

盛土の降雨と地震による 複合災害を防ぐ

小島 謙一

構造物技術研究部
(基礎・土構造 主任研究員)

松丸 貴樹

総務部
(人事 課員)



こじま けんいち



まつまる たかき

はじめに

鉄道は人々の生活に密着しており、自然災害などから運行の安定性・安全性を守ることは非常に重要です。鉄道構造物はコンクリートや鋼材料からなる橋梁や土を材料とした盛土、地盤や山の中にするトンネルなどの多種の構造物が連続的につながって構成されており、それぞれの構造物の特性に応じた災害対策を考えていく必要があります。これまでに被害が生じた自然災害としては、地震、降雨・降雪、風などがあります。鉄道構造物を新たに建設したり、また現在ある構造物を保守していくためには、これらの災害が単独もしくは複合的に発生した場合に対して、個々の構造物の影響度合いを評価し、被害を受けないような対策を検討していくことが大切です。

近年、鉄道構造物に大きな被害を与えた災害としては地震があります。1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震などによりさまざまな鉄道構造物に大きな被害が発生しました。地震と同様に大きな被害が多発している災害としては降雨があります。降雨については状態も多様化しており、台風などに伴う豪雨から短時間に非常に多く雨量をもたらすゲリラ的な降雨など、これまでに生じていないような降雨も発生しております。構造物への降雨被害については、コンクリート構造物などでは影響を受けにくいのですが、盛土などの土構造物は大きな影響を受ける可能性があります。これまでも、四国を襲った2004年の台風21号に伴う降雨による盛土の崩壊事例など多くの被害事例があります。

また、災害は単独のみならず、2つ以上の災害が同時もしくは連続的に発生する複合的なものも考えられます。例えば、多量の雨が降っている時もしくは、その直後に地震が発生するというような状況です。このような災害が生じた時には、個々の災害による被害以上に被害が拡大することも考えられ、複合的な災害の評価は、今後、非常に重要になってきます。ここでは複合的な災害への取り組みの1

つを述べることにします。複合災害としては降雨と地震による災害を考え、その影響が大きいと考えられる盛土における検討について示します。

盛土は土を材料として作られた主として台形状の構造物です。そのため、経済的であり、また修繕等もしやすい構造物であることから古くから使用されており、現在でも鉄道構造物の約80%を占めています。したがって、鉄道構造物での自然災害に対する安定性を検討するうえでも非常に重要な構造物の1つです。

実際の被害事例

降雨と地震がほぼ同時に発生した事例に2004年の新潟県中越地震があります。本地震では、発生前日まで台風23号による雨が連続的に降り続いていました。図1に新潟県小千谷地区における9月1日～10月22日までの降雨の記録を示します。10月20日に台風23号が上陸しており、日雨量で約100mmの多量の雨が降っています。また、この地域では台風23号のみならず、9月中旬頃から雨天の日が多かったことも分かります。このように被災を受けた箇所では、連続的な降雨や台風による集中豪雨のため、周辺

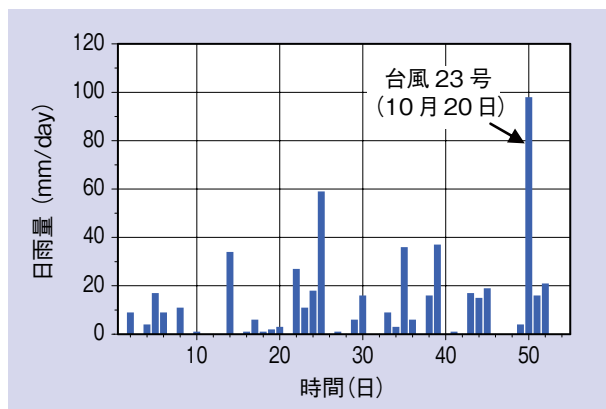


図1 2004年9月1日から10月22日までの日雨量 (小千谷地区)



(a)被災した盛土の状況1



(b)被災した盛土の状況2

図2 被災した盛土の状況

の地盤や盛土内などの含水状態が非常に高くなっていたことが推測されます。

図2 (a), (b) は新潟県中越地震で被災した鉄道盛土の状況です。盛土が大きく崩れ、列車の運行が不可能となってしまうことが分かります。この盛土の中に地震の前日までの降雨がどの程度浸透していたかについて、数値解析により求めることができます。図3は図2 (b) における盛土の崩壊前の断面図です。この断面を用いて数値解析(浸透流解析)により、盛土内の含水状態を求めた結果を図4に示します。含水状態は飽和度という指標で示されており、飽和度が高い(図中では色が赤に近づく)ほど、盛土の中の水分が多いこととなります。盛土の内部では黄色~赤色の部分が多く、盛土内の含水状態が高いことが分かります。したがって、地震の直前での盛土内部は台風等の降雨により、多くの水が含まれていた状態であったと言えます。このように、新潟県中越地震は盛土内の含水状態が非常に高くなっていた時に発生しています。

土中における水の影響

土は土の粒子、水、空隙の3相構造で成り立っています。

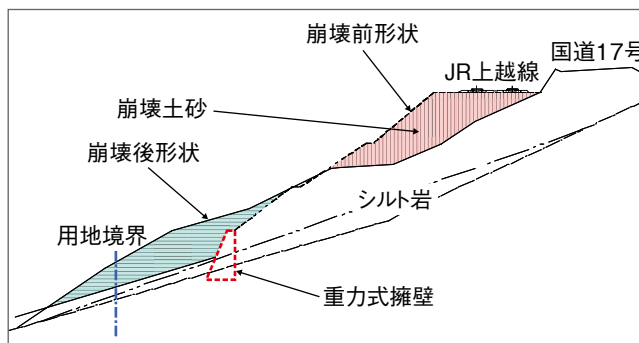


図3 被災盛土断面図

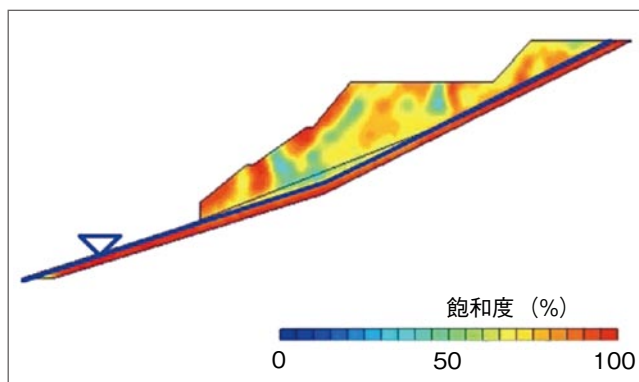


図4 降雨後の盛土内の飽和度分布(浸透流解析結果)

このうち水の量が増えるとどのような変化をするのかを述べます。図5は土の中に水が浸透していく特性(水分特性関係)を示したものです。横軸は体積含水率(土の中に含まれている水の割合)、左側の縦軸はサクシオン、右側は比透水係数と呼ばれるものです。サクシオンは土粒子を結合させる負の圧力であり、比透水係数は飽和時(土と水の

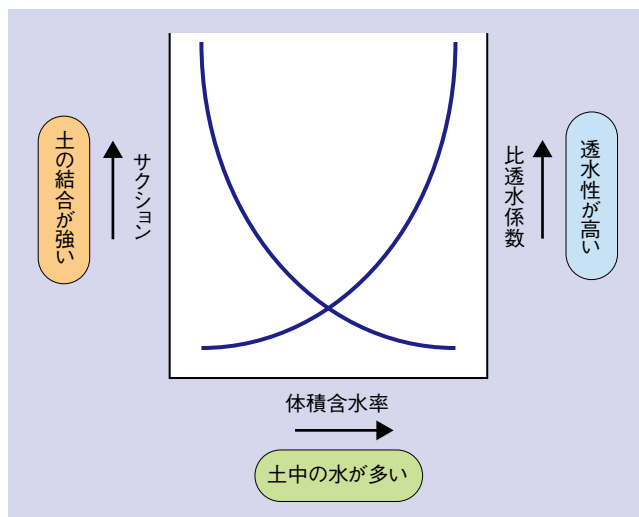


図5 土における水の浸透特性

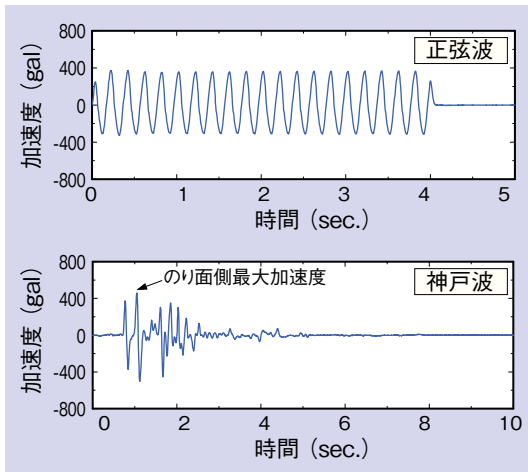


図6 入力加速度の例

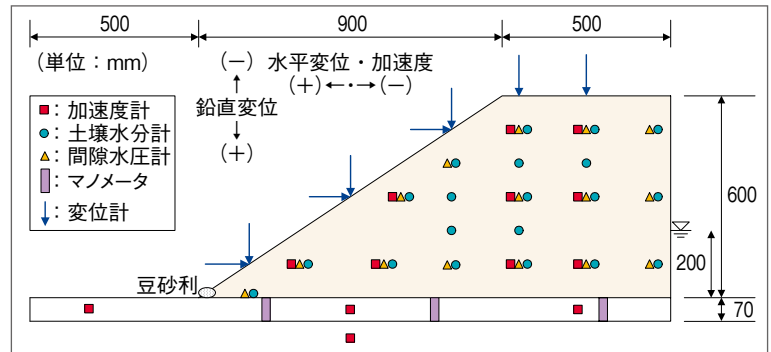


図7 模型盛土の概要と計測器配置

みで空隙がない状態)における透水係数に対するある体積含水率における透水係数の比です。透水係数とは水の流れやすさを示す係数です。土の水分特性関係は土の種類(例えば、粘土や砂など)によって大きく変わります。

水分特性関係から土中の水の量が増えていくと(横軸の体積含水率が増加する)、サクシオンは小さくなり、逆に比透水係数は大きくなります。したがって、土中の含水量が増加していくと土粒子の結合が弱まり、強度が低下していきます。これが、盛土の安定性に大きく影響し、雨による土の強度の低下およびそれに伴い耐震性の低下が生じるのです。このように土の中に水が浸透していくほど、ますます水の浸透性が良くなり、それにあわせて土の強度が低下してしまいます。

水を多く含んだ盛土の地震時挙動

土でできた構造物は中に含まれる水の量で強度が大きく変化するため、地震時における挙動も大きく異なります。これを解明するために模型実験(実構造物の1/10程度)により、降雨を受けた盛土の地震時挙動の検討を行っています。

実験は高さ600mm、のり面の勾配が1:1.5の模型を構築(稲城砂を使用)、2ケースの地震波(正弦波(5Hz、20波)と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のNS成分)を与えることで実施しました。実験に用いた地震の入力波形の一例を図6に、また模型盛土の概要を図7に示します。降雨の影響は、盛土に直接雨が降った状況を模して盛土上部から散水ノズルにより散水するケースと、その周辺地域に降った雨が地面内に浸透して、盛土の背面に隣接した山などから水が供給され盛土内に浸透していくケースを再現し、モデル化しています。背面か

ら浸透させる場合は、盛土を構築した土槽の右端に浸透槽を設け、ある水位を保ちながら浸透させています。

盛土の挙動は、天端やのり面に変位計を設置した他、盛土内部に標点を設け土槽正面から高速度カメラによる写真(後述、図9盛土の変形状況写真参照)からも求めています。また、3ヶ所の位置においてマンメータを設けており、盛土内の水位も計測しています。ここでは1例として、盛土の背面から水を浸透させ、1995年兵庫県南部地震での地震波を用いたケースについて述べることにします。

実験は盛土下端からの高さが200mmの位置で水位を保持し、盛土内へ水を浸透させ、盛土ののり先部分において水位が上昇を始めた時点で加振を行いました。加振実験は、最大加速度を段階毎に上昇させたステップ加振を行い、盛土が破壊に至るまで実施しました。図8は、盛土内の水の浸透状況です。図中には想定される水位線と各計測点における飽和度を示します。水は盛土の後ろから浸透していくため、距離の遠いのり先部分に向かって水位が低くなっています。また、盛土の初期状態の飽和度は25%程度であったのに対し、浸透後の飽和度を見るといずれも90-100%と高い値となっています。このように、背面からの水によ

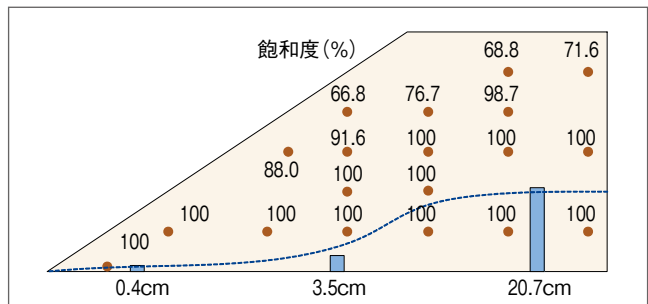


図8 振動実験前の飽和度分布と想定水位線

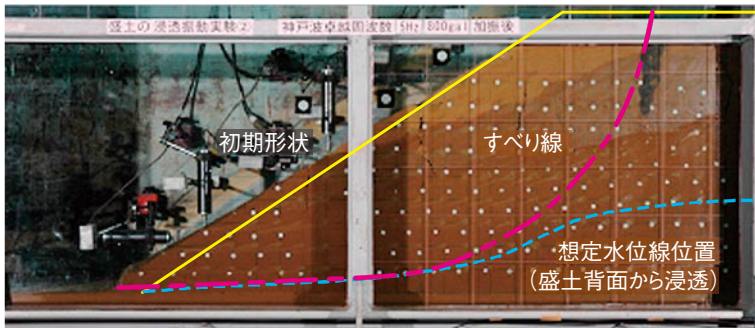


図9 盛土の変形状況(実験終了時)

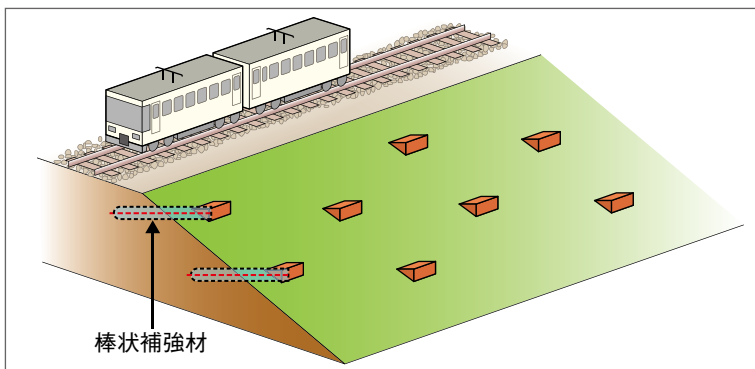


図10 対策工のイメージ

り、盛土内は高い含水状態となることが分かります。この水を含んだ状態で地震を模擬して加振を行い、終了した時の状況(神戸波最大加速度400galまで加振)が図9です。図中には加振直前の水位の位置、加振後に生じたすべり線もあわせて示します。図より、水位線に沿って盛土が円弧状のすべり破壊を示していることが分かります。また、これまでに水の浸透がないケースの実験も行っておりますが、水を含んだケースでの崩壊時の加速度に対して200gal以上も大きい加速度でようやく盛土の変形が始まっており、地震時に降雨が与える影響は非常に大きいということがわかりました。

このように複合災害により被害は拡大する恐れがあります。そこで、このような被害を防ぐための対策工についても検討を行っています。対策工としては、降雨にも地震に対しても効果のあるものが必要となります。また、既に構築されている盛土の場合には、経済性や作業性などから構築物の形状など状態を保持したまま対策工を施すことが求められます。通常、降雨に対する対策としては雨を盛土の中に入れない、もしくは入っても水を外に出す方法が

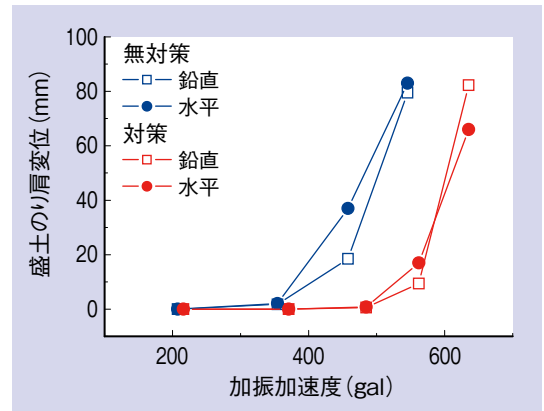


図11 対策工の効果(盛土のり肩の変位)

とられます。しかし、これらの対策では地震に対してはあまり効果を生み出すことができません。そこで、降雨によって生じる強度低下を補強し、地震の力にも抵抗できる対策工として、盛土内部を補強する工法について検討しています。図10はその工法のイメージです。盛土内に大きな棒状の硬い補強体(径400mm)を構築することにより、盛土を強化するものです。対策工の効果を評価するために行った実験結果を図11に示します。対策工がない場合には400gal程度の加振加速度で大きな変位が発生していますが、対策工を施した場合には600gal程度にならなければ同様な変位が発生せず、大きな対策効果があることがわかります。

おわりに

盛土は経済的であり、また壊れたときには復旧しやすい構造物です。しかし、降雨に弱いという他の構造物にない特徴があります。最新の設計では降雨の影響も考慮しており、新しく作られる盛土については雨に対しても強いものとなっております。今後は、更にこのような複合的な災害も視野に入れた盛土の設計や対策工の検討を図っていく必要があります。

近年、異常気象により様々な自然災害が複合的に発生する可能性が増加しています。盛土のみならず、個々の構造物の特性や生じる災害のメカニズムや複合的に生じる影響について考慮し、構造物の設計などに加えていくことが重要と考えられます。[RRR]