

生研公開講演

盛土を鉄筋コンクリート構造物なみに強くできるか？

Can We Make Embankments as Strong as Reinforced Concrete Structures ?

龍岡 文夫*

Fumio TATSUOKA

今日の演題は、「盛土を鉄筋コンクリート構造物なみに強くできるか？」です。その心は、以下のようなものです。大体土というのは何となくやわらかくて、あてにならなくて弱い。それに比べて鉄筋コンクリートは非常にかたくて丈夫だ。つまり、土というのは前近代的なもので、あはなるべく使わないほうがいい、鉄筋コンクリートが近代的だ、そういう時代の流れがあるわけです。

大体、東京でもどこでも、明治時代に作った鉄道と道路の高架構造物は、盛土です。東海道新幹線も主に盛土でつくったのですけれども、あまり丈夫じゃないということで、その後はほとんど鉄筋コンクリートで作ったわけで、今もその流れが続いているわけです。ところが、盛土だってある工夫をすれば強くなるのだ、ということが今日の演題です。つまり、土を鉄筋コンクリートと同等に強くすることは、やはり無理ですが、従来鉄筋コンクリート構造物で作ったところを土でなんとか作るということが可能になりましたという話です。

写真1は、JRの東海道線（現在、神戸線）の尼崎の近くです。高速鉄道がその上を走っている擁壁が見えますが、表面は鉄筋コンクリートです。これが、今日の演題であります「盛土を鉄筋コンクリートなみに強くできるか？」に対する答えの一つです。この断面が図1です。

表面は確かに鉄筋コンクリートの壁ですが、これは薄く、これだけですと、この上に鉄道が通ったらひっくり返る危険があるわけです。盛土の中に石油製品の高分子材料の網状のシート（ネット）を水平に幾層にも敷いておきまして土自身を強くしておけば、高速鉄道もその上を走れるようになります。

こういうことを今は言えるのですけれども、この研究を始めた大体12、3年前は、このような見通しをはっきり持っていたわけではありません。実際、実用化しはじめたのは、せいぜい5年くらい前です。JRをはじめとして、この工法ですでに16キロほど擁壁が建設されています。今

*東京大学生産技術研究所 第5部

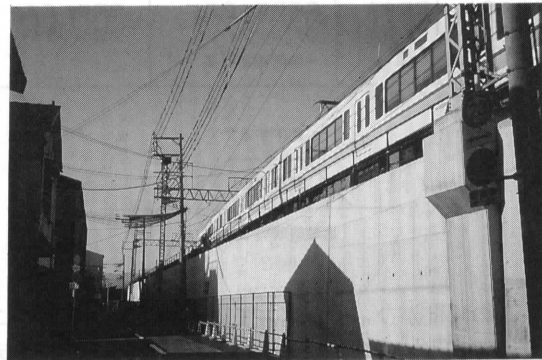


写真1

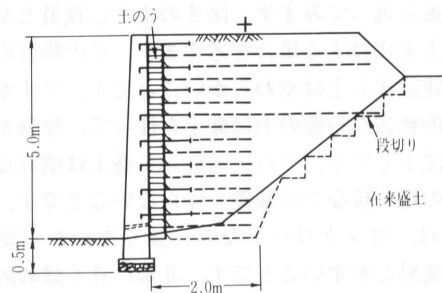


図1

日はこの工法の原理と、研究の歴史と、いろいろな課題をお話ししてみたいと思います。

この間、阪神淡路大地震がありました。ところが、被害地域に写真1の現場を含めて、全長2 km以上このような工法で擁壁が建設されていました。特に、日本家屋の倒壊率の高かった芦屋と摂津本山間の森南町でも写真2のように建設されていました。この擁壁の上を東海道本線が走っています。ここは家屋の倒壊率が80%以上だった。私はその地震の直後は、この擁壁が倒れたのではないかと考えていたのです。水平震度が0.2で設計していましたが、800ガル以上の大変大きな地震動と言うことを聞いたからです。しかし、幸いひっくり返っていませんでした。少し動いたけれども軽微な被害ということで、その後使い続けています。



写真 2

	特徴	長所	欠点
従来の盛土	建設中と建設後：柔	基礎地盤の変形に追従できる。 →杭基礎が不要	安定性に劣る 変形しやすい

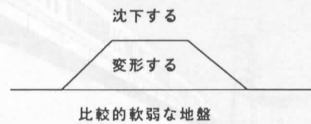


図 2

もし、この擁壁がひっくり返っていますと、この工法に責任を大変感じているわけですから、私も当然ひっくり返っているわけです。

歴史を振り返ってみます。図 2 のように鉄道とか道路のために盛土を建設する場合を考えます。その場合の特徴は、建設中も建設後も土はやわらかいことです。ですから長所は、比較的軟弱な地盤の上に盛土を作って、地盤が圧縮して盛土が沈下しても、それに追従して盛土は壊れないので、ほとんどの場合杭などの基礎を作らないことです。一方欠点としては、コンクリートなみに強くないから安定性に劣ったり変形しやすいことです。非常に良く締め固めれば、そんなこともないのですが、降雨や地震により崩れやすい欠点があります。この欠点のために、盛土というのは近代的ではないということ、だんだん図 3 に示すような鉄筋コンクリート (RC) の構造物の L 型擁壁や、高架橋に替わってきたわけです (図 3)。

この場合杭で支持することが多い。これは、土というのはあてにならず、弱いから、鉄筋コンクリート構造物で土の荷重や他の荷重をがっちり受ける、という思想なのです。こういう構造物の特徴としては、建設中も建設後も、非常にかたく、がっちりしているということです。したがって、長所は、非常に安定性に優れて変形しにくいことです。ところが欠点もある。たとえば、隣接する盛土が沈下するが、RC 構造物は沈下しない。すると、両者の間に不等沈下が起きて結構面倒な問題が起こるのです。それから、杭基礎が必要になって建設費が高いわけです。

	特徴	長所	欠点
RC 擁壁 RC 橋台	建設中と建設後：剛	安定性に優れる 変形しにくい	基礎地盤の変形に追従できない。 →杭基礎が必要

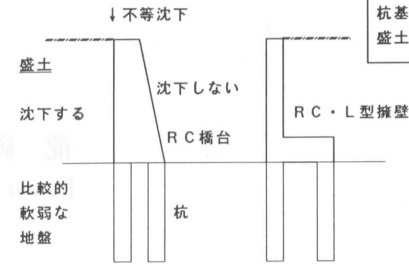


図 3

	特徴	長所	欠点
剛な壁面工を持つ 補強土擁壁	建設中は柔	基礎地盤の変形に追従できる。 →杭基礎が不要	実績が少ない RC 橋台と比較すると、剛性がまだ劣る
	完成後は剛	安定性に優れる 変形しにくい	

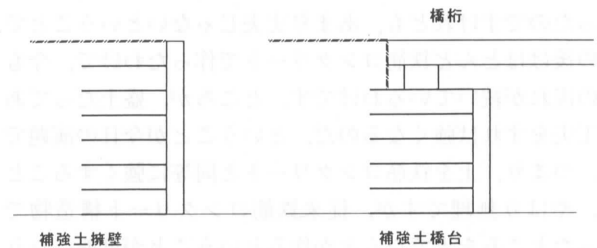


図 4

補強土擁壁 (図 1) は、盛土 (図 2) と RC 構造物 (図 3) の中間の性質を持つ構造物です (図 4)。その特徴は、まず建設中はなるべくやわらかくしておくわけです。実際、建設するときは RC の壁がないのです。土とシート状の補強材だけで構造物を作って置いて、地盤が沈下したり補強土が変形しても、その変形には追従できる。だから、杭基礎もいらない。最後に RC の壁を打つ。したがって、完成後は安定性にすぐれて変形しにくいということです。したがって、たとえばこの構造物で橋台を作ることもできる。こういう中途半端な構造物ですと、盛土のやわらかいと言う長所、RC 構造物のかたいと言う長所をうまくカバーできるのではないかという発想なわけです。

しかし、欠点もあります。まず、これは非常に新しい工法であり、ここ 5 年くらいの実績しかないことです。もう一つは、補強土の橋台は土で橋桁の重量を直接受けるわけですから、RC 橋台に比べるとまだ剛性が劣るわけです。つまり両方の長所をとろうとしたのですが、当然両方の欠

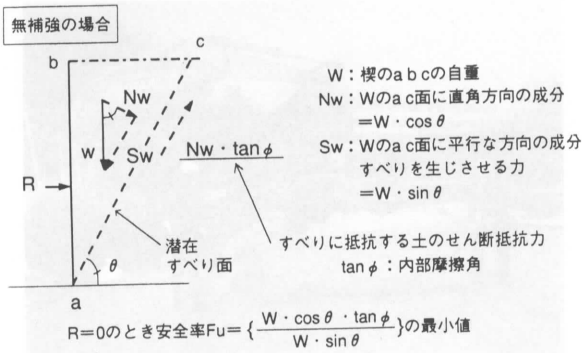


図5

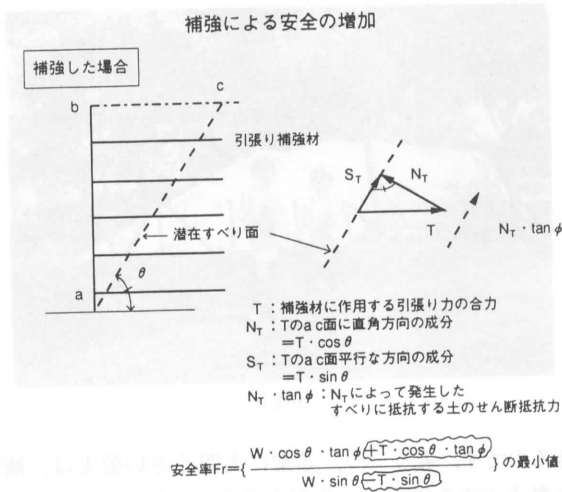


図6

点を引きずっているわけです。それでも、図4のような形式で十分うまくいっているわけで、すでに実用化しているわけです。

つぎに、補強土の原理を説明します(図5)。いま、この盛土が壊れるというのは、滑り線acという破壊面に沿って、三角形の土塊abcが下に滑り落ちようとする事です。この三角形の土の塊の重さがWです。Wの滑り線に平行な成分Swが、滑り線abに沿って滑らそうとする力になります。Wの滑り面に対する直交成分がNwです。土は摩擦性物質ですから、滑り面での押える力Nwに対してある係数の値(ここでは $\tan \phi$ という記号であらわしている)を掛けた値が、滑り抵抗になるわけです(ϕ は内部摩擦角と呼ばれている)。 $\tan \phi$ は0.5とか0.6という値です。SwよりもNw $\tan \phi$ の方が小さいと均衡が破れて滑りが生じるわけです。したがって、均衡を保つために、盛土の前に擁壁を作って抑える力Rを与えるわけです。

補強土では、壁面の外から力Rを与えるかわりに盛土の中に補強材を水平に敷くわけです(図6)。補強土に滑り線が生じようとして、土が変形しようとするとき、この場所で補強材内部に引張力が働くわけです。この引張力が

働きますと、その引張力の滑り面に平行な成分 S_T が、まずこれに沿って滑ろうとする力Nwに抵抗する力になるわけです。

それだけではなく、補強材に働く引張力Tにより、滑り線を挟んで土を押さえつけて滑り線に対する直交成分 N_T が出てくるわけです。それに対して、また摩擦係数が働きますから、 N_T に $\tan \phi$ を掛けたものが、抵抗力として増えるわけなのです。

安全率は何かという、補強材がない場合(図5)、滑らそうとする力の分母 $W \cdot \sin \theta$ の、分子の土の抵抗する力の $W \cdot \cos \theta$ に $\tan \phi$ を掛けた値に対する比です。この安定率が1を切ろうとすると壊れるということです。

補強材がある場合(図6)は、分母の土の強さは、土の自重に起因する滑り抵抗に補強材の引張力Tにより生じる土の滑り摩擦抵抗 $T \cos \theta \tan \phi$ が足されます。一方、滑らそうとする力(分母)は、土の自重による滑らそうとする力から、補強材に働く引張力による抵抗の成分 $T \sin \theta$ だけ引き算をします。この2つのメカニズムによって破壊に対する安全率が増加するわけです。

図7(a)は従来の工法です。盛土の斜面上に、擁壁を作ろうという場合に、まずシートパイルを打って、次にアンカーをして、掘削をして、杭を打って、L型擁壁を作って、盛土をします。この手順は結構複雑になるわけです。

それに対して、図7(b)は補強材が長い補強土擁壁です。この場合、杭は不要になるかも知れませんが、シートパイ

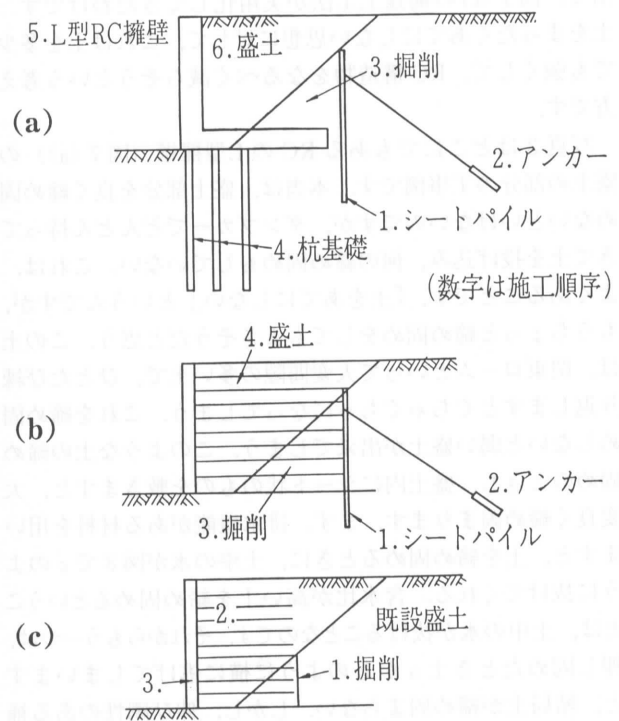


図7



写真3



写真4

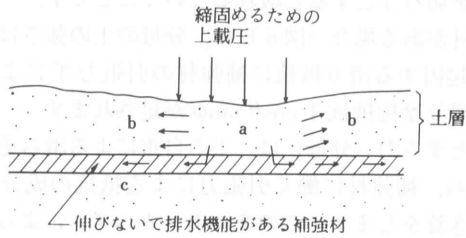


図8



写真5

ルを打ちアンカーを設置して、斜面を相当掘削してから、盛土する必要がある。しかし、図7(c)のようになり補強材が短くてよければ、杭基礎が不要になった上で、掘削量が少なくなりシートパイルとアンカーが不要になり工程が短くなり、建設費が低くなり、かつRC擁壁(図7(a))と同等な、あるいはそれ以上のものが建設できる。この理由で、図7(c)の補強土工法が実用化してきたわけです。土をまったくあてにしない思想に対して、これは土を多少でも強くして、RC構造物をなるべく減らそうという考え方です。

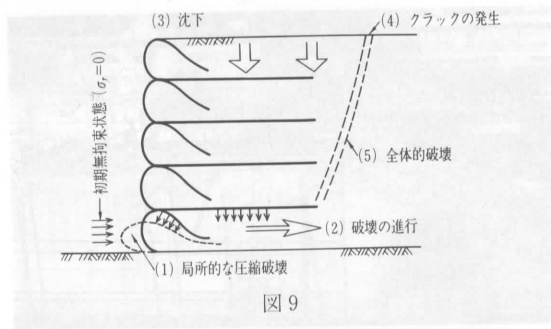
写真3はどこにでもあるRCのL型擁壁(図7(a))の盛土の部分の工事例です。本当は、盛土部分を良く締め固めないといけないのですが、ダンプカーでどんどん持ってきて土を投げ込み、何の締め固めもしていない。これは、よくあることです。「土をあてにしない」というんですが、もうちょっと締め固めをしてもよさそうだと思う。この土は、関東ロームといって大変間隙の多い土で、ひとたび練り返しますとぐちゃぐちゃになってしまう。これを締め固めしないと弱い盛土が出来てしまう。このような土の締め固めのときも、盛土内にシート状のものを敷きますと、大変良く締め固まります。まず、排水機能がある材料を用いますと、土を締め固めるときに、土中の水が図8でcのように抜けてくれる。含水比が高い土を締め固めるといことは、土中の水が抜けることなのです。それからもう一つは、押し固めたとき土aがbのように横に逃げてしまいますと、結局土が締め固まらない。しかし、伸び剛性のある補強材があれば、土は横に逃げないで、大変良く締め固めが

できるのです。もう一つ、非常に人間くさい要素は、補強材を敷きつめる場合は、地面を平面にしなければならぬ、したがって、結局締め固めることになる、ということです。

こういう工法を思いついたのが1981年頃です。東京大学生産技術研究所の千葉実験所で、まず試験盛土を建設しました。写真4は、これから関東ロームの補強盛土を作ろうとしているところです。補強材は、不織布といいまして、織っていない布であり、水を通す能力があります。しかし、かたさが足りない。しかし、あの当時排水機能があつたかさ(剛性)も大きい良い材料がなかったことと、関東ロームを用いた研究だから、排水機能を重視してまずやってみようではないか、ということになったわけです。写真5は、完成した盛土です。1982年で、13年前であります。

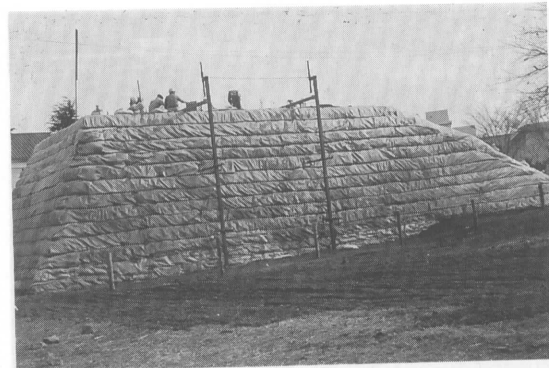
この盛土にはRC構造物を全く用いておらず、壁面は布を巻いただけの構造です。しかし、雨が降りますと大きく変形をしました。雨が降りますと、水が図9の(1)の場所にたまりまして、専門用語で言う「サクション」、すなわち負の過剰間隙水圧がなくなって、それで土自身が弱くなりまして、ぐしゃっとなつぶれまして、全体的にも変形してしまった(写真6)。それで、壁面の近くはしっかりした構造にしないといけない、と反省したわけです。

この盛土は、それでも4年間ほど放置しておきました。しかし、壁面が大変形しただけではなく、美的にもだめということを確認しました(写真7)。最初の試験盛土は大



いに反省点があったわけです。

2 番目の試験盛土 (写真 8) でも、まだ RC 構造物を使わないことに固執して、壁面に俵を置いて土が逃げるのを押さえることができないかと考えました。完成した盛土 (写真 9) は、確かに頑丈でした。しかし、これを見たときに、耐火性、耐久性が問題だとすぐ気がつきました。しかし、確かにコンクリートを一切使わないで、5.5メートルの高さの盛土をつくれたわけです。しかも、非常にやわらかい土を用いてです。この事実は、非常に大きな教訓です。翌年、山内裕元さんという大変熱心な学生が参加しまし



た。盛土が壊れないままだと博士論文を書けないということ、では壊してしまおうということになり、1985年の10月に盛土の上に池をつくりまして、水をじゃあじゃあ入れて壊した (写真 10)。確かに壊れやすくした壁面の方には、クラックができ、壁面が傾斜しました。

盛土は、翌年に解体しました。補強している領域は、クラックもなくてしっかりしていました。これで鉄筋コンクリートを用いなくても、上に池をつかって水をじゃあじゃあ入れたってそう簡単に壊れないものだという確信を得たわけです。

いよいよ、JR がこの工法を実用化することになりました。そこで、JR の総研の敷地で1988年に実用化のための



写真11



写真12



写真13

試験盛土をつくりました。その時活躍したのが、館山勝氏と村田修氏です。この場合、鉄筋コンクリートの薄い壁面工を最後に作りしました(写真13)。この壁面工には、色々な目的があります。まず、壁面の背後の土を押さえておく目的です。それから、美的なものや耐久性です。

盛土の上に大きな荷重が加わる場合があります。その時の補強盛土の強さを確かめるために、盛土上にフーチングをおいて、大きな荷重で押し込みました(写真14)。この試験盛土では、1箇所を除いて一体の壁面工を作ったのですけれども、1つの壁面だけはわざとパネルでつくったわけです。つまり、一体の壁にしたほうがいいのか、ばらばらのパネルでいいのかということを、調べたわけです。パネ

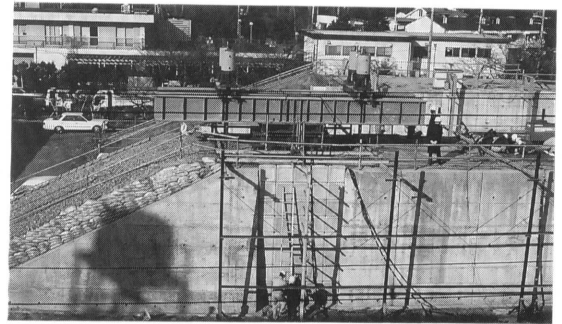


写真14

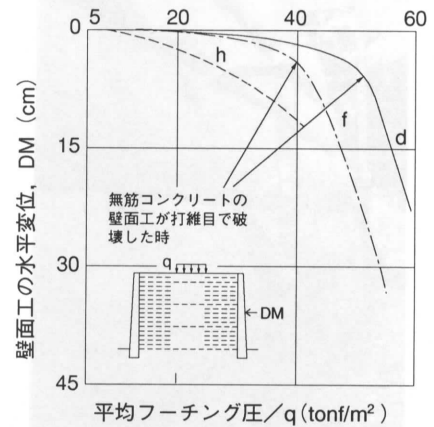


図10

ルでできた壁面は、荷重してみますと座屈してしまい、弱いことがわかりました。

図10は、壁の上部のフーチングに荷重を加えて、どれだけ壁が前に出たかを示したものです。フーチングの圧力は、最大60トン/㎡近くであり、大変大きな荷重です。フーチングの面積が2m×3mですから、360トンです。この図でhはパネルでできたばらばらの壁をあらわしていて、荷重による壁の変形が最初から大きいことがわかります。しかし、一体の壁のf, dはかなりがんばっている。fは、補強材の長さが1.5mと特に短くしたもので、hとdの壁は補強材の長さが2mです。dの壁はフーチングに40トン/㎡を加えても、壁の変形が大変小さい。この結果で、実用的にも大丈夫ということをしてJRは判断して、いよいよ実用化が始まったわけです。

たとえば高速道路で8メートルほどの高さの防音壁がありますけれども、一体の壁面工ですと、それを壁面工の上に作ることができます(図11)。しかし、パネルがばらばらしていると、このようなことはできない。JRは、壁面工の上に電柱や防音壁を立てたりして一体壁を活用しています。

従来の重力式擁壁(図12)では、壁面に作用してくる土圧による擁壁を転倒しようとするモーメントと擁壁の底面ですべらそうとする力に、擁壁の自重自身で抵抗している。

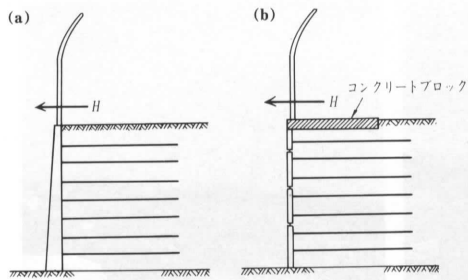


図11



写真15

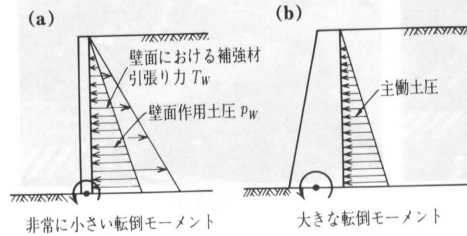


図12



写真16

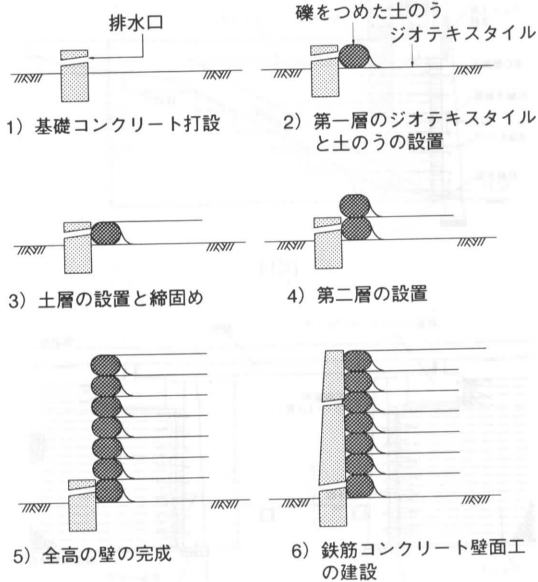


図13

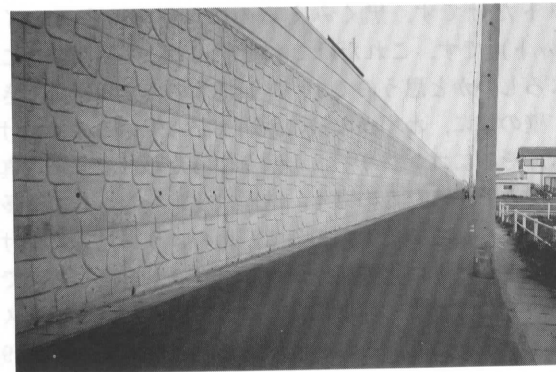


写真17

それに対して、補強土擁壁では、壁面工に作用する土圧に対して補強材が壁面工を引っ張って抵抗している構造です。したがって、自立した構造であり、壁面工の底面には転倒モーメントや滑動力が作用していない。又、壁面上内部にも大きなモーメント・せん断力が作用しない。このようなことから、壁面工を簡単にできるわけです。

このような補強土擁壁の建設法を示したのが図13です。最初に小さい基礎コンクリートをつくって、壁面の位置に礫（レキ）をつめた土のうを置きます。次にジオテキスタイル（geotextile）のシートを敷きます。「ジオ」は「土」，「テキスタイル」は「繊維」という意味ですから、土に使

う繊維を意味します。それを敷いて、30 cm の厚さに土を敷き、よく締め固める。この作業を繰り返して、まず壁をつくる。このときには一切鉄筋コンクリートはありませんから、やわらかいわけです。ですから、下の地盤が多少変形しても、あるいは盛土自身が変形しても問題がない。これは、盛土の特徴であり、杭基礎がなくても多少変形しても問題はない。変形がおさまった後、薄い鉄筋コンクリートの壁を打って盛土と一体化する。そういう状態にして、使い始める、という思想です。RC 構造物も少し使わなければうまくいかないことが、分かったわけでした。土だけで全てうまくいくというのは、どうも思い上がりであったという反省です。

実際使い始めたわけでした。写真15は、1991年に名古屋の

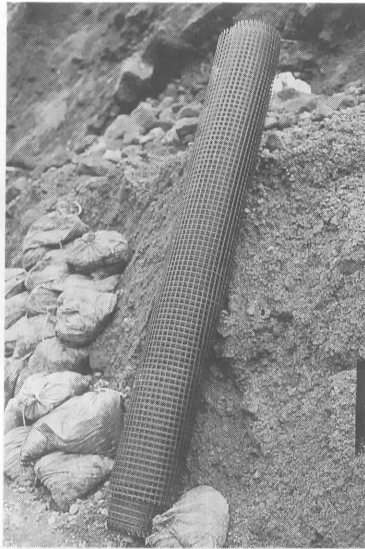


写真18



写真19

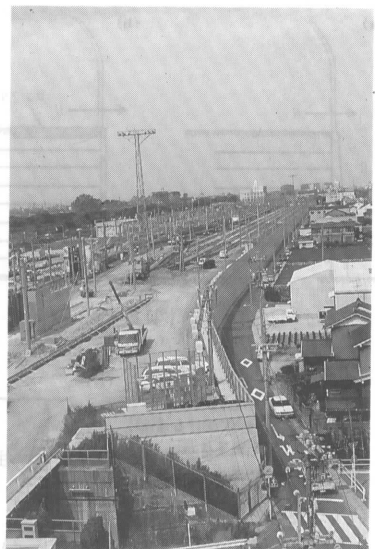


写真20

新幹線車両基地で、盛土斜面を鉛直擁壁にして、その上に線路を作ろうとしているところです。擁壁は、大体高さ5メートルで長さが1キロくらいで、最初の大きな工事です。

写真16は建設中で、盛土はでき上がったのですが、鉄筋コンクリートはどこにも使っていない。全部、土とネットだけです。黒く見えるのは、ジオテキスタイル(ネット)です。これだけでも安定して、短期間ではこれでよろしいかと思うのですが、長期間の安定は保証できない。壁の前に、わずかの量の鉄筋が立っているのですが、そこにコンクリートの壁を作ったわけです。写真17が、でき上がったものです。壁面は化粧をしまして、多少でも美しくしています。まるで石垣のように見えますけれども、これは単に化粧型枠にコンクリートを流し込んででき上がったのです。写真18は、ここに用いたジオテキスタイル(ネット)で、これを広げて使うわけです。写真19、20が、この工事を上から撮影したものです。図14は、この補強土擁壁の断面図の一つです。

この現場では、大胆なことをやりました。普通、鉄道の橋梁の橋桁(けた)は、鉄筋コンクリートの構造物である橋台で支持します。この現場は、川のそばですから地盤はあまりよくないので、その橋台は杭で支持することになる。この現場では、橋桁を受けるコンクリートブロックをそのまま補強土擁壁の上に置いて、擁壁を橋台として使用しています(図15)。普通であれば、鉄筋コンクリート構造物とするところを、土で置き換えてしまったわけですから、かなり大胆な発想です。写真21、22、23が、建設前、建設中、完成後です。補強土擁壁で橋台を作ることにより、建設費が半分近くになったそうです。この場合、盛土に集中荷重が加わる。このために、沈下が起きると問題になりますので、大変気をつけて設計と施工をしたわけです。橋桁

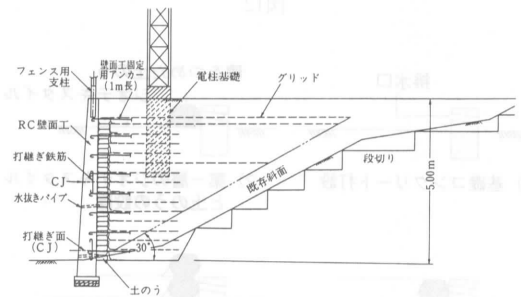


図14

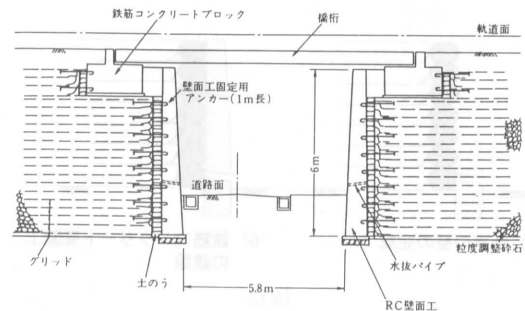


図15

の長さは、この場合は9.5mです。30m、40mの橋桁に対して、このようなことができるかどうかというのが、今の私どもの研究課題です。

次は尼崎の現場です(図16)。元々、在来線(元の東海道線、現在は神戸線)が4線あったところに、斜面に補強土工法で盛土をし6線にしたわけです。

写真24は建設開始で、1990年10月です。写真1が、完成して電車が走っているところで、上から見たのが、写真25です。コンクリートの壁の内側が土でありネットが敷いてあることは、見てもわからないですね。橋台も、写真26の

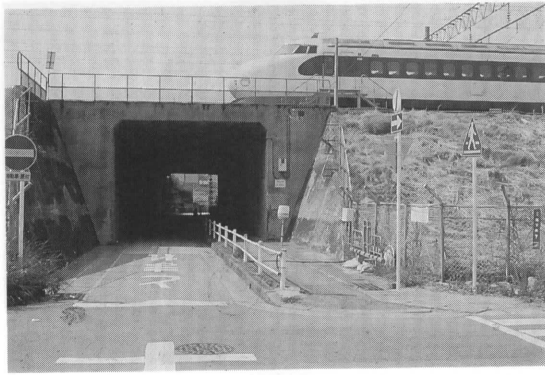


写真21



写真24



写真22



写真25



写真23

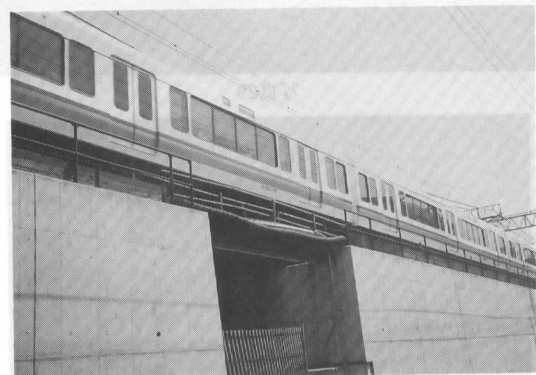


写真26

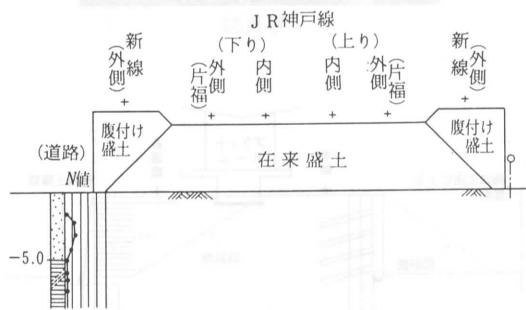


図16

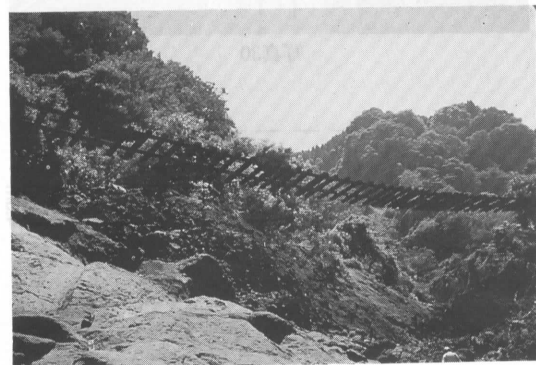


写真27

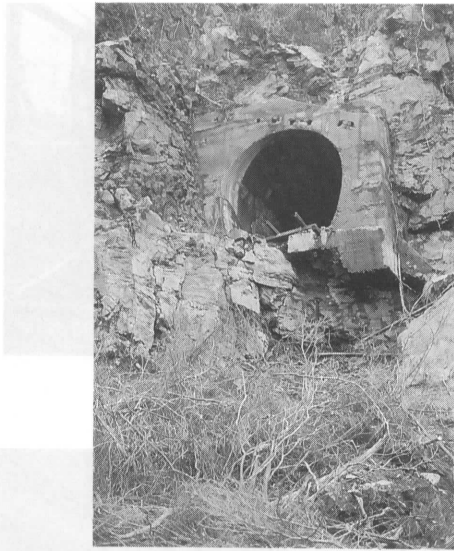


写真28



写真29



写真30

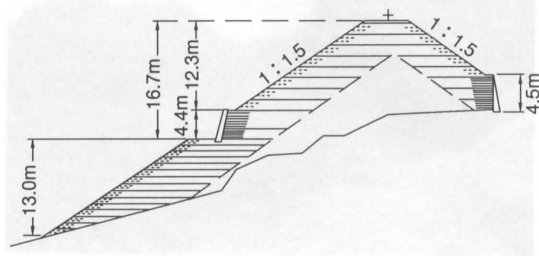


図17



写真31



写真32



写真33

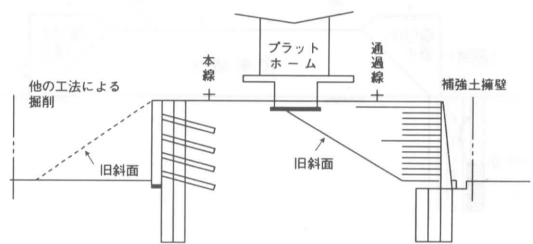


図18

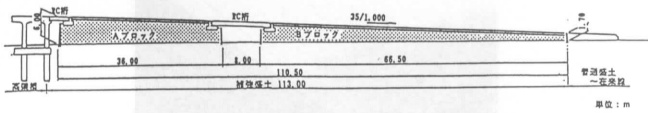


図19



写真34

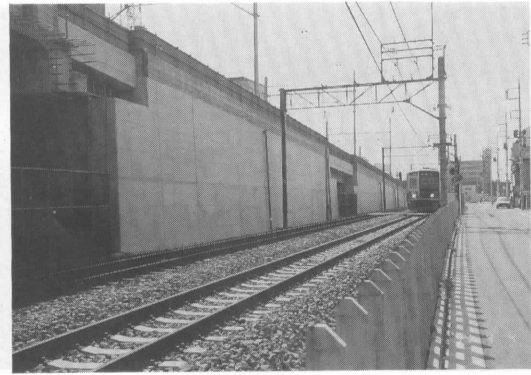


写真35



写真36



写真37

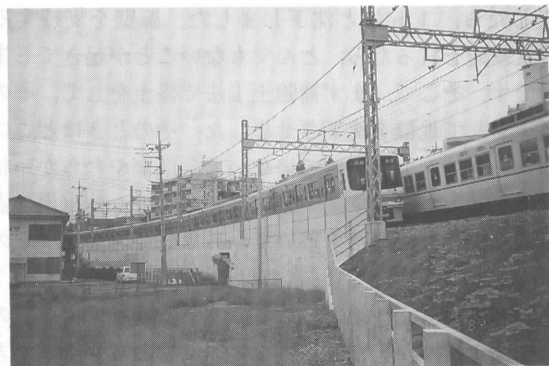


写真38

ように、ところどころ作りました。

九州阿蘇山中で、1990年に豪雨のために豊肥線の盛土がいくつかの谷で流れてしまった(写真27)。写真28はトンネルの入口であって、この下はもう盛土はなくなってしまっている(写真28、写真29)。この復旧をどうするかが問題だったわけです。通常の盛土だと、あまりにも雨に弱いということで、補強土工法で作りをなおしたわけです。(図17)

写真30は、盛土ができ上がった状態です。鉄筋コンクリートの壁面を盛土の鉛直面に打たなければいけないのですけれども、壁を打つ前にもう列車が走ってしまっている。ここの断面は、高さが34 mあります。鉛直な鉄筋コンクリートの壁面は、もう少し高くてもよかったのですが、最初のこの種の工事としては、これでもずいぶん大胆な工事だと思います。元々、盛土の崩壊は、豪雨時に起きたわけです。これを処理するために、直径の大きなコルゲートパイプを盛土中に通す必要があるわけです。補強工法では、こういう大きなパイプ(写真31)の建設も周りがやわらかいですから調整が簡単になるわけです。

写真32、33、図18は、京都の奈良線の六地藏駅の現場です。壁面工の上に電柱が立って、補強した盛土の上に線路が走っています。

東京では西武池袋線、桜台一練馬間で補強盛土の工事が行われました(図19)。盛土は次第に高くなって高さ6 mほどで、RCの高架橋に移ります。写真34、35が工事中、完成後です。この現場でも、補強盛土で橋台を作りました(写真36)。

京王線にも一部ありまして、写真37が施工前で、でき上がると(写真38)特急も走っています。最近で、壁面の彫りが深くていちばんきれいだと思ったのは、名古屋駅

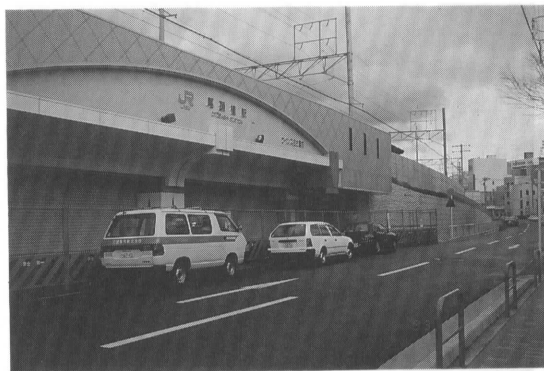


写真39

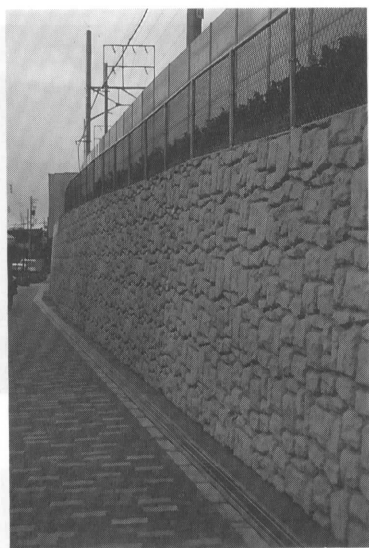


写真40

の隣の駅です (写真39, 40). いままででつくった一番高いのは高さ10mあります (写真41). この段階では、鉄筋コンクリートはどこにも用いていないのです.

最近の大きなプロジェクトは、北陸新幹線の、長野市の北の車輛基地の盛土です (図20). この工事は、地盤が極めて軟弱であることと、盛土材料が含水比の高い粘土質であったという2つの悪い条件が重なっている. したがって、この工事の成否は、この工法の将来にとって大変重要です. 盛土したら、1mほど沈下しました. 擁壁を支持するために杭基礎を打ったら、とんでもないことが起きてしまうわけです. そこで、まず補強土工法で盛土をして、その上に盛土をして地盤を沈下させました. そのときはどこにも、鉄筋コンクリートを用いていないで全部がやわらかい状態で沈下させたわけです. 十分沈下させた後、荷重用の盛土を除去して、最後に落ちてから鉄筋コンクリートの壁面工を打つ予定です. 写真42は壁を打つ前で、もう1mも沈下して、盛土が地盤にめりこんでる状態です. この現場の補強土擁壁が、建設中になるべくやわらかく、でき上がったらかたく、という思想を一番活用しています.

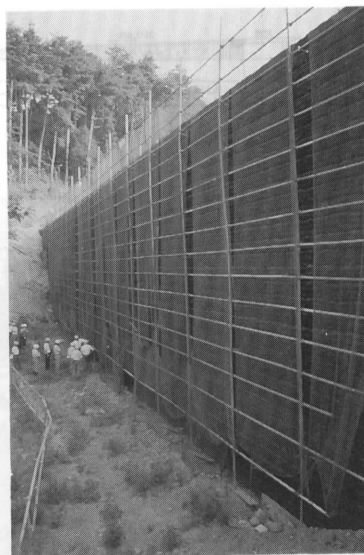


写真41

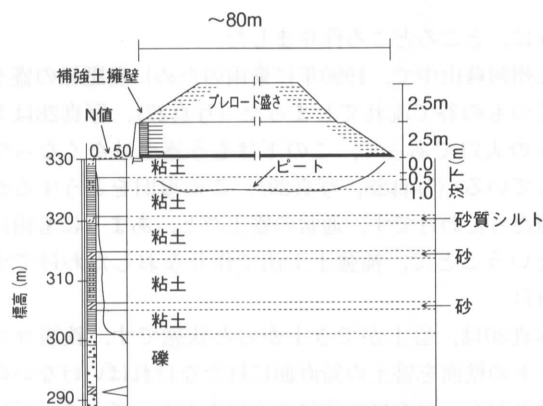


図20

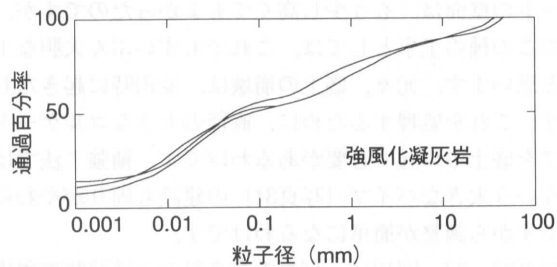


図21

盛土材料は、含水比の高い強風化凝灰岩 (図21) で、締め固めると軟弱な粘土になってしまう. したがって、非常に引っ張りに対して剛性がある織布 (織った布) と水はけが大変良い不織布 (織ってない布) を組み合わせた水はけと引張抵抗の両方兼ね備えた複合材と言われるジオテキスタイル (図22) を使いました.

次に今年の阪神大震災の話です. 図23にいわゆる震災の帯を示してあります. この帯のただ中に補強土擁壁が建設

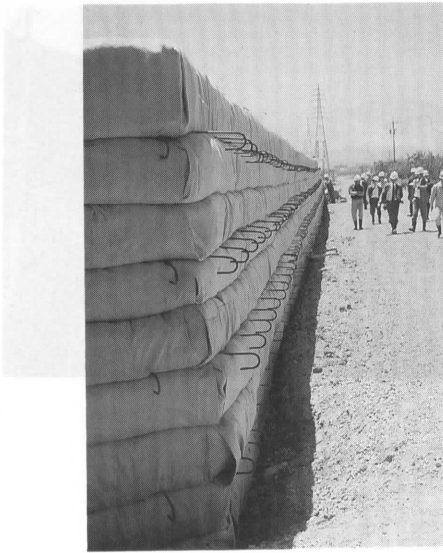


写真42

石積み擁壁 (住吉付近)

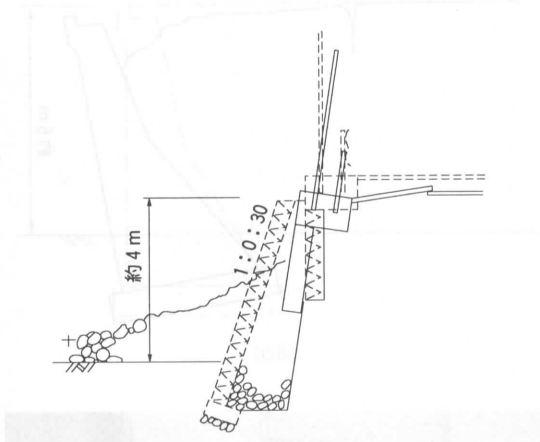


図24

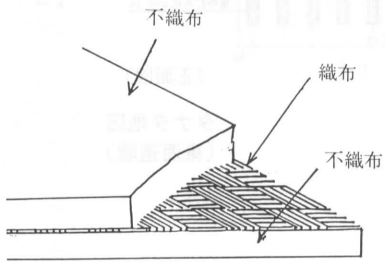


図22



写真43

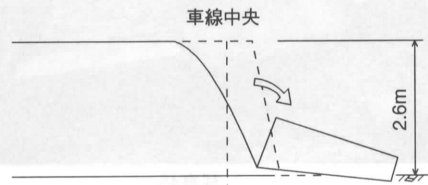


図25

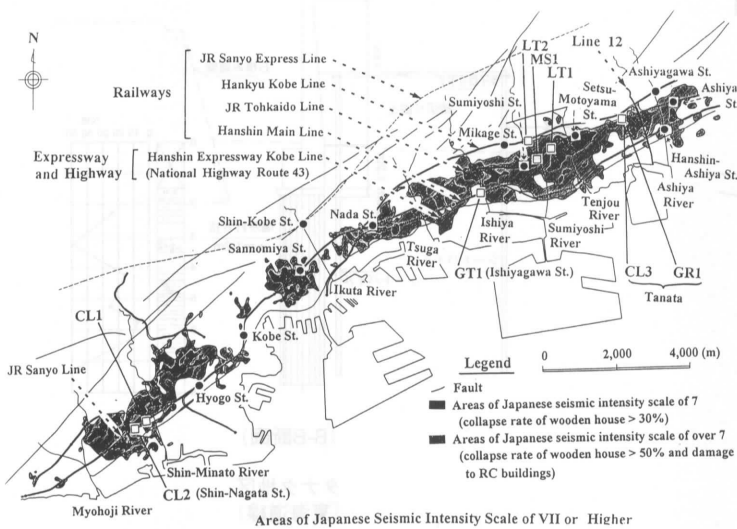


図23



写真44

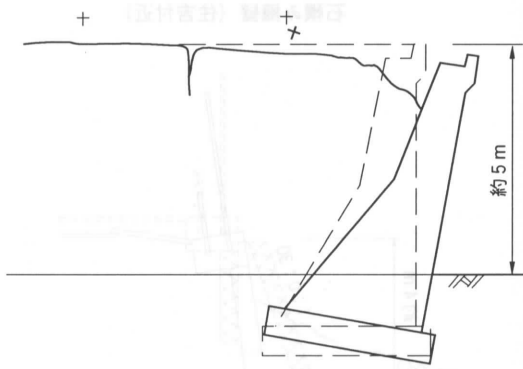


図26



写真46



写真45

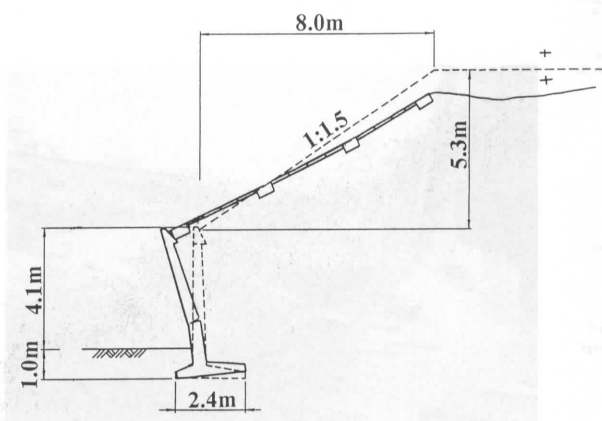
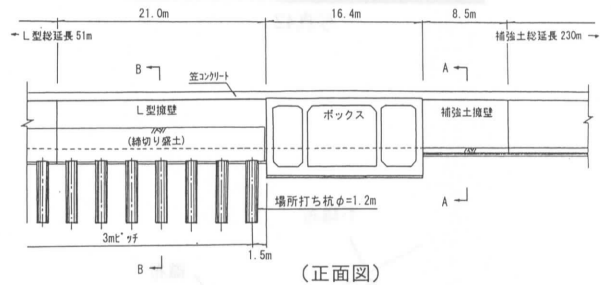


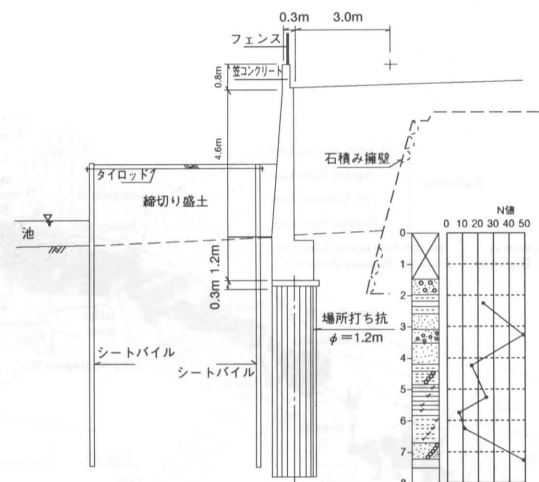
図27



(正面図)

タナタ地区
(東海道線)

図28



(B-B断面)

タナタ地区
(東海道線)

図29



写真47



写真48

されていたのです。普通の擁壁はどうなったかを申します。石積擁壁は、ばらばらになって壊れた例が多い(図24、写真43)。これは、石積みそのものが壊れやすいからです。土も弱いけど擁壁も弱いわけです。無筋コンクリートの重力式擁壁は、土圧をその重さで抵抗します。これも、相当壊れました(図25)。写真44の例では、完全に倒壊して、背中を上に見せています。通勤時間だったら大変でした。盛土を押えるところか、自分で転んでしまったわけです(なお、この現場は補強土擁壁で復旧された)。図26のようなしっかりした重力式擁壁も、倒れてしまいました。写真45は、阪神の石屋川駅のところです。無筋ですから継ぎ目のところで折れてしまった。これもやはり地震力により、自分で倒れてしまったようです。

近代的な鉄筋コンクリート製のL型の擁壁も被害を受けるものが多かった。一番はなほだしいのは、新長田駅の擁壁です(図27)。このL型擁壁は折れてしまい、上の盛土が大きく沈下しました(写真46)。

阪神大震災の被害地域には、全長2km以上ジオテキスタイルを用いた補強土擁壁が建設されていました。その中

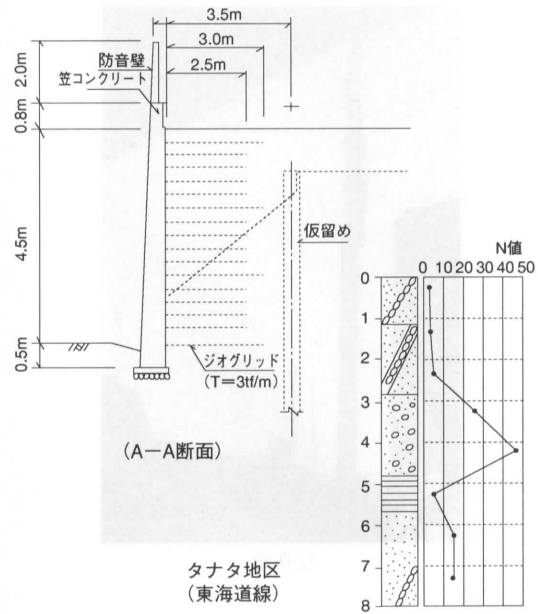


図30

で最も周辺の被害が著しかったのが、芦屋駅と摂津本山駅の間の東灘区森南町1町の通称タナタ地区の擁壁です(写真2)。この補強土擁壁があったJRの鉄道盛土の様子が写真47です。写真の右側に擁壁があります。貨車が脱線して、線路がぐにゃぐにゃになって大変地震動が大きかったことが分かります。

この現場は、2つの異なる型式の擁壁のちょうど大きな実物大振動実験をやったようなことになりました(こんなことを言ったらJR西日本に怒られます)。図28がこの現場を南から見たところです。この上を神戸線が走っています。中央にボックスカルバートと言うRCの構造物があり、盛土を横断しています。右側に補強土擁壁があって、左側に最新式の鉄筋コンクリートの擁壁があって、それが基礎で支えられていましたが、両方同じように少しだけ変形しました。従来型ではあるが最も近代的な鉄筋コンクリートの擁壁の断面が図29です。RCの壁面工だけでは土圧による滑動力と転倒モーメントに抵抗できないというので、大きな場所打ちの杭基礎を打っている。この大きな深い基礎で、擁壁が倒れるのに抵抗している構造です。この擁壁は、写真48に示すように少し前に出ました。写真の右側はRCのボックスです。

補強土擁壁の断面が図30です。基礎がありません。建設費は、上に述べた基礎で支持されたRC擁壁の約1/3であったと言うことで、これで安定性が同等であれば、合理的と言えるわけです。この補強土擁壁は、斜面の長さの余裕がなく列車を止めて工事することが元々出来なかったの、補強材の長さを上部で長くすることができなかつた。ほかの場所は、もっと伸ばしてあります(図14参照)。こ

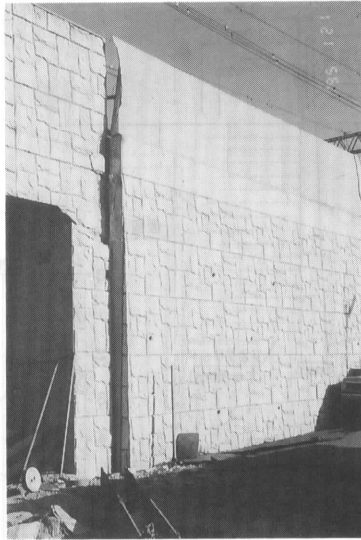


写真49



写真50



写真51

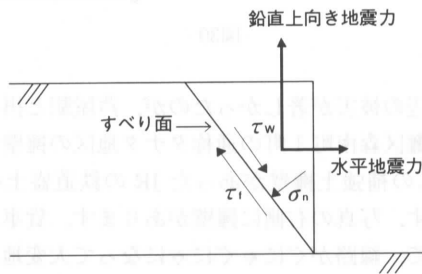


図31

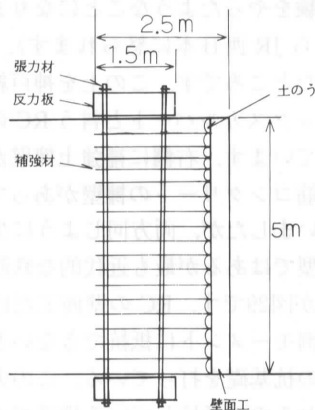


図32

れは擁壁が転倒しにくいようにするのに最も効果的だからです。しかし、この現場には地震がこないと思っていましたので、盛土の上部の補強材を長くしなかったのです。ところが、いちばんすごい地震が来てしましまして、胃に穴があくような状態になったのです。

写真49の左側がRCのボックス構造物で、右側が補強土擁壁です。擁壁の一番高い位置で最大26 cm 前に出ました。しかし、これで踏みとどまってくれたわけです。写真50は、

この補強土擁壁とその前の民家です。他にRC構造物がものすごい壊れ方をしていますから、この擁壁の被害は軽微と判断されました。JR西日本と阪神電鉄の何ヵ所かの壊れた擁壁の復旧を、補強土工法ですで行っています。

なぜ、補強土擁壁が地震に強いかということを考えてみます(図32)。いま、水平震度だけ考えますと、水平に横に振られますと、それによって滑り面に沿って滑らそうとする力(τ_w)が増えます。同時に滑り面に働く押さえる力(σ_n)も減るわけです。 σ_n が減ると、土のせん断抵抗 τ_t も減るのです。この二重のメカニズムにより、擁壁は壊れやすくなる。ところが、補強土擁壁の場合は、図6で説明したメカニズムで、補強材に働く引っ張りにより、 τ_w に直接抵抗し、かつ σ_n が減少するのを防ぐわけです。この2つのメカニズムで、結局補強した領域というのは一体構造物ようになってなかなか壊れなくなるわけです。

しかし、補強土擁壁であれば、何でも良い、というのはおかしいわけです。従来の擁壁構造、重力式とかL型RC擁壁と比較して、利点は何かということ常を考えなければならぬ。同時に、従来の非土構造物(RC構造物)と

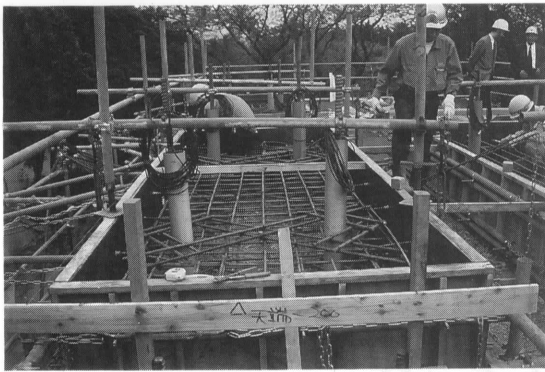


写真52

比較して、何が劣っているのかということを常に考えないと、一人よがりになってしまいます。

まず利点は何かといいますと、壁体構造が簡単で、杭基礎などの基礎構造が不要になり、大型建設機械も不要になり、工費が低くなり、工期が短くなることでしょ。

しかし、耐久性が従来工法の擁壁に比べて低ければ、後退で、進歩ではない。とくに、壁面と補強材の耐久性が必要です。剛な壁面工を使うことと、耐久性のある補強材の開発が重要なことです。これをしないと、安かろう悪かろうになります。

それから、安定性と剛性が従来工法の擁壁より低ければ、これは一種の後退です。安定性と剛性が劣ると、重要構造物とか大型構造物で使えなくなります。それから、電柱の基礎とか、遮音壁等の付属構造物、建築物の支持をする能力の点で後退してしまうわけです。これに対しては、良く締め固めたうえに剛な壁面工を用い、十分に剛性と強度が大きい補強材を使うことで解決できます。

また、美観で劣っているのは、これも一種の後退です。きたなければ、困ります。だから、壁面工の美しさもやっぱり大事です。緑化ができればさらによろしい。緑化の問題は今後の大きな課題ではないかと思えます。とにかく、美観的にすぐれた壁面をつくらないと、従来よりも進歩していることにならない。

さらに、盛土に用いることができる土質の制限が強くなれば、これも一種の後退です。補強土擁壁に用いるのは砂でなければだめだとか言われると、非常に困るわけです。とくに現場の他の工事で発生するのは関東ロームだとか、飽和度の高い細粒分の多い砂質土と粘性土が多い。こういう土を利用しなければ、建設コストの大幅減にならないわけです。そのためには、たとえば粘性土には引張剛性と排水機能のある不織布と織布の複合材を使うとか、細粒分の多い砂質土には面状のグリッドを使うとか、何か工夫が必要です。

では、従来の RC 構造物と比較して何が劣っているのか

というと、やはり土構造物は RC 構造物よりもやはり剛性が低い、信頼性が低いと考えられてきたわけで、いちばん典型的な例は橋台です。しかし、もし橋桁(けた)の荷重を土で直接受けることができれば、すなわち補強土で直接受けることができれば、杭を少なくする、あるいはなくすることができるし、非常に構造物が簡略化しやすくなる。また不等沈下の問題も少なくなります(図3, 4参照)。しかし補強土擁壁で橋桁を支持するためには、やはり RC 橋台と同等の高い剛性が必要である、ということになります。

それで、これに応えられる新しい工法を考えまして、この研究をいま千葉実験所で試験盛土を作って研究しています(図32)。盛土の下部と上に一对の RC のブロックがあり、その間を張力材で結合してあります。盛土の上の RC ブロック(反力板)の上に大きな荷重を載せる前に、張力材に引張力を入れてまず補強された盛土を締めつけてしまう。盛土は補強されていますので、締めつけても容易に破壊されません。このプレロードにより土を圧縮すると非常にかたくなり得ます。それと同時に、最後に張力材に引張力を残したプレストレスの状態にしておいてから、盛土の上の反力板に橋桁などの荷重を載せると、張力材に残っている引張力が荷重の一部を受け持ちまして、盛土に加わる荷重が減るのです。つまり引張材が圧縮力に対して抵抗するわけです。また、プレストレスの加わった状態では、土の剛性も高くなっているわけです。この3つのメカニズムによって、非常にかたい補強土擁壁ができるのではないかと期待をしています。

写真51はつくっている途中の試験盛土で、高さが5mあります。写真52は、盛土の上に反力の RC ブロックをつくっているところです。この研究にはかなり理論的・実験的な検討が必要なので、内村太郎さんに修士論文として研究してもらっているわけです。

補強土擁壁の現在における課題は、まとめると、普及化と高度化ということになると思います。最後に、「盛土を鉄筋コンクリート構造物なみに強くできるか?」という問いに対する答ですが、「それは無理だ。が、なんとか近くことはできる。コンクリートの助けを借りるけれども、土自身を強くすれば従来よりも土をもっと活用できる」ということが答だと思います。歴史的に見ますと、明治以来、最初は盛土であったが、だんだん RC(鉄筋コンクリート)構造物を用いて土を信頼しないことになってきた。現在、補強土工法があらわれてきて、盛土でも土自身を強くすればかなりやっているとやっていると、やや巻き返しを図っている状態と言えます。土というのは、どこにでも大量にありますから、これは建設コストの面から言うと、実際にはずいぶん大きなことなのです。

(1995年6月9日講演分)