

降雨による盛土の耐震性低下に関する 実験的研究

一井康二¹

¹港湾空港技術研究所地盤・構造部 主任研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: ichii@pari.go.jp

盛土の耐震性については、排水構等の整備状況によるが、降雨の浸透等により盛土の地盤物性が変化することを考慮する必要がある。そこで、水中振動台上に模型盛土を作成し、人工降雨を与えた後に加振実験を行い、降雨による耐震性低下について検討を行った。また、降雨による地盤物性の变化を、簡易貫入試験により評価することを試みた。実験により、降雨によって盛土の耐震性が低下することは確認された。ただし、それが地盤の強度低下によるものか、あるいは重量増加による慣性力の増加によるものか、判断は難しい。また、降雨量のレベルや排水条件にもよるが、実験の範囲では、地盤物性の变化を簡易貫入試験で評価することは困難であった。

Key Words : *Shake table test, Embankment, Rainfall, Handy dynamic cone penetrometer test, Seismic resistance*

1. はじめに

平成16年新潟県中越地震における盛土被害の例が示す様に、地震時の盛土の被災は交通網の分断を招き、救助活動が難航するなど大きな問題を引き起こすことが多い。一般に、地震時の盛土被害は、沢部や谷部などの集水地形に建設された盛土のほか、排水性の悪い材料による盛土に被害が集中する傾向にあり、排水構等の整備（および維持管理）状況によって耐震性が左右されると考えられる。つまり、排水条件によっては、降雨の浸透などにより盛土の地盤物性が変化し、その結果として耐震性が低下する可能性がある。

ところが、一般の盛土の設計では、設計条件で与えられた地盤条件での検討を行うのみであり、降雨等により地盤物性が変化することについては考慮されていない。例えば、地震後の盛土被災の解析事例においても、地震前の降雨・降雪による物性等の変化は考慮されていないことが多い。例えば、1)

そこで、本研究では降雨による盛土の耐震性低下の有無を実験的に検証した。また、実際に降雨により耐震性が低下するという結果が得られたことを受けて、これらの物性等の変化を簡易的な貫入試験で検知できるかどうか、追加実験を実施して実験的な検討を行った。

2. 降雨に伴う耐震性低下の検証実験

(1) 実験概要

耐震性の検証については、振動実験を実施することが一般的である。なお、耐震設計法の一つとしての震度法の検討であれば、振動実験ではなく傾斜実験を行う例が見られるが、その方法では実際の地震時の挙動について把握できないため、本研究では実際の振動実験を実施した。

地盤構造物の振動実験は、スケール効果を考えて遠心場で行われることが一般的である。しかし、遠心場で降雨後の状態の盛土を再現することは困難であると考え、港湾空港技術研究所の水中振動台を用いて1G場の振動実験として実施した。ただし、水中振動台といっても水没状態での実験ではなく、振動装置に悪影響を及ぼすことなく降雨を実施するために水中で加振可能な装置を転用したという趣旨である。盛土の断面を図-1に示す。盛土高さは1.2 mであるが、施工上の都合から、そのうちの0.8 mについては土層の底面を嵩上げすることで対処している。この点については、盛土というよりは自然斜面に近い。

盛土材料としてはまさ土を使用し、天端部分（6層）、斜面部分（6層）および法尻部分に分け、事前にそれぞれの体積を計算し、投入土の重量を調整

することで締め固めの程度を管理した。天端部分と斜面部分からまさ土を投入し、各層を締め固め、最後に法尻部分を作成した。盛土材料の単位体積重量は 16.17 kN/m^3 (1.65 tf/m^3)、含水比は約9%（飽和度では約32%）である。

計測は、地震動の増幅が考えられる天端部分には5G計、斜面と法尻部分には2G計の加速度計を配置した。また、盛土の変形については、法肩部分に水平及び鉛直方向にレーザー変位計を配置したほか、正面と側面にターゲットを配置した。降雨による物性の変化を計測するため、テンシオメータを配置して降雨時のサクシオンをモニタリングしている。

降雨の有無による耐震性能を比較検討するため、同一形状の盛土を2体同時に作成し、片方のみに降雨を与えた後、同時加振を実施した。盛土作成風景を写真-1に示すが、写真奥側の盛土に写真-2に示す降雨装置により降雨を与えている。なお、盛土材料の間隙比は0.75であるが、透水係数については試験を実施していないため把握していない。

（2）降雨による状態の変化

降雨実験時のサクシオンの値の変化を図-2に示す。法尻部分（T-12）では1000秒過ぎから急激にサクシオンが変化している。その後、斜面下部（T-8）で、1500秒過ぎから徐々に変化が始まり、2500秒付近で急激に変化した後に、3000秒後から値が一定となって飽和している。また、他の部分ではサクシオンの値に変化は見られなかった。なお、降雨強度は、雨滴が斜面に悪影響を及ぼさない程度に調節している。具体的には、 95mm/h 程度の降雨強度であるが、降雨装置の関係により断続的に計20分間の降雨（15分間の降雨、12分間の中断、3分間の降雨、4分間の中断、2分間の降雨の順序）となった。また、盛土内からの排水量については、計測を試みたもののデータの精度に問題があり、正確には把握できていない。

振動実験後の含水比分布をサンプリングにより調べた結果を図-3に示す。括弧内の数字がサンプリングの結果であり、限られた数の結果であるが、コンター図を強引に描いたものである。降雨により、天端部と斜面部の表面、および法尻部では15%以上の含水比（飽和度で約53%以上）まで増加している。

（3）振動実験結果

降雨後に3回の加振実験（1, 2回目は1999年台湾集集地震における観測波を時間軸で1/5および1/3にしたもの、3回目は5Hzの正弦波20波）を行った。地震波加振における再現波形の例（1回目加振）を図-4に示す。1Gを越える最大加速度が観測されている波形であるが、振動台の性能の問題により、実際にはピークの値は再現されていない。また、各回の加振は、同一の供試体を用いており、変位が落ち着くのを待ってから加振を実施するステージ加振の形式である。

天端の累積変形量を図-5に示す。2回目の加振で変形が増加していないため、単純に継続時間の増

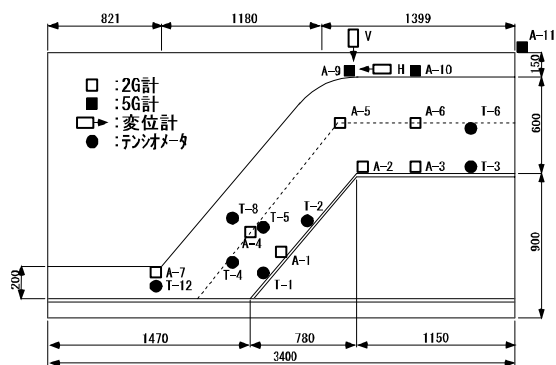


図-1 模型盛土の概要
（降雨に伴う耐震性低下に関する実験）



写真-1 模型盛土全景（製作過程）



写真-2 降雨装置

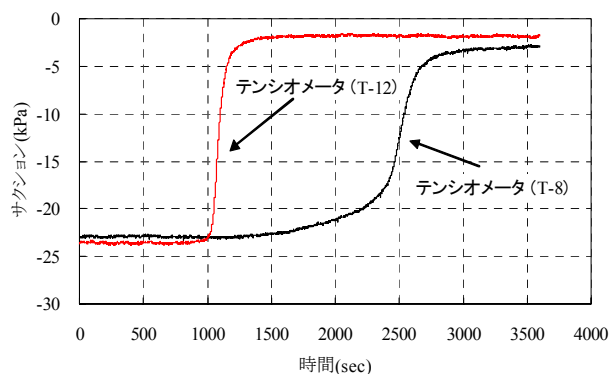


図-2 降雨実験時のサクシオンの変化時刻歴

加により変形が増大するものとは考えにくい。なお、一般には、時間軸の縮尺が小さいほど破壊力は大きいと考えられるため、2回目の加振の方が、1回目の加振より破壊力は大きいものと考えられる。天端の水平・鉛直変位の時刻歴を図-6から図-8に示す。沈下は振動の継続時間に比例して増加する傾向を示すが、水平変位は主要動部の慣性力によって生じている。2回目の加振における残留水平変位量が小さいのに対し、正弦波加振では変位振幅が徐々に大きくなって崩壊していることから、変形について共振の影響が大きいと推測しているが、固有振動数との整合性についてはスイープ加振等を実施していなかったため確認できていない。

加振前後の盛土の天端沈下量を比較すると、降雨有りのケースで最大 55 mm（平均 42 mm）、降雨無しのケースで最大 6 mm（平均 4 mm）であった。降雨の有無により、変形量にしてワンオーダーレベルの耐震性の変動があると判断できる。

変形モードを把握するため、3回の加振終了後の側面マーカー位置を計測した。図-9によると、降雨有りの盛土では天端部分は沈下、法肩部分は水平方向に移動、斜面部分は斜面に沿って沈下している。特に法肩部分の変位が大きい。降雨無しの盛土では、変形量が小さいため、変形モードは必ずしも明瞭ではない。

天端のクラック位置のスケッチを図-10に示す。図-10において斜面側とあるラインが図-9の断面図の天端の左端、天端側とあるラインが同じく右端との境界である。降雨有りの盛土においては、最初の加振終了時から2段のクラックの発生が見られ、3回目の加振終了時には法肩全域での大きな崩壊が生じた。一方、降雨無しの盛土では、初期のクラックの発生位置は1カ所であり、2回目の加振を終えても最初の加振により発生したクラックに大きな変化は見られなかった。3回目の加振終了時に2段のクラックの発生が見受けられたが、クラック幅は狭く、良好な耐震性を有していたと考えられる。

(4) 考察

実験結果から判断すると、降雨によって盛土の耐震性が低下する可能性があることは明瞭である。また、耐震性の低下の程度については、変形量にしてワンオーダー程度は変化することが、小型の模型ではあるものの、実験的に明らかとなった。この原因については、今回の実験では表面の含水比の上昇により、表層の破壊程度が大きく変化したからである。

ただし、今回の実験では、よく締め固められた盛土であったため、表層の崩壊にとどまり、盛土全体の崩壊は発生していない。特に、地震波加振ではクラックの発生程度にとどまっていることから、排水性のよい材料で丁寧に施工された盛土の場合、多少の降雨では、地震動により致命的な損傷が引き起こされるほどの耐震性の低下は生じにくいとも判断できる。

また、降雨による盛土の耐震性低下のメカニズムとしては、サクション等の変化などによる地盤の強度低下によるものと、重量増加による慣性力の増加によるものが考えられる。この点について、今回の実験結果からは判断できない。

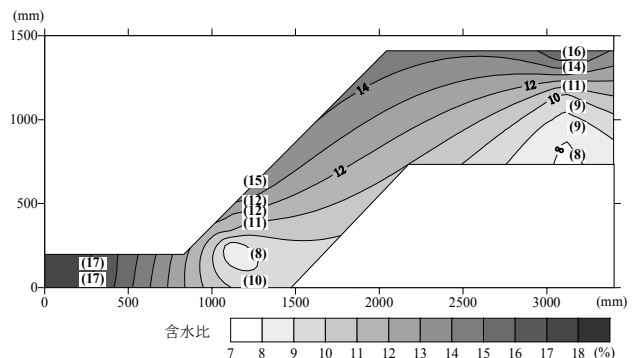


図-3 振動実験後の含水比の分布
(カッコ内が実際の計測値：
含水比約28%が飽和度100%に相当)

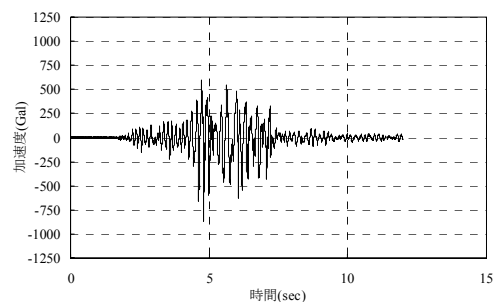


図-4 地震波加振における再現波形の例
(1回目加振:台湾集集地震TCU084EW)

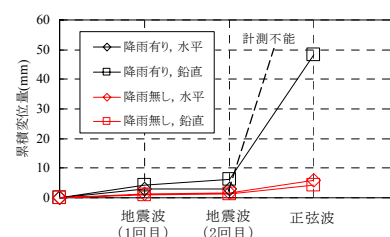
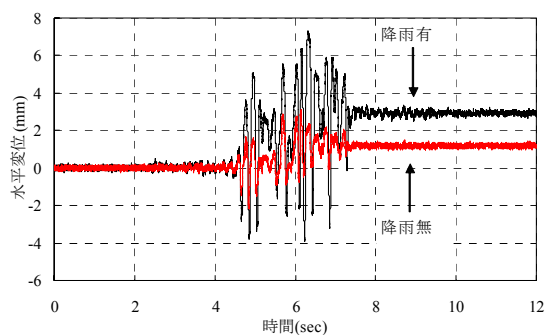
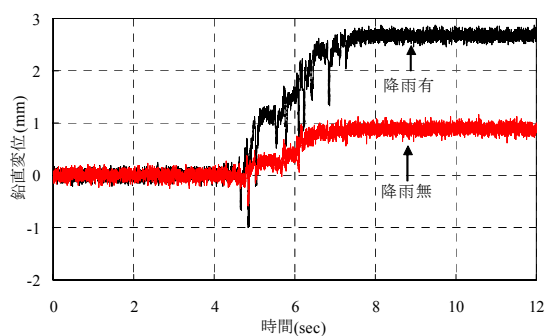


図-5 盛土天端の累積変形量

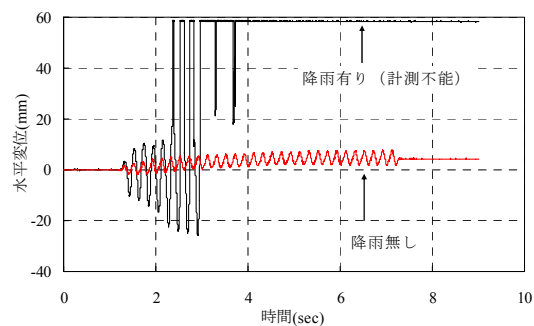


(a) 水平変位の時刻歴

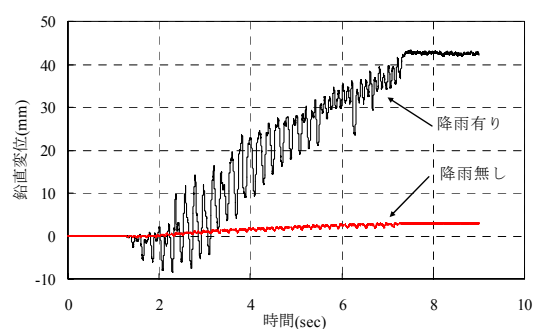


(b) 鉛直変位の時刻歴

図-6 一回目加振時の盛土天端変位の時刻歴

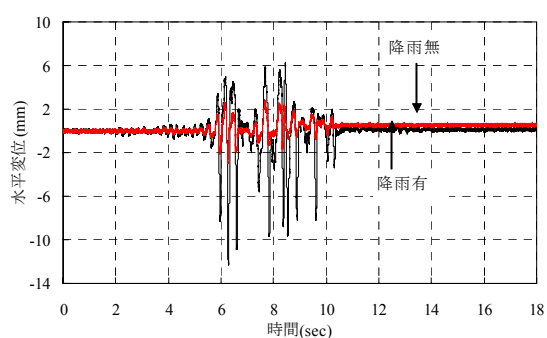


(a) 水平変位の時刻歴

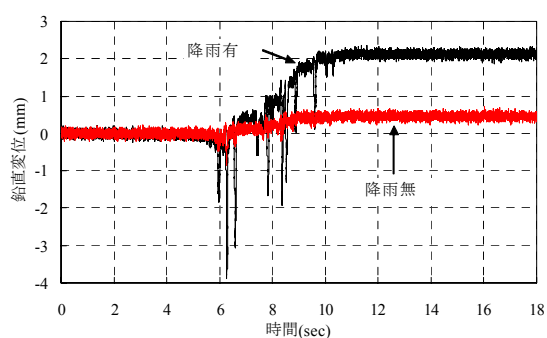


(b) 鉛直変位の時刻歴

図-8 三回目加振時の盛土天端変位の時刻歴

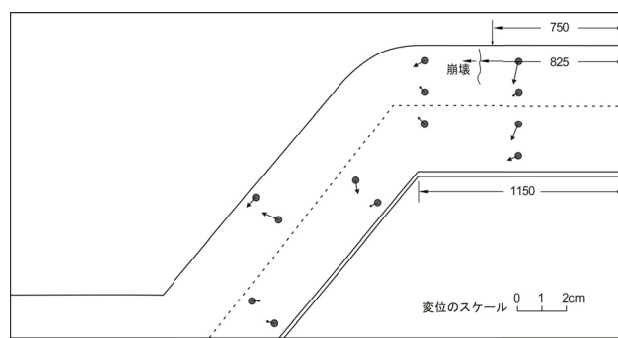


(a) 水平変位の時刻歴

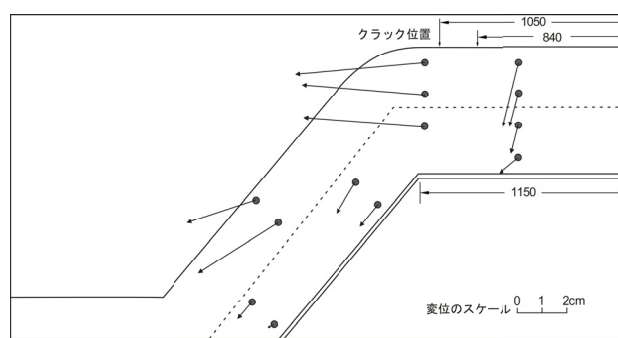


(b) 鉛直変位の時刻歴

図-7 二回目加振時の盛土天端変位の時刻歴



(a) 降雨あり盛土の変形パターン



(b) 降雨なし盛土の変形パターン

図-9 加振終了後に計測した変形パターン

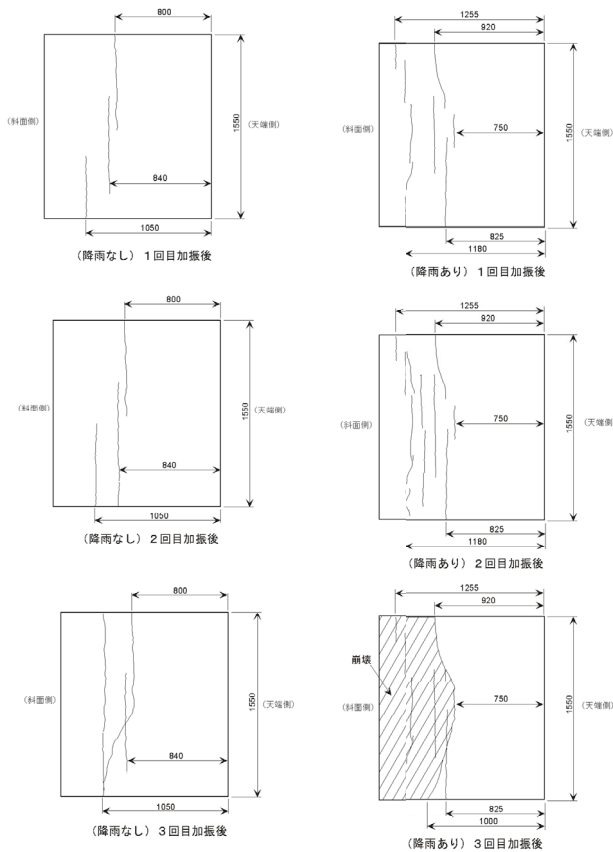


図-10 盛土天端のクラックの状況

3. 簡易貫入試験による物性値の把握の試み

(1) 実験概要

降雨により盛土の耐震性が低下する可能性があることは先述の実験により確認されている。すると、実務的には、降雨等により耐震性が低下していることを簡易的に判断できる手法が必要となる。一般には、降雨量のモニタリングによる通行規制などが実施されているが、ここではより直接的に、簡易貫入試験により強度を把握することを試みた。

実験ケースを表-1に、断面を図-11に示す。十分に締め固めた盛土では表層崩壊しか発生しなかったことを受けて、急斜面と緩斜面の2形状に、ゆる詰めと密詰めを組み合わせる実験を実施した。その結果、降雨を実施したものはゆる詰めの1ケースである。ここでは、地盤材料としてまさ土ではなく、相馬珪砂5号（および6号）を用いている。これは、均質な盛土を作成する際にまさ土では密度管理が困難であったことと、透水性の低い珪砂6号の層を作成することで、6号の層の上面に水が帯水することにより軟弱層が発生するのではないかと考えたためである。模型地盤の作成は、密度調整のため気中で乾燥状態の砂を用いて行い、ベニヤ板により斜面表面を支えた状態で水中振動台の水位を上下させ、湿润状態の斜面を形成した。乾燥状態の砂を用いたことにより、均質な盛土が形成されたと考えている。

また、水位低下後は一昼夜以上の時間をかけて十分に排水させている。珪砂6号による軟弱層は単位体積重量が約 10 kN/m^3 であり、その上の表層については、密詰めのケースで約 14 kN/m^3 （相対密度約53%程度）、ゆる詰めのケースで約 12.7 kN/m^3 （相対密度約8%程度）である。ただし、水位の下降時に浸透圧により斜面が不安定になる現象が発生したため、斜面表層部分については、やや乱された状態となってしまった。これは、水位低下をゆっくり行なったものの、まだ速すぎたためである。なお、実験計画の不備により、珪砂6号の相対密度や、珪砂の透水係数については把握できていない。

加振は、400 Galの正弦波（5波）とし、20 Hzから、徐々に振動数を低下させて、振動数の影響を調べることを試みた。これは、振動台の加振性能の観点などから、再現性の高い中程度の地震動レベルの実験を行うことをねらいとしたためである。中程度の地震動レベルでは斜面が十分に崩壊しないことが危惧されたため、斜面形状を急傾斜とし、極度にゆる詰めの条件での実験を実施した。なお、一般に振動数が高いほど正弦波1波当たりの継続時間も短く破壊力が小さいと考えられることから、高振動数から徐々に振動数を低下させ、どのレベルの振動数から破壊が生じるかを観察することにより、地震動の破壊力の振動数依存性についての検討も同時に実施しようとしたものである。なお、実験の観点を変更したことなどから、前項で述べた盛土材料や形状を大きく変更しているため、盛土の強度や破壊特性は大きく異なっていることに注意されたい。

実際には、予想したよりも早く斜面が崩壊したため、20Hzと16Hzの2種類の加振を行っている（ケース1-Aおよび1-Bでは14Hzも実施）。計測器の配置を図-12に示す。降雨は上述の降雨装置を用いて実施し、図-13に示す様に、測点T4からT2までのサクションが有意に変化した時点で降雨を停止させた。降雨強度は、降雨装置のチューニングの都合から前述の実験ケースの条件と異なり、およそ $100 \sim 125 \text{ mm/h}$ であり、やや不安定であった。前述の実験ケースと異なり地盤の透水性が高くサクションの変化が遅かったため、降雨時間は60分間である。加振前に降雨装置を撤去する必要があり、加振までに少し時間がかかったため、図-13からわかる様に加振前に若干のサクションの変化が生じている。

表-1 振動実験ケース（簡易貫入試験の評価）

ケース	地盤条件	断面形状
1-A	ゆる詰め	急傾斜
1-B	ゆる詰め +降雨	急傾斜
2-A	密詰め (締め固め)	緩傾斜
2-B	密詰め (締め固め)	急傾斜

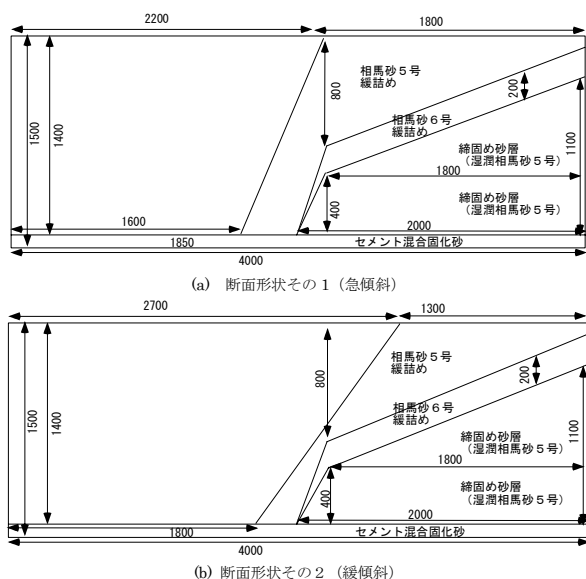


図-11 実験断面図（簡易貫入試験の評価）

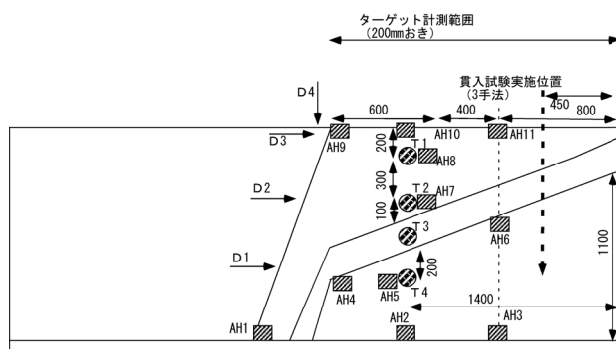


図-12 計測断面図
（緩斜面のケースもこの断面に準じた）

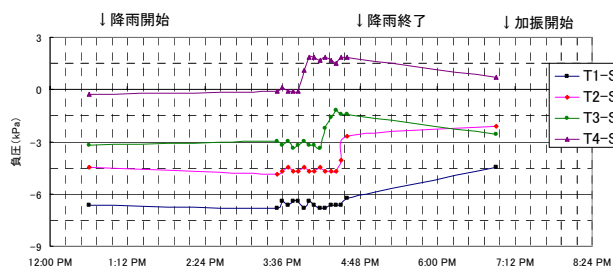


図-13 降雨によるサクシンの変化の時刻歴

(2) 簡易貫入試験

簡易貫入試験として、5 kgの重錘を落下させる土研式の簡易貫入試験と、3 kgの重錘を落下させるS H式簡易貫入試験を実施した。なお、土研式による計測値は N_c 値、S H式による計測値は N_c' であるが、一般に $N_c = 2N_c'$ の関係があるといわれている。

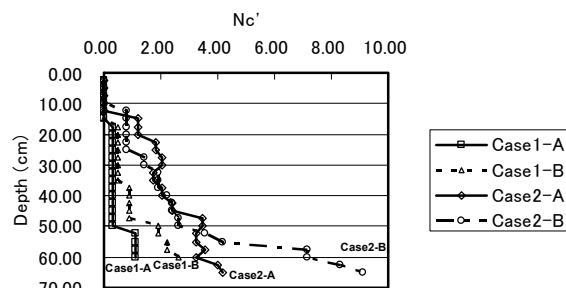
図-14に簡易貫入試験の結果を示す。実際には打撃毎に深さが異なるが、ここでは比較のために2.5 cm毎の深さに該当する値を示している。土研式では、

重錘が重すぎるため、この程度の強度の違いについては計測精度が不十分である。S H式では、ゆる詰めと密詰めの違いを計測できている。しかし、降雨の有無による違いは、もともとの地盤強度が小さいためか、今回の計測では測定できなかった。また、珪砂6号の層については、今回の貫入試験では明瞭に判別することができない結果となった。実際の変形等も発生していないことから、意図していた様な軟弱層が珪砂6号の層の上面付近に発生しなかったためであると考えられる。

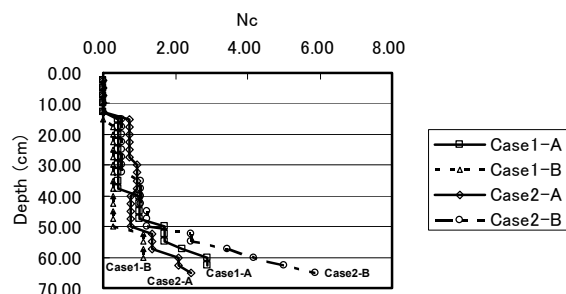
(3) 振動実験結果

斜面全体の安全率を低下させることを意図して急斜面の断面を設定した結果、斜面表層の崩壊が大きく、レーザー変位計等による時刻歴の変位計測は困難であった。そのため、図-15および図-16に示すように、各ケースにおける盛土頂部の地表面におけるターゲットの水平移動量及び沈下量により耐震性を比較検討する。ただし、天端に近いターゲットについては、斜面崩壊時に計測不能となっているものがある点に留意されたい。

緩斜面であるケース2-Bをのぞき、今回の実験では変形量に大きな違いは見受けられない。とはいえ、ゆる詰めであるケース1-Aと、密詰めであるケース2-Bには変形量に違いが見受けられる。一方、降雨有りのケース1-Bの方が、降雨無しのケース1-Aより変形量のレベルはむしろ小さく、この点については、前項で報告した実験結果と矛盾している。

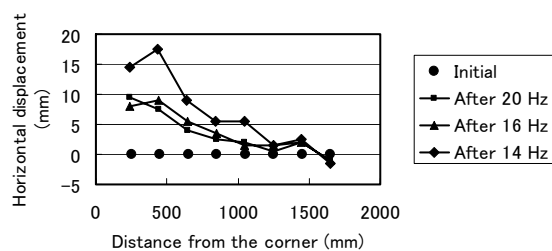


(a) S H式簡易貫入試験の結果

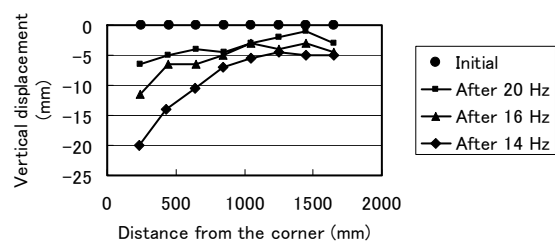


(b) 土研式簡易貫入試験の結果

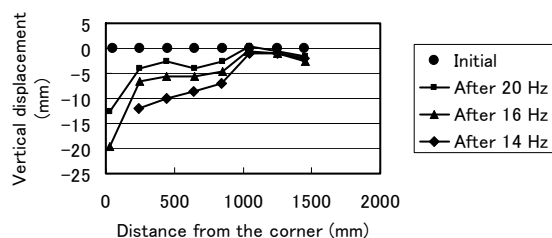
図-14 簡易貫入試験による計測結果



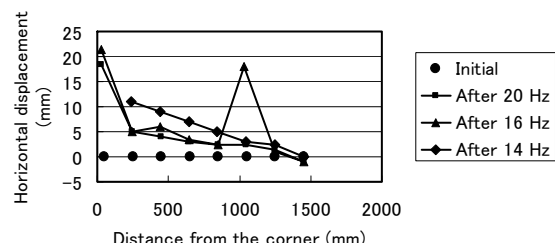
(a) ケース 1-A



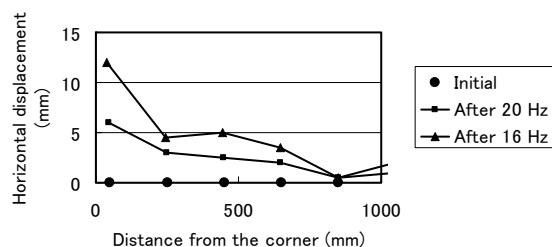
(a) ケース 1-A



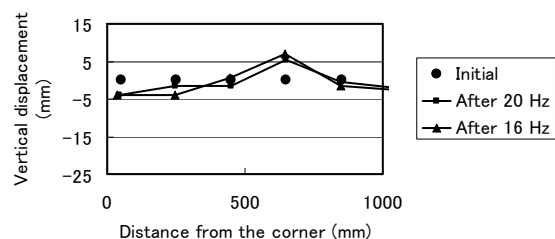
(b) ケース 1-B



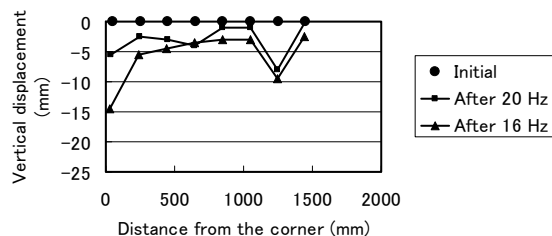
(b) ケース 1-B



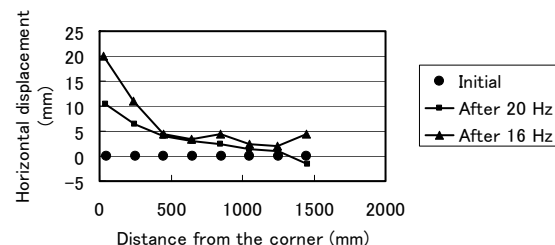
(c) ケース 2-A



(c) ケース 2-A



(d) ケース 2-B



(d) ケース 2-B

図-15 盛土頂部表面における水平変位量

図-16 盛土頂部表面における沈下量

4. 一連の実験結果に基づく考察

(1) 降雨による耐震性の低下についての検討

2項で述べた実験結果より、降雨により盛土の耐震性が低下する事例があることは明らかである。また、その際の変形量の増加量が、条件によってはワンオーダーレベルであることも実験的には明らかであろう。

これに対し、3項で述べた実験では、降雨の有無による明瞭な違いは見受けられなかった。この理由としては次の様な可能性がある。

- ・ 降雨の有無にかかわらず盛土が崩壊する様な条件では違いが明瞭には出てこない。
- ・ 珪砂では排水性が良いため、強度低下や重量増加が生じにくい。

これらの点については、今後の検討課題である。

(2) 降雨による強度低下の有無

降雨の有無に対し、要素試験を実施したわけではないので明瞭な判断は難しいが、3項で述べた様に降雨の有無による物性の変化を簡易貫入試験で検出することは困難であった。振動時の耐震性があまり変化していなかったことから、強度低下が実際に生じていたかどうかは判断が難しいが、サクシジョンの低下は計測されており、何らかの物性の変化は生じ

ていたはずである。したがって、今回の実験からは次の様な結論が得られる。すなわち、土中のサクシオンは降雨により低下するが、そのサクシオンの変化（あるいはその変化による物性の変化）を簡易貫入試験で検出することは難しい。

(3) 耐震診断への簡易貫入試験の適用性

降雨による物性の評価については、上述の様に適用が難しい面があることが示唆されたものの、SH式貫入試験ではゆる詰めと密詰めでの物性の違いを検出できたこと、ゆる詰めと密詰めでは耐震性に多少の違いがあったことから、降雨の影響ではなく盛土の締め固め度に着目した場合には、盛土の耐震診断手法として簡易貫入試験を適用できる可能性があることが確認された。ただし、実際の計測結果と、実際の強度の対応について、より多くのデータを蓄積する必要がある。その際に、本研究で用いたような振動実験による検証は、地盤の形成履歴・入力地震動の特性・盛土の変形特性を全て把握することができ、ため、実験計画が適切であれば有用な方法であると考えられる。今回の実験では、意図していたより早く盛土が崩壊したなど、実験条件の設定に多くの課題が残されており、より詳細な振動実験等による検証が今後は必要である。

なお、降雨による物性の変化を簡易貫入試験で計測することには難があるという実験結果と、降雨により盛土の耐震性は低下するという実験結果を考慮すると、降雨による盛土の耐震性の低下を簡易貫入試験により評価できるかどうかは、疑問が残る課題であって、より詳細な検討が必要である。このときに、降雨による耐震性低下の主原因が強度低下ではなく重量増加による影響である可能性も否定されているわけではないことに留意する必要がある。

5. 結論

水中振動台上に模型盛土を作成し、人工降雨を与えた後に加振実験を行い、降雨による耐震性低下について検討を行った。また、降雨による地盤物性の変化を、簡易貫入試験により評価することを試みた。得られた結論は次の通りである。

- ・実験により、降雨によって盛土の耐震性が低下する事例があることは確認された。ただし、それが地盤の強度低下によるものか、あるいは重量増加による慣性力の増加によるものか、判断は難しい。
- ・実験の範囲では、サクシオンの変化に伴う地盤物性の変化を簡易貫入試験で評価することは困難であった。
- ・締め固め度に応じた盛土の耐震性の診断手法としては、簡易貫入試験を適用できる可能性があることが確認された。ただし、実際の計測結果と、実際の強度の対応について、より多くのデータを蓄積する必要がある、より詳細な振動実験等による検証が今後は必要である。

謝辞：振動実験に用いた波形は台湾中央気象台により観測・配布されているものである。また、振動実験の実施においては、港湾空港技術研究所派遣職員の枝氏、田中氏、同研修生の斎藤氏、同実習生の西出氏の協力を得た。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 井合 進，一井康二，佐藤幸博，桑島隆一：高盛土の地震応答解析，第10回日本地震工学シンポジウム，D2-25，1998.

(2005. 3. 14 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC RESISTANCE REDUCTION OF EMBANKMENT DUE TO RAINFALL

Koji ICHII

Heavy rainfall would reduce the seismic resistance of a embankment if the drainage system of the embankment is not enough. A series of shake table tests experimentally proved the existence of seismic resistance reduction for a embankment with a rainfall. Since the mechanism of the seismic resistance reduction could be related with the change of material properties such as a reduction of the suction of unsaturated soils, in-situ handy cone penetrometer tests and monitoring of the suction were conducted in the shake table tests. The test results reveals that the handy cone penetrometer test cannot grasp the change of the material property such as a reduction of the suction due to rainfall.