

パナマ運河における土質工学の発展

Development of Geotechnology on the Panama Canal

長 野 正 孝 (ながの まさたか)

運輸省港湾技術研究所情報センター長

はじめに

著者は、1990年2月までパナマにて、新パナマ運河計画を策定する「パナマ運河代替案調査委員会」に勤務し、1914年に完成した現パナマ運河の建設技術について研究する機会を得、幾つかの技術情報を収集してきた。その中で Culebra Cut (クレブラ・カット) と呼ばれる中央分水嶺の掘削工事は、土質工学的に興味深いものであった。それは、掘削土量の3分の1が地すべりの処理という土との闘いに終始した難工事で、今でも、世界に例の無い軟弱層における大規模掘削工事として評価されている¹⁾。

その後の一連の工事と相まって、その軟弱地盤対策技術はアメリカの土質工学分野を先導していった。本誌を借りてここにその技術発展の歴史を紹介させていただきたい。

1. パナマ運河に見る初期の土質調査技術

中米地峡の科学的な調査は1870年からアメリカ海軍によって始められたが、当時は縦断測量図でルートと比較したのみで、各ルートの土質比較は行っていなかった²⁾。土質が初めて議論されたのは、1879年、Ferdinand de Lesseps (レセップス) の招きで世界から研究者たちが集まり、中米地峡運河を議論した「パリ会議」で、それはパナマ・ルートが決定したという歴史的な会議であった³⁾。

当時は、岩の掘削や遠距離輸送はコストが掛かるというような常識的な議論が行われていたに過ぎなかった。今日、我々が土量計算と呼んでいる計算や土質調査は、レセップスのパナマ運河着工前の1880年に行われた。レセップスは1881年に海面式運河を着工し、中央分水嶺の掘削に1884年頃より取り掛かるが、彼の会社は資金不足と多くのトラブルのため

に1889年に倒産する。しかし、会社は Culebra の地層について概略把握していた。南方側の斜面が問題で、そこには柔らかい地層の上に硬い玄武岩層が載っているという報告を行っている²⁾。

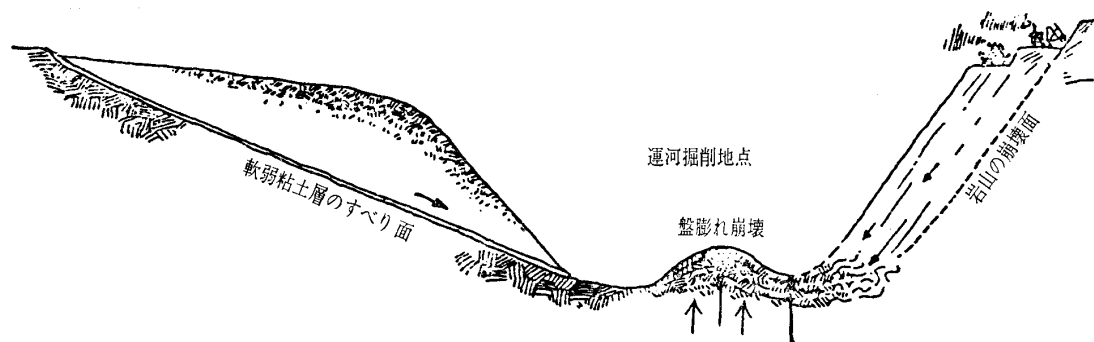
フランス時代からも地すべりは起き、その原因が柔らかい Cucaracha (クカラッチャ) 層にあることも判明していた。Cucaracha 層とは、Culebra の南の Gold Hill (ゴールド・ヒル) と Contractor's Hill (コントラクターズ・ヒル) 付近の Cucaracha を中心に厚さ 120 m (400 ft) で横たわっている灰緑色の頁岩の層で、その付近以外にはない特殊な地質で、その崩壊のメカニズムは降雨と密接な関係があった。乾燥した状態ではこの地層は安定しているが、水を含むと極めて不安定になる地質であった⁴⁾ (口絵写真-10)。

パナマでは、雨は4～12月の間の雨季に集中する。Culebra の地下水位は、乾季には地表から12mであったものが、雨季には2～5mと高くなる。地下水位が高くなると地すべりが始まることが、明らかになってきた。フランス時代は表面をはいだ程度で工事を中止したため、地すべりの恐ろしさは分からなかった。

2. アメリカの工事と地すべり

1904年からアメリカの建設は始まったが、当初、Culebra のすべての土質に対して29mの高さまで3 (水平) 対 2 (鉛直) の勾配で設計をした。地すべりは、本格的な掘削が始まった1907年から起こった。まず、38万 m³ の土砂が2週間にわたって動き続け (4.3 m/日) たのが最初であった。さらに、同年、Culebra に近い東岸の頂の少し下にクラックが発生、次いで崩壊が起きた。その後、その兩岸の至る所でさまざまな形態の崩壊が起き始めた。大きな崩

事例報告



図—1 Culebra の崩壊メカニズム
(Panama and The Canal (Abbot J.A.) より)

壊は1911～1912年にかけて多発した。レールやスチーム・ショベルが土砂に頻繁に埋まった。1911年から設計変更してのり面の安定勾配を大きく取ったので、安定したように思われた。しかし、1913年初頭、150～230万 m^3 の土砂がすべり落ちた。1913年10月、ようやく、所定のレベルまで掘り下げたので、Gamboa（ガンボア）という Culebra Cut の北端の締切堤を撤去し、Gatun（ガツン）湖の水を掘った水路に流し込み、掘削は浚渫船による作業になった。その直後、北の東岸の Gold Hill の一部が崩れ落ち運河を閉鎖した。1913年から1914年にかけてこれを除去している間、その基部を中心に崩壊は続き、運河の開通を遅らせた（口絵写真—11）。

1914年8月15日、1億7700万 m^3 の土砂を掘削し、“SS Ancon”（アンコン号）の通過をもって開通とした。その2か月後の1914年10月、Gold Hillの北で幅610m、55.3万 m^3 の土砂が水路に崩れ落ち、運河を閉鎖した。崩れ落ちる少し前から、水深13.7mの水路の底が少しずつ隆起し始め、水面まで20cmに迫ったとき、崩落が起き、山全体が崩れた。その後、運河は1915年7月、9月と崩れ、1916年4月まで約7か月間閉鎖された。この崩壊もその直前に水路の中央が隆起して島ができ、崩壊が発生したと記録されている（口絵写真—12）。

運河の通水によって水が Cucaracha 層の山塊全体に浸透し、やがて山自らの重みに耐えられなくなり、次第に塑性変形を起こし崩壊したとされている。1916年の年報では、そのほかの小さな崩壊でも675万 m^3 の浚渫を必要とし、これらの大崩壊土砂を完全に除去するには、730万 m^3 の掘削を必要としたと述べている。その後、小さな崩壊は続き、運河は

1920年に2日閉鎖されたのを最後に閉鎖は起きていない。

このように掘削と崩壊を繰り返してきたのが Culebra の歴史であった^{1), 5), 6)}（図—1）。

現在も、わずかずつであるが崩壊を続け、維持浚渫によって対応している。

3. アメリカの総合地質調査と土質力学の進展

3.1 地すべり防止策

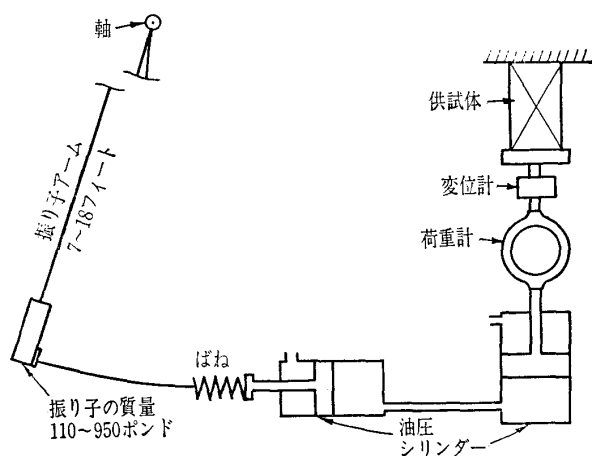
開通後の現場では崩壊の防止、予知のために1915年から地下水調査観測用のパイプが埋め込まれ、水位観測が行われるようになった。乾燥状態では極めて安定している地層も、水が浸透するとすべり面を形成し、大きな円弧で崩壊して行くことが明らかになった。

この時代、土質力学が発達していない時代であり、経験的に各種の対策が段階的に採られていった。採られた対策は、トンネル、側溝による水はけ、斜面の植栽、クラックの封鎖、工法の検討などで、今日考えても同じような対策であったと思われる。

3.2 土質調査

(1) 運河地帯の土質

アメリカは工事期間中に5073本のボーリングを行い、さらに、1936年の「第三閘門計画」、その後1947年の「運河地帯総督調査」で、運河周辺の地質調査を綿密に行った⁷⁾。その結果、パナマ地峡では、5000万年前に地峡の一部の地域が局部的に地峡と交差する形で海の中に陥没し、そして、再び隆起するという繰返しと火山活動の結果、今日のような堆積岩、火成岩、変成岩が複雑に入組んだ地層を形成し、



図一 2 カサグランデの実験装置⁹⁾

軟質の底泥、粘土、シルト、砂利を含む表土以外に10種類以上の土が混ざっていることが判明した。

(2) Cucaracha 層の崩壊の特徴

崩壊は幾つかの異なった形態をとり、Macdonald (マクドナルド) はこの崩壊を4つのタイプに分類している。

① 深く掘削したときのすべり

運河の水路を開削すると軟らかい地山が自重で変形して水路にゆっくりとすべり落ちるケース

② 構造的すべり

運河掘削現場での段差などの構造的に弱い部分からすべるケース

③ 泥流すべり

急斜面を泥流がかけ下るケース

④ 複合すべり

上記3つが組み合わさったすべりのケース

(3) 構造力学的な解明

ある程度正確に斜面勾配設計できるようになったのは、近代土質力学の発展を見た第二次大戦直前のことである。Wilson V. Binger (ビンジャー) と Thomas F. Thompson (トンプソン) によって、崩壊の元凶であったCucaracha層の内部摩擦角 13.5° 、粘性強度 1.13 kgf/cm^2 が計測された。そして、斜面の設計条件として粘性強度 1.13 kgf/cm^2 、内部摩擦角 10° 、安全率1.3が決定した⁹⁾。

(4) 動力学特性の解明

パナマ運河は軍事優先に造られた運河であり、国防省は、第二次大戦中に日本が真珠湾の次にパナマ

運河攻撃に来ると真剣に考え、防衛策を講じていた。閘門やダム破壊活動以外にもCulebraの軟弱層に高性能爆弾を落とされて閉鎖される場合も想定して、ハーバード大学の土質力学の第一人者のA. Casagrande (カサグランデ) らに、動的地盤解析を依頼した。彼らは一軸と三軸の圧縮試験装置に振り子式、重錘式、油圧式の3つの動的加圧装置を連結した装置を開発して実験を行った。その結果、Cucaracha層の動的強度は一軸の場合、静的強度の1.5倍、三軸の場合、2.0倍であるという結論を1947年に報告した。この装置は現在用いられているものと原理的には同じであるが、現在ではサーボ油圧方式や、加圧時間をさらに短くするために衝撃波を用いたものなどがありかなり改良されている。戦前にすでに動的試験を行っていたことを評価したい⁹⁾。

しかし、Casagrandeはこの時、速度効果しか検討していない(現在では、繰返し載荷効果も重要であることが指摘されている。さらに粘土の動的強度の大きさは初期せん断応力、載荷周期で変化することも知られている(図一2))。

(5) 「両洋間運河調査委員会」の掘削勾配基準

1970年の「両洋間運河調査委員会」では、パナマのルートについて、工兵隊が過去の経験と実験から土質ごとの切土高の変化に対する斜面勾配の基準化を試みた。これはJAX 46と呼ばれる基準で、現在、公表されているものではこれが最新の基準である⁴⁾。

(6) 「パナマ運河委員会」の技術水準

運河を管理している「パナマ運河委員会」は、1980年代から地すべり制御プロジェクトを開始し、Culebraに数十メートルごとに傾斜計を埋め込み、地下水の状態、斜面の変位と応力の関係を計算機に掛けて解析を続けてきた。その結果、地山全体の挙動が分かるようになった。責任者のGeorge Berman (ベルマン) によれば、現水路のルート15の掘削改良計画の場合、ほぼ正確な斜面設計が可能であるとのことである。

また、斜面の勾配の答えは一つだけではなく、ある幅の範囲に存在するということである。すなわち、斜面の傾斜をある程度急にとれば、崩壊は安定するまで続き、土砂を維持浚渫で除去し続けなければならない。崩壊が生じない勾配にすれば、莫大な土量を掘削する必要がある。この議論の精度を上げてゆ

事例報告

けば、究極的には経済学の議論に入っていくことになるとも指摘していた。

4. おわりに

今後の Culebra の研究課題としては、現代の大量かつ大規模な急速施工技術を投入することになるので、施工管理面から地山の挙動を解析していくことが求められる。ベルト・コンベヤー、リクレーマーなどの大型重機を狭くて軟弱な切り通しに数多く投入できない可能性もあり、その場合、掘削工法、コストにかかわってくる問題になるおそれがある。

参 考 文 献

- 1) Goethals G.W.: Introduction Paper-International Engineering Congress, 1915.
- 2) Sullivan J.T.: Report Historical and Technical

Information relating to the Problem of International Communication by way of the American Isthmus, Washington Printing Office, 1983.

- 3) McCullough D.: The Path between the Seas, A Touchstone Book, Simon and Schuster, New York, 1977.
- 4) 国際協力事業団企画部特別調査室：パナマ運河代替案関連補助調査, 1987.
- 5) PCC(ICC): Annual Report.
- 6) Goethals G.W.: Dry Excavation of the Panama Canal, International Engineering Congress, Paper No. 10, 1915.
- 7) Stratton J.H.: The Future and the Panama Canal, Proceedings of ASCE, Vol. 74, 1948.
- 8) Binger W.V. and Thompson T.F.: Excavation Slopes, Proceedings of ASCE, Vol. 74, 1948.
- 9) Casagrande A. and Shannon W.L.: Strength of Soils under Dynamic Load, Proceedings of ASCE, Vol. 74, 1948.

(原稿受理 1991.12.18)