レベル（地表面の応答加速度200gal相当）の地震入力を考慮した際のトンネル頂底盤間の応答相対水平変位は構造高さの0.05～0.1%程度、また兵庫県南部地震レベルの数種の地震入力（入力加速度レベルとして700～800gal程度）を作用させた場合の応答変位は構造高さの1.0%程度であった。

(2) 実験対象（供試体概要）

図-3に実験対象とした供試体の概要を、また表-1にそれぞれの部材諸元を示す。これらはせん断土槽の枠の中で、実モデル同様の複鉄筋の配筋状態を再現しうるサイズとすることを目標として、実スケールで土被り5.0m（フーチング型）および3.8m（インバート型）、内空幅4.8m、高さ3.8m、部材厚さ220mmのフーチング型および

インバート型の両基礎構造タイプを対象とし、この1/2モデルを実験に用いることとした。なお、実験においては長さスケールのみを1/2とし、これ以外については実物同様（相似則を適用しない）として取り扱うものとした。また、ここで用いた供試体の断面諸元は常時荷重のみに対して決定したものとした。なお、構造タイプにより土被りが異なるのは部材厚さを同一としたためである。

表-1 部材諸元

	フーチング型	インバート型
部材厚さ (mm)	110	110
主鉄筋 (引張側)	ホールド D13@150	D13, 16 @150
	サイド ウオール D10, 13 @150	D16@150
	共通 D10@130	D10@130
配力筋	共通 D6@130	D10@130
せん断補強筋	ホールド D6@130	D6@130
	サイド ウオール D6@140	D6@120

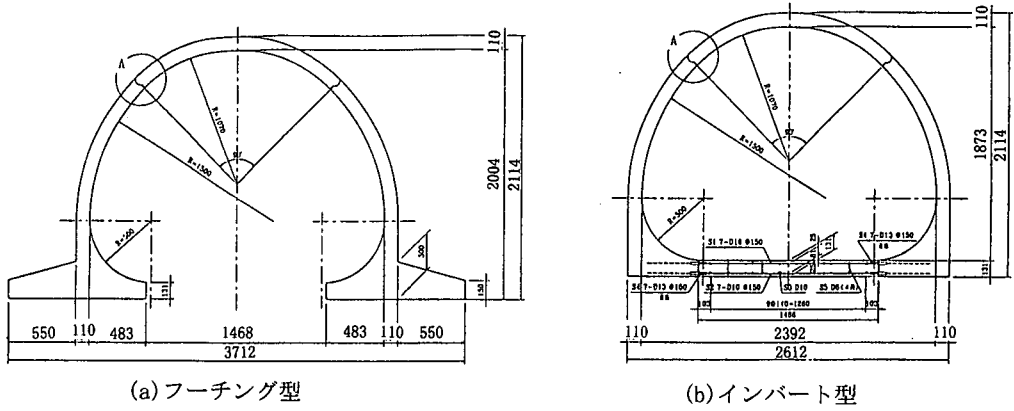


図-3 実験対象

(3) 載荷方法

実験に用いたせん断土槽の概要を図-4に示す。ここで用いた載荷装置は電力中央研究所における原子力ダクトの実験に用いたものとほぼ同様なものであり、せん断壁により連結された剛壁である載荷壁に荷重を作用させることで土槽全体にせん断変形を生じせしめるものである。

載荷は装置の北側載荷壁に静的 50tf 両動型油圧ジャッキを2台配置し、図-5に示すように5, 10, 20, 30, 50, 70, 90mmの載荷スケジュールによる漸増交番載荷を変位制御により行った。

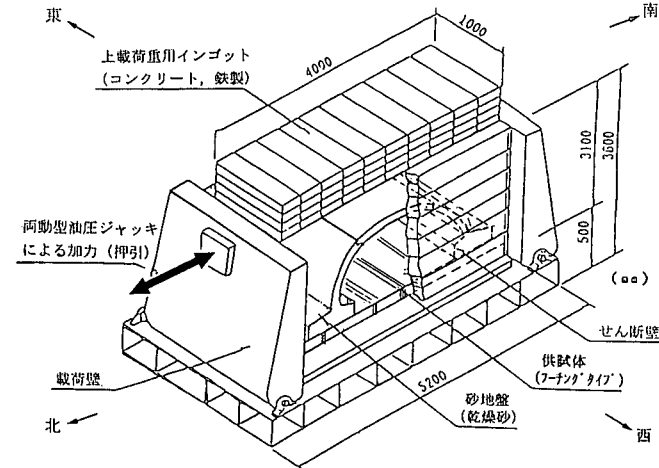


図-4 せん断土槽

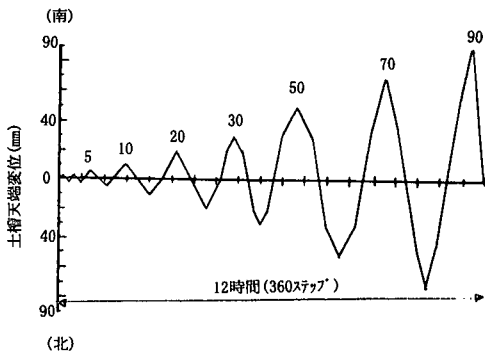


図-5 載荷スケジュール

ここで用いた載荷の振幅は兵庫県南部地震レベルの地震力が作用した際の盛土地山のひずみレベルを意識し、せん断土槽中の地盤の平均的なせん断ひずみレベルとして3.0%に相当する土槽天端変位90mmを最大とした。

なお、土槽中には上述の電中研の実験に用いた表乾状態の岐阜砂を、ほぼ最大密度付近にまで締め固めて地盤を作成した。表-2に岐阜砂の物理特性を、図-6に排水繰返し三軸試験による変形特性を示す。

表-2 岐阜砂の物理特性

真比重	2.650
最大粒径	0.425mm
60%粒径	0.327mm
30%粒径	0.267mm
10%粒径	0.146mm
均等係数	2.24
曲率係数	1.49
最大密度	1.735
最小密度	1.462

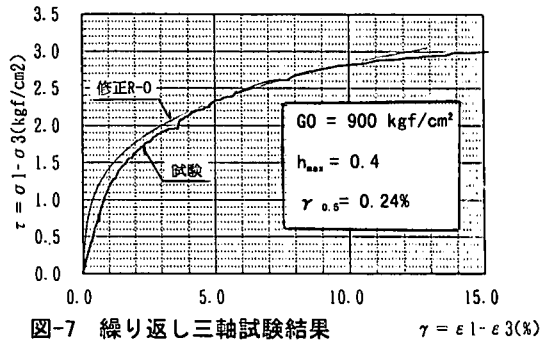


図-7 繰り返し三軸試験結果 $\gamma = \varepsilon 1 - \varepsilon 3 (\%)$

(4) 計測内容

表-3 に計測内容の一覧を、また図-7 には計器配置を示す。

表-3 計測内容一覧

計 器	計測内容	備 考
ジャッキ (0-F&0)	載荷用 (50 t)	2 台
載荷板変位計	・載荷板変位 (地盤強制変位) ・地盤変形角の把握 (地盤変位モード)	
躯体変形応力等	変位計	躯体の変形、フーチング底面の滑動
	ひずみゲージ	発生応力
	大型変位計 (ゲージ)	コンクリートおよび鉄筋両方
	土圧計	つぎ部の変位 (ずれ)、目開き
		サイドウォール、ボルト
		インバートタイプのみ

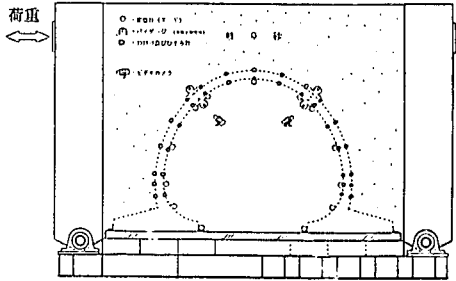


図-7 計器配置

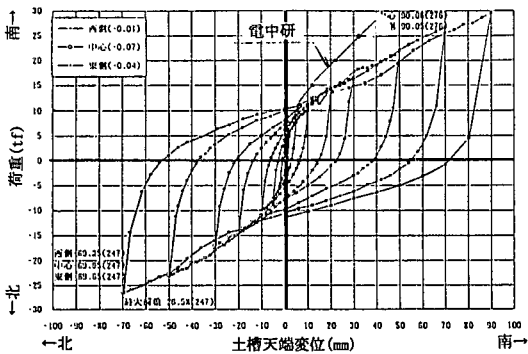
4. 実験結果

実験はフーチング型、インバート型とも 90mm の最大変位まで問題なく載荷が可能であった。以下に各着目点ごとに概要を示す。

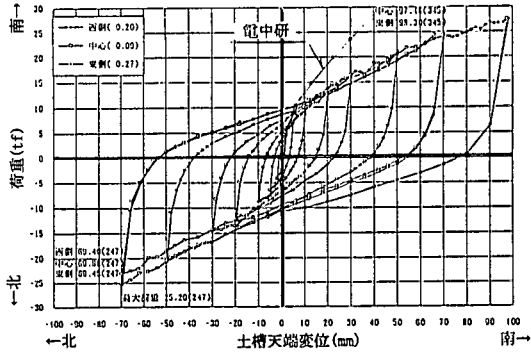
(1) 土槽天端における荷重変位関係

図-8 に両構造形式におけるジャッキ荷重～土槽天端変位の関係を示す。なお、図中には電中研³⁾での幅 2.0m × 高さ 1.0m の 2 連ボックス構造に対する載荷試験結果を併せて示している。これらより、

- ① 荷重変位関係は南北両方向にほぼ対象でかつ両構造タイプに明確な差は認められない。
- ② 荷重変位関係の初期勾配は本実験および電中研で大差がない。その一方で、2 次勾配は電中研、フーチング型、インバート型の順に大きい。



(a) フーチング型



(b) インバート型

図-8 土槽天端における荷重変位関係

(2) トンネル躯体の変形

図-9 に両構造形式の土槽天端 70mm 載荷時点の躯体の変形量を、イメージ図とともに示している。

これより、

- ① トンネルは 2 ヒンジの門型構造のモードで変形しており、トンネルの相対水平変位はサイドウォールのたわみによって生じている。
- ② フーチング型とインバート型とでは変形のモードが若干異なっている。具体的にはフーチング型は左右の対称にサイドウォールがほぼ対称に変形しているのに対し、インバートでは押される側のサイドウォールが他方に比べて大きく変形している。
- ③ フーチング型では土槽のせん断変形により押される側の基礎フーチングがトンネル内空側へ滑動を生じた。これは基礎底面軸力が躯体の変形により変動し、引き抜き側では滑動抵抗が減少するためと考えられる。

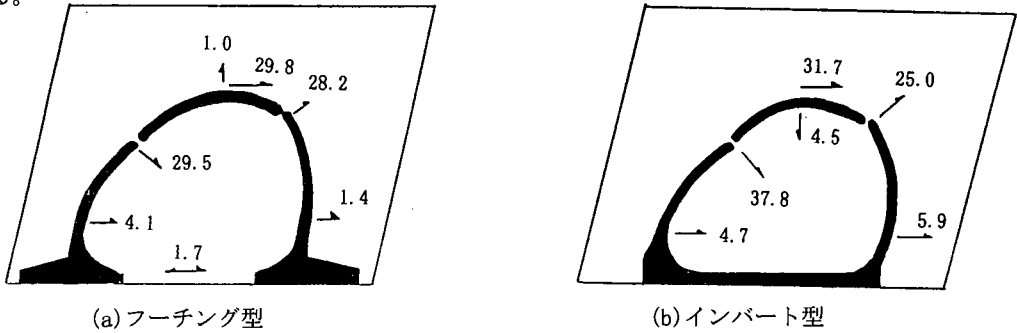


図-9 トンネルの変形モード(南側 70mm 載荷時。図中の数値は底面に対する相対変位量 mm)

(3) 部材の状況

図-10 は鉄筋の降伏状況を示したものである。これによれば、土槽天端変位として 30mm 相当の変位載荷時にスプリングライン付近で最初の降伏が生ずるが、それ以降も鉄筋降伏領域は限定された範囲に留まっていることがわかる。この際、被りコンクリートの剥離は認められておらず、コンクリートの圧壊は生じていない可能性が高い。また、スプリングライン以外の箇所にはクラックは生じておらず、ひずみレベルも小さなものであった。なお、最初のクラックは両基礎タイプとも概ね 5~10mm 程度の載荷を行った時点で、鉄筋降伏と同様スプリングラインで発生している。

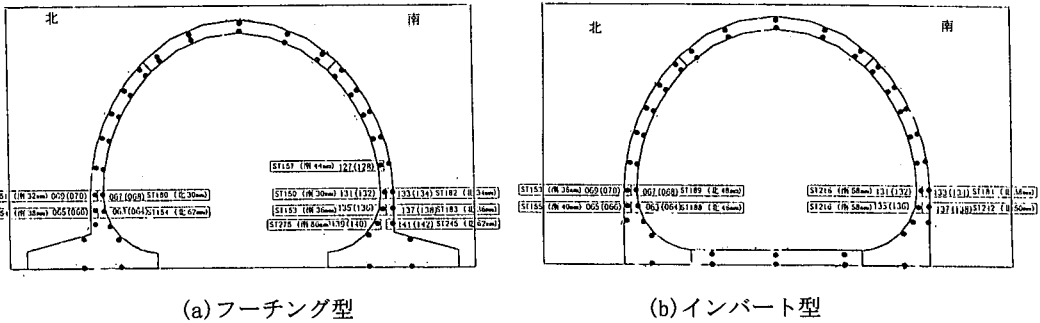


図-10 鉄筋の降伏状況 (図中枠囲みした●印が降伏したひずみゲージを、数値は降伏時変位を示す)

(4) 継ぎ手の状況

継ぎ手部の変形のイメージを図-11 に示す。本実験において供試体は最大 50mm 程度の相対水平変形を生じたが、この際の継ぎ手部の回転角は 3~4 度程度であった。この値は図-12 に示す継ぎ手の幾何形状から定まる可能回転角に対してある程度の余裕を持っており、継ぎ手は静的な載荷に対しては本実験を超える範囲の相対水平変位を許容しうる能力のあることが確認された。

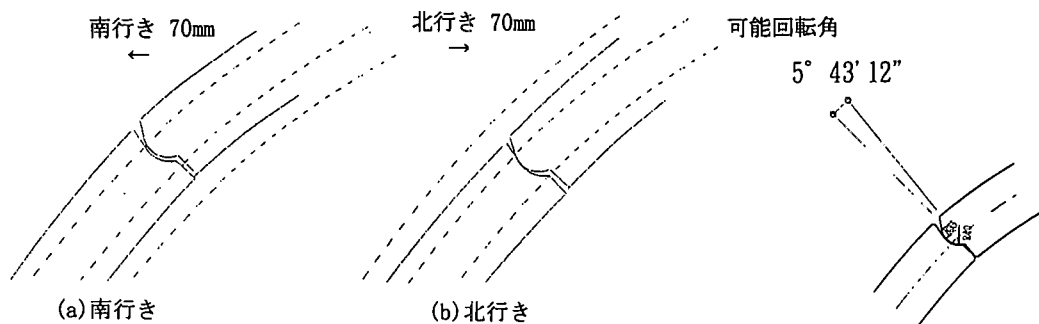


図-11 継ぎ手変形の状況（フーチング型）

図-12 幾何形状からの継ぎ手性能

5. まとめ

本実験で得られた結果を以下に列記する。

- ①駐車場指針レベルの地盤変位に対応する状態において、模型は側壁基部にクラックを生じた他は全く健全であり、何の問題も認められなかった。
- ②兵庫県南部地震レベルの大地震が生じた際の地盤の平均的なせん断ひずみが1%程度であると想定すれば、この変位に対応する状態において模型は側壁基部の鉄筋が降伏状態には達するものの、圧縮側コンクリートは圧壊には至っておらず、また、継ぎ手も滑落の兆候を見せず、ヒンジとして有効に機能していた。
- ③②を越える地盤変位として、地盤の平均的なせん断ひずみが3%に相当する載荷を実施したが、部材・継ぎ手部とも②の状態と大きな変化は認められず、崩壊に対する余裕を未だ有していた。
- ④本実験の範囲においては、フーチング型、インバート型との間で水平方向の地盤変位に対する安定性に明確な差は認められなかった。ただし、フーチングタイプは構造体の安定を損なうものではないが、載荷方向手前の脚で滑動を生ずる可能性のあることが確認された。

以上の結果より、少なくとも静的なせん断ひずみとして%オーダーの地盤変位に対しては、トンネルを構成する部材、基礎、継ぎ手とも基本的な耐震性能に大きな問題は認められないことが確認された。

6. おわりに

本研究は、京都大学足立紀尚教授を委員長とする「モジュラー工法の耐震性向上に関する研究委員会」の一環として行われたものであり、本論文以外にも解析検討を主体としてトンネル全体の耐震性を向上させるための部材や継ぎ手構造に関する各種検討を実施してきている。しかしながら、本論文で報告した静的実験のみから動的な大地盤変位に対する安定性を結論付けるには、必ずしも十分な結果が得られているとはいえない。このため、平成8年度には振動台実験による大地盤変位時の動的安定性や継ぎ手部の支圧・せん断耐力についても実験を予定しており、日本への導入に向けて、特に大地震に対する安定性確保を目標として、鋭意努力を進めているところである。

最後に、熱心な審議を頂いた委員の方々をはじめ、委員会に係わるWGの中で議論を頂いたモジュラー工法協会技術検討委員会の関係各位の皆様方に謹んでお礼を申し上げる次第である。

7. 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会；駐車場設計施工指針・同解説、平成4年11月
- 2) (財) 土木研究センター；モジュラー工法の耐震性向上に関する研究委員会 報告書、平成8年5月
- 3) 電力中央研究所；限界状態を考慮した屋外重要構造物の耐震設計法、電力中央研究所報告、平成4年4月
- 4) 電力中央研究所；低拘束圧下の模型実験材料（岐阜砂等）の静的・動的特性、電力中央研究所報告、昭和56年5月