

分割式アーチトンネルの耐震性向上 に関する実験的研究 (その1)

金 聲漢¹・馬杉 吉晃²・中川 重二²・中野 雅弘³

¹ 正会員 工修 日本技術開発 (〒164 東京都中野区本町 5-33-11)

² 正会員 モジュラー工法協会 (〒103 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

³ フェロー会員 工博 NTT 関西支社 (〒540 大阪市中央区馬場町 3-15)

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たプレキャスト部材からなる2ヒンジアーチトンネルであり、頂版と側壁のとのヒンジ部に独自の構造形式(接触接合)を採用していることが最大の特徴であるが、日本で適用するにあたっては地震時の安定性を確認することが不可欠である。そこで、本トンネルを日本で適用するに際して必要な課題を数値解析により整理するとともに、トンネルの基本的な水平方向挙動を把握することを目的として1/2 模型により静的交番せん断変形実験を実施した。その結果、静的な載荷に対しては構造高さの%オーダーの変形に対して基本的に安定であることが確認された。

Key Words : *underground-structure, two-hinged arch culvert, seismic-design, cyclic horizontal loading test*

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。

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年の兵庫県南部地震の教訓から、橋梁構造ではこれまでも大きく上回る地震荷重を設計上考慮することとなり¹⁾、少なくとも道路構造物の一つとして、橋梁で想定する荷重が作用した際の状態を把握しておく必要もある。

これら背景から、本論文は本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、主として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。

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。構造

体は土被り荷重を支持する上部円弧部材(以降「ボールド」と称す)、水平土圧に抵抗するとともにボールド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「インパート」が使い分けられる)とによって構成されている。

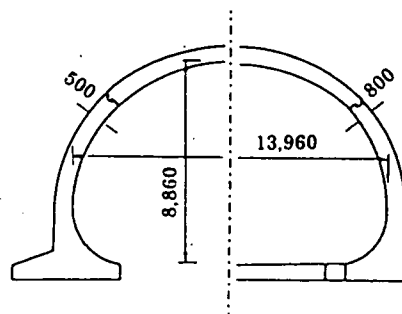


図-1 構造概要 (土被り5mの例)

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、すなわちボールド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、ボールド側は凸型の、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、このジョイント部は単なる接触接合となっており、何ら

水平耐力法レベルの地震が作用した際には降伏曲げモーメント超過し、終局曲げモーメントに達する可能性がある。

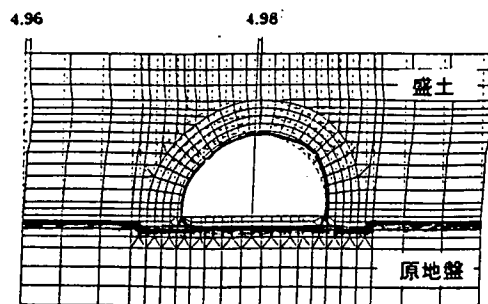


図-4 構造物相対変位最大時刻変形図 (I 種地盤)

(3) 本トンネルの地震時の問題点および課題

(2) に示した結果に基づき考えられる本構造の問題点もしくは課題として以下が挙げられる。これらを解決することを目的として、本静的せん断変形実験、小型振動台実験および部材の耐力・変形性能実験を実施したものである。

① 構造物は、地盤条件によるが、構造高さの 5% を超えるような大きな相対水平変形を被る可能性があり、これに対して追従できるだけの変形性能を有しているかどうかを確認する必要がある。ここでいう変形性能とはサイドウォールの RC 構造としての変形性能とともに、ジョイント部の回転に対する変形性能を指す。

② 構造物が安定性を喪失するためには、「ジョイント部が逸脱し、ボルトとサイドウォールとが分離する」もしくは「基礎であるフーチングが滑動もしくは転倒する」ことが必要であり、これらを動的解析で把握することは難しいため、実験等によりこの可能性を確認する必要がある。

③ 耐震性照査の目安とすべきトンネル相対変位量 (構造高さに対する比率で示すと) は、まずは I 種地盤のみを対象とし、震度法レベルで 0.1%、地震時保有耐力法レベルで 1.0% とする。ただし、不測の事態を考慮して 5% 程度の相対変位量を被る可能性も考える。

4. 静的せん断変形実験の概要

(1) 実験対象 (供試体概要)

図-4 に実験対象とした供試体 (フーチングタイプ) の例の概要を示す。ここで用いた縮尺は複鉄筋の配筋状態を再現できる最小寸法として部材厚さを 110mm とし、これより決定したものであり、実大規模の 1/2 としている。また、構造形式による挙動の差を把握するためにインバートタイプについても実験を行うものとした。

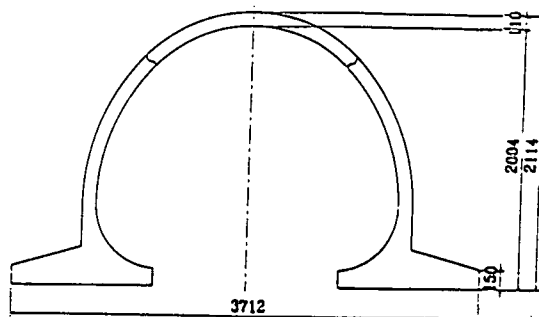


図-5 実験対象 (フーチングタイプの例)

(2) 載荷および計測内容

実験に用いたせん断土槽の概要を図-6 に示す。同装置は、可動側壁により連結された剛な載荷壁に荷重を与えることで土槽全体をせん断変形させるものである。

載荷は 2 台の静的ジャッキにより、変位制御により最大 90mm までの漸増交番載荷により行い、その間、土槽および地盤の変形、模型のひずみおよびこれに作用する土圧を測定した。

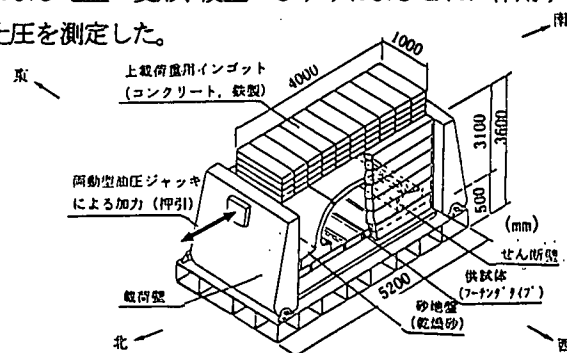


図-6 せん断土槽

なお、上述の載荷最大変位は 3. による解析結果 (II 種地盤での値) を意識し、土槽変位の上限值である土槽天端変位 90mm を最大とした。なお、同値は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% に相当する大きなものである。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充填した。

5. 実験結果

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終了した。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-7 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 (処女載荷線のみ) 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

逸脱防止構造を有していない。

日本での適用に当たっては、特にこの継ぎ手が存在することに起因する水平方向の変形特性に着目するとともに、地震による大変形を被った際に継ぎ手部が弱点となって、構造不安定となることはないかどうかについて検討することが不可欠である。

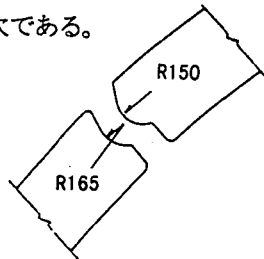


図-2 継ぎ手部構造

3. アーチトンネルの地震時挙動の想定

(1) 検討目的および手法・条件

アーチトンネルの耐震性向上に関する研究に先立ち、トンネルの地震時挙動を推定し、本構造の問題点および確保すべき耐震性能の目標を設定することが必要である。このため、上記を目的として、図-1 に示した諸元を含む数種のトンネル横断面を対象とした2次元等価線形動的解析 FLUSH を実施した。想定した各種条件を表-1 に、解析モデルの概要を図-3 に示す。

表-1 検討条件

	想定した条件	備考
原地盤条件	N 値 30 程度の良好な I 種地盤	参考として N 値 15 程度の II 種地盤についても検討。
盛土条件	N 値 5 程度の砂質材料	龍岡 ²⁾ によるせん断剛性評価式を適用。
入力地震動	道示震度法および地震時保有水平耐力法タイプⅡ相当	道示 V 編図・解-4.4.1 および 5.3.2 ¹⁾ に規定されるもの。

ここで、トンネルが設計上対象とすべき地震動の大きさは、基本的に「道路土工指針 擁壁・カルバート編」を参照すべきであるが、研究開始時点で同指針の改訂動向が明らかでなかったこと、また、2 ヒンジ構造という崩落の可能性を有する特殊な構造形式をとるために、いわゆる大地震時の安定性についても十分確認しておく必要のあったことから、橋梁で用いる震度法に加えて地震時保有水平耐力法に対する入力地震動を検討に際して想定するものとした。この際の入力地震動は、盛土の存在により原地盤地表面上の応答には大きく影響しないものとして、原地盤地表面位置で規定することとし、橋梁における標準的波形を用いるものとした。

また、当面はトンネルが良好な基礎地盤（I 種地盤相当）上に設置される場合のみを対象として検討を進めるものとし、参考として II 種地盤相当の地盤上の応答について補足検討するものとした。

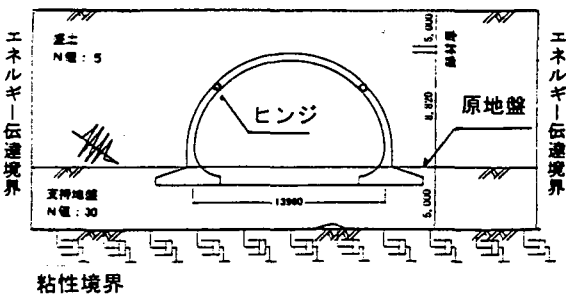


図-3 モデルの概念図

(2) 動的解析結果

図-4 に I 種地盤上に設けられたトンネルの変形図の例を、表-2 に解析による主要な応答値の一覧を示す。

表-2 主要応答値一覧

		I 種地盤	II 種地盤	備考
加速度	盛土天端	541<193>	459	単位：gal
	トンネル天端	627	364	
	トンネル下端	813	812	
変位量	盛土天端	14.3<1.03>	54.2	単位：cm 盛土高 11m () 内は構造高さで除した値(%)
	トンネル天端	4.6<0.94>	33.4	
	トンネル下端	1.1<0.1>	14.7	
	相対変位	5.0<0.84> (0.83<0.09>)	24.0 (4.03)	
継ぎ手部軸力 (正が圧縮)		-13.9<-3.1> (69.1<80>)	-24.7 (58.3)	単位：tf () 内は常時との重畳値

※数値は「<」外が地震時保有水平耐力法（タイプⅡ）の場合を、「>」内は震度法相当の応答値を示す。

- これより、以下がまとめられる。
- ①地震時保有水平耐力法（タイプⅡ）レベルの地震が作用した際の構造物変位は、良好な基礎地盤上に盛土が設けられた場合には構造物高さの 1% 程度に過ぎないが、相対的に地盤の悪い II 種地盤相当に盛土がおかれた場合には構造物高さの 5% にもおよぶ可能性がある。一方で、震度法レベルの地震が生じた際の構造物変位量は地震時保有水平耐力法の 1/10 程度であった。
 - ②トンネル継ぎ手部の軸力は、地震時保有水平耐力法レベルの地震が作用した際にも、常時の死荷重による圧縮力を重畳すれば引張が生じる可能性は低い。
 - ③サイドウォールスプリングラインの断面力は、震度法レベルでは許容応力度内に収まるものの、地震時保有

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。これは土槽の変形挙動が、土槽中の地盤の剛性に支配的であるためと考えられる。

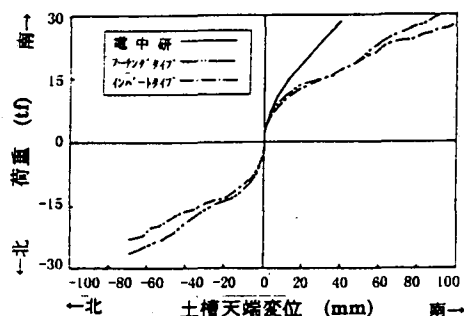


図-7 土槽天端における荷重変位関係

(2) トンネル躯体の変形

図-8 にフーチング型の土槽天端 70mm (この時点のトンネル変位は共に約 30mm) 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フーチング型では地盤の変形により押される側のフーチングのみがトンネル内空側へ滑動を生じ、内空幅を縮小する挙動を示す。

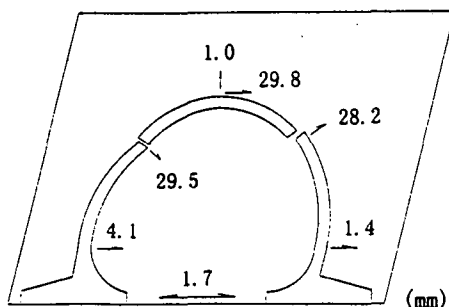


図-8 トンネルの変形モード

(3) 部材の状況

両構造とも土槽天端変位が約 30mm の時点でスプリングライン付近で最初の降伏が生じ、それ以降も鉄筋降伏領域はこれより下方のほぼ 2 D 範囲に限定されたものであり、コンクリートの剥離は最後まで認められなかった。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た。

(4) 継ぎ手の状況

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-9 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未だ余裕を持っており、静的な継ぎ手の回転変形性能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。

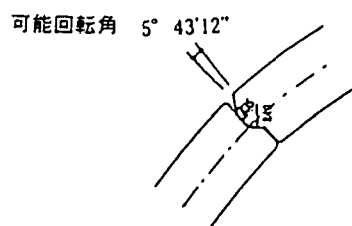


図-9 幾何形状からの継ぎ手性能

6. まとめ

本報告に示した解析および実験で得られた結論および課題を以下に列記する。

- ①動的解析に基づき、本トンネルが考慮すべき相対水平変位量目標値を想定した。
- ②耐震目標とした相対水平変位量に相当する変形に対してトンネルは基本的に安定であった。具体的には、震度法レベルでは側壁にクラックを生じた以外は全く問題なく、地震時保有耐力法レベルに対しても鉄筋降伏が生じた程度であった。
- ③I 種地盤の目標値を越える地盤変位として、土槽天端で 90mm (地盤の平均的なせん断ひずみとして 3%相当) までの載荷を実施したが、部材・継ぎ手部とも安定性を喪失する兆候を認められなかった。
- ④本実験結果については動的実験による確認が必要であると共に、部材の耐力、変形性能についても実験的な確認を行った上で、本構造の耐震性を結論付ける必要がある。

7. おわりに

本研究は、(財) 土木研究センターが設立した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、関係各位の方々に心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、平成 8 年 12 月
- 2) Iwasaki, Tatuoka : Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, S. and F., Vol. 17, No. 3, 1977
- 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