

# 数値解析による道路ボックスカルバートの 層間変形角と盛土地盤の地表面沈下の相関関係

八ツ元 仁<sup>1</sup>・澤村 康生<sup>2</sup>・木村 亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課（〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25）  
<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2）  
<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-4）

## 1. はじめに

道路ボックスカルバートは、土工構造物の一つであり、実現場において数多く用いられている構造体である。過去の大地震では、道路ボックスカルバートを取り囲む盛土地盤での損傷は確認されているものの、躯体において大きな損傷が生じていないこともあり、道路ボックスカルバートは耐震性能が高いとされてきている。その他の土工構造物と同様に、橋梁に比べてコスト面で有利性があることや、前述のとおり耐震性能が高いということから様々な現場で用いられており、さらに近年では断面が大型化したものや、内部空間に中壁を設置した構造面での複雑化したものが出現してきている。

しかし、一方で、耐震性能が高いとされてきたこともあり、道路ボックスカルバートの耐震設計に関する研究はほとんど行われてきておらず、耐震設計手法については未だ確立されていない。また、前述のような構造的に大型化、複雑化が生じた道路ボックスカルバートの地震時挙動についても、未だ不明な点が存在していることから、これら多岐に渡る構造も対象とした体系的に整理された耐震設計手法の確立が望まれる状況にある。

このような背景から、筆者らは道路ボックスカルバートの耐震設計手法を確立することを目的に、同構造の地震時挙動の解明に関する研究を実施してきた<sup>1)3)</sup>。文献2), 3)では、検証する対象を道路ボックスカルバートの躯体のみとするのではなく、土工構造物としては地震時の挙動を必ず把握しておかなければならない躯体を取り囲む盛土地盤についても検討の対象としている。また、当該研究では、道路ボックスカルバート躯体およびそれを取り囲む盛土地盤の地震時挙動を一体的にかつ正確に評価することのできる動的解析を実施し、地震時挙動の膨大なデータを蓄積してきた。これら動的解析の結果をもとに、道路ボックスカルバートの地震時挙動を

分析する中で、躯体におけるせん断ひずみ（層間変形角）と盛土地盤の地表面における沈下量との間に強い相関関係があることを明らかにした。本稿では、この新たに得た知見について述べる。

## 2. 数値解析の概要

### (1) 解析手法の概要

本研究で用いる地震時における道路ボックスカルバートの動的挙動を求める数値解析は、文献1), 2), 3)で用いた手法と同じ2次元弾塑性FEM（解析コード：DBLEAVES<sup>4)</sup>）とし、地盤部および躯体のモデルについても同文献と同じモデルを用いた。なお、このDBLEAVESについては、道路ボックスカルバートを含む様々な種類の地中構造物に対する耐震検討等が実施されてきており、その計算精度の高さについては検証済みである<sup>1)2), 5)9)</sup>。道路ボックスカルバートの地震時挙動を検証した筆者らの研究<sup>2)</sup>の中では、過去の大地震における道路ボックスカルバートの被災状況と解析結果との比較により、地盤部の変形状態は過小に、躯体の曲げ損傷は過大に評価をするが、地震時における盛土地盤内での道路ボックスカルバートの挙動や盛土地盤の地表面での沈下挙動などを適切に評価できることを確認している。

### (2) 解析対象の選定<sup>3)</sup>

本研究では、様々な構造条件下での道路ボックスカルバートを検討することを目的に、異なる9つの構造条件の解析を行う。断面形状を表す $W/H$ （内空幅を内空高で除した値）は1.0, 2.0, 3.0の3ケース、土被りは1.0m, 6.0m, 10.0mの3ケースとし、これら2条件を組合せた9ケースを解析対象とする。道路土工カルバート工指針<sup>10)</sup>（以降、カルバート工指針と呼ぶ）および国土交通省制定土木構造物標準設計第1巻<sup>11)</sup>に基づき行った常時設計により決定した

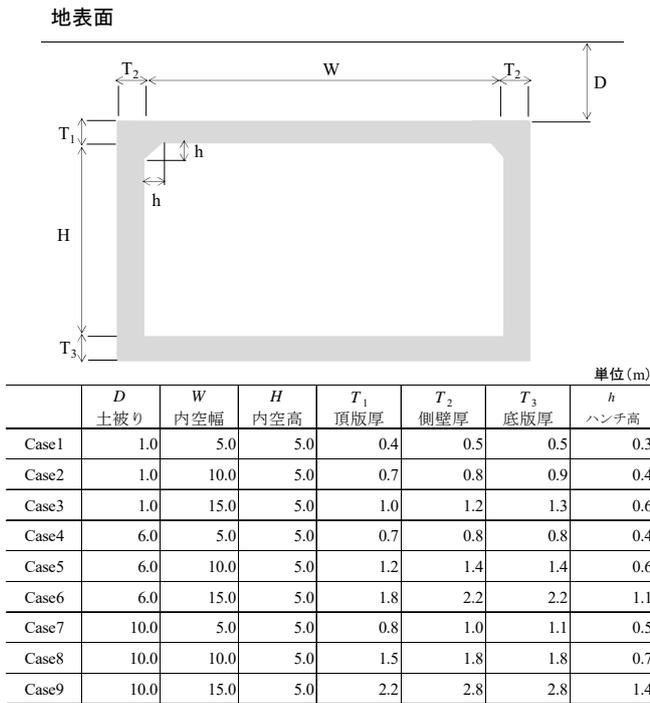
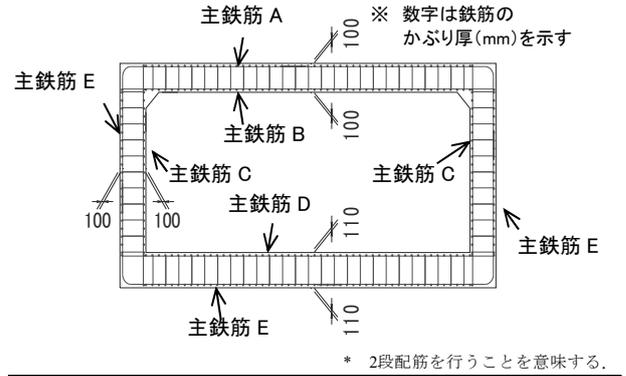


図-1 解析対象の構造諸元<sup>3)</sup>



	主鉄筋A 径及びピッチ	主鉄筋B 径及びピッチ	主鉄筋C 径及びピッチ	主鉄筋D 径及びピッチ	主鉄筋E 径及びピッチ
Case1	D19@125	D19@125	D13@125	D16@125	D19@125
Case2	D25@125	D25@125	D16@125	D25@125	D25@125
Case3	D35@125	D32@125	D25@125	D32@125	D35@125
Case4	D22@125	D19@125	D13@125	D19@125	D22@125
Case5	D35@125	D35@125	D25@125	D35@125	D35@125
Case6	*D32@125	*D29@125	D29@125	*D29@125	D32@125
Case7	D32@125	D25@125	D13@125	D25@125	D22@125
Case8	D38@125	D35@125	D25@125	D38@125	D38@125
Case9	*D38@125	*D32@125	D29@125	*D32@125	*D35@125

図-2 配筋の概略<sup>3)</sup>

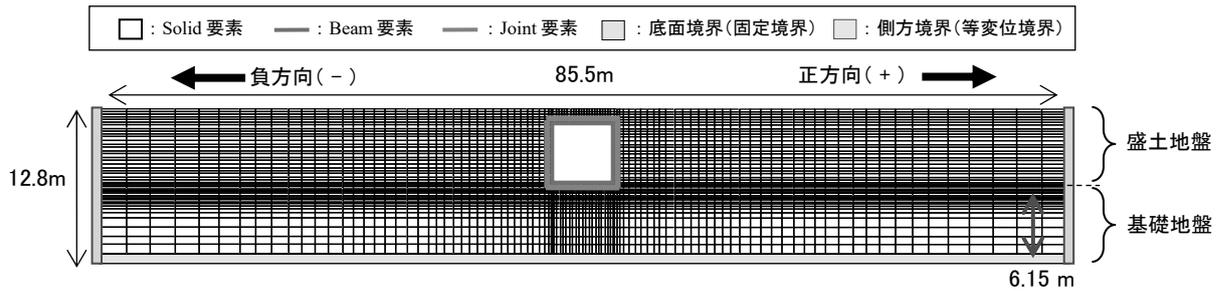


図-3 モデル化の概要 (Case1)<sup>3)</sup>

構造諸元を図-1に、配筋の概略を図-2に示す。なお、本研究では、地震時にせん断破壊が生じないことを前提とするため、せん断耐力に大きな影響を及ぼすスターラップは十分な量が配置されていることを想定している。

### (3) 解析モデルの概要<sup>3)</sup>

道路ボックスカルバートは盛土地盤内に設置すると想定し、盛土地盤の材料は良好な砂質地盤とした。道路ボックスカルバートを設置する基礎地盤については、カルバート工指針に示す基礎地盤の考え方<sup>10)</sup>に従いN値21の砂質地盤とし、基礎地盤より上の道路ボックスカルバート施工後に設置する盛土部分(盛土地盤)は、N値11の砂質地盤とした。また、異なる地盤条件下での地震時挙動を求めるため、基礎地盤をN値16に変更したケース、盛土地盤をN値5に変更したケースについても検討を行った。図-3には検討ケースの代表としてCase1の解析モデル図を示す。基礎地盤の底面は固定境界として設定し、基礎地盤の厚さは全てのケースで道路ボックスカルバートの構造物高さ(外側寸法)とした。また、水平

方向のモデル化範囲は、文献2)の中で確認した解析精度に影響を与えない範囲として、深さ方向のモデル化長さの3倍とした。

周辺地盤(基礎地盤および盛土地盤)の力学特性は、subloading  $t_{ij}$  model<sup>12)</sup>を用いるとともに、豊浦砂の土質パラメータを用いて地盤の設定を行った。表-1に示す豊浦砂の土質パラメータは、豊浦砂の三軸圧縮試験の結果<sup>12)</sup>をもとに定めた。subloading  $t_{ij}$  modelは、中間主応力の影響やせん断剛性の拘束圧依存性を考慮できるうえ、砂・粘土の区別なく正規圧密状態から過圧密状態を考慮できる。さらに、実務における使用を想定して開発されたモデルであるため、必要なパラメータの多くが三軸試験や圧密試験によって決定できるという点で、その他のモデルに比べて長けている。本研究では、地盤定数の設定はN値をもとに決定することとし、既往の研究で行われた手法<sup>13)</sup>を参考にパラメータフィッティングを行った。このフィッティングの中では3軸圧縮試験の再現解析(以下、3軸解析と呼ぶ)を実施することで、基礎地盤および盛土地盤それぞれで設定したN値相当の地盤特性を有するように、パラメータを

表-1 豊浦砂の解析パラメータ<sup>3)</sup>

Principal stress ration at critical state $R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp.)}$	3.2
Compression index $\lambda$	0.07
Swelling index $\kappa$	0.0045
$N=e_{NC}$ at $p=98kPa$ & $q=0kPa$	1.1
Poisson's ratio $\nu_e$	0.333
Parameter on density and confining pressure $\alpha$	60
Parameter on the form of yield surface $\beta$	2

表-2 検討ケースと地盤条件, 入力地震動の関係<sup>3)</sup>

ケース名称	N値		入力地震動
	基礎地盤	盛土地盤	
Case1-1	21	11	2-II-I-1
Case1-2	21	11	2-II-II-2
Case1-3	21	11	2-II-III-2
Case1-4	21	5	2-II-I-1
Case1-5	21	5	2-II-II-2
Case1-6	21	5	2-II-III-2
Case1-7	16	11	2-II-I-1
Case1-8	16	11	2-II-II-2
Case1-9	16	11	2-II-III-2

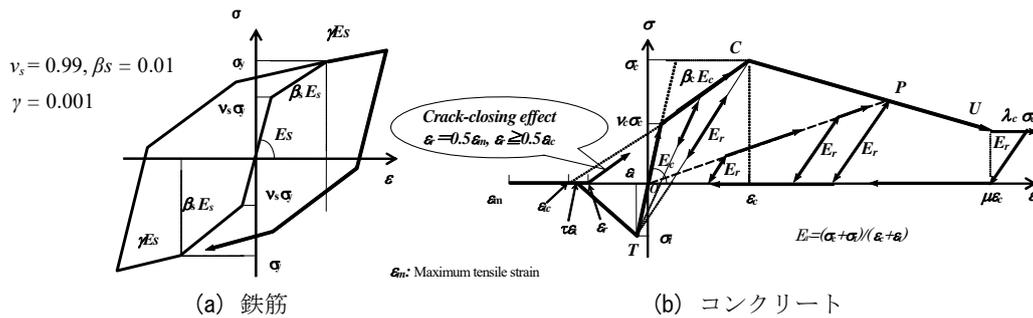


図-4 AFD model の応力-ひずみ関係<sup>14)</sup>

設定した。具体的な設定方法として、N値と3軸圧縮試験の変形係数の関係をもとに、N値の700倍の値が3軸解析から求まる変形係数に相当するようにパラメータを変化させた。地盤の単位体積重量は20kN/m<sup>3</sup>、地盤のポアソン比は1/3とした。

本解析では躯体を構成する部材での軸力変動による影響を評価するため、軸力依存性を考慮できるAxial-Force Dependent model (AFD model)<sup>14)</sup>を用いて躯体のモデル化を行った。AFD modelにおける応力-ひずみ関係を図-4に示す。AFD modelに入力するパラメータは、文献2), 3)の中で用いたパラメータと同じものを用いており、これらは図に示す骨格曲線の二次勾配が始まる応力、二次勾配の傾き、ポストピークにおける剛性低下の割合を決定するパラメータとなる。このパラメータ設定については、コンクリートのひずみが0.0035に達するまでは道路橋示方書・同解説コンクリート橋・コンクリート部材編<sup>15)</sup>に示す二次曲線の骨格曲線に合うように設定し、コンクリートのひずみが0.0035を超えたポストピーク領域の骨格曲線は同じ道路ボックスカルバートを対象に躯体の地震時挙動を検証した研究<sup>16)</sup>の中で用いている勾配を参考に設定を行った。コンクリートの単位体積重量は24.5kN/m<sup>3</sup>とし、コンクリートの圧縮強度はカルバート工指針に示すコンクリートの設計基準強度である24 N/mm<sup>2</sup>、主鉄筋はSD345を用いることを想定して降伏強度は345 N/mm<sup>2</sup>とした。また、文献16)を参考に、躯体モデルの要素長は部材厚の1/2程度、剛域はカルバート工指針<sup>10)</sup>に従い設定を行った。

道路ボックスカルバートと周辺地盤の境界部には

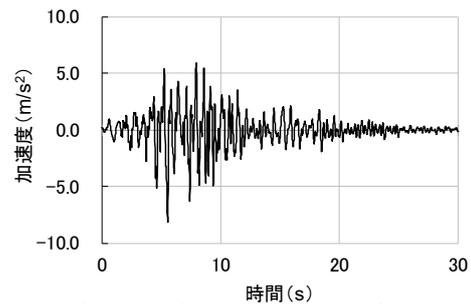


図-5 入力地震動の時刻歴波形 (2-II-I-1)<sup>18)</sup>

Joint 要素を配置し、その入力パラメータは、Sawamura *et al.*<sup>17)</sup>で使用されているコンクリートと砂地盤間の Joint 要素に用いられたパラメータを用いた。

#### (4) 解析検討ケースと入力地震動<sup>3)</sup>

Case1からCase9までの9ケースに対して様々な条件下での地震時応答を得るため、表-2に示す地盤条件および地震動を変化させた検討を行う。表中に示すように、1つのCaseに対して9つの検討条件が存在するため、本解析での検討ケースは全部で81ケースとなる。

動的解析の入力地震動は、図-3に示す底面境界に道路橋示方書・同解説耐震設計編<sup>18)</sup>に示すレベル2地震動タイプII地震の地震動を入力した。本研究ではタイプII地震動の中でもI種地盤の波である2-II-I-1(神戸海洋気象台地盤上NS成分)、II種地盤の波である2-II-II-2(JR西日本鷹取駅構内地盤上EW成分)、III種地盤の波である2-II-III-2(ポート

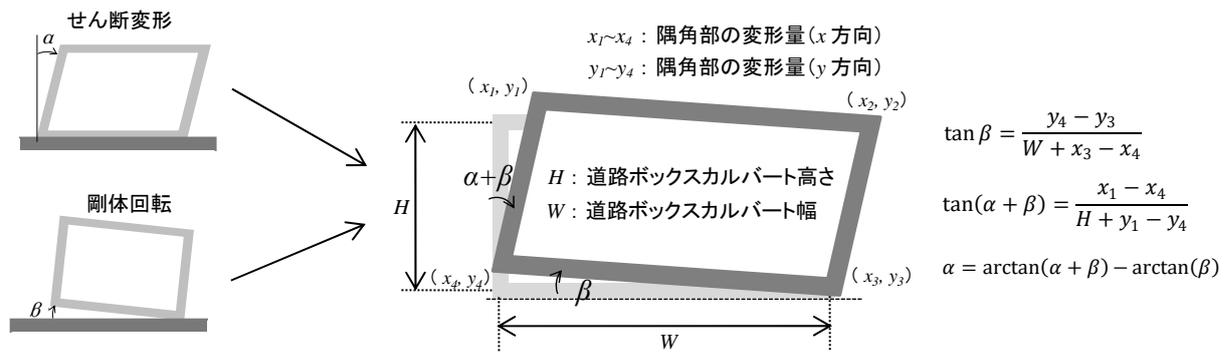


図-6 せん断変形と剛体回転のイメージとその値の求め方<sup>2)</sup>

沈下量が小さくても勾配が大きければ  
通行できないこともあり得る

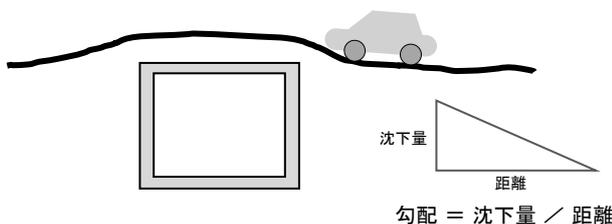


図-7 盛土地盤の損傷状態の評価指標

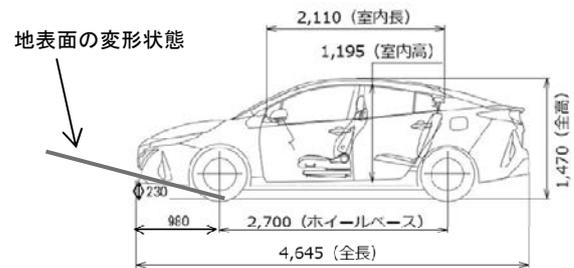


図-8 一般車両の構造図と沈下量の関係の概念図<sup>20)</sup>の寸法図を編集

アイランド内地盤上 NS 成分) の 3 波を入力した。  
図-5 には前述の I 種地盤の波である 2-II-I-1 の時刻  
歴波形を示す。本研究では、道路ボックスカルバート  
とそれを取り囲む周辺地盤の強震動下での挙動を  
把握することを目的としているため、様々な種類の  
強震動を当該モデルの固定境界に入力した。

動的解析における計算時間の間隔は、動的解析  
において一般的に用いる 1/500 秒とし、時間積分は  
Newmark- $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ ,  $\gamma=1/2$ ) を用いて計算を行っ  
た。また、粘性減衰モデルは剛性比例型を仮定し、  
周辺地盤部における減衰定数は  $h=0.05$ 、躯体の減衰  
定数は  $h=0.02$  とした。

### 3. 解析結果

#### (1) 層間変形角および盛土地盤の沈下量の算出

道路ボックスカルバートの地震時の挙動は、文  
献<sup>2)</sup>の中でも述べたように、図-6に示すせん断変形  
と剛体回転の両挙動が同時に生じることになる。各  
挙動の大きさを示す指標として、層間変形角 $\alpha$  (せん  
断変形角またはせん断ひずみ) と剛体回転角 $\beta$ を  
用いることとし、本研究ではこの層間変形角 $\alpha$ を用  
いて解析結果の分析を行う。層間変形角 $\alpha$ は、図中  
に示すように道路ボックスカルバート四隅の変形量  
から算出した。

また、道路ボックスカルバートを取り囲む盛土地  
盤の損傷状態を評価する指標として、文献<sup>2)</sup>の中で  
用いた沈下量と勾配という 2 つの指標を用いた。盛  
土地盤の地表面を盛土道路として用いる場合、車両

の走行性という観点が必要となる。この車両  
の走行性と盛土地盤の損傷の程度を同時に評価でき  
る指標として、同文献の中では前述の 2 指標を用い  
ている。車両の走行性を評価するには、沈下量は必  
要不可欠な評価指標となるが、図-7 に示すように  
小さな沈下量であっても段差のような沈下量の変化  
割合が極端に大きい場合には走行が困難となる。こ  
のため、盛土地盤の地表面の変化の割合を表す勾配  
という指標を設定している。この勾配は、沈下量を  
距離で除することで求めており、道路構造令の解説  
と運用<sup>19)</sup>等に示す縦断勾配と同じ指標となる。な  
お、ここに示す沈下量とは、盛土地盤の地表面にお  
ける 1m あたりの沈下量を表す。車両の走行性を判  
断するには、図-8 に示すように変形後の盛土地盤  
の地表面と車両のバンパーとの接触状況の評価する  
必要がある。車種により前輪とバンパー間の距離が  
変わるが、本研究では文献<sup>20)</sup>の寸法図をもとに、  
前輪とバンパー間の距離が 1m 程度であると想定し、  
盛土地盤の地表面での沈下量を 1m あたりの相対沈  
下量とした。沈下量の算出にあたっては、入力地震  
動の最終時刻における盛土地盤の地表面での変形量  
を用いて求めている。メッシュサイズの大きさによ  
り 1m あたりの沈下量が直接求められない場合は、  
線形補間を行うことで 1m あたりの沈下量を算出し  
ている。

#### (2) 層間変形角と盛土地盤の沈下量の相関関係

図-9に、81 ケースの解析結果より求めた層間変形  
角 ( $\alpha$ ) と沈下量の最大値 ( $d$ ) および層間変形角  
( $\alpha$ ) と勾配の最大値 ( $r$ ) の相関分布を示す。ここ

に示す沈下量および勾配の最大値とは、モデル化範囲内での盛土地盤の地表面における両指標の最大値のことを表す。

沈下量、勾配とともにバラつきは存在するものの層間変形角との強い相関関係があることがわかる。沈下量は、 $d = 15.03 \times \alpha + 0.02$ と切片を有する一次方程式に近似され、勾配についても同様に $r = 23.48 \times \alpha + 0.02$ という切片を有する一次方程式に近似される。躯体を取り囲む周辺地盤に生じるせん断変形の大きくなれば、躯体に生じるせん断変形の大きさも大きくなる。一方、水平方向に繰り返しの水平変形を受ける地盤においては、水平変形が大きくなると塑性変形が生じ、体積ひずみの変化が生じることで沈下が生じることが広く知られている。このため、本解析で得られた躯体の層間変形角（せん断ひずみ）の大きさと、盛土地盤の地表面における沈下量の大きさに線形関係という強い相関関係が現れることは妥当な結果であると考えられる。

つぎに、図-9に示した81ケースの相関分布の詳細分析として、図-10に入力地震動毎に分類してプロットした相関分布を示す。沈下量については、II種地盤の入力地震動を入力した結果がI種およびIII種のものに比べて若干ではあるが相関曲線が縦軸のプラス方向にシフトしている。このことは、II種地盤の入力地震動を用いたケースでは沈下量が大きくなる傾向にあることを表している。一方で、相関分布

におけるバラつきは、入力地震動毎での差はほとんど現れていない。この相関分布での傾向は、勾配についても同様に現れており、II種地盤の入力地震動を入力した場合、勾配はその他の地震動に比べて大きな値を示している。入力地震動が持つ振動特性が周辺地盤部の応答に影響をもたらしているものと考えられる。なお、土被り毎に分類した相関分布についても分析を行ったが、土被りの大きさがバラつきに与える影響はほとんどないことを確認した。

2. (1)の中でも述べたように、本研究で用いた解析手法では、盛土地盤の地表面における沈下量を過小に評価する傾向がある。このため、本項で示す相関曲線の精度については、今後のさらなる検討により検証を行うのと同時に、相関曲線の高精度化を行うことを予定している。

### (3) 相関関係の活用方法

本研究では、道路ボックスカルバート躯体に生じる地震時の応答の大きさを表す指標である層間変形角と、道路ボックスカルバートを覆う盛土地盤の地表面における沈下量および勾配の相関関係を求めた。層間変形角が得ることができれば、動的解析を行わずとも盛土地盤の地表面沈下量が求められると言える。一方、Wnag<sup>21)</sup>、西岡ら<sup>22)</sup>の研究では、地中構造物を対象にひずみ伝達に関する研究が行われており、地盤に生じるひずみがわかれば躯体に生

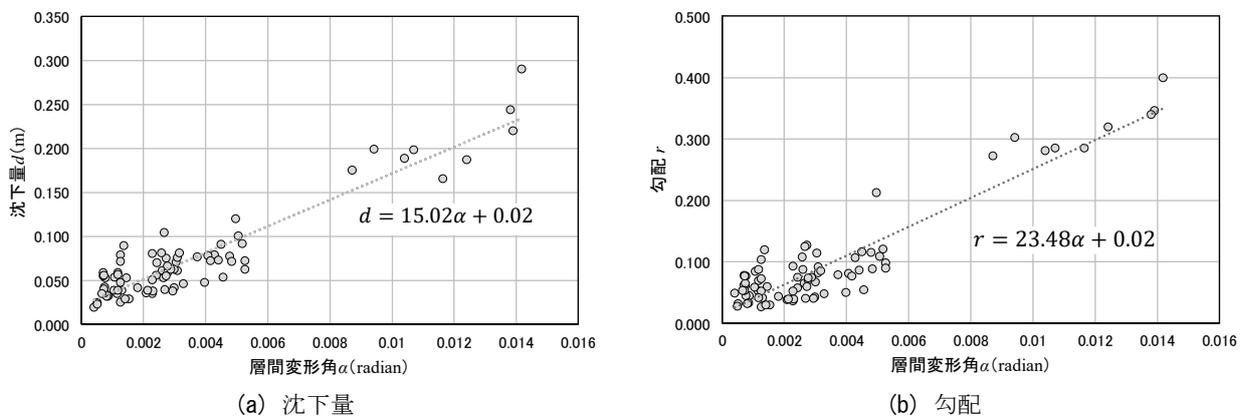


図-9 層間変形角と盛土地盤の地表面における沈下量および勾配との相関関係

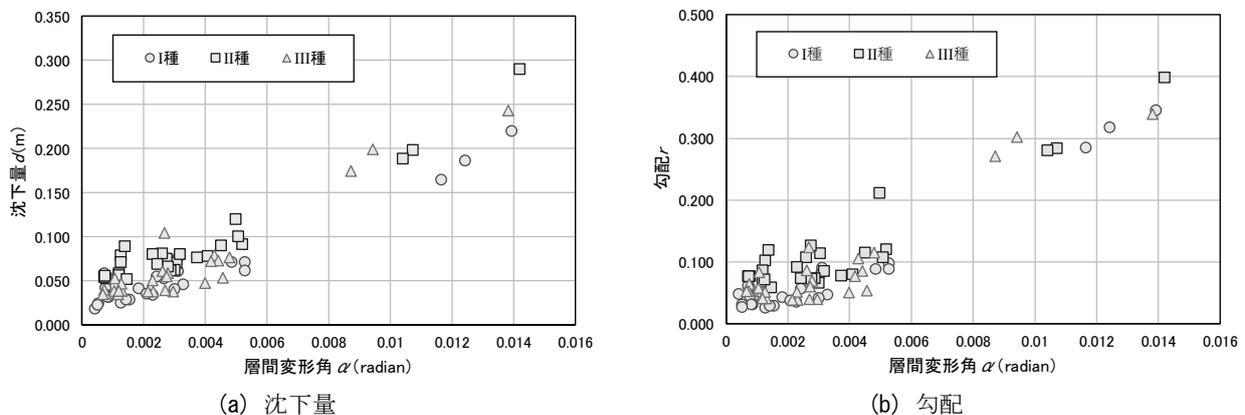


図-10 入力地震動により分類した層間変形角と盛土地盤の地表面における沈下量および勾配との相関関係

じるせん断ひずみを求められることを研究成果の中で述べている。また、本研究と同じく道路ボックスカルバートを対象とした筆者ら<sup>3)</sup>の研究でも、ひずみ伝達の関係が現れることを明らかにしている。このような地盤ひずみから躯体に生じるひずみを簡易に求められる手法と、本研究で得た成果の組み合わせを行えば、動的解析を用いることなく盛土地盤に生じる変状を簡易に求めることができると考えられる。

#### 4. まとめ

耐震設計手法が確立されていない道路ボックスカルバートの地震時挙動を明確にするため、筆者らは数多くの動的解析を実施してきた。本研究では、躯体に生じるせん断変形と道路ボックスカルバートを取り囲む盛土地盤に生じる変状との相関関係を明らかにした。本研究で得られた成果について以下にまとめる。

- 1) 躯体に生じるせん断変形の大きさと、躯体を取り囲む盛土地盤の地表面における沈下量および勾配との間には、強い相関関係がある。
- 2) 入力地震動の特性が1)に示す相関関係に影響を与えるがその程度は小さい。
- 3) 地震時の躯体のせん断変形量だけでなく、盛土地盤における地表面沈下量等の盛土地盤における変状を評価できる指標を、簡易な計算手法により求めることができる。

#### 参考文献

- 1) Yatsumoto, H., Mitsuyoshi, Y., Sawamura, Y. and Kimura, M.: Evaluation of seismic behavior of box culvert buried in the ground through centrifuge model tests and a numerical analysis, *Underground Space*, Vol.4, Issue2, pp.147-167, 2019.
- 2) 八ツ元仁, 澤村康生, 木村亮: 道路ボックスカルバートの地震時挙動の検証に関する解析的研究, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, (地震工学論文集第38巻), 2019. (印刷中)
- 3) 八ツ元仁, 澤村康生, 木村亮: ひずみ伝達を用いた道路ボックスカルバートの簡易な耐震設計手法に関する研究, 土木学会論文集C (地圏工学), 2019. (印刷中)
- 4) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007.
- 5) Danno, K. and Kimura, M.: Evaluation of long-term displacements of pile foundation using coupled FEM and centrifuge model test, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.6, pp.941-958, 2009.
- 6) Jin, Y., Bao, X., Kondo, Y. and Zhang, F.: Soil-water coupling analysis of real-scale field test for 9-pile

- foundation subjected to cyclic horizontal loading, *Geotechnical Special Publication, Deep Foundation and Geotechnical In Situ Test*, ASCE, Vol.205, pp.111-118, 2010.
- 7) Cui, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Analytical study on the control of ground subsidence arising from the phenomenon of accompanied settlement using footing reinforcement pile, *Geotechnical Special Publication, Deep and Underground Excavation*, ASCE, pp.307-312, 2010.
- 8) Xia, Z. F., Ye, G. L., Wang, J. H., Ye, B. and Zhang, F.: Numerical analysis on the influence of thickness of liquefiable soil on seismic response of underground structure, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, Vol.15, No.3, pp.279-284, 2010.
- 9) 澤村康生, 石原央之, 岸田潔, 木村亮: 強震応答実験と数値解析に基づく3ヒンジアーチカルバートの耐震設計法に関する考察, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.73, No.1, pp.1-10, 2017.
- 10) 公益社団法人日本道路協会: 道路土工—カルバート工指針 (平成21年度版), 2010.3.
- 11) 一般社団法人全日本建設技術協会: 国土交通省制定 土木構造物標準設計第1巻, 2000.9.
- 12) Nakai, T. and Hinokio, M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.
- 13) 譽田孝弘: 土留め掘削に伴う周辺地盤の変形挙動に関する研究, 名古屋工業大学学位論文, 2009.
- 14) Zhang, F. and Kimura, M.: Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.3, pp.72-92, 2002.
- 15) 公益社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.
- 16) 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.
- 17) Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M.: Evaluation of dynamic behavior of culverts and embankments through centrifuge model tests and a numerical analysis, *Proc. of the 14th International Conference of the International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, pp.743-748, Kyoto, 2014.9.
- 18) 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, 2017.
- 19) 公益社団法人日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2015.8.
- 20) トヨタ自動車(株): PRIUS PHV, [https://toyota.jp/prius-phv/welcab/tilt\\_p\\_kaiten/](https://toyota.jp/prius-phv/welcab/tilt_p_kaiten/), 2019年6月13日閲覧
- 21) Wang, J. N.: Seismic design of tunnels: state-of-the-art approach, Monograph 7, *Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas*, New York, 1993.
- 22) 西岡勉, 運上茂樹: ひずみ伝達特性を用いた地中構造物のせん断変形量の推定, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.273-282, 2002.