

クーロンの破壊規準および土圧論について

古藤 田^{とうだ} 喜久雄^{きくお}*すぎ 杉^{すぎ} 村^{むら} 義^{よし} 広^{ひろ}**

1. はじめに

土質基礎構造の教科書や参考書には、特にその力学的な内容においては、必ずその冒頭でクーロンの式とか、クーロンの破壊規準といった概念に出会う。これらは大抵の場合公式的なものとして紹介され、われわれにとっては一つの定理に近いものになっている。しかし、これらの概念がどのようにして生まれてきたのか、その当時の歴史的背景や学問の流れについてはほとんど触れられていない。そのことに多少の不満を持った経験のある人は筆者らのほかにもかなり多くいるのではないかと思う。

筆者らは、幾重にも織り重なった土質力学の歴史的な糸を解きほぐし、たぐりよせ、その芽生えの当時までさかのぼってみたいと長い間念願していたが、クーロンがその土圧問題を含んだいくつかの静力学の問題についてエッセイを発表したのは200年も前の1773年であるので、なかなか原文を手にすることができなかった。ちなみに、その時代はフランス革命の直前の時期であり、日本では江戸時代の中期にあたり、土質力学の概念がわが国に導入されたのは早くとも大正時代以後のことであるから、この年月の差を考えれば今になってクーロンの当時の資料を入手することはおろか、クーロンが電磁気などの研究分野に現われるクーロンと同一の人物か否かの区別がおぼろげになるのも当然かも知れない。

Geotechnique に紹介された1, 2の簡単な論述^{文^{1), 2)}}のほかに、最近になって偶然ある書店でクーロンのエッセイの原文コピーとその英訳および詳細な解説が付された文献^{文³⁾}を見いだしたが、一読して多くの点を再確認あるいは再発見することができた。たとえば、後節に述べるようにクーロンは決して土のみを扱っているのではなく、今日でいう c や ϕ はむしろ石材の強度を扱うことによって求められ、それを土圧問題にも応用できるという立場で考えられているということや、なぜ破壊現象が考えられていたかの根拠が明りょうになったように思える。また、思想の根源を見きわめることができるということのほかに、想像力や創造力が誘発されるというプラス・アルファのあることが、原典に触れることの意義でもあろう。したがって、ここで

は原文の持味を失うことなしになるべく忠実に訳出して、土質工学に関心を持つ人々の参考資料に供してみたいと思う。しかし全文を扱うとかなりの量になるので、主として土質工学に関係の深い部分を中心に訳と簡単な解説を付すことにする。

2. クーロンのエッセイの土質工学的位置

ゴールダーはクーロンを紹介するにあたっての冒頭で「彼のいわなかったことが彼のせいになれ、彼のいったことは多く忘れ去られている」^{注¹⁾}と同情し、最高の賛辞を贈っている。ゴールダーによれば、一般の問題には二つのアプローチがあり、その一つは科学者としてのそれであり、今一つは技術者としてのそれである。科学者は真実のみが関心事であり、その意味で答は唯一であるが、技術者には多くの答がありうる。なぜなら、科学者にとっては答が得られぬ限り常にそれを探し続けさえすればよいが、技術者にとっては答がすぐに必要であることが多く、したがって真実そのものではなくても少しでもそれに近い答を得るために適切な仮定や判断を行なうからである。しかし、決定的な誤りゅうはこのことのうちにあるのではなくて、むしろ後世の技術者が最初になされた仮定や判断を忘れたときに現われる。この典型的な例がクーロンであるというのである。

以上の叙述は、暗々裡にわれわれのうちに存在する“クーロンは土質工学の祖である”という意識と一致する。しかし土圧論を最初に確立したと思われるクーロンでも、歴史上で、ある日突然誰も知らなかった光輝く理論を発表したということではない。むしろこの種の静力学的問題は当時一般的に流布していたものであり、クーロンの思想は、彼自身で仕事をする場合にはそれに基づくものとして持っていた個人的な設計指針の類にすぎなかったこと^{注²⁾}は興味深い事実である。彼の土圧論（今日では論と呼ばれている）を含んだエッセイの題は、『いくつかの静力学問題における最大最小法則の適用について、建築に関連して^{注³⁾}』となっているが、ここでいわれているいくつかの問題とは、ハリの強度、柱の強度、土圧、アーチを指している。一方、クーロンより以前に約100年来の解決すべき問題として、1) 橋脚の厚さ 2) アーチのスパンと内柱の大きさ 3) 要石[key stone] 付近の迫石[voussoir]の厚さ 4) アーチの形 5) 土圧と擁壁の大きさ、などがあったといわ

* 早稲田大学教授 理工学研究所

** 工博 建設省建築研究所研究員

表—1 クーロンの貢献

ゴールダーの指摘	ケリーゼルの指摘
1. セン断抵抗法則を述べた。 $s = c + \sigma \tan \phi$ 2. 扱う材料の試験の重要性を述べた。 3. 鉛直壁に対する摩擦と粘着力を有する土の土圧の式を述べた。 $P_A = \frac{1}{2} w h^2 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} - 2 c h \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi}$ 4. 破壊面が水平と $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ だけ傾くことを示した。 5. 壁摩擦の影響を導入した。 6. 鉛直土堤の限界高さを述べた。 $H_c = \frac{4c}{w} \frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi}$ 7. 排水の重要性を強調した。 8. 極限の概念、すなわち主働および受働土圧を紹介した。 9. 破壊面は平面であると仮定したが、曲面でもありうることを指摘した。 10. 安息角の正接が摩擦係数に常に等しいとは仮定しなかった。 11. 土圧分布が静水圧的になることを証明しているわけではない。	1. それ以前には、混乱していた粘着力の概念を、粒子間の有効拘束圧の概念として確立した。その公式は今日でもいまだに正しいものとされている。 2. 主働土圧と受働土圧の基本的区別を明確にし、この両者の中間にある場合は安定状態を保つことを示した。 3. 破壊面が不確定の方向を示すという考えのもとに作られた最大土圧の三角形断面を持つプリズム法は、地中土圧論に飛躍的な発展をもたらした。

れ注⁴⁾、このうち土圧問題は比較的新しいものではあるが、いずれにしてもその当時の知識者にとってこれらは等しく関心のある問題であったわけである。たとえば土圧問題に関して、ケリーゼル文²⁾によればフランスにおける土関係の開祖はボーバン (Maréchal de Vauban) であり、彼の経験に基づいた擁壁の大きさの考えがほかの人によって一覧表にされ、当時の擁壁設計の教科書的作用を果たしていたといわれる。事実、クーロンは土圧に関する彼の計算結果に対してボーバンの値を比較検討の基準的な対象として引用している。このほかにも、クーロン以前に土圧問題を扱った人々は数多く存在し注⁵⁾、クーロンの思想が決して突然のように現われたものでないことがわかる。それにもかかわらず今日からみれば、依然として“クーロンは土質工学の祖である”という考えを禁じ得ないのは、粘着力と摩擦力という材の性質を明確にし、これを破壊時の平衡状態に適用して極限解析の確立をなしたことによっている。表—1にはゴールダー文¹⁾とケリーゼル文²⁾によって述べられたクーロンの貢献を一覧表にまとめてみた。今日からみれば、合力としてではなく応力の概念、土粒子と間ゲキ水という二相構造として現われる有効応力注⁶⁾、変位の影響などの点については、やや欠ける点があるとはいえ、クーロンの破壊規準および土圧論が根源から崩壊することはなく、彼自身メモとして持っていたこの考えが、今日なお基本的な教科書的作用を果たしていることは感慨深い事実である。

3. エッセイの構成

クーロンのエッセイの構成は表—2に示すように緒言と19の節からなっている注⁷⁾。

緒言では、このエッセイで扱われた主要なテーマ、すなわち極限平衡状態における摩擦力と粘着力の影響について触れ、石材の圧縮や曲げ、土圧、アーチについてこれを適用したことの要旨を述べている。このエッセイの表題にみられるように、材が破壊する場合を考えるには、摩擦力と粘着力とが外力と釣りあっている極限平衡状態で、外力が最小であるような面を探すことに帰着されることが強調されている。すなわち物体内に考えられるすべての面のうち、最も破壊しやすい面を探すことである。擁壁に作用する土圧を求める場合には、背面土の内部に考えられるあらゆる面のうち、擁壁面に作用する水平力が最大となるような面を探せばよいとされている。経験的に、擁壁を転倒させるときの破壊面が直線的であることが知られているから、クーロンは実用的には直線スベリ面を考えれば十分であると述べているが、流動体の場合などは最大圧力を生じさせる面は曲面となることを強調している。

緒言の末尾で、クーロンは「このメモは最初は自分の仕事に使用するための資料にすぎなかったが、いかに貧弱なものでも実用的に有用なところがあれば常に親切に受け入れてくれるので、あえてこのアカデミーに提出した。科学は公共の有益性にさざげられるべきであるから、偉大な人間は建築物の天上に位置し上層階を設計構築し、通常の技術者は下階に散在し、あるいは基礎の暗やみに隠れて創造することができる限りにおいて完全性を探るなど、市民は能力に応じて貢献すべきである」といっている。これは緒言の冒頭で、『計算と物理学の混在が許される限りで』摩擦力と粘着力の影響を検討してみたいといっていることと関連して、クーロンの謙そんな態度が如実に現われており今さらながら敬服する思いである。

『予備的な命題』と題されて、本文のⅠ、Ⅱ、Ⅲ節が始められ、ここでは静力学における力の釣り合いが命題として述べられている。すなわち、あらゆる外力は考えている面に平行と直角の方向に分離して考えれば、平行な力の総和はゼロで、直角方向も反力を含めれば総和はゼロとなることが示されている。

Ⅳ、Ⅴ節は各々、『摩擦について』、『粘着力について』と副題され、これらの力は重力のように能動的な力ではなく受動的な力であり、それらの抵抗力の限界から推定されることを述べている。摩擦については、物体が大きくなると法則に従わなくなるが、アマントン (Amantons)注⁸⁾にならって圧縮力に比例するものと仮定したとしている。

粘着力については、『固体が各部分に分離するときの抵抗力』注⁹⁾から測定されるものとし、白石 [pierre blanche, white stone] についての三つの実験を行なっている。それらは、今日でいう引張り、セン断、(片持バリの) 曲げに相当し、引張りとセン断の実験結果があまり変わらないので、これを粘着力として考えることにしたといっている。Ⅵ節では、材料がレンガとモルタルの場合を述べているが、天

表—2 クーロンのエッセイの構成

	副 題	そ の 他	備 考
緒言			要 旨
I II III	予備的な命題		静力学の条件
IV V VI	摩擦について 粘着力について		材料の性質
VII	物体の破壊についての考察		ハリ問題
VIII	石柱の抵抗力		柱問題
IX X XI XII XIII XIV XV	土圧、擁壁について	例題 例題	土圧問題
XVI XVII XVIII	アーチについて 摩擦も粘着力も持たないジョイントによるアーチについて 摩擦と粘着力が考慮されるアーチの安定について	系I, 系II, 問題, 注意I, 注意II, 系III, 例題 問題, 注意I, 注意II	アーチ問題

候や材令によって強度が異なる場合があるので各所で個々の試験をすべきであることを述べている。

『物体の破壊について』と副題されたVII節では片持バリの釣りあい問題が扱われている。この場合にはIII節に述べられたハリ断面に平行と直角方向の力の総和がゼロという条件のほかに、任意位置における引張り力と圧縮力によるモーメントの総和が、端部に作用する外力によるモーメントと等しいという条件が必要であることが指摘されている。さらにV節で扱った片持バリの曲げ実験と比較し、固定端の圧縮側には何らかの破壊が生じているものと推定している。

前節を受けてVIII, IX節では圧縮力を受ける『石柱の抵抗力』を考察している。これらの節はおおの粘着力のみの場合と、粘着力と摩擦力を有する場合とを扱っているが、その要旨を述べるとつぎのようになる。図—1 [原文の Fig 5] のように均質性の石材が荷重 P を受け、CM面で破壊するとすれば、CM面上での極限平衡釣りあい状態を考えて、

$$\frac{a^2 \delta}{\cos x} + \frac{P \cos x}{n} = P \sin x \quad (1) \text{注}^{10)}$$

あるいは、

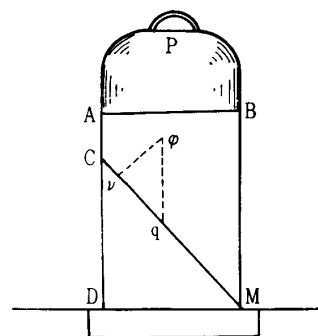
$$P = \delta a^2 \left[\cos x \left(\sin x - \frac{\cos x}{n} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

ここで、

a^2 : 底面の面積

δ : 粘着力

P : 荷重



図—1

n : 摩擦による定数

x : Mにおける角度

材が破壊することなしに支持できる荷重 P は(2)式において最小であるような値を見い出せばよい。したがって(2)式を x について一回微分し、それをゼロとおけば結局次式を解けばよいことがわかる。

$$\cos^2 x + \frac{2 \sin x}{n} \cdot \cos x - \sin^2 x = 0 \quad (3)$$

これから、

$$\cos x = \sin x \left(\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - \frac{1}{n} \right) \quad (4) \text{注}^{11)}$$

となり、

$$\tan x = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - \frac{1}{n}} \quad (5)$$

となる。これは材の摩擦によって破壊面の角度が異なることを示したもので、クーロンはレンガの場合を一例にとり、 $1/n = 3/4$ であるから角度は $63^\circ 26'$ になり、引張り力の4倍になるとしている。また、(2)式にみられるように等質性の柱の強度は、その断面積 a^2 に比例することを結論している。

これに続いて『土圧・擁壁について』と副題されたIX節が今一度現われ、土圧問題や限界高さがXV節まで論じられているが、この部分については次節に全文訳を紹介することにする。

XVI節以下は『アーチについて』最大最小法則を適用して論を進めているが、ここでは土質工学に関係する部分のみに注目したいので極限平衡状態を考える限りにおいては、材料が異なるということだけで土圧やアーチ問題が全く同じ考え方で解明できるという興味ある事実を指摘するにとどめたい。

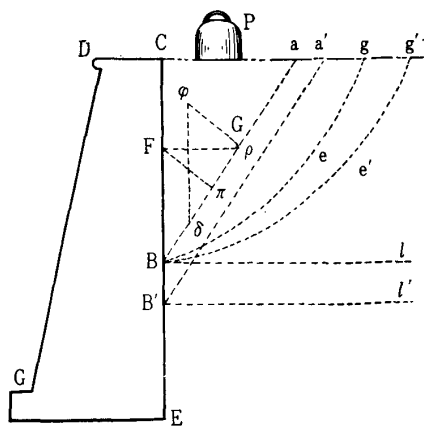
4. 土圧に関する部分の全文訳^{注12)}

IX

土圧・擁壁について

重い直角三角形プリズムCBaが、F点を通り鉛直線CB

に直角に作用する力によって、線 Ba 上に支持されているものとしよう〔図—2，原文の Fig. 8 参照〕。また、それは自重の作用を受け、線 Ba に沿って生ずる粘着力と摩擦力によって保持されているものと仮定しよう。



图—2

CB=a, Ca=x とすれば $\delta\sqrt{a^2+x^2}$ は線 Ba 上の全粘着力を表わすことになろう。三角プリズム CBa の重さ ϕ は $gax/2$ (ここでは g は三角柱の密度) に等しいだろう。

もし力 F および ϕ が線 Ba に平行と直角な方向に分解されれば、三角柱 $\phi G\delta$ と $F\pi\rho$ (これらの分解された力を表わすとする) は、三角柱 CaB と相似形となろう。したがって各力はつぎのように表現することができる。

ϕG , aB に直交する力, ϕ の成分: $\phi x/\sqrt{a^2+x^2}$

$G\delta$, aB に平行な力, ϕ の成分: $\rho a / \sqrt{a^2 + x^2}$

F_π , aB に直交する力, A の成分: $Aa/\sqrt{a^2+x^2}$

$\pi\rho$, aBに平行な力, Aの成分: $Ax/\sqrt{a^2+x^2}$

もし、 $1/n$ を摩擦係数とすれば、三角柱を aB に沿ってすべらせる力の成分は次式で示されよう。

$$\left[\phi a - Ax - \frac{\phi x + Aa}{n} - \delta(a^2 + x^2) \right] / \sqrt{a^2 + x^2} \quad (6)$$

釣りあい満足するにはこの式をゼロとおけばよく、したがって、

$$A = \frac{\phi\left(a - \frac{x}{n}\right) - \delta(a^2 + x^2)}{x + \frac{a}{n}} \quad (7) \text{注}^{13)}$$

一方、Fに作用する力が、Ba の方向へ三角柱が動き出すような値まで（その力をA'とする）増大するとすれば、Ba に沿う力はずぎのようなものになろう。

$$\left[A'x - \phi a - \frac{\phi x + A'a}{n} - \delta(a^2 + x^2) \right] / \sqrt{a^2 + x^2} \quad (8)$$

これより釣りあい、

$$A' = \frac{\phi\left(a + \frac{x}{n}\right) + \delta(a^2 + x^2)}{x - \frac{a}{n}} \quad (9) \text{注14)}$$

ここで、 $x=a/n$ のとき無限大となる。

上の二つの式より力Aは $ga^2/2$ より常に小さく、力 A' は常に大きい。 $ga^2/2$ は粘着力と摩擦力がゼロになるとき、あるいは三角柱が液体であると仮定されるとき、ある値を与える。

それゆえ、粘着力と摩擦力が三角柱の安定に貢献する場合、三角柱を移動させることのないCBに直角なF点への力はAとA'の間に存在することが明示されたことになる。

X

しかし、もし緒言で述べたように粘着力がすべての面で等しい均等な土塊内では、この無限の土塊を支えるために力 A は三角柱 CBa を支持することができるばかりでなく、すべての面のうち粘着力と摩擦力とで抵抗し、自重を受け、最大圧力を生じるような曲線 Beg で囲まれる $CBeg$ も支持できなければならない。なぜならこの仮説によれば、もし最大圧の面を支持するに十分な力と異なる非常に小さなある力を F 点に作用させるだけならば、この線に沿って土塊が分離することはないだろうし、ほかの部分はずべて粘着力と摩擦力によってつなぎ留められていることが明白であろうからである。それゆえ、土塊全体を支えるに十分な力をみつけるためには、すべての面 $CBeg$ の中で CB 上の圧力が最大になるような面が探されなければならない。同様に、安定を乱すことなく F 点に作用させることのできる最大の力を決定したい場合には、 $Be'g'$ に沿う面 $CB'e'g'$ を流動させるに十分な力 A' が最小になるような別の曲線 $Be'g'$ を探す必要があるだろう注¹⁵⁾。また液体の場合には、流動を生じさせることのない F 点に作用する水平力の限界は極大値 A と極小値 A' の中間に存在することになる。摩擦力と粘着力がゼロである液体とこれらの性質が無視できない物質との差違は、前者の場合それを包含する容器の側面 CB が唯一の力によって支持されているのに対して、後者の場合には、限界 A と A' の間に釣り合いを乱さない無数の力が存在しうることであるといえる。

ここでの問題は、土塊を支持して釣りあい状態にある擁壁に対して生ずる最小水平圧力¹⁶⁾を見出すことであるから、力Aのみを扱うことにしよう。

最初に、最大圧力を与える線は直線であると仮定する。土圧によって擁壁が転倒する場合、破壊を生じる面は三角形に非常に類似しているということが経験的に知られているからである。

この仮定と上述の提言によって、 aB に沿ってのスベリに抵抗する最大圧力 A を必要とする一定側面 CB を持ち C で直角であるような三角形が見つけれられるに違いない。それゆえ、任意の三角形に対して、

$$A = \frac{\frac{1}{2} g a x \left(a - \frac{x}{n} \right) - \delta (a^2 + x^2)}{x + \frac{a}{n}} \quad (10) \text{注}^{17)}$$

がたてられるから、最大最小の法則を適用して、

$$\frac{dA}{dx} = \frac{\left(\frac{1}{2n}ga + \delta\right) \left(a^2 - \frac{2ax}{n} - x^2\right)}{\left(x + \frac{a}{n}\right)^2} = 0 \quad (1)$$

となり、最大圧力の生ずる三角形の形状は $x = -\frac{a}{n} + a\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}}$ となる^{注18)}。この x の値を A の式に代入すれば $A = ma^2 - \delta la$ (ここで m と l は n の級数を含んだ定数)^{注19)} が導かれる。この力 A は無限の土塊 $CBlg$ を支持するに十分であろう。

上述の式から粘着力が x の値に影響しないこと、最大圧力を与える三角形の大きさは摩擦によることなどが明らかである。

もし摩擦がゼロであれば、粘着力にかかわらず最大圧力を示す三角形は底角が 45° の二等辺三角形である^{注20)}。

XI

上述の公式 $A = ma^2 - \delta la$ で、 a が変数であると考えれば $dA = da(2ma - \delta l)$ となり、二つの無限の面 CB 、 CB' 間の圧力の差を表わす。鉛直線 CB が A より小さい力を受けることはないから、線 BB' は dA より小さい力の作用を受けると仮定することはできない^{注21)}。全高 $CE = b$ であるような擁壁の基底 E 点についての力 A による基本的なモーメントは $(b-a)(2ma - \delta l)da$ となろう。また、積分すれば E 点まわりの全モーメントは $\frac{1}{3}mb^3 - \frac{1}{2}\delta lb^2$ となろう。この量は擁壁の大きさを決定するために、擁壁の重量によるモーメントと等式化されるに違いない。

擁壁の形と大きさに関しては、前に著した *les Recherches sur la figure des digues*^{注22)} のほかにもっとよい参考文献はない。

例題

放置されたとき傾斜 45° を示すような土であるとして摩擦係数は 1、新しく埋め直した土^{注23)} であるとして粘着力をゼロと仮定すれば、

$$x = -\frac{a}{n} + a\sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} = -a - \sqrt{2}a = \frac{4}{10}a \quad (2)$$

となり、 $A = 3ga^2/35$ となる^{注24)}。 m はそれゆえ $3/35$ に等しくなろう。また、 G 点まわりの全モーメントは $mb^3/3 = b^3/35$ となろう*。したがって、土を抑えている壁が傾斜を持たず厚さは c で、土と同じ密度を有しているとすれば $c = 24b/100$ となり、高さの $1/4$ より少し小さいものになるだろう。

* この例題では、以下の例題と同じく擁壁 $DCEG$ が無限の強度を有していると仮定している。また重量の成分として計算される摩擦力は水平圧力 A よりも大きいとしている。それゆえ、問題はノリ先 G で転倒することのないような大きさを見出すことにある。

しかし擁壁が $1/6$ の傾斜を持っているとすれば、境界 C D での厚さを c とすると、釣りあい状態に対しては、

$$\frac{b^3}{35} = cb\left(\frac{c}{2} + \frac{b}{6}\right) + \frac{2b^3}{12 \times 3 \times 6} \quad (3)$$

これから近似的に $c = b/10$ となる。もし釣りあいのた

めに石材の重量を $1/4$ ほど増加させる必要があるような場合は $c = b/7$ となる。したがって、もし 35 ft の高さの土が支持される必要がある場合は、 CD は 15 ft に等しくなければならぬだろう。この値は実際によく使われている大きさであり、 $c = b/7$ は実用上十分な値であると思う。特に、釣りあいの必要から土塊を $1/4$ 増大させる場合に適合するのみでなく、擁壁に生ずる摩擦力が無視される場合にも適用できるからである。破壊モーメントの際には、土は CE に沿ってすべろうとし、 A を消去すると同時に擁壁のモーメントを増加することになる。

ポーバンは彼が造った要さいではすべて、 5 ft の厚さと $1/5$ の傾斜をつけた。この有名な人物によって造られた擁壁は 40 ft より高いものはまれで、彼の施工はわれわれの最後の式とかなりよく一致している。しかしポーバンが彼の壁に控え壁を付け加えたことは事実であるが、この補強は砲撃によって城郭の要さいが崩れることのないようにした補足的なものと考えられるべきである。

この理論の結果として、新しく埋め戻された均質性の土の場合は、それを支持する壁の上部 CD で測られた厚さは、高さ CE に比例するので $15 \sim 20$ ft の高さしかない擁壁に対しては厚さを少し減少させることができそうである。

XII

既知の粘着力を持った土に対して、土圧を示す式 $A = ma^2 - \delta la$ は根切に対して有効な結果を導き出すから、トレンチの必要深さを求めることもできる。壁は落ち込むことなく垂直に切られるとすれば、一般式 $A = ma^2 - \delta la$ で $A = 0$ とすれば、 $a = \delta l/m$ となりその深さを与える^{注25)}。

同様の原理によって、根切深さが与えられれば、土がその粘着力によって支持しうる角度も見い出せよう。

XIII

もし土塊 CaB が荷重 P の作用を受けているとすれば上式中の ϕ (X 節(10)式) は $P + gax/2$ で置き代えるべきである。

$$A = \frac{\left(\frac{1}{2}gax + P\right) \left(a - \frac{x}{n}\right) - \delta(a^2 + x^2)}{\frac{a}{n} + x} \quad (4)$$

これから、

$$x + \frac{a}{n} = \sqrt{\frac{a^2 \left(1 + \frac{1}{n^2}\right) - Pa \left(1 + \frac{1}{n^2}\right)}{\frac{1}{2n}ga + \delta}} \quad (5) \text{注26)}$$

擁壁の大きさを得るには x のこの値をまず A の式に代入し、つぎに **XI** 節の方法に従えばよい。

XIV

以上まで、われわれは破壊の瞬間において三角形 CBa の CB 上に生ずる摩擦力を考慮していなかった。これに注意すると直ちに、三角形が Ba 上の摩擦によってのみでなく、 CB に沿ってすべる際に擁壁に生ずる摩擦力によっても支持されることが明白となる。この後者の摩擦は A/ν で

表わされる。ここで $1/\nu$ は土が石材面上をすべるときの摩擦係数を示す。今釣りあい状態で、CB 上の摩擦力が BC に沿う力に等しい。それゆえ、A の値を与える式 (X 節) で、量 $(gax/2 - a/\nu)$ 注27) が ϕ に代入されればよい。すなわち、

$$A = \frac{\left(\frac{1}{2} gax - \frac{A}{\nu}\right) \left(a - \frac{x}{n}\right) - \delta (a^2 + x^2)}{x + \frac{a}{n}}$$

したがって、

$$A = \frac{\frac{1}{2} gax \left(a - \frac{x}{n}\right) - \delta (a^2 + x^2)}{a \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{\nu}\right) + x \left(1 - \frac{1}{\nu}\right)} \quad (16)$$

これから、A が最大、 $1/n + 1/\nu = m$, $1 - 1/\nu = \mu$ と仮定すれば、

$$x = -\frac{ma}{\mu} + \sqrt{\frac{n \left(\frac{1}{2} m g a^3 + \delta \mu a^2\right)}{\mu} + \frac{m^2 a^2}{\mu^2}} \quad (17) \text{注28)}$$

x のこの値を A の式に代入し、上述の過程に従えば、擁壁の大きさが見い出されるだろう。

例題

新しく埋め戻された土であるとして粘着力がゼロ、摩擦係数は放置した場合傾斜 45° を持つ土であるとして 1 と仮定する。もし n が ν と等しいとすれば、 $A = gx(a-x)/4$, $x = a/2$ 注29) となるから、 $\angle CBA = 26^\circ 34'$ であり $A = ga^2/16$ となる。また、G 点についての土の反力による全モーメントは、 $gb^3/48$ である注30)。したがって傾斜がなく厚さ c の壁注31) に対しては、摩擦力は擁壁の抵抗モーメントを $gcb^2/16$ だけ増大させるに貢献する。それゆえ、

$$\frac{b^3}{48} = \frac{c^2 b}{2} + \frac{cb^2}{16} \quad (18)$$

したがって、 c は $15b/100$ に非常に近い。すなわちこの仮説によれば、20 ft 高さの圧力下で 3 ft 厚の壁は安定状態を保つことになるだろう。

この例題の仮説は傾斜 $1/6$ を持つ擁壁に対しても通常用いられる値として、容易に適用することができる。しかしこの計算から得られる厚さは実用的に一般化されたものよりもずっと小さいものであろう。事実擁壁の寸法を大きくする原因はいくつか存在する。これらは、

- 1) 石材に対する土の摩擦は土自身に対する摩擦ほど大きくはない。
- 2) 土中を浸透する水は土と石材の間に集中し、水の層を形成する。それは土の力を摩擦のない液体圧に置き代える作用をする。この問題を除くため実用的には擁壁の裏側に鉛直パイプを通し、壁の底部に排水路を設置して水が流れやすいようにしているが、しばしば水あるいは氷によって土が運ばれ、排水路が固まり使用不可能になることがある。
- 3) 含水量が土の重量のみでなく、摩擦力に対しても影

響を与える。私自身石けん質の土で乾燥した場合安息角が 45° となり、湿った場合には $60 \sim 70^\circ$ になることを見出した経験がある。それゆえ、もし公式から決定された大きさが信頼されるためには、抵抗力の検討対象としての土中を水が流れないようにするか、流れても体積をわずかに増大させる程度にしておかねばならない。水分が引き起こす土の体積増加や表面のき裂は、経験のみによってしか決定できない擁壁への土圧の原因となる注32)。

以上の注意点は石材の性質にまだ考慮されていない。常に、載荷される以前の乾燥状態と考えられている。また凍結はまだ考慮に入れられていない。その影響は疑いなく石材にとって心配される最も危険なものである。凍結は、体積の膨張を引き起こすことによって湿潤土に圧力の増加を生じさせることはいうまでもなく、排水路の固結化も促進させる。また乾燥する前にきびしい固結を経験する壁はその粘着力の大部分を失い抵抗力を失うだろう。

以上の注意は、擁壁がそれに圧力を与える裏込め土の性質によって個々に大きさを考慮すべきであり、乾燥した地域の方が湿った地域よりも危険度は小さいという結論を導き出すが、それにもかかわらず、すべての種類の土に対して擁壁は傾斜 $1/6$ 、上部の厚さが高さの $1/7$ (XI 節参照) で設計しておけば危険はないだろうと考えられる。

XV

粘着性液体内の最大圧力面について

これまでわれわれは最大圧を与える面は三角形であると仮定してきた。この仮定の理由は、得られた結果の単純性、実用への応用の容易性、技術者にとっての使いやすさと理解しやすさなどであった。しかし正確な方法で最大圧力を生じる曲面を決定したいならば、ここで示す方法が適用できると思われる。

CBg [図-3, 原文 Fig. 8] が CB 上に最大圧を生じる曲面であるとし、土の摩擦力と粘着力が無限の液体 $gCB/$ のそれと同じであると仮定しよう。もし CBg の一部すなわち、PMg を考えれば、PMg は PM 上に構成されるすべての面のうち、その線に最大圧力を与えるような面であることが明白である。この圧力の大きさを得るためには、面 PgM が gM 上の摩擦および粘着力と PM 上の摩擦

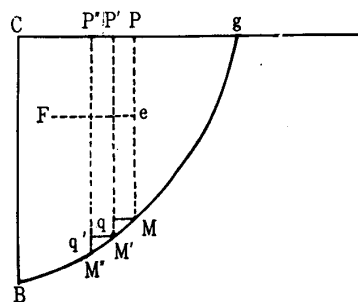


図-3

と粘着力で支持され、その自重 ϕ の作用を受けて極限釣りあい状態にあり、まさにそれが破られる状態を考える必要がある注³³⁾。部分PMgについてのこの提言はP'M'gについてもいえる。今、破壊の瞬間には全体が釣りあい状態にあるから、自重の作用を受け、摩擦力や粘着力と周囲の液体から作用するいくつかの力によって支持される部分PMP'Mも極限釣りあい状態にあるに違いない。しかし要素PMgはPMに沿ってのスベリに抵抗するそれ自身の摩擦力と粘着力、または要素CBPM内に反力として生ずる同じ大きさの摩擦力と粘着力がなければ支持され得ないことは明白である。それゆえ、PMに作用する水平力をP、P'M'に作用するそれをA'で表わせば、釣りあい状態にある要素PMP'M'は水平線Feに沿って(A'-A)の圧力によって支持されていることになる。またA/nで表わされる摩擦反力と δ PMの粘着反力によって鉛直面PM上に荷重作用を受けるだろう。さらに、P'M'の摩擦および粘着力と、MM'の摩擦および粘着力によって支持されるだろう。それゆえ基本面PP'MM'は、自重と以上のすべての鉛直力の作用を受けている三角形MM'qと等価と考えることができる。今、

$$\begin{aligned} gP &= x, \quad PM = y \\ gP' &= x', \quad P'M' = y' \\ gP'' &= x'', \quad P''M'' = y'' \end{aligned} \quad (19)$$

としよう。鉛直側面a、水平側面xで鉛直力 ϕ を受けている三角形はつぎの水平圧力を生ずることは前述したとおりである(IXおよびX節)。

$$A = \frac{\phi \left(a - \frac{x}{n} \right)}{x + \frac{a}{n}} - \frac{\delta(a^2 + x^2)}{x + \frac{a}{n}} \quad (20)$$

この式を要素PP'MM'に対して作られるものと比較すれば、Aが(A'-A)の代わりであることがみられる。

$$\begin{aligned} \phi &= y(x' - x) + \frac{(A - A')}{n} + \delta(y - y') \quad (21) \text{注}^{34)} \\ a &= (y' - y) \\ x &= (x' - x) \end{aligned}$$

それゆえ、極限釣りあい状態を表わす式は、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} (A' - A) &= [y(x' - x) + \frac{A - A'}{n} + \delta(y - y')] \\ &\left[\frac{y' - y - \frac{x' - x}{n}}{x' - x + \frac{y' - y}{n}} \right] \quad (22) \text{注}^{35)} \end{aligned}$$

簡単のために新しく埋め戻した土として $\delta=0$ とすれば注³⁶⁾、

$$(A' - A) = \frac{y(x' - x) \left[(y' - y) - \frac{x' - x}{n} \right]}{\frac{2(y' - y)}{n} + (x' - x) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (23)$$

同様に、次のことが言える。

$$(A'' - A') = \frac{y'(x'' - x') \left[(y'' - y') - \frac{x'' - x'}{n} \right]}{\frac{2(y'' - y')}{n} + (x'' - x') \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (24)$$

したがって、以上の二つの式を加えれば、

$$\begin{aligned} (A'' - A') &= \frac{y(x' - x) \left[(y' - y) - \frac{x' - x}{n} \right]}{\frac{2(y' - y)}{n} + (x' - x) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \\ &+ \frac{y'(x'' - x') \left[(y'' - y') - \frac{x'' - x'}{n} \right]}{\frac{2(y'' - y')}{n} + (x'' - x') \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (25) \end{aligned}$$

しかし、面PMgの水平圧力は面P''M''gの水平圧力と同様最大でなければならないから、もしy、y'、y''、およびx、x'、x''が定数であるなら、一つの変数x'はA''-Aが最大であるような値に違いない。これはy'-y=y''-y'=dyとおいてx'について微分すれば求められる。

$$\begin{aligned} \frac{d(A'' - A)}{dx'} &= \frac{y \left(dy - \frac{x' - x}{n} \right) - \frac{y}{n} (x' - x)}{\frac{2dy}{n} + (x' - x) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \\ &- \frac{\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) y (x' - x) \left(dy - \frac{x' - x}{n} \right)}{\left[\frac{2dy}{n} + (x' - x) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]^2} \\ &- \frac{y' \left(dy - \frac{x'' - x'}{n} \right) + \frac{y'}{n} (x'' - x')}{\frac{2dy}{n} + (x'' - x') \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \\ &+ \frac{\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) y' (x'' - x') \left(dy - \frac{x'' - x'}{n} \right)}{\left[\frac{2dy}{n} + (x'' - x') \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]^2} \quad (26) \end{aligned}$$

この式のおおのの対応項は連続関数とみられるからx'-xをdxで置き換えて考えられる。

$$\begin{aligned} B &= \frac{y \left(dy - \frac{dx}{n} \right)}{\frac{2dy}{n} + dx \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} - \frac{\frac{y}{n} dx}{\frac{2dy}{n} + dx \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \\ &- \frac{\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) y dx \left(dy - \frac{dx}{n} \right)}{\left[\frac{2dy}{n} + dx \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]^2} \quad (27) \end{aligned}$$

xdy=dxとしてこの式に代入すれば、

$$\begin{aligned} &\frac{y \left(1 - \frac{z}{n} \right)}{\frac{2}{n} + z \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} - \frac{\frac{yz}{n}}{\frac{2}{n} + z \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \\ &- \frac{\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) yz \left(1 - \frac{z}{n} \right)}{\left[\frac{2}{n} + z \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]^2} = B \quad (28) \end{aligned}$$

この式はzについての2次式であるので、次式の形となる。

$$z + \frac{F' + G'y}{2(F + Gy)} = \pm \sqrt{\left(\frac{F' + G'y}{2(F + Gy)} \right)^2 - \frac{F'' + G''y}{F + Gy}} \quad (29)$$

ここで、F、F'およびF''は、G、G'およびG''と同様定数である。もし粘着力が考慮に入れられれば、同様の式が

得られ、係数のみ変えればよいことがわらう。

この最後の解析から、粘着力と摩擦力とが知られている液体が容器 CBg の中に包含されているとすれば、壁 CB に対する圧力は Bg' の形がどうあろうと曲面 Beg が無限の液体に最大圧力を与える限りにおいて、同一になることが結論づけられる。しかし、もし曲線 Beg が容器の外側にあるなら、ありうるすべての面のうち最大圧力を与えるような面をみつけることが必要とならう。

もし容器に対する液体の粘着力と摩擦力が液体自身の内部的な値よりも小さければ、容器内の液体の圧力は無限の液体のそれよりも大きなものとならう。これらの注意の拡張は、上述の式の応用性と同様に特殊な考察を要求し、このエッセイで意図した簡単性から離れるので、この種の主題は別のところで扱うことを希望したい。いくつかの重要な問題の解はまだ十分には得られていないからである。

5. おわりに

以上にクーロンのエッセイの構成とその概要を、特に土圧に関する部分についてはまずい訳ながら全文を紹介した。この資料がクーロンの一側面を理解するにささかでも役立てば幸いである。クーロンの人となりやその時代の背景あるいはその後の研究界の流れなどについては、調査不足などもあって十分には触れることができなかった。機会を見つけて勉強してみたいと思う。なおハイマン (Heyman) の文献には、この点についてもかなり詳細に解説されており、この資料でも随所で参照させていただいたので、ここで謝意を表したい。クーロンに関心を持たれた方には、この文献の一読をお勧めするが、入手困難な場合には筆者らの手元に一部保管しているのでご一報いただければ幸いである。

最後に、ゴールダーも述べているように、われわれがみ慣れた Géotechnique の表紙のさし絵がクーロンのエッセイの締めくくりに記号を引用しているという事実、そしてここに何か暗示的なものを感じるということを指摘して終わりとする。

注1) 文1) P66参照。なお、クーロンの原典や文1), 2), 3)の訳で、原文に忠実な部分は『』、やや意識した箇所は「」, 単語訳で不確実なものは〔〕を付し、原語や英訳語などを付け加えることにする。その他現われる記号は原文どおりである。

注2) これはエッセイの緒言に、クーロン自身が言っている言葉として現われる (3参照)。

注3) 原文の表題はつぎのとおりである。

ESSAI Sur une application des règles de Maximis & Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture. Par M. Coulomb, Ingénieur du Roi

Heyman の英訳 (文3) はつぎのようになっている。

NOTE On an application of the rules of maximum and minimum to some statical problems, relevant to architecture By C. A. Coulomb, Ingénieur du Roi.

数学的には極大極小法則と訳すべきであろうが、とくに厳密な区別の必要がない限り最大最小法則と訳すことにする。

注4) 1717年に Gautier によって「知識者に提出された解決すべき五つの難問」として提言されたものと言われる。文3) P124参照。

注5) 文2) P152あるいは文3) P124—132を参照。とくに文3) では各研究者の研究内容が紹介されている。

注6) この概念は Terzaghi を待って初めて現われたものである。彼は1923年頃にこの概念を用い始めたと言われるが、その内容については1936年の第1回国際土質工学会議で発表した論文 “The shearing resistance of saturated soils” に詳しく述べられている。

注7) 原文では節番号が18節までであるが9節が二つある (ミスプリントと思われる)。

注8) Guillaume Amontons (1663—1705) は二つの個体あるいは円筒まわりに締めつけられたロープの実験によって、摩擦は接触面積によらず二つの物体間の圧力によってのみ決まると結論したといわれる。文3) P76—77参照。

注9) 原文は la résistance que les corps solides opposent à la désunion directe de leurs parties, Heyman 英訳 (文3) では the resistance that solid bodies offer to the simple separation of their parts となっている。

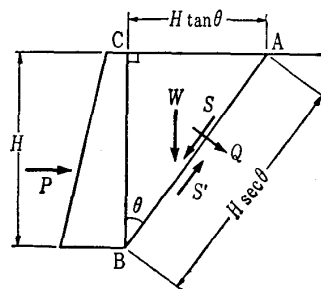
注10) 原文では式番号はついていないが、便宜上ここでは付すことにする。右辺は面CM上の作用せん断力を示す。左辺の第1項は粘着力の項で、底面DMの面積が a^2 とされていることからCM面の面積は $a^2/\cos x$ となり粘着力の総和であることが解る。また左辺第2項は摩擦の項である。今、面CMに直交する全垂直力は $P \cos x$ であるので、内部摩擦角で表わすとき $1/n = \tan \phi$ であることが明らかである。クーロンは、内部摩擦角という概念は用いていない。クーロン以後、安息角 [angle of repose] が内部摩擦角と混同されてかなり長い間混乱が生じていたといわれるが、表1の Golder の10番目の指摘はこのことを指している。 ϕ や c を実験的にかなり正確に見い出している例としては A. H. Bell (1915, 文4) がある。A. W. Skempton (1958, 文5) によれば、Bell と同時期に Frontard, これら以前にも ϕ を見い出そうとした研究が多くあることが知られるが、今日から見ると実験的な基盤を与えたのは Bell と考えてよさそうである。ただし、全応力、有効応力の明確な区別はそこでもまだ見られない。

注11) (3)式の2次方程式の根として求められる。

注12) 以下はエッセイのうち土圧に関する部分の全訳である。原文には記号の重複やかなりのミスプリントが含まれているが、一応原文になるべく忠実に訳すことにし、必要に応じて注をつけることにする。

注13) これが主動土圧の基本式である。今日的な表現で書き直せば、次図のようになる。

土塊ABCによるAB面上の垂直力 Q とスベリ力 S は、



$$Q = P \cos \theta + W \sin \theta$$

$$S = -P \sin \theta + W \cos \theta$$

一方、AB面上の抵抗力としての摩擦力と粘着力の総和は、

$$S = Q \tan \phi + cH \sec \theta$$

$S = S'$ とし P について解き、いくつかの三角関数変換を行なえば次式が得られる。

$$P = W \cot(\theta + \phi) - cH \{\tan \theta + \cot(\theta + \phi)\}$$

ここで、 $W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \theta / 2$ を代入すれば

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \theta \cot(\theta + \phi) - cH \{\tan \theta + \cot(\theta + \phi)\}$$

次に、(7)式で、 $A = P$, $a = H$, $x = H \tan \theta$, $1/n = \tan \phi$, $\phi = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \theta$ を代入し整理すれば上式と一致する。また、上式は

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \text{ のとき最大となり、結局}$$

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - 2cH \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \\ = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} - 2cH \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi}$$

が得られる。これが表—1に示した Golder の3番目の指摘に対応する。

注14) これが受働土圧の基本式である。この場合は前注の図で、面AB上で S はすべり上らせる力、 S' はそれに抵抗する力となり向きを逆に考えてよい。式の導き方は主動土圧の場合と全く同様で、結果は次式のようになる。

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \theta \cot(\theta - \phi) + cH \{\tan \theta + \cot(\theta - \phi)\}$$

同様に(9)式からも変数の変換を行えば、上式が求められることが確かめられる。

ここで、 $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ のとき P は最小となり、結局

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2cH \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \\ = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2cH \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

が得られる。クーロンは次節以降で主働土圧のみを扱っているが、受働土圧についても基本的な考え方は示しているわけである（表—1のGolderの8番目の指摘およびKeriselの2番目の指摘を参照）。

注15) Heyman は主働と受働で A と A' の値が変わるのみでなく、破壊線も変化することは興味深いと言っている（文3 P72参照）。この部分の文章は解りにくい、要するに主働および受働土圧を求めるには、おのおの最大最小の面を探す必要があるが、ここに扱ってきた例が直線であったので、他に曲線の破壊面がありうることを示唆したものと解釈できる。

注16) これは最大圧力とする方が解りやすい。主働土圧は壁に作用する圧力のうち最大となる面を探すことであったからである。しかし壁の押え荷重という観点からみれば、安定状態を保つ押え荷重の最小値と考えられないこともない。

注17) (7)式あるいは注13)と同じものである。

注18) (10)式の x についての2次方程式の根のうち正の値をとったものである。

注19) (10)式に代入して整理すれば次のようになる（文3 P72参照）。

$$m = \frac{g}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n}} \right)^2 \\ i = 2 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n}} \right)$$

注20) 摩擦がゼロということとは n を無限大にすればよく、 $x=a$ となって直角二等辺三角形となるから底角は 45° である。

注21) Golder（文1 P69）は、この文章は解りにくい、論理的には「線B'は dA よりわずかも大きい力の作用を受けることはできない」とするのが正しいとしている。Heyman（文3 P72）は、この文章の前半に対して「クーロンは極限平衡状態を考えている」と注を付け後半には何も触れていない。このどちらも正しいものと思われる。すなわち極限状態なので、BB'に dA より小さい力が作用すると考えるのはすでに無意味であり、また、 dA より少しでも大きい力の作用を受けると破壊してしまうはずであると解釈できる。

注22) この文献についての情報は解らない。

注23) 原文では les terres nouvellement remuées. Heyman は newly-turned soils, Golder は newly deposited earth と訳している。通常、擁壁の裏込め土は施工後埋め戻すので乱された土であり、粘着力は期待できないと解釈してよいであろう。

注24) 土の単位体積重量 g が、ここでは擁壁のそれと等しいと仮定して省略されている。Heyman はこのことを指摘し、 g を付して英訳している（文3 P54参照）。これ以後 Heyman にならって、原式では g が省略されている場合も g を付すことにする。

注25) 注13) の P_A の式で $P_A = 0$ として H について解けば限界高さが求められる。

$$P_A = H \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \left\{ \frac{1}{2} \gamma H \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \right\} = 0 \\ H \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \neq 0 \text{ であるから } \{ \} = 0 \text{ であり、したがって}$$

$$H = \frac{2c}{\frac{1}{2} \gamma \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)} = \frac{4c}{\gamma} \cot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

次に、 $a = \delta l / m$ で $a = H$, $\delta = c$ および l, m に注19) に示された値を代入し、さらに、 $1/n = \tan \phi$, $g = \gamma$ として変換すれば上式と一致することが解る。

注26) 前述の場合と同様 $\frac{dA}{dx} = 0$ として求める。その分子は

$$x^2 + \frac{2a}{n} x - \left\{ a^2 + Pa \left(1 + \frac{1}{n^2} \right) \right\} = 0$$

となり、これを x について解れば求められる。

注27) 鉛直壁面における摩擦力が荷重の減少分として取り扱われている。

注28) 注26) の場合と同様に2次方程式の根として求められる。

注29) $A = g x(a-x)/4$ を x について一回微分し x について解けば $a/2$ が求まる。

注30) $\int_0^b (b-a) dA$ ここで $dA = g a / 8$ を代入して解けばよい。

注31) 原文では mur de terrasse. Heyman 訳では terrace wall である。

注32) 有効応力の概念に到達していなくてもクーロンが水の存在についての深い認識を持っていたことがうかがわれる。

注33) この節でクーロンは連続体として扱おうと意図したことが明白である。しかし、Heyman が指摘しているように、もし gM がスベリを生じた面であるなら PM は同時に破壊面にはなり得ないであろう。ここでは連続体への近似的な応用の一例としてみるべきだろう。完全な液体であるなら摩擦力はむしろないとみた方がよいと思われることなど、この節は理解しにくい点が多いが、クーロンの土圧論ではむしろオマケの節であり、最後にクーロン自身が言っているようにそれ以後の発展した問題として取り扱うべき性質のものであると解釈される。

注34) 右辺第1項は $PMqP'$ の重量で、密度としては水が考えられていると思われる1とされている。第2項と第3項はおのおの鉛直方向の摩擦力と粘着力による補正項を示している。

注35) 微小三角形 $MM'q$ についての釣り合いが考えられている。ただし、ここでは MM' に生じる粘着力が省略されている。

注36) 鉛直方向の荷重の補正項としての粘着力も省略されている。

注37) このエッセイは Mémoires de Mathématique et de Physique, présentées à l'Académie Royale des Sciences par divers Savants, et lûs dans ses Assemblées, Vol. 7, 1773, P. 343—382, Paris (1776) に収録され、Théorie des machines simples, Paris (1821) に再録された。この間クーロンは校正の機会を持たなかったので、いくつかのミスプリントはそのままにされたと思われる。

参考文献

- 1) H. Q. Golder : Coulomb and Earth Pressure, Geotechnique, Vol. I, No. 1, 1948, p. 66-71.
- 2) J. Kérisel : Historique de la Mécanique des Sols en France Jusqu'au 20e Siècle, Geotechnique, Vol. VI, No. 4, 1956, P. 151—166
- 3) J. Heyman : Coulomb's Memoire on Statics, An Essay in the History of Civil Engineering, Cambridge at the University Press 1972
- 4) A. L. Bell : The lateral pressure and resistance of clay, and the supporting power of clay foundations, Reprinted from Minut. Proc. Instn. civ. Engrs, 1915, 199, P. 233—272, A Century of Soil Mechanics, ICE P.93—134
- 5) A. W. Skempton : Arthur Langtry Bell (1874—1956) and his Contribution to Soil Mechanics, Geotechnique Vol. VIII 1958, P. 143—157

(原稿受理 1973. 10. 2)

※

※

※