

# 大規模地震動に対する剛性ボックスカルバートの 応答計算手法の提案と試算例

谷本俊輔・齋藤 亮・佐々木哲也・西田秀明

## 1. はじめに

道路土工におけるカルバートのうち、「従来型カルバート」については、過去の地震による被害が限定的であったという経験的事実に基づき、常時の作用に対する照査を満足することで、それが地震動の作用に対しても所要の性能を満足するとみなすとされている<sup>1),2)</sup>。ここで、「従来型カルバート」とは、比較的小規模で単純な構造諸元を有するカルバートであり、構造形式ごとにその範囲が具体的に定められている<sup>1),2)</sup>。一方、近年ではコスト縮減や施工省力化等の観点から、大型化、プレキャスト化により規模等が従来型の適用範囲から外れるカルバートが増加しつつある。そのため、これらのカルバートにおいても地震動の作用に対する性能を適切に確保できるように、標準的な耐震設計の方法を提示する必要性が高まっている。

上記の背景から、著者らは代表的な構造形式である剛性ボックスカルバートを対象に、大規模地震動に対して汎用性および実用性を有する耐震性

照査手法を提案し、その妥当性を実験や被災事例の再現解析などから確認している<sup>3),4)</sup>。本稿では、その提案手法のうち構造解析手法に関する概要を説明するとともに、提案している照査方法<sup>4)</sup>を適用した場合の試算結果を紹介する。

## 2. 大規模地震動に対する剛性ボックスカルバートの応答計算法

平成4年に策定された駐車場設計・施工指針<sup>5)</sup>には、地中構造物の断面方向に対する耐震設計法が規定されており、応答変位法に基づく構造解析の方法や、地震力の基となる表層地盤の振動変位の算出方法なども含めて体系的に示されている。ただし、今日の道路構造物において考慮が必要となる大規模地震動（レベル2地震動）における適用性には様々な課題が残されている。本研究では、これをレベル2地震動によって生じる大きな変形レベルに対して適用できるように改良した手法を提案している。その概要を以下に示す。

### 2.1 非線形応答変位法

文献5)に示されている従来の応答変位法をボッ

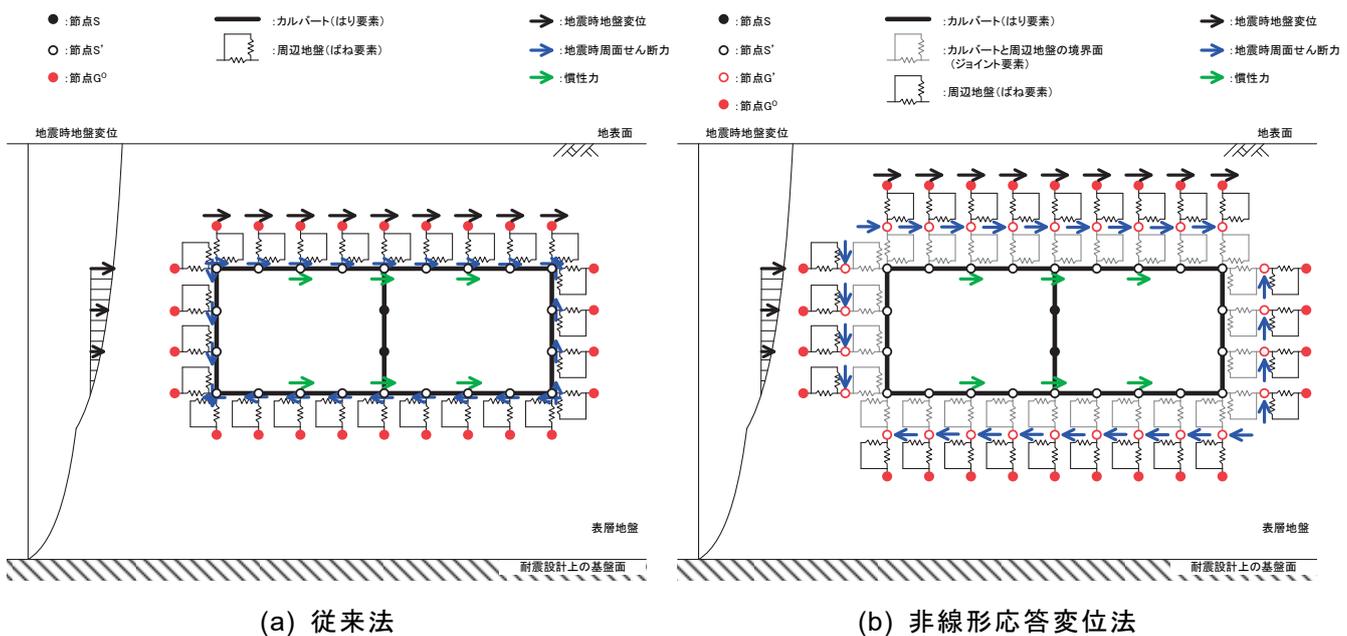


図-1 応答変位法の概念図

クスカルバートの断面方向に適用する場合の概念図を図-1(a)に示す。これは、カルバートの構成部材をはり要素、周辺地盤をばね要素によってモデル化し、カルバートの自重に起因する慣性力のほか、周辺地盤の変形に伴ってカルバートに加わる荷重を地震時地盤変位および地震時周面せん断力として与えるものである。この方法は、動的FEMによる線形モデルをサブストラクチャー法によって縮約したものであり、線形解析～等価線形解析の範囲内においては動的FEMの近似解を得ることができる<sup>6),7)</sup>。ただし、この方法ではカルバートと周辺地盤の接触面におけるすべり・剥離を適切に表現することができないため、大規模地震動を入力した場合は、計算上、カルバートに周辺地盤から不自然な引張力や摩擦強度を超えるせん断力が作用し、部材の断面力や変形量が過大に算出されることとなる。

これに対し、立石・岡<sup>8)</sup>が提案した解析モデルは、図-1(b)に示すようにカルバート（はり要素）と周辺地盤（ばね要素）の間にジョイント要素を設けることで、両者の接触面におけるすべり・剥離を表現するものである。この方法は、動的FEMによる非線形モデルをサブストラクチャー法によって縮約したものであり<sup>3)</sup>、著者らはボックスカルバートの動的遠心模型実験や過去の地震による地中構造物の被災・無被災事例の再現解析を通じて妥当性を検証している<sup>3),4)</sup>。このモデルを用いると、周辺地盤の変形に伴う作用である地震時地盤変位および地震時周面せん断力がいずれもジョイント要素を介してカルバートに伝達するため、カルバートに作用する引張力とせん断力がジョイント要素の引張強度と摩擦強度によって制限されることとなる。これに加え、構造部材および周辺地盤の非線形復元力特性をはり要素およびばね要素に付与することにより、大規模地震動に対する部材の断面力や変形量を合理的に算出することができる。著者らは、この方法をボックスカルバートの耐震設計において用いることができる構造解析手法として提案している。

## 2.2 表層地盤の応答計算法

応答変位法において主たる地震力となる周辺地盤の地震時地盤変位および地震時周面せん断力は、表層地盤の応答計算結果に基づいて設定する必要がある。ここではまず、駐車場設計・施工指針に

示されている表層地盤の応答計算法の特徴を示す。

- ・ 表層地盤が水平成層状であることを仮定した場合の1次モード解を利用したものである。
- ・ 表層地盤の物性値を一様とみなすことで計算手法の単純化を図っている。
- ・ 表層地盤の固有周期が地震動により1.25倍に長周期化することを見込んでいる。これは、表層地盤の微小ひずみ域のS波速度  $V_{s1}$  に対し、地震時のひずみ依存性の影響により0.8倍 (=1/1.25倍) に低下することを見込んでいることに相当する。

著者ら<sup>9)</sup>はこの手法を改良し、レベル2地震動に対して適用可能な手法を提案している。その概要を以下に示す。

### 2.2.1 表層地盤の硬軟分布

従来の方法では表層地盤を一様とみなす単純化を図っているため、算出される地盤変位分布には各地層の硬軟分布の影響が反映されない。しかし、地震時の振動による表層地盤の変形は軟弱な地層に集中し、その傾向は地震動が強い場合ほど顕著となる。このため、表層地盤を一様として近似するのではなく、物性の異なる複数の地層から構成される水平成層地盤の1次モード解から表層地盤の応答を算出する方法を提案した。

### 2.2.2 大規模地震動のS波速度比 $c_v$

地震時のS波速度の低下度合いを表すS波速度比  $c_v$  ( $=V_{sd1}/V_s$ 、 $V_{sd1}$ は地震時のS波速度)は、表層地盤の応答計算結果を大きく左右する重要なパラメータである。従来の方法で用いられている  $c_v=0.8$ は、1970年代当時の強震記録を用いた多数の地震応答解析の結果に基づいて設定されたものであり、平成7年(1995年)兵庫県南部地震以降に観測されているような極めて強い地震動に対して得られたものではない。そこで、著者らはレベル2地震動に概ね相当する地震動が観測された近年の鉛直アレイ地震記録の波形処理解析結果等に基づき、設計上の目安となるS波速度比  $c_v$  として表-1に示す値を提案している<sup>3),9)</sup>。

表-1 S波速度比  $c_v$  の目安

		S波速度比 $c_v$	
		レベル1地震動	レベル2地震動
$V_s < 300\text{m/s}$	砂質土層	0.8	0.2
	粘性土層	0.8	0.4
$V_s \geq 300\text{m/s}$		1.0	0.8

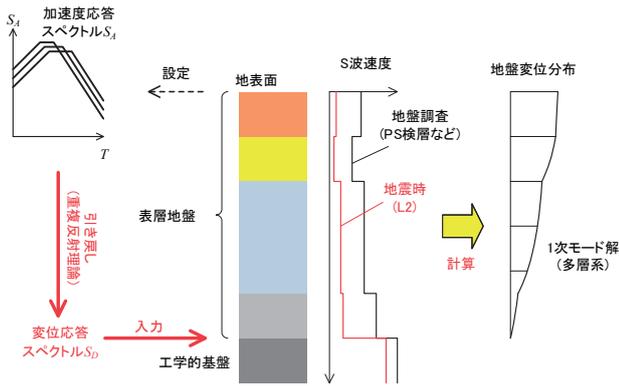


図-2 提案した表層地盤の応答計算手法の概念図

2.2.3 工学的基盤面における地震動の設定

道路土工要綱<sup>10)</sup>では、道路土工構造物の耐震設計に用いる地震動が、地表面における加速度応答スペクトルの形で設定されている。一方、地中構造物である道路カルバートの耐震設計では、表層地盤の応答計算を行うにあたり、工学的基盤面においてこれと整合した地震動を設定することが必要となる。

そこで、地表面で設定された加速度応答スペクトルを重複反射理論によって引き戻し、工学的基盤面における変位応答スペクトルに変換する方法を提案した。この方法を用いることにより、工学的基盤面における地震動を、地表面で設定された加速度応答スペクトルと矛盾なく設定することができる。

表層地盤の応答計算法として提案した一連の手法のイメージを図-2に示す。なお、提案手法を実務者が手軽に使用できるよう、文献9)の巻末資料には提案手法に基づく表層地盤の応答計算プログラムを収録しており、土木研究所土質・振動チームHPでも公開している。

3. 剛性ボックスカルバートの耐震性評価に関する試算

3.1 試算の条件

文献3)、4)で提案した手法を用いて盛土内に構築したカルバートの耐震性を評価するために、一

般的な常時設計において考慮する荷重（死荷重、活荷重、土圧）に対して、断面設計を実施した場合所打ち剛性ボックスカルバートを対象に、レベル2地震動による照査を実施した。

本研究ではカルバートの内空寸法や地盤条件を変えた多数のケースについて試算を行っているが、本報では従来型カルバートの中で最も大きな内空断面（Case1）と、大型カルバートの定期点検データ（1巡目点検結果）から単連構造で比較的実績のある範囲で最大となる内空断面（Case2）のケースに対する試算結果を紹介する。

対象土被りは、事前検討の結果から、土被りが薄いほど常時荷重に対する地震時荷重の比率が大きく、耐震設計の結果が構造諸元に与える影響が相対的に大きいため、カルバート指針で規定されている最小値0.5mとした。また、盛土及び表層の土の定数は砂質土相当の単位体積重量 $\gamma = 19\text{kN/m}^3$ 、せん断抵抗角 $\phi = 30^\circ$ 、粘着力 $c = 0\text{kN/m}^2$ と設定し、頂版および側壁との摩擦強度はケーソン基礎のせん断地盤反力度の上限値を参考に $0.5\sigma_{tan}\phi$ 、底面の摩擦強度はカルバート工指針を参考に $\sigma_{tan}\phi$ と設定した。ここに、 $\sigma$ は各部材に作用する地盤反力度（直応力）である。

3.2 照査方法

部材の照査方法は、曲げ変形に対しては、大型カルバートの正負交番載荷試験<sup>11)</sup>の結果から、内側コンクリートの剥落など早期機能回復の支障にならない程度の損傷にとどめることを意図し、層間変形角の制限値を1/100に設定した。また、せん断力に対しては、各部材の脆性的なせん断破壊を防止するため、せん断耐力を超えないことを照査した。

3.3 試算結果

各ケースのレベル2地震動（タイプI、タイプII）の照査結果を表-2及び図-3に示す。全てのケースで層間変形角が制限値未満となり、曲げ変形の照査を満足した。参考までに、表-2には最も厳しい

表-2 照査結果一覧

	内空幅 (m)	内空高 (m)	土被り (m)	地盤条件	地震波	曲げ変形照査		せん断力照査				曲率			
						層間変形角 $\theta_s$	制限値	せん断力 P (kN)	コンクリート負担分 $S_c$ のみ		せん断補強鉄筋考慮		発生曲率 $\phi_d$ (1/m)	降伏曲率 $\phi_y$ (1/m)	$\phi_d/\phi_y$
									せん断耐力 $P_s$ (kN)	$P/P_s$	せん断耐力 $P_s$ (kN)	$P/P_s$			
Case1	6.5	5.0	0.5	Ⅲ種地盤単層	タイプ1	1/1303	1/100	167.9	263.2	0.64	334.7	0.50	0.00177	0.00535	0.33
					タイプ2	1/1540	1/100	164.2	263.2	0.62	334.7	0.49	0.00157	0.00535	0.29
Case2	14.0	6.0	0.5	Ⅲ種地盤単層	タイプ1	1/2015	1/100	566.0	424.7	1.33	678.6	0.83	0.00125	0.00215	0.58
					タイプ2	1/2490	1/100	545.7	424.7	1.28	678.6	0.80	0.00099	0.00215	0.46

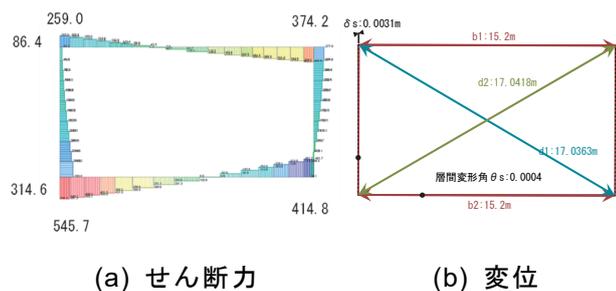


図-3 Case2(タイプ II)の計算結果

曲げ変形が生じた部材の曲率を示しているが、いずれのケースにおいても降伏に達するものはなかった。この結果を踏まえ、せん断照査においては、荷重の正負交番繰返し作用の影響を考慮することなくせん断耐力を算出し、発生せん断力と比較したところ、Case1の断面規模であればコンクリート負担分のみで満足することとなった。なお、本研究で試算を行った他の従来型カルバートにおいても同様に、レベル2地震動に対する各照査を満たす結果が得られた。Case2については、コンクリート負担分のみではせん断耐力が不足する結果となったが、組立筋（4本・D13@250）程度のせん断補強鉄筋量を配置することで、せん断耐力を満足する結果が確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、大規模地震動に適用可能な剛性ボックスカルバートの応答計算モデルおよびその地震力を設定するうえで必要なる表層地盤の応答計算手法を提案した。また、提案したモデルを用いて、内空断面の異なる2ケースのカルバートの耐震性を評価した結果、組立て鉄筋と同程度のせん断補強鉄筋を配置することにより、所定の性能を満足する結果が得られた。今後の課題として、

本研究にて提案した手法について、改良地盤や杭基礎に支持されるボックスカルバートのほか、プレキャスト部材のカルバート、アーチカルバート、門型カルバートなど他の構造形式のカルバートに対する適用性を検証していく必要がある。

#### 参考文献

- (公社)日本道路協会：道路土工構造物技術基準・同解説、2017.3.
- (社)日本道路協会：道路土工-カルバート工指針（平成21年版）、2010.3.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人土木研究所：大型のボックスカルバートの耐震性照査手法に関する研究、国総研資料第1247号、土木研究所資料 第4440号、2023.4.
- 谷俊秀、岡崎貴斎、栗原勇太、七澤利明：大型ボックスカルバートの耐震性照査手法の開発、土木技術資料、第63巻、第11号、pp.28～33、2021.11.
- (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説、1992.11.
- 川島一彦：地下構造物の耐震設計法、鹿島出版会、1994.
- 立石章：応答変位法による地震荷重の作用方法に関する研究、土木学会論文集、No.441/I-18、pp.157～166、1992.1.
- 立石章、岡二三生：地中構造物横断方向のレベル2地震動に対する静的耐震計算法の適用性、土木学会論文集、No.752/I-66、pp.179～192、2004.1.
- 佐々木哲也、谷本俊輔：大規模地震動に対する地中構造物の耐震設計のための表層地盤の実用的な応答評価手法、土木研究所資料、第4430号、2022.6.
- (社)日本道路協会：道路土工要綱(平成21年版)、2009.6.
- 八ツ元仁、藤原慎八、星隈順一、谷口哲憲、北村岳伸、玉越隆史：1連道路ボックスカルバートの地震時限界状態の評価に関する研究、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.71、No.3、pp.295～314、2015.

谷本俊輔



土木研究所 地質・地盤  
研究グループ土質・振動  
チーム 主任研究員  
TANIMOTO Shunsuke

齋藤 亮



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  
SAITO Ryo

佐々木哲也



土木研究所 地質・地盤  
研究グループ土質・振動  
チーム 上席研究員  
SASAKI Tetsuya

西田秀明



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  
室長  
NISHIDA Hideaki