

泥岩の力学的性質に関する研究

愛知工業大学総合技術研究所所長 大根 義男
財団法人 東海技術センター 中村 吉男

1. はじめに

我が国において、泥岩をフィルダムの構築材料として本格的に使用したのは佐布里ダム（愛知県企業庁、1966年完成）であり、このダムでは泥岩を中心コア材料として利用している。その後、山村ダム（三重県企業庁）、五位ダム（農林水産省）他や道路盛土等においても泥岩は大々的に使われるようになり、この種の材料の研究も各方面で進められるようになった。しかし、泥岩は材料として利用する場合ばかりでなく、地山の状態においても風化し易く、また風化に伴う強度低下が起こることが知られており、その長期安定性において一抹の不安が残ると考えられている。

一方、近年フィルダムの建設において、ダムサイト周辺で経済的に採取可能な構築材料を風化が進行しているとの理由から大量に廃棄し、ダムを建設した例が少なからず見受けられるが、このことは泥岩の場合と同様、材料の長期的安定性において問題があると考えられているからである。

しかし、フィルダムに限らず土質構造物の特徴は、置換盛土などの、特別な場合を除いて現地産の経済的に入手可能な材料を有効に利用することであり、その意味においては材料の廃棄は経済性を無視した行為と言わざるを得ない。土質構造物の構築に際し、自然材料の大多数は構築材料として利用可能と考えるべきであり、そのためには材料としての力学的諸性質を十分な精度で明らかにする必要がある。そして、工学的立場から材料の利用方法を、また力学的見地から盛土構造物の構造を選定しなければならない。

ここでは、一般土質構造物の構築材料として必ずしも適当とは考えられていない泥岩について、その力学的諸性質を調査、試験した結果を報告し、この結果に基づいてその合理的利用方法について提案しようとするものである。

2. 泥岩の分類とその特徴

岩塊はすでに述べたようにフィルダムを始め、道路、鉄道などの路床、路盤、宅地造成あるいは護岸工事などほとんどの土木工事に欠くことのできない材料の一つである。通常岩塊は、硬岩と軟岩に二大別されるが、工学的及び地質学的観点から表-2.1のごとく分類すると岩塊利用上、かなり便利である¹⁾。この表では、岩の地質年代、成因、構造物質などの面から、第三紀以新に生成された堆積岩のうち、砂岩、泥岩（シルト岩を含む）、頁岩、凝灰岩などを軟岩、これ以外の火成岩、変成岩などを硬岩と呼び、硬岩や軟岩の風化したものを、それぞれ硬岩の風化岩（単に風化岩）および軟岩の風化岩（風化軟岩）と呼称することとした。

表-2.1 岩塊の分類¹⁾

分類	硬岩	風化岩	軟岩	風化軟岩
特性				
岩種	火成岩, 変成岩		第三紀以新の堆積岩	
一軸圧縮強度	300kgf/cm ² 以上	300kgf/cm ² 以下	300kgf/cm ² 以下 (100kgf/cm ² 以下が最も多い)	50kgf/cm ² 以下
吸水率	5%以下	5%以上	5%以下	5%以上
弾性波速度	2.5km/s以上	2.5km/s以下	1.0~2.5km/s	1.0km/s以下
骨材の安定性試験 (JIS A 1122)	5サイクルで12%以下	5サイクルで12%以上	サイクルで12%以上 (スレーキングしやすい)	1サイクルで粘土状になる
その他の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 採取には発破を必要とする ボーリングのコアは棒状 	<ul style="list-style-type: none"> 採取には主にリッパーを使用 ボーリングコアは数センチの岩塊や岩片となり、粘土分も含む 	<ul style="list-style-type: none"> 採取は主としてリッパーで行う ボーリングコアは棒状となるが乾燥時にひび割れを起こす 	<ul style="list-style-type: none"> ボーリングコアは硬い粘土状で乾燥時にひび割れを起こす 転圧によって粘土化する

我が国において、これら軟岩は全国的に広く分布しており、その面積的割合は約 19%に達すると言われている²⁾。

軟岩は拘束状態から解放され、自然条件下に放置されると容易にスレーキングや風化を起し強度が低下する。この現象は軟岩塊を締固めて盛り立てた構造物においても見られることがあり、これによって構造物が沈下したり、崩壊した例が過去、数多く報告^{1), 3), 4)}されている。

地山状態において、拘束圧解放後に発生する強度低下の理由として、泥岩内部の潜在的亀裂(ヘアクラック)の存在と含有粘土鉱物(モンモリロナイト系)が挙げられる。潜在的クラックは地山部を掘削した際、その応力解放により出現する。したがって、斜面を鉛直に掘削した場合よりも緩く掘削した場合の方がクラックは出現し易く、また応力解放直後はサクシジョン力の効果によりクラックの出現も少なく、したがって斜面崩壊に対する安定性も高い。しかし、時間の経過とともにサクシジョン力は消滅し、これに伴ってクラックも出現し、遂にはクラック内に地下水の浸入を許しこれが間隙水圧として作用し、またモンモリロナイト鉱物を含有する場合は斜面は膨張し強度低下が起り崩壊することになる。そしてこのことは塊状岩の場合も同様である。

3. 泥岩塊の粒度特性

軟岩や風化岩を構築材料として使用する場合、岩塊は撒出し・転圧過程において破碎され、細粒化することになる。細粒化の程度は重機械の種類や重量あるいは岩質等によって異なる。そして盛り立てられた構造物の安定性や耐久性は締固め密度に支配され、また締固め密度の大きさは材料の細粒化の程度によって定まる。したがって、この種の材料を扱う場合は材料の細粒化特性を良く理解しておくことが大切である。締固め後の粒度分布が悪い場合は密度が小さい。このため岩塊の風化や浸水時のスレーキングを助長することになり、構造物の沈下や崩壊の誘因となる。これに対して締め固められた岩塊の粒度分布が良好な場合は密度も高く安定性も優れている。

軟岩の細粒化は比較的規則正しく起こるので、その粒度分布は Talbot (タルボット) の提案⁹⁾した式 (3.1) を用いて表すと便利である。すなわち Talbot によれば P を材料の通過百分率、d を材料の粒径、D を最大粒径、n を指数としこれらの関係を表したもので、 $n = 0.25 \sim 0.5$ で最も良く締まる粒度分布であるとしている。

$$P = (d/D)^n \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

盛土の中にできるだけ空隙を残さないことが、強い土構造物にするための条件である。そのためには、できるだけ締固めに都合のよい粒度 (ウェルグレード) になるように採取・掘削方法や撒出し方法および使用する重機械を選定することが大切である。例えば、泥岩を掘削する際、最大粒径がなるべく小さくなるような配慮必要であり、この時点で細粒化しておくことは撒出し厚さに大きな影響を与えることになる。図-3.1 は瑞浪泥岩についてリッピングの方法を数種類変えて行い、掘削後 32 t 級ブルドーザで走行圧砕した後の粒度を示したものである。この図からリッパーの数が多きほど、また根入れ深さが浅いほど細粒化していることがわかる。また、発破を必要とする場合は最小抵抗長と爆薬量を変えることにより調整することができる。図-3.2 は一軸圧縮強度 (q_u) が $20 \sim 100 \text{kgf/cm}^2$ の奄芸泥岩を油圧リッパーを用いて採取し、これをブルドーザで撒出した後の粒度範囲 (A) とタンピングローラーを用いて転圧した後の粒度範囲 (B)、および各転圧ローラーを組み合わせて締め固めた後の粒度範囲 (C) を示したものである。図で明らかのように、撒出し後の粒度範囲は Talbot 式の指数である $n = 0.3 \sim 0.6$ 、タンピングローラーで転圧した後は平均的に $n \approx 0.3$ 、複合転圧後は $n = 0.2 \sim 0.3$ の範囲である。n の値は岩の硬軟や亀裂の発生状況、風化の程度などによって異なるものと考えられるが、他の泥岩の試験結果でも概ね上記と同様な結果が得られている。これらの結果から、軟岩に対して、撒出し、転圧等の外力を与えることによって起こる粒度変化の特徴として、以下の事項が挙げられる。

- ① 細粒化は粒度分布が平行移動する形 (相似粒度) で起こる。
- ② 撒出し後の n の値は、リッピング採取時に $n = 0.4 \sim 0.6$ の範囲となり、通常の転圧によって細粒化した材料では $n \approx 0.3$ である。
- ③ 転圧によって土層全体を $n \leq 0.2$ の粒度状態にするのはかなりの困難を伴う。

軟岩の転圧過程における粒度変化がこのような特徴を示すことは工学的に重要な意味を持つ。例えば、軟岩をフィルダムなどの不透水性材料として使用する場合、n の値と透水性の関係を求めておくことによって、許容最大粒径を決定することができる。また、後述するように、締固め後のスレーキングや風化による強度低下に対しても n 値との関係を整理しておくことにより適正な品質管理手法を決定することができる。

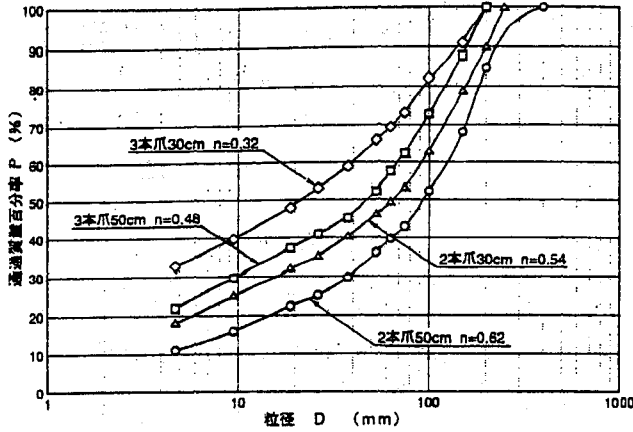


図-3.1 リッピング方法の違いによる粒度曲線⁹⁾

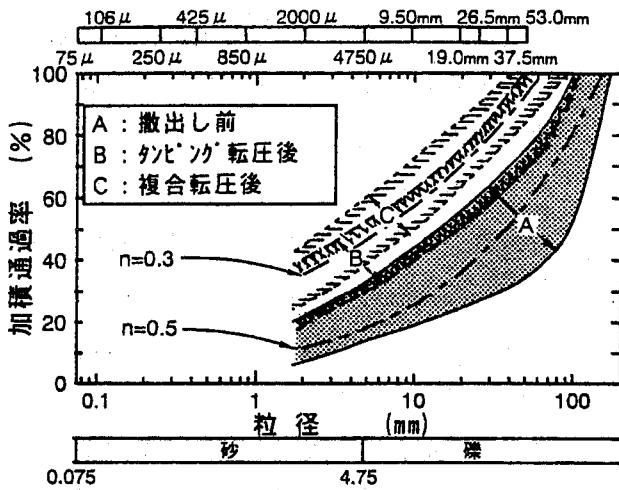


図-3.2 奄芸泥岩(山村ダム)の細粒化程度⁹⁾

4. 泥岩塊の締固め及びせん断強度特性

4-1 泥岩の締固め特性

岩塊を締め固めた際、密度の大きさは主として材料の粒度組成に支配されることが知られている。このことから、比較的新鮮な岩塊を盛り立て材料とするロックフィルダムなどでは、工学的性質を判定するための締固め度は通常、相対密度によって評価される。これに対し、軟岩は締固めによって細粒化するため、締固め後の工学的性質は岩塊材料というよりはむしろ、礫まじりの土質材料としての性質が強く現れ、このため、この種の材料の締固め度は、一般には密度や空気含有量を基準として判定される。

礫質材料の締固め特性は、例えば Walker-Holtz (ウォーカ・ホルツ) の提案した方法により明らかにされるが、軟岩に対してこの方法を適用するのはあまり好ましくない。この方法は、締固め後の全体土 (-4.76mm) のみの密度によって締め固

まり程度を判定するものであり、そのためには土分と岩塊分とを洗浄などによって分離しなければならない。しかし実際問題として細粒分と岩塊分とを精度よく分離することはかなり面倒であり、したがって、Walker-Holtz の方法によって締固め程度を判定するのは必ずしも適当とは考えがたい。

図-4.2 は、直径 20cm、高さ 30cm のモールドを用い締固め試験を行った結果を、初期粒度の礫率と密度の関係で整理して示したものである。試験に用いた試料は、初期粒度分布が図-4.1 に示すとおり $n = 0.4 \sim 1.0$ となるよう調整した。図-4.2 には締固めエネルギーとして JIS100% と JIS200% を与えて得られた結果を示してある。これによると JIS100% のエネルギーで締め固めた結果は Walker-Holtz の実験結果で見られるように、礫分の増加に伴って全体の密度が低下するような傾向を示している。これに対し、JIS200% のエネルギーを与えて締め固めた結果では礫分の増減による密度の変化が認められない。このことは高いエネルギーを与えて締め固めた場合、締固め後の粒度は初期の礫含有量には関係なく、ある一定粒度に近づくことを意味する。事実、礫率の異なる各材料を締め固めた後の粒度分布は、すべて図-3.2 に示した粒度範囲におさまっている。これらの結果から、軟岩の締固め程度を判定する一つの方法として、軟岩自体の密度（見か

け比重)を基準とした次の方法がより合理的と考えられる。すなわち、締め固めた後の乾燥密度を軟岩自体の乾燥密度と対応させるものであり、所要の締め固め度(Dn)を次式で表す¹⁾。

$$D_n = \frac{\text{全体の締め固め乾燥密度}}{\text{軟岩の乾燥密度}} \times 100 \dots\dots\dots (2.2)$$

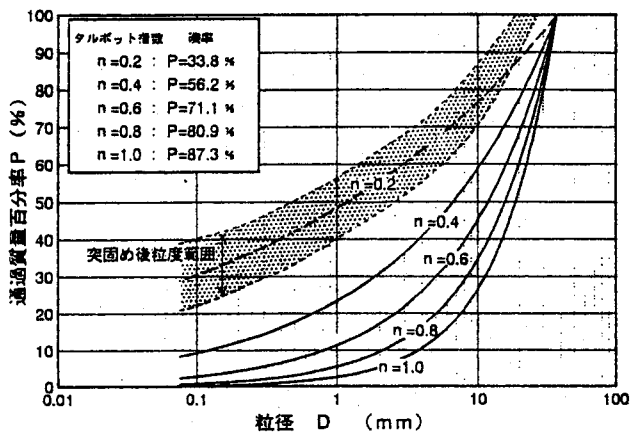


図-4.1 突固め試験に用いた泥岩の粒度

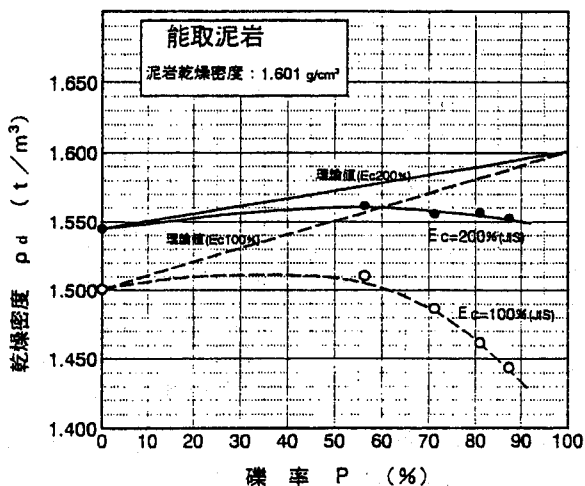


図-4.2 泥岩の濃率と突固め密度

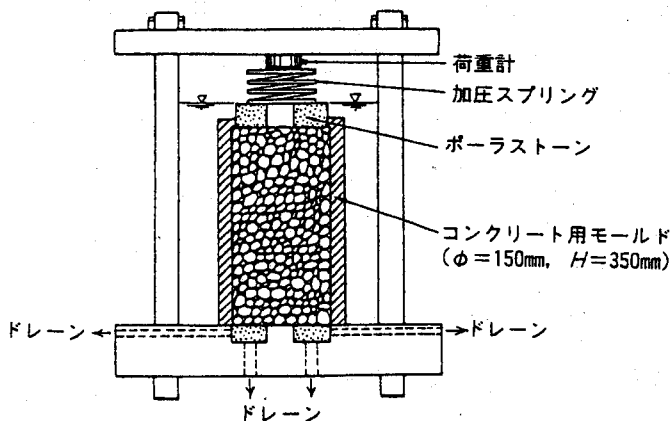


図-4.3 風化試験装置

4-2 泥岩の強度低下特性¹⁾

泥岩材料は、乾湿繰返し作用を受けることによって細粒化するとともに強度低下を起こす。泥岩盛土の強度低下は粒度分布、締め固め条件に加えて岩塊部分が周囲から受ける拘束圧によって支配されることが知られている。そこでこれらの諸条件を考慮した室内実験を行って盛土材料の強度低下特性を明らかにした。

(1) 室内実験方法

試験は、直径 150 mm、高さ 350 mm の二割モールドを用い、この中に軟岩材料を静的に締め固め、鉛直荷重 $P_v = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ を作用させた状態(図-4.3)でコンクリート骨材の安定性試験と同様な方法で行った。すなわち、供試体を硫酸ナトリウム溶液に 24 時間浸したのち炉乾燥(110℃)する過程(試験中は鉛直変位を測定)を 1 サイクルとして 5 サイクル繰返す(以下風化試験と呼ぶ)。風化試験終了後、供試体を取り出し

B.P(バックプレッシャー) $= 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_3 = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ で約 1 日等方圧密し、軸ひずみ速度 0.25%/min のひずみ制御で三軸圧縮試験を行った。なお、供試体の締め固め条件は表-4.1 に示すとおりであり、実施工を想定し粒度分布はタルボット式で、締め固め密度は D_n 値で評価した。

表-4.1 風化試験の基本条件

鉛直荷重 $P_v = 0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
粒度分布 $n = 0.4, 0.5, 0.6$
締固め度 D_n 値 = 85%, 90%

(2) 実験結果

図-4.4 はタルボット式の指数 n と強度比 R 風化前後の圧縮強度の比で式 (4.1) の関係を示したものである。図で明らかなように、細粒分が多く締固め密度が高い試料ほど、また風化試験時の鉛直荷重が大きいほど強度低下が小さくなることわかる。図では $n = 0.4, 0.5$ の一部の試料で $R > 100\%$ となり風化

試験後の強度が風化試験前の強度を上回っているが、これは風化試験時に作用荷重によって供試体が密実化したものと推察される。また、岩塊の比重・吸水試験によると、強度低下が小さい試料 ($R \geq 70\%$) の岩塊の吸水率はインタクトな岩塊の吸水率と大差なく、岩塊自体のスレーキングはそれほど進行しないものと考えられる。図-4.5 は、 n と R の関係から $R = 80\%, 90\%, 100\%$ となる n を読みとり、拘束圧と n 値の関係を示したものであり、現場で発生する材料の粒度組成 (n) と所要の締固め度 (D_n) から推定した強度低下率と拘束力の関係を示したもので、これによって所要の強度に対応する実際の盛土における覆土の厚さを定めることができることを示している。

$$R = (\text{風化試験後の平均軸差応力}) / (\text{風化試験前の平均軸差応力}) \times 100\% \dots (4.1)$$

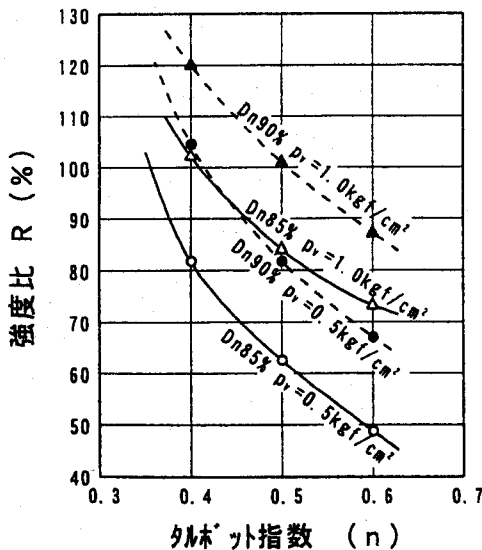


図-4.4 タルボット指数と強度比の関係

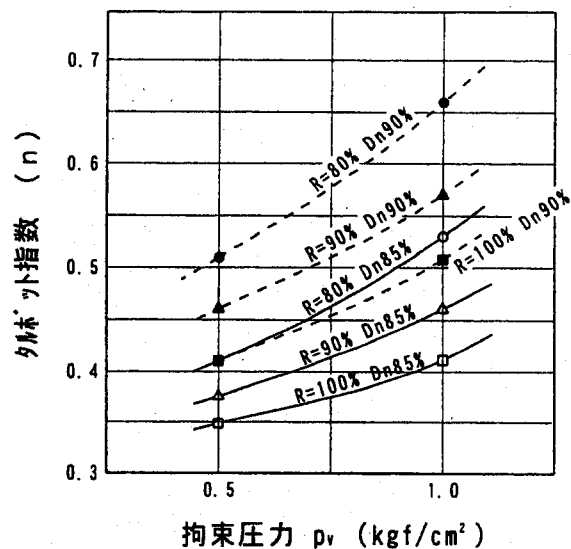


図-4.5 タルボット指数と鉛直荷重の関係

5. 実務への適用¹⁾

前項において述べた試験結果は主として岐阜県東濃地方に分布する瑞浪層群の泥岩に関するものである。瑞浪市近郊においてこれら泥岩を主材料とする 42 m に及ぶ高盛土の宅地造成が計画され現在工事が行われている。以下は本盛土の設計と施工管理に関する報告である。

5.1 盛土設計

図-4.5 によれば、風化作用により強度低下を起こさないための拘束圧は、 $R=100\%$ を設計条件とすると、 $D_n \geq 90\%$, $n=0.5$ の場合、 $p_v=0.95\text{kgf/cm}^2$ 、すなわち約5mの覆土が必要となる。しかし本地区において、覆土として使用可能な段丘堆積層および土岐砂礫層は土量的に厚さ2.5mが限度であった。断面形状決定においては、斜面勾配、盛土の強度が主たる要素になるが宅地造成法では、盛土の場合斜面勾配は1:1.8が標準となっているので、ここではこの値を採用することとした。

盛土の強度は図-4.5 で示されるように粒度組成（タルボット指数）、締固め度（ D_n ）および風化作用による強度低下などによって異なるので、各要素の組合せによって数多くの断面構造が考えられる、例えば覆土2.5m（ $\approx 0.5\text{kgf/cm}^2$ ）に対し強度低下の起こらない n 値は $n \approx 0.35$ となるように材料を細粒化し、 $D_n \geq 85\%$ とすればよいことになる。しかし、表層すべりに対しては $R=100\%$ の強度は必要なく、また $n \approx 0.35$ とするための材料採取は経済的にも好ましくないので、種々検討を重ねた結果斜面の安定上支障のない範囲で強度低下を許すこととした。そして材料採取程度を $n \leq 0.6$ とし図-5.1 に示すように拘束荷重の小さい表層部に対しては $D_n \geq 90\%$ 、下層部を $D_n \geq 85\%$ とした。

5.2 施工

材料の採取方法としては各種方法が考えられ、採取される程度に大きく影響する。各種掘削機械を用いて採取試験を行った結果、リッパーによる採取がもっとも経済的であるとの結論を得た。表-5.1 の仕様で行った採取試験では前出の図-3.1 に示すリッパーの爪の数と採取粒度の関係が得られ、この関係を参考として「3本爪50cm根入れ」による採取方法を採用することとした。

また転圧は振動ローラーを用いた盛り立て試験の結果、 D_n 値90%に対しては撒出し厚50cm、転圧回数8回/層とした。図-5.2 に品質管理試験の結果を示した。この図で明らかなように盛土の締固め度は設計値を十分満足する結果が得られている。

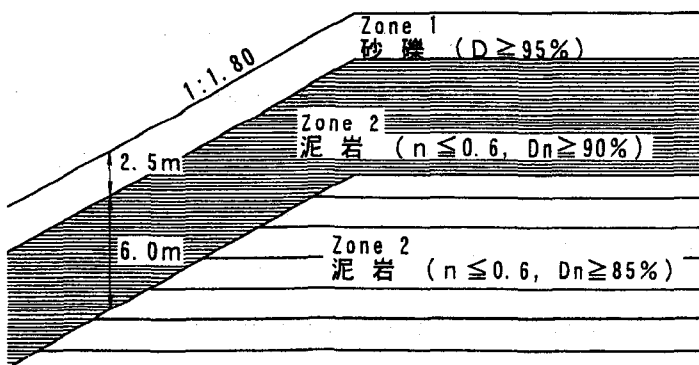


図-5.1 泥岩材料 (Zone2) の施工管理基準

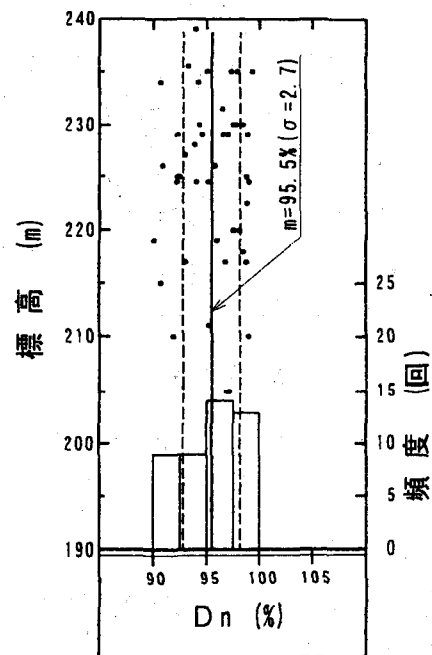


図-5.2 泥岩の品質管理試験結果

6. あとがき

以上泥岩材料を用いた盛土の設計・施工例を述べた。過去泥岩材料を用いた盛土構造物の崩壊や不当沈下等の被害が数多く報告されている。この結果、泥岩材料ばかりでなく硬岩の風化した材料までが盛り立て材料としてあまり好ましくないと一部では考えられている。しかし、材料の力学諸性質を十分把握し工学的立場からその利用方法を工夫することによりこの種の材料は十分利用可能であり、安定性も他の自然産材料と同様に確保する事ができる。ここでは、宅地造成の盛り立てを例として述べたが、盛り立て構造物に対する基本的な考え方はフィルダムの場合も同様であるので、今後この種の材料を積極的に用いた経済的ダムの建設が望まれる。

【参考文献】

- 1) 大根義男：盛り立て材料としての岩塊の諸問題，土と基礎，Vol.32，No.7，pp3-8，1984
- 2) 地盤工学会編：土質・基礎工学のための地質学入門，入門シリーズノ.3，P.59，1979
- 3) 島博保・今川史郎：スレキング材料（ぜい弱岩）の圧縮沈下の対策，土と基礎，Vol.28，No.7，pp45-52，1980
- 4) 浅田秋江：1978年宮城県沖地震による宅地造成地被害の土質工学的検討，第15回土質工学研究発表会講演集，pp.1333～1336，1980
- 5) W.B.Fuller & S.E.Thompson：The Laws of Proportioning Concrete，Trans. A.S.C.E.，1907，pp67-43
- 6) 三重県企業庁：山村ダム工事誌，1975
- 7) 中村吉男・大山英治・大根義男・成田国朝：スレキングに伴う軟岩材料の強度低下について，土木学会第49回年次学術講演会概要集，1994
- 8) 中村吉男・小島淳一：軟岩材料を用いた盛土の品質管理，第5回調査・設計・施工技術報告会発表論文集，pp.15-24，1996