

特集報文：道路構造物の強靱化に向けて

地震時の液状化によるカルバートの被災発生の要因分析

伊藤浩和・佐々木惇郎・佐々木政和・七澤利明

1. はじめに

災害に強い信頼性の高い道路網の構築のために、大規模地震や大雨等による道路機能への影響を最小限に留められるような設計・施工・維持管理を行っていくことが管理者に求められている。

道路土工構造物のカルバートでは、既往の地震において、継手の開きにより背面盛土の土がカルバート内へ流入し、内空道路のみならず上部道路の交通へ影響を及ぼす被害の発生が確認されている。ここで、カルバートの継手とは、縦断方向に分割されたカルバート躯体の接合部を指す

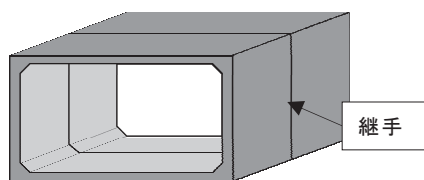


図-1 カルバートの構造例

(図-1)。

カルバートの設計においては、これまで比較的規模の小さなカルバートにおける慣用設計法は示されているが、具体的な耐震設計法は示されておらず、液状化しやすい地盤上に敷設されたカルバートの設計にあたっての留意事項等についても具体的には示されていない。

そこで、本検討では地震によるカルバートの被災事例の調査、その変状に係る再現解析及び液状化地盤上を模擬したボックスカルバートの動的遠心載荷模型実験を行い、被災の発生要因等を明確にすることを試みたので、その検討の概要について紹介する。

2. 地震におけるカルバートの被災事例の調査

過去の地震において液状化の影響を受けたと推定されるボックスカルバートの変状内容及び変状程度と補修方法について整理した。表-1 に示す熊本地震で被災を受けたカルバートを中心に合計30施設の調査を行った。

地震直後の被災調査結果等によると、カルバー

表-1 対象カルバート

地震名	路線名	施設数
2007年 新潟県中越沖地震	県道荒浜中田線	1
2011年 東北地方太平洋沖地震	国道349号	1
2016年 熊本地震	九州自動車道	28
		30

トの躯体には目立った損傷はなく、主な変状内容は継手の開きであった。また、継手の開き量と補修方法との関係を整理すると、開き量の大きさに応じて、補修方法が変化していることが分かった(図-2、3)。

補修方法は、継手の開きが大きくなるほど、補修に要する日数や上部道路等への交通規制の観点から難易度は高くなっていく。道路機能への影響を最小限にするためには、上部道路の規制が不要な鋼板閉塞補修が可能な継手の開き量 20cm 程度未満に留めることが望ましい。

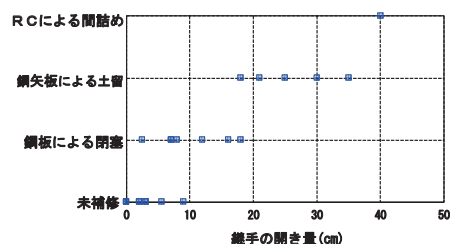


図-2 継手の開き量と補修方法の関係

	継手の開き量 δ		
	$7\text{cm} \leq \delta < 20\text{cm}$	$20\text{cm} \leq \delta < 40\text{cm}$	$40\text{cm} \leq \delta$
補修の難易度	比較的容易	やや難	難
	内空道路から施工が可能 上部道路の交通規制はなし	上部道路から施工 上部道路の交通規制が発生	上部道路、内空道路の全面通行止め を行い施工
補修方法	鋼板閉塞による補修	鋼矢板土留による補修	RC間詰めによる補修

図-3 継手の開き量と補修方法の概要

3. カルバートの変状に係る再現解析

3.1 解析の概要

2.で整理した被災事例の中から代表的な2施設(表-2)を選定し、推定地震動分布図¹⁾より当該カルバート位置での地表面最大加速度(PGA)を抽出して液状化判定を行った。その結果、両箇所ともにカルバート近傍のボーリング調査で確認された沖積砂質土層において液状化する判定と

表-2 対象カルバートの基本情報

事例 No.	路線名	カルバート諸元				地震名
		延長 (m)	ブロック 数	躯体寸法 (幅×高) (m)	土被り (m)	
1	九州道	28.9	2	5.76×5.59	1.0	2016年 熊本地震
2	国道349号	26.0	2	8.00×6.05	0.6	2011年 東北地方太平洋沖地震

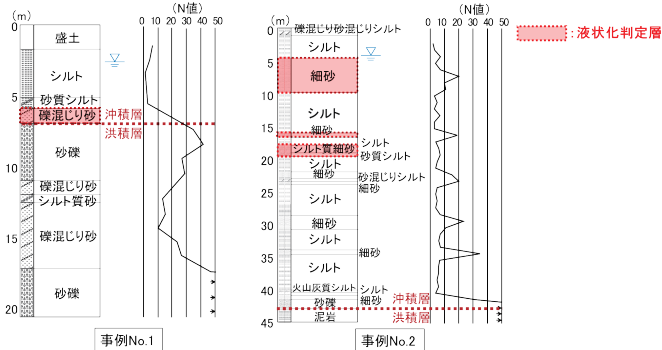


図-4 対象カルバート近傍の柱状図

なった(図-4)。この結果を踏まえ、カルバートの変状再現解析を実施した。

再現解析は、応答変位法を用いた静的解析により行った。以下に解析手順を示す。

- ① 対象カルバート近傍で実施したボーリング調査結果を踏まえ、地盤定数を設定。
- ② 地震応答解析結果に基づき入力地震動を設定。
- ③ 基礎地盤の変形解析(有限要素法を用いた静的変形解析法 ALID)を実施し、カルバート位置の地盤変位を算出。
- ④ カルバート躯体を梁要素、周辺地盤を非線形のばね要素でモデル化(継手部をフリーとした弾塑性床土の梁モデルを構築)し、ばね先に③で算出した地盤変位を与え、躯体変位(カルバート継手の開き量等)を算出。

3.2 カルバートの縦断方向の解析結果

縦断方向の解析条件、結果を示す。

(1)解析条件

表-3 に再現対象箇所における解析条件の概要と継手開き量(解析結果、実被害)を示す。地盤の変形解析においては、液状化(軟化)を考慮する層を砂質土のみとした場合と砂質土及び粘性土とした場合の解析を行った。砂質土層の繰返し三軸強度比は、ボーリング調査結果に基づき、液状化判定に用いられる N 値からの推定式(H29 道示 2)より求めた。粘性土層については、既往の文献³⁾で示される推定式に基づき、粘着力 c より求めた。粘着力については、一般的な粘性土の強度増加率 $m(=0.30 \sim 0.45 \text{ 程度})$ より、深さ方向に強度を変化させた。

表-3 対象箇所の解析条件・結果と実被害との関係

事例 No.	CASE	路線名	入力地震動		液状化 (軟化)を 考慮する層	粘性土 強度 増加率	継手開き量(cm)	
			地震動 タイプ	地表面 最大 加速度 (cm/s ²)	砂質土	粘性土	解析結果	実被害
1	1-1	九州道	タイプⅡ	1040	○	---	16.2	25
	1-2				○	○	15.7	
2	2-1	国道 349号	タイプⅠ	610	○	---	25.0	35
	2-2				○	○	31.0	

入力地震動は、対象箇所近傍で観測された地表面波形を用いて、等価線形解析により引き戻し及び順解析を実施し、解析対象地点における地表面最大加速度を求め、この値を用いた。

(2)解析結果

表-3 に九州道及び国道 349 号のカルバートの解析結果を併記している。図-5 に砂質土のみを液状化させた解析結果を示す。

砂質土のみを液状化させたケースに対して、粘性土も軟化させたケースを比較した結果、両事例ともにカルバート両端部付近の鉛直変位はやや増加するものの、水平変位に大きな差は生じなかったことから、両カルバートともに砂質土層の液状化が継手の開きの主要因となっている可能性が高いと考えられる。なお、解析結果の継手の開き量は実被害と比べてやや小さい結果となっている。これは、本解析が静的な解析であり、地震動の慣性力の繰返しによる影響が含まれていないことが理由として考えられる。

変形モードに着目すると、実被害ではカルバート両端部が沈下するような状況であったが、解析では中央部の継手付近が沈下するようなモードとなっている。粘性土の軟化も考慮したケースでは、継手の開き量に大きな差はなかったものの実被害に近い変形モードとなっている。このことから、カルバートの地震時の変状の再現解析を実施する場合には、砂質土の液状化に加え、粘性土の軟化の影響も考慮する必要があると考えられる。

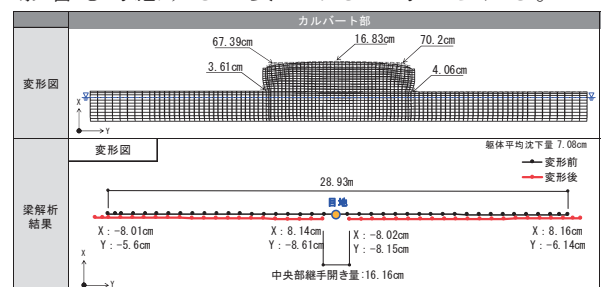


図-5 縦断方向解析結果(例: CASE-1-1)

4. ボックスカルバートの動的遠心載荷実験

4.1 実験の概要

本実験は液状化層を模擬した地盤材料上の1/75スケールの模型（材料はアルミニウム）に対して75Gの遠心力場で実施した。カルバートの内空断面幅、土被り厚、ブロック延長、液状化層厚等をパラメータとして12ケースの実験を行った（表-4）。12ケースのうち、CASE-3及びCASE-10はブロック連結の有無による挙動の変化を確認するため、全体の半分のブロックを補強材により縦方向に連結した。なお、入力地震動波形は、H29道示2)に示されるレベル2地震動（タイプI）の動的解析用標準加速度波形2-I-I-3とした。

表-4 実験ケース一覧

No.	カルバートの内空断面幅 (m)	土被り厚 (m)	ブロック延長 (m)	液状化層厚 (m)	加振方向	着目点
CASE-0	構造物なし	-	-	3	カルバート縦断方向	構造物の有無
CASE-1	6.5	0.5	10	3	カルバート縦断方向	基本ケース
CASE-2	6.5	0.5	10	3	カルバート横断方向	加振方向の影響
CASE-3	6.5	0.5	1.5	3	カルバート縦断方向	ブロック延長の影響
CASE-4	6.5	5	10	3	カルバート縦断方向	土被り厚の影響
CASE-5	6.5	0.5	10	10	カルバート縦断方向	液状化層厚の影響
CASE-6	14	0.5	10	3	カルバート縦断方向	内空幅の影響
CASE-7	6.5	5	10	10	カルバート縦断方向	土被り厚・液状化層厚の影響
CASE-8	14	0.5	10	10	カルバート縦断方向	内空幅・液状化層厚の影響
CASE-9	6.5	0.5	10	10	カルバート横断方向	加振方向・液状化層厚の影響
CASE-10	14	0.5	1.5	3	カルバート縦断方向	内空幅・ブロック延長の影響
CASE-11	14	5	10	10	カルバート縦断方向	内空幅・土被り厚・液状化層厚の影響

4.2 実験結果

(1)実験後の状況

基本ケース（CASE-1）の加振後の盛土の変状を写真-1に、盛土及び液状化層の変位ベクトルとカルバート本体の変状図を重ねたものを図-6に示す。

変位ベクトル図に示すとおり、盛土及び液状化層がカルバートの縦断方向（道路の横断方向）に変位しており、この変位に追随するようにカルバートの各継手に開きが発生している。

(2)カルバートの縦断方向の挙動

入力地震動とカルバートの縦断方向の伸び量及

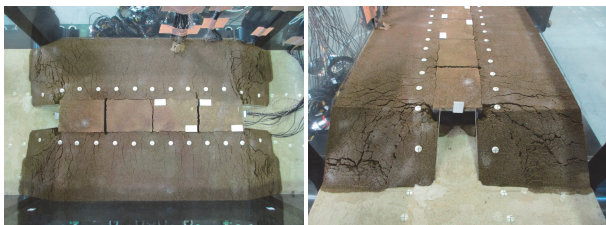


写真-1 加振直後の状況（CASE-1）

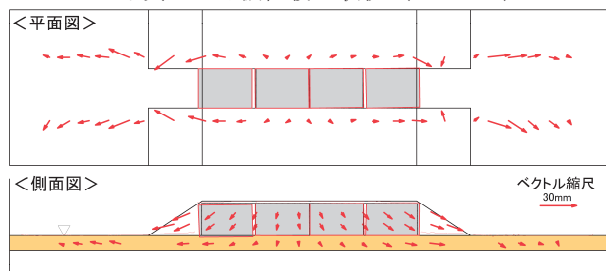


図-6 変位ベクトル図（CASE-1）

び躯体直下地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴波形を整理した結果の例（CASE-1）を図-7に示す。なお、以降に示す数値は、実物スケールに換算した値である。

過剰間隙水圧比の急増時にはカルバートの縦断方向の伸び量は限定的であるが、入力地震動の主要動付近で伸び量が急増している。カルバートの縦断方向の伸びは、地盤が液状化した状態で慣性力の繰返しに影響して流動化が進行したことが大きな要因であると推察される。

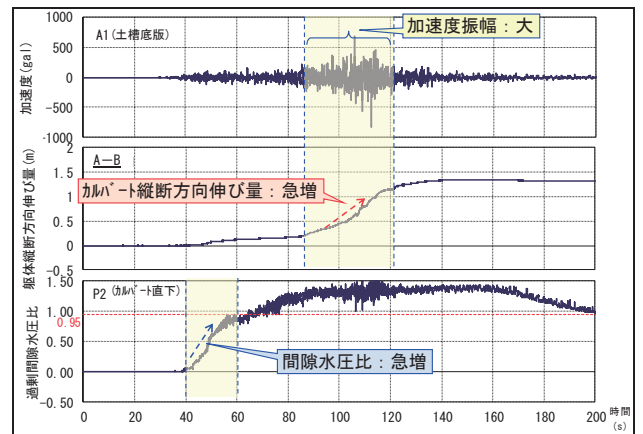


図-7 縦断方向の伸び量の時刻歴変化(CASE-1)

(3)カルバートの縦断方向の伸び量の発生傾向

基本ケースに対して、土被り厚や液状化層厚を変化させたケースの比較を図-8に示す。

土被りが大きいと拘束土圧の影響により躯体直下では液状化が発生せず（黒丸：液状化なし、赤丸：液状化）、カルバートの縦断方向の伸び量は小さくなっている。一方、液状化層が厚いと躯体直下の一部を除き液状化が発生し伸び量も大きくなっている。

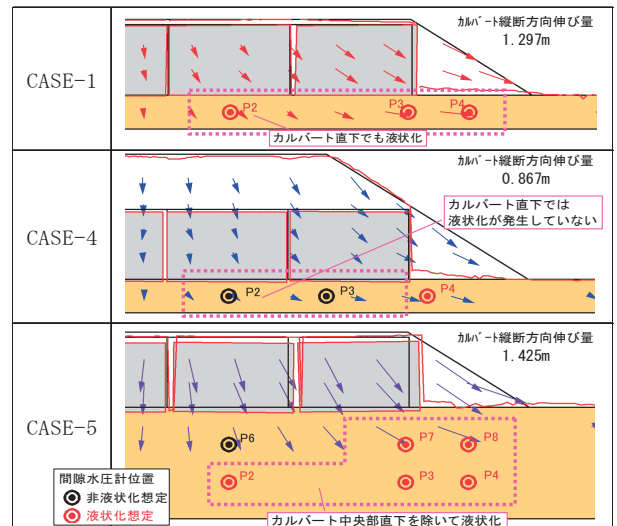


図-8 変位ベクトル図の比較

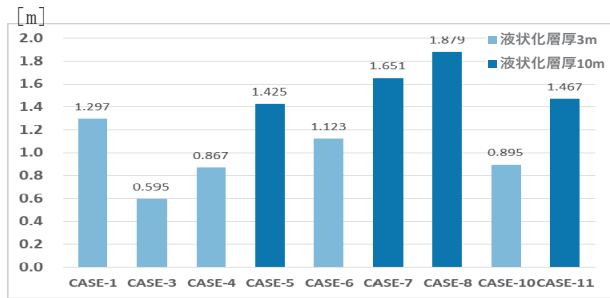


図-9 縦断方向の伸び量のまとめ

各実験ケースで得られたカルバートの縦断方向の伸び量（継手開き量）を図-9に示す。CASE-3及びCASE-10は、連結していないブロック側で生じている伸び量を2倍にした値とした。

基本ケース（CASE-1）に対して、液状化層が厚いケースでカルバートの縦断方向の伸び量がすべて上回る結果となった。

カルバートの縦断方向の伸び量について、各種パラメータとの関係性を分析した結果の例を図-10に示す。液状化層が厚くなると伸び量は大きくなり、土被りの大きさや内空断面幅が変わっても同様の傾向となることが確認された。なお、カルバートの鉛直方向の変位についても液状化層が厚くなると変位は大きくなり、同様の傾向を示すことが確認された。

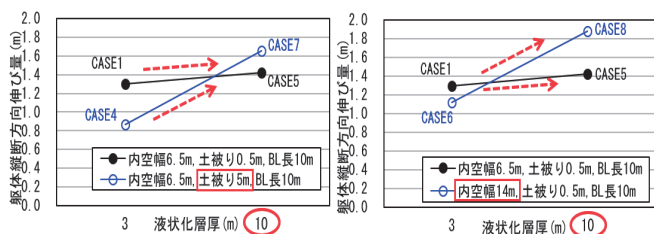


図-10 縦断方向の伸び量の各種条件の整理結果

5. まとめ

本検討では地震による液状化の影響を受けるカルバートの挙動について、被災事例調査、再現解析及び動的遠心载荷模型実験で発生要因等を明確

にすることを試みた。

今回の検討から得られた知見として、カルバートの地震時の液状化の影響により発生が想定される変状は、カルバートの継手の開きが主なものであり、躯体自体の損傷は生じていないことが被災事例から確認された。また、液状化の変形モードは、砂質土の液状化のみならず、粘性土の軟化の影響も考慮することで、より実現現象に近づくことが再現解析から分かった。加えて、液状化による変状の程度は、液状化が発生する層の厚さ及び慣性力の影響が大きいことが模型実験で明らかになった。

今後は、既設カルバートの対策検討の判断の目安となる液状化によるリスクを有する条件及び新設カルバートの液状化対策を行う条件の抽出方法の検討を行うとともに、新設カルバートの液状化に対する設計での対応案を検討していく。具体的には、カルバートの継手を容易に補修ができる開き量（概ね20cm程度未満）に留めるため、以下の内容を検討・提案し、道路土工構造物の基準類への反映を目指していく。

- ① 継手の開き量が大きくなる地盤条件、構造条件の明確化
- ② 実務での適用に考慮した解析方法
- ③ 新設時における継手部の構造細目

参考文献

- 1) Suetomi: Estimation of Map of AVS30 and JMA Seismic Intensity Scale on the Recent Damaged Earthquakes in Japan, The 7th Asia Conference on Earthquake Engineering, 22-25 November 2018, Bangkok, Thailand
- 2) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成29年11月）
- 3) 稲垣太浩、板清弘、山田眞一、粕田金一、安田進：H16新潟県中越地震による粘性土地盤上の土構造物の変形挙動（その1）、第4回日本地震工学会大会梗概集、4th、pp.222～223、2005

伊藤浩和



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部構造・基礎研究室
主任研究官
ITO Hirokazu

佐々木惇郎



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部構造・基礎研究室
研究官
SASAKI Atsuo

佐々木政和



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部構造・基礎研究室
交流研究員
SASAKI Masakazu

七澤利明



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部構造・基礎研究室
長、博士（工学）
Dr. NANAZAWA Toshiaki