

高盛土の動的解析におけるせん断弾性係数の設定について

篠原秀明・南部光広・福原慶一・古田一郎

A note on evaluation of initial shear modulus for earthquake resistant design of high embankment

Hideaki Shinohara, Mitsuhiko Nambu, Keiichi Fukuhara, Ichiro Furuta

Abstract

Dynamic FEM analysis was required for earthquake resistant design of a high embankment. In the analysis, it should be evaluated magnitude and distribution of initial shear modulus in the embankment rationally. This note describes a rational method evaluating the initial shear modulus based on both results of laboratory dynamic tests considering the stress dependency of banking materials and PS logging against an experimental embankment. An estimated distribution of shear wave velocity in the embankment, which was converted from the initial shear modulus corresponding to the laboratory tests, showed good agreement with a tomography obtained from the PS logging. This note also describes that magnitude of the initial shear modulus is different from banking materials.

キーワード：せん断弾性係数，拘束圧，盛土，数値解析，三軸試験，物理探査

1. はじめに

近年，丘陵地の広域開発に伴う切り盛り造成が各所で進められており，谷筋を埋める大規模な高盛土（以降，高盛土という）が出現している。高盛土については，1978年宮城県沖地震に代表されるような切り盛り造成地における盛土のり面の崩壊や液状化に伴う流動性の変状などが発生したことから，耐震性の検討が重視されてきたが，1995年兵庫県南部地震の被災¹⁾を契機として，高盛土の規制が見直されるとともに，建設に際してはより詳細な耐震検討が求められることとなった。

このような状況にあって，高盛土の耐震性を照査するために，FEMによる動的解析を実施する機会が増えている。動的解析の結果に最も影響を及ぼす入力パラメータの一つに初期せん断弾性係数があるが，高盛土の場合には盛土自体の地震応答が安定上問題となるため，盛土の初期せん断弾性係数を合理的に推定することが重要となる。

本報告では，盛土高40mに達する高盛土の建設が予定されている造成工事において，先行して施工される高さ25mの盛土を試験盛土と位置付け，室内土質試験から推定した盛土の初期せん断弾性係数の分布を実際に施工された盛土でPS検層およびS波トモグラフィにより検証することにより，本盛土にも利用できる初期せん断弾性係数の設定を試みた事例を紹介する。

本事例では，室内土質試験から推定した盛土の物性分布が，S波トモグラフィの結果と良い整合を示したことにより，室内土質試験から盛土の物性を推定できることを確認した。また，拘束圧に対する剛性の変化割合は材料に依存しないが，絶対値は材料に大きく依存する可能性があることから，材料毎に基本的な物性を確認することが重要であることを示した。

2. 高盛土の概要

今回対象とした高盛土は，神戸市街地の西方に開発されている宅地造成地内に位置している。造成地は丘陵地に位置しており，対象となる盛土は谷を埋めて築造される。丘陵地に分布する地質は，新生代第三紀鮮新世～第四紀洪新世に堆積した大阪層群からなっており，礫質土，砂質土および粘性土の各層がほぼ水平に堆積している。

試験盛土として位置付けられた盛土は，高さ40mの盛土に近接して先行造成される高さ25mの盛土である。この盛土を検証現場として，高盛土の耐震性および長期安定性を検討するために設定した盛土材料の物性試験を実施するとともに，盛土の動態観測および完成後の物性調査に基づいて適用性を検証し，当該造成地における高盛土の評価方法を確立することが計画された。

当該造成地の盛土材料は，切土によって発生する大阪層群の土砂材料である。盛土材料は細粒分を約12%含有し，均等係数は88と大きく，粒度配合のよい礫質土が主

体である。自然含水比は9.8%と低く、最大乾燥密度は1.914g/cm³である。また、最大乾燥密度の90%の締固め度での三軸圧縮（CD）試験から得られたせん断抵抗角は35.03°、粘着力は9.8kN/m²である。

3. 室内土質試験に基づく盛土に対する初期せん断弾性係数の設定

高盛土の地震時安定性を検討するためにFEMによる動的解析が行われるが、重要な入力パラメータの一つとして初期せん断弾性係数があげられる。初期せん断弾性係数を求めるには、①原位置においてPS検層を実施することによりS波速度から求める方法と、②想定される平均有効主応力下での動的変形試験から微小ひずみ域におけるせん断弾性係数を求める方法がある。

基礎地盤については現存することから①の方法を適用することができるが、盛土に関しては造成前のために造成に用いられる盛土材料をもとに②の室内土質試験による方法をとることになる。

未固結材料の動的変形特性は、圧密圧力に強く依存することが一般に知られており、盛土構造物においては自重応力分布に依存した物性分布が形成されるものと考えられる。本事例では、盛土の自重応力分布を予めFEMを用いて解析するとともに、盛土内に発生する平均有効主応力をパラメータとした室内土質試験を実施することにより、盛土内の応力分布を反映した動的変形特性を設定することにした。

盛土の動的変形特性を推定するための試験方法として、ひずみ依存性を求めるための動的変形試験および応力依存性を求めるための微小繰返し载荷を伴う等方圧密試験を実施した。

供試体の大きさは、盛土材の最大礫径がφ50mmとなることを考慮してφ300mm×H600mmとし、盛土施工の締固め条件である最大乾燥密度の90%で締固めた。供試体の圧密は全て等方状態でいき、盛土高さ25m（試験盛土）および40mで想定される平均有効主応力を考慮して、98.1~589kN/m²の6段階に設定した。なお、動的変形試験については、147kN/m²および392kN/m²の2条件で実施した。これらの試験には、大型供試体を使用可能な大型繰返し三軸試験装置を使用した。なお、平均有効主応力589kN/m²は盛土の密度を2.0g/cm³とすると、45mの盛土高さに相当している。

図-1に試験結果を示した。盛土造成前における動的解析には、この試験結果からべき乗近似によって以下の式を導いて、動的解析に適用した。

$$G_m = 13500 \times (\sigma'_m)^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 G_m :初期せん断弾性係数
 σ'_m :平均有効主応力

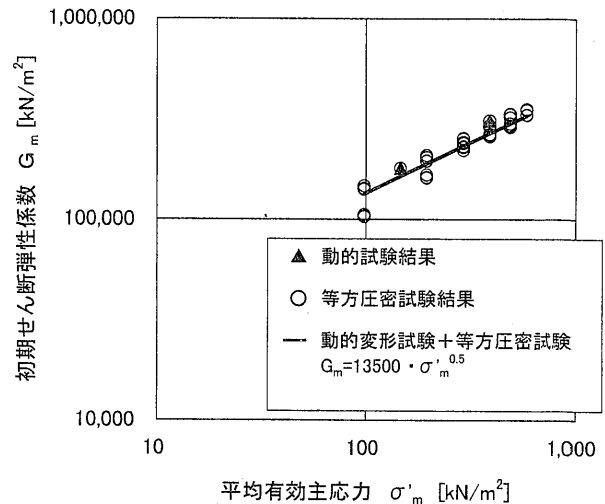


図-1 動的変形試験結果および等方圧密試験結果による初期せん断弾性係数と平均有効主応力の関係

Fig.1 Relations between the initial shear modulus and mean effective principal stress based on both results of laboratory dynamic tests and isotropic consolidation tests.

4. 盛土造成後の調査に基づく室内土質試験結果の検証

4.1 PS検層結果と室内土質試験結果の比較

試験盛土造成後にボーリングを行い、PS検層を行った。PS検層結果のS波速度から初期せん断弾性係数を求め、室内土質試験から推定した応力依存性とを比較を行った。

図-2に、PS検層の結果から求めた平均有効主応力と初期せん断弾性係数の関係を室内土質試験結果と比較して示す。PS検層結果はデータのバラツキがあるが、

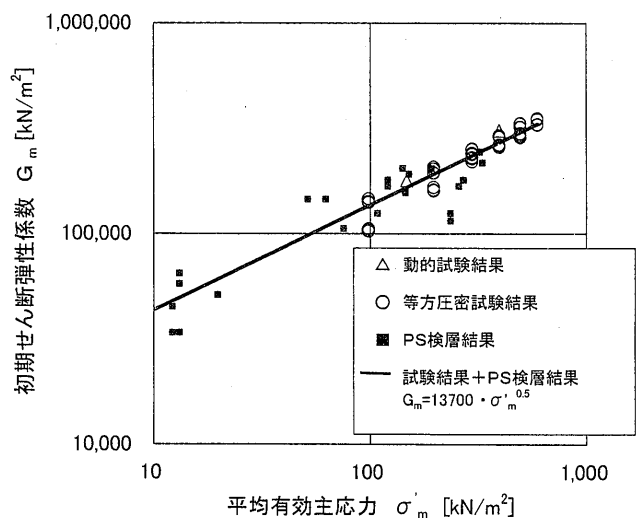


図-2 土質試験結果およびPS検層結果を総合した初期せん断弾性係数と平均有効主応力の関係

Fig.2 Relations between the initial shear modulus and mean effective principal stress used in results of laboratory dynamic tests and PS logging.

室内土質試験結果と比べてみると同程度の値を示している。それぞれの分布は若干異なっているが、結果のパラッキを考えると極端に大きな差がないことから、当該造成地の盛土については、室内土質試験およびPS 検層結果の全体でべき乗近似式を求めることにした。以下に、べき乗近似式を示し、図-2に近似曲線を示した。

$$G_m = 13700 \times (\sigma'_m)^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

4.2 S波トモグラフィ結果と室内土質試験から想定した初期せん断弾性係数分布の比較

試験盛土では、PS 検層に加えてS波トモグラフィを行い、図-3に示すようなS波速度の断面分布を求めている。図に示すS波トモグラフィによるS波速度分布では、盛土造成時の不均質性を示す分布があるものの、地表面で速度が遅く、深度が深くなるにつれて速度が速くなるという傾向を示している。

一方、盛土の初期応力解析結果と(2)式に示した初期せん断弾性係数の実験式から盛土内のS波速度を推定すると、図-4に示す分布図が得られた。両図に見られるように、室内土質試験に基づいて推定したS波速度分布は、S波トモグラフィの結果と概ね対応していることが確認された。なお、両方法によるS波速度の違いは、1割から1割強程度の違いに収まっている。

5. 盛土材が異なる場合のせん断弾性係数の比較

今回の盛土材料には、大阪層群の礫質土を用いているが、盛土材料が異なった場合には初期せん断弾性係数は異なった値を示すことが予想される。そこで、盛土材料が異なった場合に初期せん断弾性係数と平均有効主応力の関係がどの程度の違いがあるのかを見ることにする。

比較するデータとしては、次の二つである。一つは、神戸層群の泥岩および凝灰岩の材料を用いた高盛土の試験結果である。試験は本検討と同様、大型の三軸試験装置による動的変形試験と等方圧密試験の併用によっている。二つ目には、港湾技術研究所の井合ら(1998)²⁾が釧路空港で用いている釧路層群の礫質土と大柴毛類層の砂質土の混合材料を用いた高盛土の試験結果である。釧路空港では砂質土と砂礫の混合比を1:4としており、礫の配合が多い材料を用いている。

図-5に、これらの試験結果を比較した図を示す。釧路空港では礫分の多い材料を用いていることから初期せん断弾性係数が大きくなっている。一方、神戸層群の粘土質材料を用いた高盛土では、本検討における盛土材料の初期せん断弾性係数の5割程度となっている。このように、初期せん断弾性係数の絶対値は盛土材料によって大きく異なることが分かる。一方、平均有効主応力に対する依存傾向については、ここに例示したデータを見る限り、平均有効主応力に対しては材料によらず0.5乗に比例しているものと推察される。

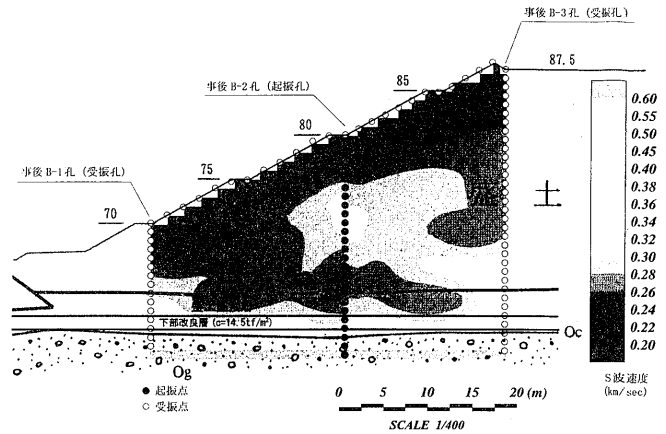


図-3 S波トモグラフィによるS波速度分布
Fig.3 Distributions of shear wave velocity by shear wave tomography methods.

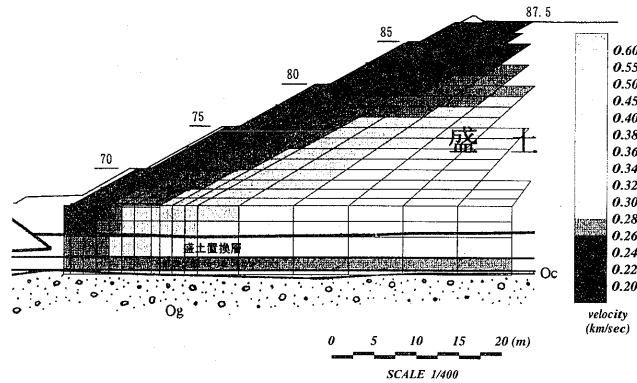


図-4 本検討で設定したせん断弾性係数より求めたS波速度分布
Fig.4 Distributions of shear wave velocity by initial shear modulus estimated from proposed relations.

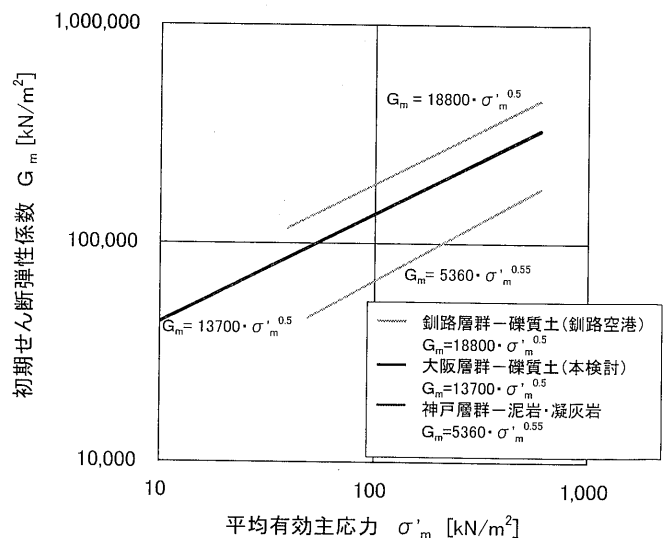


図-5 盛土材が異なる場合の初期せん断弾性係数と平均有効主応力の関係
Fig.5 Relations between the initial shear modulus and mean effective principal stress on the different materials of embankments.

6. まとめ

本検討結果から、高盛土の動的解析に用いる初期せん断弾性係数については、以下の設定方法を用いることを提案できる。

- ① 盛土造成前では、盛土材を再構成して供試体を作成し、ひずみ依存性を評価するための動的変形試験および応力依存性を評価するための微小繰返し载荷を伴う等方圧密試験を行い、平均有効主応力と初期せん断弾性係数の関係およびひずみ依存曲線を求める。この結果を、初期応力解析で求めた応力分布に適用し、応力状態に対応した物性を設定する。
- ② 本検討のように、本盛土を造成する前に、試験盛土を造成する場合には、①の検討に加え、盛土でPS検層を行い、土質試験結果と比較した上で、これらのデータを用いて平均有効主応力と初期せん断弾性係数の関係を求める。

今回の検討において平均有効主応力と初期せん断弾性係数の設定値は、S波トモグラフィ結果との整合が良いことを確認した。さらに、盛土材が異なる場合の初期せん断弾性係数の違いを見たところ、盛土材によって初期せん断弾性係数が大きく異なることがわかった。

このようなことから、初期せん断弾性係数の設定には、動的変形試験やPS検層等を行って、盛土材の特性にあった設定値を求めることが必要と考える。

参 考 文 献

- 1) 沖村孝, 二木幹夫, 岡本敦, 南部光広: 兵庫県南部地震による宅地地盤被害と各種要因との関係分析, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.259-270
- 2) 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, pp.1557-1562, 1998