

重. 6 ボックスカルバートの耐震設計に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 23

担当チーム：地質・地盤研究グループ(土質・振動)

研究担当者：佐々木哲也，谷本俊輔，山木正彦

ボックスカルバートは、地震時に周辺地盤や盛土と一体となって挙動するため、地震の影響を受けにくいとされているが、ボックスカルバートの大型化が進み、構造的にも複雑なものが出現してきており、このようなボックスカルバートに対する地震の影響度合いについては、体系的な研究がまだなされていない。また、地中の道路構造物としての、ボックスカルバートに要求される耐震性能を満足するための限界状態についても明確になっていないのが現状である。

本研究では、ボックスカルバートの耐震性能を満足させるために設定すべきカルバートおよびそれを構成する部材の限界状態、ならびに地中におけるカルバートの地震時挙動の評価手法を提案し、耐震設計法として体系化していくことを目的とするものである。平成 22 年度では、①ボックスカルバート供試体を用いた繰返し水平載荷実験、②地盤内に設置したボックスカルバート供試体による遠心力載荷実験を実施することにより、ボックスカルバートを構成する構造部材の終局限界状態の確認およびボックスカルバートと地盤との相互作用の評価を行った。

キーワード：ボックスカルバート，耐震性能，限界状態，繰返し水平載荷実験，評価手法

1. はじめに

ボックスカルバートの設計、施工等の基準については「道路土工カルバート工指針」（以下、指針）に示されているが、その耐震設計に関しては一般的に省略されている。これは、指針において定められている適用範囲規模（幅で 6.5m、高さで 5m 以下）のボックスカルバートにおいては、地震時に周辺地盤や盛土と一体となって挙動するため、地震の影響を受けにくいためとされている。また、これまでの地震においても、道路用のボックスカルバートで機能損失に至るような大きな被害が生じていないところである。

一方で、近年、ボックスカルバートの大型化が進み、また、構造的にも複雑なものが出現してきているが、このようなボックスカルバートに対する地震の影響度合いについては、体系的な研究がまだなされていない。また、そもそも、地中の道路構造物のひとつとして、ボックスカルバートが確保すべき耐震性能についても明確になっていないところである。

このような背景から、ボックスカルバートが地震に対して確保すべき耐震性能を明確にするとともに、耐震性

能を満足するための部材の限界状態とその評価手法を提案し、耐震設計法として体系化することが重要である。

本研究では、地中構造物であるボックスカルバートの地震時での限界状態を適切に評価するため、①ボックスカルバートを構成する構造部材の終局限界状態の把握およびボックスカルバート構造全体系での終局限界状態の把握、②ボックスカルバートが地震時に受ける地盤からの相互作用力の評価、を行うものとし、最終的にはボックスカルバートの耐震性能の明確化および耐震性能の評価手法の確立を行うものである（図-1）。

2. 動の実験で見られた大地震時のボックスカルバートの応答特性とその評価方法

ボックスカルバートの耐震設計に関する研究②では、盛土とボックスカルバートの相互作用を把握するための動の実験（動的遠心力模型実験）、実験結果を精度よく再現できる解析手法の検討を行った。本報告書ではその研究成果について報告を行う。

平成 22 年度に行った一連の動の実験では、大地震時における盛土とボックスカルバートの相互作用について、

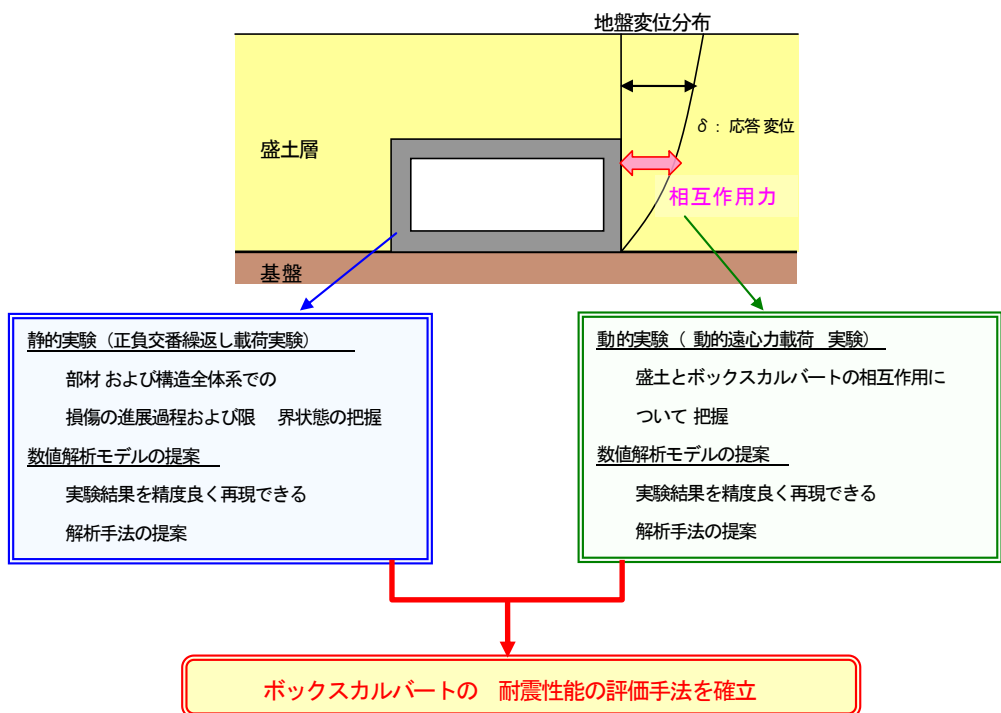


図-1 共同研究における研究内容

次のような特徴が見られた。

- 1) 側壁・盛土間の剥離、底版の浮き上がりなど、相互作用に著しい非線形性が生じる。
- 2) 地震動が強くなるにつれて、躯体のせん断変形よりも剛体回転運動が顕著となる。大地震時には非線形相互作用による地震エネルギーが逸散する効果が期待され、結果として、大地震時においても大きな部材断面力が発生しにくい。
- 3) 地震動が強くなるほど、躯体のせん断変形が最大値を示す時刻は、ボックスカルバートの応答加速度がピークを示す時刻と概ね一致し、地盤振動変位がピークを示す時刻と一致しなくなる。つまり、ボックスカルバートの応答加速度と盛土の振動変位の挙動が一体的でなくなる。
- 4) 断面幅が小さいほど剛体回転運動が顕著となる。つまり、従来型ボックスカルバートのように断面寸法の小さい場合ほど地震エネルギーの逸散効果により大きな躯体の変形や部材断面力が発生しにくい。
- 5) 土被りが大きくなると、ボックスカルバート・盛土間の相互作用における非線形性が発現しにくくなる。これは、カルバート周辺地盤の拘束圧が高いことや、カルバートの剛体回転運動が上載土からの鉛直反力によって抑制されるためであると考えられる。

これらのイメージを図-2 に模式的に示す。

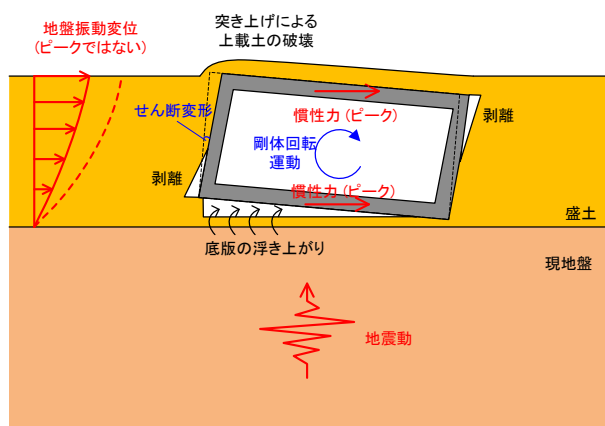


図-2 大地震時における盛土とカルバートの相互作用に関する模式図

地中構造物の地震時応答の評価するための実務的な解析方法として、応答変位法、応答震度法の2種類がある。過年度の実験で見られた挙動を踏まえ、両者の適用性について検討する。

遠心実験結果の考察に基づけば、大地震時におけるボックスカルバートの応答を評価するにあたり、盛土と躯体の相互作用における非線形性をいかに評価するかが重要なポイントであると考えられる。応答震度法のような

FEM でこの極限状態を再現することを考えると、①SH波の伝達による地盤のせん断振動、②側壁の主働・受働抵抗、③頂版の上載土の鉛直押し抜きせん断、といった多方向せん断に対する土の非線形挙動を考慮することが必要となり、複雑な構成モデルを選定することが必要になる。

一方、応答変位法では、あらかじめ地盤反力係数と地盤反力の極限值を求めておき、これをばねの反力特性に反映することで、カルバート・盛土間の非線形相互作用を比較的容易に表現することができる。このような解析モデルの扱いの容易さから、応答変位法に基づき、動の実験の結果を再現することを試みた。

3. 解析対象とした実験

解析対象としたのは平成 22 年度に実施した実験であり、盛土内に設置されたボックスカルバートに大規模地震動を入力した実験である。これらのうち、として、表

表-1 解析対象とした実験ケース

Case	土被り厚	BOX 内空幅	盛土形状
2	0.5m	14m(1 連)	台形
5	0.5m	6.5m(1 連)	台形
6	0.5m	24m(2 連)	台形
7	10.0m	14m(1 連)	水平

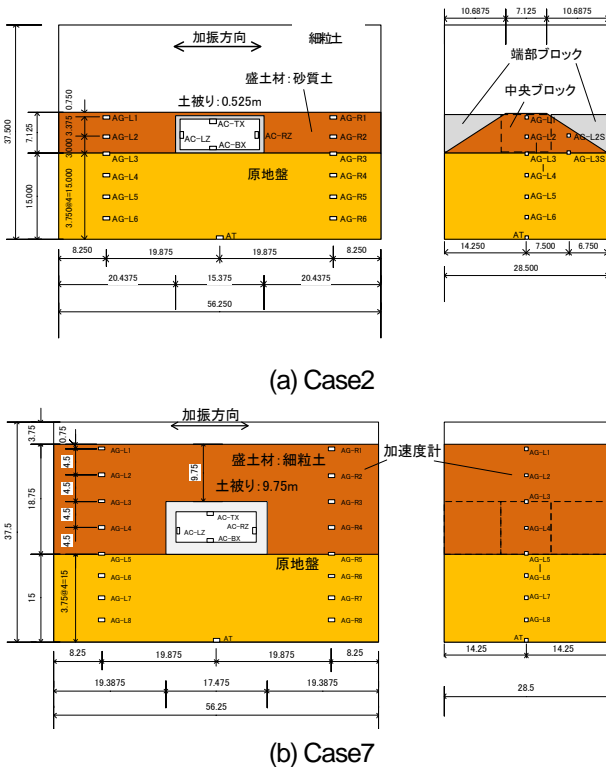


図-3 実験模型概要 (単位:m, 実物スケール)

-1 に示すように、カルバートの躯体形状と土被りの大きさが異なる 4 ケースを解析対象とした。

実験模型の例を図-3、カルバート模型の断面図を図-4 に示す。各ケースにおいて、カルバートの層間変形角が最大を示した時刻を解析対象とし、同時刻におけるカルバートの応答加速度と盛土の地盤振動変位の計測値を解析モデルに作用させることとした。

4. 解析モデル

4.1 解析方法の概要

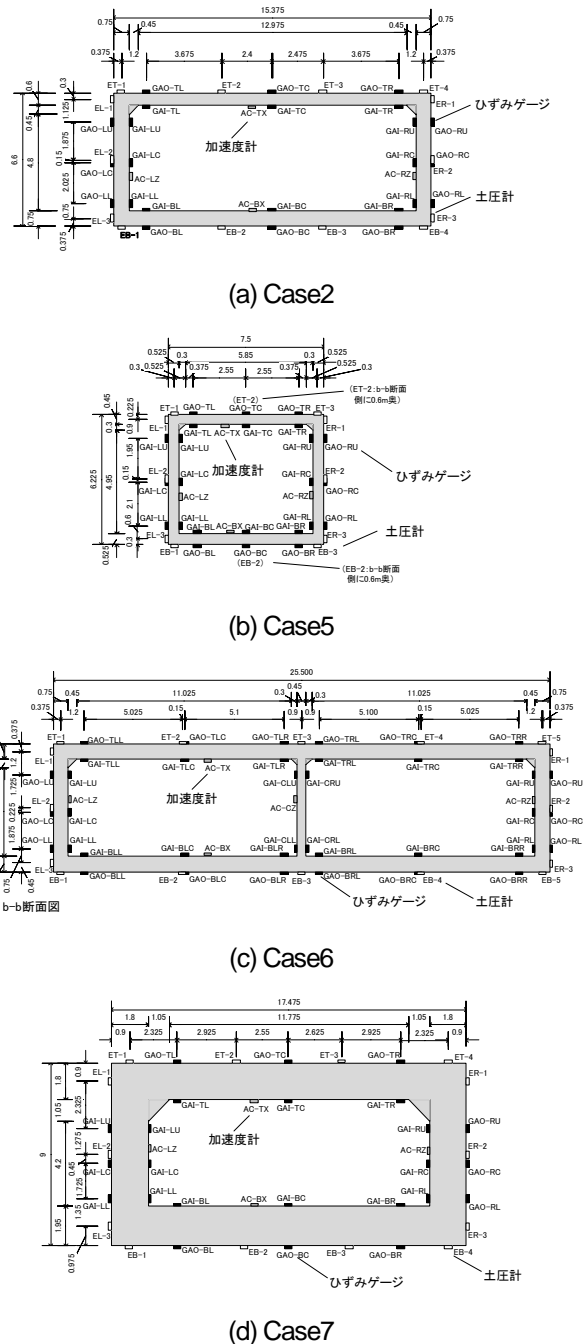


図-4 カルバート模型の断面図 (単位:m, 実物スケール)

応答変位法による解析では、ボックスカルバートを梁要素でモデル化し、次の6種類の地盤抵抗を考慮した。

- ・頂版の鉛直地盤反力
- ・頂版のせん断地盤反力
- ・側壁の水平地盤反力
- ・側壁のせん断地盤反力
- ・底版の鉛直地盤反力
- ・底版のせん断地盤反力

解析は次の手順で行った。

- 1) 初期応力解析により、解析モデルに躯体の自重と頂版の上載荷重を作用させ、地盤反力の初期値を再現する。
- 2) 躯体の慣性力と地盤振動変位を静的に漸増させながら作用させる。

以下、個々の地盤抵抗のモデル化方法について述べる。

4.2 頂版の鉛直地盤反力

頂版による鉛直押し抜き破壊、剥離を考慮したバイリニア型とする。鉛直方向地盤反力係数は、次式で与えることとした。

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad (2)$$

変形係数 E_0 は実験で使用した盛土材の三軸試験結果 (E_{50}) から設定することとし、頂版位置での拘束圧相当の値を用いることとする。補正係数 α は常時の値 (=4) とする。換算載荷幅 B_v は 10m を下限とした。

頂版の鉛直地盤反力の上限值 p_{vTU} としては、図-5 に模式的に示す鉛直押し抜き破壊を考慮することとし、次式により設定した¹⁾。

$$p_{vTU} = \frac{\gamma}{B} \left\{ BH + \frac{H^2}{\tan(45^\circ + \phi/2)} \right\} \quad (3)$$

ここに、 γ は上載土の単位体積重量、 H は土被り厚、 ϕ はせん断抵抗角である。この極限值は、上載土が主動崩壊角 ($45^\circ + \phi/2$) のすべり面を形成しつつ押し抜き破壊する領域の重量に相当する。地盤反力の下限值については、剥離を考慮してゼロとした。

4.3 頂版のせん断地盤反力

滑動を考慮してバイリニア型の抵抗特性を与えた。せん断地盤反力係数 k_s は、ケーソン基礎の底面せん断地盤反力係数を参考に、次式で与えた。

$$k_s = 0.3k_v \quad (4)$$

また、上限値は次式で与えた。

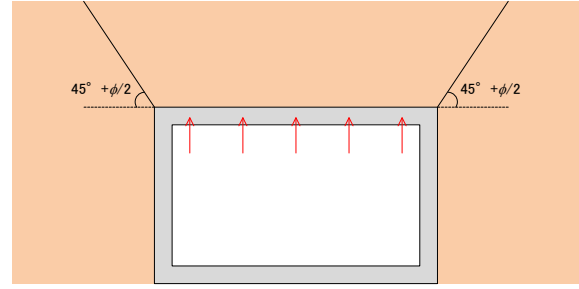


図-5 頂版上載土の押し抜き破壊の模式図

$$p_{ST} = c + \sigma'_v t a \phi \quad (5)$$

4.4 側壁の水平地盤反力

受働破壊、剥離を考慮し、バイリニア型の抵抗特性を与えた。水平方向地盤反力係数は、式(1)、(2)と同様に次式で与える。

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (6)$$

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad (7)$$

水平地盤反力の上限值は常時の受働土圧とした。下限値については、剥離を考慮してゼロとした。

4.5 側壁のせん断地盤反力

滑動を考慮し、バイリニア型の抵抗特性を与えた。せん断地盤反力係数 k_s は、次式により設定した。

$$k_s = 0.3k_H \quad (8)$$

また、せん断地盤反力の上限值 p_{ST} は次式により設定した。

$$p_{ST} = c + \sigma'_h t a \phi \quad (5)$$

ここに、 σ'_h は加振前に側壁に作用する静止土圧とした。

4.6 底版の鉛直地盤反力

鉛直方向地盤反力係数は、式(1)、(2)により設定することとし、変形係数 E_0 は底版位置での拘束圧に相当する値とした。

ボックスカルバートは底版幅が大きく、底面地盤が支持力破壊することは考えにくいことから、底面の鉛直反力については上限値を設けていない。一方、剥離の影響を考慮するため、地盤反力の下限值をゼロとした。

4.7 底版のせん断地盤反力

滑動を考慮してバイリニア型とした。せん断地盤反力係数は、ケーソン基礎の底面せん断地盤反力係数を参考に、式(1)により設定した。上限値は式(2)により設定した。

5. 解析結果

5.1 層間変形角 α および剛体回転角 β

層間変形角 α および剛体回転角 β について、動的遠心力

表-2 解析で得られたカルバートの層間変形角 α および剛体回転角 β

ケース名	実験値		解析値					解析値/実験値			
	L1	L2	L1	L2			L1	L2			
				$\tan\phi = 0.3$	$\tan\phi = 0.15$	$\tan\phi = 0$		$\tan\phi = 0.3$	$\tan\phi = 0.15$	$\tan\phi = 0$	
Case2	α	3.14E-04	1.31E-03	4.45E-04	2.55E-03	2.22E-03	1.88E-03	1.42	1.95	1.69	1.43
	β	7.63E-05	7.46E-04	1.40E-04	9.74E-04	8.47E-04	7.20E-04	1.83	1.31	1.14	0.97
Case5	α	2.87E-04	1.37E-03	2.08E-04	2.10E-03	1.89E-03	1.67E-03	0.72	1.53	1.38	1.22
	β	8.75E-05	1.86E-03	2.20E-04	3.54E-03	3.21E-03	2.88E-03	2.52	1.90	1.73	1.55
Case6	α	2.51E-04	1.06E-03	4.04E-04	1.94E-03	1.84E-03	1.42E-03	1.61	1.83	1.74	1.34
	β	3.97E-05	8.83E-05	6.40E-05	3.54E-04	3.44E-04	2.60E-04	1.61	4.01	3.90	2.94
Case7	α	3.47E-04	7.81E-04	1.52E-04	4.87E-04	3.38E-04	1.89E-04	0.44	0.62	0.43	0.24
	β	2.13E-04	1.51E-03	2.04E-04	6.86E-04	4.80E-04	2.73E-04	0.96	0.45	0.32	0.18

模型実験により得られた値（実験値）と解析結果（解析値）を表-2 に比較する。ここに、層間変形角 α および剛体回転角 β は図-6 のように定義している。表中の $\tan\phi$ はカルバート頂版、側壁、底版の摩擦係数である。ここに示す解析では、静止土圧係数 K_0 を、土被りの小さい Case2, 5, 6 における計測値として、0.1 としている。

せん断地盤反力の上限值を求める際の摩擦係数を、豊浦砂とアルミ板の一面せん断試験の結果に基づいて $\tan\phi = 0.3$ としたところ、Case2, 5, 6 において α, β ともに過大な解析結果が得られたため、 $\tan\phi = 0.15, 0$ とした解析も行った。 $\tan\phi$ が小さくなるにしたがって、 α, β ともに小さくなる傾向が見られ、かつ、 $\tan\phi = 0$ とした場合でも土被りの小さい Case2, 5, 6 に関しては $a > 1.0$ であり、安全側の計算結果となっている。しかし、土被りの大きい Case7 に関しては解析値が実験値を大きく下回っており、本解析により実験結果を再現することができていない。そこで、土被りの大きい Case7 を中心に、地盤抵抗に関するパラメータを種々変更し、解析結果に与える影響を調べた。



(a) 層間変形角 (b) 剛体回転角
図-6 カルバートに関する2種類の変位モード

5.2 地盤抵抗パラメータが解析結果に及ぼす影響に関する試算

まず、Case7 における加振前の静止土圧係数 K_0 は概ね

0.3 程度であったため、これを修正した。摩擦係数に関しては、実験により頂版、側壁での剥離が見られたことから、 $\tan\phi = 0$ とした。

ただし、摩擦係数をゼロとすることで、カルバート底面のせん断地盤反力が得られないため、図-7 に示すように、解析結果として得られるカルバートの変位は水平方向の剛体変位（滑動）が卓越し、カルバートのせん断変形や剛体回転が発生しにくくなっている。このため、底版のせん断地盤反力については、摩擦係数を増加させた計算を行った。これによって α の解析値は大きくなったものの、実験値に比べると 1/2 程度までしか増加しなかったため、静止土圧係数 K_0 や各部の地盤反力係数についても種々変更した解析を行った。解析パラメータと解析結果の一覧を表-3 に示す。

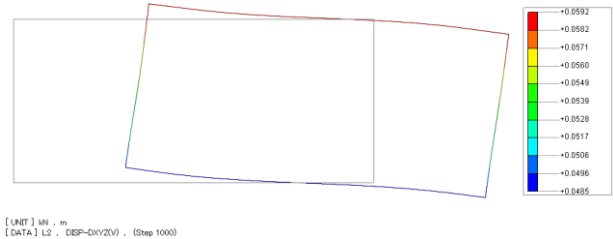


図-7 Case7 におけるカルバートの変位の解析結果 (L2 入力時、倍率 100 倍 ($\tan\phi = 0.3$))

土圧係数、摩擦係数、地盤反力係数を上げることで α の比が 1 に近づく傾向が確認できる。本条件において層間変形角 α の比が 1 に達する条件はケース C7L2-9 であった。

表-3 実験 Case7 に対して地盤抵抗パラメータを変更した場合の解析結果

解析ケース	土圧係数 K_0	摩擦係数 $\tan\phi$			地盤反力係数(基本値との倍率)			α 比	β 比			
		頂版	側壁	底版	頂版	底版	側壁					
C7L2-1	0.3	0	0	0.3	鉛直1、せん断1	鉛直1、せん断1	鉛直1、せん断1	0.4876	0.3707			
C7L2-2		0	0	0.6				0.5618	0.4294			
C7L2-3		0	0	0.3				0.5254	0.3999			
C7L2-4	0.5	0	0	0.6	鉛直1、せん断1	鉛直1、せん断2	鉛直1、せん断1	0.6526	0.5012			
C7L2-5		0	0	1.5				0.6884	0.5297			
C7L2-6	0.3	0	0	0.3	鉛直2、せん断2	鉛直2、せん断2	鉛直2、せん断2	0.6817	0.3059			
C7L2-7		0	0	0.6				0.8973	0.4083			
C7L2-8		0	0	0.75				0.9982	0.4572			
C7L2-9		0	0	0.9				1.0983	0.5062			
C7L2-10		0	0	1.5				鉛直2、せん断10	鉛直2、せん断10	鉛直2、せん断10	1.1262	0.5197
		0	0	1.5							1.1262	0.5197

さらに、この試算結果を踏まえ、Case2, 5, 6についても底版の摩擦係数と各部の地盤反力係数を C7L2-9 と同様に設定した場合の解析を行った。その結果を表4に示す。土被りの大きなCase7については実験値と同程度の層間変形角 α が得られたが、土被りの小さいCase2, 5, 6については、層間変形角 α を過大に評価する結果となっている。つまり、土被りの大きいケースと小さいケースについて、両者の実験結果と解析結果が一致するような地盤抵抗パラメータの設定方法を見出すことができなかった。

今後は、解析モデルも含め、ボックスカルバートの応答を精度よく再現することのできる方法について、さらなる検討が必要である。

表-4 地盤抵抗を大きく設定した場合の各ケースの層間変形角 α および剛体回転角 β

ケース名		実験値	解析値	解析値/実験値
修正後Case2	α	1.31E-03	3.34E-03	2.55
	β	7.46E-04	1.16E-03	1.55
修正後Case5	α	1.37E-03	2.97E-03	2.17
	β	1.86E-03	3.55E-03	1.91
修正後Case6	α	1.06E-03	1.86E-03	1.75
	β	8.83E-05	3.08E-04	3.49
修正後Case7	α	7.81E-04	8.58E-04	1.10
	β	1.51E-03	7.64E-04	0.51

5. まとめ

盛土内に設置されたカルバートの動的応答に着目し、

応答変位法による解析を行うことで、過年度に実施した遠心実験結果の再現を試みた。

ボックスカルバートの断面形状によらず、土被りの小さいケースについては実験結果を概ね再現することができたが、土被りの大きいケースについては実験結果の再現が困難であった。試算として、カルバート・盛土間の摩擦係数や地盤反力係数を増加させた場合の解析も行ったが、土被りの異なる複数の実験結果を同時に再現することのできる地盤抵抗パラメータの設定方法を見出すことができなかった。

今後は、解析モデルも含め、ボックスカルバートの応答を精度よく再現することのできる方法について、さらなる検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩, 中島進: 地震被害を受けた樋門の解析, 土木技術資料, Vol.51, No.4, pp.34-39, 2009.12.
- 2) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書 IV 下部構造編, 2002.2

Research on seismic design method for Box culverts

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2010-2011

Research Team : Geology and Geotechnical Research Group
(Soil Mechanics and Dynamics Research
Team)

Author : SASAKI Tetsuya
TANIMOTO Shunsuke
YAMAKI Masahiko

Abstract : It is generally known that box culverts exhibit the inherent seismic performance because these structures are constructed in the ground, which may result in less significant seismic effect on them. On the other hand, the size of the box culvert has recently increased and also been complex shape, so that such culvert may affect the seismic effect. However there are few researches on the seismic design for such culvert. Required seismic performance of the box culvert for road facility and the limit state to satisfy the seismic performance are also unclear.

This research has conducted for development of the seismic design for the box culvert based on the proposal of the evaluation method for the limit state and seismic behavior of the box culvert. In FY2010, both the cyclic lateral loading tests and the centrifuge tests to the scaled box culvert were performed, and the limit state of the structural member in the box culvert and the interaction between the ground and the box culvert were discussed through the experimental results.

Key words : Box culvert, Seismic Performance, Limit state, Cyclic lateral loading test, Evaluation Methodology