

## VI—3 フィルダムにおけるアスファルトしゃ水壁工法の技術の現状と課題

北海道大学工学部 正員 菅原照雄

## 1. ま え が き

## (1) 概 説

我が国でフィルダムのしゃ水壁にアスファルトしゃ水壁が採用され始めてから十数年を経過した。それらは表に示すように、1つをのぞいては堤高70m級以下のものであったが、最近、それらよりさらに堤高の大きな90メートル級のダムへの採用が東京電力により計画されようとしている。また貯水池内の地山が透水性の場合の漏水防止の為に4万平方メートルを超える大規模なアスファルトしゃ水壁が、山梨県による大門ダムにおいて現在施工中である。

筆者は約20年前からこれらの建設に関与し、またここ2～3年の間に建設省、ダム技術センター、電力各社等の御好意によって、これらの幾つかを改めて調査する機会を得た。本稿ではそれらにもとづいて、主としてアスファルトの側からみたアスファルトしゃ水壁の技術の現状、既往のダムのパフォーマンス、問題点、今後の課題等について述べてみたい。

水関係構造物へのしゃ水材料としてのアスファルトの利用の歴史はきわめて古い、本格的にそれがダムなどに利用され始めたのは1930年代からであり、現在までに建設された表面しゃ水壁タイプのダムで、堤高50メートルを超えるものは20ダム近いとされているが、未だ普遍的に採用されるには至っていない。

アスファルトを遮水目的に用する方法としては、幾つかのものがあるが、本稿では主としてアスファルト表面しゃ水壁工法について述べることにする。

## (2) アスファルト表面しゃ水壁の主な施工例、構造例

表は我が国における比較的大型のフィルダムのしゃ水壁への利用例を取りまとめたものである。堤高は深山ダムを除いてすべて70メートル以下である。深山ダムは同時に表面しゃ水壁を採用した、世界で最もダム高さの大きなダムの一つである。表ならびに図-1に示した表面しゃ水壁の構造は、我が国における最近の主要な事例を示したものである。これらしゃ水壁は図-1のように、通常最上層から順に、保護層、上層、中間層、下層、レベリング層並びにマカダム層の6層から構成される。マカダム層の下は堤体の外皮部を構成するトランジション層である。これらの各層は夫々次のような固有の役割をもっている。

保護層は上層のアスファルトコンクリートを直接水、太陽光線、空気にさらすのを避ける趣旨でおかれる数ミリの層である。通常は硬質のアスファルトにフィラーをまぜたもので、場合によっては添加剤を混合す

表 我が国でのアスファルトしゃ水壁の実施例

| ダ ム 名 | 大 津 岐                                 | 二 の 倉   | 新 高 野 山 | 深 山       | 沼 原   | 多々良木  | 双 葉  |
|-------|---------------------------------------|---------|---------|-----------|-------|-------|------|
| ダ ム   | 遮水壁舗設完了年                              | 1968    | 1969    | 1971      | 1972  | 1973  | 1978 |
|       | 事業主体                                  | 電源開発    | 青森県     | 東京電力      | 農林省   | 電源開発  | 農林省  |
|       | ダム高(m)                                | 52.0    | 37.0    | 33.0      | 75.5  | 38.0  | 57.4 |
|       | ダム頂長(m)                               | 165     | 108     | 380       | 334   | 1597  | 283  |
|       | ダム体積(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 362     | 184     | 325       | 1967  | 1273  | 1464 |
|       | 上流のり面勾配                               | 1.7     | 2.0     | 1.8       | 1.9   | 2.5   | 1.8  |
| 遮 水 壁 | 面積(10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )   | 11.1    | 7.3     | 15.4      | 44.6  | 140.0 | 28.7 |
|       | 全層厚(cm)                               | 30.0    | 27.0    | 18.0~28.0 | 35.5  | 30.0  | 33.0 |
|       | 上層厚(cm)                               | 5×2     | 4×2     | 5×1~5×3   | 6×2   | 5×2   | 6×2  |
|       | 中間排水層厚(cm)                            | 8       | 10      | 0         | 8     | 8     | 8    |
|       | 下層厚(cm)                               | 5       | 5       | 0         | 6     | 4     | 5    |
|       | レベリング層、マカダム層の厚さ(cm)                   | 3.5+3.5 | 4       | 5+8       | 6+3.5 | 4+4   | 4+4  |

る場合もある。一般に非透水性であるがこれに止水を期待するものではない。上層は、しゃ水壁での最重要部分で、透水性が小さく、かつ力学的にも安定性の高いアスファルト・コンクリートを舗設する。貯水池側からの水はここで遮断する。多くの場合2層に分けて設置される。

中間層は、上層と逆に透水性の高い空隙率の大きい混合物で作られる。保護層、上層を透過してきた水を排水する役割をもち、排水層の名で呼ばれることもある。下層は、堤体

内の水からしゃ水壁を守る部分と考えればよい。従って上層と同じく透水性の低い混合物が用いられる。レベリング層は、不陸整正のための層であり、さらにこれからの上の層の機械施工を容易にするための基盤を作るための層である。またマカダム層は施工中のトランジションの仕上げ、保護のための層と考えればよい。

アスファルトしゃ水壁は堤体、地山からの背圧に対してはほとんど抵抗できないので、トランジションは背圧発生を防止するために、堤体側からの水に対して十分な排水機能をもつ必要がある。また寒冷地ではこの層が凍上防止層を構成する。

### (3) ダム技術側から指摘される問題点

アスファルトしゃ水壁については堤高の小さい場合はともかく、堤高70メートル程度を超えるフィルダムへの利用に、ダム技術者はいくつかの疑問をもっている。それらを整理してみると、

a. 比較的薄いアスファルトしゃ水壁が数十年、場合によっては100年を超える期間老化しないでその性能を保ち得るか、流動してしまったり、亀裂が発生したりしないか。

b. アスファルトしゃ水壁と堤体との複雑な動的、静的相互作用のもとで、しゃ水壁がどのような挙動を示すかが不明であり、設計が極めて難しい。

c. 経験が比較的少なく、安全性の実証が不十分、その供用性に関する報告事例も少ない。

などに要約できよう。これらの率直な疑問に対して明瞭な結論は見出せないのが現状というべきであろう。しかし、後述のように70m級ダムしゃ水壁の供用性が次第に明らかになりつつあり、さらに堤体の力学的解析手法の発達とアスファルトの側での物性研究の進展に伴って、経済性を追及したさらに高いダムへの適用が検討され始めた段階と言えよう。

## 2. アスファルト混合物の力学特性

### (1) アスファルト混合物とは

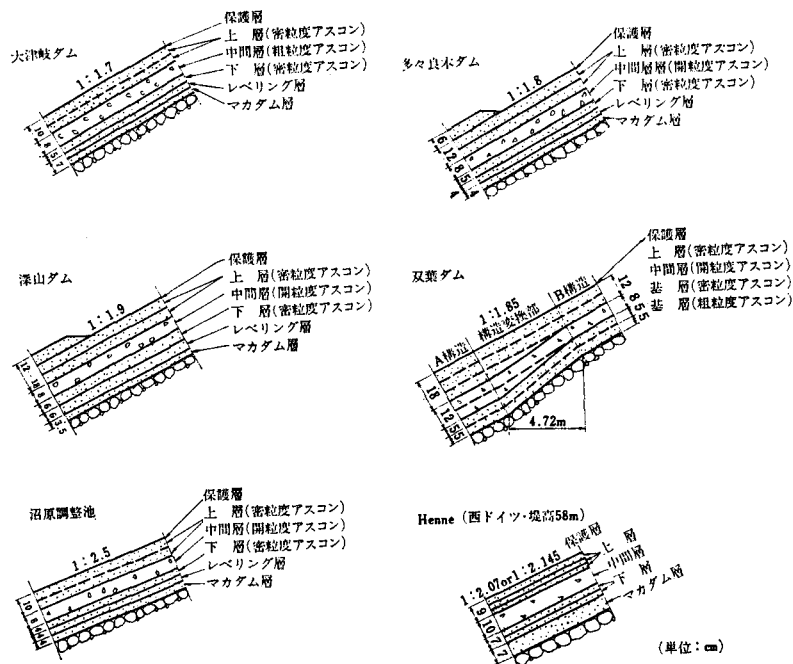


図-1 アスファルトしゃ水壁の構造例

アスファルト混合物はアスファルト、石灰石粉（200番ふるい通過約80%以上）、砂、碎石などからなる。水工用では耐水安定性を増大させるための添加剤や流動防止のためにアスベストなどを混合する場合もある。アスファルト混合物の特徴の一つに、アスファルトの量、硬さ、骨材粒度を変えることにより、目的ごとに多様な材質の選択が可能ながあげられる。しゃ水壁用アスファルト混合物は、道路用のそれとかなりことになっている。

## （2）力学的性状

アスファルト混合物は、その力学的性状から、その変形抵抗が何に依存するかによって、力学的に3つのタイプに分類される。

（1） マカダム型混合物 ： 粗な混合物、透水性大

（2） アスファルト・コンクリート型混合物 ： 密な混合物、流動抵抗比較的大

（3） マスチック型混合物 ： 密な混合物、高温で容易に流動

（1）は主として骨材の内部摩擦角に依存するもの、（2）は内部摩擦角と粘着力の双方に依存するもの、（3）は主として粘着力（アスファルトの粘性）に依存するものである。中間層、マカダム層に利用されるものは（1）のタイプに属し、空隙率は20～30%である。しゃ水壁上層用混合物は、（2）に属するが、（3）に非常に近い性質を示す。空隙率は2～4%と考えればよい。保護層材料、コンクリート構造物との接合部に用いられ、マスチックアスファルトは配合としては無空隙であるが、1ないし2%程度の連行空気を含む。道路表層用は（2）に属し空隙率は3ないし5パーセントである。（3）は高温で（2）に比べて著しく流動しやすい。上層用混合物は、ごく僅かのアスファルトの増減で力学性状が著しく変化し、道路用混合物に比して配合設計、現場品質管理がきわめて重要である。

## （3） 温度、時間依存性

アスファルトは、そもそもが温度によってその性状が大きく変化し、また変形の速度、荷重が作用している時間によってもその力学的な性状は著しく変化する。この性質を温度・時間依存性とよぶ。極めて複雑ではあるが、現在では物性の測定法も普及しており、比較的容易にその全体を把握することが可能である。

## （4） 高温安定性

しゃ水壁の場合には自重にもとづく斜面での“ダレ”が非常に重要であり、これを安定性とするのが適切であろう。これをスロープフローと呼んだりする。ダムしゃ水壁で予測される最高温度は、水面より上では夏季には60℃にも達するが、水面下では水温と同じと考えてよい。従来の経験では、ダレがみられるのは主として、水面上の直射日光にさらされる部分である。従って斜面安定性は60℃を基準として検討される。

## （5） 強度と破壊ひずみ、変形係数

アスファルト混合物における強度の定義はきわめてむずかしい。曲げ、圧縮、引張り強度、変形係数は、温度と載荷速度に非常に大きく依存している。従ってアスファルト混合物の強度を一口に表現してしまうのは難しい。破壊のときのひずみ（伸び限度）についても同じことが言える。

従ってしゃ水壁用アスファルトのような場合には、温度と載荷速度（載荷時間）を変化させた広範な強度、伸び限度試験を行っておき、力学解析から、堤体のある部分に作用する応力あるいはひずみ量を求め、混合物の物性がそれをクリアできるか否かを検証する方法がとられる場合が多い。

一般には低温では、コンクリートの強度にも匹敵する非常に大きな数値が得られ、高温では強度とは呼べないような小さな数値しか得られない。一方、急激に作用する荷重にたいしては強度は非常に大で、ゆっくりとかかる荷重に対しては強度は小さくなる。

伸び限度は、強度とは逆に低温・高速で小さく、高温・低速で大きくなる。アスファルト混合物は粘弾性体であり、弾性係数という表現は使用できず、通常変形係数の名で呼ばれる。低温・高速載荷時には、コンクリートに匹敵する  $200,000\text{kg/cm}^2$  を超える大きな変形係数をもつ。

## （6） 耐久性

しゃ水壁用としての耐久性は、力学的な意味での疲労と、材料の老化の2つの角度から検討される必要がある。繰返し荷重による強度、変形係数の低下については従来の研究成果からみてほとんど問題にする必要がない。一方、アスファルトは紫外線にさらされ、また空気と触れて酸化重合をおこし、もろい材料に変質して行く。しゃ水壁用の場合、アスファルト量が多く、密実でほとんど水、空気を透過させないこと、さらに保護層によって、透水・透気も実質的にゼロに等しいものにするのが通例であり、保護層が完全な場合には、これらの一般的にいう老化現象はみられないとされている。とくに水中部分についてはアスファルトの劣化や、混合物としての性能低下はきわめて少ないといわれる。

水面上の保護層は常に大気に暴露される部分であり、多くの場合10年位でなにがしかの老化現象が見られるようになる。保護層が劣化したような場合には上層に劣化が及ぶともいわれ、この意味では、しゃ水壁の耐久性に保護層が非常に大きな役割をもつことがわかる。常時水面上或は水面が上下する部分の保護層はある年間で当然補修を必要とするものと考えた方がよい。

#### (7) 透水性

アスファルト混合物はアスファルト量を増し空隙率を4%以下にすることによって容易に $10^{-7}$ cm/secの透水係数を確保することができる。従ってしゃ水という面では十分にその機能を果たすとみてよい。

### 3. しゃ水壁の構造

#### (1) 概説

構造の事例については先にも述べたが、ここでは一般的なしゃ水壁の構造設計について述べておく。アスファルトしゃ水壁の構造設計は、しゃ水壁の断面設計とカットオフなど、コンクリート構造物等への取付け部の設計、アスファルト混合物の機械施工を考慮した形状設計等になろう。また直接しゃ水壁の基盤となり、また背圧の発生を防止するためのトランジションについても相当の配慮が必要であろう。

アスファルトしゃ水壁がその機能を十分に果たするためには、他の工法以上にカットオフと一体になった動きが期待される一方で、設計が適切でなければそこが最大の弱点になりかねない。アスファルトしゃ水壁はその厚みが小さいことから、その施工はかなり厳密さを要求される。従ってしゃ水壁の面的な形状がその施工に出来るだけマッチしたものであることが望ましい。

#### (2) 堤体の設計

堤体の設計に関しては、しゃ水壁がアスファルトであるがためのとくに特殊なものではないにしろ、この工法に対する十分に技術経験が蓄積されていない今日にあたって、とくにしゃ水壁の厚みが小さいことを前提に、厳密な静的・動的な解析が行なわれる必要がある。アバットメントの形状はできるだけ滑かなものとし、上流側法面の勾配は、堤体の安定のほかしゃ水壁の安定、施工を考慮にいたれたものであることが必要である。最近の動的解析法の進展は目覚ましく、それらの手法の利用がこの工法の評価に利用されている。

#### (3) 断面の構造設計の考え方

基本的にはしゃ水壁はそれ自体はしゃ水機能を持つだけで力学的機能はすべて堤体に依存すると考えた設計が必要なのであろう。アスファルトしゃ水壁がたわみ性に富むとは言っても、これに過度の期待をかけることには明らかに限界がある。アスファルトしゃ水壁は、自重および水圧によるクリープによって容易に基盤(堤体)の変形に追従するが、その追従性はやはり温度と時間(基盤の変形速度)の関数である。このような考えからすれば、設計上の考え方は、材料の破断歪みをしゃ水壁全体のひずみ以内に止めることが第一の条件なろう。この意味でしゃ水壁は出来るだけ平面とし、断面の急変や、折れなどがないようにすることが必要である。勾配の変化するところでは緩やかな緩和区間をいれるなどで対処するのが望ましい。

従来の設計例、施工例ならびにそれらの供用性からみて、しゃ水壁の設計は、許容ひずみのほか、各層の固有の役割、ならびに施工上の要求からきまることが多い。すなわち、上層は主としてしゃ水性の確保のための層として、十分材料の均質性が確保される厚みすなわち一層が5cm程度、しゃ水性の確保と、面的な均質性確保のために2層設置とし、中間層は、粗粒混合物であることに配慮し、厚み方向ならび



て補修が行なわれた例もなく、その止水性が完全に確保されていると見てよいであろう。

### (3) ダレ

十分な撓み性としゃ水性を確保しようとすれば、どうしてもアスファルト量は大きくなり勝ちであり、それに伴って流動の危険性は増大する。初期のものでは、透水性が重視され、流動が発生しやすい傾向にあったが、ここ数十年ほどの間に建設されたものには、しゃ水壁が流動している例はない。今回の一連の調査でも一見“ダレ”とみられる現象はほとんどが保護層マスチックのダレであり、それも局部的なものであった。これも小さな透水性の確保がさして困難ではないことが明らかになり、さらにスロープフロー試験によってダレ対策が技術的に可能になったためと考えられよう。

### (4) プリスタリング

プリスタリングは“火ぶくれ”などと訳すことができる。保護層、表層が丁度火傷のあと皮膚が水ぶくれをおこすようにふくれあがる現象である。これは、透気性の小さな舗装内で高温時に水分が気化してその蒸気圧でアスファルト層がふくれあがるためと考えられている。しゃ水壁のプリスタリングは、

a. 保護層のプリスタリング

b. 2層に舗設された上層の1層目と2層目との境界面でのプリスタリング

c. 1層目の内部で発生するプリスタリング

の3つに大別できる。

プリスタリングは施工直後に多発するが、相当年数が経過してもピンホールなどからの水の侵入によって発生するので定期的点検が必要である。

初期の小型貯水地の場合にはプリスタリングの発生が多かった。上掲のダムについても大なり小なりのプリスタリングの発生が認められている。いずれも良く補修が行なわれており、筆者がみた範囲では大きくふくれあがっているものは見られなかった。発生の初期に補修が行なわれるならばそれが大きな欠陥に繋がることはないと思われる。

### (4) 老化によるしゃ水壁の荒れ、剥離等の破壊

上層の老化によるしゃ水壁の荒れ、剥離の例は我が国ではまだ報告されていない。この理由は保護層が予期された以上に、その機能を発揮しているためとみられ、保護層再評価の声が強い。しかし、筆者が観察した範囲内では、10年程度経過することによって、保護層の表面に紫外線劣化と思われる現象が発生して、脆くなり始め、場合によっては微細な亀の甲状の亀裂らしきものがみられたりするようになる。これがその後どのように進行するかは明らかではないが、一応注意深い観察が必要でないかと考える。

我が国ではまだ、全面的な保護層劣化、再舗設の例は聞かないが、一部には保護層が局部的劣化で補修の例がある。これらの事例からすれば前述のように、10年あるいは15年といった期間での保護層の再舗設が検討されて然るべきものと考えられる。

## 5. お わ り に

20年余りにわたって見てきた、しゃ水壁の供用性は、筆者が予期した以上に良好であった。これは初期の小型貯水池などでの経験から、十分に技術が蓄積されてきたことと同時に、ダム関係者の熱心かつ入念な研究によるものが大きい。ダムの側としては多くの技術者が、とくに揚水発電所の上池ダムへの利用について多少の不安を感じつつも将来の技術として大きな魅力を感じていることは事実であり、将来の研究の進展が期待される。