

鉄道における土工技術と性能規定化の動向

館 山 勝

在来鉄道の多くは明治～戦前に造られたものであり約9割が土工であったのに対して、昭和39年以降に造られた新幹線における土工の採択比率は約2割まで激減した。このように、線区の高級化や時代とともに土工が敬遠されるようになったのは、土工は建設費も安い災害も多く、メンテナンス費用まで加えた場合には高架橋やトンネルの方が得であるという評価がなされてきたためである。しかしながら、戦後、機械化施工の導入、設計基準の整備、地盤改良技術の向上、補強土工法の導入などにより土工の品質が格段に向上した。その結果、「土工」も構造物として認められ、「土構造物」という名称で呼ばれるようになった。さらに最近では基準の性能規定化によって、高架橋などと等価な性能の土構造物を造ることが可能となってきた。ここでは、鉄道における土工技術の変遷と、基準の性能規定化について紹介する。

キーワード：鉄道盛土、土工、変遷、性能規定、補強土工法、土構造

1. はじめに

図-1に鉄道における土構造物の採択比率を示す。在来鉄道の多くは明治～昭和初期に造られたものであるが、実に総延長の87%が土構造物である。

一方、昭和39年以降に造られた新幹線では徐々に比率が低下し、新幹線全体での土構造物の採択比率は21%に過ぎない。このように、線区の高級化や時代とともに土構造物が敬遠されるようになってきたのは、

盛土の多くは建設年代が古く品質も不十分であったため、建設費は安いメンテナンス費用まで加えたライフサイクルコストで考えた場合にはRC構造物の方が得であるという評価がなされてきたためと思われる。しかしながら、新幹線など戦後に造られた盛土は、機械化施工の導入、設計基準の整備、地盤改良技術の向上、補強土工法の導入などにより品質が格段に向上し、きちんと造ればそれなりの性能で構築できることが次第と認知されるようになってきた。その結果、盛土も構造物として認められ、従前の「土工」から、「土構造物」という名称で呼ばれるようになった。さらに最近では、設計基準の性能規定化などによって、構造物間の垣根を超えて、高架橋などと等価な性能を有する盛土の設計が可能となってきた。

ここでは、鉄道における土工技術の変遷^{1), 2)}を基準の観点から概観するとともに、新しい考え方である基準の性能規定化³⁾について紹介する。

2. 土工技術の変遷

(1) 戦前の鉄道盛土

戦前（昭和20年以前）の土工は人力施工が基本であり、構築後の保守や安定よりは、切土やトンネル掘削ズリをいかに少ない労力で運搬し盛り立てるかが優先された。この頃は、土量のバランスが最優先であり、盛土材を選んだり水平に撒きならしたりすることもな

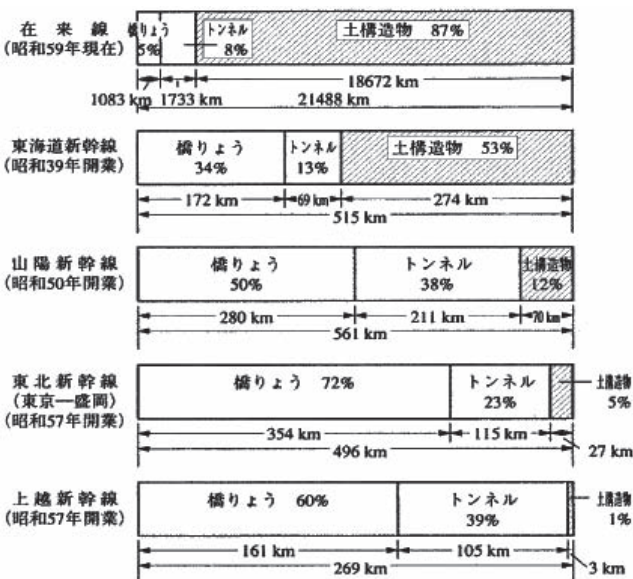


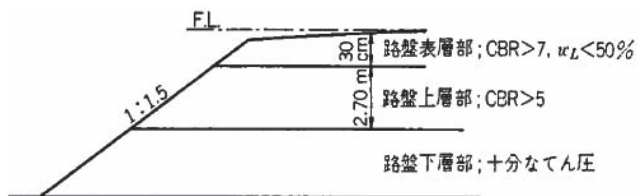
図-1 土構造物の採択比率 (国鉄の例)

く、切土やトンネルの掘削土を撒きこぼして、のり面だけを土羽打ちにより締め固めて造った「盛りこぼし盛土」が多かったようである。

盛りこぼし盛土は、積層方向が斜面方向（すべりやすい方向）と一緒にあるため、ちょっとした雨や地震で容易に滑る。また、発生土を用いることが基本であったことから、盛土材として粘性土が用いられることも多く、構築後の沈下や路盤の噴泥が問題となることも多かった。このため、戦前に造られた盛土は多くの保守を必要とした。しかし、簡単に修復できるメリットもあり、人件費が安く大量の保守要員を擁していた時代には大きな問題にはならなかった。

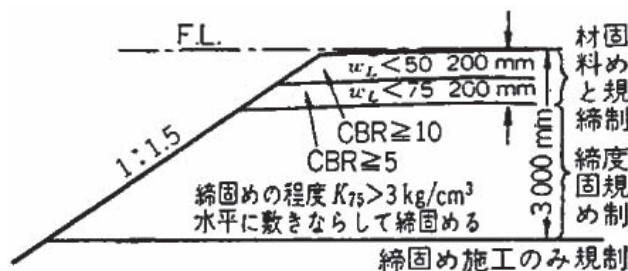
(2) 戦後～東海道新幹線建設まで

戦後、機械土工がアメリカから本格的に導入された。国鉄技術研究所では、昭和 22 年から行われた米軍三沢基地の建設に際しての土工管理に参画し、最新の技術が導入⁴⁾された。その後、これらの技術は信濃川水力発電所の大堰堤の建設に利用されるとともに、昭和 34 年には機械施工を前提とした土工管理の新しい考え方が「路盤構築基準」⁵⁾によって示された。図一 2 にその概要を示すが、CBR 値による上部盛土の強度管理に加えて、路盤面では動的変形量の規制のために K_{75} 値による管理方法も示された。



図一 2 路盤構築基準 (在来線 1, 2 級線)⁵⁾

東海道新幹線の建設のために昭和 36 年に制定された「新幹線規格」⁶⁾もこれとほぼ同じ内容であるが、路盤が 2 層区分され、上層路盤の CBR 値がより厳しいものとなっている (図一 3)。それでも東海道新幹線は、開業当初に多くのトラブルが発生した。東海道新幹線は、特に開業 1 年目に、のり面の降雨時崩壊による運転停止、橋台背面盛土の沈下による速度規制、路盤噴泥による軌道保守の増大などが多発する結果となり、社会的な問題となった。これらの問題は、東海道新幹線が突貫工事であったため、軟弱地盤に対する処置や盛土材の選別、路盤強度の規程が十分ではなかったことに起因したものとされている。



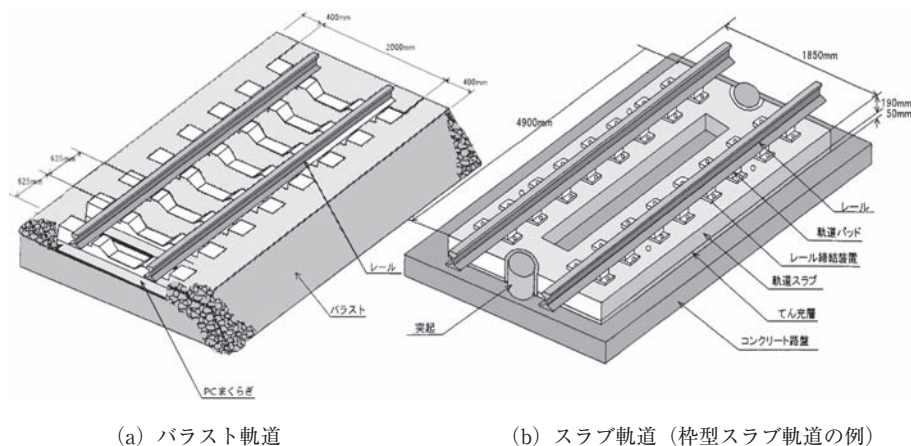
図一 3 東海道新幹線路盤基準⁶⁾

(3) 東海道新幹線以降

東海道新幹線の反省を踏まえて、昭和 42 年に「土構造物の設計施工指針」⁷⁾が制定された。この指針は、指針名にもあるように土工を構造物として捉えて、計画、調査、設計、施工に至る一連の事柄に対してまとめられた初めての基準である。盛土材の選定基準、橋台背面のアプローチブロック、締固め管理値としての乾燥密度・コーン支持力の導入、路盤材料の粒度規程、排水設備の充実、基底破壊に対する円弧すべり安全率による判定などが導入され、当時としては画期的なものであった。山陽新幹線の建設は、この基準を基本としたが、のり面の緩勾配化 (1:1.5 → 1:1.8)、盛土材料、路盤材料の選定基準の強化、締固め度 (D 値) による管理、土留め壁の使用制限などが新たに導入された。

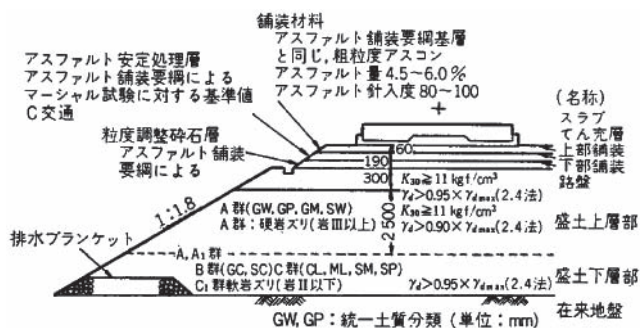
図一 4 は鉄道における軌道の種類を示す。これまでバラスト軌道を基本とした場合の土構造物の設計基準の変遷であったが、軌道のメンテナンスフリーを目指したスラブ軌道の開発が昭和 40 年から始まり、新幹線の建設では高架橋やトンネルなど土路盤以外のほとんどの区間に多用されるようになった。このような情勢を踏まえて、山陽新幹線 (岡山～博多) の建設にあたり、昭和 46 年に制定された「スラブ軌道の設計施工」⁸⁾においてスラブ軌道用盛土の構築基準 (図一 5) が示された。

その後、「省力化軌道用土構造物標準」⁹⁾として改定されたが、基本的にはこの基準を踏襲している。ただし、スラブ軌道は沈下に対する調整代がバラスト軌道に比べれば格段と小さいため、盛土支持地盤に対しては軌道構築後の沈下が 10 mm/10 年間以内、盛土材も基本的には礫系の良質土以外は用いないものとしている。また、兵庫県南部地震以降に整備された耐震標準¹⁰⁾の設計法を取り入れ、L1 地震における残留変形量を 10 mm、L2 地震では 50 mm 程度以内に抑えるように、層厚管理材や盛土補強材を配置することになっている (図一 6)。

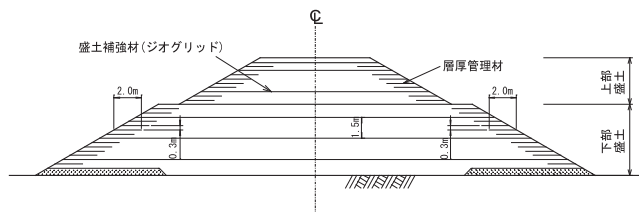


(a) バラスト軌道 (b) スラブ軌道 (枠型スラブ軌道の例)

図一 4 軌道の種類



図一 5 スラブ軌道用盛土の構築基準⁸⁾



図一 6 省力化軌道用盛土断面⁹⁾

(4) 補強土工法の進展

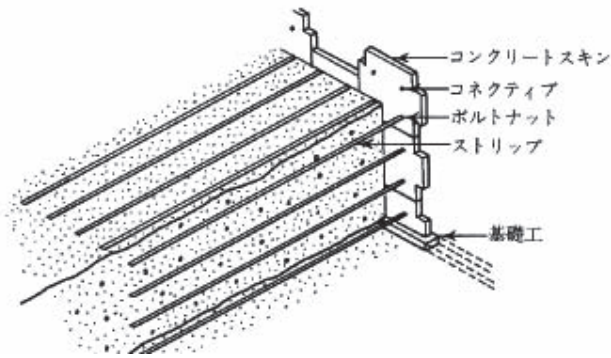
前述した通り、設計基準がない時代に造られた在来鉄道はほとんどは土構造物で造られていたのに対して、皮肉なことに基準の整備が進むにつれて激減し、東北新幹線や上越新幹線ではトンネルとトンネル間の瞬き区間において多少用いられただけで、ほとんど採用されなくなってしまった。この理由の一つに、盛土は地震や雨などの長期的な安定を確保するために、1:1.5程度ののり面勾配が必要となるため、高架橋と比べれば高さに応じて余分な用地が必要となることが挙げられる。例えば、高さ1mの場合で3m、10mの場合には30mの余分な用地が必要となることから、高いほど経済的に不利な構造と言える。したがって、建設費は圧倒的に安い用地費も含めて比較すると、用地が高い都市部や線路高さが高い場合には、高架橋の方が安くなってしまふことになる。このため、人工密集箇所を縫うように造られた新幹線では、建設年代が進むにつれて徐々に採用比率が低下し、昭和56年に開業した上越新幹線では、わずか1%しか採用されない状況になってしまった(図一1)。

そこで、経済的で簡易な土構造物の特徴を活かしつ

つ、のり面を急勾配化し、かつ保守手間のかからない新しい土構造の開発に対するニーズが高まってきた。例えば、鉛直勾配の盛土ができれば、高架橋と同様の用地幅で鉄道の建設が可能となる。また、東海道新幹線では降雨によって頻繁にのり面が小崩壊を繰り返す問題となったが、のり面も強化できれば一石二鳥となる。その解決方法として、補強土工法の適用が進められてきた。

ここで補強土工法とは、土中に鋼材やジオテキスタイルなどの引張補強材を配置することにより、盛土の安定性や自立性を高める工法である。鉄道では古くから、盛土内や盛土底面に引張補強材を配置する技術に着目し、実用化を図ってきた。例えば盛土のり面補強に関しては、昭和40年に漁網を、昭和41年にはポリエチレンネットや帆布を配置した現場施工実験や散水実験¹¹⁾を行い、補強効果が確認された。それらの成果は層厚管理材として昭和53年の基準¹²⁾に取り入れられている。

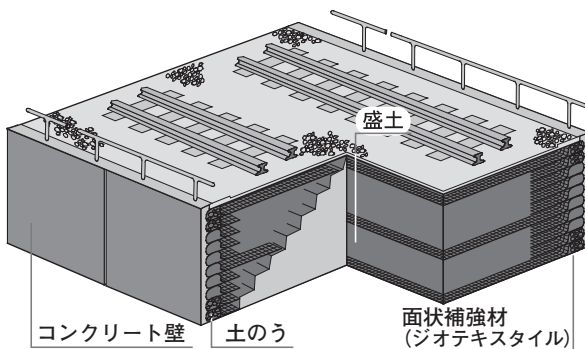
また、1963年にフランスのH. Vidalによって開発されたテールアルメ工法(図一7)にも早くから着目し、振動実験や散水実験、ストリップの腐食に関する研究を経て昭和48年には羽後境の現場に初めて適用された。しかし、鋼製の帯状補強材を用いるため腐食の問題があること、補強密度が小さいため補強材が長



図一七 テールアルメ工法の構造

くなりすぎること、地震時にパネルからなる壁面工の一体性が不明確であることなどの理由により、変位制限が厳しい鉄道構造物に対しては積極的に用いられてこなかった。

これに対して鉄道総研では、東京大学と共同で鉄道のような変位制限が厳しい箇所において、擁壁や橋台・橋脚などのRC構造物の代替としての補強土工法（RRR工法）¹³⁾を開発した（図一八）。この工法は、面状補強材（ジオテキスタイル）と曲げ剛性の高い場所打ち一体壁面工を組み合わせることにより、短い補強長で高い安定性が得られるところに特徴がある。壁面剛性の効果に着目した模型載荷試験によると、同じように補強材を配置しても、分割壁に比べて一体壁の方が壁面剛性の効果で破壊耐力が4倍以上向上することが確認されている。



図一八 RRR工法の構造

本工法の施工手順は、まず土のうなどの仮壁面を用いて盛土を建設し、盛土と地盤の変形が十分に収束した後に、場所打ちコンクリートで本壁面工を建設する。この段階施工と壁面剛性の付加により、次の利点が生まれる。

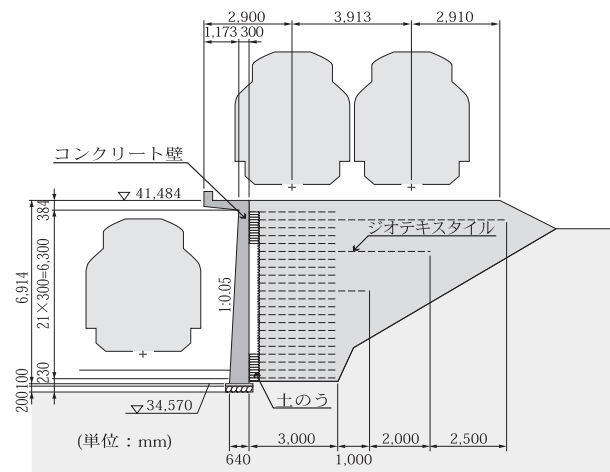
①施工時の盛土と地盤の変形に伴う補強材と壁面工の

- 定着部で生じる応力集中の問題が緩和される。
- ②完成後に剛性の高い壁面工が設置されるため、防音壁や手すりなどの付帯構造物の設置が可能となり、橋台として建設した場合も、盛土天場に作用する鉛直・水平集中荷重に抵抗できる。
- ③壁面工が補強材相互を連結しているため、補強材と壁面工の局所的な破損が構造物の全体破壊につながらない。例えば、施工後に擁壁前面の地盤が掘削された場合でも、十分な安定性を確保できる。
- ④壁面のきちんとした仕上げが保証できる。

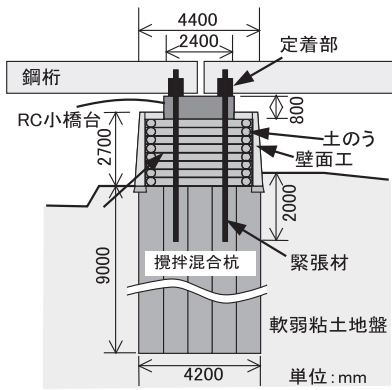
この工法は平成4年の土構造物設計標準¹⁴⁾に採用され、既に100kmを超える施工延長実績を有する。

図一九の現場は、JR山手線の新宿～新大久保間に位置し、中央線との交差部における跨線線路橋の老朽化による橋梁架替え工事に適用された事例である。山手線と中央線は日本における最重要線路である。特に本現場は新宿に隣接していることもあり、日本一の過密線路である。これら6本の重要線路が交差する箇所であり、このような重要箇所にも本構造が採用¹⁵⁾されている。

また、本工法を橋脚や橋台に用いる取り組みも行われている。例えば橋脚の場合は、橋桁からの大きな荷



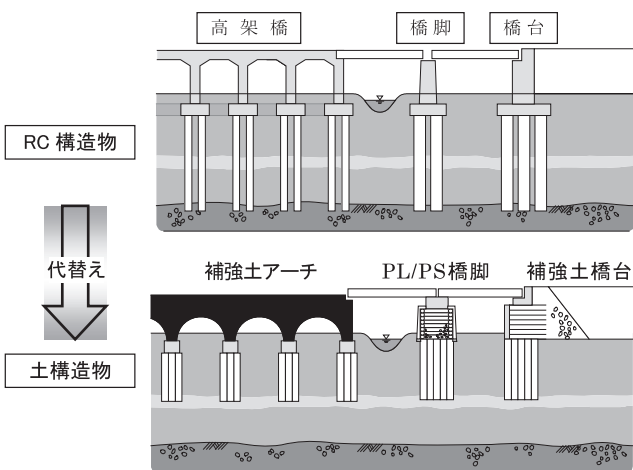
図一九 RRR工法の適用例¹⁵⁾ (山手線, 新宿駅付近)



図一10 PL/PS 橋脚の構造¹⁶⁾

重が作用することになるが、そのような荷重が作用した場合でも盛土の即時・残留沈下が抜本的に小さくなることを目的に、プレロード・プレストレス工法（以降、PL/PS 工法）が提案された。盛土内に鉛直緊張材を配置して一時的な荷重履歴（プレロード）を与え、十分に塑性沈下を生じさせた上で半分程度の荷重を除荷し、残りの荷重を長期的に緊張荷重（プレストレス）として保持する。

図一10に、本工法が初めて適用されたJR九州篠栗線の馬出橋梁¹⁶⁾の構造図を示す。この橋梁は、仮線ではあるが約4年間に亘り営業線として使用された。桁を設置して供用中に生じた残留変形量は、驚くべきことに僅か1mm弱である。この結果は、盛土でもあってもRC橋脚なみの優れた変形性能が得られることを実証したものである。また、RC橋脚と比べて基礎が地盤改良などの簡便な処理で済むことから、大幅なコストダウンが可能であることが確認されている。この他、補強土橋台¹⁷⁾や補強土アーチ構造¹⁸⁾も別途、施工されており、将来は、図一11のようにRC構造物の代替として、これらの新盛土構造が採用



図一11 補強土工法による高架構造

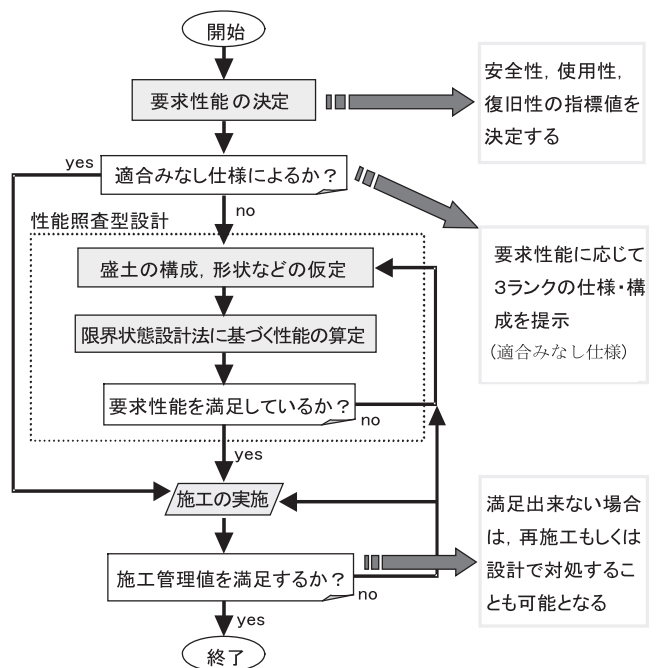
されることも夢ではなくなってきている。

3. 設計の性能規定化

以上のような対処によって、高架橋と同等の信頼性の高い土構造物を構築できるようになった。その一方で、過度な信頼性を追求した結果、経済性の悪化や設計・施工管理の煩雑さなどから、土構造物がもともと持ち合わせていた簡便で容易な構造物という特徴が失われている事実も見逃すことはできない。特に、重要度が低い場合や規模が小さい場合にも、一律に同じ性能で設計することは現実的ではない。

近年、鉄道においては、個別の事情や新技術への対応を柔軟に行うために、規基準類の性能規程化³⁾が進められている。そこで土構造についても、性能照査型設計法の体系に移行することを目指した改訂委員会（土構造物設計標準に関する委員会：委員長 東京理科大学 龍岡文夫教授）を設置し、平成19年1月に新しい設計標準が発刊された。この基準¹⁹⁾は上述の課題を解消できる方法として期待されている。

図一12に新しい基準による盛土の設計²⁰⁾の流れを示す。この基準では性能照査型設計を基本としているため、まず初めに鉄道事業者が重要度や軌道構造、復旧の難易度などを勘案して要求性能を決定する。その後、設計条件や構造・断面を仮定し、限界状態設計法に基づいて応答値を算定し、算定された応答値が要求性能毎に定められた制限値以内であることを照査する流れとなる。しかしながら、土構造物は元来、簡易な



図一12 概略の設計の流れ

構造物であり、設計に過度な労力をかけることが費用や工程の面から必ずしも適切でない場合がある。特に、小規模な工事や緊急性を要する工事においては、実務的に困難である。また、十分な調査や知識を伴わずに性能設計が行われた場合には、実状にそぐわない設計、危険な設計となる場合もある。

そこで、設計の利便性を高めるとともに不確実性に対処する方法として、本設計基準では要求性能水準(性能ランクと呼ぶ)を3段階に設定した上で仕様を示す方法(いわゆる、適合みなし仕様)も併記することにした。この方法は、従来の仕様規定を性能ランク毎に細分化して示すものであり実務的に有効な方法であるため、一般的にはこれを用いる場合が多いと想定される。しかしながら、現場条件から標準的な仕様で対応できない場合、大規模工事において標準的な仕様を用いるよりも更に合理的な設計にしたい場合、新しい形式の土構造物を採用する場合などでは、性能照査型設計による設計が行われることになる。

表一1には性能ランクと要求性能との対応のイメージを示す。本基準において適合みなし仕様を用いる場合には、初めに性能ランク(要求性能のランク分)を定めることになる。その際にはこの表が参考となる。ただし、表に示した適用例はあくまでも適用のイメージを伝えるために軌道構造や線区の重要度の観点から仮に示したものであることに注意を要する。例えば、有道床(バラスト)軌道を支持する土構造物であっても、重要度が極めて高い線区などにおいては性能ランクIが適用されることもあるし、閑散線区であってもL2地震動に対して復旧の容易性を確保したい場合などにおいては性能ランクIIが適用されることがある。つまり性能ランクは、軌道構造や重要度から一義的に定まるものではなく、最終的には経営を含めた諸条件

表一1 性能ランクと要求性能のイメージ

	性能ランク I	性能ランク II	性能ランク III
要求性能	常時においては極めて小さな変形であり、L2地震動や極めて稀な豪雨に対しても過大な変形が生じない性能を有する土構造物。	常時においては通常の保守で対応出来る程度の変形は生じるが、L2地震動や極めて稀な豪雨に対しても壊滅的な破壊には至らない性能を有する土構造物。	常時においての変形は許容するが、L1地震動や年に数回程度の降雨に対して破壊しない程度の性能を有する土構造物。
適用例	例えば、省力化軌道を支持する土構造物	例えば、重要度の高い線区の有道床軌道を支持する土構造物	例えば、一般的な線区の有道床軌道を支持する土構造物

表一2 土構造物の照査項目、照査指標の例

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性	破壊	土構造物の内部破壊安全度(円弧すべり法, 2楔など), 変位・変形
	安定	支持地盤の安定(円弧すべり法, 圧密沈下量), 変位・変形
	列車走行	変位・変形(繰返し累積変位, 動的変位)
使用性	乗り心地	変位・変形(軌道整備基準値, 動的変位)
	軌道保守性	変位・変形(繰返し累積変形, 沈下速度)
	振動・騒音	振動レベル, 騒音レベル
	外観	変形, クラックなど
復旧性	変形, 損傷, 残存耐力	地盤や土構造物の地震時残留変形, 降雨時変形など

に対して、事業者の意志によって選定されるべきものである。

表一2は、性能項目と性能指標の例を示す。具体的に性能照査型設計を行う際には、要求性能に対応した性能項目と照査指標を定める必要があるが、その際にはこの表が参考となる。また、性能照査は照査式を用いて行うことになるが、安定計算法として実績のある円弧すべり(修正フェレニウス)法を例として、照査式として形式変換したものを下式に示す。従来の設計では、円弧すべり安全率が許容安全率以上であることを確認してきたが、ここでは応答モーメントが限界モーメントに対して1以下であることを照査することとなる。

$$\gamma_i \frac{M_{Rd}}{M_{Ld}} = \gamma_i \frac{\sum \{W \sin \alpha + (y/r) K_h W\}}{f_{rs} \cdot \sum \{[(W - bu) \cos \alpha - K_h W \sin \alpha] \tan \phi + cL + T_r\}} \leq 1.0$$

ここに、 γ_i : 構造物係数(一般に1.0)、 M_{Rd} : 設計応答モーメント、 M_{Ld} : 設計抵抗モーメント、 f_{rs} : 円弧すべり抵抗係数、 W : スライス重量、 K_h : 水平震度、 α : スライス底面の角度、 ϕ : 内部摩擦角、 c : 粘着力、 L : スライス底面の長さ、 T_r : 対策工の抵抗力、 r : 円弧の半径、 b : スライス幅、 y : スライス重心と円弧中心間の鉛直距離、 u : 間隙水圧

この他、土構造物に関する照査指標としては、変位・変形に関するものがある。例えば、地震時における滑動変位や揺すり込み沈下に関しては、既に耐震標準において算定法¹⁰⁾が示されている。また、スラブ軌道のように常時における変形の制限値が厳しい場合には、列車の繰返し載荷に伴う盛土の圧縮変形の累積なども問題となることから、本基準¹⁹⁾では新たにその算定法を示した。

一方、土構造物の性能照査にあたっては、設計耐用期間における性能の経時的変化を考慮して行わなければならない。具体的には、降雨における土の強度低下や圧密による強度増加なども必要に応じて考慮しな

ればならない。このため本基準では、系統立てて実施した土質試験結果から、盛土の設計強度定数を土質分類毎に、検討する状態（例えば、降雨時や地震時）毎に設定した。なお、詳細に関しては文献^{19), 20)}を参照するとよい。

4. おわりに

鉄道盛土は時代とともにその要求性能が変化し、RCや鋼構造物と同等の性能を求めて高級化の道を歩んできた。実際、支持地盤をセメントで固めて、良質な盛土材料を購入してよく締め固めを行い、コンクリートでのり面を覆い、ジオテキスタイルなどの補強材を多段に配置することによって、地震や雨に対して他の構造物に負けない性能の土構造物ができるようになってきた。しかしながらその一方で、発生土の再利用率は低下し、設計も複雑になり、経済性や環境適合性も低下するなどの弊害も見受けられる。この点に関する是正は今後の課題である。

盛土は、RCや鋼のような材料劣化がなく建設直後は手が掛かったとしても徐々に丈夫となり全取替えの心配もないため、長いスパンでみれば維持管理がしやすい構造物とも言える。したがって合理的な設計を行うためには、年代効果による性能の向上をどのように評価するのが重要となる。また、盛土の品質を左右するのは締め固めにあることを忘れてはならない。仕様設計では単に締め固めの仕方と施工管理を規定していたが、性能設計では、締め固めを行うことによって、強度や遮水性、剛性などが、どの程度、高まるのかを定量的に示すことが求められる。このように、直接的に締め固めの効果を性能と結び付けて説明できるため、発注者や施工者の理解が得られやすい。その一方で、設計の性能規定化に関しては、事業者が土の本質を見極めた適切な評価ができるかどうか鍵となることを忘れ

てはならない。絵に描いた餅にならないように心がけたい。

J C M A

《参考文献》

- 1) 日本鉄道施設協会：鉄道施設技術発達史，1994.1
- 2) 館山勝：鉄道における盛土構造物の変化・変遷，土と基礎，Vol.54, No.9, 2006.9
- 3) 館山勝，村田修：鉄道土構造物の性能規程化の動向，土と基礎，Vol.50, No.1, 2002.1
- 4) 国鉄技研：土質研究室の沿革と研究成果，鉄道技術研究所速報，1980.12
- 5) 日本国有鉄道：路盤構築基準（案），1959
- 6) 日本国有鉄道新幹線建設局：新幹線規格，1961.8
- 7) 日本国有鉄道：土構造物の設計施工指針，1967.12
- 8) 鉄道施設協会：スラブ軌道の設計施工，1971.3
- 9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（省力化軌道用土構造物），丸善，1999.11
- 10) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.11
- 11) 斉藤，都，室町他：適正盛土構造の研究（第1報），鉄道技術研究報告，NO595，1967.6
- 12) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説（土構造物），1978.11
- 13) 龍岡文夫，館山勝：ジオテキスタイル補強土擁壁，基礎工，1995.11
- 14) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善，1992.10
- 15) 加藤正二，高橋眞一：JR山手線での剛壁面補強土壁工法の適用について，ジオシンセティックス技術情報，Vol.16, No.2, 国際ジオシンセティックス学会日本支部，2000.7
- 16) 龍岡文夫，内村太郎，館山勝，小島謙一：鉄道橋のプレローディッド・プレストレス（PL・PS）補強土橋脚の挙動，土と基礎，Vol.46, No.8, 1998.8
- 17) 館山勝，青木一二三，米澤豊司，篠田昌弘，渡辺健治：耐震性に優れたセメント改良補強土橋台の開発，鉄道総研報告，Vol.18, No.4, 2004.4
- 18) 古山章一，佐藤春夫，余目祥一，山崎聡：補強盛土によるアーチ高架構造の設計と施工，Vol.30, No.11, 2002.11
- 19) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善，2007.1
- 20) 館山勝：土構造物設計標準の概要，鉄道総研報告，Vol.20, No.12, 2006.12

【筆者紹介】

館山 勝（たてやま まさる）
 財団法人鉄道総合技術研究所
 構造物技術研究部
 部長

