

道路盛土の法尻部に着目した新しい耐震補強工の開発

Development of a new type of reinforcement method for road embankments focusing on their toes

茨城大学大学院理工学研究科（工学野） 准教授 榎本忠夫

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. 研究の背景と目的

近年、道路盛土の地震時被害が顕在化してきている。これらの被害は、盛土内水位の位置、盛土材料、締固め程度、盛土構造、基礎地盤等の様々な要因の影響を受けて発生している。そこで、申請者は、盛土の耐震性に及ぼす諸要因の影響を模型実験により検討してきた（Enomoto & Sasaki, Soils and Foundations, 2015）。その結果、盛土内水位の影響については、盛土法肩部の水位は低くても盛土法尻部の水位が高いと地震時に大崩壊に至る可能性があることを示した。また、申請者は、道路盛土における既存の耐震補強工の効果についても模型実験により調査しており（Enomoto & Sasaki, Soils and Foundations, 2018）、碎石を詰めた金網製の箱（ふとんかご）を盛土法尻部に設置することで、その排水効果と自重による押さえ効果により盛土の耐震性が向上することを定量的に明らかにした。しかし、実務においてふとんかごを設置する場合、既設盛土の法尻部をバックホウ等により掘削しなければならない、場合によっては工事中に盛土が安定性を失う可能性がある。過去には、ふとんかご設置のために盛土法尻部を掘削した際、不安定化した盛土が崩壊した事例もある。

以上の背景から、本研究では、申請者が明らかにした盛土法尻部における排水効果と押さえ効果の重要性に着目し、施工が容易で掘削が不要な、そして低廉な、新たな耐震補強工を提案する。当該補強工の効果については、振動台模型実験を通じて明らかにする。また、当該補強工の設計手法や性能評価手法を確立するため、その第一歩として、上記の模型実験結果を対象とした斜面安定解析を行う。

2. 振動台模型実験の概要

盛土模型の構築には江戸崎砂を用いた。江戸崎砂の粒径加積曲線、締固め曲線（A-a法）、土質特性をそれぞれ図-1、図-2、表-1に示す。図-3に振動台模型実験の概要を示す。土槽内（幅1000mm×高さ500mm×奥行300mm）に、5°の傾斜を有する地山（基礎地盤）を石膏にて模擬した。その上に、最適含水比に調整した江戸崎砂を用いて縮尺1/35の盛土模型を構築した。盛土模型の締固め度は78%、高さは420mm、法面勾配は1:1.5であり、盛土1段（140mm）毎に幅20mmの小段を設けた。地山模型と盛土模型の間の摩擦力を確保するため、石膏の表面全体に紙やすりを敷設した。また、盛土模型の変形状況を容易に観察できるようにするため、土槽の片側面において、幅100mm、高さ40mm毎に白色に染めた江戸崎砂にて格子を構築するとともに、格子内に1~2個のマーカーを設置した。模型構築時に、図-3に示すような計測機器類（間隙水圧計、加速度計、変位計）を設置した。

申請者が考える耐震補強工の概念を図-4に示す。バックホウ等により既設盛土の法尻部に水抜きパイプを圧入し、板状の金網砕工の中央部にアンカーボルト1本/体を打ち込むことで金網砕工を基礎地盤に固定した上で、金網砕工内に碎石を敷き詰めることで完成する。なお、金網砕工と盛土表面の間には吸出し防止材として不織布を敷く。本補強工により、法尻部において速やかな排水が可

能になるとともに、碎石を詰めた「もたれ式金網柵工」の自重とアンカーボルトの締付けにより法尻部における拘束効果が期待できる。本補強工は施工が容易で低廉であるとともに、法尻部の掘削が不要という特長がある。今回の実験においては、金網柵工は鉄製の網（目の大きさ：3 mm×3 mm）にて模擬し、中詰め材として粒径5 mm程度の礫を用いた。金網柵工の盛土横断方向の幅は150 mmとし、盛土模型には合計2体の金網柵工を盛土横断方向に並べて設置した。アンカーボルトには、先端を尖らせた直径6 mmの全ネジを用いた。水抜きパイプは、表面に無数の小孔をあけた直径10 mm、長さ210 mmのストローにて模擬し、水平方向に60 mm間隔（1段当たり4本）で設置した。

模型構築後、盛土模型の背面に設置した貯水タンクから盛土内に水を浸透させた。浸透開始から95分経過した段階で、周波数5 Hz、片振幅300 gal、50波のsine波で土槽を加振した。その後、再びタンクから水を10分間浸透させ、再び同条件のsine波で土槽を加振した。これは、2016年の熊本地震のように、短期間に連続的に強震動が生じる事態を念頭に置いたものである。表-2に代表的な実験ケースを示す。ケース1は無対策であり、ケース2～5は金網柵工の厚さ t や長さ l を変化させたり、水抜きパイプの有無が異なるケースである。ケース2, 3, 5の金網柵工の長さ $l=135$ mmは、盛土1段の法面長の約1/2に相当する。

表-1 江戸崎砂の土質特性

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.724
細粒分含有率 F_c (%)	8.4
平均粒径 D_{50} (mm)	0.23
均等係数 U_c	3.24
最適含水比 w_{opt} (%)	16.4
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.707

表-2 実験ケース

実験ケース	1	2	3	4	5
厚さ t (mm)	-	15	15	15	7
長さ l (mm)	-	135	135	70	135
水抜きパイプ	-	4本×3段	無	4本×3段	4本×2段*

*: 金網柵工の長さが短く水抜きパイプを設置できる領域が小さいため、2段とした。

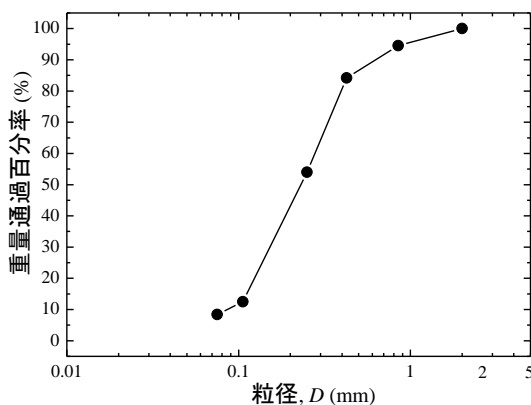


図-1 江戸崎砂の粒径加積曲線

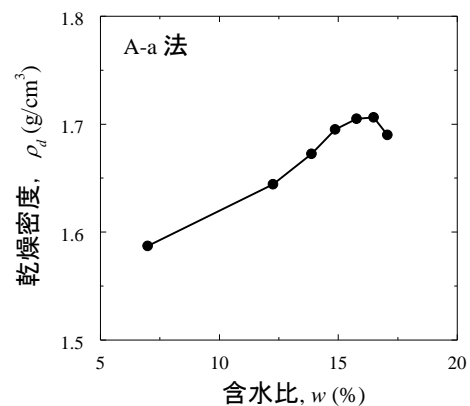


図-2 江戸崎砂の締固め曲線

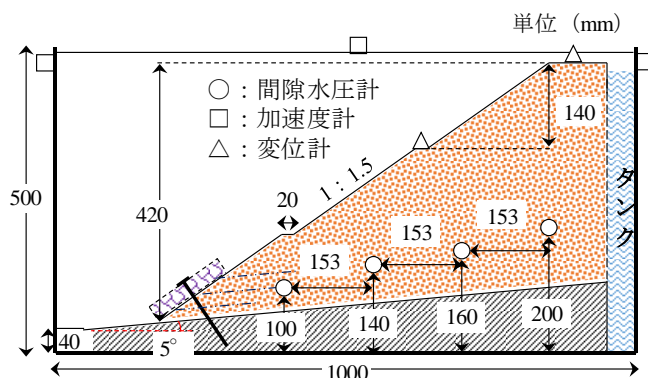


図-3 模型実験の概要

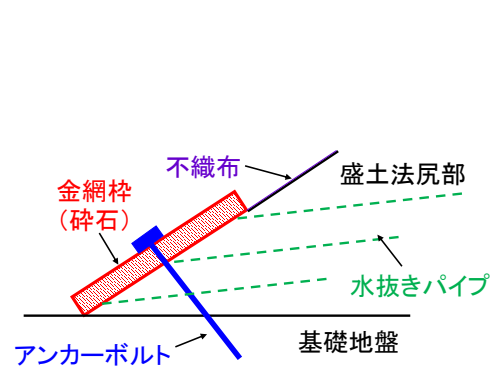


図-4 提案耐震補強工の概要

3. 斜面安定解析の概要

振動台模型実験の結果を対象にニューマーク法 (Newmark, 1965) による斜面安定解析を実施した。表-3に用いたパラメータを示す。盛土部 (江戸崎砂) の湿潤・飽和単位体積重量はそれぞれ実験値・計算値であり、それ以外のパラメータはEnomoto & Sasaki (2018)と同様に定めた。なお、Enomoto & Sasaki (2018)による江戸崎砂の強度定数 (c , ϕ) は、締固め度82%の供試体を対象とした排水三軸圧縮試験による値である。また、模型実験では連続的に強震動が生じる事態を念頭に置き2度加振を行ったことから、解析における入力波は簡易的に周波数5 Hz、片振幅300 gal、100波のsine波とした。アンカーボルトについては、その張力、周面摩擦力等を実験的に測定していないことなどから、本解析上では考慮していない。

表-3 解析パラメータ

	盛土	基礎地盤	金網砕工
湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	15.14	18.2	19
飽和単位体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	17.95	18.2	19
内部摩擦角 ϕ (°)	32.6	40	45
粘着力 c (kPa)	2.5	500	50

また、模型実験では連続的に強震動が生じる事態を念頭に置き2度加振を行ったことから、解析における入力波は簡易的に周波数5 Hz、片振幅300 gal、100波のsine波とした。アンカーボルトについては、その張力、周面摩擦力等を実験的に測定していないことなどから、本解析上では考慮していない。

(実験調査によって得られた新しい知見)

4. 振動台模型実験により得られた結果

図-5に各ケースの1度目の加振直前における盛土内水位を示す。また、各ケースの2度目の加振後における盛土模型の変形状況を図-6に示す。

4.1 提案補強工による効果

提案補強工による効果を検証するため、ケース1 (無補強) とケース2 (補強工あり) の実験結果を比較する。図-5を見ると分かるように、ケース2はケース1に比べて天端付近の水位が高い。これは、実験に用いた不織布の透水係数が想定以上に小さかったため、全体的に盛土の排水性が阻害され水位が上昇してしまった可能性が原因として考えられる。一方で、ケース2の法尻付近の水位はケース1に比べて低い。これは、水抜きパイプの効果によるものと考えられる。

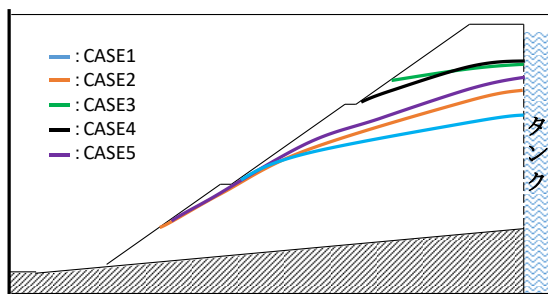


図-5 各ケースの盛土内水位



図-6(a) ケース1の変形状況



図-6(b) ケース2の変形状況

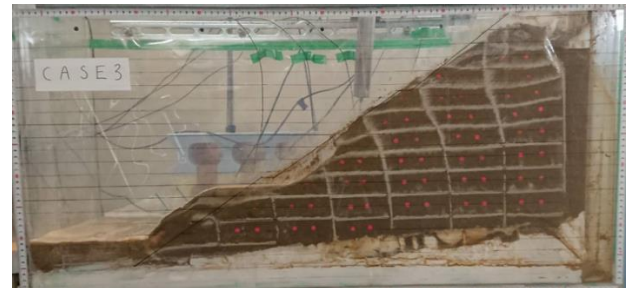


図-6(c) ケース3の変形状況



図-6(d) ケース4の変形状況

図-6(e) ケース5の変形状況

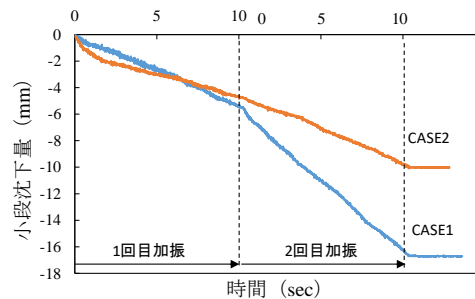


図-7 ケース1と2の小段沈下量の比較



図-8 ケース1の法尻部における浸透破壊 (左から、浸透開始後0, 60, 75, 90分経過時)

ケース1とケース2の小段沈下量（模型スケール）の時刻歴を図-7に示す。1度目の加振ではわずかな沈下量の差が確認されたが、2度目の加振では大きな差が生じ、提案補強工の設置により最終沈下量を約1/2に抑えられることを明らかにした。また、ケース1では図-8に示すように加振前に法尻が浸透崩壊を起こしていたが、ケース2では補強工の設置によりそのような崩壊は生じなかった。

4.2 提案補強工における水抜きパイプの役割

提案補強工における水抜きパイプの重要性を検証するため、ケース2とケース3の実験結果を比較する。図-5から分かるように、水抜きパイプを施工しなかったケース3はケース2に比べて盛土内水位が非常に高い。したがって、金網砕工よりも水抜きパイプによる水位低減効果の方が非常に大きいことがうかがえる。これは、金網砕工は盛土の外部に設置してあるため盛土内水位に与える影響が小さいのに対し、水抜きパイプは盛土内に設置してあるため水位を直接的に低下させることができることに起因すると考えられる。

両ケースの小段沈下量（模型スケール）の時刻歴を図-9に示す。同図および図-6(b)と(c)から明らかのように、両者の差は明瞭で、ケース3では1度目の加振で大きく変形している。したがって、本提案補強工において水抜きパイプが果たす役割は非常に大きいことが分かる。ただし、図-6(c)に示

されているように、ケース3の盛土模型のすべりは補強工よりも上部で生じており、補強工で押さえられている箇所はほとんど変形していないことに注意が必要である。すなわち、色砂により形成された補強部分の格子はさほど変形しておらず、法面上部のすべり土塊が補強工の上に流出しているような崩壊形態であることが分かる。したがって、本補強工の法面方向の長さ (l) を長くすることで、盛土内水位が高くても盛土の変形を抑制できる可能性がある。

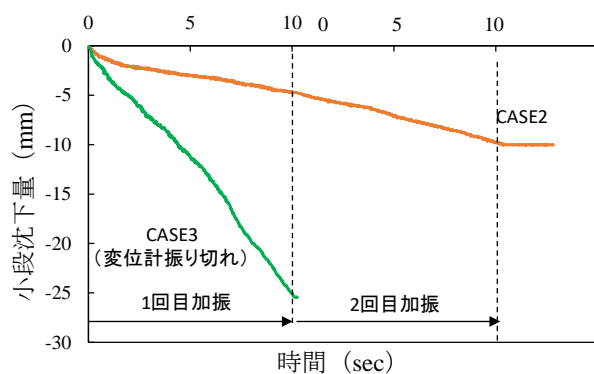


図-9 ケース2と3の小段沈下量の比較

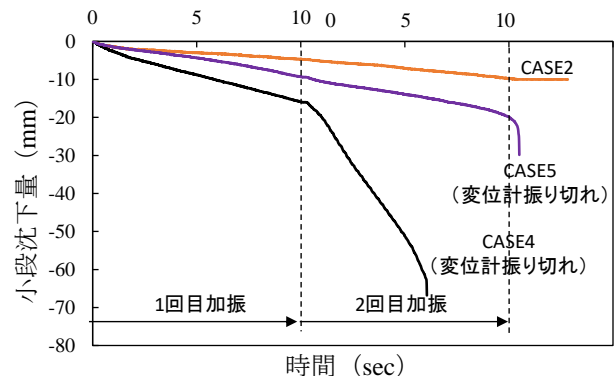


図-10 ケース2, 4, 5の小段沈下量の比較

4.3 補強効果に及ぼす金網砕工の形状の影響

提案補強工における金網砕工の形状が盛土の耐震性に及ぼす影響を検証するため、ケース2, 4, 5の実験結果を比較する。図-5から分かるように、ケース2とケース4では、明らかに後者の方が盛土内水位が高い。これは、ケース4の金網砕工の法面方向長さ (l) が短いことに加えて、表-2のように金網砕工の面積に応じて水抜きパイプが2段になっていることが大きく影響している。一方、金網砕工の厚さのみが異なるケース2とケース5では、盛土内水位にあまり相違はなく、厚さが薄いケース5の方がわずかに水位が高い結果となった。

これらのケースの小段沈下量 (模型スケール) の時刻歴を図-10に示す。ケース4では金網砕工の法面方向長さ (l) がケース2と5の約1/2のため、大きく変形していることが分かる。ただし、4.2で述べたケース3と同じように、ケース4の盛土模型のすべりは補強工よりも上部で生じており (図-6(d))、補強工で押さえられている箇所はほとんど変形していない。一方で、ケース5では金網砕工の厚さがケース2の約1/2になっているため、金網砕工の自重による拘束効果があまり期待できずケース2よりも大きな沈下が生じた。しかし、ケース4と比較すると変位は小さいことから、提案補強工においては、金網砕工の厚さよりも法面方向長さ (l) が重要なパラメータになり得ることが分かった。ただし、本実験の模型は小規模であるため、実物大の模型にて、「もたれ式金網砕工」の自重とアンカーボルトの締付けによりどの程度の拘束効果が期待できるか検証する必要がある。

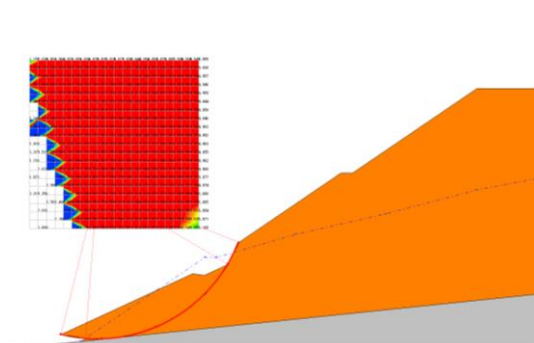


図-11(a) ケース1の解析結果

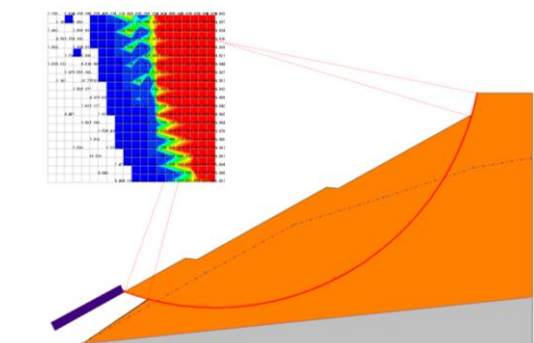


図-11(b) ケース2の解析結果

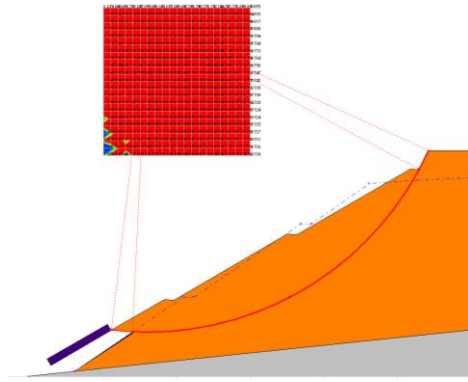


図-11(c) ケース3の解析結果

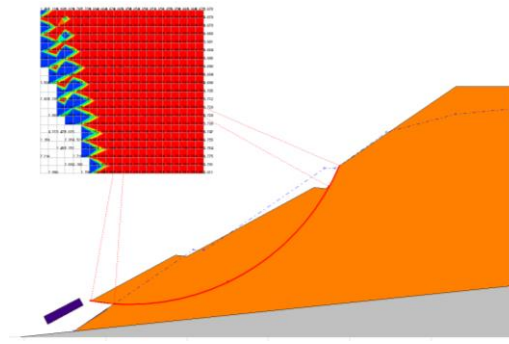


図-11(d) ケース4の解析結果

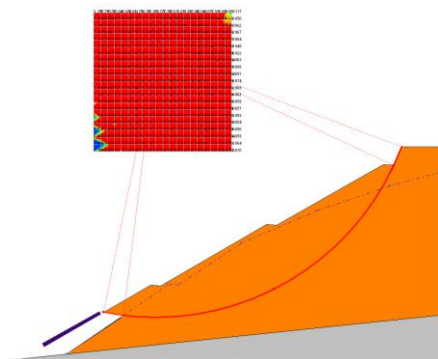


図-11(e) ケース5の解析結果

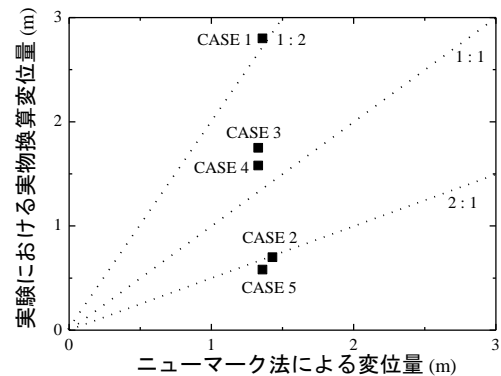


図-12 ニューマーク法による解析結果

5. 斜面安定解析の結果

4.で述べた振動台模型実験の結果を対象に、ニューマーク法による解析を実施した。図-11に各ケースの解析断面を示す。解析上のすべり面の位置は図-6に示す実験結果と概ね一致することを確認した。ニューマーク法による変位量と実物換算した実験による変位量の関係を図-12に示す。ニューマーク法による変位量は実際の変位量の1/2~2倍程度になっており、定性的にはニューマーク法により本提案補強工の性能を照査できることが分かった。今後、より精緻な評価が可能となる手法を検討していく必要がある。

6. 参考文献

- 1) Enomoto, T. and Sasaki, T. (2015): Several factors affecting seismic behaviour of embankments in dynamic centrifuge model tests, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 4, pp. 813-828.
- 2) Enomoto, T. and Sasaki, T. (2018): Seismic behaviour of reinforced embankments in dynamic centrifuge model tests, *Soils and Foundations*, Vol. 58, No. 1, pp. 212-227.
- 3) Newmark, N. M. (1965): Effect of earthquakes on dams and embankments, 5th Rankine Lecture, *Géotechnique*, No.2.

(発表論文)

第55回地盤工学研究発表会等に論文を投稿する予定である。なお、本研究は茨城大学での卒業研究の一環としても実施しており、当該学生は2018年度更尽会賞（茨城大学内での優秀卒業論文賞）を受賞した。