

土質工学に関する測定

渡 辺 隆*

1. ま え が き

周知のとおり、土は弾性体でもなくまた液体でもない。さらに困る問題は、いかなる土であっても地表に存在する限りは、土木工学上で必ず対象としなければならないことである。土木構造物は一般には固体で作られ、その設計上の根拠は弾性体の力学である。また、水も土木工学上しばしば取り扱わねばならない対象であるが、水理学等がその根拠を提供している。一方、土は液体にも弾性体にも属さず、現在は土質力学とか土質工学と呼ばれる学問によって設計の根拠を与えられているが、土の性質の複雑さのために、まだ弾性体や流体のように体系が完全に近いものとはいい難いのである。

それゆえ、土の測定では、たとえば鋼等のようにひずみを測定すれば応力がわかるというような便利さはない。種々の要素を独立した形で測って、それらの要素の間の関係等を見出すように利用したり、設計計算の不備を測定によって補なうように利用したりしている。

測定を行なう場合に一般的注意としては、目的をはっきりさせてこれを測るのに最も単純な計器を用いるよう努力することであろう。最近では電子工学、その他の発達にもなつて、種々の複雑な計器類も開発されてきた。それゆえ、過去には測定できなかつた量も測定可能になってきて誠に喜ばしいことではあるが、一面簡単に測定できるものにも必要以上に複雑な測定機構を使うと、時間や労力の大きな損失を受けているの気が付かぬこともある。これは測定を最も合理的に行なうための注意であるから便利な新しい機器で能率よく測定できるものは、もちろん大いに活用すべきことはいうまでもない。さらに注意すべき点として、測定を行なうために被測定物に対する影響がなるべく無いことである。

土の測定では、土を判別したり、土の状態たとえば単位重量、含水量、間げき比等を求めるための測定もあり、一方設計に関連する力学的測定も行なわれる。これは土が土粒子の集合であるから、たとえ同じ土でも状態によ

* 正会員 工博 東京工業大学教授 土木工学科

り力学的性質も変わるので、力学的性質を測定する場合にも、必ず土の状態のデータを必要とするためである。それゆえ土に関する測定といえば、一般の土質試験までも含める必要があるであろうが、ここでは主として最近の土圧等の測定に関する動きを伝えることにしようとする。

2. 土 圧 の 測 定

(1) 概 説

土に接する構造物を建設する場合に、構造物を設計するためにはそれが受ける荷重条件を決めなければならない。この荷重条件を与えるものが、いわゆる土圧論等の土質工学的な知識である。ところで現在の土圧論等は、土の破壊時の状態について考慮しており、現実の構造物では土の破壊が生じないときに働く土圧等を知りたいのである。そこで土圧論等を検討したり、あるいはその不備を補なって現実の設計条件を求めるために、土圧の測定は土質工学上しばしば行なわれている。

土圧測定は大別して二つの方法が考えられる。一つは土を支持する構造物等のひずみを測定し、間接的に土圧の大きさを求める方法である。この方法は、比較的ひずみの大きな構造物の場合に測定が容易である。Tschebotarioff¹⁾等が行なつた方法はシート・パイル岸壁について、傾斜計を利用して行なつたが、間接的測定方法の成功例の一つであろう。また土留め矢板等の支保工の応力を測定して、間接的に土圧を求めることも広く行なわれている。弾性体の変形を測定するものであるから、測定自体は通常の鋼構造物等における測定と変わらない。

他の一つは、土中の応力を直接測定する方法である。構造物のひずみが小さいときは、直接土圧を測定する方が精度が良いし、また土中の応力を問題にするときには直接的方法を利用せざるを得ない。ここでは主として土圧を直接測定する方法について述べる。

土圧計には、構造物等に働く土圧を求めるために境界面に設置するもの（境界面型）と、土中応力を測定するため埋込むもの（埋設型）とがある。境界面型の方が背面に寸法等の制限が少ないから制作が容易であるが、本質的には余り差はない。土圧計は土の圧力を受ける受圧部と、この圧力を何かの測定可能な量に変え、しかもこの測定量と土圧とが直線的比例関係にあるように測定する測定部とからなっている。土圧計について一般的に述べられた報告²⁾もあるので、これらを参考にすれば測定部の機構も理解頂けると思う。

受圧部は土圧測定においては最も大切な部分であり、これにはピストンのように動くピストン型と受圧板自体が弾性変形するダイヤフラム型の2種類がある。ピスト

ン型のもでは縁部の摩擦を除くことができず、また製作の容易さからいってもダイヤフラム型のものが良いので、最近はこの形式のものが多い。受圧板が土圧により変位してから、もとの位置までついに背面に圧力を加えてもどすゴールド・ペック型もあるが、これも移動をくり返してその位置にもどるので好ましい方法とはいえないであろう。

受圧板としていかなる特性を持ったものが、正確な土圧測定に必要であるかを、組織的に研究始めたのは W. E.S.³⁾ であろう。しかし最近、このときに見出された条件では不十分であるといわれている。

以前は液圧による土圧計の較正によって正しい値が得られるものが良いとされたが、液圧のみの較正では不十分なことが判明している。最近の土圧計の較正は液圧と土中での圧力の両方が行なわれている。最近の研究⁴⁾では、つぎのようなことが判明している。

ダイヤフラム型の受圧板で土圧を正確に測るためには、受圧板中央点の変位 d と圧力 p の関係が重要であり、単位圧力当りの変位の変化が、

$$d/dp < 1 \times 10^{-5} \text{ in/lb/in}^2 \quad (3.6 \times 10^{-4} \text{ cm/kg/cm}^2)$$

であることが良く、できればこの値を $0.3 \sim 0.5 \times 10^{-5}$ in/lb/in² 程度まで小さいものが良いという。また、土中での較正に周面摩擦の影響を少なくする装置も開発⁴⁾されている。この種の較正の際にも、受圧部の変形によって土中にアーチ作用ができて誤差が出るが、このアーチ作用の影響を受けるのは受圧面から約 60° の円すい状の部分であるといひ、較正には少なくとも直径の $\sqrt{3}/2$ 倍(直径の約 90%) 以上土かぶりが必要にならないという。

土圧計としては、圧力と読みとの間に直線性が欲しいので、このために受圧板中央点の変位が直径の 1/2000 以下であることが望ましい。しかしこの直線性は、液圧と土圧との較正直線の勾配が一致することを意味するものではなく、土圧の方が小さいことが多い。

土圧計に働く土圧は 3 種類に分けて考えるべきであり、それらは ① 最初の载荷、② 除荷、③ くり返し载荷である。たとえば、① で正確な測定値を示した計器でも、② でも正確とはいえず、③ ではさらに複雑である。また土の種類によっても応答が違ふ。以下に受圧板の特性と、測定部の機構について今少し詳細に述べる。

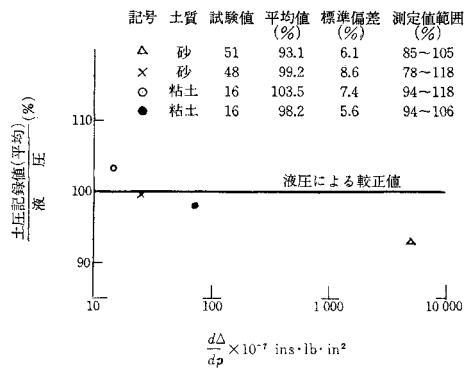
(2) 受圧板の特性

前述したとおり受圧板の変形による土のアーチ作用は土圧を過小に測定させる原因と考えられているが、土圧はまた土の密度のばらつきによっても大きく変動し土の種類によっても誤差は変わる。それゆえ土圧誤差が受圧板の変形特性によるものか、それ以外の原因によるかを調べぬと、合理的な受圧板特性を求められない。砂中で

の較正で、十分注意して一様に詰めても密度のばらつきを生じ、±15% 程度の誤差は生ずる⁴⁾という。それゆえこの種の研究では何回も土を詰め変えて較正しなければならない。

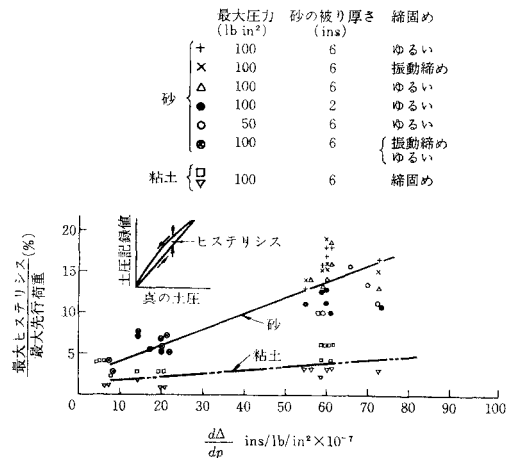
受圧板の変形特性には二つの点を考えなければならない。一つは、土中での較正值が直線性を持つように十分小さい変形でなければならない。しかし、この直線性は液圧と土圧が一致した値を示すことは意味せず、一般に土圧が低い。等しい液圧と土圧を一致した値として測定するためにはさらに剛性の大きな受圧板である必要がある。液圧との差を 2% 以下にするには前述した $d/dp < 81 \times 10^{-5}$ in/lb/in² 以下という値が出てくる。図—1 に Trollope⁴⁾ 等の実験結果を示している。この種の誤差は粘土よりも砂の方が大きい。

図—1 最初の载荷における土圧記録値と液圧記録値の受圧板の変形率による変化 (Trollope による)



以上は最初の载荷のときに示される土圧測定値に関するものであるが、除荷の場合には受圧板が逆に土中にもどるように動くから、土圧値も変わってくる。除荷の際には、液圧の 150% 程度にも大きく出ることがある。この誤差は受圧板の剛性と土の硬さに関係し、受圧板が剛

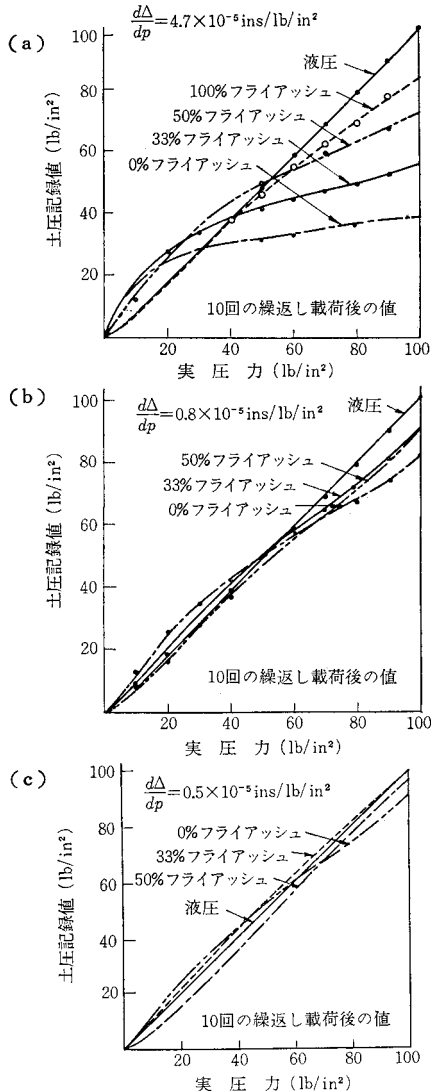
図—2 除荷時の土圧計の示すヒステリシスと受圧板変形率による変化 (Trollope による)



で土が軟いほど誤差は少ない。受圧板の剛性と载荷、除荷時のヒステリシスの関係⁴⁾は図-2のようである。

くり返し载荷では受圧板の付近の土が締まるので、さらに誤差は大きくなる。この傾向は集中粒径の砂で最も大きい。砂とフライアッシュの混合物についての結果⁴⁾は、10回のくり返し後で図-3(a), (b), (c)のように大きな差があり、受圧板の剛性が大きくなれば非常に小さい。

図-3 砂とフライアッシュ混合物におけるくり返し载荷と土圧記録値の関係の受圧板の変形率による相違 (Trollope) による



(3) 圧力測定部の機構

微小な変形を正確に測定する機構であり、ストレインゲージ型、インダクション型、振動弦型、マノメーター型、空気圧型、磁歪型等種々の方法が試みられている。

受圧板の剛性を大きくする必要があるため、微小変位を正確に測定し、しかも安定性の良い必要がある。

ストレインゲージ型については余り詳細には述べないが、最近では非常に感度の良いゲージも開発されている。欠点としては安定性にあると思われ、湿気等の影響も、受け易いのである。

インダクション型については、差動トランスのように微小変位をインダクタンスの変化として電氣的に計測するものもある。磁歪型も変形が非常に少なく、しかもインダクタンスの変化を利用するものであるが、鉄の単結晶がねじり等のひずみにより変化することを利用して

いる。振動弦型のは、弦の自由振動数が張力によって変わることを利用している。あらかじめある張力で引張られて受圧板に固定されたピアノ線を、電磁石等に交流を流して振動させる。振幅を電磁石等で測定し、交流の周波数を変えて共振振動数を求めるのである。多少計器の背面寸法が長くなるので、境界面型のものに利用されている。

マノメーター型は、受圧板の背面に水等を満たし、これを毛細管のマノメーターに継いで測定⁵⁾する。温度補正のためダミーのセットを必要とする。

空気圧型は、ゴールドベック型のようにバランスするように圧を加えるものもある。最近空気を送るパイプの中にオリフィスを設け、変形する受圧面のごく近くに開口させ、噴き出し口の間隔が土圧により変化すると、パイプ中のオリフィス前後で圧力差が生ずることを利用して測定⁶⁾するものもある。この方法だと、受圧板変位を直径の1/10000にすることができるというが、境界面型にのみ応用可能である。

以上のように、各種の方法が応用されているが、微小な変位の測定であるので、いずれの場合も温度補正等を十分考慮する必要がある。

(4) 三次元土圧の測定

土中の応力状態を正確に決める目的では、一方向の応力のみを測定したのでは十分でない。たとえば二次元応力であれば σ_x , σ_y , τ_{xy} の三つの量を独立に測定しなければならない。ところで、土圧計はほとんどが受圧面に対し垂直な応力の測定を行なう。鋼等でストレインゲージを利用して伸び縮みを測り、二次元応力を測定するためにはロゼットゲージによって三方向の伸び(縮み)を測定する必要があると同様なことになる。三次元応力では独立に測定すべき量は、 σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} の6つになり、6つの独立な応力測定を必要とする。土圧の場合に三次元的な応力状態を知る目的で、14面体のそれぞれ方向の違う7つの面に土圧計をつけた7面土

計も開発⁷⁾された。7つの方向の垂直応力が知れば、独立な量は6つであるし、測定面の方向をうまく選べば解析も簡単化できる。

3. 間げき水圧の測定

最近の進んだ解析方法を応用してその適否を論じたり、これにより計算の精度を向上させようとする、土圧のみでなく間げき水圧の測定も行なう必要がある。間げき水圧の測定は過去にもいろいろ試みられたが、余り成功していなかった。

現場で間げき水圧を測定する最も簡単なものは、下部にストレナを持つスタンドパイプ中の水位の観測である。この方法は、間げき水圧の変動によりパイプ中に水が出入しなければならぬから、時間的遅れ⁹⁾があり、特に透水性の悪い地盤では使いものにならない。水の出入を少なくするため、マノメーターを利用する方法を使うと、マノメーターの水位差に等しい容積のみの出入となり、スタンドパイプにくらべればはるかに改良される。アメリカ合衆国開拓局でアースダム²⁾の測定に応用⁹⁾され、わが国でも利用¹⁰⁾されている。また土圧計の受圧板前面にポーラスストーン等をつければ、水の出入の非常に少ない間げき水圧計ができる。

室内実験では実に精密な測定を行ないたいので、水の出入はほとんど無くしたい。このために測定部から金属パイプ等の圧力差による容積変化の少ない材料を使って、目盛のある毛細管に継ぎ、目盛まで水を満たして間げき水圧の変化による目盛部の水の動きを空気圧を加減して止めるようにして、空気圧を測定する方法も行なわれている。これはゼロ点法 (null balancing method) と呼ばれるが、つりあいまでに多少の水の動きは生ずる。

Terzaghiの圧密理論の示すように、荷重増加 $\Delta\sigma$ を支えた瞬間に間げき水圧増加 Δu は、 $\Delta\sigma = \Delta u$ と考えられている。しかし、測定値は一般に $\Delta\sigma > \Delta u$ となることが多い。すなわち、理論を完全に確かめることはできなかったのである。圧密理論の検討に関連して、MITで間げき水圧測定に関する一連の研究が行なわれていた。最近の報告¹¹⁾によると、非常に良い結果が得られているので以下にこれに関して述べよう。

間げき水圧の測定誤差は、土が完全に飽和し、圧密試験機に周面摩擦がないものとするときぎの二つの理由による。一つは測定機構の変形が過大で、全体としての間げき水の圧縮率を変え、このため粒子間応力と間げき水圧の割合を変えることである。またこれは測定機構の応答に時間的遅れを生じ、間げき水圧の時間的変化に追従しない。他の一つは粒子の骨格中の、粒子間のボンド、構造粘性等により、粒子の骨組みの圧縮性が水のそれに近づく

ため、与えられた荷重の一部が始めから粒子の骨組によってある程度受持たれる。前者は測定機構によるものであり、後者は圧密理論で示されない土の性質によるものである。測定機構による原因を除くには、間げき水圧計の圧縮性が水の圧縮性に等しくなると良い。MITではunbonded型のストレナゲージを使って微小変位を測定し、受圧板の容積変化率が $4 \times 10^{-7} \text{ in}^3/\text{lb}/\text{in}^2$ で、これに取付けたモルタルプラグとこれを満たす水によって測定系全体として $5 \times 10^{-7} \text{ in}^3/\text{lb}/\text{in}^2$ という計器を作った。この圧縮性は飽和土のそれに近く、これを使って圧密試験機の底部で測定したところ、測定値と与えた荷重の比が完全に100%となり、ピークの荷重に対する測定値ピークの遅れが0.25秒以下ということである。

Whitman等は間げき水圧計の特性を電気アナログで解析しているが、これを解析的行なったものも報告¹²⁾されている。

試料中の間げき水圧測定に配線を無くすため、無電による観測も試み¹³⁾られている。

4. その他の測定

地盤の三水元的変形の観測に関連して、地盤の水平変位の測定も行なわれるようになった。地盤中にフレキシブルなパイプを立て、水中変位によるパイプの曲りを傾斜計により観測することが行なわれている。傾斜計にも移動型と埋込型が開発¹⁴⁾されている。

ベーン試験も現場測定でしばしば利用されるが、急速、圧密急速、緩速試験を行ったり、水平方向と垂直方向の粘着力を分けて測定するため、ベーンの形を変えた試験も試み¹⁵⁾られている。またベーン試験で得られる結果の意味を研究するため、三軸試験機中でベーン試験を行なう研究も試み¹⁶⁾られている。

5. 結 語

現在の土質力学では不明な多くの問題をかかえており、過去の理論を検討したり、あるいは最近の解析方法の妥当性を検討するには、正確な測定の重要性が非常に増しているのである。土圧や間げき水圧等の基礎的問題に関してかなり満足すべき計器類が作られるようになってきたが、わが国ではまだ十分でないように思われるのは非常に残念である。本講座ではページ数にも制限があり、十分に現在の動向を伝えることができなかったが、何かの参考になれば幸甚である。

参 考 文 献

- 1) Tschebotarioff, G P. & Ward, E.R.: "Measurements with Wiegmann Inclinator on Five Sheet Pile Bulkhead," Proc. 4th. Int. Conf. S.M.F.E. 1957,

- 2) 例えば 針生幸治：“土圧計について”，土と基礎 Vol. 1, No. 3, 昭和 28 年
- 3) “Soil Pressure Cell Investigation,” Interim Report, U.S. Waterway Experiment Station, Vicksburg (1944)
- 4) Trollope, D.H., Lee I.K.：“The Measurement of Soil Pressures,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1961, No. 5/19, pp. 493~499
- 5) Rowe, P.W., Briggs, A.：“Measurements on Model Strutted Sheet Pile Excavations,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1961, No. 5/16, pp. 473~478
- 6) Wikramaratna, P.H.D.S.：“A New Earth Pressure Cell,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1961, No. 5/21, pp.509~512
- 7) Ichihara, M., Takagi, S.：“Development of a Seven-Face Earth Pressure Gauge,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1961, No. 5/10, pp. 435~438
- 8) “Time Lag and Soil Permeability in Ground Water Observations,” W.E.S. Bulletin No. 36, April, 1951
- 9) 例えば Tschebotarioff：“Soil Mechanics, Foundation, and Earth Structures,” Mc Graw-Hill, 1953, p. 563
- 10) 例えば 佐藤・最上・渡辺：“尼ヶ崎港開門仮締切内排水工事に於ける法面安定問題について”，土と基礎, Vol. 1, No. 2, 1953 年 7 月, pp. 4~9
- 11) Whitman, Richardson, Healy：“Time-Lags in Pore Pressure Measurements,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1961, No. 1/69, Vol. 1, pp. 407~411
- 12) Perloff, Nair, Smith, “Effect of Measuring System on Pore Water Pressures in the Consolidation Test,” Proc. 6th. Int. Conf. S.M.F.E. 1965, No. 2/43, pp. 338~341
- 13) Leussink, Prange：“Telemetric Measurement of Pore Pressure in Soil Samples,” Proc. 6th. Int. Conf. S.M.F.E. 1965, No. 2/33, pp. 291~292
- 14) Kallstenius, Bergan：“In Situ Determination of Horizontal Ground Movements,” Proc. 5th. Int. Conf. S.M.F.E. 1965, No. 2/10, pp. 481~485
- 15) Aas G.：“A Study of the Effect of Vane Shape and Rate of Strain on the Measured Value of In-Situ Shear Strength of Clay,” Proc. 6th. Int. Conf. S.M.F.E. 1965, No. 2/1, pp. 141~145
- 16) Kenney, Landva：“Vane-Triaxial Apparatus,” Proc. 6th. Int. Conf. S.M.F.E. 1965, No. 2/28, pp. 269~272

新しい土留工法

日本道路公団理事 工学博士 藤森謙一・日本道路公団理事 内田襄編著・B 5 判 / 440 頁 上製 定価 3,400 円 千 200 円

- 現場ですぐ役立つ土留工法の設計と施工
- 従来公開されなかった新しい土留工法の紹介
- 初めて体系づけられた土留工法の技術書

■ 主要目次

<p>第1章 概 説</p> <p>第2章 土圧の計算法</p> <p>第2節 クーロン土圧公式</p> <p>第3節 ランキン土圧公式</p> <p>第4節 粘着力を考慮した土圧公式</p> <p>第5節 静止土圧</p> <p>第6節 地震時土圧</p> <p>第7節 土圧作用点の高さ</p> <p>第8節 山留工に作用する土圧</p> <p>第9節 斜面の安定計算</p> <p>第10節 ヒービング</p> <p>第3章 基礎のための土留</p> <p>第1節 自立式土留</p> <p>3.1.1 自立式土留の型式</p> <p>3.1.2 安 定</p> <p>3.1.3 のり面の表面処理</p> <p>3.1.4 すべり</p> <p>第2節 支保工式山留</p> <p>3.2.2 山留工法のための地盤性状知識</p> <p>3.2.3 切梁山留の基本</p> <p>3.2.4 矢板の工法</p> <p>3.2.5 腹直し</p> <p>3.2.6 切 梁</p> <p>3.2.7 掘 削</p> <p>3.2.8 土圧の算定</p>	<p>第3節 アイランド土留</p> <p>3.3.2 施工計画</p> <p>3.3.3 施工例</p> <p>第4節 トレンチ工法</p> <p>3.4.2 トレンチ工法の特徴</p> <p>3.4.3 トレンチの形状</p> <p>3.4.4 施工例</p> <p>第5節 特殊な土留工法</p> <p>3.5.1 イコス工法</p> <p>3.5.2 OWS工法</p> <p>3.5.3 エルゼ工法</p> <p>3.5.4 アース・ウォール工法</p> <p>3.5.5 フレバクト工法</p> <p>3.5.6 フレウォール工法</p> <p>3.5.7 大林深礎工法</p> <p>3.5.8 竹中式深礎工法</p> <p>3.5.9 R Gパイル工法</p> <p>3.5.10 カルウェルド・アースド リル式土留</p> <p>3.5.11 ベントウ工法および清 水くい工法による土留工法</p> <p>3.5.12 コルグートセルによる土留 工法</p> <p>3.5.13 折衷土留工法</p> <p>3.5.14 液体塗壁による地盤凍結</p>	<p>工 法</p> <p>3.5.15 その他の外国の土留工法</p> <p>第4章 擁 壁</p> <p>第1節 重力式擁壁（設計計算例）</p> <p>第2節 倒立 T 型擁壁</p> <p>第3節 控え壁式擁壁（設計計算例）</p> <p>第4節 矢板擁壁</p> <p>第5節 特殊な擁壁</p> <p>4.6.1 たな段をつけた擁壁</p> <p>4.6.2 箱型擁壁</p> <p>4.6.3 H型鋼を用いたくい式擁壁</p> <p>第6節 ピン型擁壁</p> <p>4.7.1 コンクリート・クリッピン コ擁壁</p> <p>第5章 石積およびブロック積</p> <p>第1節 石積およびブロック積</p> <p>第2節 石積の加工</p> <p>第3節 石積の方法</p> <p>第4節 ブロック積の方法</p> <p>第5節 石積およびブロック積の基礎</p> <p>第6節 土留石積およびブロック積</p> <p>第5章 斜面のための土留</p> <p>第1節 のり面防護のみを用いた場 合</p> <p>6.1.1 モルタル吹付</p>	<p>(1) モルタル吹付</p> <p>(2) のり面保護のためのシュ ットクリート工法</p> <p>6.1.2 アスファルトのり面防護法</p> <p>6.1.3 プラスチック・ソイルセメ ント吹付</p> <p>6.1.4 播種工</p> <p>(1) 種子吹付工法に併用する格 子枠ブロック工</p> <p>(2) 新日式（東興式）急速緑化 たな吹付工</p> <p>(3) 播種工（流亡防止のための センイの使用）</p> <p>6.1.5 ヒニールシートによるのり 面防護・山留</p> <p>第2節 のり面防護工とウェルポ イント</p> <p>6.2.2 地下水事前低下工法の機構</p> <p>6.2.3 公 式 基本</p> <p>6.2.4 地下水事前低下工法の設計 および施工管理</p> <p>6.2.5 ウェルポイント工法の設計 施工例</p> <p>第3節 箱枠工法による土留施工</p>
--	---	---	--

新しい仮設工事の設計と施工 八島忠編著

B 5 判 530 頁上製 定価 3,600 円 千 150 円

近代図書株式会社

東京都千代田区九段 1 丁目 22 番
電 (263) 3871・3872 (261) 5818・5819 振替 東京 23801 番