

組積造擁壁の構造力学的な形

Structural Form of Masonry Retaining Wall

中村勇吾* 篠原修**

by Yugo NAKAMURA and Osamu SINOHARA

*東京大学修士1年 工学部土木工学科

**東京大学教授 工学部土木工学科 工博

(〒113 文京区本郷7-3-1)

Aesthetics of a retaining wall consists of not its surficial appearance but its form. This thesis attempts to find a new methodology of designing a masonry retaining wall from a structural viewpoint. Form of a masonry retaining wall is an expression, which emerges as a result of structural relationship between shapes of elements, profile of the wall, and landform where the wall is placed.

Key Words: retaining wall, masonry construction, structural form

1. はじめに

(1)背景

自然の中で自らの場所を確保するため、人間は土地の形を変えてきた。土を盛り、あるいは切り開いて平場をつくり、それを支えるために擁壁をつくる。新たにつくり出された地形の中での不連続面として、擁壁は周囲の景観に対し大きな影響力を持っている。ある時にはそれは、レベル差を活かした、豊かな、意味に満ちた空間を演出するものとなるが、ともすれば周囲を威圧する無表情な壁となる。

日本人は伝統的に豊かな壁をつくってきた。山の斜面に造られた段状の石垣集落や石垣農地、防衛手段としての城郭の石垣など、これらの擁壁はその実用性、強度を満たす合理的な形であると同時に、ゆったりとした安定感を我々に感じさせる美しい形をしている。起伏の多い日本の地形の中で、これらの擁壁のたたずまいは豊かな空間を形成する重要な要素となってきた。しかしこれらは土木技術の近代化以後、標準断面を用いた無骨なコンクリート擁壁にとってかわられ、その結果、都市や田園は至る所で威圧的で無表情な壁に囲まれることになった。

最近の景観に対する認識の高まりの中で、擁壁についても様々なデザインの配慮が試みられるようになった。が、しかし、それらの殆どは、化粧型枠などを用いてただ表面を飾り立てるだけの修景デザインの域に留まっているのが現状である。擁壁のデザインにおいて最も重要なのは、ただ表面を飾ることではなく、その「かたち」について考えることである。そのかたちとは、いたづらな造形感覚のみによるものではなく、背後の土の重みを支える合理的な構造を持ち、その安定感が我々にも伝わるような形態を持っていることが基本となる。そしてさらに、擁壁のかたちをデザインするということは、必然的に土地のかたちを造形することにつながり、従って、擁壁本体のみならず、それを含む土地全体を視野に入れたデザインを考えていく必要がある。

このような観点から、土地によって多様に異なる諸条件に対応した擁壁のかたち、というものを考えていくことによって、画一的なものではなく、その土地ごとに固有な場所性をもった、豊かな擁壁のかたち、あるいは土地のかたちを創造していくことが出来るのではないと思われる。

(2)研究対象および目的

・以上のような背景のもとに、本論文は、構造的合理性を持った「かたち」のデザインとしての擁壁のデザイン手法論を提示し、さらに擁壁のかたちと、それをとりまく様々な土地の条件との対応関係を明らかにすることを第一の目的とする。

・本論文では具体的な研究対象として、石積、ブロック積などの組積造の擁壁を選択した。日本では城郭の石垣をはじめとして、美しい石積擁壁を造ってきた歴史があり、それらを構造的な観点から見つめ直す事によって新たな擁壁デザインの方法論を導き出すことを意図しているからである。施工数が最も多いことも理由として挙げられる。

また、議論の簡略化のため、対象とする組積造擁壁は、空積みに限定する。

・上記の研究対象・目的を踏まえて、以下の事柄を具体的な目的として設定する。

- ① 組積造擁壁について、その全体の形態と、その構成要素(石・ブロック)との力学的対応関係を明らかにする。
- ② 要素と全体の対応関係に基づいた、合理的なかたちとしての組積造擁壁のデザイン手法論を提示する。
- ③ さらに、種々の土圧条件との力学的対応関係に基づいて、擁壁と、それを含む土地の造形についてのデザイン手法論を提示する。

- ④ 以上で得られた知見を総合した、組積造擁壁のデザイン手法について考察を加える。

2. 組積造擁壁の構造式～要素と全体の関係

(1) 組積造擁壁の構造的特徴

組積造擁壁は、それが一体の構造物ではなく、各ブロック（石）の集合で構成される「集合体の擁壁」である、という点で、重力式や片持ち梁式などの「剛体の擁壁」とは大きく異なる。従ってその挙動も、剛体の擁壁のように、全体としての転倒あるいは滑り出しをするものではなく、その破壊は主として、あるブロックの噛み合わせ部分におけるブロックの回転あるいは滑り出しによって生じる。いわゆる「はらみ」という現象である。

従ってその構造式も、従来の、擁壁断面を一体として考える簡略化されたものではなく、各ブロックそれぞれの噛み合わせ部分における安定条件を与える式でなければならない。そのような特性を踏まえた式として、岡積の「示力線方程式」¹⁾が挙げられるが、本論文ではこの式の考え方を踏まえた上で、より様々な形のバリエーションに対応するような構造式を提示した。

(2) 各ブロック同士の力学的関係

この構造式では、N個のブロックからなる擁壁断面をモデルとして考える。各ブロックに、擁壁上部から順に1,2,3...Nと番号をつけ、それぞれが固有の寸法（面高 a_n 、控え長 b_n ）と、固有の傾き（傾斜角 θ_n ）をそれぞれ持つものとする（図1）。

n番のブロック（以後、「ブロックn」と呼ぶ）に着目し、これに加わる力とその作用点・作用線を整理すると図2のようになる。

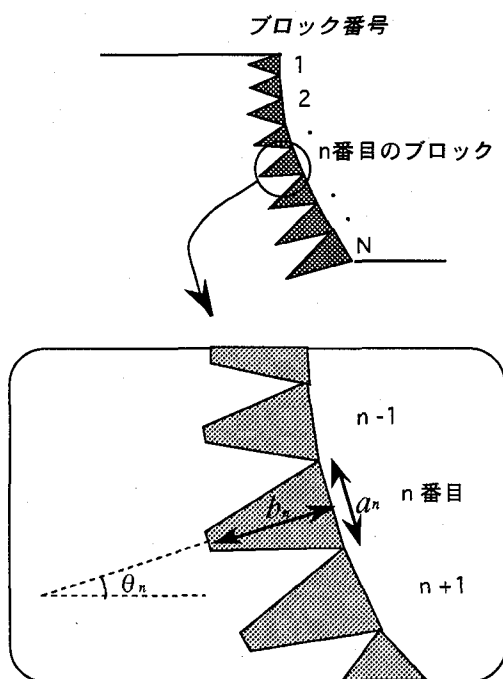


図1 各ブロックのパラメータ

ここでは理論の簡略化のため W_n, V_{n-1} の作用線は簡易的にブロックnの中心線上にあるものとし、また Q_n はブロック前面に作用するものとしている。

ブロック合端には滑動が起こらないものと仮定すると、ブロックnの転倒に対する安定の条件は、ブロックnの下端を支点とした五つの力（ H_{n-1} 、 V_{n-1} 、 Q_n 、 W_n 、 $W_n \cdot k_h$ ）の作るモーメントの総和がブロックの転倒方向（図2では時計回り方向）に向かないことである。つまり、

$$M_{n+} \geq M_{n-}$$

$$\left(\begin{aligned} M_{n+} &= V_{n-1} \left(a_n \sin \theta_n + \frac{1}{2} b_n \cos \theta_n \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} W_n (a_n \sin \theta_n + b_n \cos \theta_n) \\ M_{n-} &= H_{n-1} \cdot a_n \cos \theta_n + \frac{1}{2} Q_n \cdot a_n \cos \delta \\ &\quad + \frac{1}{2} W_n \cdot K_h \cdot (a_n \cos \theta_n - b_n \sin \theta_n) \end{aligned} \right)$$

・・・式(1)

であり、さらに M_{n+} と M_{n-} の比をブロックnの転倒に対する安全率 F_n として、以下のように定義する。

$$F_n = \frac{M_{n+}}{M_{n-}}$$

・・・式(2)

F_n が1以上であることがブロックnが転倒しないための最低限の条件である。

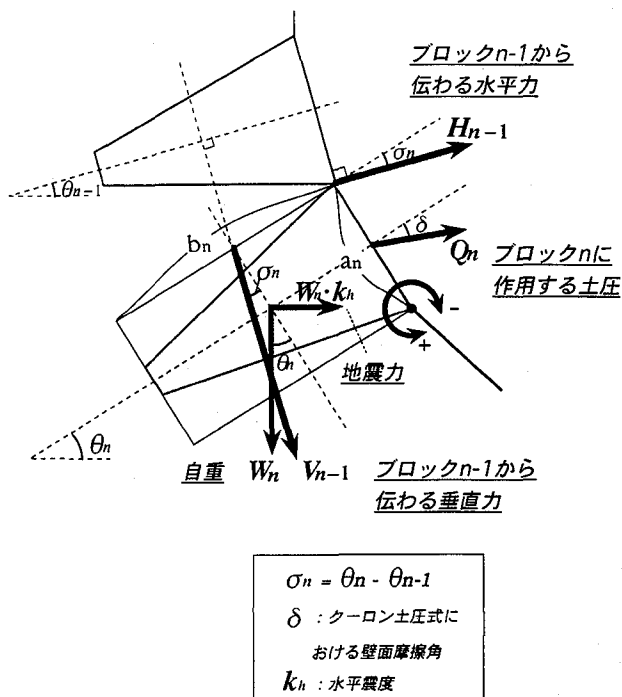


図2 ブロックに作用する力

(3) 構造式の適用

$$H_n = H_{n-1} \cdot \cos \sigma_n + Q_n \cdot \cos \delta - V_{n-1} \cdot \sin \sigma_n - W_n \cdot \sin \theta_n + W_n \cdot K_h \cdot \cos \theta_n$$

・ ・ ・ ・ 式(3)

式(3)によって V_n 、 H_n は級数的に定まる。

以上、式(1),(2),(3)が各ブロック同士の力学的関係を規定する基本式である。



$$K_{An} = \frac{\sin^2(\theta_n + \phi)}{\sin^2 \theta_n \cdot \sin(\theta_n - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta_n - \delta) \cdot \sin(\theta_n + \beta)}} \right]^2} \quad \cdots \text{式(4)}$$

$$W_n = \gamma_c \cdot a_n \cdot b_n \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式}(5)$$

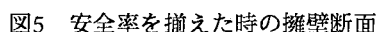
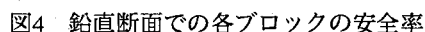
Q_n : ブロック n 単体に作用する土圧 (tf/m)
 Z_{n1} : ブロック n 上端の z 座標
 Z_{n2} : ブロック n 下端の z 座標
 γ_s : 背面土の単体重量 (tf/m³)
 K_{An} : クーロンの主働土圧係数
 θ_n : ブロック n の傾斜角
 ϕ : 背面土の内部摩擦角
 δ : ブロック背面と背面土の壁面摩擦角
 β : 地表面が水平面となす角
 W_n : ブロック n の自重 (tf/m)
 γ_c : ブロック材・石材の単位重量 (tf/m³)

次にこれらの基本式を用いて、図3のようなX乙座標系の中で各ブロックの安全率と擁壁全体の安全率を対応づけてゆき、その対応関係からより合理的な断面形を導き出してゆく方法を提示する。

Q_n 、 W_n は式(4)(5)によって求められるので、これらを式(3)に代入してゆくことにより、 $n=1、2、3 \cdots$ の順に V_n 、 H_n の値が級数的に求められてゆく。結果、全ての Q_n 、 W_n 、 V_n 、 H_n が求まり、これらを式(1)(2)に代入することにより、全てのブロック($n=1 \sim N$)において、その転倒に対する安全率 F_n が算出される。

その計算例として、ある諸条件のもとで算出された各ブロックの安全率グラフを図4に示す。

図4を見て解るように、鉛直に立った擁壁では下方のブロックにゆく程、その安全率は低下してゆき、それが1.0を下回るところ(図4では $n=14$)でブロックの転倒による破壊が起こる。



このような破壊を防ぐには、各ブロックに適切な傾斜、寸法を与えて、各ブロックの安全率が一定の基準以上になるようにすることが必要である。例として、前述の図4の条件下において、各ブロックの安全率が全て3.0以上の値をとるように、各ブロックの傾斜角 θ_n を変化させ、断面を変形したものが図5である。（基準安全率の設定値については今後の検討が必要であるが、本論では実例との比較（次項参照）等から3.0という値を採用した。）

この扇勾配を描く断面形は、各ブロックの安全率がすべて基準値以上のラインに揃っているという点で、構造的に合理的なものであるといえる。

(4)構造式の検証

江戸城の石垣は、長年の風雪にも耐えてきており、構造的にも十分安定しているものと考えられる。この江戸城の石垣の断面勾配と前章で提示した構造式による理論的な断面勾配ととの比較を行った。

土質条件や控え長などのパラメータを仮定し、江戸城石垣の隅角部における各石の面長に対応した理論的な断面勾配線を異なる水平震度のもとに算出し、実際の立面写真と重ね合わせたものが図6である。

パラメータの設定の仕方がある程度妥当で、石の積み方による違いを考慮に入れないければ、江戸城の石垣は本論文の構造式の枠組みの中では安全率3.0、水平震度0.2程度に相当するといえる。

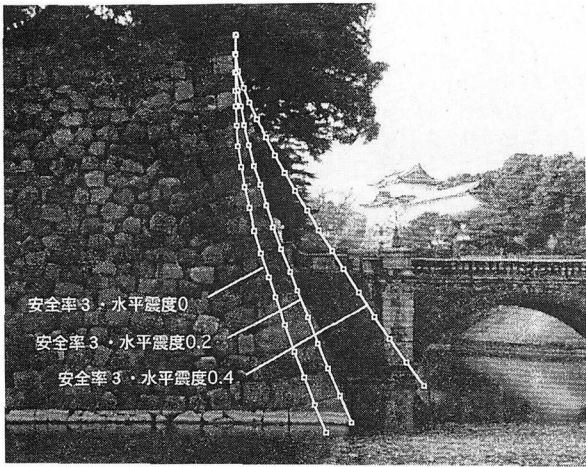


図6 構造式の検証

3. 組積造擁壁のかたちのデザイン手法論

前章で示したように、組積造擁壁において、その構成要素（石・ブロック）の形と擁壁全体の断面形には密接な力学的対応関係があり、要素の形は、安全率というものを媒介として全体の形に反映する。そして、その逆も然りで、全体の形が要素の形に反映することも当然あり得る。このように、全体の形と要素の形を別々にデザインするのではなく、両者を密接な力学的対応関係のあるデザインパラメータとして扱いながらデザインしようとするのが本章での着眼点である。

操作の対象とするデザインパラメータは、大きく分けて要素の形、全体の形、安全率の三種類に分類することが出来る（詳細は図7参照）。

これらの三種類のパラメータは互いに力学的関係を保ちながら影響しあい、それぞれを様々に操作することによって多様な擁壁の形を作り出すことが可能であるが、ここではその基本的な特性が理解できるように、それぞれのパラメータを一種類ずつピックアップし、その操作の特性を解説してゆきたい。この時、設計条件は固定するものとする（ $\phi=40^\circ$, $\sigma=20^\circ$, $\gamma=1.8\text{tf/m}^3$, 水平震度=0.2）。以後、「要素の形の操作」、「全体の形の操作」、「安全率の操作」の順に説明してゆく。

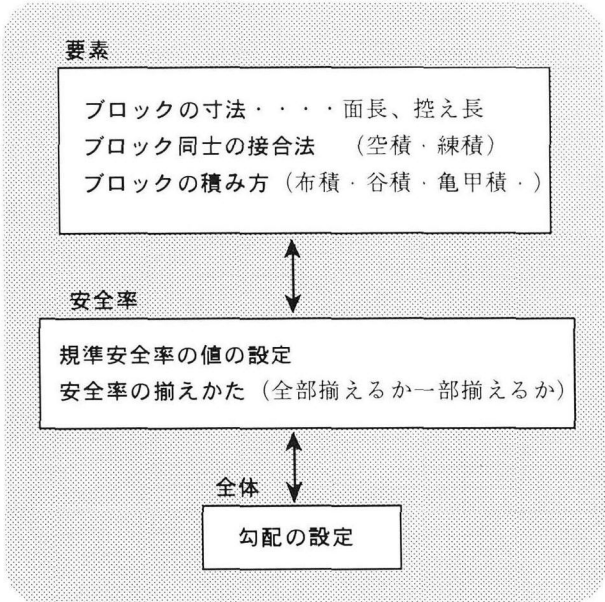


図7 各種パラメータ

(1)要素の形の操作

デザインパラメータとして要素の形を操作するとき、その操作対象として考えられるのは、ブロックの寸法、ブロック同士の接合法、ブロックの積み方であるが（図7参照）、ここでは議論の簡略化のため、ブロック寸法の操作のみ取り扱うものとする。

寸法の操作の基本的なモデルとして、次の二通りの操作を考える。

- ・面高と控え長の比（寸法比=控え長/面高）は固定したまま、ブロックの大きさを変える。（拡大・縮小）
- ・面高を固定したまま控え長を変えて寸法比を変化させる。（変形）

それぞれの要素の形の操作に対して、全体の断面勾配はどう変化するかを示したのが、図8,9である。

図8,9を見ても解るように、

- ・ブロックを拡大する程、あるいは寸法比を増加させる程、全体の断面勾配は立ち上がり、急勾配でも安定を保つことが出来るようになる。

- ・逆に、ブロックを縮小する程、あるいは寸法比を減少させる程、断面勾配は寝てきて、緩勾配でないと安定を保つことが出来ない。

以上が要素の形の操作による断面形状の変化の基本的な特性である。

(2) 全体の形の操作

全体の形から要素の形を導き出すということは具体的には、全体の断面勾配を先に決めてから（各ブロックの傾斜角を先に決めてから）、各ブロックの安全率が規定以上の値をとるようにその寸法を最適化することを意味する。そのためにはこれまで述べた要素から全体への計算過程を逆

算すればよい。しかし、この場合、求める解は面長と控え長の二つがあるので、寸法を一意的に決定する事は出来ず、どちらか一方を任意の値に固定しなければならない。ここでは誌面の都合上、図表は割愛し、その基本的な特性だけを述べておくに留める。

- ・面高を固定した場合、全体の断面勾配を急にする程、また、同じ断面内でも下方のブロックになる程、控え長は長くなる。
- ・控え長を固定した場合、全体の断面勾配を急する程、また、同じ断面内でも下方のブロックになる程、面高は低くなる。

以上が全体の断面形状の操作による要素の形の変化の基本的な特性である。

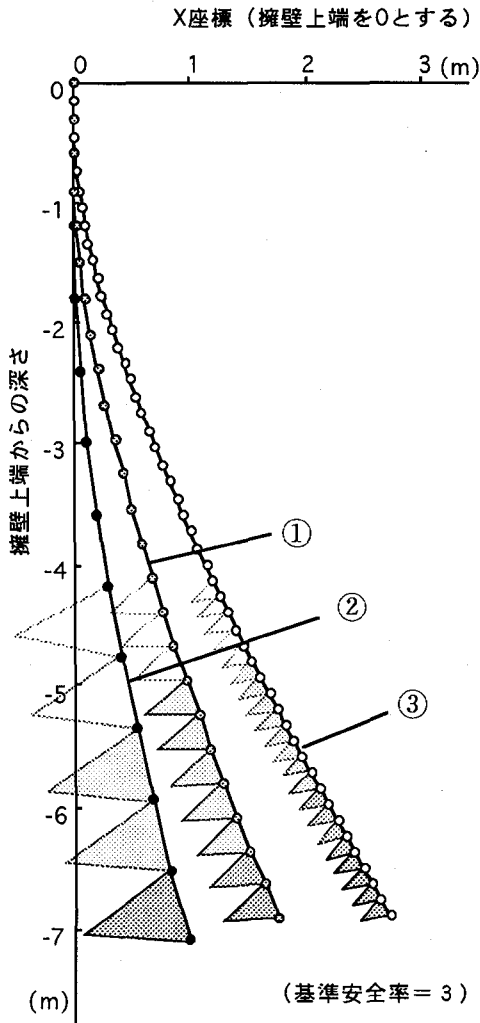
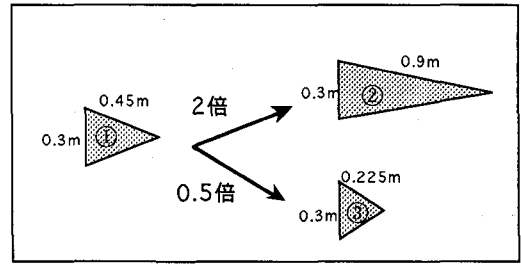
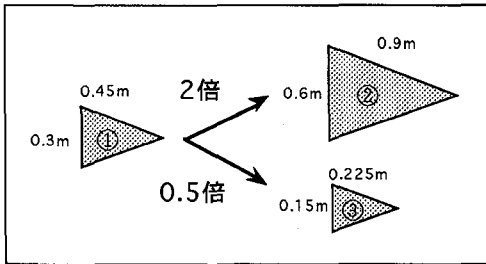


図8 要素の拡大・縮小による断面勾配の変化

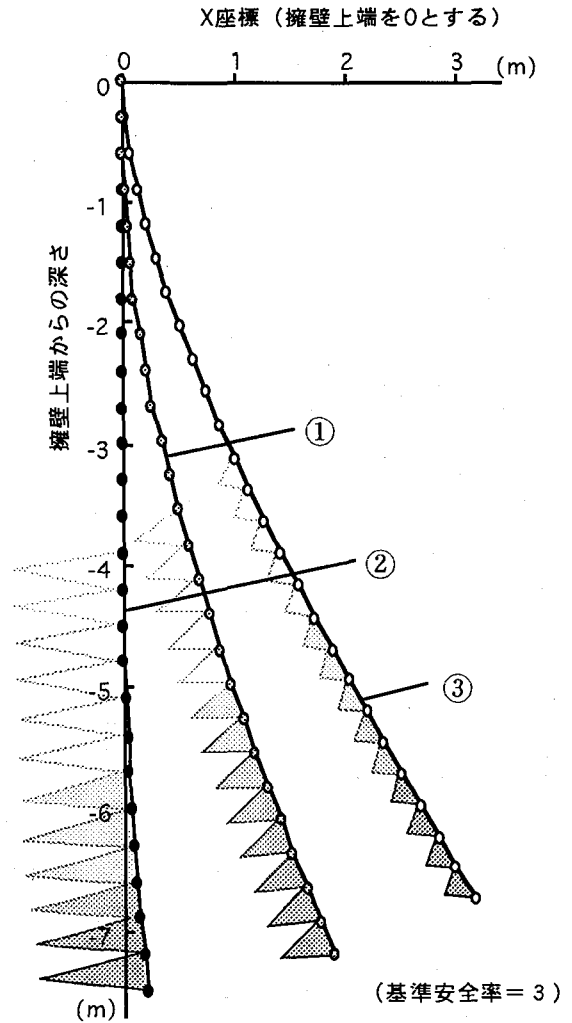


図9 要素の変形による断面勾配の変化

(3)安全率の操作

前述したように要素の形から全体の形を導く、あるいは全体の形から要素の形を導くためには、「全てのブロックの安全率がある基準値以上にする（あるいは基準値に揃える）」という計算過程が必要であるが、この基準安全率を操作する事によっても擁壁の形は大きく変化する。具体的には、

- ・基準安全率の適用の仕方の操作
- ・基準安全率の設定値

の二通りの操作が考えられる。ここでは誌面の都合上、前者の「基準安全率の適用の仕方の操作」のみについて述べる。

基準安全率の各ブロックへの適用の仕方には大きく分けて以下の二通りがある。

- ①全ブロックが基準安全率以上になるようにする。（基準値以上の安全率を満たすブロックについては傾斜角を変えず、鉛直のままにしておく。）
- ②全ブロックを基準安全率に揃える、（基準値以上の安全率を満たすブロックについてもその傾斜角を危険側に变化させる。

これまでの勾配曲線の計算過程は全て①の方法に準じていたが、②のような方法も当然あり得る。両者を比較したものが図10である。

②の方法においては本来基準値以上の安全率を満たしていた上部のブロックの傾斜角を危険側に变化させて基準値に揃えているためその勾配線の上部は前面に張り出したものとなっている。これは、日本古来の石積技法の一つである「法返し」（石垣上部の石を張り出させる技法）の形態と対応しているものと考えられる。

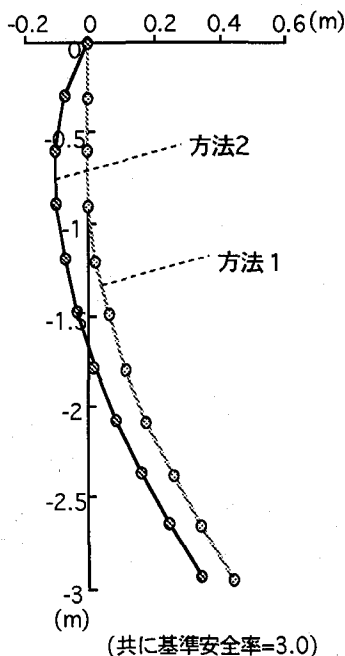


図10 安全率の適用の違いによる断面形の変化

以上、三種類のデザインパラメータ操作によるデザインの基本的な特性について述べてきたが、これらのデザインパラメータ操作を様々な状況によって使い分け、あるいは組み合わせることによって、より多様かつ合理的な擁壁のデザインが可能であると考えられる。

4. 擁壁と土地のデザイン手法論

擁壁という構造物は決してそれ自体独立したものではなく、常に背面の土の重みを背負い、土地の一部として存在する。従って、擁壁のデザインにおいては、あくまでそれを含む土地の秩序との関係のもとで、その形態を考えてゆかなければならない。その第一歩として、本章では、まず地質や載荷重などによって多様に変化する土圧条件と擁壁のかたちとの力学的対応関係を明らかにし、その対応関係に基づいて、擁壁と、それを含む土地の造形に関するデザイン手法論を提示してゆきたい。

(1)種々の土圧条件との対応

擁壁のデザインの際の設計条件として現れる土圧条件は、大きく分けて土質条件（内部摩擦角 ϕ 、単位重量 γ ）と、載荷重（分布荷重、集中荷重、帯荷重・・・）の二種類がある。

①土質条件との対応

擁壁設計の際に考慮に入れなければならない土質条件は、主に土の内部摩擦角 ϕ と単位重量 γ である。これらの値は土の種類によって様々な値を取る。図11は良配合の砂（ $\phi=40^\circ$, $\gamma=2.0\text{t/m}^3$ ）と粘性土（ $\phi=30^\circ$, $\gamma=1.8\text{t/m}^3$ ）について、それぞれの土質条件に対応した勾配曲線を算出したものである。（安全率=3.0, 寸法: $0.3 \times 0.45\text{m}$ ）

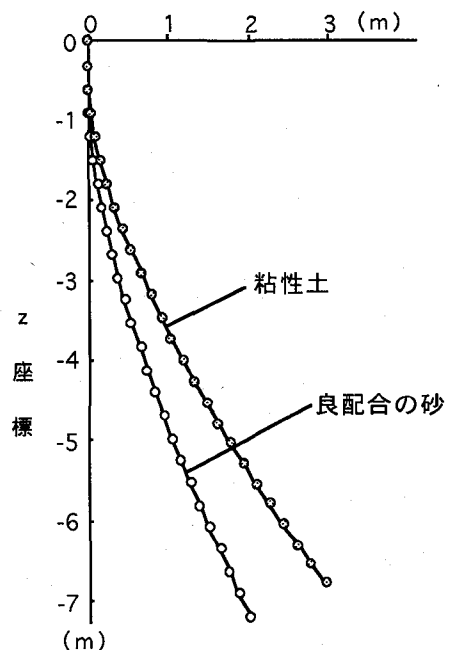


図11 土質条件の違いによる断面形の変化

図11を見て解るように、土質条件の違いによって、それに対応した勾配曲線は大きく変化している。一般的に、 γ が大きい程、また ϕ が小さい程、土圧は増加し、それに対応して擁壁の勾配曲線は緩くなる（要素で対応するときは、寸法が大きくなる）ということがいえる。

このようなことを考慮に入れることによって、その場所その土地ごとに固有な石積の様式といったものを考えることが可能であり、画一的でない、より場所性を持った擁壁のデザインを創造することができるのではないかと考えられる。

② 載荷重との対応

擁壁は基本的に背面の土を支えるために造られるが、その背面の土の上に構造物が立っていたり、人や車が動いたりするときは、その重みによって土圧が増加し、擁壁はそれらの増加土圧も支持しなければならなくなる。従って、擁壁は土の重量のみならず、背面土の上に作用する載荷重についても十分に考慮して設計する必要がある。

背面土に作用する載荷重を力学的に分類すると、分布荷重・帯荷重・線荷重・点荷重・移動荷重に分けられるが、ここでは帯荷重のみを取り上げ、その土圧への影響、そしてさらに擁壁のかたちへの影響について述べる。

帯荷重とは限られた二次元的な広がりの中で一様に作用する荷重のことであり、ある範囲内に構造物や盛土がある場合はそれを帯荷重とみなすことができる。擁壁に作用する増加土圧は、分布荷重のように一様ではなく、その位置によって異なる（図12）。擁壁上のある位置での、帯荷重による増加土圧を与える式はBousinesqの解²⁾を用いる（詳細は省略）。図13は幅4m、60tの構造物（帯荷重 15t/m^2 ）を仮定し、その荷重位置 d を変化させた時の勾配変化を示している。

図13を見て解るように、荷重位置が擁壁上端に近づいてくると勾配曲線は緩くなり、また、直線的になっている。これは、荷重位置が近くなる程、全土圧の内の増加土圧の占める割合が増大するのが原因である。従って、一般的に、直線的で緩勾配の勾配線はより力強く、反対に曲線的で急勾配の勾配線はより繊細な線であるということがいえる。

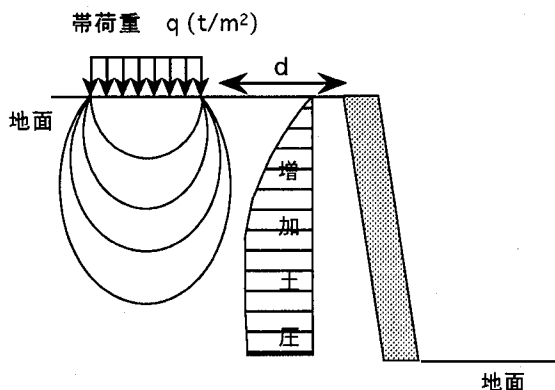


図12 帯荷重による増加土圧

(2) 擁壁のかたちと土地のかたちとの関係

土圧条件は常に一方的に設計条件として現れるだけでなく、土地のかたちを操作することによって土圧条件をコントロールすることも可能である。従って、ただ擁壁のか

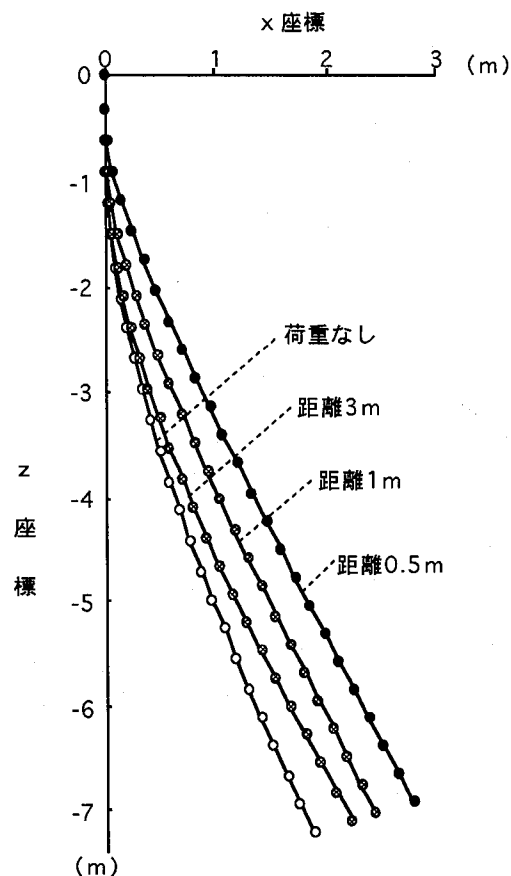


図13 帯荷重の位置による断面形の変化

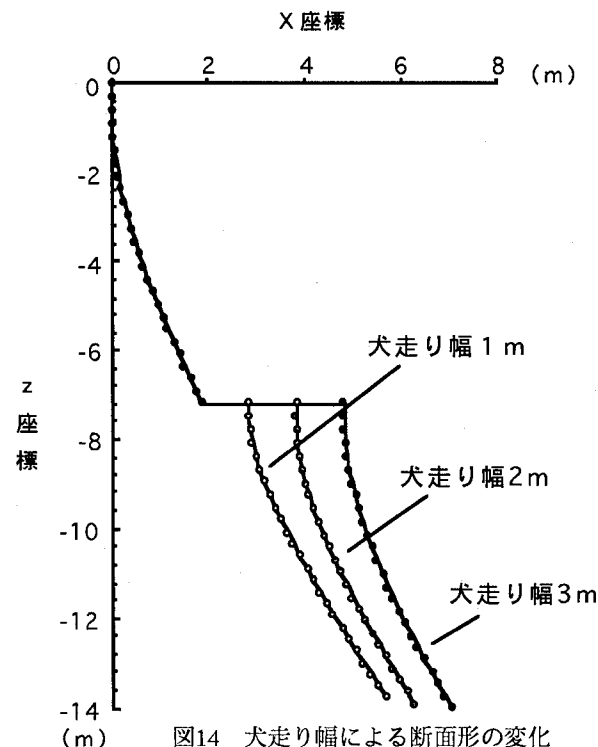


図14 犬走り幅による断面形の変化

たちをその土地の状況にあわせるだけでなく、擁壁のかたちに合わせて土地のかたちを造形してゆく、という考え方も可能である。その例として、段状の擁壁のデザインについて述べてゆく。

段状擁壁においては、それぞれの段の擁壁は個々に独立したものではなく、下の段が上の段を支え、またその下の段がそれを支える、というように互いに力学的に影響し合っているものとみなされる。この関係には前節の帯荷重の論理をそのまま活用することができる。つまり、上部の段と下部の段との間の「犬走り」を前図12におけるdとみなし、下部の段には、上部の段の重みが荷重範囲無限の帯荷重として作用するとみなすのである。この考え方に従い、二段の段状擁壁において、その犬走り幅を変えたときの下部の勾配の変化の特性を示したのが前頁図14である。

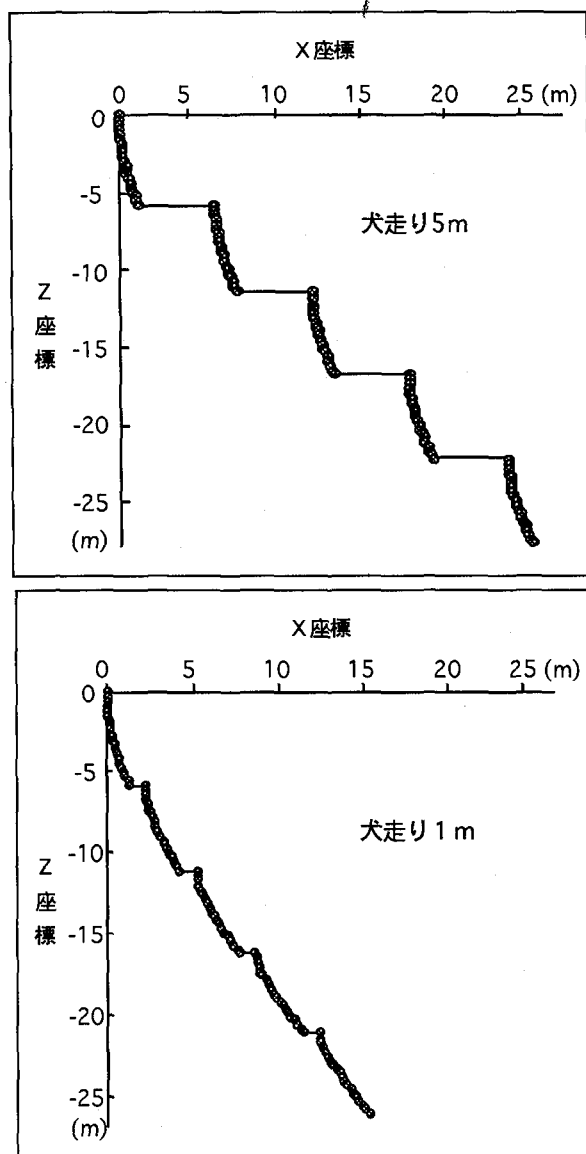


図15 多段擁壁への適用

図14を見て解るように、犬走り幅が狭くなる程下部の勾配は緩くなり、逆に広くなる程下部の勾配は立ち上がる。

その結果、犬走り幅を広くとった場合には上部と下部の勾配線はほぼ同じような傾斜となり、同じかたちの積み重ねとして認識されるのに対し、犬走りを狭くとった場合に

は上部と下部の勾配線に連続性が見られ、全体を一つの擁壁として認識することができる。この特徴はさらに多くの段を積んだ場合の図15を見ればより顕著になる。犬走り幅が広い場合は、同じ形態の積み重ねとしてリズムのある地形をつくり出しているのに対し、犬走り幅が狭い場合は、下部にゆくほど勾配は緩くなり、全体としてみれば、軽い分節のある一つの巨大な擁壁といった観が強いといえる。

5. まとめ・デザイン手法の活用

組積造擁壁を構造的な観点から見つめ直すことによって、そこにはまだ様々な新しい「かたち」のデザインの可能性が開けていることを示すことができた。

本論文で提示した組積造擁壁の構造力学的なデザイン手法論は、いわゆるマニュアル的なものではなく、様々な要素のかたち、全体のかたち、そして土地のかたちの間の対応関係を構造的合理性のもとに秩序立てるものである。その秩序の大枠は自然の力(=土圧)によって規定されており、この枠の中でデザインパラメータの操作という人為の介入がなされる。本論文で示したのは、あくまでその秩序への介入の最も基本的なボキャブラリーに過ぎず、実際のデザインにおいてはこれらのボキャブラリーを様々な組み合わせ、活用することを想定しているものである。

6. 今後の課題

本論文ではある程度の理論の簡略化のため、以下に挙げる重要な項目についてはとりあげていない。

- ①ブロックの積み方(布積、谷積、亀甲積・・・)の影響
- ②地盤条件、裏込め土の影響
- ③擁壁の延長方向(Y軸方向)での力の及ぼし合い(入り隅、出隅・・・)

これらの項目についても今後検討してゆく必要があろう。

参考文献

- 1) 高倉正人：もたれ式・ブロック積擁壁の設計と解説、現代理工学出版、1982
- 2) 石原研而：土質力学、丸善
- 3) 田淵実夫：石垣、法政大学出版局、1975
- 4) 大久保森造：石積みの秘法とその解説、理工図書
- 5) 伊東ていじ：城、読売新聞社

(1994年9月14日受付)