

鉄道盛土の耐震補強箇所選定のための情報支援システムの構築とその利用

Development of an information system for the selection of seismic reinforcement sites of railway embankments

阪本泰士*, 関雅樹**, 永尾拓洋***, 伊藤義人****

Yasushi SAKAMOTO, Masaki SEKI, Takuhiro NAGAO, Yoshito ITOH

*東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部, 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 博士課程 (後期課程)
(〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

** 博 (工), 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (同上)

*** 工修, 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (同上)

**** 工博, 名古屋大学大学院教授 附属図書館長 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The seismic reinforcement of the Tokaido Shinkansen structure should be performed in order to prevent a long-term interruption due to a large-scale earthquake. In case of embankment structures, it is necessary to evaluate the seismic performance of embankments considering ground condition of each site. As a result, it is imperative to perform the geologic reconnaissance in all embankments, and a great amount of cost, time, and effort is required in the light of the conventional method. In this research an information support system based on existing data has been established to select seismic reinforcement sites from the embankments on the soft subsoil or on the ground having the possibility of the liquefaction. So far these existing data were managed separately, but the developed information system can make it possible to manage information unitarily and to display information on the map visibly. In addition to, this system can be enhanced as the synthetic maintenance management system in the Tokaido Shinkansen embankments.

Key Words: L2 earthquake, embankment, information system, microtremor

1. はじめに

1964 年 10 月 1 日に開業した東海道新幹線は, 昨年 10 月に品川駅が新しく開業して, 一日最大 300 本を超える列車が 270km/h にて営業運転している。近年の輸送量は年間 1 億 3000 万人の乗客が利用する状況であり, 日本の動脈として我が国において最も重要な社会基盤のひとつである。東海道新幹線のダイヤの正確さには, 2003 年度に一年間の一列車当りの平均遅れ時分が 0.1 分であり, 世界中の鉄道関係者から「桁が一桁違うのでは」という程の正確な運行状況である。

近年, 日本の太平洋岸を震源とした東海地震や東南海・南海地震¹⁾の大規模地震の発生が危惧されている。このため, 指定公共機関の一つである JR 東海でも, 法令および国の指導に基づき, 大規模地震時に備えての事前の措置, 地震災害発生時の被害の軽減等を目的とした「東海旅客鉄道株式会社防災業務計画」²⁾を定めている。例えば, 警戒宣言発令前後の列車の運行に関しては, 「鉄道事業者として法令を遵守し, お客様の安全を確保しつつ, 極力移動機会を提供していく」という基本的な考え方により運行計画が定められている。また, 東海道新幹線構造物の耐震補強工事は, 東海道新幹線が日本の動脈であることから, 東海地震時での長期不通防止を目的として進められてきた。さらに, 1995 年の兵庫県南部地震以降は, 東海地震に限らず, 東南海・南海地震および直下型大規模地震を対象とした耐震補強工事を東海道新幹

線全線において実施している。

RC 構造物に関しては, 兵庫県南部地震により新幹線構造物の一部も被災したため, せん断破壊性能に課題がある RC 構造物を選定して耐震補強工事が実施されている。耐震補強工事が必要な RC 構造物の選定は, 建設時の設計図書により選定可能である。

一方, 東海道新幹線の半数以上の構造比率を占める盛土に関しては, 耐震性能が劣るため東海地震対策として 1979 年から静岡県内を中心に長期不通が予測される被害が生じる軟弱地盤上および液状化地盤上の盛土を対象として耐震補強工事が実施されている。盛土の耐震性能評価には, 盛土形状の他, 盛土材料, 基礎地盤種別を基に地震時の応答特性を算出する必要がある。このため, 地質調査をすべての箇所で行う必要があるが, そのためには膨大な費用, 時間および労力が必要であり, 既存情報を活用することが効率的である。東海道新幹線では建設時の地質データの他, 開業後随所で実施された改良工事でのデータ並びに沿線の自治体地質データが活用可能である。また, 東海地震および東南海・南海地震に関しては, 推定入力地震に対応した地盤動等が公表されている。さらに, 東海道新幹線では 1979 年以降一部の区間で耐震補強工事のための地質調査も継続して実施されている。さらに, 東海道新幹線では防災管理等のために全線に渡り航空写真および 100m ほどの常時微動測定データがある。

本研究では, 既存のデータを活用することにより, 軟弱地盤上および液状化地盤上の盛土の中から耐震補強が必要な箇所の選

表-1 変形レベル (Fは安全率)

変形レベル	変形状態	被害程度	沈下量の目安
1	$F \geq 1.0$ 以上	なし	なし
2	$F \leq 1.0$ かつ 残留変形量が小さい	軽微	20cm未満
3	残留変形量は大さい が壊滅的な破壊に至らない	応急措置で 復旧可能	20cm以上 50cm未満
4	残留変形量が極めて 大きく、壊滅的な破壊に至る	復旧に 長時間要す	50cm以上

定をするための情報支援システムを構築し、その有効性を検証する。また、情報支援システムは、具体的な個々の盛土の補強工設計にも適用可能としている。本システムの特徴は、既存・新規も含め入手された東海道新幹線の地質・地震データを一元管理したこと、および耐震評価結果を可視的情報支援システムとしたことである。今回はL2地震を想定した耐震評価を行ったが、基礎情報をシステムに組み込んでいるため、再度システムを構築する手間なく、他のさまざまな地震に対し耐震評価を可能としている。さらに耐震に限定されず降雨、降雪並びに沿線振動に関するデータならびに、弾性波トモグラフィ解析等新技术により得られたデータも追加することにより、維持管理者にとって東海道新幹線盛土区間の総合的な情報支援システムとして活用発展が可能となると期待される。

2. 地震防災業務におけるGISの活用例について

地震時防災業務においてGISを活用した研究³⁾は従来から行われており、特に地震による被害予測についての研究が多い。例えば、北原ら⁴⁾は、模擬地震波の作成から動的解析の実行、さらに解析結果の統計処理までを専門家でない一般の技術者が簡便迅速に実施可能となるGISを構築した。久世ら⁵⁾は、開発した広域震度分布推定法の妥当性を検証するために、1944年の東南海地震を例に建物被害に基づく震度予測との比較をGIS上で行っている。また、自治体でも横浜市、静岡県、愛知県、豊橋市、名古屋市等が、震度予測や液状化の被害予測を、さらに岐阜大学では郵便番号を入力すれば当該箇所の東海、東南海、南海地震時の被害予測が行える「郵便番号情報検索システム」⁶⁾などが開発され、さらにインターネット上などで公表されている。

既往の研究は、被害予測の目的が市民に対する公的な注意喚起や、避難計画や復旧計画のための利用であることが多く、詳細な耐震補強を目的としているものは少ない。特に、地盤データのみに着目した面的な被害予測に関する研究が多く、入力地盤動や液状化の発生予測などの結果を示しているものが多い。したがって、個別構造物の被害予測には言及していないのが普通である。このため、東海道新幹線盛土の耐震補強工事箇所の選定に既往の研究成果は参考として利用できるものの不十分である。そこで、盛土耐震補強を目的として、沿線直下の地質データや当該箇所の盛土の物性値を用いた個別の盛土の被害予測可能な情報支援システムの開発を行った。この情報支援システムにより得られた耐震評価結果は、自治体で公表されている被害予測より精度が高いものと考えられる。

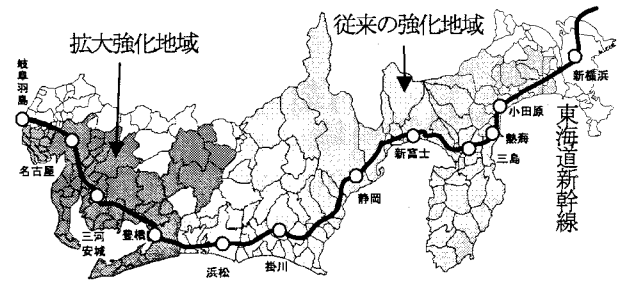


図-1 東海道新幹線と「東海地震防災強化地域」

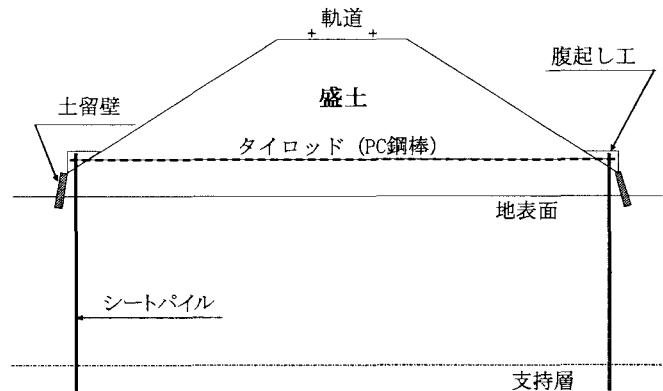


図-2 シートパイル締切り工法

提案システムでは、個々の盛土地点に関する盛土とその下の地盤の材料物性値、航空写真、常時微動データ等の既存の諸情報を活用して耐震評価を行う。盛土の被災パターン別の変形・沈下量の予測は、著者らがこれまで提案している方法による^{7,8)}。また、個々の盛土被害の損傷度の基準は表-1に示す「鉄道耐震設計標準」⁹⁾に基づく変形レベルを適用する。

3. 東海道新幹線の既往の耐震補強工事

「東海地震防災強化地域」は、1978年に施行された「大規模地震対策特別措置法」に基づいて策定されている。当初の震源地は静岡県駿河湾沖であった。その後の研究により震源区域が西側に拡大見直され、2002年4月に新たな地域が指定された。新たな「地震防災強化地域」は、図-1に示すように6県167市町村から8都県263市町村へと地域拡大されている。

東海道新幹線においては、当初の「地震防災強化地域」では、新横浜～豊橋間の214kmが対象となった。そのため「東海地震」対策として、1979年から1992年にかけて長期不通防止の目的から耐震補強工事が実施された。特に、軟弱地盤上の盛土及び宮城県沖地震の経験から落橋防止対策等が確実に実施された。東海道新幹線の既往の構造物別施工数量は、盛土(17.9km)、橋台裏(159箇所)、土留(3.6km)、斜面(22箇所)、落橋防止(3033箇所)、高架橋(144箇所)、橋台・橋脚(55基)、トンネル(延べ18.2km)である。なお、東海道新幹線の線路延長は515kmであり、線路を支える土木構造物の内、盛土43%、RC高架橋23%、トンネル13%である。

東海道新幹線の盛土は耐震設計を行うことなく構築されたこともあり、概して耐震性が低く、大規模地震時には被災することが予測される。しかしながら、RC構造物と比較し、一般的に被

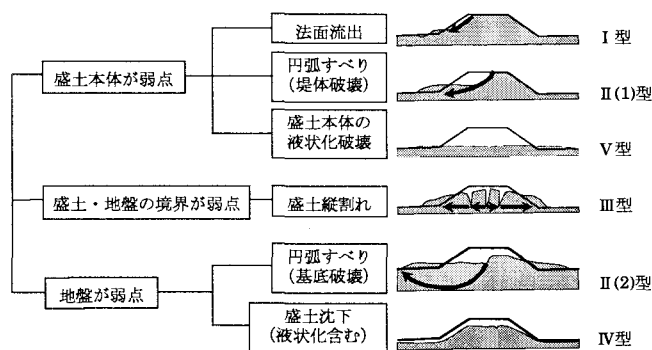


図3 鉄道盛土の被災パターン

災盛土は早期復旧が可能であるという利点もある。盛土の補強工法は、大規模地震時の盛土本体の沈下や変形を最低限にすることを目的としている。各種工法を検討した結果、最も効果的である図2に示す「シートパイル締切り工法」¹⁰⁾が東海道新幹線では採用されている。この原理は、基底円弧すべり破壊に対する抵抗が強くなること、並びに地震動によりたとえ盛土を支える地盤が液状化により支持力が低下しても、シートパイルによって側方に地盤が流動しなければ盛土本体の沈下および変状を最小限にすることが可能ということである。

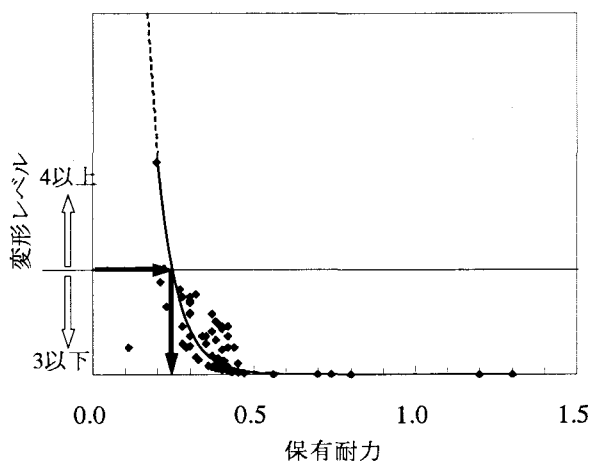
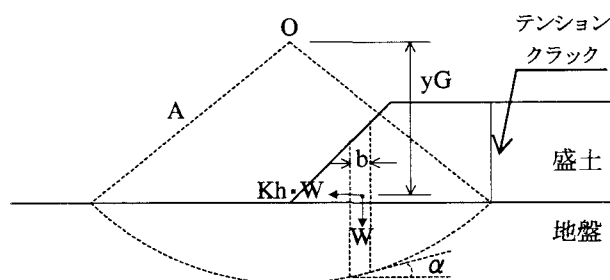


図5 保有耐力と盛土沈下量の関係 (L2地震動：スペクトルI)

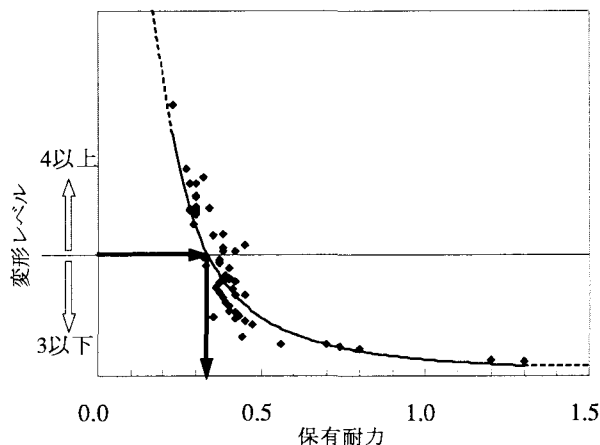


図-6 保有耐力と盛土沈下量の関係 (L2 地震動：スペクトルⅡ)

填することで早期復旧が見込まれる。したがって、復旧に長期間を要すると予想されるⅡ(2)型、Ⅲ型、Ⅴ型の被災パターンを主眼に盛土の耐震評価方法を検討する。

4. 盛土の耐震補強工事を必要とする箇所の選定

4.1 軟弱地盤上の盛土の選定

鉄道耐震設計標準⁹⁾では、L2地震動に対しては盛土の耐震照査指標に変形レベル、すなわち盛土沈下量を被害程度による復旧性指標に用いている。鉄道基準における盛土の被害程度と沈下量の目安は表-1のとおりである。長期不通防止を目的とした場合、変形レベル4以上を対策箇所を選定基準とし、これらの箇所を対象に、L2地震動に対しても長期不通防止対策を実施していくことを検討している。

盛土の耐震評価方法を検討するにあたり、盛土の被災パターンに着目することとした。図-3に鉄道盛土の被災パターン¹⁰⁾を示す。Ⅰ型、Ⅱ(Ⅰ)型のように盛土の一部が崩壊するケースは2003年十勝沖地震で見られたが、比較的復旧が早い。また、Ⅳ型は形状を維持したまま沈下するため、剛性低下がなく、バラストを充

4.2 変状・沈下対策：Ⅱ(2)型破壊対策

II(2)型破壊に対しては円弧すべり法(基底破壊)を用いて、盛土の保有耐力を算定して抽出する¹⁰⁾。保有耐力の算出には図-4に示す Bishop 法による安定計算式を用いた。試行計算により、スライスの分割片に作用する力のつり合いを求める方法であり、スライスの側方力を無視する修正 Fellenius 法等と比較してより精度の

$$F = \frac{A}{\sum (W \cdot A \cdot \sin \alpha + Kh \cdot W \cdot y_G)} \sum \left[\frac{\{c' \cdot b + \tan \phi' (W - u \cdot b)\} \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}}}{F} \right] \quad \dots (1)$$

高い安全率計算が可能とされている。Bishop 法による安全率 F は式(1)で示される。ただし、 c' : 粘着力(kN/m^2)、 ϕ' : 内部摩擦角、 W : 全重量、 Kh : 設計水平震度、 b : 分割片幅、 α : 分割片の底面の傾度、 u : 分割片に作用する水圧(kN/m^2)、 y_G : 分割片の重心とすべり円中心の間の鉛直距離、 A : 円面半径である。なお、計算においてはテンションクラックを盛土全体に設定した。保有耐力は安全率が 1.0 となるときの設計水平震度 Kh で表す。すなわち Kh が大きいほど保有耐力は高くなる。

算出された保有耐力と盛土沈下量とを結び付けるため、代表的な盛土に対して、数値解析的に円弧すべり法（基底破壊）による保有耐力と変形レベル（基底破壊モデルを用いたニューマーク法による滑動沈下量+支持地盤の揺り込み沈下量から算出）との関係を図5と図6に整理した。これらの図から保有耐力と変形レベルの相関関係が得られ、難解な計算をしなくても、円弧すべり法という簡単な計算により、変形レベルを算出可能であることが知見として得られた。ここで、変形レベル4を確保したい場合、 Kh （保有耐力） ≤ 0.35 程度を抽出基準とすることとする。

4.3 液状化破壊対策：Ⅲ、Ⅴ型破壊対策（ $F_L \cdot P_L$ 法）

液状化による盛土の被災パターンは、盛土底部に高い過剰間隙水圧が発生し、盛土堤体に縦割れ（テンションクラック）が生じるⅢ型破壊、地盤の液状化により盛土が全体的に沈下するⅣ型破壊、飽和砂質土地盤上にある砂質盛土が地盤の液状化に伴い盛土自体も液状化し、盛土が全面的に崩壊するⅤ型破壊に分類される。

ここで、復旧性能の向上を目的とした場合、Ⅲ型、Ⅴ型のみを対象とすれば良い。しかし、液状化による盛土の変状は、液状化に起因する過剰間隙水圧の消散および支持地盤の強度低下による沈下と、液状化前に発生する盛土堤体の破壊や揺すり込み沈下などが複合的に重なり合い発生する。また、盛土の土質諸定数の情報が明らかに不足しており、場所毎に盛土の液状化による被災パターンや沈下量を解析により定量的に精度良く予測することは、現状では極めて困難である。

そこで、被災パターン毎の区別は今後の課題として、今回は鉄道盛土の他、道路、河川、港湾等の盛土構造物における過去の地震被災事例を調査し、盛土沈下量と液状化指数（ P_L 値）の関係を整理することで、補強箇所の選定を行うこととした。液状化抵抗率（ F_L 値）から P_L 値を算出する現行の算出式⁹⁾は式(2)で表される。

$$P_L = \int_0^H (1 - F_L) w dz \quad w = 10 - 0.5z \quad \dots (2)$$

$$\left[F_L = \frac{R}{L} \right]$$

ここで、 R : 液状化強度比、 L : 地震時最大せん断応力比、 w : 液状化抵抗率の深さ方向の重み関数、 H : 液状化の判定を行なう表層地盤の厚さで $H \leq 20\text{m}$ 、 z : 地表面からの深さ（m）であり、式(2)における $(1 - F_L)$ 部は液状化程度の重み関数（影響関数）である。

本研究では P_L 値と盛土沈下量との関係をより正確に捉えるために、以下の2つの検討を行った。①盛土沈下量について、より

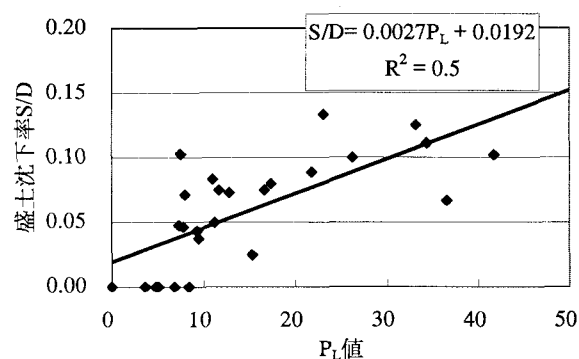


図7 盛土沈下率と P_L 値の関係

P_L 値と相関の高い状態を検討した。具体的には盛土沈下量、盛土沈下量/盛土高、盛土沈下量/液状化層厚と P_L 値との関係である。結果、盛土沈下量/盛土高（盛土沈下率）が最も高い相関がみられた。② P_L 値算出式中の液状化程度の重み関数がより盛土沈下量を考慮した関数となるような、様々なパターンの関数について比較検討を行っている^{8),11),12)}。その結果、式(3)のとおり双曲線余弦式の相関が最も良いことが分かった。

$$P_L = \int_0^H (\cosh(F_L))^{-5} w dz \quad \dots (3)$$

このとき、図7に示すように P_L 値と盛土間の関係は次式(4)にて近似できる。

$$S/D = 0.0027P_L + 0.0192 \quad \dots (4)$$

ただし、 S : 盛土沈下量（m）、 D : 盛土高（m）である。

この式を用いることで、地震動および確保したい変形レベル毎に要対策箇所を選定することが概略可能となる。表1より長期不通防止を目的としたときは、変形レベル4であり、このとき、盛土沈下量 S は 50cm 以上となる。具体的には式(4)より、

$$P_L \geq \frac{185}{D} - 7.11 \quad \dots (5)$$

を満たすとき、レベル4となる。

5. 情報支援システムの提案

5.1 鉄道盛土耐震データベース

これまで、耐震補強箇所の選定を行う際の考え方および基準値について述べてきた。実際はどのような情報が必要であるのかを、図8に示す。大きく、(a)地盤情報、(b)盛土情報、(c)地震波情報、(d)地勢情報、(e)自治体等公開情報、(f)耐震評価、(g)補強工スペック（図面）の7つの情報からなる。これらを鉄道盛土耐震データベースと呼ぶこととする。このうち必要不可欠な情報は、地盤情報、盛土情報と地震波情報であり、地勢情報は情報支援システムを構築したときに有益な情報となる。また、自治体等公開情報は筆者らの行った予測との比較を行うために付け加えた。従来これらのデータは別々に管理されており、耐震補強箇所の選定、補強工の設計を行う際、その前段で、散在している情報を一つずつ探し出し、全線の中から当該箇所のデータのみを取り出す必要があり、非常に手間のかかる作業であった。本研究では、これらを一元管理し、情報を一括して扱うことができるようにし、さらに地図上に情報を表示させることもできるようにした。このよう

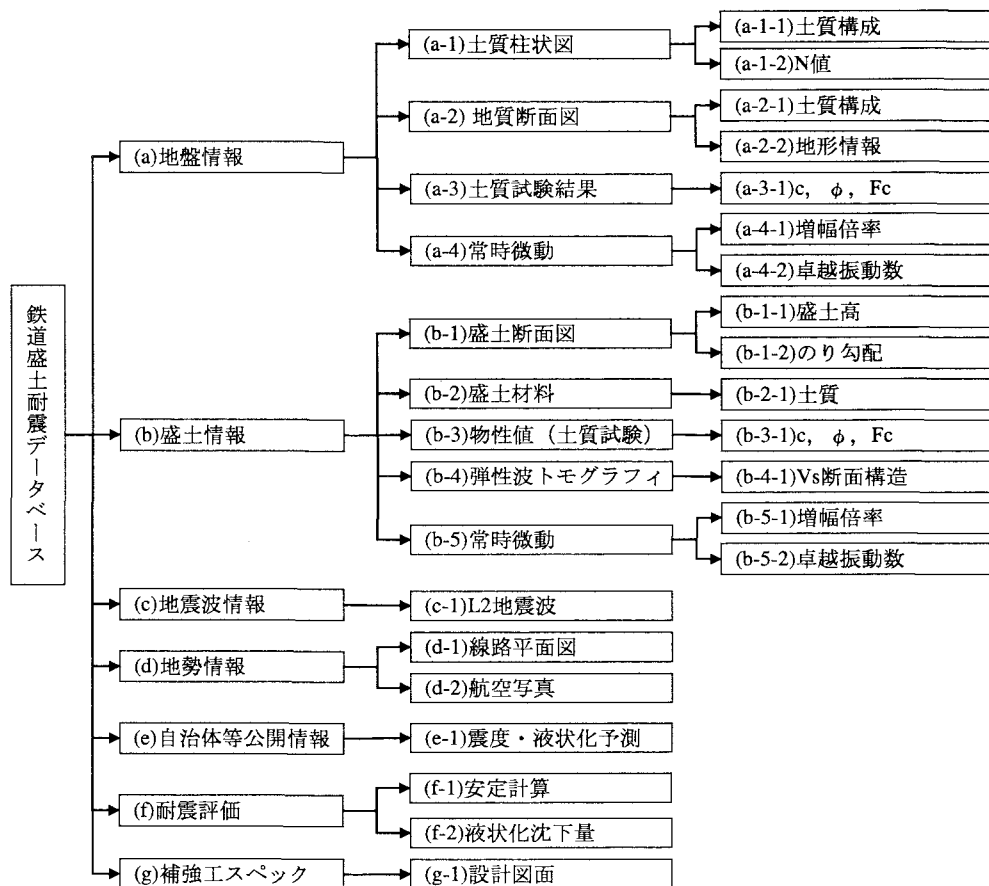


図8 鉄道盛土耐震データベースの内容

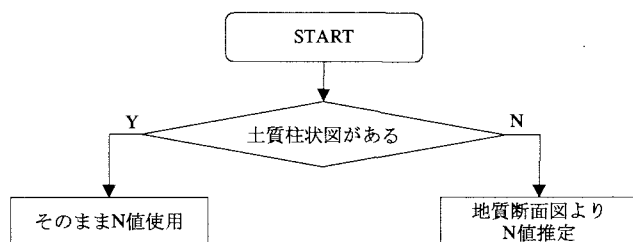


図9 N値の推定方法

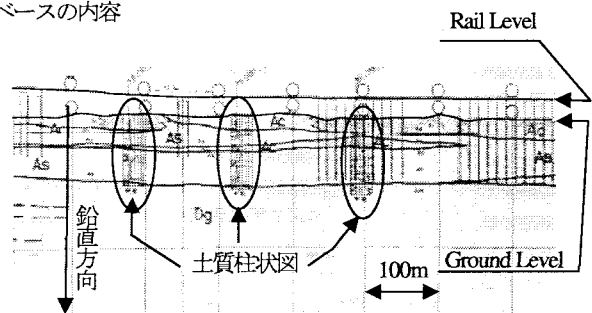


図10 地質断面図

(S59 作成 JR 東海社内資料「新幹線地震対策地質図」)

に鉄道盛土耐震データベースを地図化したものを情報支援システムと呼び、耐震評価計算結果、および補強工設計時の補強工のスペック（図面）も合わせて表示させる。

(1)地盤情報

①土質柱状図

東海道新幹線では沿線約 500m ごとに土質柱状図が作成されている。得られる情報は各土質構成およびN 値である。図9に示すように、耐震評価を行う盛土区間の土質柱状図が存在する場合は、利用可能であるが、存在しない場合は、自治体等で公表されている近傍の柱状図、あるいは、次に述べる地質断面図で推定することになる。

②地質断面図

図10 は、東海道新幹線の東京～新大阪までの沿線すべてに渡って連続的に地質断面が描かれた地質断面図である。縮尺は線路方向に 1/1000、鉛直方向に 1/10000 である。土質情報が得られるだけでなく、溺れ谷などの地形的特徴を捉えることができる。

表2 土質試験結果例

層	下端深度 (m)	土質	単位 体積 重量 γ (kN/m ³)	N値	平均 粒径 D ₅₀ (mm)	10% 粒径 D ₁₀ (mm)	細粒分 含有率 (%)	粘土分 含有率 (%)	液状化 対象 判定	粘着力 c (kN/m ²)	内部 摩擦角 φ (度)	cosh(FL) ⁻⁵ w ^{0.7} z		
												L1 スペクトル I	L2 スペクトル II	L2 スペクトル III
1	1.81	粘土	16.0	2	0.04	—	65	—	対象外	19	0	—	—	—
2	2.81	粘土	16.0	3	0.04	—	65	—	対象外	19	0	—	—	—
3	3.40	粘土	16.0	5	0.04	—	65	—	対象外	19	0	—	—	—
4	4.80	砂	19.0	20	2.58	0.01	19	7	対象	0	39	0	0.001	0.069
5	5.80	砂	19.0	23	2.90	0.01	18	6	対象	0	39	0	0	0.002
6	6.60	砂	19.0	38	4.19	0.01	20	6	対象	0	39	0	0	0
PL												0	0.001	0.071

③土質試験結果

一軸圧縮試験等の土質試験より、安定計算に必要な粘着力 c、内部摩擦角 φ、また、液状化判定に必要な細粒分含有率 Fc、粘土分含有率 Pc、平均粒径 D₅₀、10%粒径 D₁₀等が求まる。表2に示

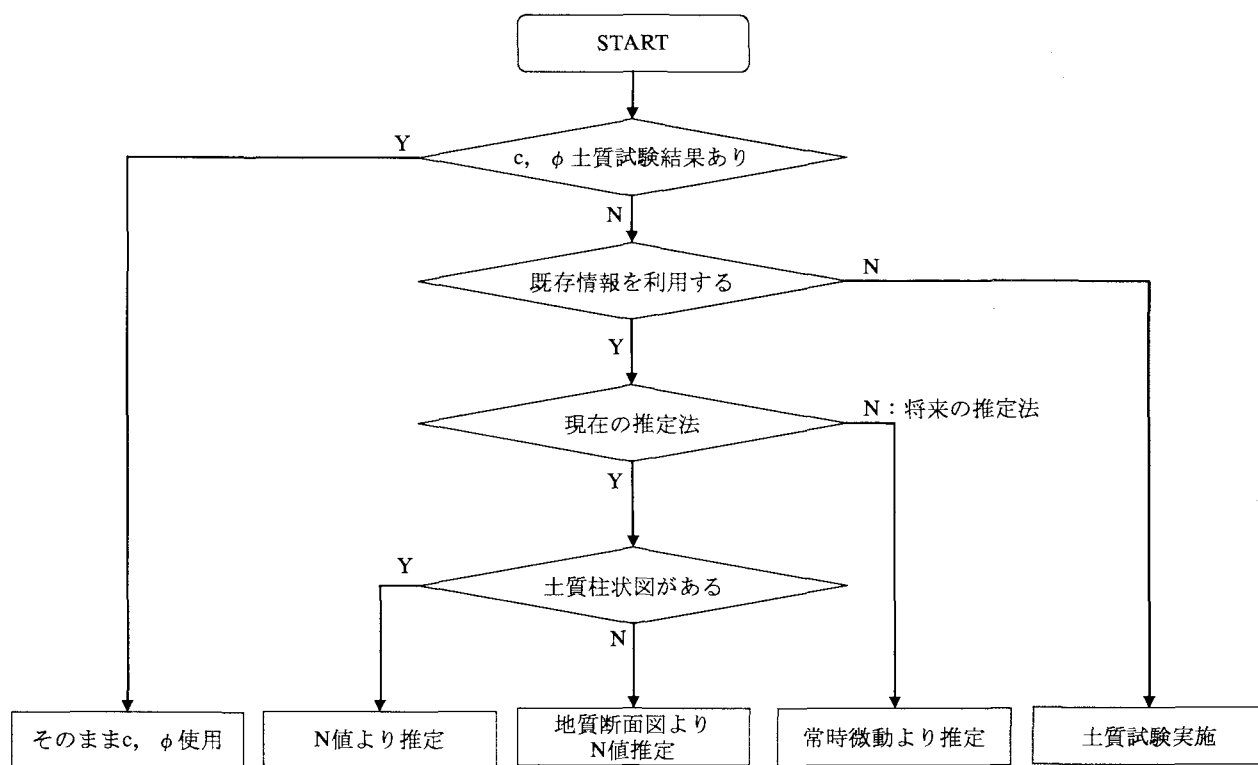


図-11 c, φの推定方法

すとおりの、今回、実際に耐震補強候補箇所として耐震評価を行う箇所の一部で、地盤の土質試験を行った。

これらの物性値のうち、いくつかはN値より推定する方法もあるが、土質試験より直接求めた方が精度が高い。図-11に粘着力cと内部摩擦角φの導出方法を示す。土質試験結果より粘着力c、内部摩擦角φが既知であれば、そのまま用いる。未知の場合、試験を行うか既存情報を活用する。軟弱地盤上の盛土すべてに試験を行うには膨大な費用、時間、労力を要する、したがって、既存情報を活用するのが効率的である。N値より推定する方法はTerzaghiら¹³⁾による「 $c=6.25N$ 」経験式などがある。土質柱状図がある場合、N値はそのまま適用できるが、柱状図と柱状図の間は図-10の地質断面図による補完を行い、N値の推定を行ったのち、cを推定する。このように、c, φの導出方法はさまざまであるので、安定計算や液状化判定を行った場合はその情報源と取得時期を鉄道盛土耐震データベースに保管し、情報支援システムにおいて表示できるようにしておくこととした。

従来は、当該箇所の土質試験結果や土質柱状図のような点の情報がない場合、地形的、あるいは地質的に似ていると考えられる箇所の物性をそのまま適用するなどの方法で推定を行っていた。本システムの利用により、地質断面図のような線の情報により推定が可能となり、物性推定の精度の向上が図ることができるようになった。このように2重3重に情報の補完が可能なが本システムの特徴のひとつである。

④常時微動

東海道新幹線では、100mごとに、常時微動データがある。地盤および盛土それぞれにおいて卓越周波数および増幅倍率を知ることができる¹⁴⁾。図-11示すように、この常時微動データが土質柱状図あるいはc, φ等の土質試験値の代用となれば、個別の耐震評価が可能となる。

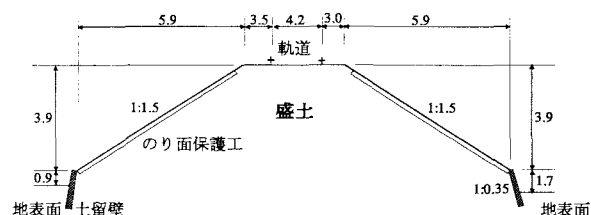


図-12 盛土断面図

表3 盛土材料、採取場所、物性一覧

No	盛土材料	採取場所	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 ϕ (度)	飽和単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	透水係数 $ks(10^{-2}\text{m/s})$
1	砂(礫)	丹那トンネル ずり	3	38	19	1.22E-01
2	シルト	切取	7	22	13	1.00E-04
3	(粘土質) シルト	岡部・石脇	60	23	21	1.06E-05
4	(粘土質) シルト	瀬戸	0	43	21	1.20E-06
5	砂	満水・高御所	30	17	19	1.00E-03
6	砂	志都呂	23	17	21	1.13E-03
7	砂	和泉	8	28	20	1.00E-03

常時微動は計測が非常に平易であるため、データを再度取り直したり、計測間隔を狭めさらにデータを拡充することが可能である。

(2)盛土情報

①盛土断面図

式(1)より、安全率を求める際、盛土重量が必要である。また、式(4)より液状化による沈下量を求めるには盛土の高さDが必要である。これらより盛土断面情報は必須である。図-12に示すよ

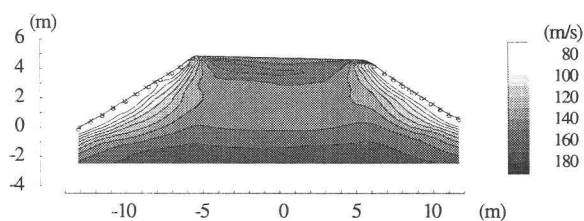


図-13 Vsの弾性波トモグラフィ

うに、東海道新幹線のすべての盛土において盛土断面図が存在する。これにより、盛土高、のり勾配、さらに施工時に検討の必要な土留めの状況、のり面保護工の有無などの情報が得られる。

②盛土材料

すべての盛土において、盛土材料、採取場所のデータが存在する。表-3にそれらの一部を示す。現状、鉄道耐震設計標準⁹⁾では、土質試験による詳細なデータがない場合、盛土材料による土質区分に従い、単位体積重量、粘着力、内部摩擦角の設計値の目安を与えている。

③物性値（土質試験）

表-3に近年土質試験により取得した東海道新幹線の盛土の物性値の一例を示す。東海道新幹線の盛土は開業後40年を経過しているため、圧密や列車荷重による締固めを受けており、開業当初の値とは異なっている可能性がある。開業当初のデータしかない箇所では、新たなデータを取得する必要がある。試験を行う場合、費用、時間及び労力がかかるため、地盤と同様に図-11による推定を行う方法があるが、現行の推定方法では精度が悪い上、地盤と異なり土質柱状図も存在しないため、N値による推定を行うことができない。常時微動や次に説明するせん断弾性波速度等既存情報を活用した把握手法の確立が期待される。

④弾性波トモグラフィ

せん断弾性波速度 V_s は土の強度特性や振動伝播を知る場合、また、鉄道耐震設計標準⁹⁾の地盤種別を決定する場合、さらにはFEM解析を行う場合に必要不可欠なパラメータである¹⁵⁾。せん断弾性波速度をN値より推定することはできるものの精度はよくない。筆者らは弾性波トモグラフィ解析を活用し、せん断弾性波速度を把握する調査法の研究を実施している^{16),17),18)}。図-13にその一例を示す。盛土堤体のせん断弾性波速度 V_s の平均は150m/s程度ではあるが、一様ではないことが分かる。のり面は80~100m/sの速度の低い層、軌道直下では列車荷重による締固めと思われる160~180m/sの速度の高い層、盛土直下地盤は建設時のサンドマット層と思われる180m/sの速度の高い層が見られる。本手法は盛土のせん断弾性波速度 V_s が簡潔に計測できるだけでなく、盛土の断面構造が分かるためより詳細なFEM解析を行うことができる。実施例はまだ少数なため、今後データを増やし、情報データベースを充実させる予定である。

(3)地震波情報

工学基盤面での入力地震動は、L2地震動を設定した。鉄道耐震設計標準⁹⁾では固有周期により弾性応答加速度スペクトルが異なる。なお工学基盤面の定義は砂質土でN値50以上、粘性土でN値30以上の連続地層もしくは V_s が400m/s以上の連続地層である。



図-14 線路平面図

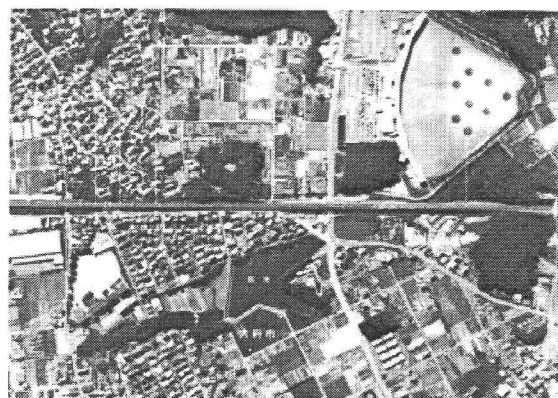


図-15 航空写真

また、地表面での設計地震動は、固有周期の大小により分類された地盤種別⁹⁾ごとに弾性加速度スペクトルが与えられる。なお、算出方法は式(6)による。

$$T = 4 \times \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{sodi}} \quad \dots (6)$$

$$[V_{sodi} = 80N^{1/3} \text{ (砂質土)}, V_{sodi} = 100N^{1/3} \text{ (粘性土)}]$$

ここで、 h_i :各土層の層厚($i=1 \sim N$)、 V_{sodi} :各土層のせん断弾性波速度である。

(4)地勢情報

地勢情報は、鉄道盛土耐震データベースを可視化し、施工の最終判断を下すために必要である。

①線路平面図

図-14に示すように、線路平面図は東海道新幹線の線路、土木構造物を維持管理する上で非常に重要な地図である。線路状況(曲線か否か等)、構造物種別(盛土、切取、高架橋、橋梁、トンネル)、山谷(等高線あり)、河川等地形情報が盛り込まれている。また、住宅等開発状況も入っている。したがって、線路平面図による管理を行えば、施工性等の個別の現場状況を把握することができる。

②航空写真

図-15に示すような東海道新幹線全区間における航空写真がある。仕様は線路平面図と同様である。これを情報支援システムに組み込み、線路平面図と併用することで、側道の有無、沿線住宅の有無、仮設物の設置や資材置場に適当な箇所などの情報が現場

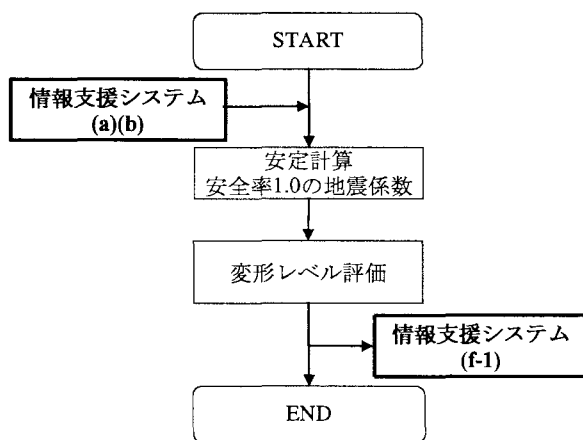


図16 耐震補強箇所選定への適用フロー（変状・沈下）

に出かけなくともある程度把握できる。また、現場の詳細な写真があれば、より詳しく把握可能である。これらを情報支援システムにおいて可視化することで、補強工法の選択や具体的な施工方法の参考として利用できる。

(5)震度・液状化予測

横浜市、静岡県、愛知県、豊橋市、名古屋市等の自治体、および岐阜大学等の研究機関において震度予測や液状化の被害予測が公開されている。これらを情報支援システムに加えることで、本研究で行った予測結果と比較するなど、参考資料として使用できる。これらの情報は面的かつ大局的なものであり、本研究での局所的な予測を補完するものである。

5.2 耐震補強箇所選定への適用

(1) 変状・沈下対策

安定計算を行うには、地質構成、地下水位、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の情報が必要である。図16のフローに従い、情報支援システム(a), (b)によりこれらの情報を引き出し、安全率1.0のときの保有耐力 K_h を計算する。図5、図6から $K_h \leq 0.35$ であると変形レベル4となる。求めた保有耐力 K_h と変形レベルをさらに情報支援システム(f-1)に追加し、推定結果の根拠を明確にする。

(2) 液状化破壊対策

液状化の判定を行う場合、図17のフローによって行った。まず、液状化の対象か否かを判定する必要がある。液状化の判定を行う必要のある土層は、次のすべてに該当する飽和砂質土層とする。

- ①地下水位が現地盤面から10m以内にある土層
- ②現地盤面から20m以内の範囲にある土層
- ③平均粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ10%粒径 D_{30} が1mm以下の土層
- ④細粒分含有率 F_c が35%以下の地盤、または F_c が35%を超えても粘土分含有率 P_c が15%以下の土層

これらの基準を満たすか否かを情報支援システム(a-3-1)の地盤の土質試験値および(b-3-1)の盛土の土質試験値等より抜き出し、判定を行う。続いて、情報支援システム(a-1-1), (a-1-2), (a-2-1)より、せん断弾性波速度 V_s 、および地層情報を抽出し、地盤の固有周期を算出した後、地盤種別を選定した。

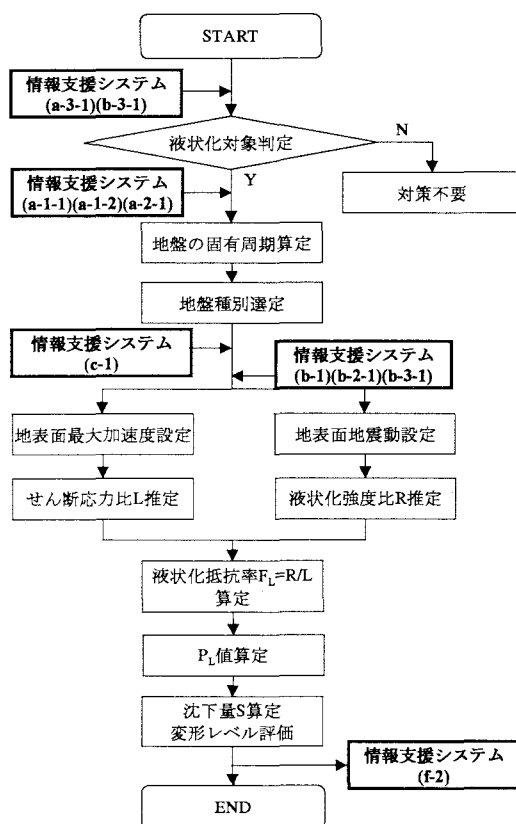


図17 耐震補強箇所選定への適用フロー（液状化）

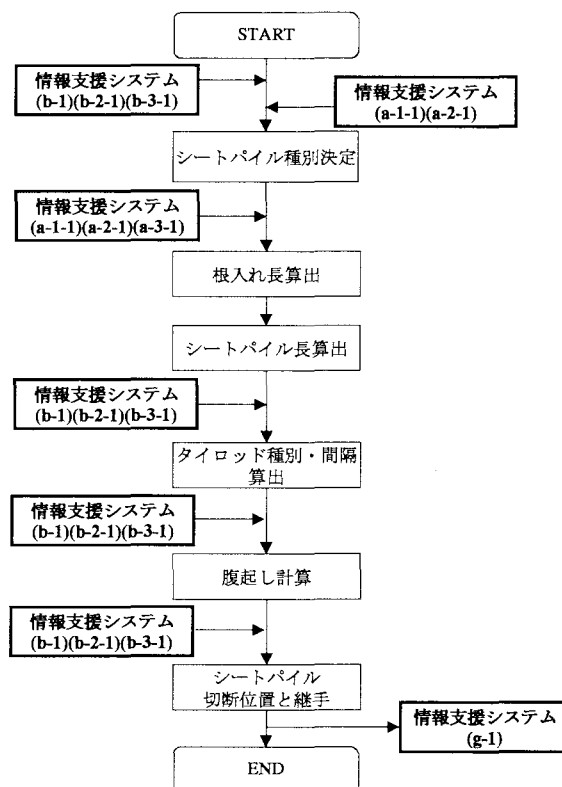


図18 耐震補強工設計への適用フロー

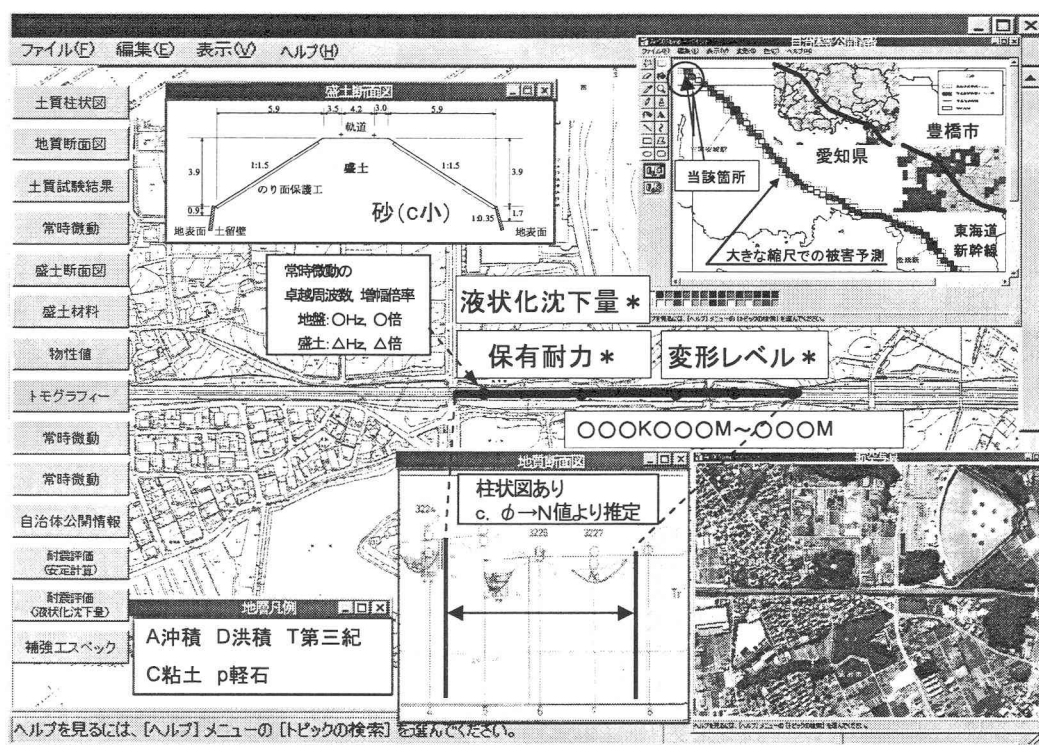


図-19 情報支援システム表示

次に情報支援システム(c-1)より地震波情報を抜き出し、地表面最大加速度設定、地表面地震動設定を行い、さらに、情報支援システム(b-1)の断面情報および(b-3-1)の単位体積重量(情報がない場合、(b-2-1)の盛土材料)より盛土重量を求め、せん断応力比 L 、液状化強度比 R を算出し、両者の比(R/L)を取ることで液状化抵抗率 F_L を求めた。その後式(3)に従い P_L 値を求め、式(4)に従い沈下量 S を求め、変形レベルを判定する。これらの結果もその根拠とともに情報支援システム(f-2)に組み込み、一覧情報として地図上に映し出しその妥当性を確認した。

5.3 補強工設計への適用

耐震補強の対象であると選定された箇所における補強工の設計は、対策工がシートパイル締め切り工の場合、図-18のフローによって行った¹⁹⁾。まず、情報支援システム(b-1)、(b-2-1)、(b-3-1)より盛土重量、(a-1-1)、(a-2-1)より軟弱層厚の情報を取得し、シートパイルの種別を決定する。続いて、情報支援システム(a-3-1)(情報がない場合は、(a-1-1)、(a-2-1)の土質)より軟弱層の水中単位体積重量を用いて、根入れ長とシートパイル長を算出した。さらに情報支援システム(b-1)、(b-2-1)、(b-3-1)より求まる盛土重量から、タイロッド種別・間隔、腹起しの計算、切断位置と継手を計算した。これらの結果は補強箇所選定時と同様に、根拠とともにスペック(図面)を情報支援システム(g-1)に表示した。

5.4 情報支援システムの表示例

図-19は情報支援システムの表示画面である。本情報支援システムはMicrosoft Windows上にて扱うことができる。左側には鉄道盛土耐震データベースの各項目が索引として表示されている。この索引を選択することで必要な情報を表示させることができる。また、図の右上部には、ある程度大きな縮尺の被害予測を表

示し、さらに静岡県、愛知県、豊橋市等自治体の被害予測データも表示しており、比較を可能としている。

情報支援システムの利用により、耐震補強箇所が精度良く抽出され、必要な箇所に対策を施すことが可能となった。また地震時の復旧計画も策定できるようになり、地震時のダウンタイム解消が図られるようになった。本情報支援システムはさらに情報を追加することで盛土の総合的な維持管理に生かしていくことができると考えられる。

5.5 実際の適用例

耐震評価は前段のデータ収集と耐震評価計算の2つの工程からなる。従来は土質資料を文献資料の中から取り出す、あるいは新たに土質調査を行ってはじめてデータを収集することができ、それから耐震評価計算を行っていた。情報支援システムの利用により、データ収集の時間が節約でき、時間・労力・経費が半分以下と大幅に軽減されることになった。

ここで、東海道新幹線の盛土において、実際に適用した例を述べる。情報支援システム(a)(b)より、盛土は高さ5m、単位体積重量 $\gamma=18.0\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi=30$ 度、地盤については表-2のとおり諸元が得られる。図-16のフローに従い、安全率1.0のときの保有耐力は0.42と求まり、変形レベルは3以下と判定される。また、情報支援システム(a-3-1)の地盤の土質試験値および(b-3-1)の盛土の土質試験値より、表-2のとおり液状化の対象か否かが判定されさらに図-17のフローに従い、液状化指数 P_L 値を算出したところ、表-2のとおり、液状化の可能性はほぼ0と求まった。安定レベルは3以下である。

次に、自治体等公開情報との比較を行った。岐阜大学のホームページ「郵便番号情報検索システム」を参照したところ、当該箇所付近の液状化指数 P_L 値は0と表示された。また、当該箇所の属する自治体のホームページなど公表している液状化危険度も小

(液状化の可能性が低い)を示した。このように多くの箇所でも今回の評価結果と自治体等公開情報とで大きな差異は見られなかった。

6. 結論

本研究により得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 東海道新幹線構造物の耐震補強工事は、L2 地震時での長期不通防止を目的として検討されているが、盛土に関しては、個別の盛土、地盤情報より補強箇所の選定を行う必要がある。選定の合理化、効率化を図るため新たな地質調査を行わず、既存情報を用いることにより耐震補強箇所の選定を行うのであるが、これまで情報が散在しており、非常に手間のかかる作業であった。本研究で情報支援システムを構築したことにより、既存情報を一元管理し、可視的に表示させたことで、作業時間および手間が半分以上と大幅に軽減され、効率良く耐震補強箇所の選定が行えるようになった。
- (2) 当該箇所の土質試験結果や土質柱状図のような点の情報がない場合、地質断面図のような線の情報により点の情報の推定が可能となり、物性推定の精度の向上が図られるようになった。また、弾性波トモグラフィによる盛土の Vs 断面構造をシステムに組み込んだことにより、解析精度が向上した。このように情報支援システムは、時間的な効率化のみならず精度向上による正確な耐震評価を可能にした。
- (3) 変状・沈下および液状化のそれぞれに対し定量評価手法を提案し、変形レベルに応じた閾値の設定が行えるようになった。本研究では、特に長期不通防止を目的とし、変形レベル4での検討を行った。その結果、従来よりも正確に補強箇所の選定が可能となり、ダウンタイムの解消に役立つものとなった。
- (4) 情報支援システムにより得られた選定結果は自治体の被害予測結果と大局的には整合していることを確認した。
- (5) 情報支援システムは、耐震補強箇所の選定を目的に構築したものであるが、補強工設計や施工性の検討などの作業にも適用可能である。

情報支援システムを用いることで、今後別の地震動での検討、例えば、東南海、南海地震などについて地震波を変更することにより適用可能となる。

また、さらなる情報の拡充をはかり、耐震に限定されず降雨、降雪並びに沿線振動に関するデータも追加することにより、維持管理者にとって東海道新幹線盛土区間の総合的な情報支援システムとして活用していきたい。

さらに、情報量の豊富な常時微動データに注目し、詳細な物性値が未知の場合に、現地調査をすることなく地盤・盛土情報を精度良く推定する方法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎：第3章 迫り来る巨大地震に備える 3-1 迫り来る東南海・南海地震に備えるための強震動の予測 最新の知見とその問題点、土木学会誌、88巻、pp.27-29、2003.9.

- 2) 関雅樹：東海地震等の大規模地震対策について、震災予防、第196号、pp.23-29、2004.5.
- 3) Borchardt, R., Wentworth, C. M., Janssen, A., Fumal, T. and Gibbs, J.: Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, CA, Proc. of 4th International Conf. on Seismic Zonation, Vol.3, pp.545-552, 1991.8.
- 4) 北原武嗣, 伊藤義人：地理情報システムを用いた確率論的耐震性評価システム, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.289-298, 2002.3.
- 5) 久世益充, 杉戸真太, 能島暢呂, 木下智晴：1944年東南海地震を対象とした建物被害に基づく震度分布と強振動予測法による推定震度分布の比較, 第39回地盤工学研究発表会, No.952, 2004.7.
- 6) 岐阜大学地震工学研究室ホームページ：
<http://www.cive.gifu-u.ac.jp/lab/ed2/index.html>.
- 7) 永尾拓洋, 関雅樹, 長縄卓夫, 今村眞一郎：基礎地盤の側方流動現象に着目した鉄道盛土の耐震補強工法に関する一考察, 第39回地盤工学研究発表会, No.662, 2004.7.
- 8) 永尾拓洋, 長縄卓夫, 阿知波秀彦, 萩原敏行, 今村眞一郎：液状化指数を用いた盛土の耐震補強に関する一考察, 第38回地盤工学研究発表会, No.657, 2003.7.
- 9) 運輸省鉄道局, 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999.10.
- 10) 野沢太三：新幹線盛土構造物の耐震強化に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1304, 1986.3.
- 11) 阿知波秀彦, 長縄卓夫, 町田文昭, 森本巖, 山本裕司：土構造物の液状化被害程度把握に関する検討(その1), 土木学会第57回年次学術講演会, III-516, 2002.9.
- 12) 長縄卓夫, 阿知波秀彦, 町田文昭, 森本巖, 山本裕司：土構造物の液状化被害程度把握に関する検討(その2), 土木学会第57回年次学術講演会, III-517, 2002.9.
- 13) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, 1948.
- 14) 中村豊, 研究展望：総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No.531/I-34, pp.1-33, 1996.1.
- 15) 阪本泰士, 吉岡修, 神田仁, 西山誠治, 青柳幸穂：改良杭を例にした2次元FEM解析モデルの簡便化の検討, 土木学会第57回年次学術講演会, III-799, 2002.9.
- 16) 神田仁, 阪本泰士, 吉岡修, 岡本栄：弾性波トモグラフィを用いた既設鉄道盛土の探査法に関する研究, 土木学会論文集(投稿中)。
- 17) 堤要二, 神田仁, 吉岡修, 阪本泰士, 根岸裕：東海道新幹線盛土における弾性波トモグラフィの試行(測定編), 土木学会第57回年次学術講演会, III-671, 2002.9.
- 18) 神田仁, 吉岡修, 阪本泰士, 根岸裕, 堤要二：東海道新幹線盛土における弾性波トモグラフィの試行(考察編), 土木学会第57回年次学術講演会, III-672, 2002.9.
- 19) 日本国有鉄道：盛土耐震補強工設計の手引(案), 1980.3.

(2004年9月17日受付)