

平成28年熊本地震におけるカルバートの被害状況

眞野 基大¹・片根 弘人¹・栗林 健太郎²・坂部 晃子²・藤田 亮一³・佐伯 宗大¹

¹正会員 工修 (株)エイト日本技術開発 東京支社（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）

²正会員 工修 (株)エイト日本技術開発 中国支社（〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町3-1-21）

³正会員 工修 (株)エイト日本技術開発 関西支社（〒532-0034 大阪府大阪市淀川区野中北1-12-39）

1. 背景と目的

平成28年(2016年)4月14, 16日に熊本県熊本地方を震源とするマグニチュード6.5および7.3（ともに震源深さ約10km）の地震が発生し、熊本県で2度にわたり最大震度7が観測¹⁾された。また、熊本県熊本地方から大分県中部にわたり4月30日までの間に震度5強以上の強い揺れが複数回観測されている(以降これらの一連の地震活動を「熊本地震」と称す)。地震観測史上、一連の地震活動の中で最大震度7が2回観測されたのは初めてのことである。

著者らは、熊本地震発生から約2週間が経過した4月28日, 29日に現地入りし、震源からごく近傍に位置し複数回の強い地震を受けたと考えられるカルバートを中心として被害状況を調査した。

道路土工構造物であるカルバートは、これまで一般に地震の影響を考慮した設計は実施されてきておらず、これは既往の地震において致命的な損傷が生じた事例がほぼないためである。こういった長年の経験則から道路土工カルバート工指針²⁾においては、従来型に該当する規模のカルバート(例えば、現場打ちボックスカルバートの場合、内空幅6.5m以下、内空高5.0m以下の比較的小規模なカルバート)であれば、常時荷重に対する設計がされていれば一定の耐震性が担保されていることと見なし、地震時の照査を省略して良いとの設計思想となっている(いわゆる「みなし規定」)。

本稿は、カルバートの現状の設計法の妥当性を確認することを目的に、これまでにない極めて稀な複数回の強い地震を受けた“従来型カルバート”の被害状況を調査しその結果を報告するものである。また、加えてやや特殊な被害形態を示すカルバートに対して目視調査や簡易的な計測を実施し、これらの結果を踏まえて被害メカニズムを推定した。



図-1 調査対象カルバートの位置

2. 調査概要

図-1に調査対象カルバートの位置を示す。図中には、地震後に布田川断層帯周辺で生じた地表面の亀裂位置³⁾を記載しているが、調査はこの断層近傍を通る高速道路盛土(九州自動車道および九州中央自動車道)を横断するカルバートを中心に実施した。高速道路部で18基、一般国道部で1基の合計19基を対象に主に目視による調査を実施した。全19基のうち、18基が現場打ちボックスカルバート、1基がプレキャストアーチカルバートである。現場打ちのボックスカルバートは全て“従来型”に該当する規模で、プレキャストアーチカルバートは、その範囲からやや外れる規模のものである。

表-1 調査対象カルバートの被害の状況

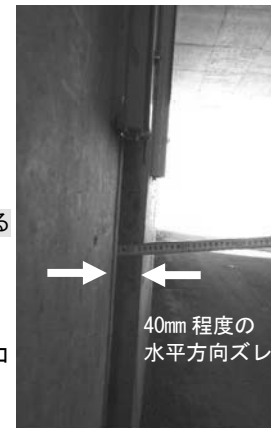
No.	路線名 / カルバート名	種 類	ブロック数	被害の状況
1	九州自動車道 益城 熊本空港 ～嘉島JCT ～御船IC ～緑川PA 宇城氷川 SIC付近	現場打ち ボックス カルバート	2	目地開き(約7cm), 沈下
2			2	目地開き(約3cm), 沈下
3			2	変状なし
4			2	目地開き(約20cm)
5			2	目地開き(約8cm)
6			2	目地開き(約18cm), 沈下
7			2	目地開き(約25cm), 沈下, 目地ズレ(約4cm)
8			2	目地開き(約9cm)
9			4	目地開き(約6～12cm), 沈下
10			3	目地開き(約10cm), 沈下
11			2	目地開き(約6cm), 沈下
12			3	目地開き(約18cm), 沈下
13			2	変状なし
14			2	目地開き(約6cm)
15			2	変状なし
16			2	変状なし
17			2	変状なし
18	九州自動車道 小池高山 IC付近	---	21	側壁部材傾斜, 縦断方向亀裂
19	国道443号 (寺迫交差点付近)	現場打ち ボックス カルバート	1	コンクリート塊落下, 縦断方向亀裂



(a) 目地部全景



(b) 目地開き



(c) 目地ズレ

写真-1 被害の状況(熊本 31)

断方向(水平方向)にも約4cmのズレが生じていた。調査時点では応急対策として、側壁の背面部(盛土側)に鋼矢板が打込まれ、頂版部には内側から鋼板が貼られており、カルバート内部への土砂の流入を防いでいる状況であった。側壁部には変状発生直後の(恐らく)NEXCOによる調査時のコメントが記載されており(頂版：空が見えている)、変状発生直後には開口した目地部から大量の土砂が流入してきたことが想像される。ただし、写真に示すように著者らが調査した時点では土砂は全て撤去されている状況であった。

写真-2に九州自動車道(熊本33)の被害状況を示す。本カルバートは、今回調査したカルバートの中で最も延長が長いところである。躯体ブロック数が4つあり、目地が3箇所設けられており、いずれの目地部でも開きが生じていた。両坑口側でそれぞれ120mm, 80mm, 中央部で60mmの開き量であった。両坑口側の目地からは大量の土砂が流入している状態であり、カルバート内の通行は規制されていた。写真-3(a)には本カルバートの坑口部の路面の様子を示すが、舗装に亀裂が生じ躯体側が沈下している状況がわかる。また、写真-3(b)に”御船8”の坑口部の様子を示すが、これも同様に躯体側が沈み込むような変状を示している。

3. カルバートの被害状況

(1) 被害状況の概要

表-1に調査対象カルバートの被害状況を整理した。表に示すように、調査したカルバートの被害形態は、ほぼ躯体目地の開きであり、最大で目地1箇所当たり約25cmの開き量が確認された。これと合わせて、多くのカルバートで躯体が沈下している状況も確認された。また、躯体コンクリートに亀裂や剥落が認められたのは2基のみであり、その損傷程度は上部道路で通行止めを伴うような重度なものではなく、断層の直近に位置していたにも関わらず、軽微な被害に止まっている状況であった。

以降には、これらのカルバートの代表的な被害状況について述べる。

(2) 代表的な被害

a) 現場打ちボックスカルバートの被害

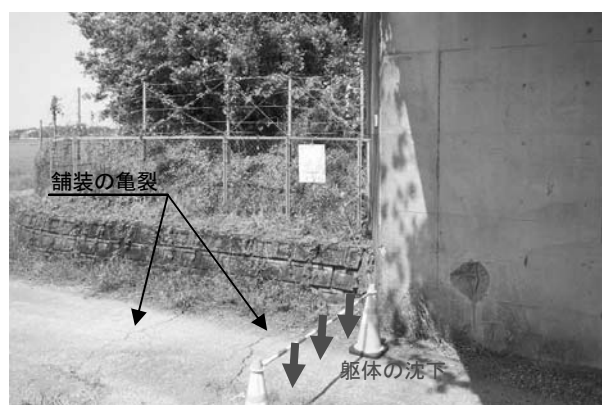
写真-1に九州自動車道(熊本31)における被害状況を示す。本カルバートが今回調査した中で最も目地開き量が大きかったところである。本カルバートでは、目地部で約25cmの開きが生じるとともに、横



写真-2 被害の状況(熊本 33)



(a) 熊本 33



(b) 御船 8

写真-3 躯体の沈下状況

写真-4に国道443号線沿い(益城町寺迫交差点付近)に位置するカルバートの被害状況を示す。写真(a)に示すように、西側坑口部ではカルバートの脇にあるブロック積みの擁壁が完全に崩壊していた。恐らくこの擁壁の崩壊に伴い躯体に大きな側圧が作用し、カルバート躯体が大きく損傷したものと推測される。また、側壁の隅角部(同写真の点線枠部分)でカルバート縦断方向の亀裂が躯体全長にわたり確認された(表面が塗膜で覆われていたことから、開口幅は測定できなかった)。東側坑口部においても西側と同様にブロック積み擁壁が崩壊し坑口部が損傷していたことを考えると、この縦断方向亀裂は、ブロック



(a) 西側坑口部の被害



(b) 東側坑口部

写真-4 被害の状況(益城町寺迫交差点付近)

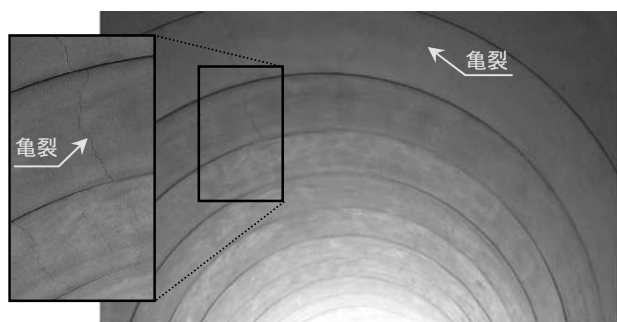
積擁壁の崩壊に伴って増加した側圧の影響により、カルバートが南から北方向へせん断変形するようなモードとなり発生した可能性が指摘される。ただし、躯体の損傷度としては、坑口部付近が特に重度であるのみで、写真(b)に示すように、カルバート上部の車の通行は特に規制されている状況ではなかった。

b) プレキャストアーチカルバートの被害

写真-5に九州中央自動車道の小池高山IC付近にあるプレキャストアーチカルバートの被害の状況を示す。本カルバートは、内空幅3900mm、内空高4800mm、部材厚280mm(現地計測結果)の断面を有する二分割式プレキャストアーチカルバートである。写真(b)はカルバート内部のアーチ部材の損傷状況(亀裂の発生状況)を示している。写真に示すように、アーチ部材においてクラウン部(アーチ頂部)からやや外れた位置(45度程度開いた位置)に縦断方向亀裂



(a) 西側坑口の状況



(b) アーチ部の縦断方向亀裂

写真-5 被害の状況(小池高山 IC 付近)

が発生していた。この亀裂は坑口側ではなく、カルバートの内部側で生じていた。亀裂幅は測定できていないが、3m程度離れた位置から目視で十分に確認できる幅を有しており、比較的开口幅が大きい亀裂である。一方、側壁部材はアーチ部材と異なり、躯体自体は健全な状態であった。ただし、側壁の鉛直方向に対する傾斜角を測定すると、地山側に倒れ込むような変形をしていることが判明した。

4. カルバートの被害メカニズムの推定

調査した多くの現場打ちボックスカルバートでは、目地がカルバート縦断方向に開口するとともに、躯体自体が沈下する変状が見られた。また、プレキャストアーチカルバートについては、アーチ部材に多数の縦断方向亀裂が発生するとともに、側壁部材が傾斜するように変形していた。以降では、これらの特徴的な被害がどのようなメカニズムで生じたのか考察を加えた。

(1) 現場打ちカルバートの被害メカニズムの推定

現地調査結果を踏まえると、沈下被害が生じているカルバートは、図-2 に示す変形状態にあると推測される。例えば地震時に盛土のり面がすべり破壊的な挙動を示しカルバートに変状が生じた場合、目地開きは生じるものの、坑口部の躯体は図とは逆の縦断勾配になる可能性が高いと考えられる。加えて、

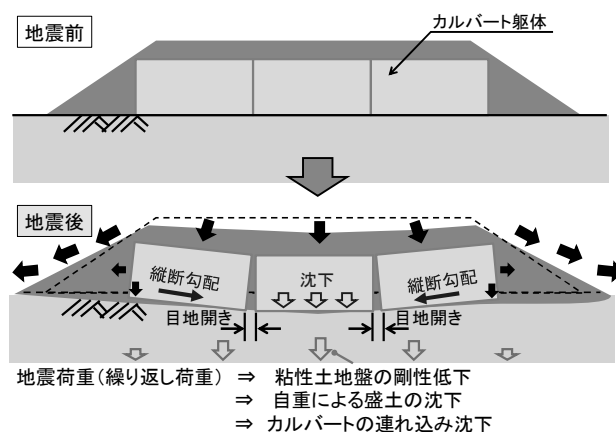


図-2 カルバート縦断方向の変状イメージ

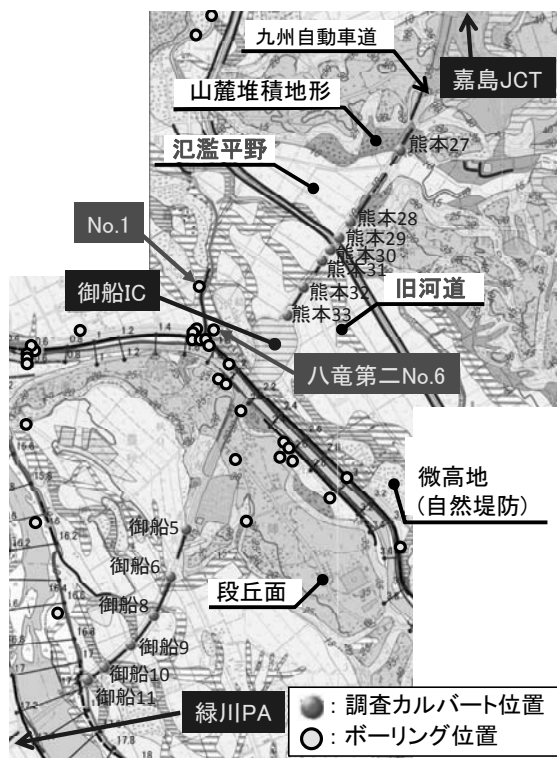
調査したカルバート上の盛土では特に崩壊している状況は確認されていないため、カルバートのこのような沈下変形は、上部盛土のすべり挙動に伴うようなものではないと考えられる。

この躯体の変形状態は、盛土自重による基礎地盤の変形に伴う沈下変形状態に酷似しており、盛土材というよりはむしろ、基礎地盤の方に変状に至った素因が存在すると考えられる。

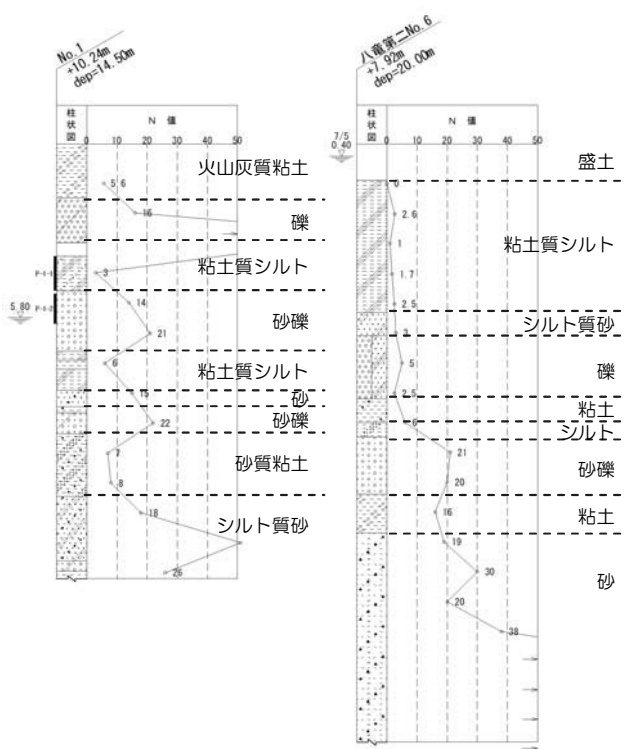
そこで、図-3 ではこれらのカルバート周辺の地盤状況を整理した。図(a)に嘉島 JCT～緑川 PA 付近の治水地形分類図³⁾を示すが、この区間のカルバートは概ね氾濫平野や旧河道部上に位置することがわかる。図(b)には、御船 IC 付近の旧河道部上のボーリング柱状図⁴⁾を示すが、ここでは粘性土層と砂礫層の互層の地盤構造となっていることが確認できる。恐らくこの一帯の地盤は概ねこのような構造であると推測され、カルバート直下の基礎地盤も同様な状態であると考えられる。基礎地盤の土性は基本的には液状化するようなものではなく、現地調査でもこの一帯では液状化の痕跡が確認されなかったことから考えると、基礎地盤の液状化が変状の要因ではないといえる。

一方、國生ら⁵⁾⁶⁾は沼山津地区(嘉島 JCT から北西に約 1.5km にある地区)で採取された非常に鋭敏比の高い(100 前後)火山灰粘性土に対して力学特性試験を実施している。この結果を参照すると、沼山津地区の粘性土は地震時に繰返しせん断力が作用すると、剛性が徐々に低下し、ある荷重強度を超えるとその変化が顕著となる特性が確認されている。

九州自動車道で沈下したカルバートの基礎地盤が同様の特性を有する粘性土で構成されていると仮定すると、熊本地震の強震動の繰返し作用により地盤の剛性が極度に低下した可能性が考えられる。つまり、カルバートの沈下は、基礎地盤において地震時に「繰返し軟化」が生じ、盛土自重により地盤が沈下したことに伴い発生したものと推定される。



(a) 治水地形分類図



(b) ボーリング柱状図

図-3 カルバート(九州自動車道)周辺の治水地形分類図およびボーリング位置

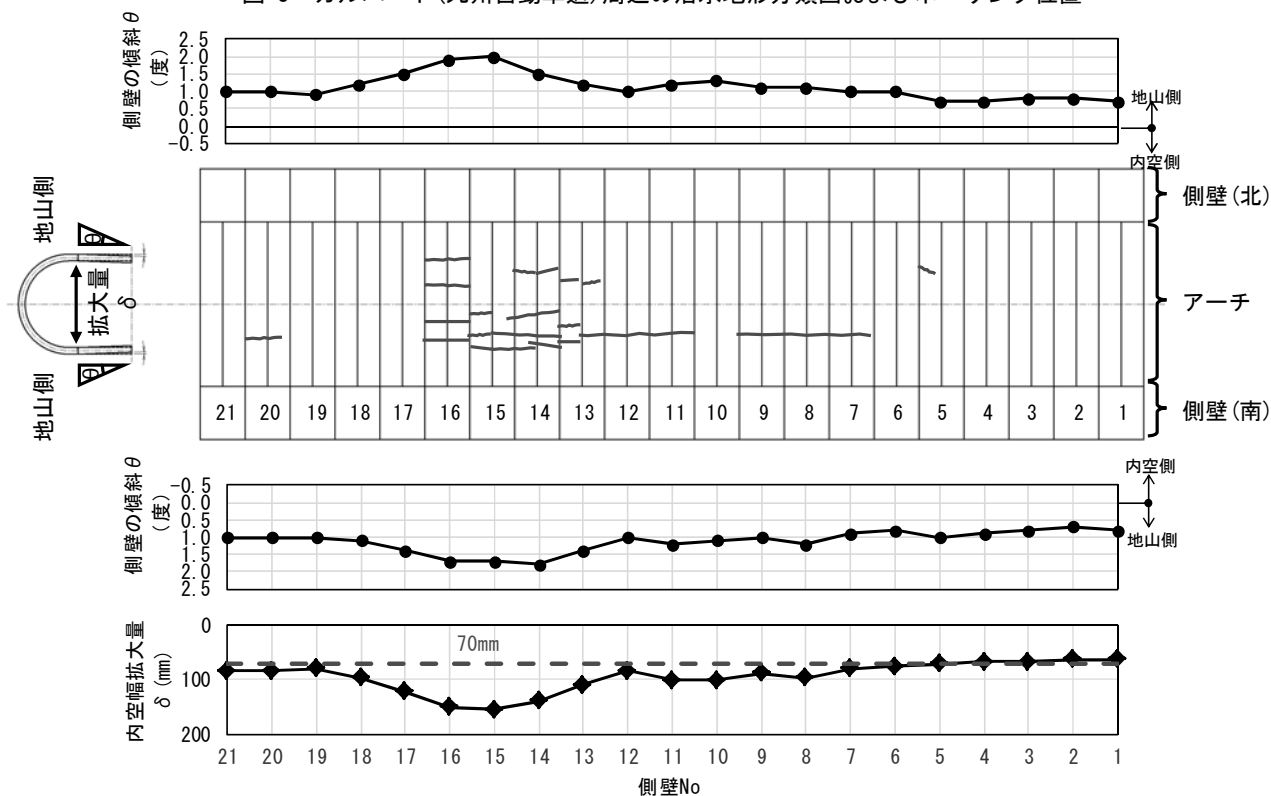


図-4 プレキャストアーチカルバートの被害の状況(小池高山 IC 付近)

(2) プレキャストアーチカルバートの被害メカニズムの推定

先に述べた小池高山 IC 付近にあるプレキャストアーチカルバートについて、アーチ部材に発生した

亀裂をスケッチするとともに、側壁部材の傾斜角を計測し、これらを図-4 に示すように整理した。同図より、アーチ部材の亀裂はカルバート内部側となる側壁 No.7~16 区間で発生している。側壁の傾斜角は No.14~17 区間で特に大きく、最大で 2° 程度

地山側に傾斜している状態であった。同図には、側壁高 h と側壁の傾斜角 θ から側壁上端部位置での内空幅の拡大率 δ を計算している($\delta=h\times\tan\theta$)。内空幅の拡大率は側壁下端部がカルバート内空方向へ変位していないと仮定して算出したものであり、これによると最大で約 150mm 拡大したことになる。内空幅の拡大率に着目すると、内空幅が 70mm 程度拡大した範囲でアーチ部材に亀裂が生じはじめ、特に 100mm を超えた範囲での亀裂の発生は顕著であるように見受けられる。つまり、アーチ部材に発生した亀裂と側壁の傾斜(側壁上端部位置の開き量)には強い相関関係が認められる。

写真-6 に本カルバートの上部盛土の状況を示す。カルバート前後区間の盛土が沈下しており、カルバート直上の路面で段差(不陸)が生じている。この盛土の沈下は、地震時の揺すり込み沈下であると考えられるが、盛土厚の薄いカルバート直上と盛土厚の厚い前後区間とで沈下量に差が生じ、カルバート直上の路面で段差が生じたものと推測される。沈下量に相対差があると、カルバート直上の盛土に鉛直下向きの荷重(鉛直土圧)が加わることとなり、この地震時の鉛直土圧の増加が誘因となり、カルバート側壁が地山側へと倒れ込んだ可能性が高いと考える。

図-5に本カルバートの推定曲げモーメント分布を示す。土被りがある程度大きい場合を考えると、地震時の鉛直土圧の増加によりクラウン部(アーチ頂部)で内側引張状態が卓越する。一方、土被りが小さい場合、クラウン部からやや外れた位置で内側引張状態が卓越する。本カルバートの亀裂の発生状況(発生位置)からすると初期荷重状態(常時荷重状態)としては後者であったと推測される。

したがって、本アーチカルバートの被害は、鉛直土圧の増加によりアーチ部材下端部が股開きのような状態になり生じたものと推定される。

5. 結論

以下に本稿の結論をまとめる。

- [1] 熊本地震において強震帯に位置していた複数のカルバートを調査したが、構造物として致命的な損傷を受けたものはなかった。
- [2] 今回調査したカルバートのほとんどが従来型カルバートに該当する規模であったが、複数回の強震動を受けたにも関わらずほぼ被害はなく、カルバート工指針における”みなし規定”を実証する一例となった。
- [3] 九州自動車道で確認されたボックスカルバートの沈下被害は、粘性土主体の基礎地盤が「繰返



写真-6 カルバート上部盛土の状況

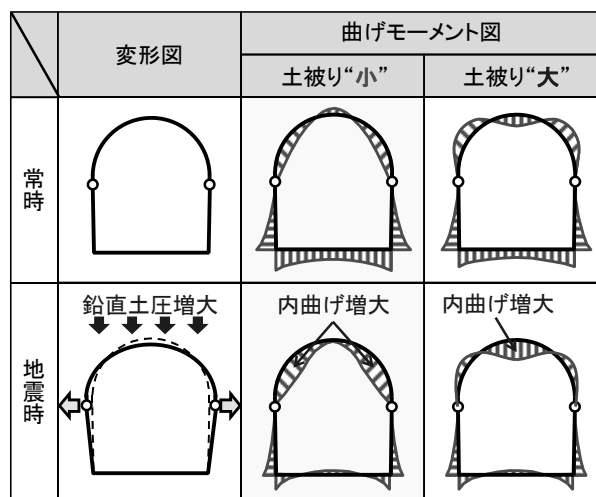


図-5 推定曲げモーメント分布

し軟化」することで生じたと推定された。

- [4] プレキャストアーチカルバートの被害は、地震時に盛土の揺すり込み沈下に伴い躯体に作用する鉛直土圧が増加し、これによりアーチ部材が股開きの状態に至り発生したものと推定された。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会HP
<http://www.jishin.go.jp/> (2016年6月閲覧)
- 2) (社)日本道路協会：道路土工 カルバート工指針,2010.3
- 3) 国土地理院HP <http://www.gsi.go.jp/>(2016年6月閲覧)
- 4) (一社)全国地質調査業協会連合会：平成28年(2016年)熊本地震復興支援ボーリング柱状図緊急公開サイト,
<http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/index.html>(2016年6月閲覧)
- 5) 國生,大川,大島,加藤,中島：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性(その1),第38回地盤工学研究発表会(秋田),2003.7
- 6) 國生,大川,大島,加藤,中島：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性(その2),第38回地盤工学研究発表会(秋田),2003.7