

盛土の耐震性に与える浸透水の影響 に関する実験的研究

松丸 貴樹* 小島 謙一*
館山 勝* 渡辺 健治**

Experimental Study on Influence of Seepage Water on Seismic Resistance of Embankment

Takaki MATSUMARU Kenichi KOJIMA
Masaru TATEYAMA Kenji WATANABE

During the mid Nigata prefecture earthquake in 2004, a lot of railway and road embankments collapsed in mountain regions. It seems that the main reason of these damages was the increase of the degree of water saturation and the water level in embankments caused by the typhoon just before this earthquake. In this paper, the shaking table tests of the embankment affected by seepage water were performed aimed at evaluating the influence of seepage water on seismic resistance. Furthermore, the simulation analysis making use of effective stress analysis was conducted in order to evaluate the applicability of estimation of the response acceleration and the deformation in embankment.

キーワード：盛土，浸透水，模型振動実験，有効応力解析

1. はじめに

2004年新潟県中越地震では、山岳部の鉄道や道路などの盛土に多くの被害が発生した(図1)。この地震においては、直前の台風23号による降雨の影響によって盛土内の飽和度が上昇し強度が低下した状態で地震を受けたことにより、盛土に大きな被害が生じたことが指摘されている。著者ら¹⁾はJR上越線の被災盛土を対象とした解析を行い、盛土の耐震性に及ぼす直前の降雨浸透の影響が大きいことを明らかにした。その後、2007年能登半島地震や2007年新潟県中越沖地震においても同様の被害が発生しており、降雨浸透や背面地山からの浸透水を受ける盛土の耐震性評価、ならびに対策工の検討が重要視されるようになってきている。

これまでに、一井²⁾は、模型振動実験により降雨浸透を受けた盛土は耐震性が低下することを明らかにしている。また、Matsuoら³⁾は、背面地山から水の浸透を受ける盛土について一連の遠心力場での模型振動実験を行い、水位線の位置や盛土の密度と変形量の関係、対策工の効果などを示している。さらに、大川ら⁴⁾は、浸透水を受ける盛土への円弧すべり法やNewmark法など設計に用いられる計算手法の適用性について検討している。しかしながら、盛土の破壊メカニズムについてまで言及

した研究事例はほとんどない。

そこで本研究においては、背面地山から水の浸透を受ける盛土の地震時挙動を解明するために、1G場での模型振動実験を行いその破壊メカニズムについて検討した。また、有限要素法に基づく有効応力解析により、模型振動実験の再現解析を行い、本解析手法の適用性についても検討した。



図1 2004年新潟県中越地震における鉄道盛土の被災事例(JR上越線220k300m)

2. 模型振動実験

2.1 実験の概要

模型盛土の概略図を図2に示す。盛土の高さは60cmであり、勾配は1:1.5とした。盛土の作製には稲城砂(土粒

* 構造物技術研究部(基礎・土構造)

** 総務部

特集：構造物の耐震技術

子の比重 $G_s=2.723$, 50% 粒径 $D_{50}=0.134\text{mm}$, 均等係数 $U_c=9.29$, 細粒分含有率 $F_c=23.6\%$, 締固め試験による最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.517\text{g/cm}^3$ を用い, 乾燥密度が $\rho_d=1.108\text{g/cm}^3$, 含水比 $w=13\%$ 程度となるよう高さ 5cm ごとに締固めを行った。この密度での稲城砂の飽和透水係数は, 室内透水試験 (変水位法) により $4.8 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ である。盛土の密度は, 最大乾燥密度と比較するとかなり小さめであるが, 盛土の浸透性を優先させたことと, 模型の相似率から粘着力を過度に高く設定しない配慮からである。

一方, 支持地盤については同じ稲城砂を用いるが, 沈下や液状化の発生が生じないように締固め密度比 $D=90\%$ ($\rho_d=1.365\text{g/cm}^3$) とし, 十分に締固めを行って作成した。

計測用には, 盛土内に加速度計・間隙水圧計・土壌水分計を設置した。盛土の変形については天端やのり面に変位計を設置する他, 後に示す盛土の変形写真のように盛土内部に標点を設置し, 土槽正面から高速度カメラによる撮影も行っている。また, 3ヶ所の位置においてマンメータを設け, 盛土内の水位を計測した。

実験は, 土槽右端に浸透槽を設け, 盛土下端からの高さが 20cm となるように水位を保持し, 盛土のり先の間隙水圧計やマンメータの水位が上昇を始めた段階で加振を行った。加振には, 1995年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された波形のNS成分を, 卓越周波数が 5Hz となるように時間軸を調整した波を用いた。その際, 最大加速度振幅を $200, 400, \dots$ と 200gal ずつ上昇させて段階加振を行い, 盛土が破壊に至るまで実験を行った。入力波形の時刻歴の例を図3に示す。

2.2 実験結果および考察

加振直前における飽和度の分布と, マンメータの値を基に想定される水位線の位置を図4に示す。なお, 飽和度については, 土壌水分計の体積含水率の値を用いて算定している。水位線は, 土槽右端から盛土のり先に向かってなだらかに形成されているものと考えられるが, 水位線位置より上方においても飽和度が 100% に達している領域が広範囲に及んでいる。なお, 盛土作成時の含水比 13% は飽和度で約 24% に相当することから, いずれの土壌水分計設置位置においても飽和度が上昇していることがわかる。これは, 不飽和土におけるサクシオンによって, 下面の水分が上昇したことによるためである。

振動実験では, 200gal および 400gal 加振時には盛土の変形はほとんど生じなかったが, 600gal 加振時において変形が生じ始め, 800gal 加振時には大きな変形が生じたため, この加振加速度で実験を終了している。 800gal 加振後の変形状況の写真を図5に示す。加振に伴い, 盛土

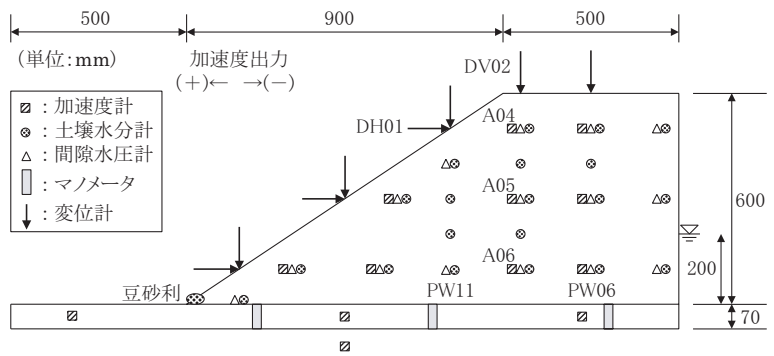


図2 模型盛土の概略と計測器配置

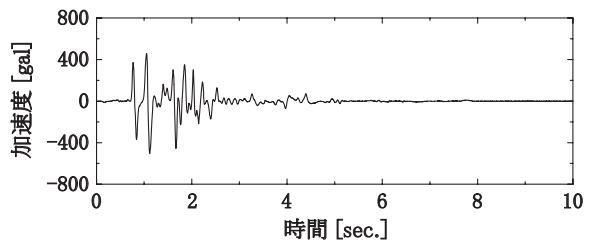


図3 入力波形

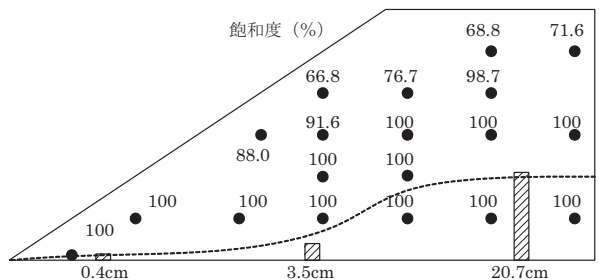


図4 加振直前の飽和度分布と想定水位線位置

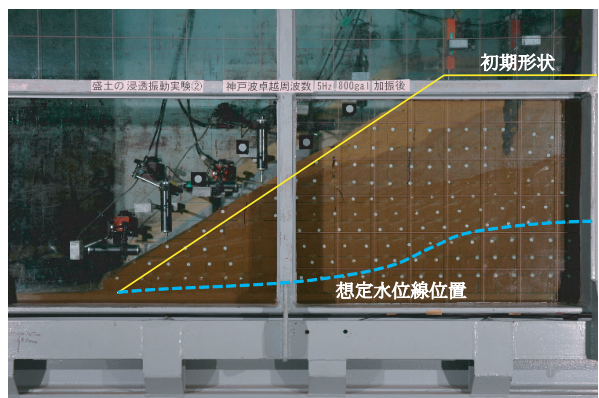


図5 盛土の変形状況 (800gal 加振時)

天端は沈下し水平左方向へ変位が生じ, 盛土のり肩やのり面においては多数のクラックが生じている。また, 盛土内の標点の移動から, 水位線位置を中心に比較的大きなひずみが生じているものと想定される。

400gal および 600gal 加振時において, 盛土のり肩の加速度計 A04 およびその下部の A06 (図2 参照) の加速度応答を図6に示す。なお, ここでは図2に示すように, 十側をのり面方向, 一側を壁面方向とした。 400gal 加振時においてはわずかではあるが, 加速度計の設置位置が高

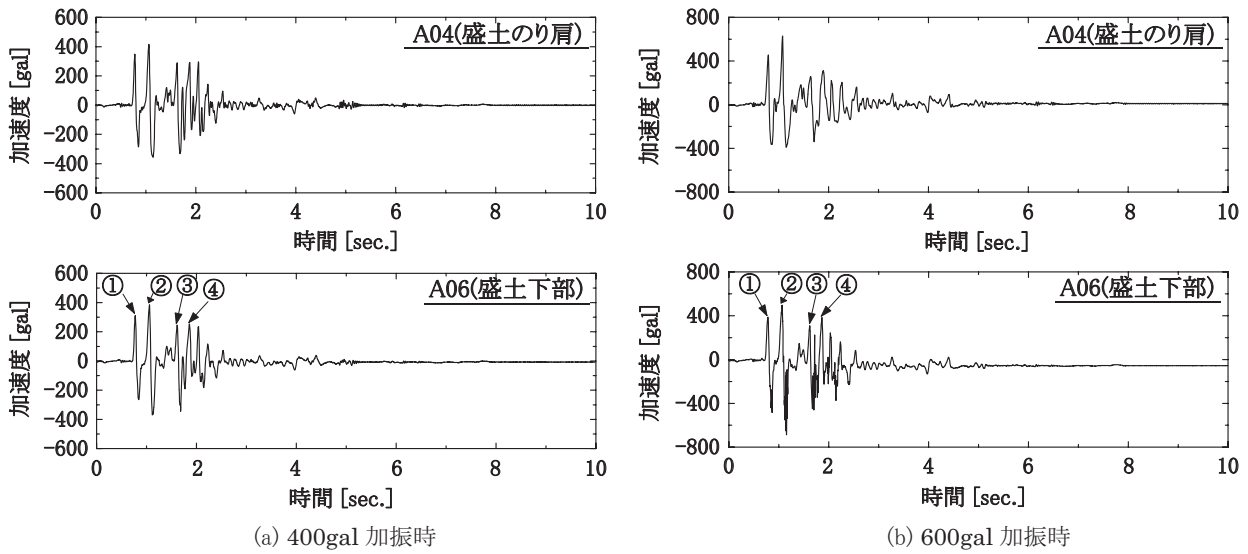


図6 加速度計における加速度応答

いA04の方が低い位置A06に比べて大きな加速度応答となっており、のり肩付近の加速度が増幅している。一方、600gal加振の場合は、1秒付近の最大加速度が入力される時点においては400gal加振時と同様に盛土のり肩のA04において加速度の増幅が見られるが、その後の比較的大きな加速度成分が入力される2秒付近においては、盛土下部のA06に比べてのり肩のA04では小さな加速度応答となっており、減衰が生じている。

この現象について詳細に検討するために、図2の加速度計A04～06位置において、(a)各加振ケースでののり面側（+側）の最大加速度入力時、(b)600gal加振時の各時刻、における加速度の応答倍率を図7に示す。なお、加速度の応答倍率は、各加速度計位置での加速度を入力加速度で除すことによって求めており、(b)については以下の①～④の時点（図6参照）の応答倍率を示している。この標記は以降でも用いることとし、(a)は②の時点に相当する。

- ①：のり面側（+側）に最初に大きな加速度が入力された時点
- ②：のり面側に最大の加速度が入力された時点
- ③、④：のり面側に比較的大きな加速度が入力された時点

図7(a)の各ケースののり面側最大加速度入力時の応答倍率に着目すると、盛土に変形の生じなかった200galおよび400gal加振時については、盛土内において両ケースでほぼ同等の加速度の増幅が見られる。盛土に変形が生じた600gal加振時にはさらに大きく増幅している。図7(b)の600gal加振時における応答倍率を見ると、図中②における増幅は①と比べて大きく、また③や④の時点では盛土内で減衰が生じている。

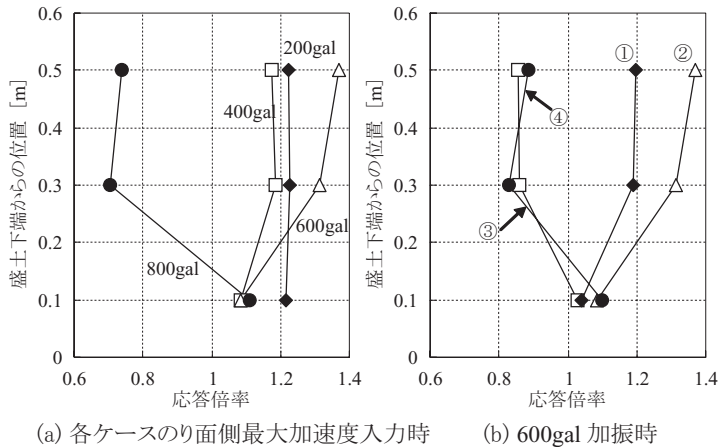


図7 加速度の応答倍率

400gal加振時および600gal加振時における盛土内の過剰間隙水圧、600gal加振時の盛土のり肩の変位時刻歴を図8に示す。過剰間隙水圧については図2に示す盛土下部のPW06およびのり面下部のPW11、変位についてはのり肩のDV02の鉛直変位とDH01の水平変位の結果を示した。また、図中には、前述の600gal加振時における盛土下部の加速度計A06での加速度応答についても示している。各加速度による加振のインターバルは3分間として加振後の過剰間隙水圧の消散を考慮の上実験を行ったが、完全には消散しきらず、400gal加振以降では次の加振段階前に過剰間隙水圧が残った状態であった。また、200gal加振時においては、盛土内のいずれの間隙水圧計においても過剰間隙水圧は発生していない。図8の過剰間隙水圧の時刻歴を見ると、400galおよび600gal加振時いずれの場合も、のり面側（+側）に最大加速度が入力される時点②において過剰間隙水圧が上昇を始めていることから、大きな入力加速度成分によって過剰間隙水圧が上昇しているものと考えられる。しかしながら、過剰間隙水圧の上昇量は入力加速度によって異なってお

特集：構造物の耐震技術

り、600gal加振時には盛土下部のPW06で4kPa、のり面下部のPW11で2kPa程度であるのに対して、400gal加振時にはPW06で2kPa、PW11で1kPa程度であり、いずれも600gal加振時の2分の1程度ある。600gal加振時には盛土に変形が生じるとともに、図7に示したように加速度応答が増幅から減衰に転じているが、減衰が生じている③・④（図6参照）の時点では盛土下部のPW06においてかなり水圧が上昇していることから、この減衰は過剰間隙水圧の上昇量に応じて生じるものと考えられる。なお、実験における盛土内の初期応力状態を把握することは難しいため、発生した過剰間隙水圧が初期鉛直有効応力と等しくなったかどうか判断することは難しい。しかし、この後の800gal加振時においても600gal加振時とほぼ同様の過剰間隙水圧が発生し、それ以降頭打ちとなっていることから、いずれの間隙水圧計位置においても600gal加振時には液状化に達しているものと思われる。

変位は鉛直・水平方向共に最初に大きな加速度が入力された①の時点で生じ始めているが、その程度は小さく、変位が急増するのは最大加速度が入力される②の時点である。この時点での盛土のり肩における加速度応答は、600gal加振時の①の時点や400gal加振時以前と同じ②の時点よりも大きく（図7参照）、また400gal加振以前では盛土に変形が生じていないことから、盛土に変形が生じた要因は図7(b)に示した②の時点での大きな加速度の増幅によるものと考えられる。

3. 有効応力解析による再現解析

実験において盛土の応答に変化が見られた600gal加振時を対象に、有効応力解析による再現解析を実施し、その適用性について検討した。

3.1 解析条件

解析はOkaら⁵⁾の砂の繰返し弾塑性モデルを組込んだ2次元の土～水連成有効応力解析コードLIQCA2D04⁶⁾を用いた。解析に用いた稲城砂のパラメータを表1に示す。これらのパラメータは、模型盛土とほぼ同密度を有する稲城砂の繰返し非排水三軸試験結果を満足するように定めた。初期間隙比から破壊応力比までのパラメータについては、各種物理試験および三軸圧縮試験の結果を元に定めた。ただし、圧密試験については実施していないことから、圧縮指数・膨潤指数については一般的な値を用いることとした。また、変相応力比は変相角を一般的な値である28度として求めた。硬化パラメータ以降のパラメータについては、繰返し非排水三軸試験の結果を再現できるように試行錯誤で定めた。これらのパラメータを用いた液状化強度曲線と、繰返し応力比 $R=0.156$ の時の繰返し非排水三軸圧縮試験のシミュレーション結果を

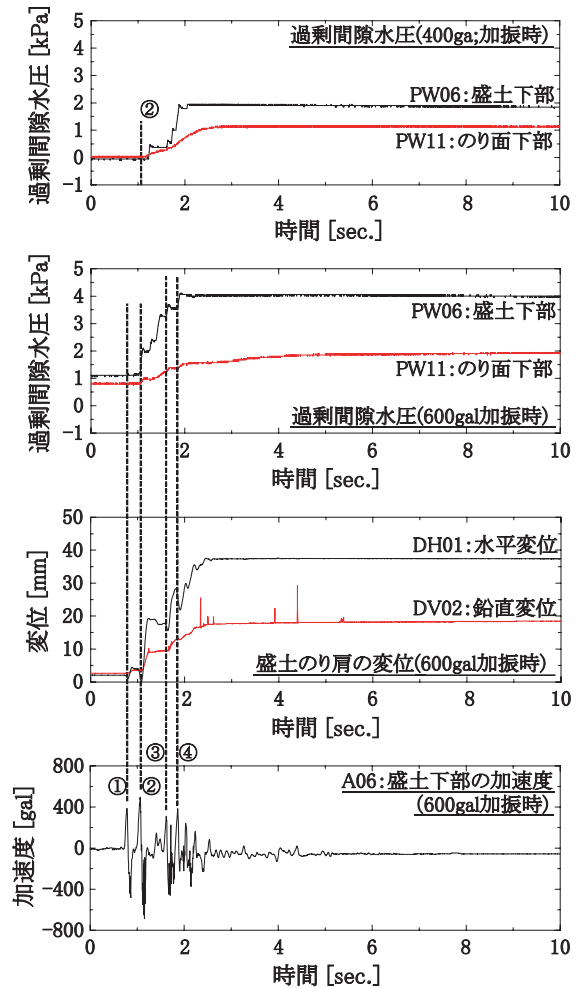


図8 過剰間隙水圧・変位の時刻歴

表1 稲城砂の解析パラメータ

初期間隙比	e_0	1.46
湿潤密度	ρ_s (t/m ³)	1.7
圧縮指数	λ	0.025
膨潤指数	κ	0.0025
透水係数	k (m/s)	4.8×10^{-5}
初期せん断係数比	G_0 / σ'_{m0}	1251
変相応力比	M_n	0.91
破壊応力比	M_f	1.29
硬化パラメータ	B_0	8000
硬化パラメータ	B_1	80
硬化パラメータ	C_f	0.0
ダイレイタンス係数	D_0	3.0
ダイレイタンス係数	n	2.0
塑性基準ひずみ	γ_{ref}^p	0.0005
弾性基準ひずみ	γ_{ref}^E	0.005

図9に示す。これらの図から、本パラメータにより繰返し非排水三軸試験の結果を概ね再現できることがわかる。解析に用いた有限要素モデルを図10に示す。変位境界条件として下端は全節点固定、右端については水平方向

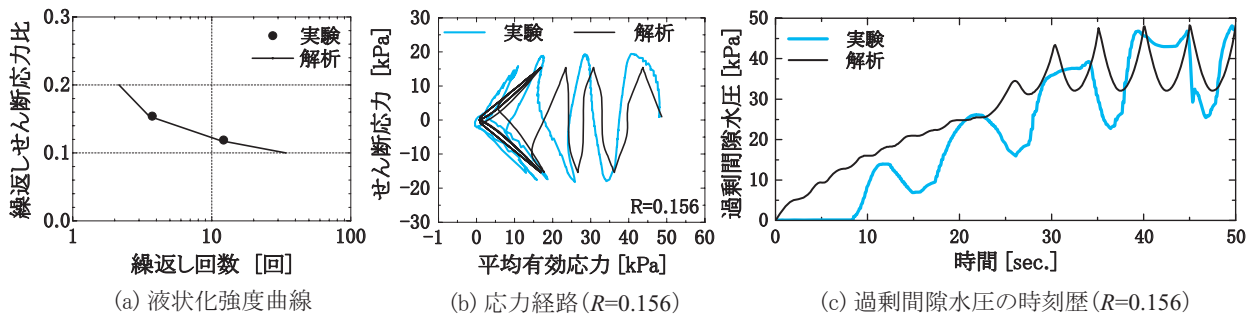


図9 要素シミュレーションの結果

のみ固定，鉛直ローラとしている。水位線の位置は，図5に示した実験における飽和度と想定水位線の分布を基に，要素分割の簡便性を考えて図10に示すように四角形要素の端辺を水位線位置とし，排水境界を設定した。それ以外の境界部については非排水境界としている。なお，水位線より上方の不飽和土の部分においては，同じ砂の繰返し弾塑性モデルを用いるが過剰間隙水圧の発生は考慮しない全応力モデルとした。支持地盤についてはダイレイタンス係数を0，基準ひずみを十分大きな値とし，有効応力が大幅に低下しないものとした。解析では高周波振動に対する減衰を確保するため，初期剛性比例型のRayleigh減衰を導入しその値を0.002とした。計算時間は10秒とし，計算時間増分は0.001秒とした。

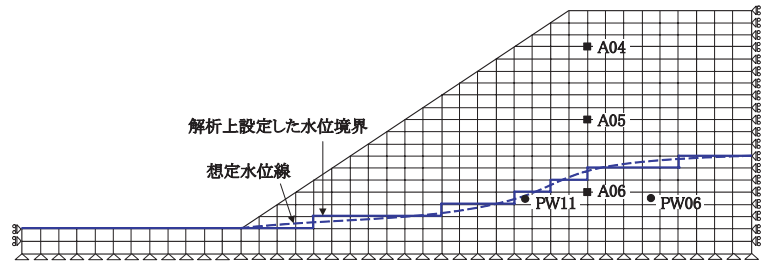
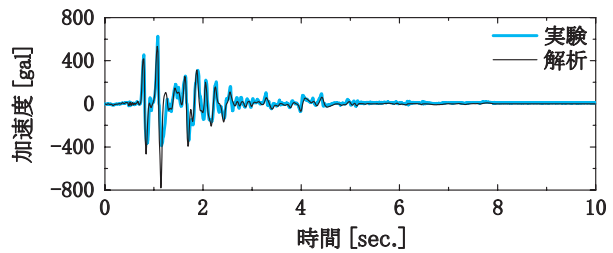


図10 解析に用いた有限要素モデル

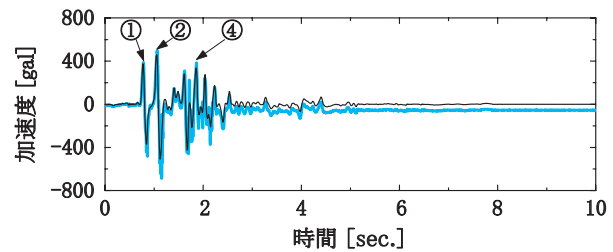
3.2 解析結果および考察

盛土のり肩の加速度計A04（図2参照）および盛土下部のA06における加速度の時刻歴を図11に示す。時刻歴の比較においては，いずれの加速度計の位置においても，解析は実験の加速度応答を概ね再現できている。なお，実験の加速度計A06において加振終了後も加速度がゼロになっていないが，これは加振中に加速度計が傾いたことによるものと考えられる。また，加速度計A04～06において，のり面側（+側）に最大加速度が入力される②の時点および2秒付近の比較的大きな加速度が入力される④の時点（図11参照）における加速度の応答倍率を図12に示す。②の時点では盛土内で増幅が見られ，④の時点では減衰しており，この傾向についても解析は実験と一致している。しかしながら，最大加速度が入力される時点②の増幅については，解析では実験ほど顕著なものとはなっていない。

盛土下部のPW06（図2参照）における過剰間隙水圧の時刻歴を図13に示す。実験では②の時点で過剰間隙水圧が上昇を始めるが，解析では最初に大きな加速度が入力される時点①ですでに一旦上昇を開始すること，また②以降において水圧の上昇度合いが実験に比べて著しくなっている。要素シミュレーションの結果を見ると，図



(a) A04(盛土のり肩)



(b) A06(盛土下部)

図11 加速度応答の比較

9(b)に示す有効応力の低下については，解析では室内試験を概ね再現できているが，図9(c)に示す過剰間隙水圧の上昇については実験よりも速くなっている。本解析で用いた稲城砂のパラメータでは，実験に比べて過剰間隙水圧が上昇しやすい

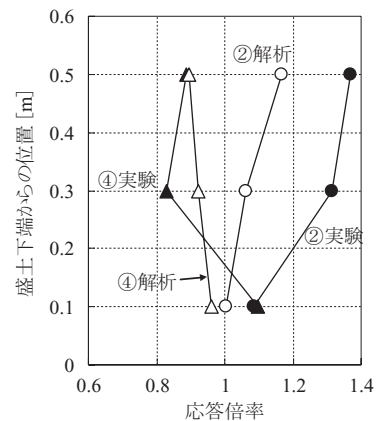


図12 加速度の応答倍率

特集：構造物の耐震技術

したものと考えられる。また、図12に示した加速度応答倍率では、②の時点（図11参照）において解析では実験ほど応答倍率に増幅が見られなかったが、これは過剰間隙水圧の上昇量が実験に比べて解析では著しいことによるものと思われる。また、発生する過剰間隙水圧の量については、解析では実験よりも1kPa程度大きな値を示している。図13には初期応力解析で求めた初期鉛直有効応力も示しているが、解析では加振中に過剰間隙水圧が初期鉛直有効応力とほぼ同等となっており液状化に至っている。実験においても液状化に至ったことが想定され、この点については解析は実験と整合しているが、盛土内の初期応力の評価については更に検討が必要になると思われる。

盛土のり肩における変位計DV02（図2参照）の鉛直変位およびDH01の水平変位の時刻歴を図14に示す。水平・鉛直変位いずれについても変位の発生する時刻については、解析は実験と概ね整合している。しかし、実験では変位が止まる約2秒以降においても解析では変位が増加し続けている。また、比較的大きな加速度成分が入力される約2秒以前においては、鉛直変位は実験と解析であまり差がないのに対して、水平変位について実験に比べ解析ではかなり小さな変位量となっている。実験においては図5に示すように盛土の天端やのり面で引張クラックが多数発生していることや、のり先が滑動変位していることが見られたが、有限要素解析ではこれらの現象については考慮することができないため、解析における水平変位は実験に比べて小さくなったものと考えられる。

4. おわりに

土中に浸透した水が盛土の耐震性に及ぼす影響について検討するため、盛土の背面から水位を与えた状態で模型振動実験を実施するとともに、有効応力解析による再現解析を行った。その結果以下のことがわかった。

- (1) 模型振動実験では、加振と共に盛土内で加速度応答に増幅が見られ、入力加速度の大きさにより増幅が著しくなった段階で盛土に変形が生じることがわかった。また、この時点において過剰間隙水圧が上昇を始め、以降の加速度応答に減衰が生じることが確認された。
- (2) 有効応力解析により、盛土内での加速度の増幅や過剰間隙水圧の上昇に伴う減衰については定性的に再現できた。ただし、発生する過剰間隙水圧や水平変位については十分に再現するには至らなかった。

今後は同様の模型振動実験により対策工の検討や、地山背面からではなく降雨散水を受けた盛土の地震時挙動の検討を進める予定である。また、本実験で得られた知見を元に、Newmark法などの比較的簡易な計算手法を用

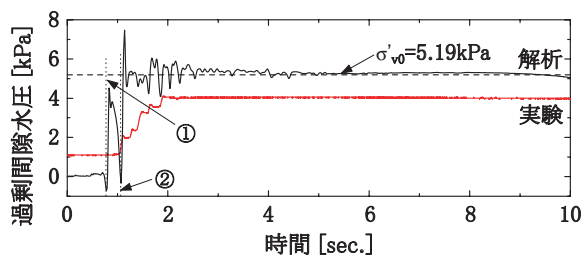
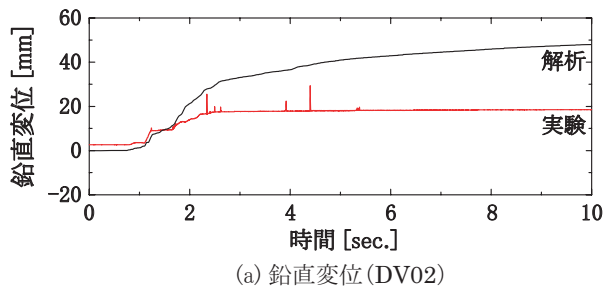
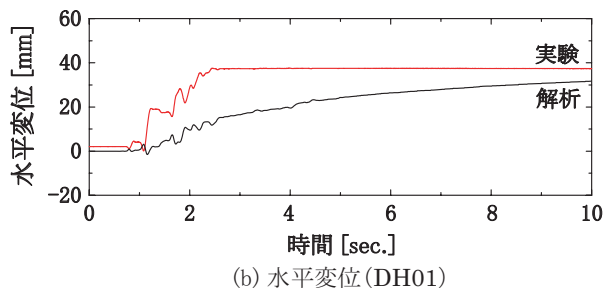


図13 PW06（盛土下部）における過剰間隙水圧時刻歴



(a) 鉛直変位 (DV02)



(b) 水平変位 (DH01)

図14 盛土のり肩の変位時刻歴

いた残留変位算定についても検討を進める予定である。

文献

- 1) 館山勝, 松丸貴樹, 篠田昌弘, 小島謙一, 堀井克己: 新潟県中越地震での降雨の影響を考慮した被災盛土の検証解析, 鉄道総研報告, Vol.22, No.1, pp.41-46, 2008
- 2) 一井康二: 降雨による盛土の耐震性低下に関する実験的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, pp.1-8, 2005
- 3) Matsuo, O., Saito, Y., Sasaki, T., Kondoh, K. and Sato, T.: Earthquake-induced flow slides of fills and infinite slopes, Soils and Foundations, Vol.42, No.1, pp.89-104, 2002
- 4) 大川寛, 杉田秀樹, 佐々木哲也, 水橋正典: 山岳盛土の耐震性能照査手法に関する検討, 土構造物の地震時における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集, pp.257-260, 2007
- 5) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus. Geotechnique, pp.95-100, 1997
- 6) 液状化解析手法 LIQCA 開発研究グループ: LIQCA2D04 (2004年公開版) 資料, 2004