

「SECURE-G 工法」 設計・施工マニュアル

令和 7 年 10 月

序

1964 年 1 月新潟地震における建物倒壊等の被害により、地盤の液状化は世界中で強く認識されるようになった。1995 年 1 月以降兵庫県南部地震における大規模地震から従来の 2～3 倍といった大きな地震動に対する設計法の開発が必要となり、以降性能設計の導入に至ってきている。土構造物についても設計法の見直しが行われてきている。防災意識の高まりの中で緊急輸送路の確保など、盛土における耐震性の確保が求められてきている。

平地部における地震時の道路盛土の被害は、主として基礎地盤が液状化することにより生じる。地下水位の高い飽和した砂地盤上の盛土が液状化の被害を受ける。

従来の液状化対策は地盤改良工が主体であり、液状化の発生そのものを防止する工法であった。また、レベル 2 地震動については周辺の重要性を考え、影響が大きいと思われる場合に詳細な検討の必要性が高まっている。

対策が必要とされる際に、従来からの発生防止対策ではコストが著しく増大するなど、現実的に対応不可能なケースが現れる。また、性能設計への動きの中で、変形を許すものの修復可能な限界、あるいは破壊に至らない変形を照査していく考え方が導入されてきている。

このような現状認識の中で、本 SECURE-G 工法 設計・施工マニュアルは実績の少なかったジオシンセティックスを用いた対策工を、より信頼性の高いかつ設計可能なものとするべく提案している。ここで取り上げるジオシンセティックス+碎石の当工法は液状化の発生そのものは許容するが、沈下量を低減し、側方変位を大きく抑制し、盛土の機能を確保しようとするものである。

照査方法は、液状化層の剛性低下を考慮した静的 FEM(ALID)をベースとしている。これは、本 SECURE-G 工法に関する動的遠心载荷模型実験及び動的有効応力 FEM を用いた数値シミュレーション並びに静的 FEM(ALID)による再現解析により、対策後の盛土の沈下量や側方変位量を定量的に評価する妥当性が検証されたためである。社会的にリスクマネジメントが必要な状況のもと、定量的に設計する方法を性能設計の考え方に従って、コストパフォーマンスの優れた設計・施工マニュアルを提示している。これにより従来に無かった低コストな液状化対策が可能となり、地震災害の危険性が逼迫してきている中で、その自然災害への備え・軽減への一助とするものである。

目 次

改定項目について	1
第1章 総説	2
1.1 適用範囲	2
1.2 SECURE-G 工法の概要	3
第2章 調査	6
2.1 調査の基本的な考え方	6
2.2 地盤調査方法	6
第3章 設計に関する一般事項	10
3.1 基本方針	10
3.1.1 設計の基本	10
3.1.2 想定する作用	11
3.1.3 盛土の要求性能	12
3.1.4 性能の照査	14
3.2 設計に用いる荷重	19
3.3 地盤定数	22
3.4 使用材料	24
3.4.1 一般	24
3.4.2 ジオシンセティックス	25
3.4.3 砕石	26
3.4.4 不織布等	27
第4章 SECURE-G 工法の設計	28
4.1 設計の基本的な考え方	28
4.2 SECURE-G 工法の安定性照査	30
4.3 常時の作用に対する安定性照査	32
4.3.1 基本的な考え方	32
4.3.2 常時の作用に対する盛土の沈下	33
4.3.3 常時の作用に対する盛土の安定	33
4.3.4 常時の作用に対する周辺地盤の変形	34
4.4 地震動の作用に対する安定性照査	34
4.4.1 基本的な考え方	34
4.4.2 地震動の作用に対する盛土の変形	40
4.4.3 SECURE-G 工法における液状化時の変形照査	41

第5章	施工と施工管理	50
5.1	施工の基本方針	50
5.2	施工手順	50
5.3	施工管理	54
5.4	沈下管理及び安定管理	56
第6章	維持管理	57
6.1	維持管理の基本方針	57
6.2	通常時の維持管理	57
6.3	災害時の復旧対策	57
6.4	施工台帳	58
参考資料 1	：設計計算例	60
参考資料 2	：使用材料例	64
付属資料 1	：不完全液状化層の範囲について	66

改定項目について

令和 7 年 10 月

1 : 許容変位量

変更箇所 3.1.4 性能の照査

- ・ SECURE-G 工法における許容変位量に関する記載を追記

令和 7 年 4 月

1 : SECURE-G 構造仕様の設定法

変更箇所 4.4.3 SECURE-G 工法における液状化時の変形照査

- ・ SECURE-G 構造仕様の設定の際に計算ソフトによる算出を推奨する記載を追記

2 : 低減係数 DE 算出の方法

変更箇所 4.4.3 SECURE-G 工法における液状化時の変形照査

- ・ 低減係数 DE を算出する際に不完全液状化層(FL=1.2)を含めた上で算出する記載を追記

3 : 不完全液状化層 定義

変更箇所 4.4.3 SECURE-G 工法における液状化時の変形照査

- ・ 不完全液状化層について対象範囲を碎石下面 1m のみに変更

4 : 設計計算例

変更箇所 参考資料 1 : 設計計算例

- ・ 設計計算例を修正した不完全液状化層で計算を実行

5 : 不完全液状化層説明資料

変更箇所 付属資料 1 : 不完全液状化層の範囲について

- ・ 不完全液状化層変更に関する説明資料を追加

令和 3 年 1 月

1 : RC 碎石の使用の可否

変更箇所 3.4.3 碎石

- ・ RC 材について使用不可から地下水位が碎石層底面から 1m 以上深い位置であれば使用可に変更

第1章 総 説

1.1 適用範囲

SECURE-G工法 設計・施工マニュアル（以下、本マニュアル）は、液状化の発生が予測される軟弱地盤上に構築される盛土の安定対策及び液状化時の盛土の変形抑制対策としての「SECURE-G工法」の調査、設計、施工及び維持管理に適用する。

本マニュアルは、液状化の発生が予測される軟弱地盤上に構築される盛土の安定対策及び地震時における基礎地盤の液状化による盛土の変形を低減させ、修復を容易にする「SECURE-G (Stabilization of Embankment Construction Utilizing REinforcement with Gravel) 工法」の調査、設計、施工及び管理の基本的な考え方と手法、留意事項について示したものである。

本マニュアルの構成を以下に示す。

第1章 総説

本マニュアルの適用範囲及びSECURE-G工法の概要を示す。

第2章 調査

SECURE-G工法を実施するに当たって、必要となる調査の基本的な考え方及び特に重要である地盤調査方法を示す。

第3章 設計に関する一般事項

SECURE-G工法の設計に当たって要求される盛土の性能と性能照査に関する基本的な考え方を示す。

第4章 SECURE-G工法の設計

盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）であるSECURE-G工法の設計法について規定し、必要な性能を確保していることを照査するための手法等を示す。

第5章 施工と施工管理

SECURE-G工法の施工及び施工管理の考え方並びに軟弱地盤上の盛土の情報化施工等を示す。

第6章 維持管理

SECURE-G工法を実施した軟弱地盤上の盛土の維持管理の基本的な考え方を示す。

本マニュアルの適用に当たっては、以下の基準・指針類を参考に行うものとする。

なお、これらの基準・指針類が改訂された場合は、新旧の内容を十分に比較したうえで適切に準拠するものとする。

- 1) 「道路構造令」（平成15年 政令321号）
- 2) 「道路土工構造物技術基準」（平成27年 国土交通省）
- 3) 「道路土工構造物技術基準・同解説」（平成29年 日本道路協会）
- 4) 「道路土工要綱」（平成21年 日本道路協会）

- 5) 「道路土工・盛土工指針」(平成22年 日本道路協会)
- 6) 「道路土工－軟弱地盤対策工指針」(平成24年 日本道路協会)
- 7) 「道路橋示方書・同解説」(平成29年 日本道路協会)
- 8) 「設計要領第一集 土工編」(平成27年 NEXCO)
- 9) 「地盤調査法」(平成15年 地盤工学会)
- 10) 「地盤調査の方法と解説」(平成25年 地盤工学会)
- 11) 「地盤材料試験の方法と解説」(平成21年 地盤工学会)
- 12) 「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル」(平成25年 土木研究センター)
- 13) 「河川構造物の耐震性能照査指針・解説Ⅱ. 堤防編」(平成28年 国土交通省水管理・国土保全局)
- 14) 「土木研究所資料 河川堤防の液状化対策の手引き」(平成28年 土木研究所)
- 15) 「土木研究所資料 河川堤防の液状化対策の手引き＜設計計算例＞」(平成29年 土木研究所)
- 16) 「道路震災対策便覧 (震災復旧編) 平成18年度改訂版」(平成19年 日本道路協会)
- 17) 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No. 17-4」(平成20年 新道路技術会議)

1.2 SECURE-G 工法の概要

SECURE-G 工法は、液状化しない碎石層でジオシンセティックスを挟み込むことにより、ジオシンセティックスの引張剛性による補強効果を確保し、ジオシンセティックスと碎石が盤としての機能を発揮する。また、碎石層の持つ排水効果により、地震時に発生する周辺地盤の過剰間隙水圧を速やかに消散させる効果がある。これらの複合効果により、液状化後の盛土の変形を抑制する。

SECURE-G工法の一般的な構造を図1.2-1に示す。図に示すように、SECURE-G工法は、碎石層によってジオシンセティックスの上下を挟み込む単純な構造が特長である。ジオシンセティックスを用いた盛土補強工法に、液状化しない碎石層を組み合わせることにより、ジオシンセティックスの引張剛性による盛土基礎を補強する効果と碎石の変形を拘束する効果により、ジオシンセティックスと碎石が一体となり盤としての機能を発揮する。また、碎石層は周辺地盤の過剰間隙水圧を速やかに消散させる効果がある。

SECURE-G工法は、これらの効果が複合し、軟弱地盤対策におけるすべり破壊防止効果と不同沈下抑制効果に加え、地震時の液状化変形抑制対策として、盛土の変形を抑制する効果を発揮する。

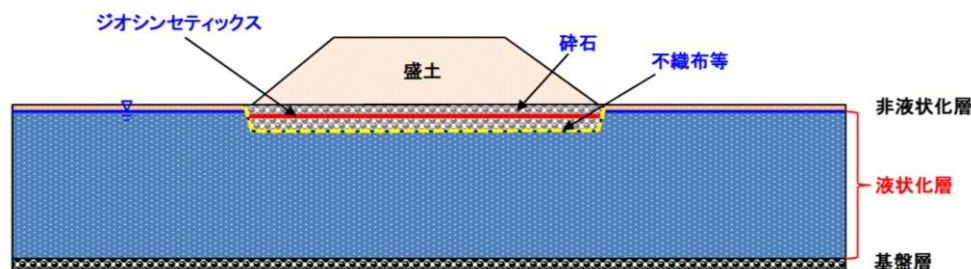


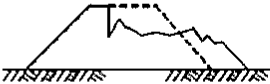
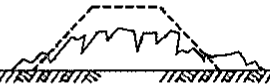
図1.2-1 SECURE-G工法の一般的な構造

SECURE-G工法は、基礎地盤の液状化の発生と液状化時の盛土の変形を許容する工法であるが、基礎地盤の液状化を生じさせない対策工法（サンドコンパクション工法、動圧密工法、TOFT工法等）に比べ、単純な構造であることから、施工が容易で、大幅にコストを低減させることができる。

液状化発生時に SECURE-G 工法が盛土の変形を抑制するメカニズムは、次の 3 つの効果による。

- ① 碎石層が基礎地盤の液状化時にも剛性のある盤として機能する。
- ② 碎石層内に敷設されているジオシンセティックスが基礎地盤の液状化時のすべりに対して抵抗力として機能する。
- ③ 透水性の碎石層が碎石層周辺の砂地盤の液状化を抑制する。

SECURE-G 工法対策後の盛土は、基礎地盤の液状化時に盛土形状をある程度保ちつつ一様に沈下する。図 1.2-2 の「道路震災対策便覧（災害復旧編）」平地盛土の被災パターンⅣ型に類似している。

被災パターン	被災模式図	被害形態
I 型		のり面の流出，崩壊または亀裂の段差の発生が道路車線まで及ばず，のり肩にかざられるもの。
II 型		盛土のすべり崩壊または亀裂，段差の発生が道路車線まで及ぶもの。
III 型		破壊が基礎地盤におよび盛土形状が原型をとどめないもの。
IV 型		盛土の一様な沈下に伴って，盛土形状をある程度保ちつつ変形したもの。
V 型		構造物背面の盛土が沈下および亀裂を起こしたもの。

(2) 被災度分類表

被災パターン	被災度	被災度の説明
I	B	亀裂幅 15cm 以上または段差量 20cm 以上
	C	亀裂幅 15cm 未満，かつ段差量 20cm 未満
II	A	亀裂幅 30cm をこえ，かつ段差量 50cm をこえたもの
	B	亀裂幅 30cm 以下または段差量 50cm 以下
III	A	—
IV	B	沈下量 50cm 以上
	C	沈下量 50cm 未満
V	B	沈下量 20cm 以上
	C	沈下量 20cm 未満

図 1.2-2 「道路震災対策便覧(災害復旧編)」の平地盛土の被災パターン分類

SECURE-G工法における設計は、必要な変形抑制性能を実現するために、碎石層厚と、補強材として用いるジオシンセティックスの必要引張剛性、引張強度を決めることである。基本的な使用材料を表1.2-1に示す。

また、碎石層の透水性が低下しないように、基礎地盤と碎石層の間には細粒分流入防止のフィルターとして不織布等を敷設する。これは構造部材ではないため、設計計算では考慮しない。

表1.2-1 SECURE-G工法で使用する材料

ジオシンセティックス	地盤が液状化時に盛土のすべり破壊及び変形を抑制するだけの引張強さを有し、施工時の碎石層内での敷設、締固めに対し十分な耐久性を有する摩擦特性に優れた材料
碎石	盛土の安定性に必要な強度特性、透水性及び耐久性等を有する材料 (クラッシュラン(C-40)又は相当のもの)
不織布等	基礎地盤の細粒分の流入を防止する材料

第2章 調査

2.1 調査の基本的な考え方

SECURE-G 工法の実施に当たっては、合理的かつ経済的な盛土及び SECURE-G 工法の設計、施工及び維持管理を行うために必要な調査を効率的かつ的確に実施しなければならない。

SECURE-G 工法の実施に当たっては、合理的かつ経済的な盛土及び SECURE-G 工法の設計、施工及び維持管理を行うために、地形や地質等の地盤条件の他、盛土材料、周辺構造物の有無並びに施工、環境条件等について適切に調査を実施しなければならない。SECURE-G 工法の調査は、道路建設等の進捗状況に応じて他の構造物と同時に進められ、内容の精度を深めながら系統的に実施される。したがって、調査に当たっては、道路土工等の全体の流れについて理解する必要がある。

道路土工全体に関する調査については、「道路土工要綱」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等に示されているので、参照されたい。

ここでは、地盤調査について記述する。

2.2 地盤調査方法

地盤調査は、盛土及び本工法の設計に必要な資料を得ることを目的として、適切な方法で行う。

地盤調査は、主に盛土等の構造物の設計に利用するため、実施するものである。SECURE-G 工法においては、地盤の地層分布、地下水の位置、各層の強度・変形特性及び液状化特性等の種々の情報が必要となる。

以上のような情報を得るためには、種々の調査・試験方法があるので、構造物の規模、重要度及び周辺への影響等設計上の種々の条件を勘案し、適切な調査を計画・実施する必要がある。

(1) サウンディング

サウンディングは軟弱地盤の厚さ、土層の成層状況及び中間砂層の存在等を明らかにし、設計に際して土層区分をするための判断資料を得るためや、ボーリング孔を利用して直接地盤の変形特性や強度を調査するために行う。

規格・基準化されているサウンディングを以下に示す。

1) 日本工業規格（JIS）

- ・ JIS A 1219 「標準貫入試験方法」
- ・ JIS A 1220 「機械式コーン貫入試験方法」
- ・ JIS A 1221 「スウェーデン式サウンディング試験方法」

2) 地盤工学会基準 (JGS)

- ・ JGS 1411 「原位置ベーンせん断試験方法」
- ・ JGS 1431 「ポータブルコーン貫入試験方法」
- ・ JGS 1433 「簡易動的コーン貫入試験方法」
- ・ JGS 1435 「電気式コーン貫入試験方法」

また、サウンディングではないが、PS 検層(速度検層)を実施すると、1m 毎に P 波、S 波速度を測定し、微小ひずみ領域における剛性等の情報を得ることができる。

(2) ボーリング

ボーリングは土質や成層状況を把握し、必要に応じてサンプリングや原位置試験等を実施するために行う。ボーリング位置はサウンディング結果を参考にして、軟弱層の厚い箇所や最も強度の弱いと考えられる地点、さらに砂質土では液状化する可能性がある地点を選定する。道路縦断方向の間隔は一般的には、100m～300m 程度の範囲で一本実施することが望ましい。また、地形的にひとつの軟弱地盤地域とみなされる範囲内では、少なくとも 2 地点以上でのボーリングを実施することが望ましい。

(3) サンプリング

サンプリングは、地盤を構成する軟弱層の土質試験試料を得るために行う。適切なサンプラーを利用し、乱さない試料の採取を行わなければならない。

サンプリング位置はその目的に応じて実施するが、可能であれば、先行したボーリングやサウンディング結果を参考にすることが望ましい。サンプリングの頻度は、ボーリングの頻度に準じるが、土質や地層構成の類似性等を考慮し、類似性が高い場合は頻度を小さくし、逆の場合には頻度を大きくするなどの工夫が望ましい。

(4) 土質試験

解析・設計計算のための地盤定数を求めるためには、 N 値などのサウンディングに適用する経験式もよく用いられるが、検討の精度を向上させるためには、乱さない試料をサンプリング後、適切な土質試験を実施し、その結果を勘案して地盤定数を設定することが望ましい。ただし、サンプリング試料による試験結果には乱れの影響も考えられるので、乱れがどのような影響を与えるかを考慮することも重要である。また、バラツキのある試験結果が得られた場合には、統計処理など適切な方法で代表値を設定することが望ましい。

表 3.3-1 に示した調査項目から合理的な設計を行うのに必要な項目を実施する。

1) 判別分類に関する試験

設計を行うに際しての注意点、問題点及び着目点等を把握するためと、設計用地盤モデルを作成するために、土層構成を示す土層断面図を作成する。その際の層区分に、自然含水比、土粒子の密度、液性限界、塑性限界、粒度及び有機物含有量（泥炭質地盤の場合）等の土質試験結果が参考となる。

このうち、自然含水比は比較的簡便に実施でき、土層の違いを識別するために有用なものであり、また強度や変形特性とも関係があるので、できるだけ多く異なる深さで求める。

2) 圧密特性

盛土等に伴う、地盤の沈下量や沈下速度等の圧密沈下に関する照査を行うには、Terzaghi の圧密理論が適用されることが多い。これに必要なデータを得るために圧密試験を実施する。圧密や強度・変形特性等は、同一土層においても必ずしも同じではない。このため、できるだけ多くの試験を実施して、設計数値の採択が合理的にできるようすることが望ましい。多数の実施が難しい場合には、サウンディングなどの結果を利用し、代表値に近いデータが得られているかどうかの検証を行うことも重要である。

3) 強度・変形特性

盛土の安定検討や FEM 等による変形検討の実施には、地盤の強度・変形特性が必要である。地盤材料の破壊はほとんどの場合、せん断で決定されるので、せん断強度を試験で評価する。排水条件の違いで、粘性土の短期安定問題等を対象とした非排水せん断強度と、砂質土や長期安定問題を対象とした排水せん断強度があり、それぞれを求めるために適切な試験を実施する。一般に、同一地層でも強度や変形特性にはバラつきがあるため、試験は複数個行うことが望ましい。例えば、飽和粘性土の非排水せん断強度を求めるために実施する一軸圧縮試験は、同一土層内の 2～3 深度で実施することが望ましい。三軸圧縮試験は、強度定数（粘着力と内部摩擦角）を求めるのに少なくとも 3 個の供試体について圧密圧力を変えて試験するのを原則とする。三軸圧縮試験の圧密圧力は盛土前の土かぶり圧とこれに最大盛土荷重を加えた圧力の間で異なる大きさに設定する。上記の中で、三軸 UU 試験は原理的に、一軸圧縮試験と同様に、 $\phi=0$ 法における非排水せん断強さを求める試験であり、圧密を伴う三軸圧縮試験とは全く異なるので、結果の利用には注意が必要である。

4) 地震時特性

耐震性に関する検討は、大別して、盛土あるいは基礎地盤の地震時の応答特性、液状化の発生の有無及び液状化時の残留変形にわけられる。

特に、土工構造物の場合は加速度応答などよりも、残留変形が問題になることが多く、液状化が懸念される場合は注意が必要である。

液状化判定には、通常 N 値、標準貫入試験用サンプラーで採取された試料の物理試験及び単位体積重量がわかれば、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」等の方法で実施できる（3.2(3)参照）。

検討の精度を高める目的で、動的せん断強度比を「土の繰返し非排水三軸試験」から求め、地震時せん断応力比を「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験」や「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験」の結果を用いて求めることもできる。しかし、これらの試験は細粒分の少ない砂質土の場合、試料の乱れの影響を受けやすく、本来の強度・変形特

性よりも大幅に低下した結果が得られることもあるため、凍結サンプリングを行うなど、試料の採取は十分注意して行う必要がある。

(5) その他

盛土材料に関しては、設計時点で使用予定の材料が決まっていない場合も多く、結果として一般的な値を設計用地盤定数として用いる場合が多い。しかし、施工時点で締固め特性、乱した土のC B R及び締固めた土のコーン指数等が実施される場合が多いが、設計時点の定数と大きく異なる場合には、設計の見直しが必要かどうかを検討する必要がある。

第3章 設計に関する一般事項

3.1 基本方針

3.1.1 設計の基本

- (1) 軟弱地盤上の盛土及び軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）であるSECURE-G工法の設計（以下、SECURE-G工法の設計）に当たっては、構築する盛土の使用目的との適合性、安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の確実性と容易さ、環境との調和及び経済性を考慮しなければならない。
- (2) SECURE-G工法の設計に当たっては、想定する作用に対して盛土の要求性能を設定し、それを満足することを照査する。
- (3) SECURE-G工法の設計は、実験や解析等から妥当とみなせる第3章及び第4章に基づいて行う。

(1) 設計における留意事項

SECURE-G 工法は盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）であり、設計に当たって常に留意しなければならない基本的な事項を示したものである。

(2) 要求性能と照査

SECURE-G 工法の設計に当たっては、原則として、(1)に示した留意事項のうち、構築する盛土の使用目的との適合性、安全性について、「3.1.2 想定する作用」に示す作用に対して安全性、使用性、修復性の観点から軟弱地盤上の盛土の要求性能を設定し、盛土がそれらの要求性能を満足することを照査する。要求性能は、土工構造物に関連する「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等に示す事項を満足するように設定する。

(3) 設計手法

道路土工の調査、計画、設計、施工、維持管理の考え方や留意点を示した「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」は、性能設計の枠組みを導入している。「道路土工－軟弱地盤対策工指針」の「第4章 設計に関する一般事項」において、軟弱地盤上の土工構造物及び対策工の設計の基本的な考え方として、「設計にあたっては、原則として、使用する目的との適合性、機能性、安全性について想定する作用に対して土工構造物の安全性、使用性、修復性の観点から要求性能を設定し、それを満足することを照査する」ことが示された。設計では、理論的で妥当性を有する方法や実験等による検証がなされた方法、これまでの経験・実績から妥当とみなせる方法等、適切な知見に基づいて行うものとするとしている。また、SECURE-G工法が対象としている液状化の変形問題等は、様々な解析手法が提案されており、設計条件や目的に適した手法を選定するとともに、軟弱地盤の層厚や土性について正確な情報を得て、入力パラメータに反映させ、さらに解析結果を十分に吟味して採用することが重要とされている。

SECURE-G 工法は、これらの問題点を踏まえ、理論的で妥当性を有する実験と解析により、その耐震性能を満たすとされている第3章、第4章に示す設計手法を用いて設計を行うこととする。

3.1.2 想定する作用

SECURE-G 工法の設計に当たっては、施工中及び供用期間中において想定される作用を考慮するものとする。

SECURE-G 工法の設計に当たって考慮しなければならない作用の種類については、「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等を参考に適切に設定する。

「道路土工－盛土工指針」では、次のように記述されている。

盛土の設計に当たって想定する作用は、以下に示すものを基本とする。

- (1) 常時の作用
- (2) 降雨の作用
- (3) 地震動の作用
- (4) その他

「道路土工－盛土工指針」（平成 22 年 日本道路協会）より

設計で想定する作用は、盛土の設置個所等の諸条件によって適宜選定するものとする。

(1) 常時の作用

常時の作用としては、自重や載荷重の作用等、常に盛土に作用すると想定される作用を考慮する。

(2) 降雨の作用

降雨の作用は、盛土の安定性、排水工の断面計算、のり面保護工、地下排水工の設計で考慮する。

盛土の安定性の照査において想定する降雨の作用については、地域の降雨特性、盛土の立地条件、路線の重要性、事前通行規制との併用等を鑑み適切に考慮する。

(3) 地震動の作用

地震動の作用としては、レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動の 2 種類の地震動を想定する。ここに、レベル 1 地震動とは供用期間中に発生する確率が高い地震動、また、レベル 2 地震動とは供用中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動をいう。さらに、レベル 2 地震動としては、プレート境界型の大規模な地震を想定したタイプ I の地震動及び内陸直下型地震を想定したタイプ II の地震動の 2 種類を考慮することとする。

レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動としては、「道路土工要綱・巻末資料」を参照するのがよい。ただし、想定する地震動の設定に際して、対象地点周辺における過去の地震情報、活断層情報、プレート境界で発生する地震の情報、地下構造に関する情報、表層の地盤条件に関する情報、既往の

強震観測記録等を考慮して対象地点における地震動を適切に推定できる場合には、これらの情報に基づいて地震動を設定してもよい。

(4) その他

その他の作用としては、低温による凍上等の環境作用、河川やため池での水圧や浸透水の作用等があり、盛土の設置条件により適宜考慮する。

3.1.3 盛土の要求性能

SECURE-G 工法の設計に当たっては、想定する作用に対して、構築する盛土の使用目的との適合性、安全性について、盛土に連続又は隣接する構造物等の要求性能・影響を考慮して、安全性、供用性（使用性）、修復性の観点から、盛土の要求性能を設定することを基本とする。

盛土の要求性能については、目的とする土工構造物の構造や適用条件を十分踏まえ、「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工—盛土工指針」及び「道路土工—軟弱地盤対策工指針」等を参考に設定する。「道路土工構造物技術基準・同解説」では、要求性能を設定する際には、橋梁取付け部の盛土等、連続する構造物の要求性能との整合性を規定している。

道路盛土の要求性能について、「道路土工—盛土工指針」では、次のように記述されている。

- (1) 盛土の設計に当たっては、使用目的との適合性、構造物の安全性について、安全性、供用性、修復性の観点から、以下の(2)～(4)に従って要求性能を設定することを基本とする。
- (2) 盛土の要求性能の水準は、以下を基本とする。
- 性能1：想定する作用によって盛土としての健全性を損なわない性能。
- 性能2：想定する作用による損傷が限定的なものにとどまり、盛土としての機能の回復が速やかに行い得る性能。
- 性能3：想定する作用による損傷が盛土として致命的とならない性能。
- (3) 盛土の重要度の区分は、以下を基本とする。
- 重要度1：万一損傷すると交通機能に著しい影響を与える場合、あるいは隣接する施設に重大な影響を与える場合。
- 重要度2：上記以外の場合。
- (4) 盛土の要求性能は、想定する作用と盛土の重要度に応じて、上記(2)に示す要求性能の水準から適切に選定する。 「道路土工—盛土工指針」（平成22年 日本道路協会）より

(1) 盛土に必要とされる性能

想定する作用に対して、使用目的との適合性、構造物の安全性について、安全性、供用性、修復性の観点から要求性能を設定する。安全性とは、想定する作用による盛土の変状によって人命を損なうことのないようにするための性能をいう。供用性とは、想定する作用による軽微な変形や損傷に対して、盛土が本来有すべき通行機能や避難路、救助・救急・医療・消火活動・緊急物資の輸送路として

の機能を維持できる性能をいう。修復性とは、想定する作用によって生じた損傷を修復できる性能をいう。

(2) 盛土の要求性能の水準

盛土の要求性能の水準は以下を基本とした。

性能 1 は、想定する作用によって盛土としての健全性を損なわない性能と定義した。性能 1 は安全性、供用性、修復性すべてを満たすものである。盛土の場合、長期的な沈下や変形、降雨や地震動の作用による軽微な変形を全く許容しないことは現実的ではない。このため、性能 1 には、通常の維持管理程度の補修で盛土の機能を確保できることを意図している。

性能 2 は、想定する作用による損傷が限定的なものにとどまり、盛土としての機能の回復が速やかに行い得る性能と定義した。性能 2 は安全性及び修復性を満たすものであり、盛土の機能が応急復旧程度の作業により速やかに回復できることを意図している。

性能 3 は、想定する作用による損傷が土工構造物として致命的とならない性能と定義した。性能 3 は供用性、修復性は満足できないが、安全性を満たすものであり、盛土には大きな変状が生じて、盛土の崩壊等により隣接する施設等に致命的な影響を与えないことを意図している。

(3) 盛土の重要度

重要度の区分は、盛土が損傷した場合の道路の交通機能への影響と、隣接する施設に及ぼす影響の重要性を総合的に勘案して定める。

盛土が損傷した場合の道路の交通機能への影響は、必ずしも道路の規格による区分を指すものではなく、迂回路の有無や緊急輸送道路であるか否か等、万一損傷した場合に道路のネットワークとしての機能に与える影響の大きさを考慮して判断する。

(4) 盛土の要求性能

盛土の設計で考慮する要求性能は、想定する作用と上記(3)に示した盛土の重要度に応じて、上記(2)に示す性能の水準から適切に選定する。「道路土工—盛土工指針」では、盛土の要求性能の目安として表 3.1.3-1 が示されている。以下に、表 3.1.3-1 に例示した個々の作用に対する要求性能の内容を示す。

1) 常時の作用に対する盛土の要求性能

自重・載荷重等の常時の作用による沈下や変形は、盛土構築中や構築直後に生じるもの、及び供用中に生じるものがある。

盛土の構築中や構築後においては、盛土や付帯構造物等の荷重により盛土及び基礎地盤に損傷が生じず安定している必要がある。また、供用中には、時間の経過とともに、基礎地盤あるいは盛土自体の圧縮(圧密)変形が生じるが、これにより供用性に支障を与えることを防止する必要がある。このため、常時の作用に対しては重要度にかかわらず性能 1 を要求する。軟弱地盤の場合であっても、計画

的な補修によりその影響を軽減することが可能であるため、性能 1 を要求する。

表 3.1.3-1 「道路土工—盛土工指針」の盛土の要求性能の例

重要度 想定する作用		重要度 1	重要度 2
常時の作用		性能 1	性能 1
降雨の作用		性能 1	性能 1
地震動の 作用	レベル 1 地震動	性能 1	性能 2
	レベル 2 地震動	性能 2	性能 3

2) 降雨の作用に対する盛土の要求性能

想定する降雨の作用により盛土のり面にガリ侵食や浅い崩壊が生じることはある程度許容されるが、大きなすべり崩壊により供用性に支障を与えることを防止するため、重要度にかかわらず性能 1 を要求する。

3) 地震動の作用に対する盛土の要求性能

地震動の大きさと重要度に応じて性能 1 ～性能 3 を要求する。これは、地震動の作用に対する盛土の要求性能を一律に設定することは困難な面があるためである。重要度 1 の盛土については、レベル 2 地震動に対して性能 2 を要求する。一般に、盛土は橋梁・トンネル等の他の道路構造物と比較して修復性に優れているが、特に、山地部の高盛土等の早期の復旧が困難な盛土、緊急輸送道路等に設置された盛土のうち構造物取付け部の盛土等の応急復旧により迂回路等の確保が困難な盛土では、レベル 2 地震動に対して早期の復旧が可能となる範囲の損傷にとどめることが要求される。

なお、盛土に性能 2 や性能 3 を要求する場合には、照査法の限界を考慮し、震前対策と震後対応等の総合的な危機管理を通じて必要な性能の確保に努める。また、道路震災対策の考え方については「道路震災対策便覧」に示されているので参考にするとよい。

3.1.4 性能の照査

SECURE-G 工法の設計に当たっては、原則として盛土の要求性能に応じて盛土の限界状態を設定し、想定する作用に対する盛土の状態が限界状態を超えないことを照査する。また、設計に当たっては、設計で前提とする施工、施工管理、維持管理の条件を定めなければならない。

盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）である SECURE-G 工法の設計に当たっては、盛土の要求性能に応じて盛土の限界状態を設定し、各作用に対する盛土の状態が限界状態を超えないことを照査する。

盛土の限界状態と照査の考え方について、「道路土工構造物技術基準・同解説」では、次のように記

述されている。

i) 照査の基本的な考え方

盛土の設計にあたっては、要求性能に応じた盛土の限界状態を設定し、想定する作用によって生じる盛土の状態が限界状態を超えないことを照査する必要がある。盛土の要求性能に応じた限界状態、照査の考え方及び照査項目の例を、表 3.1.4-1 に示す。

表 3.1.4-1 「道路土工構造物技術基準・同解説」の盛土の要求性能に対する限界状態と照査項目(例)

要求性能	盛土の限界状態	構成要素	構成要素の限界状態	照査項目	照査手法
性能 1	盛土が健全である、又は、盛土は損傷するが、当該盛土の存する区間の道路としての機能に支障を及ぼさない限界の状態	基礎地盤	基礎地盤の力学特性に大きな変化が生じず、盛土及び路面から要求される変位にとどまる限界の状態	変形	変形照査
				安定	安定照査
		盛土	盛土の力学特性に大きな変化が生じず、かつ路面から要求される変位にとどまる限界の状態	変形	変形照査
				安定	安定照査
性能 2	盛土の損傷が限定的なものにとどまり、当該盛土の存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが、すみやかに回復できる限界の状態	基礎地盤	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	変形	変形照査
		盛土	損傷の修復を容易に行い得る限界の状態	変形	変形照査
性能 3	盛土の損傷が、当該盛土の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが、当該支障が致命的なものとならない限界の状態	基礎地盤	隣接する施設等へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	変形	変形照査
		盛土	隣接する施設等へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態	変形	変形照査

ii) 限界状態

① 性能 1 に対する盛土の限界状態

性能 1 に対する盛土の限界状態は、盛土が健全である、又は、盛土は損傷するが、当該盛土の存する区間の道路としての機能に支障を及ぼさない範囲内で適切に定める必要がある。盛土の長期的な沈下や変形、降雨や地震動の作用による軽微な損傷を完全に防止することは現実的ではない。このため、性能 1 に対する盛土の限界状態は、道路の安全性、使用性、修復性をす

べて満足する観点から、盛土に軽微な亀裂や段差が生じた場合でも、平常時における点検及び補修、また地震時等における緊急点検及び緊急措置により、盛土としての機能を確保できる限界の状態として設定すればよい。この場合、基礎地盤の限界状態は、力学特性に大きな変化が生じず、かつ基礎地盤の変形が盛土及び路面から要求される変位にとどまる限界の状態、盛土本体の限界状態は、その力学特性に大きな変化が生じず、かつ路面から要求される変位にとどまる限界の状態として設定すればよい。また、路床については、舗装設計から要求される支持力を確保するよう設計する必要がある。

② 性能 2 に対する盛土の限界状態

性能 2 に対する盛土の限界状態は、盛土の損傷が限定的なものにとどまり、当該盛土の存する区間の道路の機能の一部に支障を及ぼすが、すみやかに回復できる範囲内で適切に定める必要がある。このため、性能 2 に対する盛土の限界状態は、道路の安全性及び修復性を満足する観点から、盛土に損傷が生じて通行止め等の措置を要する場合でも、応急復旧等により道路の機能を回復できる限界の状態として設定すればよい。この場合、基礎地盤の限界状態は、復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態として、盛土本体については、損傷の修復を容易に行い得る限界の状態として設定すればよい。この際、損傷に対する修復方法を考慮して設定する必要がある。

③ 性能 3 に対する盛土の限界状態

性能 3 に対する盛土の限界状態は、盛土の損傷が、当該盛土の存する区間の道路の機能に支障を及ぼすが、当該支障が致命的なものとならない範囲内で適切に定める必要がある。このため、性能 3 に対する盛土の限界状態は、道路の使用性及び修復性は失われても、安全性を満足する観点から、盛土の大規模な崩壊によって道路自体が失われたり、隣接する施設等への甚大な影響が生じたりするのを防止できる限界の状態として設定すればよい。この場合、基礎地盤及び盛土本体の限界状態は、隣接する施設等へ甚大な影響を与えるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態として設定すればよい。

なお、各限界状態に対応した変形量の許容値は道路及び盛土の特性によって異なるため、盛土の形式、想定される被災パターンと修復の難易、立地条件と周辺への影響、道路の社会的役割等を総合的に勘案して定めるのがよい。

iii) 照査方法

照査は、盛土の形式、想定する作用、限界状態に応じて適切な方法に基づいて行う。この際、盛土本体の設計を、既往の経験・実績に基づく仕様の適用、又は工学的計算による盛土の安定性照査のいずれで行うかは、基礎地盤や盛土の条件等により判断する。

また、盛土の安定性及び耐久性は、設計のみならず施工の良し悪し、維持管理の程度に大きく依存する。したがって、設計にあたっては、設計で前提とする施工及び施工管理の方法を定めるとともに、維持管理の方法を考慮する必要がある。特に、盛土材料の力学特性は土質及び締固め

の程度が大きく影響するため、設計で前提とする強度等の力学特性が発揮されるよう、盛土材料の土質を定めるとともに、適切な締固め及び品質管理の条件を定める必要がある。

iv) 許容変位量

ここで、性能設計に基づいた重要度 1 の盛土の SECURE-G 工法の設計における許容変位量の提案値を参考に示す。

重要度 1 の道路の場合、重要度 1 の盛土についてはレベル 1 地震動に対して性能 1、レベル 2 地震動に対して性能 2 で設定される。そのため SECURE-G 工法の設計における許容変位量はレベル 1 で性能 1、レベル 2 で性能 2 の状態から決定する。

【レベル 1 地震動】

性能 1 は「想定する作用によって盛土としての健全性を損なわない性能。」と定義される。

レベル 1 地震動における許容変位量は図 3.4-1 に示すランク 2 の 25cm 以下とする。

【レベル 2 地震動】

性能 2 とは「想定する作用による損傷が限定的なものにとどまり、盛土としての機能の回復が速やかに行い得る性能。」と定義される。

レベル 2 地震動においては、橋台背面アプローチ部と一般盛土部で分けて考えるものとする。

橋台背面アプローチ部とは図 3.4-2（道路橋示方書）の範囲をいう。そのため断面検討の際に一般盛土部とは別に、橋台背面アプローチ部の断面及びボーリングデータ、液状化判定結果を用いて下記の許容沈下量による橋台背面アプローチ部における対策工の設計を行うものとする。

① 橋台背面アプローチ部

レベル 2 地震動における橋台背面アプローチ部の許容変位量は図 3.4-1 のランク 2 の 25cm 以下とする。

- ・大型車両の走行可能な段差量が 25cm であることが立証されている。
- ・踏掛版の境界部において沈下量の差により段差が発生する。
- ・図 3.4-3 にあるように橋台の背面土が沈下することで踏掛版の下部に空洞が発生するため、沈下量は小さいことが望ましい。

② 一般盛土部

レベル 2 地震動における一般盛土部の許容変位量は図 1.1-2 のⅣ型分類から 50cm 未満とする。

- ・図 1.1-2 のⅣ型分類は、沈下量 50cm 未満で小被害（盛土のごく一部の変状がみとめられるが、走行性に支障のない場合）である。「道路震災対策便覧(災害復旧編) 66,67p」記載

ランク	被災直後における常時の通行機能の確保の難易	被害の評価項目			
		車道路面の段差	すべり破壊	天端の沈下	
				横断方向	縦断方向
1	通行機能が確保	段差高が2～3cm以下	すべり面が発生しない	沈下が発生しない	沈下が発生しない
2	通行機能は低下するが、その確保は比較的容易	段差高が2～3cmを超えて、20～25cm以下	すべり面が路肩あるいはのり面内の発生に止まる	小規模で一様に沈下する	小規模で一様に沈下する
3	通行機能が低下し、確保がやや困難	段差高が20～25cmを超えて、50cm以下	すべり面が片側車線に掛かる	小規模だが不均一に沈下する	小規模だが不均一に沈下する
4	通行機能の確保に長期間が必要	段差高が50cmを超える	すべり面が上下方向車線に掛かる	大規模で不均一に沈下する	大規模で不均一に沈下する

図 3.4-1 道路盛土の 被災直後の通行機能を考慮した耐震性能基準（案）

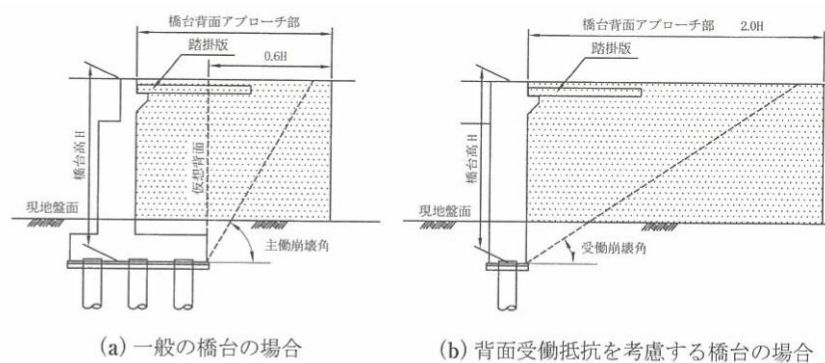


図 3.4-2 橋台背面アプローチ部の範囲

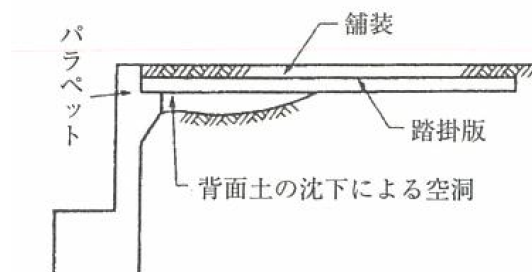


図 3.4-3 踏掛版下部の空洞

3.2 設計に用いる荷重

(1) SECURE-G 工法の設計に当たっては、以下の荷重から、盛土の設置地点の諸条件、形式等によって適宜選定するものとする。

- 1) 死荷重
- 2) 活荷重
- 3) 降雨の影響
- 4) 地震の影響
- 5) その他

(2) 荷重の組合せは、同時に作用する可能性の高い荷重の組合せのうち、最も不利となる条件を考慮して設定する。

(3) SECURE-G 工法の設計に当たっては、地震の影響として、盛土の振動応答に起因する慣性力及び液状化の影響を考慮する。

(4) 荷重は、想定する範囲内で盛土に最も不利となるように作用させる。

(1) 考慮すべき荷重

盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）である SECURE-G 工法の設計で考慮する荷重は、「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等を参考に適切に設定する。

(2) 荷重の組合せ

荷重の組合せは、「道路土工構造物技術基準・同解説」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等に基づいて、同時に作用する可能性が高い荷重の組合せのうち、盛土に最も不利となる条件を考慮して行わなければならない。表 3.2-1 に一般的な荷重の組合せの例を示す。

表 3.2-1 「道路土工構造物技術基準・同解説」の荷重の組合せの例

想定する作用		考慮する荷重
常時の作用	施工時	死荷重（+活荷重）*1
	供用時	死荷重（+活荷重）*1
降雨の作用*2	供用時	死荷重+降雨の影響
地震動の作用	レベル 1 地震動	死荷重+地震の影響
	レベル 2 地震動	死荷重+地震の影響

*1：（ ）内のものは盛土への影響や施工条件等を踏まえて必要に応じて考慮する。

*2：降雨の作用に対してはこの他に表面排水施設的设计も行う。本表における降雨の作用は、供用期間中に通常想定される降雨である。

(3) 液状化の影響

SECURE-G 工法の設計に当たっては、地震の影響として、盛土の振動応答に起因する慣性力及び液状化の影響を考慮する。

ここでは、液状化判定の手法として、「道路土工 軟弱地盤対策工指針」に準拠して以下に示す。なお、ALID を使用する場合には「河川構造物の耐震性能照査指針・解説Ⅱ. 堤防編」及び「土木研究所 資料 河川堤防の液状化対策の手引き」も参考にされたい。

1) 液状化の判定を行う必要がある砂質土層

沖積層の砂質土層で以下の 3 条件すべてに該当する場合には、(2)によって液状化の判定を行わなければならない。

- (a) 地下水位が地表面から 10m 以内にあり、かつ地表面から 20m 以内の深さに存在する飽和土層
- (b) 細粒分含有率 F_c が 35% 以下の土層、または F_c が 35% を超えても塑性指数 I_p が 15 以下の土層
- (c) 平均粒径 D_{50} が 10mm 以下で、かつ 10% 粒径 D_{10} が 1mm 以下である土層

2) 液状化の判定

1) により液状化の判定を行う必要のある土層に対しては、液状化に対する抵抗率 F_L を式 (3.2-1) により算出し、この値が 1.0 以下の土層については液状化するとみなすものとする。

$$F_L = R/L \quad (3.2-1)$$

$$R = C_w \cdot R_L \quad (3.2-2)$$

$$L = r_d \cdot k_h \cdot (\sigma_v / \sigma'_v) \quad (3.2-3)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \quad (3.2-4)$$

$$\sigma_v = \gamma_{t1} \cdot h_w + \gamma_{t2} \cdot (x - h_w) \quad (3.2-5)$$

$$\sigma'_v = \gamma_{t1} \cdot h_w + \gamma'_{t2} \cdot (x - h_w) \quad (3.2-6)$$

(レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動タイプ I の地震動の場合)

$$C_w = 1.0 \quad (3.2-7)$$

(レベル 2 地震動タイプ II の地震動の場合)

$$C_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \quad (3.2-8)$$

ここに、

F_L : 液状化に対する抵抗率

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

C_w : 地震動特性による補正係数

R_L : 繰返し三軸強度比で、3) の規定により求める。

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

k_h : 表 3.2-2 において規定する液状化判定用設計水平震度
 σ_v : 地表面からの深さ x (m) における全上載圧 (kN/m²)
 σ'_v : 地表面からの深さ x (m) における有効上載圧 (kN/m²)
 x : 地表面からの深さ (m)
 γ_{t1} : 地下水位面より浅い位置での土の単位体積重量 (kN/m³)
 γ_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (kN/m³)
 γ'_{t2} : 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (kN/m³)
 h_w : 地下水位の深さ (m)

3) 繰返し三軸強度比

繰返し三軸強度比 R_L は式 (3.2-9) により算出する。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad (3.2-9)$$

ここで、

< 砂質土の場合 >

$$N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2 \quad (3.2-10)$$

$$N_1 = 170 \cdot N(\sigma'_{vb} + 70) \quad (3.2-11)$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 40)/50 & (10\% \leq F_c < 60\%) \\ F_c/20 - 1 & (60\% \leq F_c) \end{cases} \quad (3.2-12)$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c - 10)/18 & (10\% \leq F_c) \end{cases} \quad (3.2-13)$$

< 礫質土の場合 >

$$N_a = \{1 - 0.36 \cdot \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 \quad (3.2-14)$$

ここに、

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧 100kN/m² 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

σ'_{vb} : 標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効上載圧 (kN/m²)

c_1 、 c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

F_c : 細粒分含有率 (%) (粒径 75 μ m 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 平均 (50%) 粒径 (mm)

4) 設計水平震度

液状化地盤の判定を行う際に用いる設計水平震度 k_h は、表 3.2-2 に示す設計水平震度の標準値に基づいて、式 (3.2-15) により算出される設計水平震度を用いてよい。ここに、地域別補正係数の値及び地盤種別の算出方法については、「道路土工要綱 資料-1 地震動の作用」によるものとする。

$$k_h = c_z \cdot k_{h0} \quad (3.2-15)$$

ここに、

k_h : 設計水平震度 (小数点以下 2 桁に丸める)

k_{h0} : 設計水平震度の標準値で表 3.2-2 による、

c_z : 地域別補正係数

表 3.2-2 「道路土工 軟弱地盤対策工指針」の液状化判定を行う際に用いる
設計水平震度の標準値

地震動		地盤種別		
		I 種	II 種	III 種
レベル 1 地震動		0.12	0.15	0.18
レベル 2 地震動	タイプ I	0.30	0.35	0.40
	タイプ II	0.80	0.70	0.60

(4) 荷重の作用方法

荷重を想定する範囲内で、盛土が最も不利となる状態で作用させることを示したものである。

3.3 地盤定数

設計に用いる地盤定数は、対象とする解析に応じて適切に設定する。

設計に用いる地盤定数は、対象とする解析に応じて、必要な地盤調査を実施することが重要である。ここで、解析に応じた必要調査項目とその結果から得られる地盤定数等を表 3.3-1 に示す。

力学試験等における供試体は、乱さない試料を採取して作成することが原則であるが、礫質土などにおいて乱さない試料が採取できなかった場合には、乱れた試料を密度調整して供試体を作成してもよい。ただし、この際においても正確な密度を把握するため、適切なサンプリングによりできる限り乱さない試料を採取するよう努めなければならない。

表 3.3-2 には、調査結果と設計用地盤定数の関係を示す。地盤定数の評価にあたっては、複数の試験方法から多面的に実施することが望ましい。

表 3.3-1 対象とする解析と調査項目

調査項目	安定検討	圧密検討	地震時検討							調査結果の適用
			液状化判定		動的挙動の予測					
					非液状化地盤		液状化地盤			
			詳細判定	簡易判定	円弧すべり	ニューマーク法	静的 FEM	静的 FEM	動的有効応力 FEM	
原位置調査										
ボーリング	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	柱状図
標準貫入試験	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	N 値と関連換算値
コーン貫入試験 (粘性土)	(○)				(○)		(○)	(○)		q_c と関連換算値 (N 値換算が困難な軟弱土)
PS 検層			○			○			○	せん断弾性波速度 (V_s)
室内土質試験										
(物理試験)										
土粒子密度試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	土性図
含水量試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	土性図
粒度試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	土性図、 F_c 、 D_{50}
コンシステンシー試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	土性図、 I_p
湿潤密度試験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	土性図、湿潤密度 (ρ_t)
(力学試験)										
圧密試験		◎					△			C_c 、 $e - \log p$ m_v 、 c_v
一軸圧縮試験 (粘性土)	◎				(○)	◎	(○)	(○)		s_u (飽和土の c)、 E_{50}
三軸圧縮試験 (UU)	○				○	○	○	○	◎	c_u 、 ϕ_u 、 E_{50} 、原則的には $\phi=0$ 法に適用
三軸圧縮試験 (CU)	○					○				c_{cu} 、 ϕ_{cu} 、 m 、変形係数 (拘束圧依存性)
三軸圧縮試験 ($\overline{CU}$)	○					○				c_{cu} 、 ϕ_{cu} 、 m 、 c' 、 ϕ' 、変形係数 (拘束圧依存性)
三軸圧縮試験 (CD)	○				△	○	△	△	◎	c_d 、 ϕ_d 、変形係数 (拘束圧依存性)
(液状化強度試験)										
(繰返し三軸圧縮試験)			○						◎	$R_L - n$
(中空ねじり試験)									○	$R_L - n$
(動的変形試験)										
(繰返し三軸圧縮試験)			△			△			◎	$G - \gamma$ 、 $h - \gamma$
(中空ねじり試験)			△			△			○	$G - \gamma$ 、 $h - \gamma$

ここに、◎：重要な試験、○：実施するのが望ましい試験、△：詳細な検討を行う場合に実施するのが望ましい試験

表 3.3-2 実施された調査結果と設計用地盤定数の決定への適用性

調査方法	強度(c)	強度(ϕ)	変形係数	圧密特性	液状化強度	G_0	備考
N 値	Δ (経験式)	$\bigcirc$ (経験式)	Δ (経験式)	$\times$	$\bigcirc$ (簡易法)	$\times$	軟弱粘性土は N 値が小さく適用が難しい
三成分コーン	$\bigcirc$	$\Delta(N$ 値 換算)	Δ (同左)	$\times$	$\Delta(N$ 値 換算)	$\times$	
PS 検層	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	微小ひずみ時、動的変形試験と比較
一軸圧縮試験	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	深い部分では不適なため、適用範囲を検討。また、強度を過小評価する傾向がないか注意が必要
三軸 UU 試験	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	本来条件が明確でない試験のため、一軸試験の代替としてのみ使用することが望ましい。
三軸 CD 試験	Δ	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	砂質土に適用、強度増加率も評価可能。
三軸 $\overline{CU}$ 試験	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	$\times$	粘性土に適用、強度増加率も評価可能。
圧密試験	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	$\times$	
繰返し三軸試験	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	$\times$	N 値からの簡易法と比較
動的変形試験	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\bigcirc$	PS 検層等と比較、 $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を得る。

3.4 使用材料

3.4.1 一般

SECURE-G 工法で用いる以下の使用材料は、使用目的に応じて要求される強度、施工性、耐久性、環境適合性等の性能を満足し、その性状が明らかで定められた品質規格に適合したものでなければならない。

- (1) ジオシンセティックス
- (2) 砕石
- (3) 不織布等

SECURE-G 工法は、図 1.2-1 に示したように、砕石層によってジオシンセティックスを挟み込む単純な構造である。使用する構造部材は、ジオシンセティックスと砕石であり、材料の特性や環境作用の影響等を考慮して、適切な材料を選定する。

また、砕石層の透水性が低下しないように、基礎地盤と砕石層の間には細粒分流入防止のフィルターとして不織布等を敷設する。なお、これは構造部材ではないため、仕様により規定する。

3.4.2 ジオシンセティックス

ジオシンセティックスは、液状化時における盛土の変形抑制に有効に機能する構造材料として、盛土の安定に必要な強度特性を有し、各種耐久性やクリープ性能等、構築する盛土の耐用期間の使用に耐えるものとする。

SECURE-G 工法に用いるジオシンセティックスは、建設技術審査証明を取得している材料であることを原則とし、表 3.4.2-1 の必要性能より選定することを標準とする。

表 3.4.2-1 ジオシンセティックスの必要性能

項目	必要性能
ジオシンセティックス引張剛性 EA (kN/m)	500～13,500
ジオシンセティックス引張強度 (kN/m)	50～1,350
ジオシンセティックスの地震時強度 (kN/m)	50～1,350
ジオシンセティックスと砕石との摩擦特性	ジオシンセティックスが変形抑制に十分な引張力を発揮できること
施工中の損傷	強度保持率が 90%以上であること
耐久性	耐候・耐薬品・耐バイオ

(1) 強度特性

本工法の簡易計算におけるジオシンセティックス品番選定は、ジオシンセティックス地震時強度を使用する。常時の安定照査におけるジオシンセティックスの選定は、常時のジオシンセティックス強度を使用する。

ジオシンセティックスの常時・地震時設計引張強さは、各種の試験結果に基づく材料安全率を考慮して、式(3.4.2-1)、式(3.4.2-2)より決定する。

$$T_A = \frac{T_{\max}}{F_{cr}F_DF_CF_B} = \frac{T_{cr}}{F_DF_CF_B} \quad (3.4.2-1)$$

$$T_{ae} = \frac{T_{\max}}{F_DF_CF_B} \quad (3.4.2-2)$$

- ここに、 T_A : ジオシンセティックスの設計引張強さ (kN/m)
 $T_{\max}$: ジオシンセティックスの最大引張強さ(製品基準強度) (kN/m)
 F_{cr} : クリープを考慮した材料安全率
 F_D : 耐久性(耐候性、耐薬品性等の長期的な劣化特性)を考慮した材料安全率
 F_C : 施工中の損傷を考慮した材料安全率
 F_B : 接続部の強度低下を考慮した材料安全率
 T_{cr} : クリープを考慮したジオシンセティックスの限界引張強さ (kN/m)
 T_{ae} : 標準的ジオシンセティックスの地震時における設計引張強さ (kN/m)

本工法は砕石等の礫材を用いるため、特に施工時での転圧やまき出しにおいて、施工重機の接地圧の影響や砕石・礫等の落下・貫入によるジオシンセティックスの材料損傷について留意し、しかるべき材料安全率 F_c を設定する必要がある。また、本工法に用いるジオシンセティックスは、クリープや耐候性等の長期耐久性についても確認されたものを用いる。

(2) ジオシンセティックスと土との摩擦特性

円弧すべり計算ですべり面より奥に定着長をとる必要がある場合は、(3.4.2-3) 式より算出し、ジオシンセティックスに必要とされる引張強度より、敷設したジオシンセティックス敷設長 L_e における摩擦抵抗力的方が大きいことにて照査する。

$$L_e = \frac{F_s T_{req}}{2(\alpha_1 c + \alpha_2 \sigma_v \tan \phi)} \quad (3.4.2-3)$$

ここに、 F_s : ジオシンセティックスの引抜けに対する安全率 [=常時 2.0、地震時 1.2]

T_{req} : ジオシンセティックスに作用する引張り力 (kN/m)

σ_v : ジオシンセティックスと土との接触面での鉛直応力 (kN/m²)

α_1, α_2 : 補正係数

c : 盛土材料の粘着力 (kN/m²)

ϕ : 盛土材料のせん断抵抗角 (°)

3.4.3 砕石

砕石は、液状化時における盛土の変形抑制に有効に機能する構造材として、盛土の安定性に必要な強度特性、透水性及び耐久性等を有するものとし、クラッシャラン (C-40) 又はこれに相当する材料を使用することを標準とする。

SECURE-G 工法に用いる砕石は、最大粒径が過大にならないもので、具体的にはクラッシャラン (C-40) 又はこれに相当する材料で、透水性が問題となるような細粒分を含まない材料を用いる。ここで、リサイクル材 (RC 材) は、透水性に問題が生じる可能性が高いため、使用しないものとする。但し、例外として地下水位が砕石層底面より 1m 以上低い位置にあるような透水性を求めない場所で且つ大きな変形抑制効果を期待しない場合においては RC 材を認めることもある。

SECURE-G 工法に用いる砕石は、表 3.4.3-1 の性能を有することを標準とする。

表 3.4.3-1 砕石の必要性能

項目	必要性能
クラッシャラン(C-40) 又は相当のもの	JIS 規格 A5001-2008
強度特性	強度定数 : $c = 0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 35^\circ$ 以上
透水性	透水係数 : $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 以上
耐久性	JIS 規格 A5001-2008

(1) 強度特性

本工法に用いる砕石は、クラッシャラン（C-40）又はこれに相当する材料を通常の締固め（締固め度 90%程度）で得られる強度を想定しており、強度定数として $c=0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ 以上を標準とする。

(2) 透水性

本工法に用いる砕石は、締固め度 90%程度の時に $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 以上の透水係数を有することを標準とする。具体的にはクラッシャラン（C-40）又はこれに相当する材料で、透水性が問題とならないように細粒分をできるだけ含まない（細粒分含有率が 10%程度以下）材料を用いる。なお、過度の締固めを行うと、粒子破碎等も生じて、透水性が低下することが懸念されるため、注意が必要である。

(3) 耐久性

本工法に用いる砕石は、堅硬で耐久的な石質をもち、破碎時にへん平な形状、結晶間にひび割れの生じる恐れのない原石（硬質の玄武岩、安山岩、砂岩等）を使用することを標準とする。

3.4.4 不織布等

軟弱な液状化地盤内に設置した砕石層の透水性の保持を目的に、地盤と砕石層の間に細粒分流入防止のための不織布等を設置することを標準とする。

SECURE-G 工法に用いる不織布等は、基礎地盤の細粒分の流入を防止する分離材の機能と、透水材としての機能を有する 1.8mm 厚を超える材料を用いる。

表 3.4.4-1 の必要性能より選定することを標準とする。

表 3.4.4-1 不織布の必要性能

項目	必要性能
不織布の厚み (mm)	1.8～
透水係数 (m/s)	1×10^{-3} ～
耐久性	耐生物・化学劣化に強い
材料	ポリプロピレン
製法	спанボンド

第4章 SECURE-G 工法的设计

4.1 设计の基本的な考え方

(1) SECURE-G 工法（以下、本工法）は、盛土の液状化対策が必要と判断された場合の盛土の変形抑制工法として適用を検討する。

(2) 軟弱地盤上の盛土の設計に当たっては、地盤調査結果を十分に活用するとともに、軟弱地盤上の盛土及び地盤挙動の予測の不確実性に配慮し、近隣の工事实績、類似構造・類似地盤における施工実績を踏まえて設計を行うものとする。

(1) 設計の基本事項

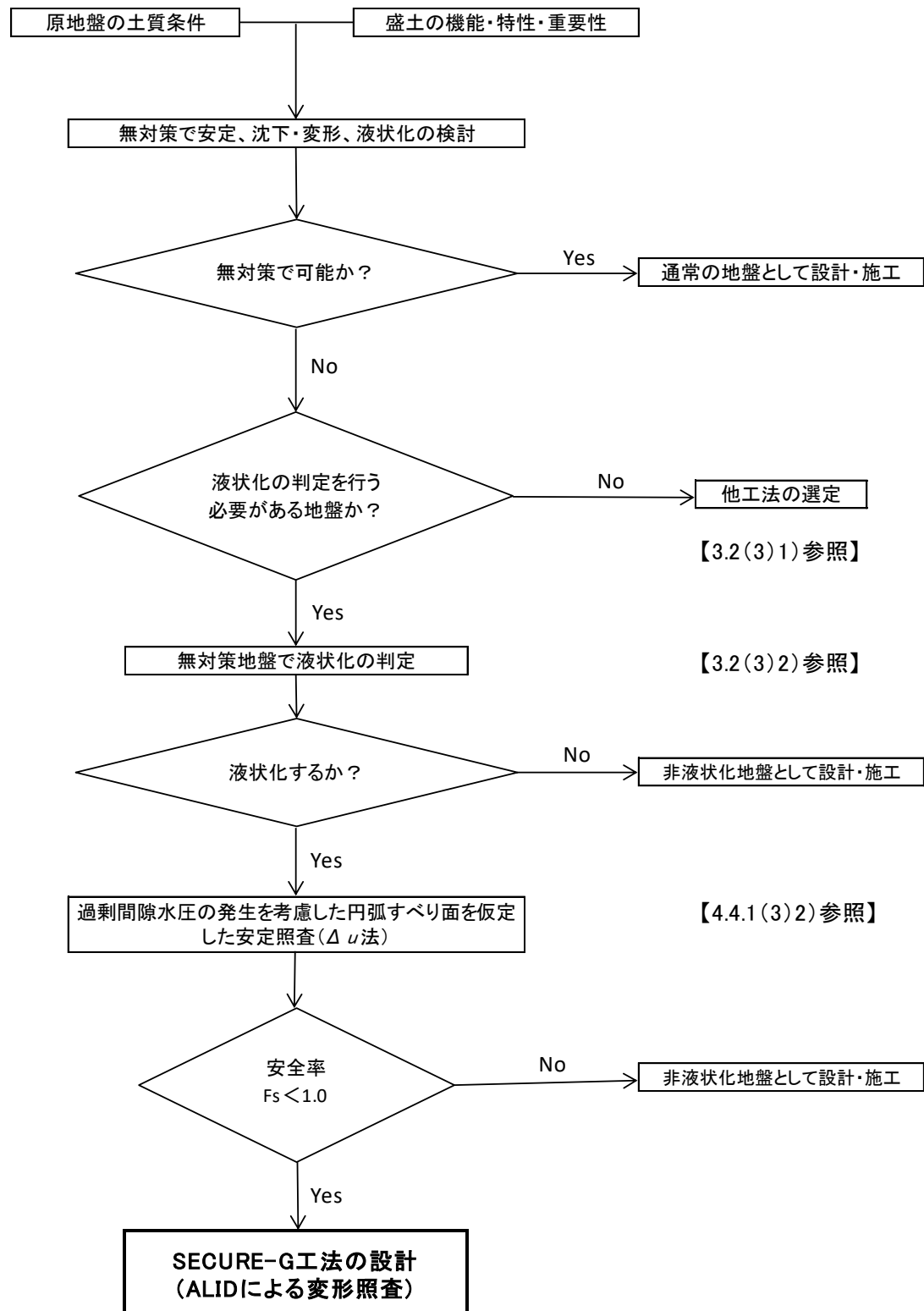
軟弱地盤対策工の目的は、沈下の促進・抑制、安定の確保、変形の抑制、液状化による被害の抑制及びトラフィカビリティ確保等に区分されるが、SECURE-G 工法は液状化対策が必要と判断された場合に対策工法の1つとして検討を行うものである。なお、1.2で述べたように、本工法は基礎地盤の液状化を防止するものではなく、その発生は許容するが、液状化後の盛土の過大な変形を抑制し、被害の軽減、修復を容易化する工法である。

SECURE-G 工法の標準的な選定手順を図4.1-1に示す。

本工法の選定の手順は以下になる。まず、原地盤の土質条件及び盛土の要求性能等を整理し、「道路土工―盛土工指針」及び「道路土工―軟弱地盤対策工指針」等に準拠し、無対策で盛土が可能かを判断し、無対策で可能な場合には、通常地盤として設計・施工を行う。軟弱地盤で対策が必要な場合、液状化の可能性のある地盤であるかを地下水位や地層の細粒分含有率、平均粒径等から判断し、液状化の可能性がない場合には、他の軟弱地盤対策工を選定する。液状化の可能性がある場合、液状化に対する抵抗率 F_L を求め、液状化の判定を行う。判定の結果、液状化しない場合には、非液状化地盤として通常の軟弱地盤対策を実施する。液状化地盤である場合、過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり面を仮定した安定照査（以下 Δu 法という）を行う。その結果、 $Fs \geq 1.0$ の場合には、沈下量が十分小さいか、構造物の変形は限定されたものに留まると考えられることから、非液状化地盤として軟弱地盤対策を実施する。 $Fs < 1.0$ の場合に、SECURE-G 工法を選定し、4.2の安定性照査を行う。

(2) 設計に当たっての留意事項

軟弱地盤上の盛土の設計に当たっては、地盤調査の結果をよく吟味したうえで、盛土及び地盤の挙動を適切に予測する必要がある。しかし、現実の軟弱地盤は層厚や土性が複雑に変化しており、これらを予め詳細に把握することは難しい。また、地盤挙動の解析手法は進歩してきているものの、解析のみにより軟弱地盤上の盛土の安定性を正確に予測することは困難であることが多い。このため設計に当たっては、解析のみによって判断するのではなく、近隣の工事实績、類似構造・類似地盤における施工実績を踏まえて総合的に判断する必要がある。



注意：基礎地盤の表層が粘性土層で、層厚が 2m を超える場合には、盛土天端の沈下抑制効果が限定される。

図 4.1-1 SECURE-G 工法の選定手順

4.2 SECURE-G 工法の安定性照査

(1)本工法の適用に当たっては、軟弱地盤における液状化時の盛土の変形抑制工法として、常時及び地震時の安定性照査(盛土の沈下、安定、変形)を行う。常時の作用に対しては、「4.3」に示す照査法により、また、地震動の作用に対しては、「4.4」に示す照査法により行う。

(2)上記(1)は「5章」及び「6章」に示した施工・施工管理、維持管理が行われることを前提とする。

(1) SECURE-G 工法の安定性照査方法

SECURE-G 工法は、ジオシンセティックスを用いた盛土補強工法に碎石層を組み合わせ、これらが一体となって盤として機能するとともに、周辺地盤の過剰間隙水圧を速やかに消散させる工法である。

これによって地震時における基礎地盤の液状化による盛土の変形を低減させ、修復を容易にすることができる。液状化の発生する基礎地盤は、図 4.2-1 に示すように、一般に液状化する土層と軟弱な粘性土層とが互層若しくは混層している。このため、本工法は液状化時の変形対策とともに、常時における軟弱な地盤の安定や沈下・変形対策としても求められ、このジオシンセティックスと碎石層により軟弱地盤上の盛土の常時及び地震時のすべり破壊防止や基礎地盤の液状化時の盛土の不同沈下・変形抑制を行うものである。SECURE-G 工法における盛土の安定性照査フローを図 4.2-2 に示し、盛土の沈下、安定及び変形の照査の考え方を以下に示す。

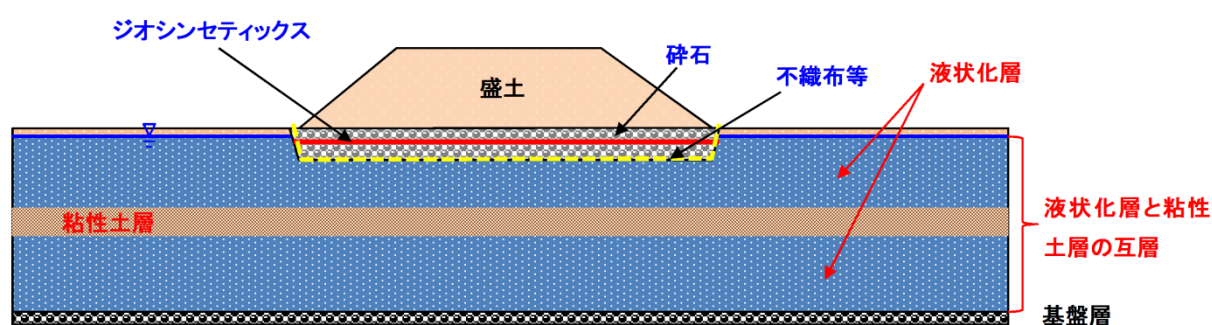


図 4.2-1 SECURE-G 工法の一般的な対象地盤

1) 盛土の沈下

盛土の沈下は、その機能を維持するために重要な性能である。特に実務的には、供用後に継続して起きる長期沈下が問題となる。このような長期的沈下は、道路などにおいては構造物取付部などにおける段差の原因となり、段差の大きさによって、路面の補修が必要となる。また、基礎地盤の状況によって、不同沈下が生じる可能性がある。

盛土の沈下は、常時と基礎地盤の液状化時に発生し、常時においては基礎地盤の軟弱粘性土層が中心であり、液状化時の沈下は飽和した砂質土層において生じる。

常時における沈下に対する作用は、基本的には安定を考慮する場合と同様である。照査方法は、従

来圧密理論を適用した方法が一般的である。ただし、二次圧密に関しては、logt 法などの別法が適用されてきた。現状では、作用に対して、盛土形状等から圧密沈下に対する荷重増分の分布を考え、沈下量は一次元圧密理論で照査する方法が一般的である。

地震時の沈下量に関しては、圧密理論から検討することは不可能であり、現状では、静的 FEM を用いる方法及び動的有効応力 FEM による方法等が提案されている。

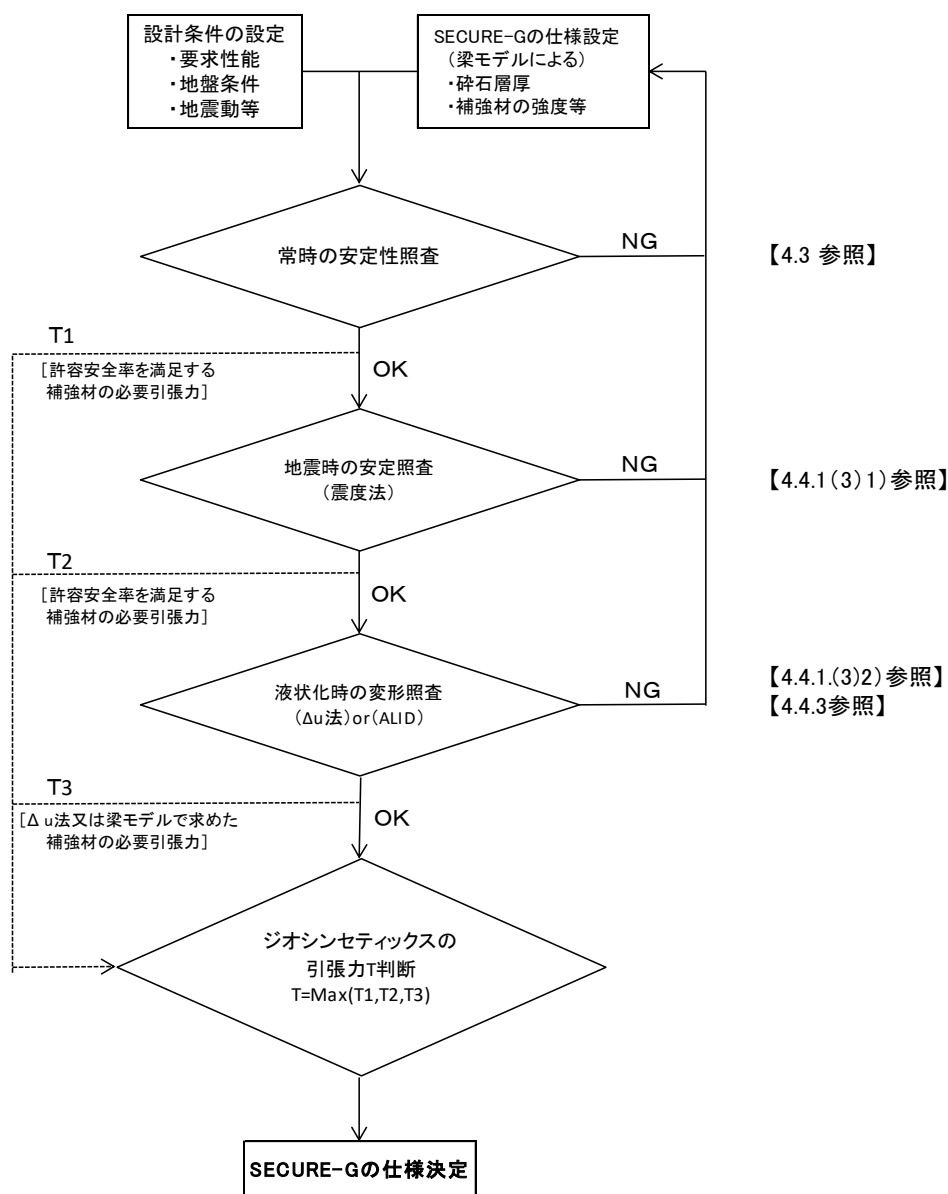


図 4.2-2 SECURE-G 工法における盛土の安定性照査フロー

2) 盛土の安定

盛土の安定は、その安全性を保つために最も基本的な性能である。軟弱地盤では、盛土の施工時に不安定となる場合もあり、安定に関する性能を事前に照査する必要がある。

作用の組み合わせは、従来、常時においては、盛土構築時は死荷重のみ、供用後は死荷重＋活荷重、

地震時で地盤の液状化の発生がない場合には、死荷重＋地震力等とするのが一般的であるが、地盤の液状化発生時には、慣性力を考慮せず、過剰間隙水圧を取り入れた照査も行なわれている。

3) 盛土の変形

周辺地盤を含む盛土の変形は、盛土そのものの機能のみならず、盛土上もしくはその内部や周辺の構造物等の機能に影響を与える点で、注意が必要な性能である。沈下は、もともと変形問題であるが、圧密という特定メカニズムでの照査とみなすことができる。

変形照査時の作用の組み合わせは安定や沈下に準拠して行われる。照査方法は、常時の軟弱粘性土地盤の変形は、従来の経験や計測データに基づいた簡易的な方法も用いられるが、特に地盤改良などの、軟弱地盤対策を計画している場合は、FEMなどの数値解析を用いる場合が多い。L2地震の液状化時の変形問題にも、動的有効応力 FEM や静的 FEM を拡張した照査方法が用いられる。

ただし、数値解析は、その結果に与える照査に用いる地盤パラメータや構成モデルの影響が大きく、十分な精度で地盤パラメータを決定することが前提となる。十分な調査結果が存在しないのに、複雑な構成モデルを用いるような方法は、大きな過誤の原因となる。一方で、詳細な土質試験から入力パラメータを決定しても、必然的に精度の高い予測ができることが補償されるような構成モデルは、現時点では存在しない。どのような構成モデルを用いる場合も、解析対象と類似の実施工結果等をシミュレートし、パラメータの妥当性を確認しておくことが望ましい。

指標値としては、変形量等が得られるため、直接的な照査が可能になる。ただし、地盤のバラツキ等はモデル化の際に必ずしもうまく表現できないことも多く、モデル化、結果の解釈に関しては慎重な検討が必要である。

(2) 設計における施工・維持管理の前提条件

「4.2 (2)」は「第 5 章 施工と施工管理」及び「第 6 章 維持管理」に示されている施工、施工管理及び維持管理が行われることを前提としている。したがって、実際の施工、施工管理及び維持管理の条件がこれらによりがたい場合には、「第 5 章」及び「第 6 章」によった場合に得られるのと同等以上の性能が確保されるように別途検討を行う必要がある。

4.3 常時の作用に対する安定性照査

4.3.1 基本的な考え方

本工法における常時の作用に対する盛土の安定性照査は、施工時及び供用中における盛土の沈下、安定及び変形について照査する。

本工法は軟弱地盤の液状化時の盛土の変形抑制工法であり、常時の安定性照査は盛土の沈下、安定及び変形について、「道路土工 軟弱地盤対策工指針」等に準拠して行う。

4.3.2 常時の作用に対する盛土の沈下

軟弱地盤の沈下量は、推定する時期によって得られる情報や要求される精度が異なるので、その目的に応じた照査手段を用いることが重要である。

常時の作用に対する盛土の沈下に関しては、盛土の施工時及び供用時に想定される沈下が、性能として規定された設計水準を超えないことを照査する。このとき、沈下に関する設計水準は、盛土の機能、上部構造及び周辺施設等への影響を考慮して定める。

(1) 照査指標と設計水準

常時の作用に対する沈下の照査に当たっては、盛土本体の指標値として、残留沈下量を用いてよい。残留沈下量の設計水準は、盛土が提供する機能、維持管理での対応の難易度等を十分考慮して決定する。その際、沈下しない構造物との取付け部等は沈下がそのまま段差となるので、盛土及び構造物が提供する機能に支障が出ないこと並びにそのための維持管理頻度及び方法等を考慮する必要がある。

設計で目標とする残留沈下量の設計水準の例として、道路では、橋梁・高架の接続盛土部において、盛土中央部における残留沈下量を舗装後3年間で10cm～30cm程度としてきた経緯がある。

一方、周辺施設等への影響に対しての設計水準は、残留沈下量のみでは規定できない。施工時も含めて設定する必要がある。

(2) 常時の作用に対する盛土の沈下の照査方法

盛土の沈下に対する照査は、想定される盛土及び基礎地盤の沈下メカニズムを良く理解した上で適切な照査方法を選定し、盛土が適用する機能を実現する上で必要とされる沈下に対する性能を満足するように行う。

具体的な照査方法は、「道路土工 軟弱地盤対策法指針」及び「NEXCO 設計要領第一集 土工編」等に準拠する。

4.3.3 常時の作用に対する盛土の安定

常時の作用に対する盛土の安定の照査では、軟弱地盤上の盛土が施工時及び供用中における常時の作用に対し、すべりに対して安定であることを照査する。

(1) 盛土の安定照査の基本的な考え方

常時の作用に対する盛土の安定の照査においては、円弧すべり面を仮定した安定計算法によって照査する。安定計算は、一般に地盤条件や盛土速度等に対応した軟弱層の強度増加を考慮して解析を行い、照査指標として安全率を用いる。この場合、盛土立上り時及び供用時の盛土のすべりに対する安定を検討し、所要の許容安全率を満足するものとする。

(2) 常時の作用に対する盛土の安定の照査方法

常時の作用に対する安定の照査では、施工時及び供用時に盛土が死荷重や活荷重などの組合せによって盛土が安定であることを照査する。常時の作用に対する照査に当たっては、盛土材料、盛土の基礎地盤の土質、湧水及び地形などの条件を十分に考慮する必要がある。

具体的な照査方法は、「道路土工 盛土工指針」、「道路土工 軟弱地盤対策法指針」及び「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル」等に準拠する。

4.3.4 常時の作用に対する周辺地盤の変形

常時の作用による変形照査では、施工中及び供用中の周辺地盤の変形が設計水準を超えないことを照査する。

(1) 変形照査の基本的な考え方

常時の作用に対する周辺地盤の変形の照査においては、過去の実績に基づく簡易推定法や FEM による方法があるが、変形予測手法や地盤データの設定等によって、その精度は大きく左右される。このため、事前に参考となる近隣の施工事例等を収集しておくことが望ましい。

(2) 常時の作用に対する変形の照査方法

常時の作用に対する変形の照査では、施工時及び供用時に盛土の死荷重や活荷重などの組合せによって周辺地盤が過度に変形しないことを照査する。

具体的な照査方法は、「道路土工 軟弱地盤対策法指針」等に準拠する。

4.4 地震動の作用に対する安定性照査

4.4.1 基本的な考え方

本工法における地震動の作用に対する盛土の安定性照査では、地震動レベルに応じて、盛土の安定及び沈下も含めた変形について照査する。

(1) 基本的な考え方

地震動の作用に対する安定性照査方法としては、今までの実績等による経験的な方法や遠心模型実験等によるものも考えられるが、前者では地盤条件の違いの評価や対策の効果等を照査するには困難が生じる。また、遠心模型実験等においては、地盤条件や地形等の影響の再現に限界があると同時に、設備、時間及び費用等の点で、必ずしも一般的に実施可能なものでもない。

以上のような観点から、本マニュアルでは、安定性照査手法として数値解析を主体とした。また、地震時の沈下に関しては、必ずしも、一般的で簡便な方法が提案されていないため、本章では沈下も含めた変形を照査することとした。

本工法は、地震時における基礎地盤の液状化による盛土の変形を低減させ、修復を容易にするため

のものであり、レベル 1 地震動若しくはレベル 2 地震動によって液状化が生じる可能性がある地盤を対象として、基礎地盤の液状化を考慮した安定解析や変形解析を行う。

なお、液状化の発生しない地盤に対しての地震時安定照査は、震度法による円弧すべり面による安定解析などによる通常の盛土補強土工法に準拠した照査を行う。(表 4.4.1-1 参照)

表 4.4.1-1 本工法の対象地盤と安定及び変形照査手法

	軟弱粘性土地盤	粘性土+砂質土地盤 A	粘性土+砂質土地盤 B	粘性土+砂質土地盤 C
常時	円弧すべり	円弧すべり	円弧すべり	円弧すべり
レベル 1 地震動	円弧すべり	液状化しない→震度法他	液状化しない→震度法他	液状化する→震度法, Δu 法, AL
レベル 2 地震動	円弧すべり	液状化しない→震度法他	液状化する→ Δu 法, AL	液状化する→ Δu 法, AL
本工法の対象	対象外	対象外	対象	対象

震度法：通常の間隙水圧を考慮した震度法による円弧すべり照査

Δu 法：過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり照査

AL:ALID による変形照査

SECURE-G 工法における盛土の安定性照査フロー(詳細)を図 4.4.1-1 に示す。

1) レベル 1 地震動（以下 L1 という）に対する安定性照査

まず、常時の安定照査として、盛土補強工法の照査方法により、許容安全率を満足するジオシンセティックスの必要引張力 T_1 を求める。次に、地震時の安定照査として、震度法(円弧すべり法) による安定照査を行い、同様にジオシンセティックスの必要引張力 T_2 を求める。引き続いて、 T_3 を次の 2 つの方法のどちらかで設定する。① Δu 法により、 $F_s \geq 1.0$ を満足するジオシンセティックスの必要引張力を求めて T_3 を設定する②弾性支承上の梁理論(以下梁モデルという)でジオシンセティックスの必要引張力 T_3 を求め、その仕様を用いて、液状化時の変形照査を液状化層の剛性低下を考慮した静的 FEM（以下 ALID という）により行い、変形量の設計水準を満足することを確認する。これらのジオシンセティックスの必要引張力の T_1 、 T_2 及び T_3 の最も大きいものを SECURE-G 工法の仕様として決定する。

2) レベル 2 地震動（以下 L2 という）に対する安定性照査

まず、常時の安定照査として、許容安全率を満足するジオシンセティックスの必要引張力 T_1 を求める。次に、地震時の安定照査として、震度法(円弧すべり法) による安定照査を行い、ジオシンセティックスの必要引張力 T_2 を求める。引き続いて、梁モデルでジオシンセティックスの必要引張力 T_3 を求め、その仕様を用いて液状化時の変形照査を ALID により行い、変形量の設計水準を満足することを確認する。これらのジオシンセティックスの必要引張力の T_1 、 T_2 及び T_3 の最も大きいものを SECURE-G 工法の仕様として決定する。

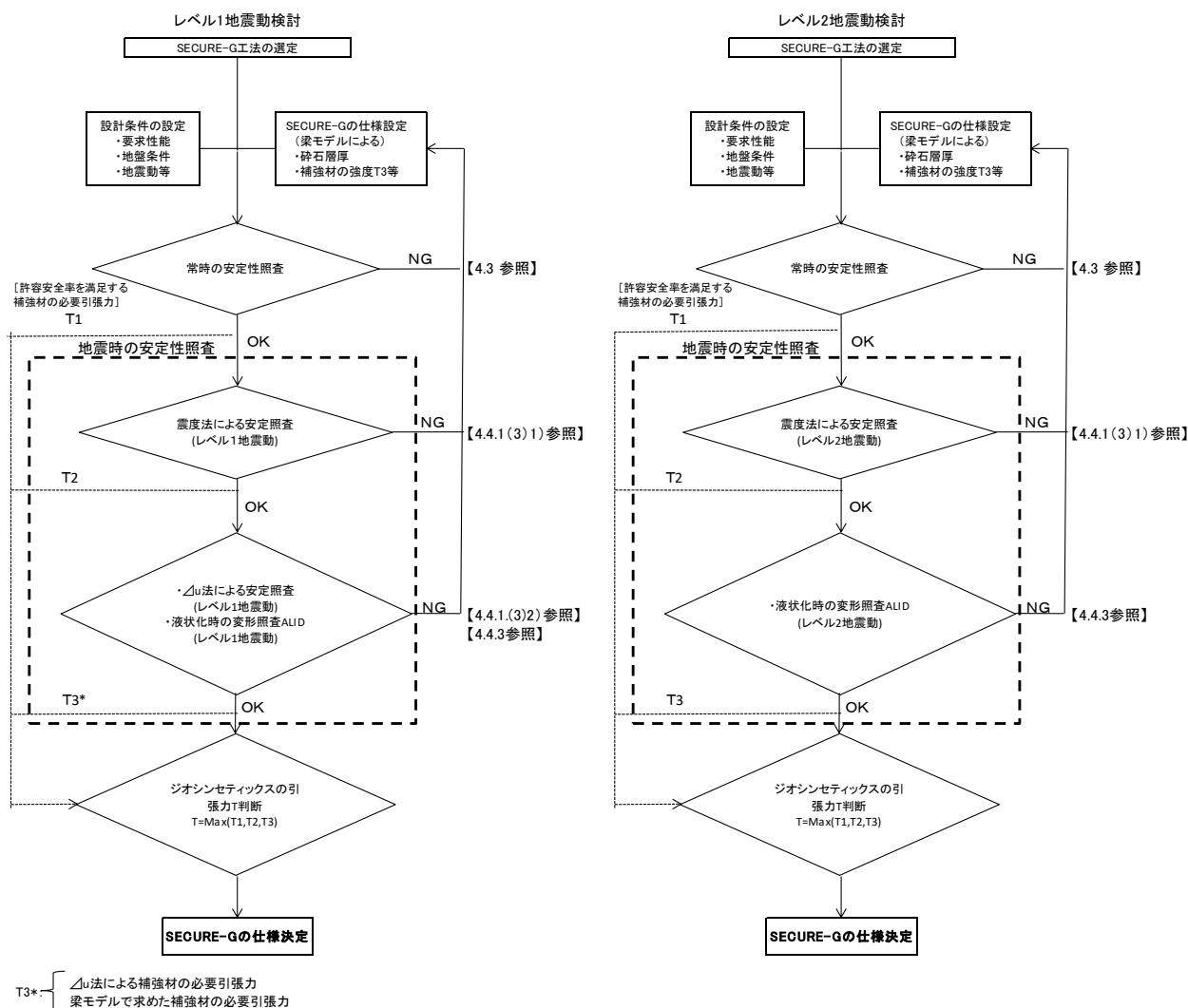


図 4.4.1-1 SECURE-G 工法における盛土の安定性照査フロー(詳細)

(2) 照査の考え方

地震動の作用に対する盛土の安定性の照査手法については、従来より種々の動的照査法や静的照査法が提案されている。しかし、盛土の地震時挙動を精緻に推定することは未だ困難であり、被災パターンや被災程度を精度よく推定する手法に関する研究開発が進められている途上である。ここでは、「道路土工 盛土工指針」における照査の考え方を以下に示す。

1) レベル1地震動に対する性能1の照査

表 4.4.1-2 に示したレベル1地震動に対する設計水平震度に対して、円弧すべり面を仮定した安定解析法によって算定した地震時安全率の値が 1.0 以上であれば、盛土の変形量は十分に小さいと考えられるため、レベル1地震動に対して性能1を満足するとみなしてよい。

また、上記以外の手法として、残留変形解析法によって算定した盛土の変形量が、性能1の限界状態に対応した変形量の設計水準を下回れば、性能1を満足するとみなしてよい。

2) レベル 2 地震動に対する性能 2 の照査

残留変形解析によって算定した盛土の変形量が、要求性能に応じた限界状態に対応した変形量の設計水準を下回れば、要求性能を満足するとみなしてよい。なお、変形量を直接求めるものではないが、レベル 2 地震動に対する設計水平震度に対して、円弧すべり面を仮定した安定解析法によって算定した地震時安全率の値が 1.0 以上であれば、盛土の変形量は限定的なものにとどまると考えられるため、レベル 2 地震動の作用に対して性能 2 を満足するとみなしてよい。

(3) 円弧すべりによる照査手法

地震動の作用に対する盛土の安定の照査手法は、構造物の変形を直接的に求めることができる残留変形解析手法と構造物の地震時安定を安全率などにより照査する震度法による安定解析手法に大別される。ここでは、「道路土工 盛土工指針」における震度法による安定解析手法及び「道路土工 軟弱地盤対策工指針」の過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり面を仮定した安定解析手法（ Δu 法）を以下に示す。 Δu 法で、特にレベル 2 地震動に対して設計を実施すると過大な対策が必要となる事例が多く、残留変形解析手法を用いることが望ましい。

1) 震度法による安定解析手法（震度法）

震度法による安定解析手法は構造物の安定の有無を照査するものであり、直接的に構造物の残留変形を評価するものではないが、これまでの被災事例などの分析により安全率に基づき経験的に構造物の変形性能や被災程度等を評価することもある。

震度法は、以下に示すような慣性力を考慮した円弧すべり面を仮定した安定解析法である。ただし、盛土周辺に施設があるなど特に重要な構造物の耐震性能の照査に当たっては、後述する地震時残留変形解析により地震時の残留変形量が設計水準を満足することを確認する。

盛土が主として慣性力で崩壊すると考えられる場合には、修正フェレニウス法に震度法を適用した式 (4.4.1-1) を用いて安全率を算出することができる。なお、ジオシンセティックスを使用する場合には、式 (4.4.1-2) を用いる。本式では常時の強度を用いるが、地震動が作用すると水で飽和した土は、非排水条件での繰返し载荷の影響により、液状化に至らなくても地盤の強度が低下する場合もある。

このため、土の強度低下が著しくない、十分な締固めがなされた山地部の盛土や粘性土の卓越した平地部盛土が一般的な適用範囲であり、液状化が生じる可能性のある地盤上の盛土など、地震動の作用による土の強度低下が著しい場合には適用できない。

$$F_s = \frac{\sum [c \cdot l + \{(W - u_0 b) \cos \alpha - k_h \cdot W \cdot \sin \alpha\} \tan \varphi]}{\sum (W \sin \alpha + (h/r) \cdot k_h \cdot W)} \quad (4.4.1-1)$$

$$F_s = \frac{\sum [c \cdot l + \{(W - u_0 b) \cos \alpha - k_h \cdot W \cdot \sin \alpha\} \tan \varphi] + r \sum T}{\sum (W \sin \alpha + (h/r) \cdot k_h \cdot W)} \quad (4.4.1-2)$$

ここに、

c 、 ϕ : 土の粘着力 (kN/m²) 及びせん断抵抗角 (°)

W : 分割細片の全重量 (kN/m)

l : 細片底面の長さ (m)

b : 細片の幅 (m)

u_0 : 常時地下水位による間隙水圧 (kN/m²)

k_h : 設計水平震度

r : すべり円の半径 (m)

h : 分割片の重心位置からすべり円の中心までの鉛直距離 (m)

α : 分割細片底面の接線方向と水平面のなす角 (°)

T : ジオシンセティックスの引張力 (kN/m)

設計水平震度は、式(4.4.1-3)により算出してよい。ここに、地域別補正係数の値及び耐震設計上の地盤種別の算出方法については、「道路土工要綱 巻末資料 資料-1」によるものとする。

$$k_h = c_z \cdot k_{h0} \quad (4.4.1-3)$$

ここに、 k_h : 設計水平震度 (小数点以下 2 桁に丸める)

k_{h0} : 設計水平震度の標準値で、表 4.4.1-2 による。

c_z : 地域別補正係数

表 4.4.1-2 「道路土工 盛土工指針」の設計水平震度の標準値 (k_{h0})

	地盤種別		
	I 種	II 種	III 種
レベル 1 地震動	0.08	0.10	0.12
レベル 2 地震動	0.16	0.20	0.24

表 4.4.1-2 に示す設計水平震度の標準値は、円弧すべり面を仮定した安定計算に用いることを想定して、既往地震における盛土の被害・無被害事例の逆解析結果に基づいて設定したものである。このため、上記以外の照査法により照査を行う場合には、表 4.4.1-2 の値を用いてはならない。なお、円弧すべり面を仮定した安定計算を用いるレベル 2 地震動の設計水平震度は、地震動タイプによらず一律に与える。

なお、レベル 2 地震動に対する照査に適用する場合には、すべり円弧の設定に際して、のり面表層付近のすべりは無視し、図 4.4.1-2 のように車道を横切る (のり肩から 4m 程度以上) 円弧を設定するのがよい。

地震動によって発生する過剰間隙水圧は、液状化判定の結果得られる液状化に対する抵抗率 F_L を用いて、図 4.4.1-3 より求めてもよい。

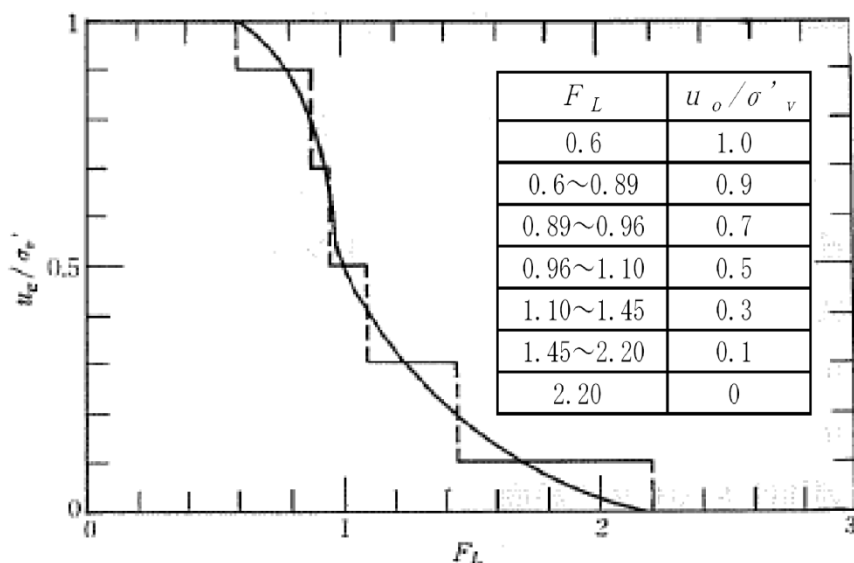


図 4.4.1-3 液状化に対する抵抗率 F_L と過剰間隙水圧比の関係
(「道路土工 軟弱地盤対策工指針」より)

過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり面を仮定した安定解析手法によって求めた安全率が1.0以上あれば、沈下量が十分小さいか、構造物の変形は限定されたものに留まると考えてよい。ただし、本安定解析手法は、安全側の計算結果を与える傾向にあることが明らかとなってきた。このため、本計算法は一次照査とし、許容安全率を下回った場合には地震時残留沈下解析法を併せて実施することが望ましい。

4.4.2 地震動の作用に対する盛土の変形

地震動の作用に対する盛土の変形を照査する際には、必要とされる性能から、設計水準を設定し、入手可能な地盤情報等を勘案して適切な照査方法を選定し、実施する。

地震動の作用に対する盛土の変形を照査する際には、必要とされる性能から、設計水準を設定し、入手可能な地盤情報等を勘案して適切な照査方法を選定し、実施する。

一般に用いられている地震動の作用に対する残留変形解析手法を図 4.4.2-1 に示す。ニューマーク法は、入力パラメータの設定が円弧すべり法と同等であり、比較的簡便に地震時の盛土の残留変位を求めることができるが、液状化時の残留変形を考慮できない。動的弾塑性有限要素解析は、地震時の現象を詳細にモデル化したもので、詳細な地盤調査とそれに基づく入力データの設定と高度な技術的判断を必要とする。一方、静的照査法には地震動による繰返し荷重による地盤の残留変形を見かけ上の剛性低下によるものとしてモデル化し、静的な自重変形解析を実施する静的自重変形解析法や流体力学に基づく方法などがある。前者は地震動の影響を液状化判定のみで評価するため、地震波のスペクトルや継続時間等の影響を考慮することが難しい。また、後者は複雑な地層構成や構造物の考慮等

に困難さがある。

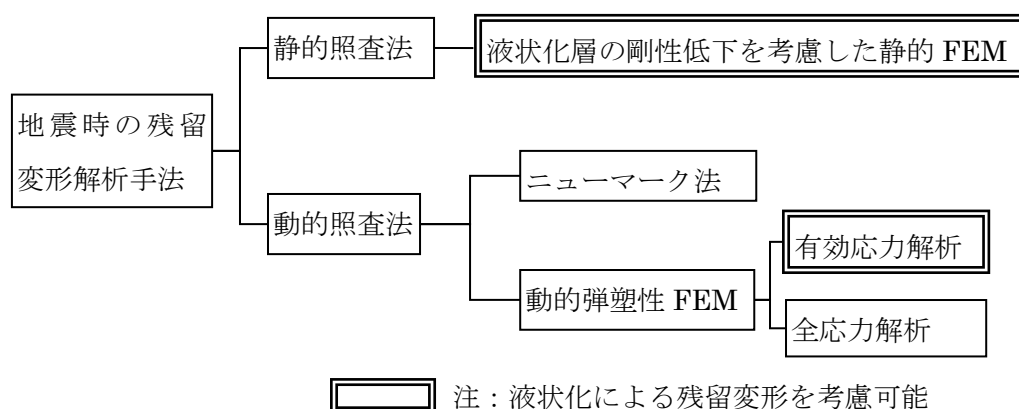


図 4.4.2-1 地震時の残留変形解析手法

解析手法の選定に際しては、設計地震動の設定、構造物の地震時挙動、想定される被害形態、各々の解析手法のパラメータの設定方法、解析手法の適用限界及び必要とされる精度などを考慮して、適切な手法を選定する必要がある。

4.4.3 SECURE-G 工法における液状化時の変形照査

- (1) 液状化時の盛土の変形抑制工法として SECURE-G 工法を適用する場合、対象構造物の重要度、周辺構造物の重要度等及び入手可能な地盤調査データ等を勘案し、適切な手法で変形照査を行う。
- (2) 照査は、液状化層の剛性低下を考慮した静的有限要素法を基本とし、必要に応じて動的有効応力有限要素法を用いる。

(1) 照査の基本

4.4.2 に示したように、地震時の残留変形解析法は種々提案されている。SECURE-G 工法は、液状化層の存在を前提とした工法であり、ジオシンセティックスを敷設すること及び周辺構造物等への影響も考慮する必要があること等を勘案すると、性能照査に適用できる手法は、液状化層の剛性低下を考慮した静的 FEM と動的有効応力 FEM による手法とに限定される。静的 FEM は、液状化判定による液状化に対する抵抗率 F_L が基本入力パラメータとなる 2 次元有限要素法であるため、複雑な形状問題を解くことが可能となる。一方で地震動の影響を液状化判定のみにより評価し、周波数や継続時間の影響を直接的に評価することができない。

動的有効応力 FEM は、入力地震動を加速度の時刻歴波形として入力し、地震時の過剰間隙水圧の発生や液状化した土の応力ひずみ関係を考慮することができるが、一般的に入力パラメータを設定するために詳細な地盤調査が必要となり、入力パラメータにより、結果が大きく変わる可能性がある。

(2) 残留変形の照査法

SECURE-G 工法の設計では、入力パラメータの設定法の簡便さを考慮し、「液状化層の剛性低下を考慮した静的 FEM(ALID)」を基本とする。

要求性能を満足するために、最終的に決定すべき諸元は、以下のとおりである。

1) 碎石層の厚さ

碎石層は厚さを増すと変形抑制効果が大きくなる。

2) ジオシンセティックスの剛性及び強度

ジオシンセティックスの剛性は引張り変形（盛土法尻部の水平変位）抑制に重要であり、また、全体的な沈下抑制及び変形抑制に寄与する。必要な場合は枚数を複数とすることも可能である。

SECURE-G 工法の仕様（碎石層厚、ジオシンセティックスの強度）を梁モデルにより設定し、「液状化層の剛性低下を考慮した静的 FEM(ALID)」を用いて盛土の変形量を算定する。盛土の変形量が設計水準を満足しない場合には、再度 SECURE-G 工法の仕様を設定し、盛土の変形量を再算定する。

SECURE-G 工法では、盛土の安定性が確保されない場合には、他工法を選定する。

(3) 照査手順

SECURE-G 工法の照査手順を以下に示す。

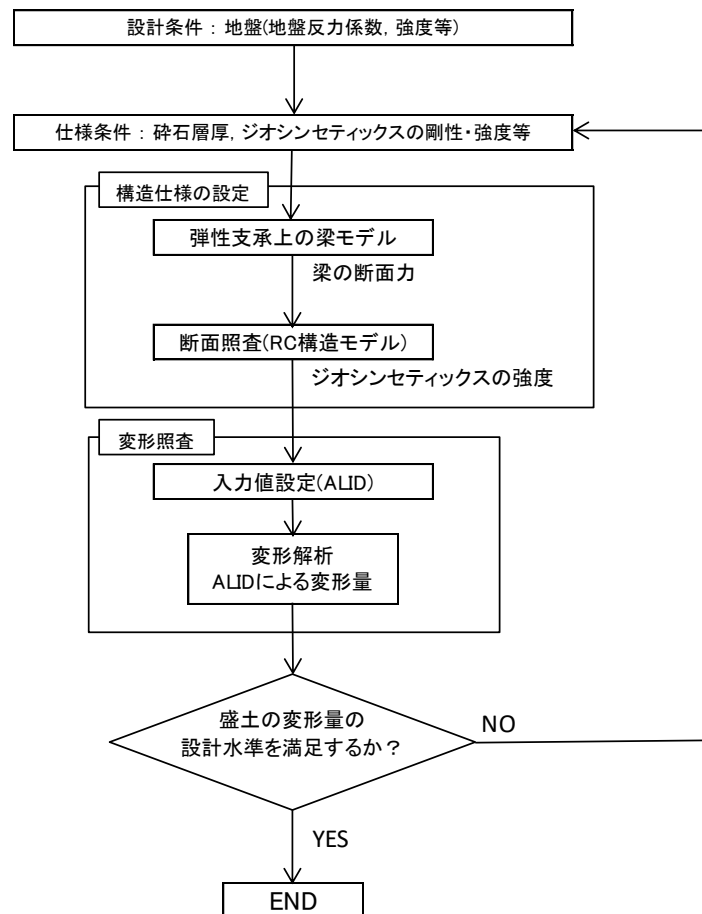


図 4.4.3-1 SECURE-G 工法の照査手順

(4) SECURE-G 工法の照査方法

1) SECURE-G 構造仕様の設定

動的遠心模型実験から碎石とジオシンセティックスを配置した場合、盛土直下は、変形が少ない一体的(盤的)な挙動を示していることが確認されている。

そこで、碎石層厚を設定し、ジオシンセティックスに作用する引張力は、弾性支承上の梁理論と単鉄筋の断面照査の方法を用いた以下の手順で算定し、ジオシンセティックスの仕様を設定する。(詳細は付属資料 1 を参照) また、算出される結果の精度から解析ソフト (FRAME (面内) FORUM8 等) を用いて断面力を算出することを推奨する。

i) 弾性支承上の梁理論

釣合方程式(半無限長梁モデル)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_v \cdot y = q(x)$$

E : 梁の弾性係数 (kN/m²)

I : 梁の断面二次モーメント (m⁴)

$$I = \frac{bt^3}{12}$$

b : 碎石層奥行き (1.0m) t : 碎石層厚 (m)

k_v : 地盤反力係数 (kN/m³)

$q(x)$: 上載荷重分布 (kN/m²)

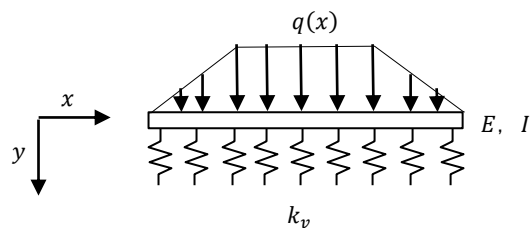


図 4.4.3-2 弾性支承上の梁

ここで、梁の弾性係数は碎石の剛性と仮定し、(社)日本道路協会：舗装設計便覧，pp. 129, (平成 18 年 2 月)から $E=200,000\text{kN/m}^2$ としている。

釣り合い方程式を展開し、梁に作用する断面力を得る。

ii) 弾性支承の設定：地盤反力係数

地盤反力係数の設定は、道路橋示方書IV下部構造編の 8.5.3 に準拠して行う。

$$k_v = D_E \cdot k_{v0} (B/0.3)^{-3/4}$$

k_v : 地盤反力係数 (kN/m³)

k_{v0} : 直径 0.3m の剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

$$k_{v0} = (1/0.3) \alpha E_0$$

B : 盛土の法尻幅 (m)

E_0 : 地盤の変形係数 ($E_0 = 2800N$) (kN/m²)

N : N 値

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha = 1.0$)

D_E : 土質定数の低減係数

ここで地盤反力係数は、道示V耐震設計編 7.3「耐震設計上の地盤定数を低減させる土層とその取扱い」に準拠して、液状化に対する抵抗率 F_L の値に応じた表 4.4.3-1 の低減係数 D_E を用いて、低減させる。

この時、碎石層直下の液状化層 1m 分を $F_L=1.2$ (その時の R の値を算出)の不完全液状化層とする。(本マニュアル p. 44に後述)液状化対象層に不完全液状化層を含めた上で液状化層の FL 及び R 値を平均し以下の表から評価するものとする。

表 4.4.3-1 土質定数の低減係数 D_E

F_L の範囲	地表面からの 深度 x (m)	動的せん断強度比 R	
		$R \leq 0.3$	$0.3 < R$
$F_L \leq 1/3$	$0 \leq x \leq 10$	0	1/6
	$10 < x \leq 20$	1/3	1/3
$1/3 < F_L \leq 2/3$	$0 \leq x \leq 10$	1/3	2/3
	$10 < x \leq 20$	2/3	2/3
$2/3 < F_L \leq 1$	$0 \leq x \leq 10$	2/3	1
	$10 < x \leq 20$	1	1

iii) 断面照査

弾性支承上の梁モデルから得られた曲げモーメントを使用して、鉄筋コンクリートの断面照査の方法によりジオシンセティックスの引張力を算定する。

ジオシンセティックスの断面照査は、曲げモーメントが作用する単鉄筋の RC 構造の断面照査法により圧縮領域と引張領域を評価し、材料の必要強度を算出する。

中立軸までの距離 X

$$X = (nAt/b) \left\{ -1 + \sqrt{(1 + 2bd/nAt)} \right\}$$

換算断面の中立軸に関する断面二次モーメント I_e は、

$$I_e = nAt(d - X)(d - X/3)$$

引張り材の応力度 σ_t は、

$$\sigma_t = M / \{At(d - X/3)\}$$

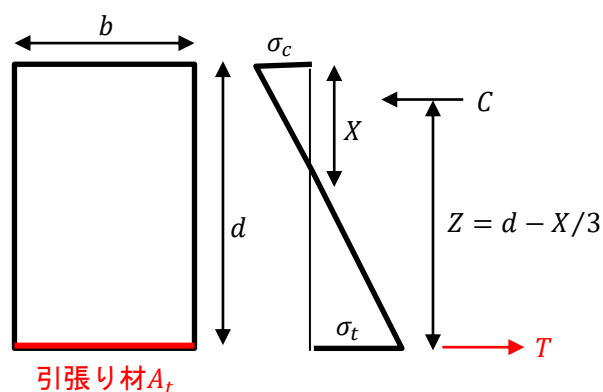


図 4.4.3-3 断面照査法

ここで、

M : 断面作用モーメント

n : 弾性係数比=(引張り材 E_t /碎石 E)

E : 碎石弾性係数(=200,000kN/m²:舗装指針から)

E_t : 引張り材の弾性係数(ジオシンセティックスの諸元から)

A_t : 引張り材の断面積

b : 断面幅($b=1.0$ m)

d : 碎石上面からの引張り材の配置高さ

X : 碎石上面から中立軸までの高さ

I_e : 換算断面の中立軸に関する断面二次モーメント

σ_t : 引張材の応力度

2) 静的 FEM による変形照査

SECURE-G 工法の盛土の変形照査は、静的 FEM (ALID)によって行い、要求性能の照査を行うことを標準とする。

静的 FEM(ALID)の照査フローを図 4.4.3-4 に示す。ALID を照査手法として用いる注意点は、一般的な FEM と同様であるが、液状化前の初期応力状態が結果に大きな影響を及ぼすため、施工過程をできるだけ忠実に再現して解析を行うことが必要である。

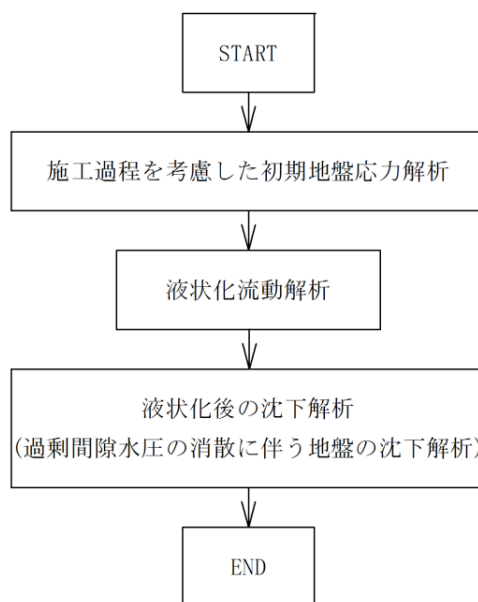


図 4.4.3-4 静的 FEM(ALID)の照査フロー

SECURE-G 工法の変形抑制効果を ALID で表現するには、ジオシンセティックス、砕石層及びその周辺地盤等を適切にモデル化することが重要となる。そこで、ジオシンセティックス挟み込み砕石層及びその周辺の砂地盤(液状化層)のモデル化について述べる。

i) 地盤モデル

地盤モデルは、地盤調査結果を基に、層厚を考慮して平面要素を用いてモデル化する。

液状化変形を照査するために液状化抵抗率 F_L を与える必要がある。液状化抵抗率 F_L の算定は、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説Ⅱ. 堤防編」及び「土木研究所資料 河川堤防の液状化対策の手引き」に準拠して行う。ALID では、盛土の上載荷重(初期自重応力解析)を考慮し、設計水平震度(または最大加速度)を与えることで、液状化抵抗率 F_L を評価することができるので、これらの機能を用いることを基本とする。液状化時の剛性低減式は、図 4.4.3-8 の方法を用いる。

入力定数は、地盤調査結果に基づき、 N 値・内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c 等である。表 4.4.3-2 に必要

入力定数一覧（例）を示す。

図 4.4.3-8 に示すように、液状化時の地盤の剛性低下は、地盤の繰返し三軸強度比(R_L 値)の評価と、液状化に対する抵抗率 F_L 値の分布が結果に大きな影響を与える。

表 4.4.3-2 必要入力定数一覧（例）

入力定数	記号	単位	備考
湿潤単位体積重量	γ_t	kN/m ³	試験値・設計値
弾性係数	E	kN/m ²	$E=2800N$
せん断弾性係数	G	kN/m ²	$G=E/(2(1+\nu))$
ポアソン比	ν		$\nu=0.33$ 推奨値
粘着力	c	kN/m ²	
内部摩擦角	ϕ	°	25°
ダイレイタンシー角	ψ	°	$\psi=\phi-20^\circ$
静止土圧係数	K_0		$K_0=0.5$
細粒分含有率	F_c	%	
平均粒径	D_{50}	mm	
N値	N		
入力加速度あるいは設計水平震度	k_h, α	gal	
相対密度	D_r	%	$Dr=21 \cdot (N1/1.7)^{1/2}$ Meyerhofの式

また、東日本大震災では、液状化判定上の液状化層のうち、浅い液状化層のみが被災に影響し、深い液状化層は寄与していないと推測される箇所が多く存在した。その結果、従来の解析では深い液状化層も変形に寄与するために、実測の沈下量に比べ過大な沈下量となる解析事例が多く見られた。『河川構造物の耐震性照査指針・解説Ⅱ.堤防編、国土交通省水管理・国土保全局治水課、H28 年 3 月』では、このような深い液状化層の変形を抑制するために拘束圧補正を導入している。SECURE-G の変形照査においても、深い液状化層の変形を抑制するためにこの補正係数を使用することを基本とする。

図4.4.3-7から求めたせん断剛性に補正係数 C_{cp} を乗じる。

$$C_{cp} = \begin{cases} 1 & (\sigma'_v < \sigma'_{v0}) \\ (\sigma'_v/\sigma'_{v0})^n & (\sigma'_v \geq \sigma'_{v0}) \end{cases}$$

ここに、

C_{cp} : 微小抵抗領域のせん断剛性に乗じる拘束圧による補正係数

σ'_v : 鉛直有効応力

σ'_{v0} : パラメータ(基準鉛直有効応力)

n : パラメータ

指針では、 $\sigma'_{v0}=75\text{kN/m}^2$ 、 $n=2.0$ が採用されている。

ii) ジオシンセティックス

ジオシンセティックスは、**Bar** 要素でモデル化する。

ジオシンセティックスの入力定数は、(1)のジオシンセティックスの選定及び(2)安定照査によるジオシンセティックスの張力確認で求められた強度定数を用いる。ここで、入力値はジオシンセティックスの引張剛性 EA 及び断面積 A である。

また、ジオシンセティックスのモデル化に梁要素を使用する方法もある。梁要素を使用する場合、断面係数 I を設定する必要がある。断面係数 I は、ジオシンセティックスが曲げの発生しない引張材料であるため、曲げモーメントが発生しないように小さな値(例えば、 10^{-7}m^4)を入力する。

iii) 砕石層

透水性が大きく過剰間隙水圧が上昇しない砕石層は、非液状化層として弾塑性の平面要素でモデル化する。砕石層の入力定数は、(1)のジオシンセティックスの選定で用いた弾性係数 $E = 200,000\text{kN/m}^2$ とし、内部摩擦角 ϕ は 35 度とする。

iv) 盛土

盛土は弾塑性の平面要素でモデル化する。入力定数は、地盤調査結果に基づき弾性係数・内部摩擦角・粘着力等を設定する。

v) 砕石層周辺の不完全液状化層

挟み込み砕石下面の砂層は、透水性の高い砕石層に接しているため、過剰間隙水圧の発生が抑制され、完全液状化に至らないことが動的遠心模型実験で確認されている。

そこで、この部分は不完全液状化層として平面要素でモデル化する。砕石層下部に 1m 範囲の不完全液状化層を設けて剛性低下を考慮する。不完全液状化地盤の低下剛性 (G_1) は、液状化抵抗率 $F_L = 1.2$ と仮定して図 4.4.3-8 安田・稲垣の図表から決定する。不完全液状化層としてモデル化する砂層範囲は、挟み込み砕石層から深度方向に+1m の範囲とする(図 4.4.3-5)。付属資料 1 に根拠を示す。

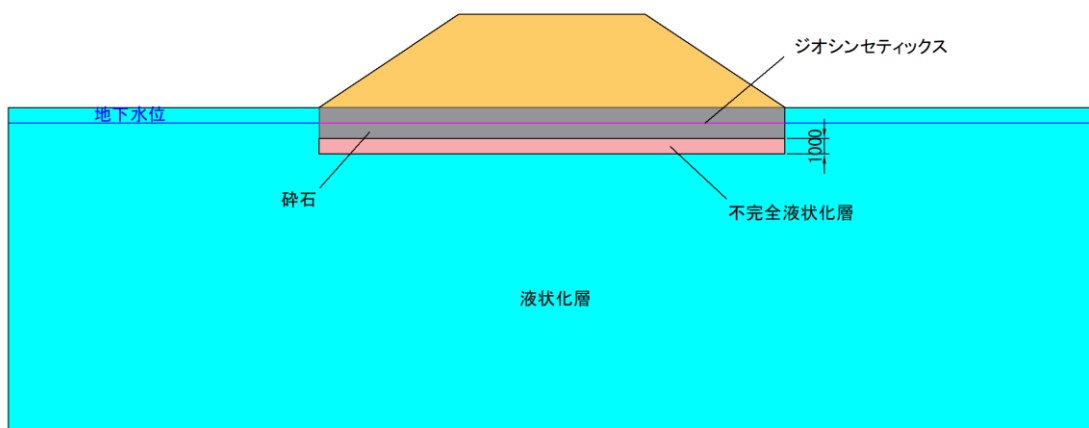


図 4.4.3-5 砕石層周辺砂層のモデル化

3) SECURE-G 工法の仕様決定

1) ～2) の照査から盛土の安定性が確保された場合には、砕石層厚やジオシンセティックスの強度等の SECURE-G 工法の仕様を決定する。確保されない場合には、砕石層厚やジオシンセティックスの強度等を変更し、再度 1) ～2) の照査を行い、SECURE-G 工法の仕様を決定する。

SECURE-G 工法では、盛土の安定性が確保されない場合には、他工法を選定する。

【参考】

静的 FEM (ALID) は、河川堤防の変形照査に用いられる代表的な方法(『河川構造物の耐震性照査指針・解説Ⅱ.堤防編、国土交通省水管理・国土保全局治水課、H28 年 3 月』)であり、概要を以下に示す。

静的 FEM (ALID)は、液状化の発生による土層の剛性低下を仮定するとともに、土工構造物の自重を作用させ、その変形を有限要素法により算定する(解析結果の一例を図 4.4.3-6 に示す)。

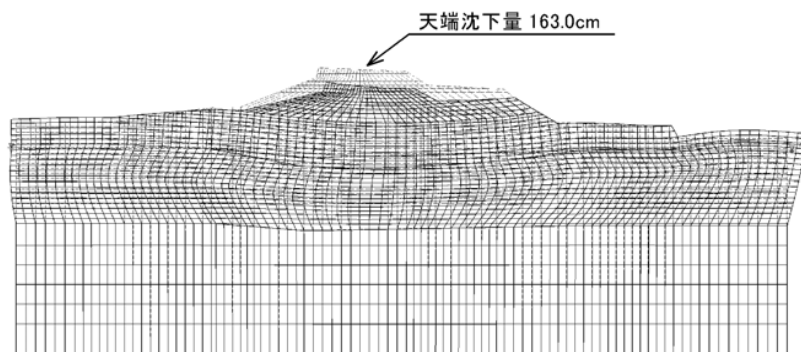


図 4.4.3-6 静的 FEM(ALID)の解析例

静的 FEM (ALID)は、地盤の液状化に伴って発生する流動現象のメカニズムを、液状化層の土骨格構造破壊に起因する剛性の消失として捉え、自重応力下の砂質土層がせん断剛性低下によって変形すると仮定した静的な地盤変形解析手法である。

地震による堤防の沈下のメカニズムを液状化した土層の剛性が低下することであると仮定して、沈下量を求める方法である。

手順としては、まず、液状化判定の結果に基づき、液状化によって剛性が低下する領域と液状化しない領域に区分しておく。初期応力解析によって、図4.4.3-7 の点A の状態を求める。

液状化した場合には、実際には点A から点C に向かうが、解析においては、点B を経由して点C に至る。点A から点B の経路では、柔らかくなったにも関わらず、ひずみを一定としているので、力が釣り合っていない。この釣り合っていない力(拘束力)を求めておき、この力を徐々にかける(拘束力を徐々に解放する)ことによって、点B から点C のようにひずみが増えることとなる。液状化した要素の応力ひずみ関係は下に凸のバイリニアモデルで表現している。

剛性の小さい方を微小抵抗領域と呼び、この範囲の剛性を G_1 、剛性の大きい方を剛性回復域と呼び、この範囲の剛性を G_2 、2 つの領域の境界を剛性回復点(抵抗変曲点)と呼ぶ。拘束力をかける過程で、

剛性回復点を超えるひずみが発生した要素では、 G_2 が適用されるので、これ以降ひずみが発生しにくくなる。微小抵抗領域の剛性 G_1 、剛性回復域の剛性 G_2 、剛性回復点のせん断ひずみ γ_L の間には、両対数軸上で直線的な関係となることが分かっており、この関係を用いれば、微小抵抗領域の剛性 G_1 から、剛性回復域の剛性 G_2 、剛性回復点のせん断ひずみ γ_L を設定することができる。

微小抵抗領域の剛性 G_1 を推定する方法として様々な方法が提案されているが、安田・稲垣式と呼ばれる図4.4.3-8の関係が、広く使われている。液状化抵抗率 F_L が0.8程度以上の範囲では、繰返しねじり試験の結果に基づいた関係式が得られていたが、レベル2地震動では F_L が0.8を大きく下回る場合も多く、この関係を拡張する必要があった。そこで、液状化抵抗率 F_L が小さい範囲におけるせん断剛性を推定し、安田・稲垣式を拡張したものが図4.4.3-8の関係である。盛土の沈下量の評価にあたっては、液状化層のせん断変形による沈下の他に、液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下も加味する必要があり、石原・吉嶺の関係を利用するのが一般的である。静的FEM(ALID)では、液状化層厚に相対密度 D_r や F_L に応じた体積ひずみを乗じた値を加え、一連の有限要素解析の中で同じ関係に基づいた沈下量を算出することが可能である。

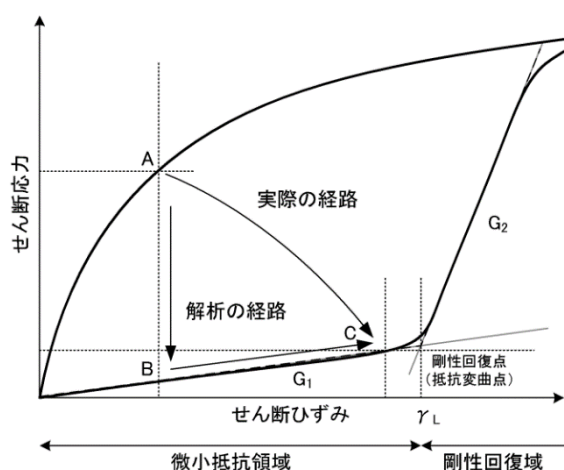


図 4.4.3-7 静的 FEM(ALID)の地震前と地震後の液状化地盤のせん断応力とせん断ひずみ関係の模式図

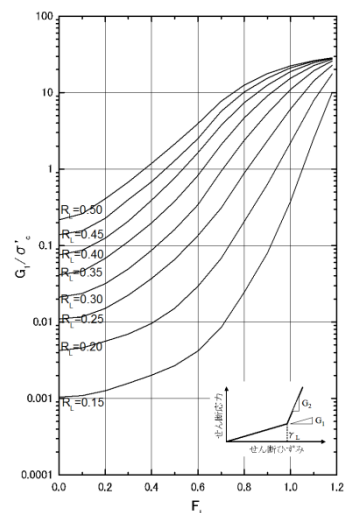


図 4.4.3-8 R_L ごとの微小抵抗領域のせん断剛性比 G_1 / σ'_c の関係

第5章 施工と施工管理

5.1 施工の基本方針

盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）である**SECURE-G**工法の施工に当たっては、本工法の特徴を十分に理解して、設計図書に示されている形状及び品質が満たされるようにしなければならない。

SECURE-G 工法はジオシンセティックスを用いた盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）であることから、施工に当たっては、「道路土工要領」、「道路土工－盛土工指針」、「道路土工－軟弱地盤対策工指針」及び「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル」等に準拠するとともに、本工法の特徴を十分に理解して、設計で盛土の要求性能を確保するように設定した施工の条件を満足しなければならない。

5.2 施工手順

SECURE-G工法の施工に当たっては、設計で定められた条件を満足できるよう所定の施工手順に従って、適切に施工・施工管理を行う。

SECURE-G 工法の安定性及び耐久性は、施工の良否に大きく依存することから、図 5.2-1 に示す施工手順に従って行う。盛土及び **SECURE-G** 工法の施工に当たっての留意点を以下に示す。

(1) 施工計画

施工計画にとって最も重要なことは、その計画が実際の工事に即応し、計画にしたがって工事が円滑に進められることである。したがって、施工計画は過去の施工実績などについて十分に分析し、現場で起こり得る種々の条件や問題点を予測検討して立案する必要がある。施工計画の主な項目を以下に示す。

- ・ 土取場の選定
- ・ 施工機械の選定
- ・ 基礎地盤の調査と対策
- ・ その他

その他の項目としては、仮設計画や品質管理計画等があり、施工時期や現場の状況に応じて検討することが必要である。

1) 土取場の選定

土取場の選定は、補強効果に密接に関係する盛土材料の土質を選定することに直結するものである。

したがって、入念な調査を行い、良質な盛土材料が得られ、かつ経済的な立地条件にある場所を選定する必要がある。

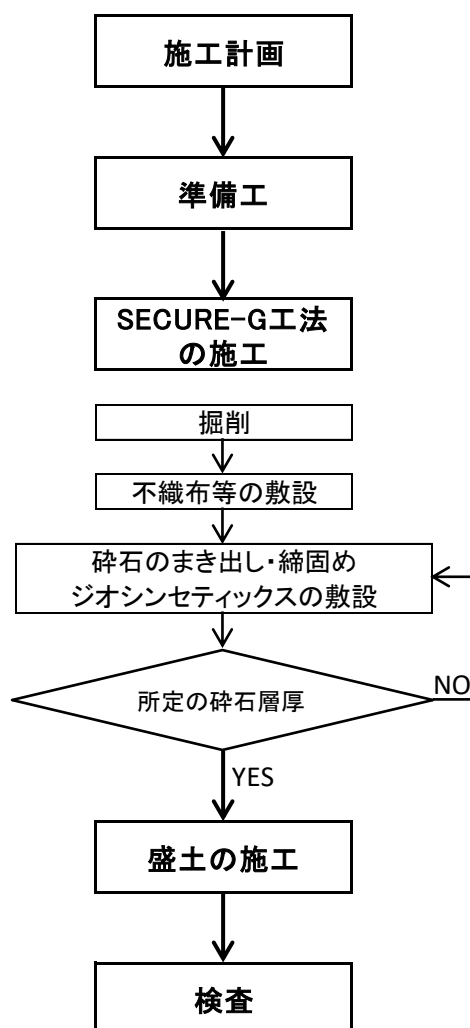


図 5.2-1 SECURE-G 工法の施工手順

2) 施工機械の選定

施工機械は、盛土材料の土質、現場の規模、地形条件及び工期等を考慮して選定することが望ましい。表 5.2-1 に主な作業の種類と建設機械の選定の目安を示す。

3) 基礎地盤の調査と検討

i) 地形・地質

現地調査や既存資料によって、広く工事区域の地形・地質・岩盤線等を把握する。特に、地すべり地帯や崩壊の多い地帯、軟弱地盤等に注意し、必要に応じて、基礎地盤土の置換え、改良、抑止杭及び段切り等の対策を検討するものとする。

表 5.2-1 作業の種類と建設機械

作業の種類	建設機械の種類
伐除根	ブルドーザ、レーキドーザ、バックホウ
掘 削	ショベル系掘削機（バックホウ、ドラグイン、クラムシェル） トラクターショベル、ブルドーザリッパ、ブレーカ
積 込 み	ショベル系掘削機（バックホウ、ドラグイン、クラムシェル） トラクターショベル
掘削、運搬	ブルドーザ、スクレープドーザ、スクレーパ
運 搬	ブルドーザ、ダンプトラック、ベルトコンベア
敷均し、整地	ブルドーザ、モータグレーダ、タイヤドーザ
締 固 め	タイヤローラ、振動ローラ、ロードローラ、振動コンパクタ タンパ、ブルドーザ
溝 掘 り	トレンチャ、バックホウ
のり面仕上げ	バックホウ

ii) 地表水・地下水の状況

以下に示す項目について、現地踏査・ボーリング等により状況を把握し、適切な排水工を検討するものとする。

- ・ 地表水の流量
- ・ 地下水位
- ・ 湧水や伏流水の可能性

盛土工の一般的な排水の対策工は、図5.2-2に示す通りであり、基盤排水層（碎石等）はSECURE-G工法の碎石層の上部に直接施工するものとする。また、液状化時には、SECURE-G工法の碎石層から基盤排水層を通り排水されることから法尻部の洗掘を防ぐ安定対策として、かご工を設置する場合もある。（図5.2-3 参照）

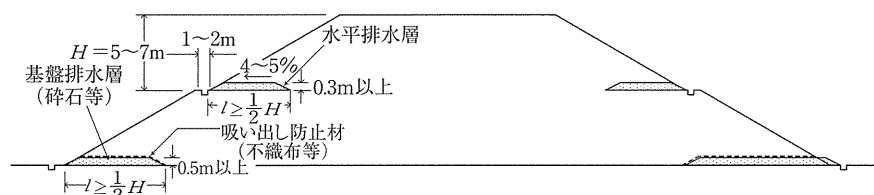


図 5.2-2 基盤排水層の例（道路土工 盛土工指針）

(2) 準備工

準備工として、基礎地盤の処理（伐除根、表土処理、段差の処理）、盛土材の特性把握、試験盛土

工（適切な施工仕様の把握）等を行う。

(3) SECURE-G 工法の施工

1) 掘削

砕石設置のための掘削時、掘削面の崩壊がないよう図 5.2-3 に示すように安定勾配を確保して掘削する。掘削は、設計で設定された砕石幅を確保するよう掘削する。ここで、掘削範囲は水路や用地境界等の余裕幅の関係を考慮して設定する。

地下水位が高い場合、釜場排水等で排水処理を行い施工する必要がある。

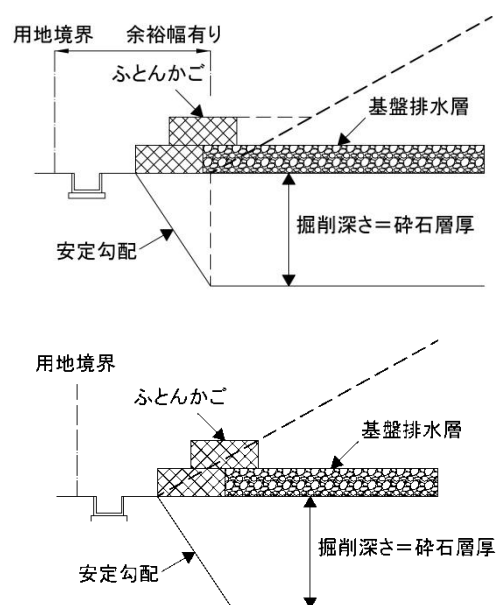


図 5.2-3 掘削工、法尻工

2) 不織布等の敷設

不織布の敷設に当たっては、所定の敷設長に切断し、所定の位置に敷設する。不織布は、地盤の細粒分が砕石内に流入しないよう、掘削底面から掘削上部の側面に敷設する。また、端部は重ね合わせて、地盤からの細粒分の流入を防止する。砕石の敷均しや締固め作業による不織布のズレによる重ね合わせの減少により、分離材としての機能を損なわないよう注意する必要がある。

3) 砕石のまき出しと締固め

砕石層の施工時の 1 層仕上り厚さは、**25cm** を標準とする。砕石のまき出し及び敷均しは、施工精度に大きく影響を与えるものである。したがって、まき出しは基準の厚さを確保しながら、平坦に敷均しを行う。締固めは、SECURE-G 工法の安定性や耐久性に大きな影響を与えるものである。したがって、5.3 施工管理に示すような締固め規定に従って締固めを行う。砕石の締固め作業を行う機械は表 5.2-1 に示す中から、施工規模や現場条件等を考慮し、適切な機種を選定する。また、降雨対策や湧水対策も十分に行う必要がある。なお、ジオシンセティックス上への砕石のまき出しに当たっては、ジオシンセティックスを損傷しないように、十分注意する必要がある。特に、ジオシンセティックスの上に直接重機を走行させないことが重要である。

4) ジオシンセティックスの敷設

ジオシンセティックスの敷設に当たっては、設計によって定められた補強方向に必要な敷設長を確保出来るようにする。なお、補強方向の接続は原則としては行わないものとする。そして、その強度を十分に発揮させるために、すべりあるいは土圧の作用する方向に敷設するものとする。

曲線部や隅角部を含む施工区間では、隣り合う補強材との間に隙間が出来たり重ね合わせが生じたりする。このような場合は、設計の考え方や手法を考慮してジオシンセティックスの補強材間隔を規定間隔以上に開けないものとする。

補強材を敷設後、曲がりやたるみが生じないように、固定ピンなどによって補強材の耳部の両端を固定するものとする。

なお、ジオシンセティックスを複数枚敷設する場合の鉛直方向への設置間隔は、砕石の締固めの仕上り層厚（標準は 25cm）に対して整数倍の間隔にしておけば、締固めの管理に合わせてジオシンセティックスを敷設できるため効率的である。

(4) 盛土の施工

SECURE-G 工法による液状化変形抑制対策を行った基礎地盤上の盛土の施工に当たり、盛土材料のまき出し及び敷均しは、施工精度に大きく影響を与えるものである。したがって、まき出しは基準の厚さを確保しながら、平坦に敷均しを行う。締固めは、盛土の安定性や耐久性に大きな影響を与えるものであるため、5.3 施工管理で後述する所定の締固め規定に従って十分に締固めを行う。

5.3 施工管理

(1) 砕石の締固め管理

SECURE-G工法における砕石の締固めは、タイヤローラ等の転圧機械を用いて、転圧回数3～5回を目安として管理を行う。

SECURE-G 工法に用いる砕石は、最大粒径が過大にならないもので、具体的にはクラッシュラン（C-40）、もしくはこれに相当する材料で、透水性が問題となるような細粒分を含まない材料を用いる。一般的に、砕石は容易に締固まるが、砂置換法や RI 計測等の現場密度試験で正確に密度を管理することは難しい。このため、砕石の締固め管理は、転圧機械の転圧回数で規定することとする。

通常、100kN 級の振動ローラやタイヤローラ等の転圧機械を用いて、仕上り厚さが 30cm の場合に 2～5 回の転圧回数で、90%程度の締固め度は得られるが、使用する砕石と施工機械による試験施工を実施し、転圧回数を決定することが望ましい。なお、過度の締固めを行うと、粒子破碎等も生じて、透水性が低下することが懸念されるため、注意が必要である。

(2) 補強材の保管

ジオシンセティックスの性能を維持できるように、適切な場所で保管する。

ジオシンセティックスは、施工まで適切な場所に保管する。施工中は、機械や他の材料によって損傷しないような場所に仮置きしておく必要がある。

(3) ジオシンセティックスの施工上の留意点

ジオシンセティックスの施工は、補強材の引張効果が十分発揮されるように十分留意して行う。

SECURE-G 工法を適用する場合の施工上の留意点を以下に示す。

- ① ジオシンセティックスの敷設の際、ジオシンセティックスの損傷や不陸を生じさせないよう、異物の除去を入念に行う。
- ② 砕石がまき出されていないジオシンセティックス上を、施工機械が直接走行しないように注意する。
- ③ ジオシンセティックスの現地接合は、設計上必要な強さが確保されるように、専用連結金具あるいはラップ長を照査したラップ接合等を用いて行う。
- ④ 砕石のまき出しにおいて、ジオシンセティックスが破断することなく、できるだけ均一な厚さに仕上げるために、砕石1層仕上がり厚は **25cm** を標準とする。

(4) 盛土の締固め管理

盛土の締固めは、盛土の品質を確保する上で最も重要であるため、所定の締固め規定に基づき、まき出し厚及び締固め度等に対し十分な管理を行う。

SECURE-G 工法による液状化変形抑制対策を行った基礎地盤上の盛土の施工に当たり、盛土材料の締固め管理は、盛土の品質を確保する上で最も重要であり、同時に盛土材料のまき出し厚の管理も重要である。このため、表 5.3-1 に示すような、所定の締固め規定に基づいて、盛土材料のまき出し厚及び締固め度等に対して十分に配慮することが必要である。

表 5.3-1 各機関の締固め管理方法と既定値

品質管理項目	分野	道路(国道等)		高速道路		
	基準書等	道路土工 盛土工指針		NEXCO 土工施工管理要領		
	区分	路体	路床	路体	下部路床	上部路床
密度比	突固め試験名	JIS A 1210 (A, B 法)	JIS A 1210	JIS A 1210 (B 法)	JIS A 1210 (E 法)	JIS A 1210 (E 法)
	D 値	砂質土 90%以上 ^{*1}	砂質土 (A, B 法) 95%以上 ^{*1} (C, D, E 法) 90%以上 ^{*1}	92%以上 ^{*3}	92%以上 ^{*3}	97%以上 ^{*3}
空気間隙率	v_a	粘性土 10%以下 ^{*1}	粘性土 8%以下 ^{*1}	8%以下 ^{*4} 13%以下 ^{*5}	8%以下 ^{*4} 13%以下 ^{*5}	8%以下 ^{*4} 13%以下 ^{*5}
飽和度	S_r	粘性土 85%以上 ^{*1}	—	—	—	—
強度・変形特性	試験方法	コーン指数	平板載荷試験	—	—	たわみ測定
	規定値	※必要に応じて実施	現場 CBR 試験	—	—	仕上り面で 5mm 以下
施工含水比		^{*2}	最適含水比付近	自然含水比及びトラフカビリティーが確保できる含水比	自然含水比及びトラフカビリティーが確保できる含水比	締固め度及び所定たわみ規定を満足する含水比
1層の仕上がり厚さ		30cm 以下	20cm 以下	30cm 以下	20cm 以下	20cm 以下

盛土材料最大粒径	—	—	300mm 以下	150mm 以下	100mm 以下
*1	管理基準値の目安で、1 回 3 点以上の試験を行った場合の最低値に対するもの。				
*2	密度比管理の場合は、締固め曲線の管理基準以上となる含水比範囲。空気間隙率、飽和度管理の場合は、自然含水比またはトラフカビリティが確保できる含水比。				
*3	盛土材料の粒度における $F_c < 20\%$ の場合で、管理基準値は RI 法による管理する場合で測定値 15 点の平均値。				
*4	盛土材料の粒度における $50\% \leq F_c$ の場合で、管理基準値は RI 法による管理する場合で測定値 15 点の平均値。				
*5	盛土材料の粒度における $20\% \leq 50\% < F_c$ の場合で、管理基準値は RI 法による管理する場合で測定値 15 点の平均値。				

5.4 沈下管理及び安定管理

盛土の施工においては、必要に応じて情報化施工を行なうこととする。

軟弱地盤上に盛土を施工する場合、設計で得られた予測と実際の地盤や盛土の挙動は一致することが少なく、このため設計どおり施工を行っても予想外の変形を示したり、破壊したりすることが予想される。これは、調査、設計及び施工の中に多くの不確定要素が内在しているためである。

動態観測は、このような不確定要素を施工段階で得られる情報によって補い、盛土を確実に完成させるために実施するものである。

盛土の施工においては必要に応じて、動態観測を行ってデータの収集に努め、当初設計時の解析結果との比較検討を行った上で沈下量や設計の理論値と実測値との相違について検証し、その傾向が把握できる場合、設計の見直しや補正を行うこととする。

情報化施工の一般的な実施フローを図5.4-1に示す。

具体的な動態観測については、「道路土工 軟弱地盤対策工指針」や「NEXCO土工施工管理要領」等を参考にされたい。

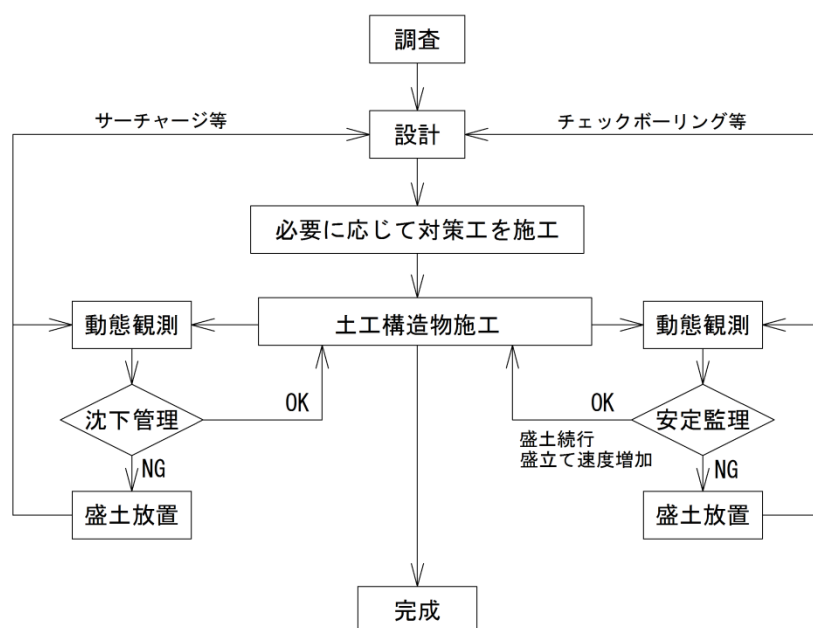


図 5.4-1 情報化施工の一般的なフロー（「道路土工 軟弱地盤対策法指針」より）

第6章 維持管理

6.1 維持管理の基本方針

- (1) 軟弱地盤上の盛土等が供用中、その機能を保ち続けるよう適切に維持管理を実施する。
- (2) 維持管理に当たっては、調査・計画・施工から維持管理までの各段階の記録等を参考に、調査及び点検・保守や、必要に応じた補修及び復旧を行う。

SECURE-G 工法は盛土の軟弱地盤対策工（液状化時の変形抑制工法）であることから、維持管理に当たっては、「道路土工要領」、「道路土工－盛土工指針」及び「道路土工－軟弱地盤対策工指針」等に準拠して実施する。

6.2 通常時の維持管理

管理者は、適切な維持管理を行う必要がある。供用中において、経年変化や自然災害の発生による影響を把握し、要求される機能を良好な状態に維持する。

維持管理に当たっては、周辺環境の変状を目視等により点検し、変状を把握する。盛土法面、地形、路面及び排水工の変状等から、安定度を総合的に評価するものである。光ファイバーによるセンサー機能付き補強材が敷設されている場合は、補強材に発生しているひずみの大きさも考慮する。

なお、具体的な維持管理方法については、「道路土工 盛土工指針」、「道路土工 軟弱地盤対策法指針」及び「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル」等を参照されたい。

表 6.2-1 点検項目の例

点検項目		着 眼 点
周辺の変状	のり面 (上載盛土)	のり面および小段に、クラック及び沈下はないか。 また、それらの進展のおそれがないか。
	路面	路面にクラック及び沈下がないか。 また、それらの進展のおそれがないか。
	基礎	基礎または本体の周辺にクラック及び沈下がないか。洗掘されていないか。 また、それらの進展のおそれがないか。
排水工	地下排水	水抜き孔や目地から著しい出水、にぎり、水量の変化等がないか
	表面排水	小段部の U 字溝等の表面排水工は機能しているか

6.3 災害時の復旧対策

災害等を受けた個所については、当面の速やかな機能回復を図るために盛土の応急対策を実施する。また、応急対策後に調査を行い、必要に応じて早急に本復旧を行う。

災害時の復旧対策については、「道路土工 盛土工指針」、「道路土工 軟弱地盤対策法指針」及び「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル」等を参照されたい。

6.4 施工台帳

施工台帳を作成し管理する。

台帳の様式は以下の通りである。

SECURE-G工法台帳

一般社団法人 ジオシンセティックス変形抑制工法研究会

工 事 概 要	
路線名	
工事名	
適用箇所	☐ 橋台背面 ☐ ボックスカルバート ☐ 避難路・緊急輸送道路 ☐ 海岸・河川堤防併設道路 ☐ 多重防御堤 ☐ 駐車場 ☐ その他(主要地方道路)
所在地	
発注者	
施工者	
工期	自 年 月 日 ～ 至 年 月 日

施 工 概 要	
盛土高	
砕石工	材料: 砕石厚:
補強材	材料:
不織布	材料:
盛土工	材料:
備考	
【平面図】 【標準断面図】	
【施工位置図・施工写真】 詳細位置のQRコード	
作成日	作成者 管理番号

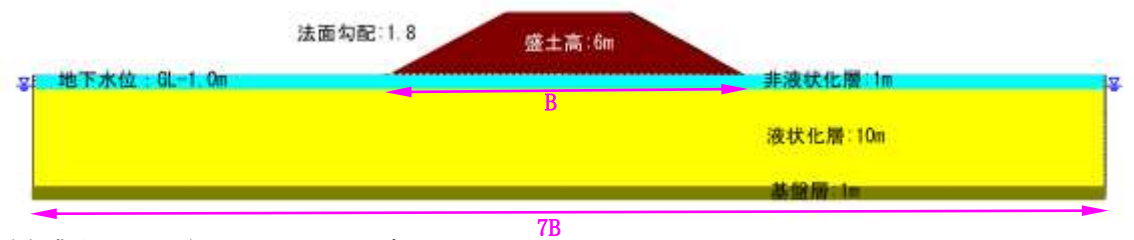
参考資料 1 設計計算例

ここでは、液状化判定の結果、盛土基礎地盤が液状化すると判定されたため、液状化時の変形解析の設計事例を示す。変形解析では、無対策時と対策(SECURE-G)時の変形照査を行う。変形照査は、河川堤防の液状化対策の手引き【平成 28 年 3 月】に準じ、静的液状化変形解析ソフト【ALID5.3】を用いた。液状化層のせん断剛性の拘束圧補正を考慮した。補正係数は、基準鉛直有効応力 $\sigma_{v0}' = 75\text{kN/m}^2$ とパラメータ $n=2.0$ を使用した。

1. 設計条件

(1) 地盤構成及び盛土形状

液状化層: 10m



(2) 盛土及び地盤パラメータ設定

事例計算 地下水位: GL-1.0m レベル2地震動($w=0.6$)

地層名	単位体積重量 γ (kN/m^3)	飽和圧縮係数 U_0 (kN/m^2)	せん断弾性係数 G (kN/m^2)	ポアソン比 μ	飽和力 Q (kN/m^2)	せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	ダイラタンシー角 ψ ($^\circ$)	粘結土圧係数 M_v	飽和分含率 F_u (%)	平均粒径 D_{50} (mm)	平均粒径 D_{10} (mm)	塑性指数 I_p	R_{L20}	相対密度 D_r (%)	N 値	震害特性・非線形タイプ	層厚
非液状化層	18.0	28,000	10,530	0.33	0	35	0	0.5	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00
液状化層	18.0	25,000	10,530	0.33	0	20	0	0.5	20.0	—	—	—	0.29	75	10.0	—	10.00
基礎層	19.0	140,000	52,830	0.33	0	45	35	0.5	—	—	—	—	—	—	50.0	—	1.00

液状化層

構造物特性値

	単位体積重量 γ (kN/m^3)	飽和圧縮係数 U_0 (kN/m^2)	せん断弾性係数 G (kN/m^2)	ポアソン比 μ	飽和力 Q (kN/m^2)	せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	ダイラタンシー角 ψ ($^\circ$)	粘結土圧係数 M_v	震害特性・非線形タイプ
盛土	19.0	20,000	10,530	0.33	—	30	5	0.5	—
砕石	20.0	300,000	73,190	0.33	—	35	10	0.5	—

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{0.7 + \sigma_{v0}'/98} + \frac{\Delta N_v}{1.7}} \quad ; \quad \sigma_{v0}' \text{ 有効土重圧 } (\text{kN/m}^2)$$
$$\Delta N_v = 0$$
$$= 1.2 (F_L - 5)$$
$$= 6 + 0.2 (F_L - 10)$$
$$= 8 + 0.1 (F_L - 20)$$
$$F_L \leq 5$$
$$5 < F_L \leq 10$$
$$10 < F_L \leq 20$$
$$F_L > 20$$

液状化判定を行う際に用いる設計水平震度の標準値

地震動		地震種別		
		I 種	II 種	III 種
レベル1地震動		0.12	0.15	0.18
レベル2地震動	タイプ I	0.30	0.35	0.40
	タイプ II	0.80	0.70	0.60

※道路土工 軟弱地盤対策工指針(平成24年度版)P169

地盤補正 I 0.90 → 0.66 0.68 0.69

液状化の判定を行う必要がある砂質土層

沖積層の砂質土層で以下の3条件全てに該当する場合には、地震時に土工構造物に影響を与える液状化が生じる可能性があるため、液状化の判定を行わなければならない。

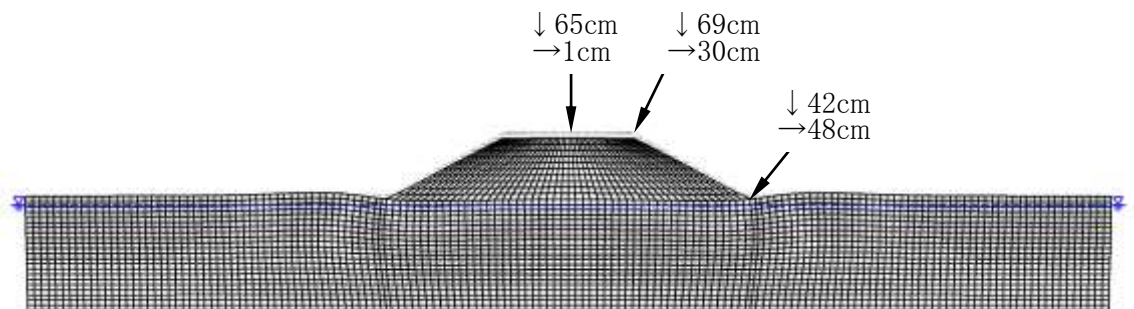
- ① 地下水位が地表面から10m以内であり、かつ地表面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- ② 細粒分含有率 F_u が35%以下の土層、または F_u が35%を超えても塑性指数 I_p が15以下の土層
- ③ 平均粒径 D_{50} が30mm以下で、かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下の土層

◆ 解析工程と荷重分割

- ① 初期応力: 荷重分割数1
- ② 盛土工: 荷重分割数20
- ③ 液状化震動: 荷重分割数50
- ④ 液状化低下: 荷重分割数50

2. 無対策時の変形照査

想定地震動: レベル2地震動 タイプ2 III種地盤



・無対策時の盛土中央沈下 65cm が許容変位 50cm を超える為、SECURE-G 工法で対策を行う。

3. SECURE-G 工法の照査

(1) ジオシンセティックスの設計

ジオシンセティックスに作用する引張力は、弾性支承上の梁理論と単鉄筋の断面照査の方法を用いた以下の手順で算定する。

①弾性支承上の梁理論

釣合方程式(曲げたわみの微分方程式)

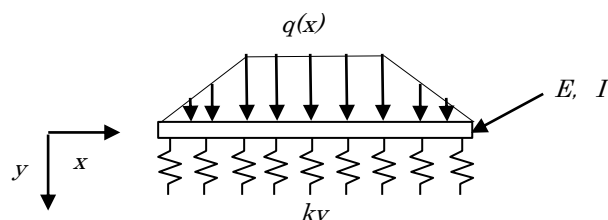
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_v \cdot y = q(x)$$

E : 梁の弾性係数 (kN/m²)

I : 梁の断面二次モーメント (m⁴)

k_v : 地盤反力係数 (kN/m³)

$q(x)$: 上載荷重分布 (kN/m²)



付図 4.4.3-3 弾性支承上の梁

ここで、梁の弾性係数は、砕石の剛性と仮定し、(社)日本道路協会：舗装設計便覧，pp. 129, (平成 18 年 2 月)から $E=200,000\text{kN/m}^2$ としている。

釣り合い方程式を展開し、梁に作用する断面力を得る。

②弾性支承の設定：地盤反力係数

地盤反力係数の設定は、道路橋示方書IV下部構造編の 9. 6. 2 に準拠して行う。

$$k_v = D_E \cdot k_{v0} (B/0.3)^{-3/4} = 1807 \text{ kN/m}^3$$

k_v : 地盤反力係数 (kN/m³)

k_{v0} : 直径 0. 3m の剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

$$k_{v0} = (1/0.3)\alpha E_0$$

B : 盛土の法尻幅 (m) = 33. 6m

E_0 : 地盤の変形係数 ($E_0 = 2800 \cdot N = 28000\text{kN/m}^2$)

N : $N = 10. 0$

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha = 1. 0$)

D_E : 土質定数の低減係数 $D_E = 0. 667$ (盛土直下平均 $F_L = 0. 6$ 、 $R > 0. 3$)

ここで地盤反力係数は、道示V耐震設計編 8. 2. 4「耐震設計上の地盤定数を低減させる土層とその取り扱い」に準拠して、液状化に対する抵抗率 F_L の値に応じた低減係数 D_E を用いて、低減させる。

付表 4.4.3-1 土質定数の低減係数 D_E

F_L の範囲	地表面からの 深度 x (m)	動的せん断強度比 R	
		$R \leq 0. 3$	$0. 3 < R$
$F_L \leq 1/3$	$0 \leq x \leq 10$	0	1/6
	$10 < x \leq 20$	1/3	1/3
$1/3 < F_L \leq 2/3$	$0 \leq x \leq 10$	1/3	2/3
	$10 < x \leq 20$	2/3	2/3
$2/3 < F_L \leq 1$	$0 \leq x \leq 10$	2/3	1
	$10 < x \leq 20$	1	1

③断面照査

弾性支承上の梁モデルから得られた曲げモーメントを使用して、鉄筋コンクリートの断面照査の方法によりジオシンセティックスの引張力を算定する。

ジオシンセティックスの断面照査は、曲げモーメントが作用する単鉄筋の RC 構造の断面照査法により圧縮領域と引張領域を評価し、材料の必要強度を算出する。

中立軸までの距離 X

$$X = (nAt/b) \left\{ -1 + \sqrt{(1 + 2bd/nAt)} \right\}$$

換算断面の中立軸に関する断面二次モーメント I_e は、

$$I_e = nAt(d - X)(d - X/3)$$

引張り材の応力度 σ_t は,

$$\sigma_t = M/\{At(d - X/3)\}$$

ここで、

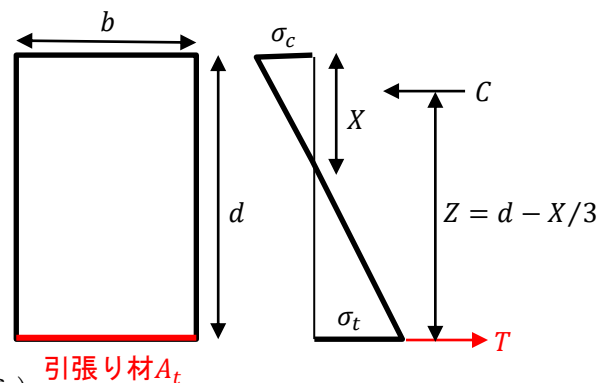
 M : 断面作用モーメント

n : 弾性係数比 = (引張り材 E_t /碎石 E)

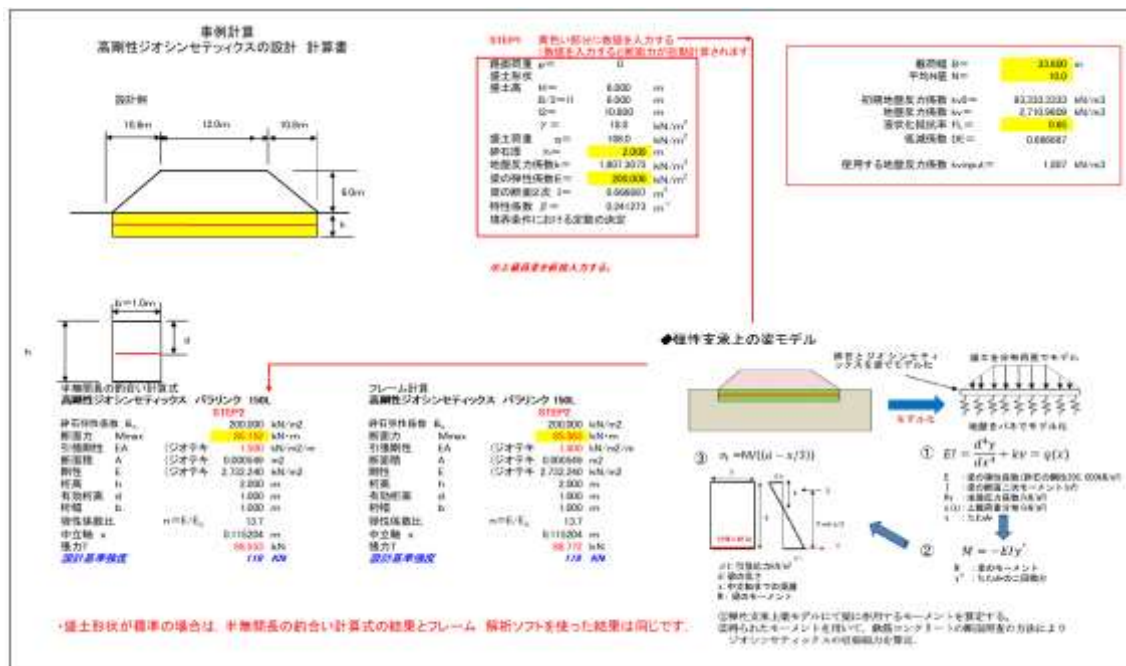
E : 碎石弾性係数(=200,000kN/m²:舗装指針から)

E_t : 引張り材の弾性係数 (パラリンクの諸元から)

A_t : 引張り材の断面積



付図 4.4.3-4 断面照査法

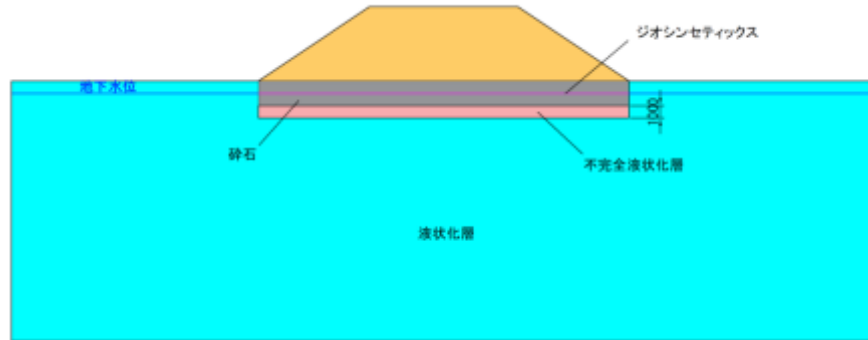


よって、ジオシンセティックスは $EA=1500\text{kN/m}$ として設定する。

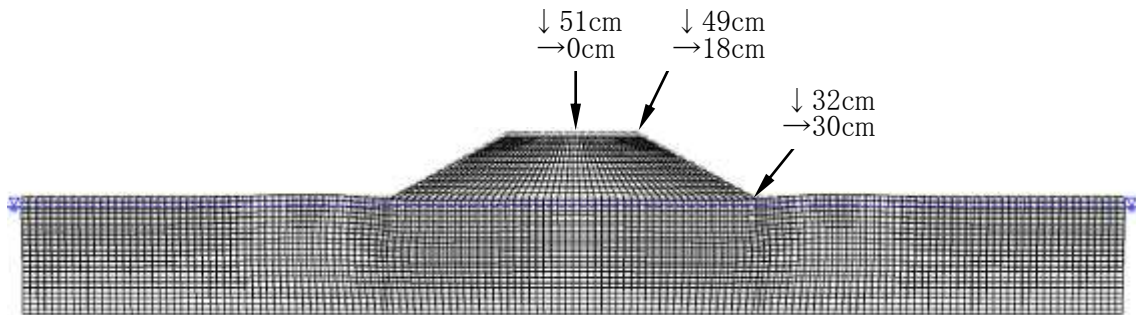
(2) 静的 FEM (ALID)による変形照査

①地盤構成

SECURE-G による対策は、碎石層厚を 1m+1m の 2m で、ジオシンセティックスを $EA=3000\text{kN/m}$ としてモデル化する。また、碎石層下面 1m の範囲は、不完全液状化層 ($F_L=1.2$) を配置する。



③対策時変形照査結果

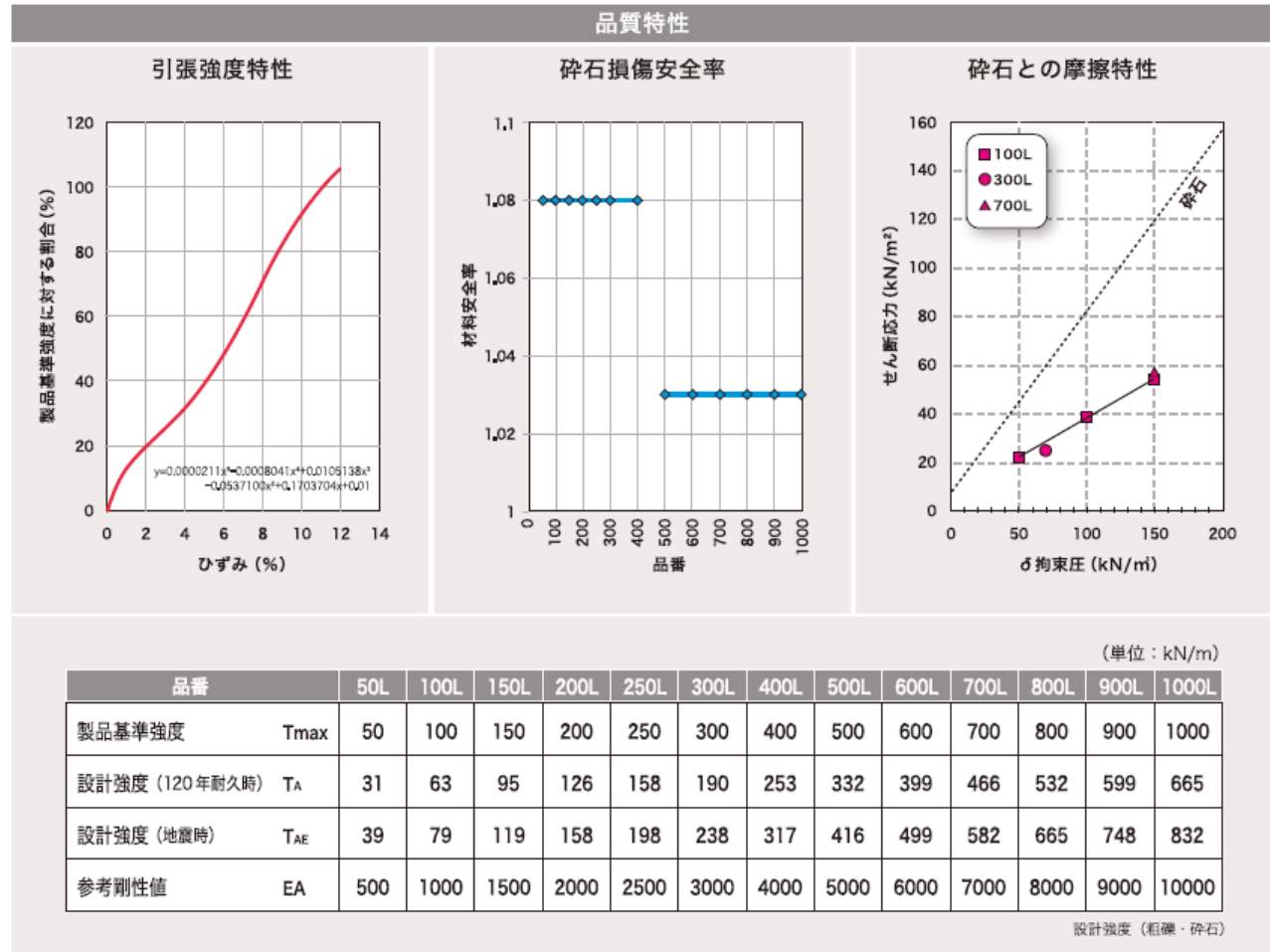


対策の結果、無対策時の盛土中央の沈下量 65cm が 51cm となり、沈下量を 78%に低減することができる。

参考資料 2 使用材料例

1.1 ジオシンセティックス

ここでは、建設技術審査証明（第1306号）を取得しているパラリンクの物性を以下に示す。



(ALIDでの入力パラメータ)

品番	製品基準強度	設計強度	設計強度	単位重量	断面積	引張剛性	変形係数
	Tmax (kN/m)	TA (kN/m)	TAE (kN/m)	γ (kN/m³)	A (㎡)	EA (kN/m)	E (kN/m²)
50L	50	31	39	0.0034	0.000418	500	1,196,172
100L	100	63	79	0.0043	0.000463	1,000	2,159,827
150L	150	95	119	0.0052	0.000549	1,500	2,732,240
200L	200	126	158	0.0059	0.000570	2,000	3,508,772
250L	250	158	198	0.0072	0.000684	2,500	3,654,971
300L	300	190	238	0.0081	0.000784	3,000	3,826,531
400L	400	253	317	0.0110	0.001080	4,000	3,703,704
500L	500	332	416	0.0134	0.001255	5,000	3,984,064
600L	600	399	449	0.0157	0.001751	6,000	3,426,613
700L	700	466	582	0.0181	0.001927	7,000	3,632,590
800L	800	532	665	0.0208	0.002184	8,000	3,663,004
900L	900	599	748	0.0235	0.002548	9,000	3,532,182
1000L	1000	665	832	0.0260	0.002775	10,000	3,603,604

1.2 不織布

ここでは、MACTEX Nの物性を以下に示す。

原料：ポリプロピレン

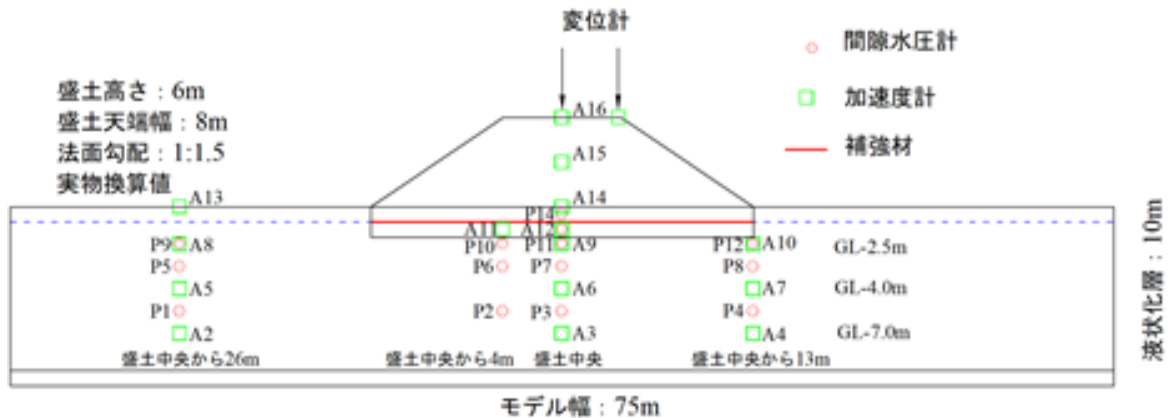
製造手法：ニードルパンチ法により製造された連続長繊維不織布

項 目			単位	N 18.1	試験方法
厚 さ	測定 荷重	0.5kPa	mm	2.0	JIS L 1085
		2.0kPa	mm	1.8	JIS L 1908
引張強度	た て		kN/m	7.6	JIS L 1908
	よ こ		kN/m	7.0	JIS L 1908
伸 び	た て		%	54	JIS L 1908
	よ こ		%	76	JIS L 1908

付属資料1 不完全液状化層の範囲について

1.1 動的遠心模型実験

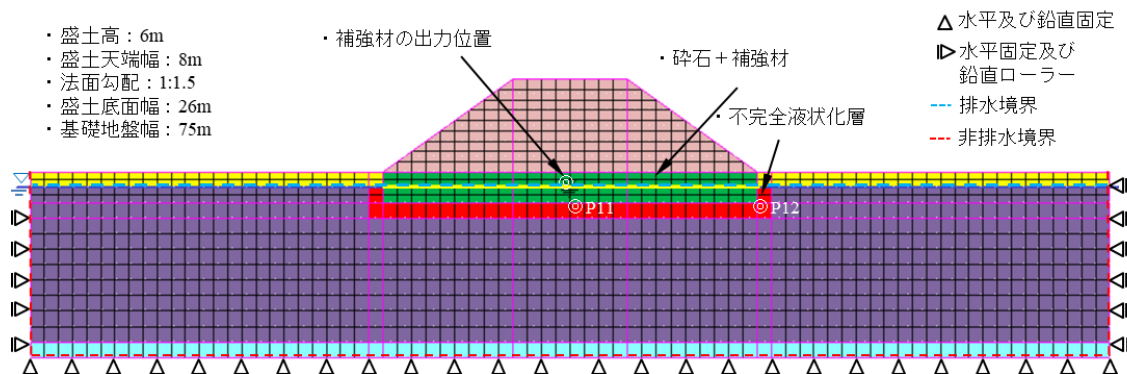
過去に実施した50G動的遠心模型実験の詳細図を以下に示す。



1/50スケールで実験を実施しており、模型寸法を実寸に直すと盛土高さ6m、液状化層10mである。

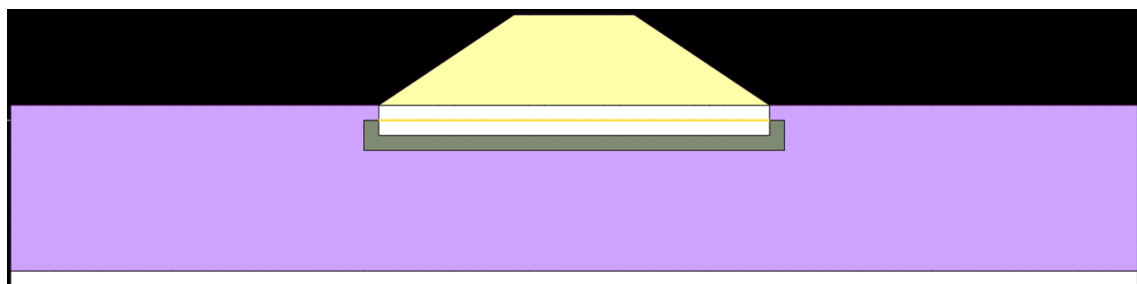
1.2 再現解析

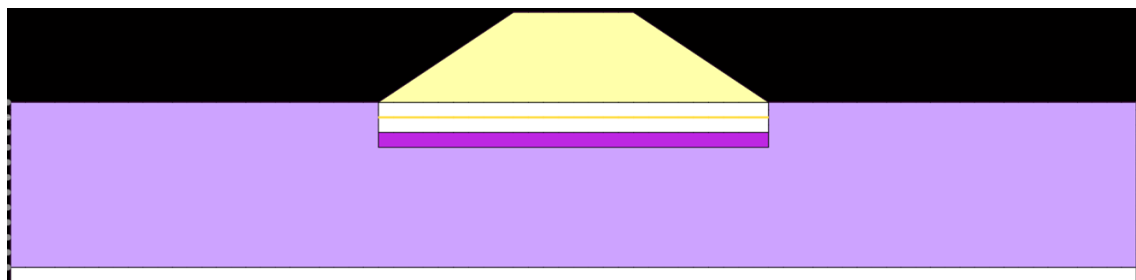
実施した動的遠心模型実験を動的解析LIQCAで再現解析を実施した。以下に解析のモデルを示す。



1.3 不完全液状化層について

以下に再現解析を実施した際に設定した不完全液状化層の図を示す。



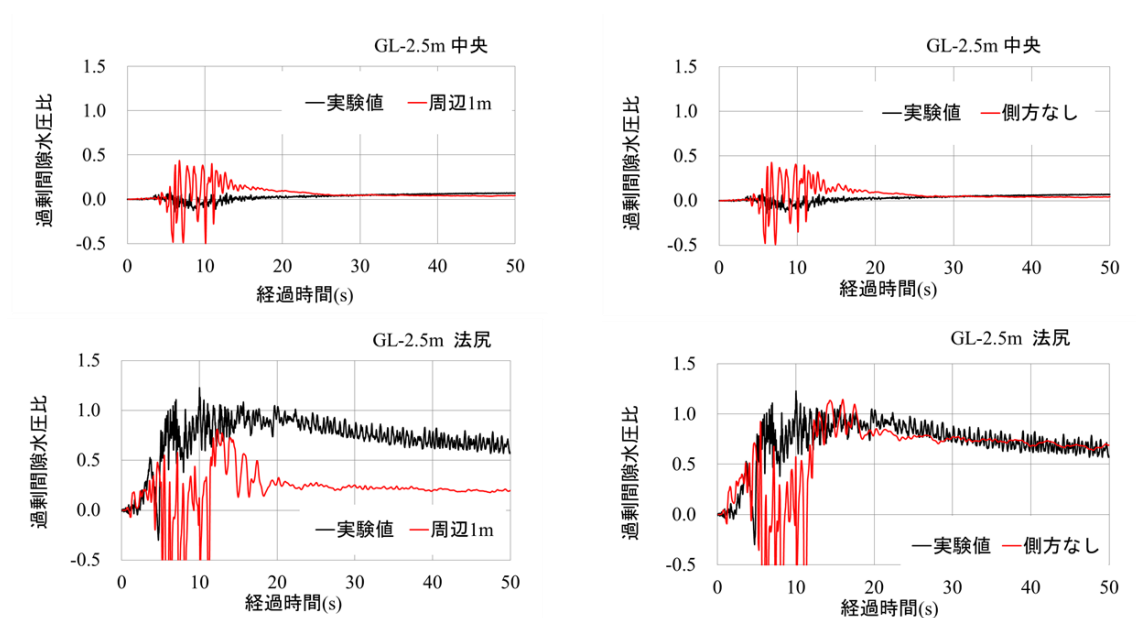


上図が従来通り不完全液状化層を碎石の周辺1mに設定したモデルである。

対して、下図が新しく不完全液状化層を碎石下面1mのみに設定したモデルである。実験結果と2ケースの再現解析の結果を比較する。

1.4 実験結果と再現解析結果について

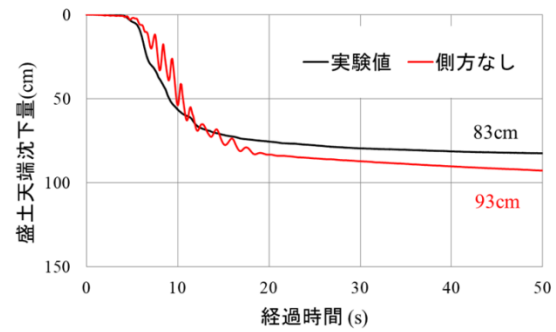
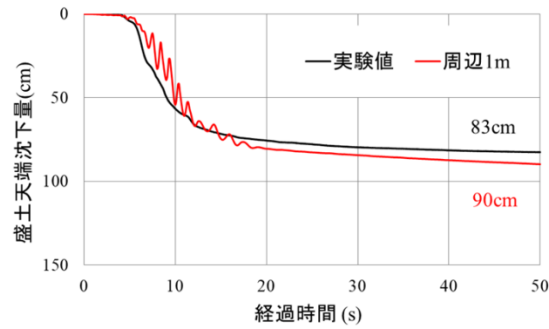
ここでは、過去実施した動的遠心模型実験の結果と実験の再現解析結果の比較を示す。



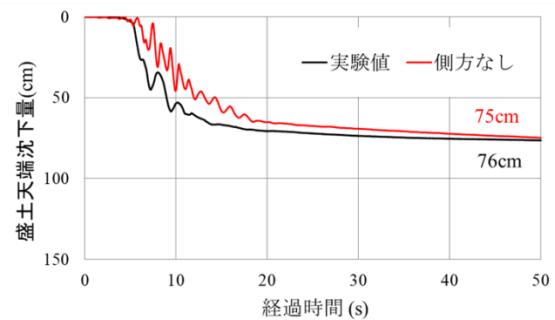
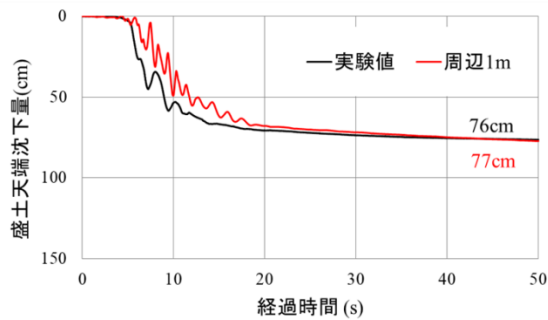
実験と再現解析の盛土中央のGL-2.5mと盛土法尻のGL-2.5mの過剰間隙水圧比を比較したグラフを示した。結果から分かるように盛土中央のGL-2.5mは再現解析の両ケースにおいて不完全液状化層を設定しているため同値となり、若干のスパイクがあるものの実験結果とも一致している。

対して盛土法尻のGL-2.5mにおいては従来の周辺1mに不完全液状化層を設けた場合(左側)、法尻部においても不完全液状化層が存在する影響により実験値に対して再現解析の値が小さく合っていない。碎石下面1mのみに設定したモデル(右側)では過剰間隙水圧比の結果が実験と再現解析で非常に近い値を示した。

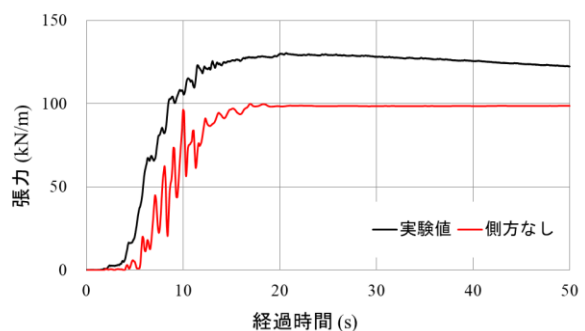
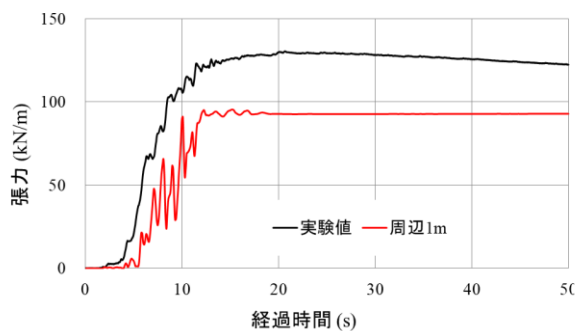
盛土天端中央沈下量



盛土法肩沈下量



同じく盛土の天端中央及び盛土法肩における沈下量を実験と再現解析で比較したグラフを示した。天端中央及び法肩においてどちらのケースにおいても実験値と近い値になった。また、新しいケースにおいて不完全液状化層を碎石下面1mに修正したところ従来の不完全液状化層にした場合と比べて沈下の増加量は3cm程度であった。実際に設計業務で用いるALIDにおいて同様に不完全液状化層を変更して解析を行ったが沈下の増加量は3cm程度であった。



補強材に働く張力について実験と再現解析の結果を比較したグラフを示した。違いとしては少量ではあるが不完全液状化層を碎石下面1mと設定したケースの方が発揮張力が大きくなり実験結果に近い値をとった。

1.5 不完全液状化層の範囲について

以上の結果を踏まえて、盛土の沈下を与える影響が少なく、盛土法尻のGL-2.5mにおける過剰間隙水圧比の挙動が実験と近い結果となったことから、SECURE-Gを敷設したことにより発生する不完全液状化層は碎石下面1mを範囲とする。不完全液状化層の設定位置に関して図示したものを以下に示す。

