

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2)

植村 靖美¹・岩崎 喬夫²・梶川 正義²・川村 淳一²・中野 雅弘³・松原 勝巳⁴

¹ 正会員 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)

⁴ 正会員 工修 間組 技術研究所 (〒305 茨城県つくば市刈間字西向 515-1)

本文が対象とする分割式アーチトンネルは、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、常時の断面力軽減を目的として、頂版と側壁の接合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。ただし、日本での適用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り、耐震性の把握と向上を目的とした種々の検討を行っている。本文は、その一環として実施した1/20サイズの模型による振動台実験結果について報告するものである。実験の結果、本構造は橋梁設計における震度法レベルの加振に対しては安定性に問題のないこと、地震時保有水平耐力法レベルの地震動に対しても基本的には安定であるものの、基礎の滑動が問題となる可能性のあることが確認された。

Key Words : two-hinged arch culvert, vibration experiment, laminar box, dynamic design

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た頂版部材 (以下ボールドと称す) と側壁部材 (以下サイドウォールと称す) との間に接触接合型のヒンジ継ぎ手を有する2ヒンジアーチ構造であり、日本での適用に際しては、特に地震に対する安全性について十分検討すると共に、必要とする耐震性を確保できるような対処をしておく必要がある。

このような背景から、分割式アーチトンネルの耐震性向上に関する研究 (その1)¹⁾では、本トンネルが目標とすべき地震時の相対水平変位量を想定するとともに、その変位量が作用した際のトンネルの安定性を把握するために静的交番せん断変形実験を実施し、橋梁でいうところの地震時保有水平耐力法レベルの地盤変位が作用した際にもトンネルは基本的に安定であることを確認した。

しかしながら、実現象は動的問題であり、静的な載荷実験では確認できない可能性のある諸問題、特に継ぎ手部における引張力の発生によるボールド部材の崩落、または基礎の滑動によるトンネル全体の安定性喪失の可能性などを把握する事を目的として、トンネル小型模型

を用いた振動台実験を実施することとした。すなわち、本文が報告する振動台実験の目的は以下に集約される。

- ① 2ヒンジアーチトンネルの動的挙動の把握
- ② 設計で想定するレベルの地震動、もしくは地盤変位が作用した際のトンネルの安定性確認
- ③ トンネルの破壊モードの確認

2. 模型振動台実験の概要

(1) 適用した相似則および縮尺率

実験に用いた供試体は電力中央研究所の原子力ダクトに対する実験例²⁾を参照して実大規模の1/20サイズとした。この際、問題となる相似則は種々のものが提案されているが、ここでは地盤の非線形物性が問題となる地盤および地中構造物の模型振動台実験に実績の多い国生、岩楯³⁾の相似則を用いた。相似則に基づく実験の各種諸元を表-1に示す。

(2) 実験対象 (構造物模型)

図-1に実験に用いた供試体の例を示す。実験は静的交番せん断変形実験¹⁾で基礎の滑動が生じたフーチングタイプを対象として、表-2に示す土被り厚さをパラメータ

一とした3つの供試体に対して実施した。

表-1 適用した相似則 (λ =模型/実物=1/20 の場合)

	相似則	縮尺率	参考例※
変位量 u	$\lambda^{3/2}$	0.011	10/0.1cm
ひずみ ε	$\lambda^{1/2}$	0.224	1/0.22%
振動数 ω	$\lambda^{-3/4}$	9.46	1/9.5Hz
加速度 α	1	1	-
応力度 σ	λ	0.05	100/5kgf/cm ²
弾性係数 E, G	$\lambda^{1/2}$	0.224	2.5×10 ⁵ /5.6×10 ⁴ kgf/cm ²
s 波速度 V_s	$\lambda^{1/4}$	0.473	150/71 m/s

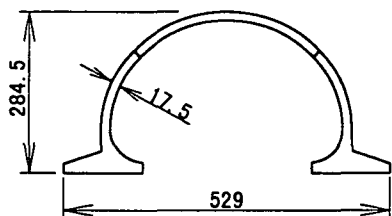
※数値は (実大) / (模型) の値の例を参考として示す。

トンネル模型材料としては、表-1 の参考例に示したように、縮尺率 1/20 に対して相似則を適用すると、 $E=5.6 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ 相当の材料が必要となり、これに類似なアクリル樹脂 ($E=3.0 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$) を用いるものとした。

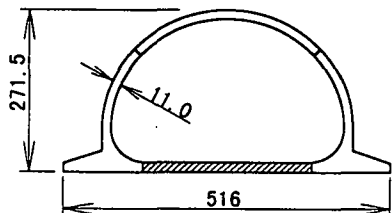
表-2 実験ケースと模型サイズ

ケース No.	1	2	3
土被り※(m)	5.0	1.0	0 (坑口)
模型高さ(mm)	284.5	271.5	ケース 2
部材厚さ(mm)	17.5	11.0	と共通
備考	-	-	インバート

※実スケール相当値



(a) 土被り 5m のケース



(b) 土被り 1m および坑口付近のケース※

図-1 実験模型 (※坑口ケースは「マナク」間にストラットあり)

(3) 地盤モデル

実験には奥行き 406mm×長さ 1496mm×高さ 650mm のせん断土槽を用い、その中には、前述の電力中央研究所⁹⁾での使用実績が多く、かつ静的交番変形実験に用いたものと同じ岐阜砂による人工地盤を作成した。せん断土槽中の模型の状況を図-2 に示す。

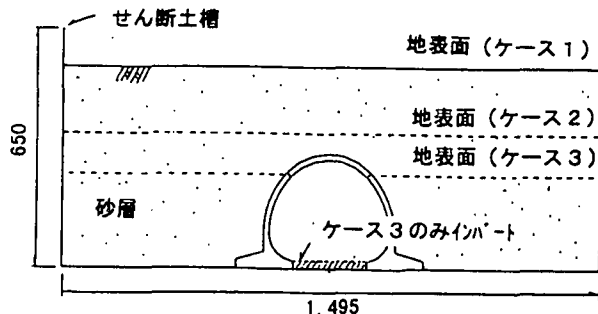


図-2 せん断土槽と模型との関係

(4) 加振条件

1. に示した目的に照らして、本実験では表-3 に示す入力加速度を振動台に付与することとした。

これら加速度は道路橋示方書 V、耐震編³⁾に規定される I 種地盤の地表面での設計水平震度 k_h の値 (震度法で 0.15、地震時保有水平耐力法タイプ II で 0.8) を参考とするとともに、設計での想定を超える地震動として神戸海洋気象台における実地震波および 1,500gal の正弦波加振を行うものとした。なお、神戸海洋気象台での実測波形は相似則上は時間軸を約 1/10 とすべきであるが、ここでは設計地震動を超える大きな地震動としての位置づけで加振しているため、時間軸を 1/4 に縮小することとした。

各レベルの加振条件を速度応答スペクトルとして図-3 に比較して示す。

表-3 加振条件

加速度 (gal)	30	150	800	実測波※	1,500
波形	スweep	正弦波	正弦波	—	正弦波
周波数 (Hz)	—	共振振動数付近	6~10	1/4 に時間軸縮小	6~10
備考	-	震度法相当	地震時保有耐力法相当	-	-

※神戸海洋気象台の観測波 (N-S 成分) とした。

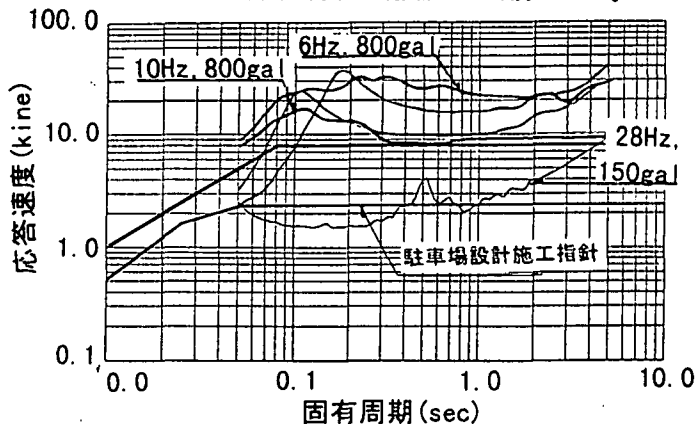


図-3 速度応答スペクトルの比較

(5) 計測

実験における計測項目は図-4の通りとした。なお、トンネル模型には内外両面にひずみ計を設置した。

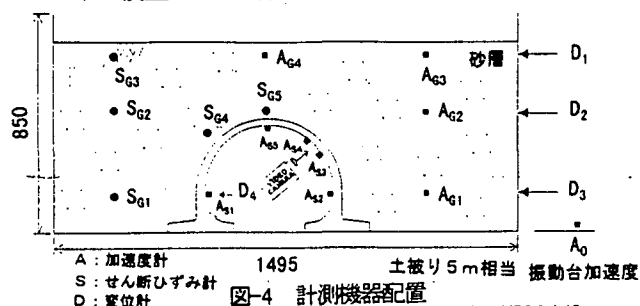


図-4 計測機器配置

3. 実験結果

トンネル模型は、ケース2の1,500gal, 6Hz加振を除き、安定性を喪失することなく実験を終了した。以下に書く着目点ごとの結果の概要を示す。

(1) 応答加速度

表-4に代表的ケースにおけるボールトおよびボールトと同一深度の周辺地盤の応答加速度の一覧を示している。ここでは、本構造がボックス型地中構造物と同様に周辺地盤に支配された挙動を示すかどうか、またボールト部材は自己振動をする事で滑落することはないかどうか等に着目して、結果の整理を試みた。

表-4より、ボールトの応答加速度と周辺地盤のそれとの関係は、土被りによって異なっており、土被り5mに相当するケース1では周辺地盤とほぼ同様であるのに対し、土被り1mに相当するケース2では周辺地盤よりもやや大きく、ボールトの露出したケース3では周辺地盤の応答に比べて明らかに増幅していることがわかる。

ただし、図-5に示すケース3の応答加速度のフーリエスペクトル(表-4中800gal加振に対応するもの)に着目すると、30Hz付近の高周波成分の増幅が原因と考えられ、安定上の大きな問題はないと考えられる。

表-4 トンネルボールト深度での応答加速度比較

加振レベル		150gal	800gal	1,500gal
ケース1	トンネル部	143 (1.00)	531 (0.91)	935 (0.79)
	地盤部	142	583	1,178
ケース2	トンネル部	168 (1.11)	764 (1.11)	832 (0.93)
	地盤部	151	690	892
ケース3	トンネル部	320 (0.91)	1,163 (1.62)	3,086 (2.44)
	地盤部	350	718	1,260

ただし、150galの加振振動数はそれぞれ28, 42, 42Hz
800galの加振振動数はそれぞれ20, 10, 10Hz
1,500galの加振振動数はそれぞれ10, 6, 6Hz

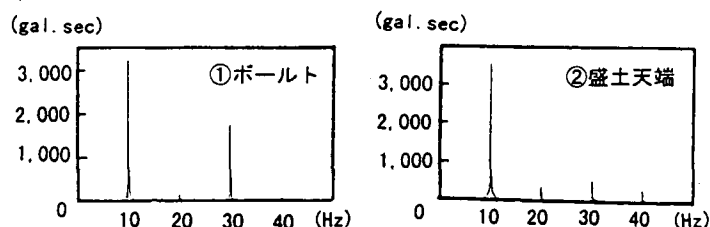
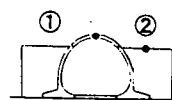


図-5 ボールト位置の応答加速度(フーリエスペクトル)
(ケース3、800gal, 10Hz)

(2) トンネルと地盤の変位

1) 地盤のひずみレベル

各ケースの各加振レベルごとの土槽の変位量(トンネル天端深度での非接触変位計による測定値)と、これに基づく平均的なせん断ひずみ相当値の一覧を、実大規模への換算値とともに表-5に示す。

実験の目標とした地盤のせん断ひずみレベルは、入力レベルとして震度法相当で0.1%、地震時保有水平耐力法相当で1.0%、最大値として5%相当りであるが、これらと比較して実験結果は相似則を考えないとも、ほぼ目標レベル相当値を示しており、相似則を適用するときわめて大きなひずみを生じていることになることがわかる。

したがって、トンネルは設計で想定するレベルの地盤変位に対して、安定性を喪失することはなかったものと考えられる。

表-5 地盤のひずみ状況

加振レベル		150gal	800gal	1,500gal
ケース1	土槽変位(mm)	0.5	1.82	5.35
	せん断ひずみ相当値(%)	0.18	0.64	1.9
	実換算値(%)	0.8	2.86	8.48
ケース2	土槽変位(mm)	0.2	2.65	7.94
	せん断ひずみ相当値(%)	0.07	0.98	2.9
	実換算値(%)	0.31	4.4	12.9
ケース3	土槽変位(mm)	0.42	2.29	4.66
	せん断ひずみ相当値(%)	0.56	3.3	6.2
	実換算値(%)	1.8	14.7	27.7

ただし、加振振動数は表-4に同じ

2) トンネルの変形

表-6にサイドウォールスプリングライン位置の振動変位量と滑動変位量の一覧を、また、図-6には測定された中で最も大きな滑動変位を生じた「ケース2 800gal, 6Hz」の変位量の時刻歴波形を示す。

図表より、加速度が大きくなると基礎は滑動を生じ、これによりサイドウォール変位は一方（トンネル内空側）に蓄積していることがわかる。ただし、震度法レベルの加振に対しては滑動量は誤差の範囲とともとれるわずかなものであり、滑動の問題は基本的には地震時保有水平耐力法レベルの大きな地震動が作用した際の問題と考えられる。

表-6 トンネルサイドウォールの変位の状況

加振レベル		150gal	800gal	1,500gal
ケース1	振動変位(mm)	0.03	0.21	1.35
	滑動変位(mm)	0.08	0.10	2.25
ケース2	振動変位(mm)	0.013	0.88	計測できず
	滑動変位(mm)	0.007	1.62	計測できず

ただし、加振振動数は表-4に同じ

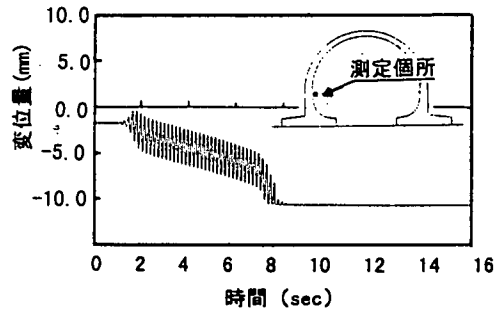


図-6 基礎の変位の状況 (ケース2 800gal, 6Hz)

(3)破壊モードの確認

ケース2および3に関しては、破壊モードを確認するために、実際にはあり得ない振動台の能力最大レベル(1,500gal, 6Hz)規模で加振を実施した。その結果、ケース2において破壊モードが確認された。また、ケース3は前述表-4に示したようにトンネルボルトの応答加速度が3.0G近くにまで増幅したものの、安定上は全く問題が認められなかった。

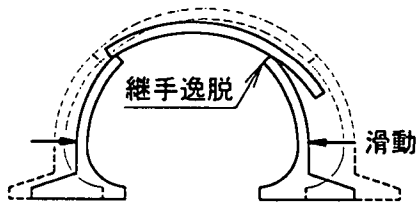


図-7 破壊モードのイメージ

図-7はケース2で確認した破壊モードのイメージを示している。図に示すように、トンネルの崩壊はサイドウォール基礎の滑動変位の蓄積によるものであり、滑動

変位が著大なものとなることによりボルトとサイドウォール間の継ぎ手が離れ、結果的に2ヒンジアーチ構造が崩壊することになるというものであった。

4. まとめ

本実験で得られた結果と、これに基づく今後の課題を以下に列記する。

- ①土被りを有する際の本トンネルの挙動は、基本的に通常のボックス型地中構造物と同様なものである。ただし、坑口部のようにボルトが露出している場合には、崩壊の可能性はきわめて低いと考えられるが、ボルト部のみが自己振動を生じ、大きな加速度を発生する可能性が高い。
- ②トンネルの基礎地盤が変形を生じないような良好な場合には、震度法レベルの地震力(150gal 相当)に対して安定上の問題は認められなかった。また、橋梁設計で想定する地震時保有水平耐力法レベルの地震力(800gal 相当)に対しても、ボルトは崩落の兆候を見せず、基本的に安定であった。ただし、このレベルの地震動が作用した際には、サイドウォール基礎は滑動を生じるため、耐震性の向上には何らかの対応が必要である。
- ③設計レベルの地震力を大きく越えるレベルの加振により、フーチングタイプの破壊モードを確認した。

5. 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、本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いる。これらについても、別の機会に報告させていただきたい。

最後に、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。

参考文献

1) 金 他：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）、第24回地震工学研究発表会 投稿中
2) 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
3) 国生、岩橋：軟弱地盤の非線形振動特性についての模型振動実験と解析、土木学会論文報告集、第285号、1979
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
5) 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