

不飽和領域を考慮した既設盛土の耐震補強に関する検討

ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社 ○岡 瑛 渡
西日本旅客鉄道株式会社 濱 田 吉 貞
西日本旅客鉄道株式会社 日 高 倫 興

論 文 要 旨

盛土の安定解析に用いる土質定数は、一般的に飽和状態で評価されている。しかし、実際の盛土は降雨時であっても不飽和領域が存在しており、飽和状態で評価するよりも高い安定を有している。そこで、降雨時の土中の不飽和状態を適切に評価することにより、より精度の高い盛土の安定評価ができ、合理的、経済的な盛土の耐震補強設計を行うことができる。そこで本検討では、鉄道盛土を対象として、盛土の不飽和状態を評価した土質定数の設定、および不飽和状態を評価しない場合との耐震補強検討の比較を行った。その結果、不飽和状態を評価した土質定数を用いることで、合理的、経済的な盛土の耐震補強設計を行うことが実証された。

キーワード：鉄道，盛土，不飽和，耐震補強

ま え が き

盛土の安定解析に用いる土質定数は、一般的に飽和状態で評価されている。しかし、実際の盛土は降雨時であっても不飽和領域が存在しており、飽和状態で評価するよりも高い安定を有している。そこで、降雨時の土中の不飽和状態を適切に評価することにより、より精度の高い盛土の安定評価ができ、合理的、経済的な盛土の耐震補強設計を行うことができる。

本検討では鉄道盛土を対象として、土中の不飽和状態を評価した盛土の耐震補強について検討した。本論文ではまず、盛土の概要を述べるとともに、盛土材料の試料採取や各種室内土質試験、浸透流解析の概要を示し、土中飽和度に応じた土質定数の評価方法について記した。次に、耐震診断・耐震補強検討の概要と結果を記した。最後に、今回の耐震補強検討結果と、従来通りの飽和状態で評価された土質定数を用いた場合の耐震補強検討結果を比較・考察し記した。本検討の流れを図-1に示す。

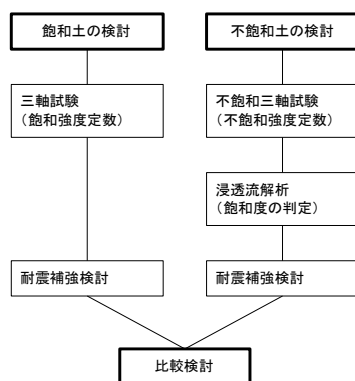


図-1 検討フロー

1. 対象盛土の概要

本検討で対象とする盛土は、複線の鉄道が走行する延長120m程度の盛土であり、最大盛土高さは約5mである。検討断面を図-2に示す。なお、本検討ではBg1、Bg2層を盛土、Bg3層以深は支持地盤として考える。対象盛土の土質定数は次項以降で評価方法を記載するが、支持地盤の土質定数は付近の既存ボーリングデータを用いている。

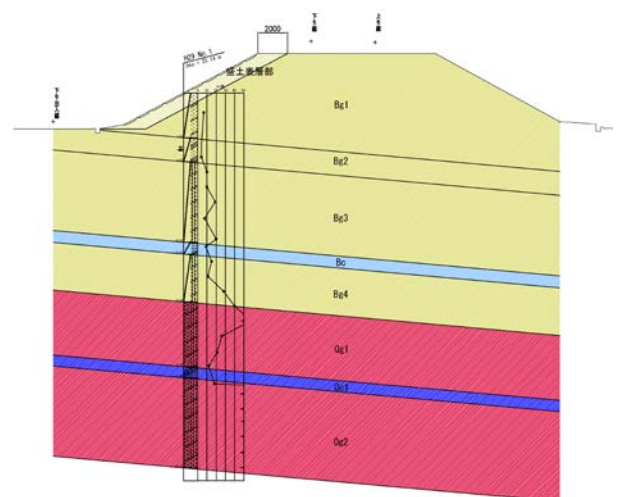


図-2 検討断面

2. 対象盛土の土質定数

対象盛土の耐震補強検討を実施するために、盛土の土質定数を把握する必要がある。まず鉄道盛土から試料を採取し、次に各種室内土質試験を実施した。また浸透流解析を実施し、土中の不飽和状態を評価した。これらを踏まえ、

土中の不飽和状態を評価した土質定数を設定した。以下では、その概要について述べる。

(1) 試料採取

盛土の設計にあたっては、不攪乱試料を採取し、地盤材料試験(物理試験・三軸試験)を実施して設計に用いる土質定数(単位体積重量 γ_t 、内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c 等)を設定することが望ましい。しかし本検討では鉄道盛土を対象としており線路に近接するため、現位置におけるボーリングや不攪乱試料の採取が容易でない。そのため、盛土表面から攪乱試料の採取、現場密度試験を実施し、試験結果に合致するよう、採取した攪乱試料(ただし、4.75mm 通過試料のみを用いる)を再構成することで、各種室内土質試験の供試体とした。ここに現場密度試験の結果より定めた供試体の初期条件を表-1に示す。

表-1 供試体初期条件

土粒子密度	湿潤密度	乾燥密度	含水比
2.638	1.85g/cm ³	1.69g/cm ³	9.54%

(2) 室内土質試験

上記条件で供試体を作成し、室内土質試験を実施した。本検討で実施した主な室内土質試験は以下の通りである。

- ・室内透水試験
- ・保水性試験
- ・飽和三軸試験
- ・不飽和三軸試験

まず、供試体の室内透水試験により、盛土の飽和透水係数は $1.30 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と求まった。また保水性試験を実施し、水分特性曲線を求めた。供試体は比較的透水性がよく、給水過程で低い飽和度で収束する傾向が見られた。得られた試験結果をもとに、後述する浸透流解析で用いる水分特性曲線を、van Genuchten モデル(以下、VG モデル)¹⁾を用いて図-3中に示す曲線として設定した。

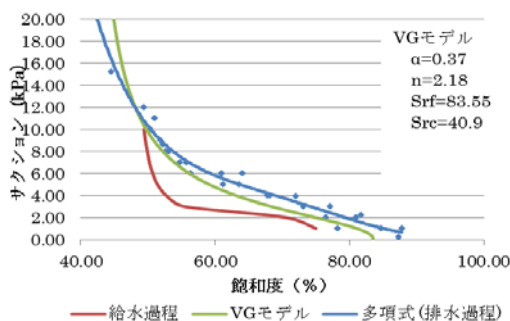


図-3 水分特性曲線

次に単位体積重量、粘着力、内部摩擦角について、供試体初期条件や飽和・不飽和三軸試験により求めた。盛土の単位体積重量は供試体初期条件の湿潤密度より 18.20

kN/m³とした。なお厳密には飽和度の変化に伴って単位体積重量は変化するが、安全側を考慮して一律でこの値とした。内部摩擦角は飽和三軸試験結果より $\phi=35.6$ 度と定めた。粘着力は飽和・不飽和三軸試験を実施し、飽和度に応じた値を求めた。

粘着力の求め方について、まず不飽和三軸試験を初期サクシジョンの大きさを3通り(2.5kPa、5kPa、10kPa)、内部摩擦角 $\phi=35.6$ 度を飽和度の大きさによらず一定とした条件で実施した。その結果、粘着力はそれぞれのサクシジョンの大きさに応じて、表-2の様に求まった。

表-2 粘着力とサクシジョンの関係

サクシジョン (kN/m ²)	0	2.5	5	10
粘着力 c (kN/m ²)	3.5	5.7	7.5	12.7

サクシジョンと粘着力の関係性を把握できたことから、サクシジョンと飽和度の関係を求め、それにより飽和度と粘着力の関係を求める。VG モデルから得られたサクシジョンと飽和度の関係性を表-3に示す。なお飽和度の値は便宜上10%区分に割切って整理している。

表-3 サクシジョンと飽和度の関係

サクシジョン (kN/m ²)	0	2.5	5	10
飽和度 (%)	83.55	71.53 →70	59.10 →60	49.74 →50

以上より求まった飽和度と粘着力の関係性を、表-4に示す。

表-4 飽和度と粘着力の関係

飽和度 (%)	~50	50~60	60~70	70~100
粘着力 c (kN/m ²)	12.7	7.5	5.7	3.5

(3) 浸透流解析

浸透流解析は、盛土内部の含水状態を求め、土中の不飽和状態を評価することを目的としている。まず盛土内部の定常的な飽和状態を評価し、そこに降雨モデルを作用させることにより、降雨時の盛土の飽和度分布を評価することができる。

まず、解析に用いるモデルについて、モデルの断面は現地の測量結果をもとに作成した。対象盛土は左右対象の形状とみなし、半断面としてモデル化した。支持地盤は浸透流解析の結果を用いないが、盛土からの降雨の流出先としての役割を果たしている。支持地盤の広さは、降雨を作用

させた際に支持地盤が満水となり盛土にオーバーフローすることがない様、十分な幅を取ることにした。またモデルの境界条件として、支持地盤が飽和することによって盛土に水位が形成されることがない様、支持地盤に排水条件を設定している。理想的な排水条件は、実際の支持地盤のようにモデルの下端や側面から透水係数に合わせて一定量が常に流出されるよう設定することであるが、より詳細な調査が必要となるため現実的ではない。そこで本検討では、既存ボーリングデータより地下水水位が地表面より-1.4mと把握できたため、支持地盤の地下水水位がモデルの全水頭-1.4mを常に保つよう排水条件を定めた。なお、ここで用いた地下水水位はある特定の時点での値であるため、この値をそのまま用いることが適切であるかは議論が必要であるが、便宜上この値を用いることとした。以上より定めたモデルを図-4に示す。

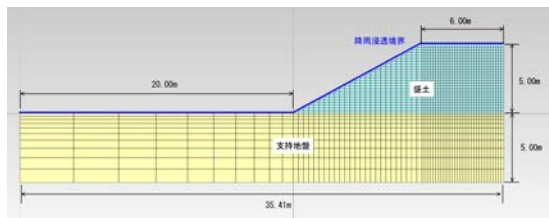


図-4 浸透流解析に用いる解析モデル

次に浸透流解析の初期条件として、盛土内部の定常的な飽和状態の評価が必要である。まず、既存ボーリングデータより地下水水位が地表面より-1.4mと把握できたため、盛土・支持地盤ともに初期全水頭をその値に定めた。その上で、鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物（以下、土構造標準）²⁾に示される初期条件降雨を作用させ、初期状態とした。ここで初期条件降雨とは、定常の盛土の含水状態を求めるための降雨モデルであり、降水日数を1年間の1/3として、1日降雨のあと2日無降雨を繰り返すものである。また1日の降水量は、土構造標準に示される当該地域における最大降雨の設計値である2500mm/yを用い、降雨日数で除した値としている。

以上より定めたモデルについて降雨モデルを作用させ、降雨時の盛土の飽和度分布を評価する。本検討では降雨モデルとして、土構造標準の定める「設計耐用期間中にしばしば起こる降雨（100年確率降雨）」を用いる。降雨パターンは土構造標準の定める「短期型降雨」「長期型降雨」の2種類について検討を実施する。ここで短期型降雨とは、台風などに代表される様な比較的短い時間に生じる降雨を、長期型降雨とは、梅雨時期の様な時雨量はあまり多くはないが長期にわたる降雨をもとに設定されたものである。この結果のうち、盛土全体の飽和度が大きくなった降雨条件の結果を用いて安定解析を実施する。短期型降雨で

は、盛土表層部では飽和度が上昇したが、内部では初期状態からほとんど変化が見られなかった。長期型降雨では、盛土の底面から飽和度が上昇したものの、全体的に飽和度は大きく上昇しなかった。そのため、本検討では短期型降雨の結果を用いることとした。浸透流解析より求めた飽和度分布を図-5、図-6に示す。

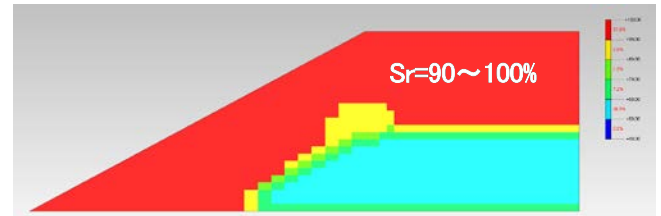


図-5 飽和度分布（短期型降雨）

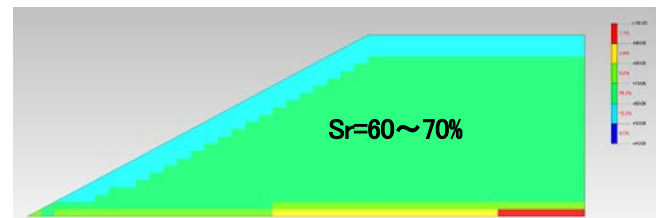


図-6 飽和度分布（長期型降雨）

浸透流解析の結果より、不飽和状態を考慮した地層区分を図-7のように定めた。またその際の土質定数を表-5のように定めた。Bg1層については、図-5より求めた飽和度の分布に合わせてBg1-①②③の3層に区分した。粘着力の値は表-4に基づいて設定した。Bg2層は盛土として評価するため、Bg1層と同様に浸透流解析の結果を用いた。Bg3層は深は先述の通り支持地盤として評価し、土質定数は既存ボーリングデータの値を用いた。また、土構造標準より盛土ののり肩から2.0mの表層部は、盛土深部と比較して転圧等が不十分であることを考慮し、粘着力を1/2に設定した。

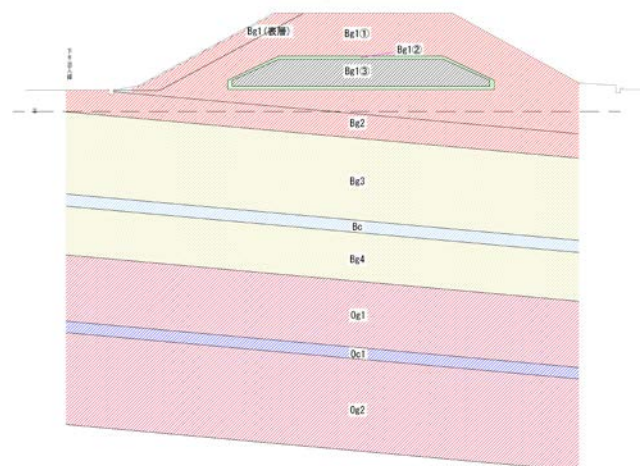


図-7 不飽和状態の地層構成

表-5 不飽和状態の設計用値

地層区分	区分	平均N値	設計用値		
			γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Bg1①	砂質土	7	18.20	3.50	35.60
Bg1②	砂質土	7	18.20	5.70	35.60
Bg1③	砂質土	7	18.20	7.50	35.60
Bg1 (表層)	砂質土	7	18.20	1.75	35.60
Bg2	砂質土	4	18.20	3.50	35.60
Bg3	砂質土	13	20.00	6.00	38.00
Bc	粘性土	9	15.00	56.30	0.00
Bg4	砂質土	18	18.00	0.00	32.60
Og1	砂質土	36	20.00	5.00	43.40
Oc1	粘性土	12	16.00	75.00	0.00
Og2	砂質土	269	20.00	0.00	35.90

ている。また、図-9内の地層の番号(以下、層No)と図-7の地層区分との関係性を表-6に示す。

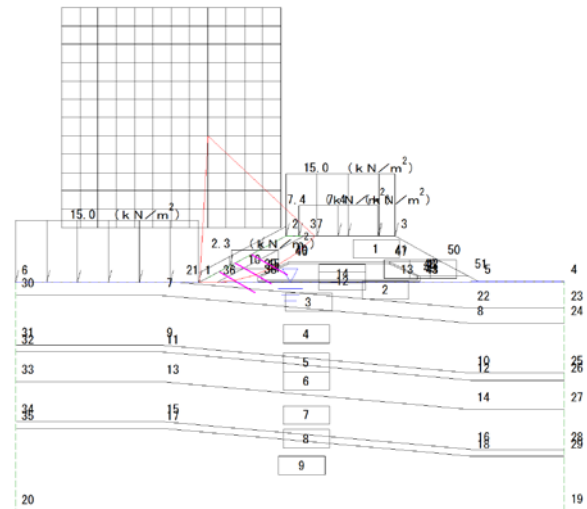


図-9 ニューマーク法の検討断面

3. 耐震診断・耐震補強検討

(1) 解析手法

耐震診断・耐震補強検討は、地震時の盛土の変形量が許容値以内に収まっているかを評価することで実施した。

盛土の変形量はニューマーク法により求めた。ニューマーク法は、すべり土塊が剛体であり、すべり面における応力-ひずみ関係が剛塑性であると仮定して、すべり土塊の滑動変位量を計算する方法である。そのため、地震時残留変位量が地震動の大きさだけでなく、降伏震度を越える地震動の作用回数および継続時間の影響を大きく受けるといった盛土の特性を直接的に考慮できる。盛土の変形量の制限値は、盛土の被害が軽微なもので収まるよう、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(以下、耐震標準)³⁾の定める値である地震時沈下量20cm未満とした。

ニューマーク法で用いる地震動については、耐震標準に記載のある「地表面設計地震動(土構造物照査波)」より図-8に示す地震波を用いる。なお、当該盛土の支持地盤は、耐震標準に準拠した算出方法より、洪積層と沖積層の堆積するようないわゆる普通地盤に相当する、G3地盤と判定されている。

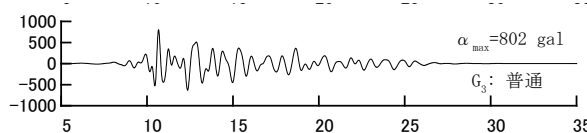


図-8 地表面設計地震動(土構造物照査波)

(2) 検討断面

本検討でニューマーク法を用いて耐震診断・耐震補強検討を実施する検討断面を図-9に示す。なお図-9には、後述する耐震補強検討時のすべり線と補強材も記載し

表-6 ニューマーク法で用いる設計用値

層No	地層区分	区分	平均N値	設計用値		
				γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
1,2,11	Bg1①	砂質土	7	18.20	3.50	35.60
12,13	Bg1②	砂質土	7	18.20	5.70	35.60
14	Bg1③	砂質土	7	18.20	7.50	35.60
10	Bg1 (表層)	砂質土	7	18.20	1.75	35.60
3	Bg2	砂質土	4	18.20	3.50	35.60
4	Bg3	砂質土	13	20.00	6.00	38.00
5	Bc	粘性土	9	15.00	56.30	0.00
6	Bg4	砂質土	18	18.00	0.00	32.60
7	Og1	砂質土	36	20.00	5.00	43.40
8	Oc1	粘性土	12	16.00	75.00	0.00
9	Og2	砂質土	269	20.00	0.00	35.90

(3) 耐震診断結果

盛土の耐震診断は、ニューマーク法により地震時の盛土の変形量が許容値内に収まっているか確認することで実施する。本検討では、飽和状態の盛土と、浸透流解析の結果を適用した不飽和状態の盛土に対して耐震診断を実施した。その結果、飽和状態・不飽和状態ともにL2地震時に照査を満足しなかったことが確認できた。耐震診断の結果を表-7に示す。

表-7 耐震診断結果

要求性能	降伏震度	円弧すべり変形量 (mm)	変形量の制限値 (mm)	照査値	判定 (≤ 1.0)
飽和	0.285	519	200	2.595	NG
不飽和	0.285	519	200	2.595	NG

(4) 耐震補強検討結果

耐震補強に用いる工法は、盛土に多数の補強材を挿入する地山補強土工法とした。補強材は材径 90mm、芯材は D22、SD345 を使用した。また補強材の水平間隔は、既設のり面工との干渉を考慮して 2.0m とした。これを用いた耐震補強検討の結果を表-8 に示す。

表-8 耐震補強検討結果

要求性能	降伏震度	円弧すべり変形量 (mm)	変形量の制限値 (mm)	照査値	判定 (≤ 1.0)
飽和	0.388	183	200	0.915	OK
不飽和	0.409	147	200	0.735	OK

4. 結論

地山補強土工法による耐震補強設計について、飽和状態、不飽和状態での比較結果を表-8 に示した。補強に必要な地山補強材の長さを 4.5m と揃えたところ、照査値では不飽和状態の方が 20%程度の余裕を確保できていることが確認できる。

そのため、盛土の不飽和状態における土質定数を評価することで、盛土の土質定数を過小評価せずに、合理的・経済的な耐震補強が実施できることが実証された。

あとがき

本検討では盛土の不飽和状態における土質定数を評価することで、合理的・経済的な耐震補強が実施できることを示すことができた。しかし盛土の耐震補強検討において、降雨作用と地震作用の組合せについての見解は少ない。本検討では、100年確率降雨と L2 地震動を組み合わせているため、従来の手法よりは合理的な設計ではあるものの、作用降雨を過大に見積もっているとも考えられる。今後は、降雨作用と地震作用の組合せについて、より議論を深める必要があると考える。

参考文献

- 1) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., No.44, pp.892~898, 1980
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）、丸善、2007
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、2012