

盛 土

おおねよしお
大根義男*

1. はじめに

盛土構造物といえば、道路、鉄道、飛行場、あるいは河川堤防やフィルダム等が想像されるが、最近では、これらに加えて各種造成工事も盛土構造物として注目されるようになった。そして、これらの規模は年々大型化し、道路や造成工事においても20mを上回る盛土も少なくなく、またフィルダムに至っては堤高200mを超える超大型のものも建設されるようになった。土砂を盛り立てた斜面の安定性は土の締固めが基本となるのはいうまでもないが、人類はすでに紀元前から土を締め固め、土構造物を建設する知識を得ていた記録がある。例えばヨルダンの Jawa に建設されたアースダムは世界最古と考えられているが、このダムは飲料水や灌漑を目的とし、紀元前4000年頃に築造され、その上流斜面は岩塊で保護されていた¹⁾。

一方、我が国においても西暦2～3世紀ころには灌漑用水源池として、アースダムが姿を現しているが²⁾、我が国に本格的なアースダムが登場したのは4世紀ころのことである。このダムは河内国（現大阪府）に築造された狭山池で、今でいう洪水吐を備え、その堤高は15m程度といわれている³⁾。また、9世紀には香川県の満濃池が弘法大師により、それまでの小堰堤のかさ上げや洪水吐の設置がなされ、その施工技術は今日でも高く評価されている⁴⁾。

このように盛土構造物の出現は社会的な要求からアースダムの建設に始まるのであるが、盛土の設計や施工に対し、土質力学的な考察が加えられるようになったのは19世紀半ば以降である。すなわち、Terzaghi により、それまでの土質力学が体系化され、その著書が1922年に出版され、また1933年には Proctor によって土の締固め特性が明らかにされ、最適含水比の概念が紹介された。この中で Proctor は現在行われている突固め試験法とほぼ同様の試験法を提案した⁵⁾。その後、実務の面から締固め密度とせん断強度との対応がなされ、盛土構造物の築造時における締固め密度が定められるようになった。そしてこのころを契機として、ヨーロッパやアメリカでは大規模なフィルダムや道路等の盛土構造物の建設が行われ、同時に各種の転圧機械の研究開発も盛んに行われた。そして例えば、羊の群の通り抜けた後地が高度に締め固められていたことからタンピングローラーの脚の形状を羊の足をまねたもの（現在の Sheep's

foot roller）や土の含水比の高い、いわゆる湿地帯における転圧機械としてウェーブローラー等が登場した。また、1950年前後における世界の主要国で建設されたフィルダムの数を調べてみると（ICOLD ダム台帳）、それ以前は年間10個程度であったのに対し、これ以降は約800個に急増しており、また堤高も、100mを越えるようになった。このことは主として、上記のような技術革新によるものであることはいうまでもない。

2. 盛土構造物の事故

盛土構造物はその目的から水利構造物（河川堤防やダム）と一般構造物に大別することができ、これらの事故はそれぞれ固有のものと共通のものがある。固有のものとしては、水利構造物の場合は水理的な要因によるものであり、これらは例えばパイピング、クイックサンドあるいは、最近話題となっているハイドロリックフラクチュア、更には河川や貯水池の水位変動に伴う、堤体内に発生する非定常浸透による斜面崩壊等である。また共通の事故としては施工中に発生する過剰間隙水圧、盛土内への地下水の浸入による間隙水圧の上昇に基づく崩壊等があるが、このほか、特に造成地の場合は地盤の沈下による被害が挙げられる。

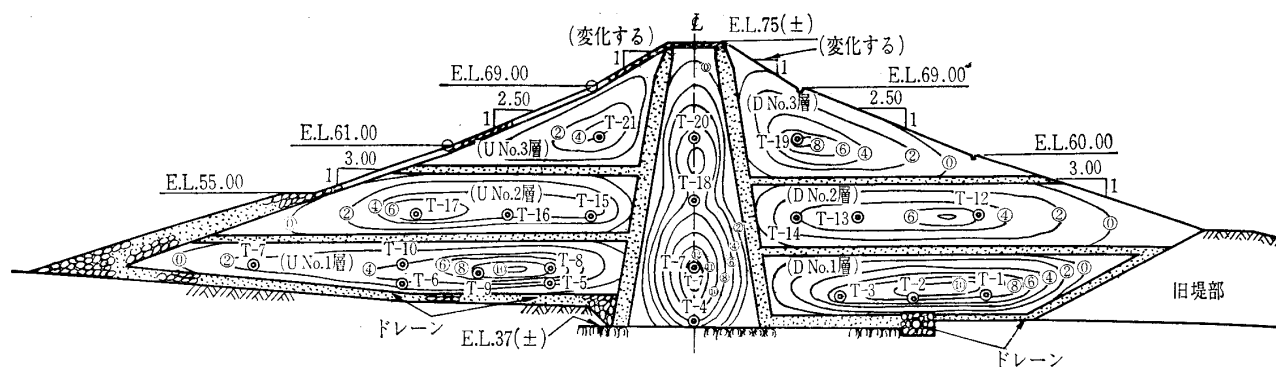
水利構造物の場合、特に河川堤防では崩壊の大多数は越流と基礎地盤を通る浸透水による、のり先付近の洗掘であることが報告されている⁶⁾。確かに堤防の、のり先付近には洪水時に発生したと思われるパイピングの跡（地元民はガマと呼んでいる）をしばしば見かけるが、これが堤防の破局的崩壊の誘因となることはいうまでもない。このため、アメリカの工兵隊（Corps of Engineers, U.S. Army）は1940年から堤防基礎地盤の浸透に関する大がかりな模型実験を行った^{7), 8)}。そしてこの結果に基づいて、ミシシッピ川やミズーリ州の河川堤防に対し、リリーフウェルを始めとする排水施設や河川敷内に不透水性のブランケットを設け、堤防の安全管理に効果をあげたが、我が国の河川堤防ではこの種の施設はほとんど見当たらない。

一方、透水性の地盤上に建設されたアースダムに対しても、この頃から上記河川堤防の場合と同様、ダム上流に不透水性のブランケットを設け、また同時にダム下流側にはリリーフウェル等、基礎地盤の浸透水による揚圧力を低減させるための施設が設けられるようになった。そして我が国においても、このような型式のアースダムが数多く登場するようになり⁹⁾、その安全性も確認されるようになった。

更に堤体内の非定常浸透に伴う斜面崩壊については Reinius（ライニウス）ほかの研究により堤体内に残留する間隙水圧の見積もり方法が提案され^{10), 11)}、また斜面活動に対する有効応力による解析法の導入により、その結果の信頼性も高められるに至った。

一方、一般盛土構造物では、しばしば斜面崩壊や沈下による被害が問題となるが、この場合の斜面崩壊は二つの原

*愛知工業大学教授 工学部

図-1 菊田ダムの盛土終了時に観測された間隙水圧(m)¹²⁾

因が考えられる。すなわち、その1は水利構造物の場合も同様で、施工中に発生する間隙水圧の見積りの誤りであり、また他の一つは締固め不足と不飽和盛土の浸水による土の強度低下である。

盛土の施工中に発生する間隙水圧は、我が国の場合は特に深刻である。これは我が国の場合、築堤材料の自然含水比が概して高く、この状態で施工される機会が多いからである。過去、盛土の施工中に観測された間隙水圧は全応力に対し100%に達した例も少なくなく、これによって崩壊したものもある²⁾。施工中に発生する間隙水圧を見積もる方法はほぼ確立されており、これらは高盛土の設計に際して有効に利用されている。また盛土中に発生する間隙水圧が異状に大きくなると予想されるような場合は堤体内にドレーンを配置することがあるが、この例を間隙水圧の観測値と併せて図-1に示した¹²⁾。

また、造成地では、しばしば地山部と盛土部との境界付近での不同沈下やすべり破壊が問題となる。これらに対しては最近、境界付近に排水施設を設け、盛土内への浸透水の浸入を防止したり、盛土の締固め管理を十分行うようになり、この種の問題はほとんど見られなくなった¹³⁾。

以上、盛土構造物を水利構造物と一般構造物とに大別し、事故の特徴と原因についての概略を述べたが、このほか我が国の場合、特に注目しなければならないことは地震による被害である。盛土構造物の地震時の安定性を検討する方法として、震度法の適用が定着している。

過去、道路や溜池などの盛土構造物は地震時にかなりの被害を受けている。しかし、上記の震度法を適用して設計され、近代的な施工法や施工機械を駆使し、建設されたアースダムやロックフィルダムは重大な被害を受けていない¹⁴⁾。このことは震度法による設計法の合理性を示すものと考えられる。しかし、設計震度を上回る地震力を経験したフィルダムが、それほどの被害を受けなかったという事実は震度法に対する疑問を残すものであり¹⁵⁾、今後の研究が望まれる。

3. 風化土の締固め特性

盛土が安定であるための条件は締め固めた土のせん断強

度を十分把握し、安定解析により合理的な断面形状を決定することである。土の締固めはいうまでもなく、盛り立てた後の沈下を少なくし、せん断強度を高め、また、透水性を小さくするなど、所要の力学的性質を得るためである。所要の力学的性質は盛土構造物の目的や規模、構築材料の組成および盛立て条件などによって決定される。

盛土の締固め密度は標準的な突固め試験を行い、その最大乾燥密度を基準として決定される。最大乾燥密度に対する盛立て乾燥密度の比を D -値と呼び、式(1)で表すが、この値は一般に、比較的小規模（堤高の低い）な盛土に対しては $D \geq 85 \sim 90\%$ 、フィルダムや堤高の高い盛土の場合は $D \geq 95\%$ としている。しかし、このように定められた締固め密度は常に不飽和状態であるので、盛土内にいったん水が浸入すれば、飽和度に応じたせん断強度の低下が起こることになる。このため、常に水の浸入を許容するフィルダムにおける締固めは D -値のほかに飽和度を規定することになる。この場合の飽和度は通常、 $S_r \geq 85 \sim 90\%$ であり、我が国の場合、土の自然含水比が比較的高いので、実際の盛土施工に当たって、この値を確保するにはそれほど問題とならない。

$$D = \frac{\text{盛土の締固め乾燥密度}}{\text{突固め試験による最大乾燥密度}} \cdots \cdots (1)$$

しかし、近年盛土規模の大型化に伴い、締固め後の安定性の高い粗粒分を多く含んだまき土や風化泥岩等、自然含水比の低い材料を好んで盛土材料として使用する傾向にある。この種の材料に対しては、当然のことながら高いエネルギーを与えた突固め試験結果が基準となり、これに伴って盛土も接地圧の大きい転圧機械により締固めが行われることになる。

例えば、アメリカの道路局では低含水比の材料に対してはAASHTOに代わって修正AASHTOを基準として採用している。修正AASHTOはAASHTOの約4.5倍の突固め仕事量である。

我が国でも上記のような粗粒材料に対しては、JISの2～4倍程度の仕事量を与えた突固め試験結果を基準とすることがあるが、これに対し、最近いくつかの問題点が指摘されている。これらは例えば、高い突固めエネルギーを基

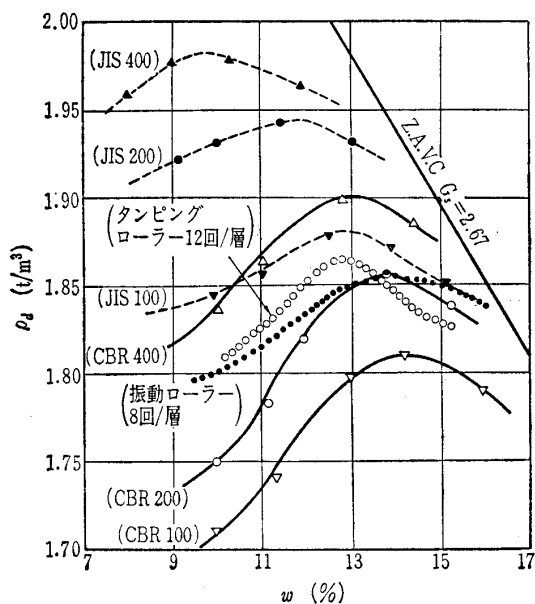
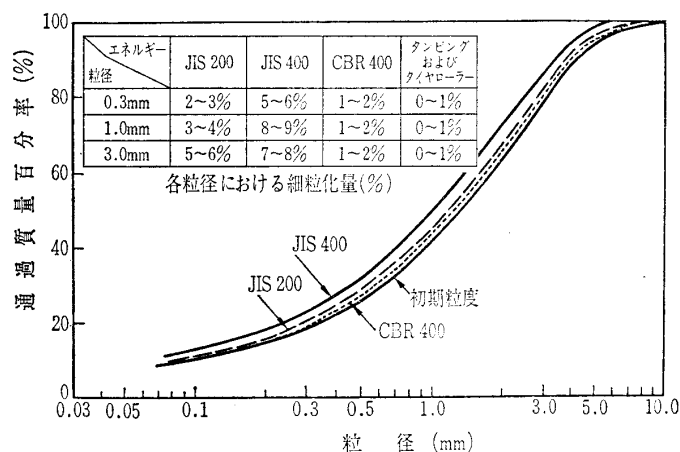
土質工学40年の歩み

準として定められた設計乾燥密度を、実際の盛立てにおいて得るのが容易ではない場合があるということである。この理由として、高いエネルギーを与えて突き固めた場合に生ずる粒度組成の変化が挙げられる。図-2はまさ土に対し、突固めエネルギーを変えて求めた突固め曲線であり、また図-3はそれぞれの突固めエネルギーを与えて突固めを行った前および後の粒径加積曲線である。図中にはタンピングローラーや振動ローラーを用いて転圧した後の乾燥密度も示してある。この図で明かなように、JISの400%の突固めエネルギーを与えて突き固めた後の粒度曲線は、平均7~8%の細粒化が起きている。これに対し、ローラー転圧の場合は、いずれも細粒化はほとんど確認されない。このことは締固め密度の管理において、盛土材料と組成を異にする材料の突固め試験で得られた乾燥密度と盛土の締固め乾燥密度とを比較することになり、結果に対して不合理な判定をすることになる。このことは第3紀の泥岩、シルト、砂岩等の場合も同様である¹⁶⁾。

図-2には突固めの際、土粒子の細粒化が起こらないように、CBRの突固め試験機を用い、JISの2~4倍のエネルギーを与えて突き固めた結果も示してある¹⁷⁾。これらの結果は同図中に示したタンピングローラーや振動ローラーで締め固めて得られた締固め曲線と良く対応している反面、JIS突固め試験結果とは大幅に相違している。以上の試験結果でも明かなように、現行の突固め試験法で得られる密度は現場において各種転圧機械を用いて締め固めた密度に必ずしも対応するものではない。したがって今後現行突固め試験法の改訂を含めた議論が必要となるであろう。

4. 火山灰土の締固め特性

火山灰質のローム土は転圧などの外力を与えることにより軟化し、また軟化した状態で放置しておくことによって再度強度の復元が見られる。この性質はシキソトロピーと

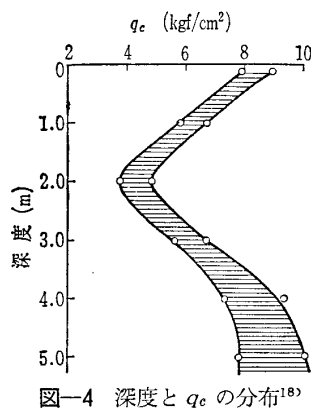
図-2 まさ土の突固めおよび転圧試験結果¹⁷⁾図-3 まさ土の細粒化試験結果¹⁷⁾

いわれているが、最近では地震などの外力が作用した場合、粘性土においても上記と同様に軟化することが認められることから、粘性土の液状化と呼ぶこともある。いずれの呼び方が適当かは後日議論することとして、前者は化学的な性質を意味し、後者は工学的表現であると考えたと理解しやすい。

この種のローム質土は最近、道路やアースダムなどの盛土材料として利用されるようになり、盛土中に発生する変形や斜面安定が注目されるようになった。図-4は最近施工されたアースダムの施工管理の記録である¹⁸⁾。この種の土の施工は、通常コーン指数(q_c)値で管理され、本ダムの場合もコーンペネトロメーターにより施工管理がなされた。そしてこのダムの場合にはタンピングローラーを用いて締固めが行われたが、締固め後において、 $q_c \geq 8 \text{ kgf/cm}^2$ が管理値として定められた。しかし、図で明かなように表層から深さ方向に q_c の値は逐次低下し、その最小値は深度2m付近において、 $q_c \approx 4 \text{ kgf/cm}^2$ となり、また深度2mを過ぎると強度は再び増加していることが知れる。この種の強度低下は転圧機械や材料運搬用機械の運行による繰返し荷重によって生ずるものと考えられた。この強度低下を確認する目的で室内において、動的繰返し三軸試験が行われた。試験条件は盛土中に土圧計を設置し、有効繰返し荷重とその回数が観察され、これによって決定された。

試験結果の1例を荷重回数 n をパラメータとして、 qu'/qu と σ_a/σ_0 との関係において図-5示したが、図で明かなように、 $\sigma_a/\sigma_0 \geq 1.5 \text{ kg·f/cm}^2$ での強度低下の著しいことがうかがわれる¹⁹⁾。このことは含水比の高いシキソトロピーの性質を有するような材料の締固めは軽量のものがより有効であることを意味し、またこの種の一時的な強度低下は盛土中、表層付近の、いわゆるローカルなすべりの誘因ともなると考えられる。

以上のように火山灰質ローム土の盛土中に起こる強度低下は施工中に発生する間隙水圧と同様、斜面の安定性を脅かすことになるので、これらに対しては、設計・施工に先

図-4 深度と q_c の分布¹⁸⁾

立って、その特性を十分検討しておく必要がある。

5. 今後の課題

盛土斜面の安定性を精度よく議論しようとする、盛土の不均質性やこれに伴うせん断強度の発揮の形態、あるいはすべり面の形、解析方法等、様々な問題を明らかにしなければならない。ここではこれらのうち、斜面安定に最も関係の深い不飽和盛土の安定問題を取り上げてみた。

盛土斜面の安定性は実務の面から全応力法 (su 法) と有効応力法 (c, ϕ 法) とを用いて検討されることが多い。すなわち、施工中の、いわゆる短期安定は全応力法により、また長期安定は有効応力法により評価しようというものであり、一般に盛土は不飽和であるから短期安定には、せん断強度として、

$$s = c_u + \sigma \tan \phi_u \dots\dots\dots (2)$$

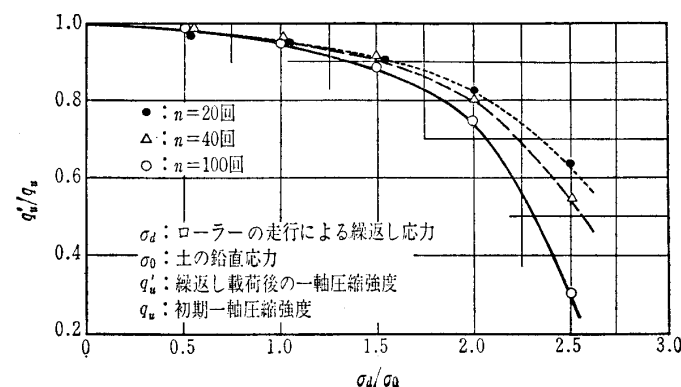
が用いられるが、この値は土の含水比と締固め時に与えるエネルギーの大きさによって大幅に変化する。例えば比較的高い含水比の土を締め固めれば、せん断強度は締固めエネルギーとは無関係に

$$s = c_u (\phi_u \approx 0) \dots\dots\dots (3)$$

となり、圧密の終了時点で、

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots\dots (4)$$

が成立する。これに対し、含水比の低い土を高い締固めエネルギーを与えて締め固めると、過圧密土で見られるような強度特性を示すことになる。しかし、この強度は一般によく知られているように、盛土が飽和することによって、

図-5 振動三軸圧縮試験結果¹⁹⁾

サクシオン効果を失い、終局的には c' , ϕ' に帰着することになる。したがって、 c' , ϕ' を用いて設計された盛土斜面は長期的に安定であるということになる。

しかし、実際には盛土が不飽和から飽和に移行する時点で様々な問題が起こることが確認されている。これらは例えば、一般盛土では、地下水や降雨などによって盛土が局部的に飽和すればその部分の強度低下と沈下が起こり、これが盛土の局部的な緩みの原因となり、遂には大規模な崩壊をもたらすことになる。また、フィルダムにおいて、貯水位の上昇によりコア内部で、この種の強度低下や沈下が発生すれば、アーチングやせん断変形が起こり、これがハイドロリックフラクチュアの誘因となる²⁰⁾。事実 Boulderhead ダムや Teton ダムなどは初期の貯水によって崩壊しているが、その原因はコア部の浸水に伴う不同沈下によるものと考えられている²¹⁾。このように盛土は常に不飽和状態で施工され、また将来飽和するものと考えられるので、飽和過程において、力学的性質の変化が起きることになる。今後ハイドロリックフラクチュア現象を含めてこの種の問題に対する究明が望まれる。

参考文献

- 1) Penman, A.D.M.: On the embankment dam, Géotechnique 36, No.3, pp.303~348, 1986.
- 2) 山口・大根: フィルダムの設計及び施工, 技報堂, 1973.5.
- 3) 日本土木史, 土木学会, 1965.
- 4) 満濃池, 香川県.
- 5) Lambe, T.W.: Soil Testing for engineers, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- 6) 山村・久楽: 堤防補強に関する考察, 土木研究所報告, 145号, 建設省土木研究所, 1974.2.
- 7) Middlebrook, T.A. & W.H. Tervis: Relief Wells for Dams and Levees, Proc. ASCE, 1946.
- 8) Bennet, P.T.: The Effect of Blankets on Seepage through Pervious Foundation, Trans. ASCE, Vol.112, 1946.
- 9) 愛知用水技術誌, ダム編, 1962.8.
- 10) Sherard, J.L. et al.: Earth and Earth Rock Dams, John Wiley and Sons, Inc., 1963.
- 11) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂, 1968.9.
- 12) 山口・大根: 荻田および東郷アースダム, 建設工事における土質工学の実用例, 土質工学会, 1969.
- 13) 大根: 高盛土の設計・施工及びその品質管理, 土と岩, No. 34, 中部地質調査業協会, 1986.
- 14) フィルダム耐震懇談会資料, 建設省, 1980.
- 15) 大根: 牧尾ダムの振動挙動, 第20回土質工学研究発表会, 特別セッション, 1985.6.
- 16) 大根: 盛立て材料としての岩塊の諸問題, 土と基礎, Vol.32, No.7, 1984.
- 17) 田沢ダム盛土試験報告書, 岐阜県, 1989.6.
- 18) 長柄ダム盛土安定解析報告書, 水資源開発公団房総導水路建設所, 1983.
- 19) 大根ほか: 締固めた関東ロームの強度特性に関する研究(I), (II), 愛知工業大学研究報告, No.19, 1984.
- 20) Narita, K., Y. Ohne: A Study on the Crack Generation in Fill-Type Dams, Soils and Foundations, Vol.18, No.1, 1978.
- 21) Ohne, Y., K. Narita: Some Consideration of the Teton Dam Failure, 愛知工業大学研究報告, No.13, 1978.

(原稿受理 1989.9.7)