

山岳盛土の地震時変形挙動に関する遠心力载荷模型実験

加藤俊二・佐々木哲也

1. はじめに

山岳地の谷状地形上の高盛土（以下「山岳盛土」という。）で、地震時の被害が大規模になりやすく、地震後の道路交通機能の確保に支障となることが多い。

土木研究所では、安全・安心な道路盛土の構築に向け、山岳盛土の合理的な耐震性診断手法及び耐震補強技術の検討を実施しているところである。

盛土の耐震性能は、盛土内の水位条件や盛土材料の条件に影響されるところが大きく、近年は発生土の有効利用に伴い盛土材料が多様化してきているとともに、過去の地震では細粒分が多く高い含水状態の山岳盛土で被害が多くみられている¹⁾。このため、効率的かつ効果的な山岳盛土の耐震性向上に向け、耐震性に及ぼす盛土材料の影響等を明らかにすることが求められている。

盛土の締固め度を高めると耐震性は向上するが、細粒分含有率の高い材料（粘性土）では締固め度ではなく、浸水に対する締固めた土の恒久性を確保する観点から一般に空気間隙率および飽和度による管理を行っており²⁾、それらの管理基準により達成される耐震性は必ずしも明確になっていない。また、細粒分含有率だけでなく塑性指数などの盛土材料の物性による変形挙動の違いも未解明である。本報は、このような背景から盛土材料の物性、含水状態、締固め程度の違いなどが盛土の動的変形挙動に及ぼす影響を把握するための遠心力载荷模型実験を行った結果を紹介するものである。

2. 山岳盛土の動的遠心力载荷模型実験

2.1 実験模型および加振実験の概要

模型実験は50Gの遠心場で行い、盛土高さ15m相当の山岳盛土を想定したものである。図-1に実験模型概要を示す。実験模型は、幅150cm、奥行き30cm、高さ50cmの鋼製大型土槽内に段切りし

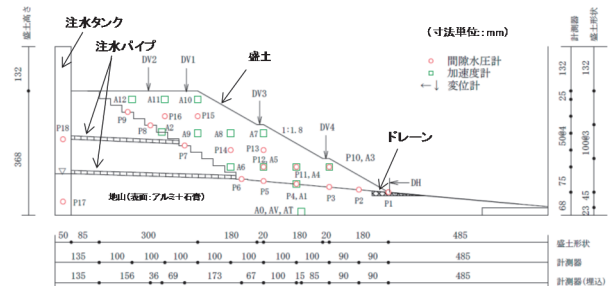


図-1 実験模型概要（側面図）

た地山模型を設置し、その上に計測器を埋設した盛土模型を作製した。

地山模型は、勾配5°の傾斜部（図右側）と上傾斜30°の段切り部（図左側）からなり、地山は石膏で構築し、地山表面はアルミ材で保護し摩擦を確保するため表面にサンドペーパーを貼った。また、盛土内に浸透水（脱気水）を通水するため、実験土槽の段切り部背面側に注水タンクを設け、盛土への注水位置の地山部2か所に注水パイプを等間隔でそれぞれ7本取り付け、水頭差を形成することで盛土内に水を浸透させる構造とした。また、法尻下の地山面には浸透水位（浸潤線）形成時における法尻部の浸透破壊を防止する目的でドレーンを設けた。

盛土模型は、後述のとおり粒度調整した江戸崎砂を用い、層厚25mmピッチで突固め棒により締固めて作製した。また、地盤内の所定位置に間隙水圧計と加速度計を埋設し、加振前後における地盤変形状況を観察するため、珪砂7号を用いて土槽前面ガラス面に水平・鉛直方向のメッシュを作製するとともに、メッシュ格子間と地表面に地盤変形観察用の標点を設置した。

加振実験は、模型に50Gの遠心力を作用させた後、盛土部背後の地山部から浸透水を供給し、法尻付近の水位が盛土高さの1/2程度となるよう水位を上昇させた後、加速度振幅を0.7倍に調整したJMA神戸波により加振を行った。実験中は、盛土の間隙水圧、加速度、変位等を計測するとともに、加振中の状況を高速度カメラで撮影した。

なお、本実験では間隙流体に水（脱気水）を使

表-1 動的遠心力载荷実験 ケース一覧 (その1)

ケース	実験条件					盛土材料の物性											
	盛土材料名	細粒分含有率 (%)	締固め度 Dc (%)	含水率 ω (%)	空気間隙率 v_a (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	礫分含有率 (%)	砂分含有率 (%)	シルト分含有率 (%)	粘土分含有率 (%)	均等係数 U_c	平均粒径 D_{50} (mm)	液性限界 ω_L (%)	塑性限界 ω_P (%)	塑性指数 I_P (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 ω_{opt} (%)
CASE1	FC50	51.3	85	17.3	23.0	2.712	0	48.7	38.0	13.3	—	0.0720	28.5	22.3	6.2	1.664	17.6
CASE2	FC20	20.8		16.2	22.7	2.728	0	79.2	10.9	9.9	45.55	0.1940	NP	NP	—	1.718	16.3
CASE3	FC35	36.5		15.2	25.5	2.713	0	63.5	26.5	10.0	38.8	0.1320	NP	NP	—	1.696	15.0
CASE4	FC50	51.3		23.6	15.0	2.712	0	48.7	38.0	13.3	—	0.0720	28.5	22.3	6.2	1.664	17.6

用しており、透水性の相似則が厳密には合っていないため、実験結果に影響している可能性があることに注意が必要であることを予め断っておく。

また、以下で述べる変形量や時刻歴等については実物および実時間に換算した値である。

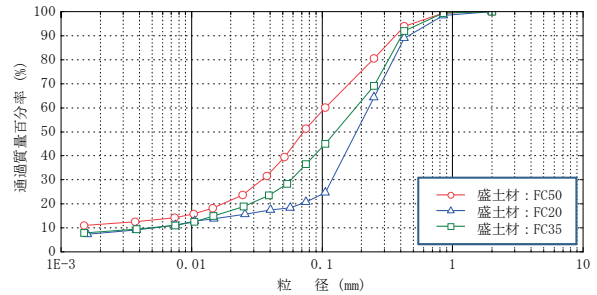
2.2 細粒分含有率の違いに関する模型実験

まず、細粒分含有率の違いが盛土の地震時の変形挙動に及ぼす影響を把握することを目的とした実験を行った。表-1に実験ケース一覧を、図-2に実験に使用した盛土材料の粒径加積曲線と締固め曲線を示す。各ケースで用いた盛土材料は、0.075mmふるいで分級した江戸崎砂に分級時に生成された材料を再混合して作製した細粒分含有率の異なる材料で、以下、それぞれFC20、FC35、FC50と呼ぶ。

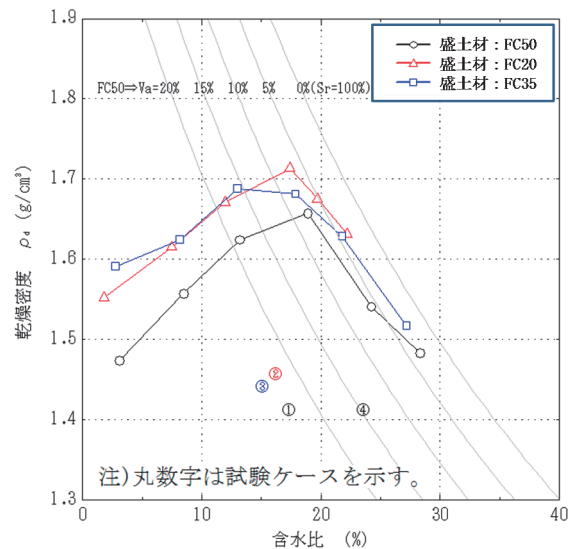
盛土模型は、全ケース締固め度を85%として、CASE1~3については、FC50、FC20、FC35の各材料を最適含水比付近（含水比15~17%）で、CASE4についてはFC50を含水比約24%（空気間隙率 $v_a=15%$ 相当）で作製した。

図-3に細粒分含有率と法肩沈下量の関係を、図-4に加振時の盛土内の間隙水圧の状況について盛土底面中央の間隙水圧計(P4)の例を、写真-1に各ケースの実験後の変形状態を示す。

図-3を見ると細粒分含有率の増加に伴い法肩沈下量も増加している。それぞれのケースの変形状況（写真-1）をみると、まずFC50を用いたCASE1では、盛土全体が変形し、天端付近にすべり線が見られた。一方、同じFC50でも空気間隙率が低いCASE4では、法尻付近で変形は見られたものの、明瞭なすべり線は見られず、盛土表面にクラックが発生した程度であり、細粒分含有率および締固め度が同程度でも、締固め時の含水比（空気間隙率）により変形挙動が異なった。加振時の過剰間隙水圧の変化状況（図-4）を見ると、CASE1は主要動時に急激な過剰間隙水圧の上昇



(a)粒径加積曲線



(b)締固め曲線

図-2 盛土材料の粒径加積曲線および締固め曲線

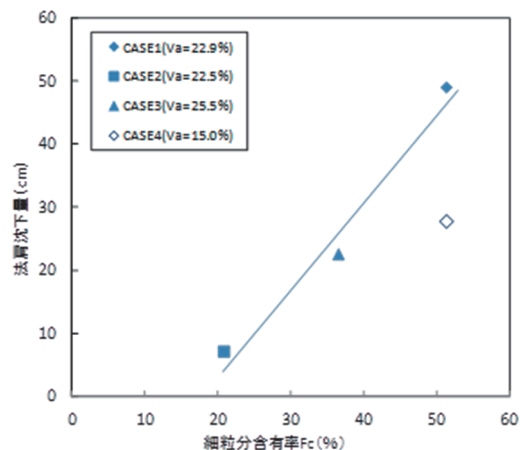


図-3 細粒分含有率と法肩沈下量の関係

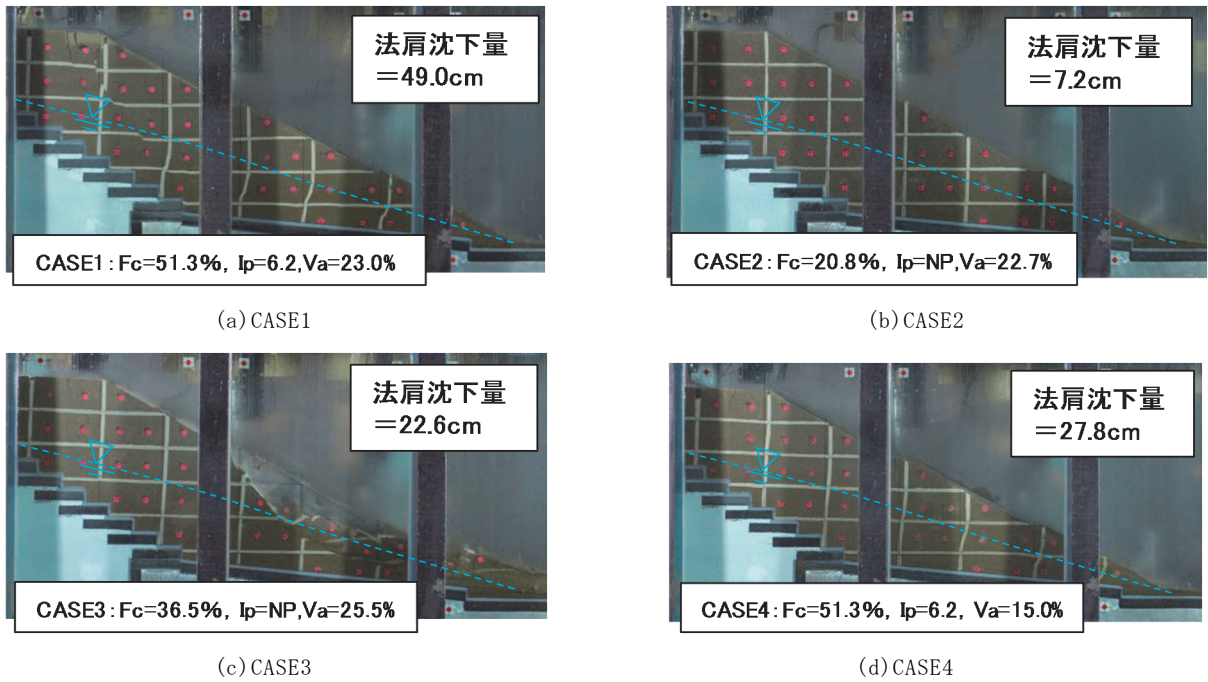


写真-1 実験後の模型の変形状態

がみられるが、CASE4では間隙水圧の上昇が緩やかになっている。空気間隙率を小さくすることで一般に透水性が低下するが、これにより地下水浸透によって飽和度が上昇しにくくなったことが推察される。このことにより、加振時の過剰間隙水圧が上昇しにくくなることでCASE1に対してCASE4では変形が抑制されたことが考えられる。ただし、作成時の含水比を上げる（空気間隙率を小さくする）ことにより、繰り返しせん断強度（液状化強度）が低下することも知られており³⁾、これは盛土の変形を大きくする方向に影響するが、今回の条件では不飽和の影響が大きく変形が抑制された可能性がある。

一方で、細粒分含有率が少なく透水性が高いFC20を用いたCASE2では、加振時の水圧がほとんど上昇せず、目立った変形も見られなかった。このケースでは供給水量も他ケースに比べかなり多く、細粒分が少ないため透水性が高いうえ、間隙水の粘性の相似則の影響もあり間隙水圧が上昇しづらい状況であったものと考えられる。

FC35を用いたCASE3では、加振時の間隙水圧は比較的上昇し天端付近の変形量はCASE1と比較して少ないが、法面中央付近から法尻かけて部分的に表層部に大きな崩壊が生じている。この表層部での崩壊はのり尻付近の局所的な水位等が影

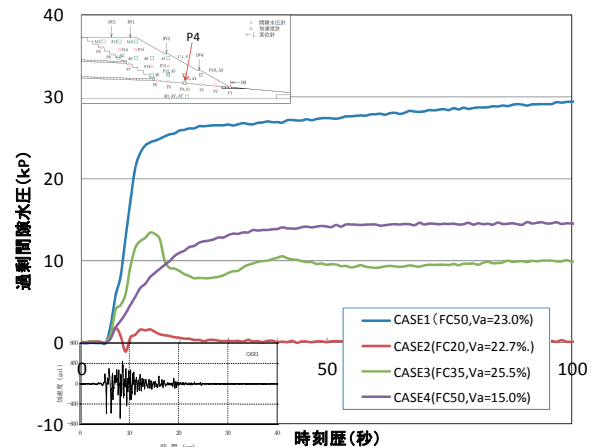


図-4 加振時の盛土内の間隙水圧の変化状況の例
響すると考えられるが、今後さらに分析が必要と
考えている。

このように盛土の変形モードは、盛土内の水位、盛土材料の物性や締め固め方法によって大きく異なることがわかる。ただし、これらの結果については、間隙流体に水（脱気水）を使用しており、透水性の相似則が厳密には合っていないため、特にCASE2のような盛土材料の透水性が高いケースは前述のように実験結果に影響している可能性があることに注意が必要である。

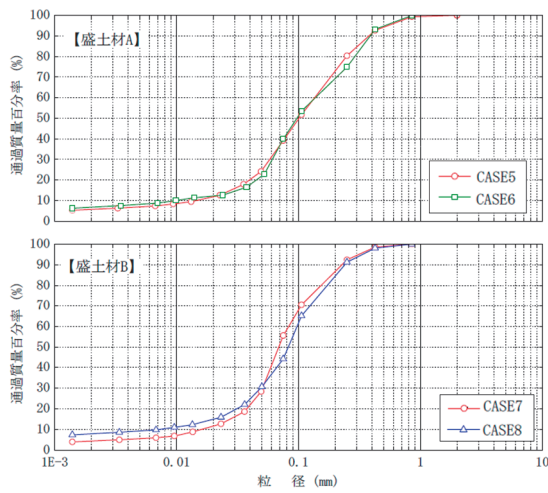
2.3 塑性指数の違いに関する模型実験

2.2の実験を踏まえ、細粒分含有率が大きな場合の塑性指数（以下「 I_p 」という。）の違いによ

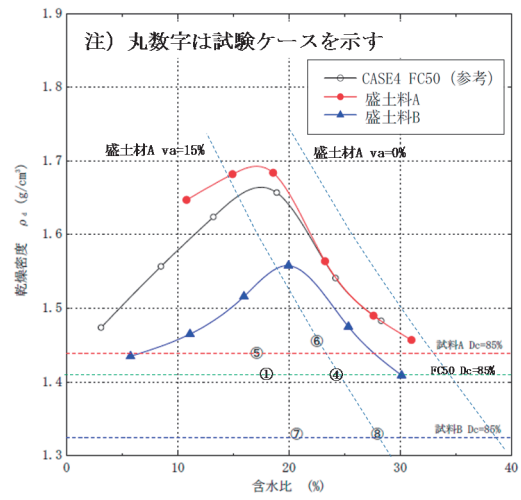
表-2 動的遠心力载荷実験 ケース一覧 (その2)

ケース	実験条件					盛土材料の物性											
	盛土材料名	細粒分含有率 (%)	締固め度 Dc (%)	含水率 ω (%)	空気間隙率 v_a (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	礫分含有率 (%)	砂分含有率 (%)	シルト分含有率 (%)	粘土分含有率 (%)	均等係数 U_c	平均粒径 D_{50} (mm)	液性限界 ω_L (%)	塑性限界 ω_P (%)	塑性指数 I_P (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 ω_{opt} (%)
CASE1	FC50	51.3		17.3	23.0	2.712	0	48.7	38.0	13.3	—	0.0720	28.5	22.3	6.2	1.664	17.6
CASE4	FC50	51.3		23.6	15.0	2.712	0	48.7	38.0	13.3	—	0.0720	28.5	22.3	6.2	1.664	17.6
CASE5	A	39.8	85	17.1	23.3	2.762	0	60.2	32.7	7.1	9.91	0.0990	29.9	19.3	10.5	1.693	17.1
CASE6		41.0		22.5	15.5	2.729	0	58.9	33.8	7.2	10.19	0.0932	31.0	19.4	11.6	1.693	17.1
CASE7	B	56.1		20.7	24.4	2.744	0	43.9	50.6	5.5	4.96	0.0690	35.1	21.0	14.1	1.558	20.0
CASE8	B(A)	43.6	85(78)	27.9	14.8 (15.6)	2.747	0	56.5	34.4	9.2	13.97	0.0863	33.9	20.2	13.7	1.558	20.0

(再掲) CASE1、CASE4



(a) 粒径加積曲線



(b) 締固め曲線

図-5 盛土材料の粒径加積曲線及び締固め曲線

る盛土の地震時の変形挙動を把握することを目的とした実験を行った。表-2に実験ケース一覧を、図-5に実験に使用した地盤材料の粒径加積曲線と締固め曲線を示す。CASE1、CASE4は2.2で示したケースの再掲である。

各ケースで用いた盛土材料は、2.2の実験におけるFC50の I_p が6.2%であったことから、江戸崎砂を0.105mm、0.075mmふるいで分級し生成した3つの試料を再混合して、細粒分含有率50%付近で I_p が10%および15%程度となる2種類の材料を追加で作製した。以下、これらを盛土材A、盛土材Bと呼ぶ。

盛土模型は、CASE5、CASE6については盛土材Aを、CASE7、CASE8については盛土材Bを用いた。いずれのケースも締固め度85%とし、CASE5およびCASE7は最適含水比付近（それぞれ17.1%、20.7%）、CASE6およびCASE8は空気間隙率 $v_a=15\%$ 相当となる含水比（それぞれ22.5%、27.9%）で作製した。これらは、比較とするCASE1およびCASE4と同様の条件である。

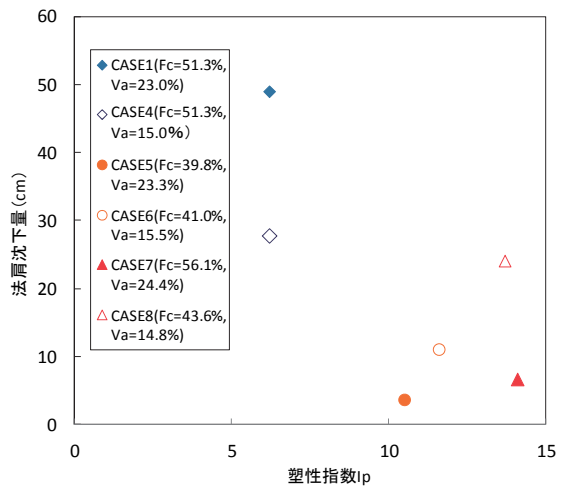


図-6 塑性指数と法肩沈下量の関係

図-6に I_p と法肩沈下量の関係を、図-7に加振時の盛土内間隙水圧の状況の例を、写真-2に各ケースの実験後の変形状態を示す。また、図-8に全ケースの加振時の過剰間隙水圧の最大値と法肩沈下量の関係を示す。

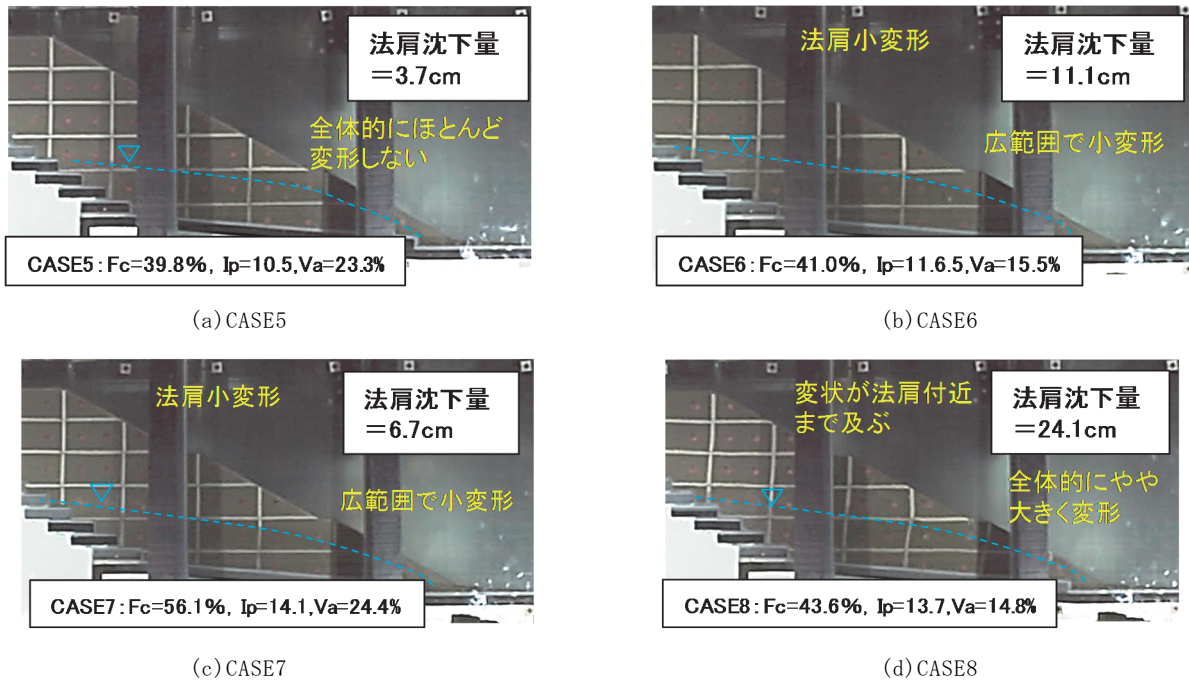


写真-2 実験後の模型の変形状態

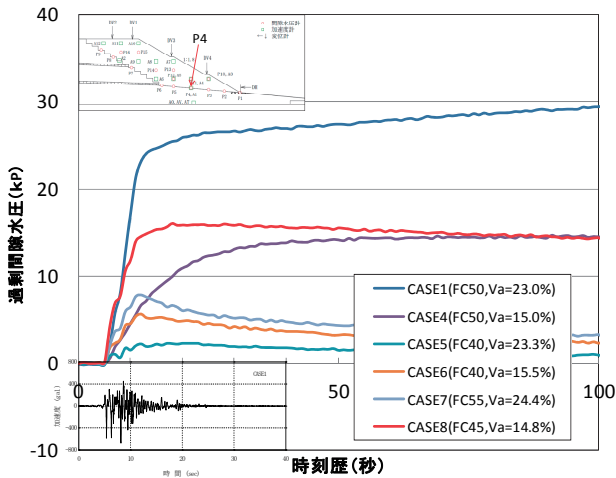


図-7 加振時の盛土内の間隙水圧の変化状況の例

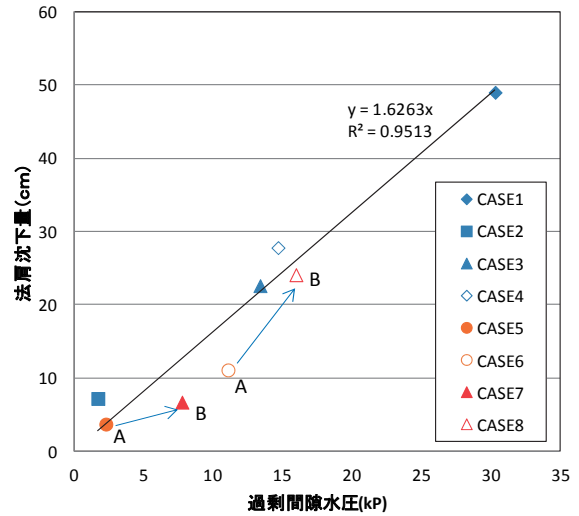


図-8 加振時の最大間隙水圧と法肩沈下量の関係

図-6を見ると、 I_p の小さいFC50 (CASE1、CASE4)と I_p の比較的大きい盛土材A (CASE5、CASE6)および盛土材B (CASE7)とを比較すると、 I_p の増加により変形量が小さくなる傾向がみられる。加振時の過剰間隙水圧の変化状況 (図-7)を見ても、 I_p の高いケース (CASE5~7)で過剰間隙水圧の増加が小さくなっており、変形量と同様の傾向を示している。

一方で、盛土材Aと盛土材Bとを比較すると (図-6、図-8)、変形量の値は全体的に小さいものの、 I_p が大きくなると変形量および過剰間隙水圧

も若干ではあるが増加しており、締固め時含水比と細粒分含有率について強度に最適な条件があるものと推察される。

ここで、CASE8については、CASE5~7と比べて変形量も大きくかつ過剰間隙水圧の上昇も大きかった。CASE8はCASE7との比較実験であったが、盛土材Bについてはバラツキが大きく、細粒分含有率を考慮するとCASE8の試料は盛土材Aに近いものであったと推察される。仮に盛土材Aの締固め曲線で管理した場合の締固め度、空気間隙率の条件は、表-2中のCASE8で示すカッコ内

の数字 ($D_c=78\%$ 、 $V_a=15.6\%$) となり、締固め不足の影響を受けて若干変形量が大きくなった可能性がある。

2.4 まとめ

2.2および2.3の実験結果についてまとめると、以下のとおりである。

- (1) 細粒分含有率の増加に伴い変形量（法肩沈下量）が増加する傾向がある。ただし、今回の実験では間隙水に水を使用しているため、変形状況に影響している可能性があることに留意が必要である。
- (2) I_p が大きくなると変形量が小さくなる傾向が見られる。
- (3) 空気間隙率管理を行うことである程度の変形量を抑制することができる。ただし、比較的 I_p が高い場合にはもともとの変形量が小さく、大きな違いがない場合もある。
- (4) 変形量は地震時の間隙水圧の上昇が影響する傾向がある。

今回の実験は、良質な砂質土を粒度調整した細粒分含有率の高い材料で I_p が15程度までの比較的小さな範囲の結果であるが、細粒分含有率の高い材料でも締固め管理と空気間隙率管理を行うことである程度の耐震性が確保できる可能性を確認することができた。一方で、材料物性や含水状態の変化で変形量が大きく異なり、施工時の管理方法の重要性も再確認できた。

3. おわりに

盛土の変形モードは盛土材料の物性や締固め方法などによって大きく異なる。このため、今後も引き続き様々な盛土材料を用いた模型実験および強度特性・変形特性を把握するための室内強度試験を実施して、地震時の変形挙動に関するデータの蓄積を進め、盛土の耐震性診断や対策方法、耐震性を考慮した締固め管理基準の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 例えば、国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所・独立行政法人建築研究所：平成19年（2007年）能登半島地震被害調査報告書、国総研資料第438号、土研資料第4087号、建築研究資料第111号、pp.102～157、2008.2
- 2) （社）日本道路協会：「道路土工—盛土工指針」、pp.211～222、2010.4
- 3) 佐々木亨、富澤彰仁、東拓生、石原雅規、佐々木哲也：細粒分の多い土の締固め条件と繰返し非排水強度比の関係に関する検討、土木学会第73回年次学術講演会、2018.9

加藤俊二



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
Shunji KATO

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
Tetsuya SASAKI