

参考資料①

覆工表面画像取得技術の適用性

水路トンネルの補修・補強対策を検討する上で、覆工表面のひび割れ等の変状を精度良く調査することが最も重要である。調査手法としては、近接目視による人力作業と覆工表面画像取得による調査方法がある。これらの適用性を把握し、所定の調査時間内に精度の高い調査を実施することが重要である。覆工表面のひび割れ等変状調査技術について、近接目視による方法と覆工表面画像取得技術による方法の調査費用と調査時間に着目し、双方の適用性を参考資料として記述する。

参考① 覆工表面画像取得技術の適用性

覆工表面のひび割れは、水路トンネルの変状現象で最も一般的にみられる変状現象であり、ひび割れ形態、規模、パターン等を観察することにより荷重のかかり方、変状の状況、変状原因等をある程度推定することができる。ひび割れ測定方法は、人力作業による方法と水路トンネル壁面の連続画像を取得して計測する方法がある。後者は人力作業に比べ調査時間を大幅に短縮することができるため、断水時間の制約を受ける場合や長距離トンネルでの適用実績が多い。

(a) 覆工ひび割れ測定（人力作業及び計測器による）

人力作業による覆工ひび割れ測定は、クラックスケールや巻尺によってひび割れの幅や位置を調査し、ひび割れ展開図を作成するものである。人力によるひび割れ調査は、暗所での長時間労働となり、作業条件が極めて悪いことや観察者の主観が入りやすいという欠点があるので機械を使った方法に移行しつつある。しかし、緊急性を要する場合や調査対象が狭い場合には依然として有効な方法である。

(b) 覆工ひび割れ測定（覆工表面画像取得による）

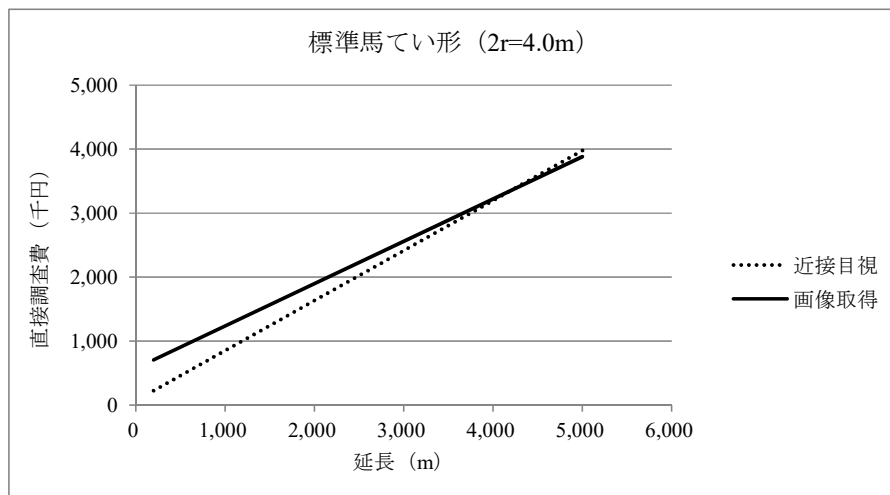
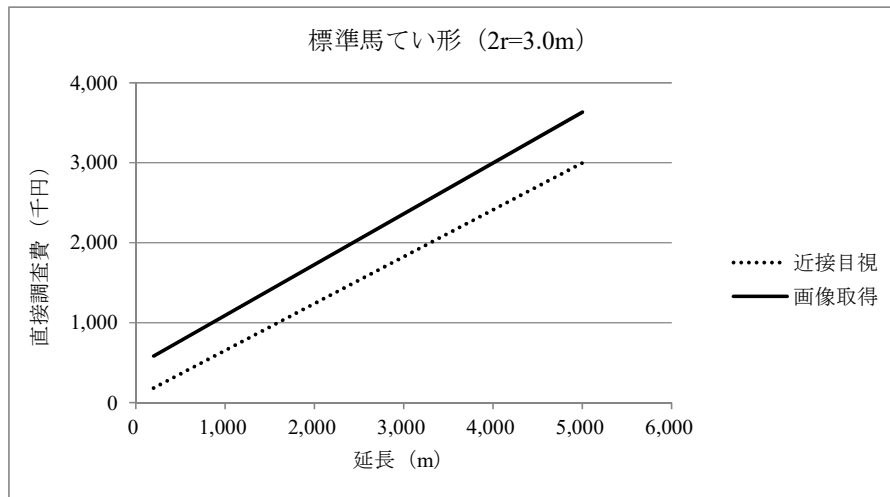
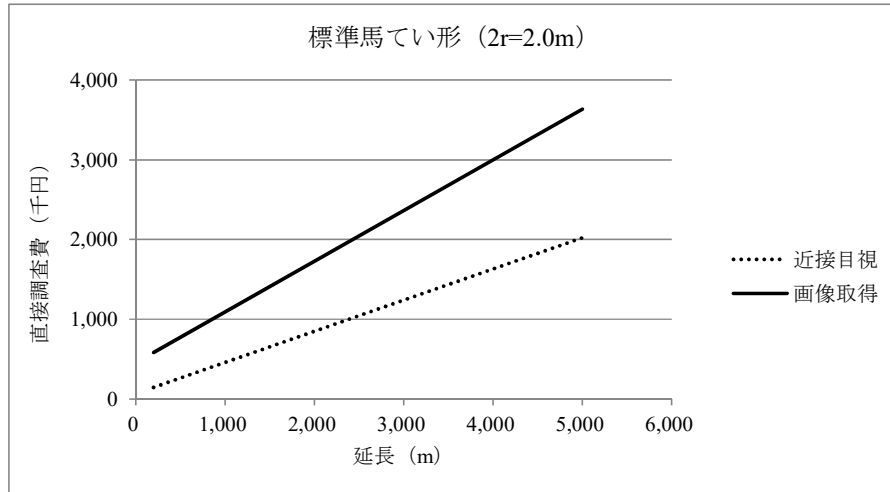
人力作業によるひび割れ調査は、作業条件が悪いことや観察者の主観が入るという欠点を持つことから、覆工表面画像取得による水路トンネルの覆工ひび割れ調査方法が開発され、ビデオカメラ（CCD エリアカメラ等）による方法やレーザーによる方法が実用化されている。

(c) 覆工ひび割れ測定技術の適用性

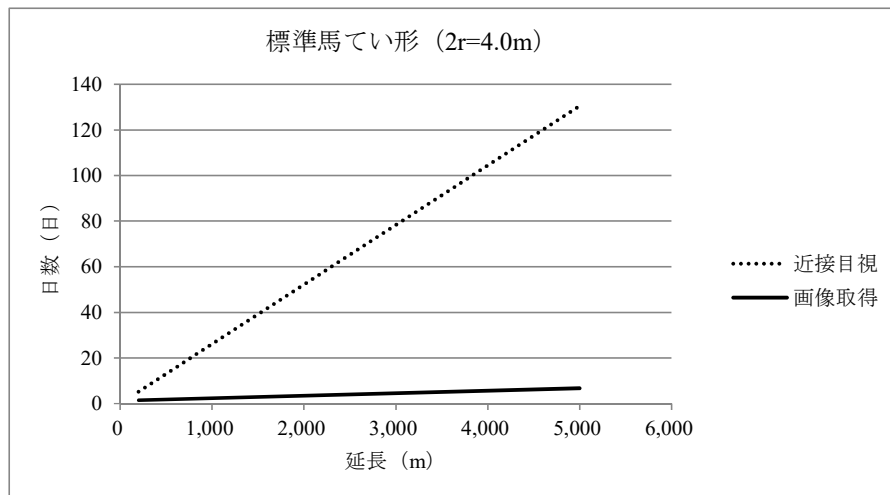
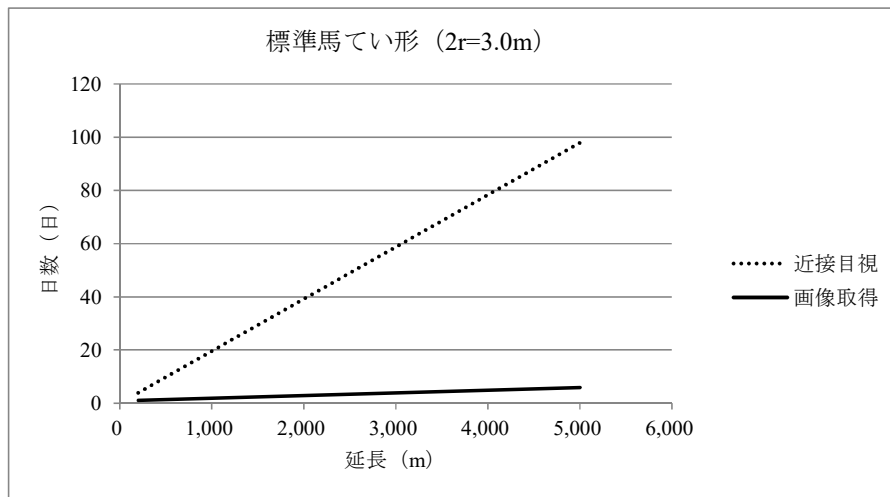
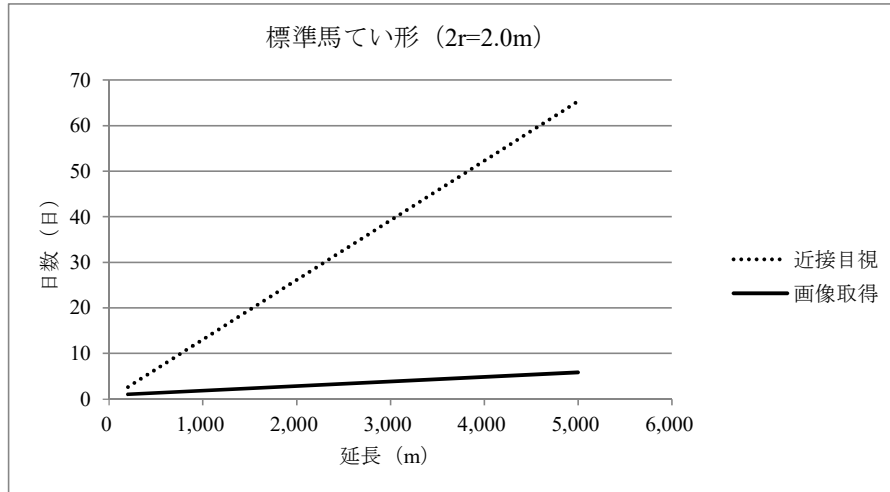
覆工ひび割れ測定技術について、人力作業による近接目視と覆工表面画像取得による方法の経済性と現地調査時間の比較例を示す。比較対象の水路トンネル断面は標準馬てい形 $2r=2.0\text{m}$ 、 3.0m 、及び 4.0m の3断面で、対象延長は $200\text{m}\sim 5,000\text{m}$ である。参①図-1 に経済性比較結果を、また、参①図-2 に現地調査時間の比較結果を示す。

人力作業による近接目視調査費及び調査時間については、土地改良工事積算基準（調査・測量・設計）による。覆工表面画像取得の調査費及び調査時間は見積もりによる。調査時間は、それぞれ1班体制の場合の現地調査時間を示す。

$2r=4.0\text{m}$ の調査費用においては、距離が長くなると（ $4,000\text{m}$ 以上）、従来の近接目視より画像取得技術の方が経済的であることがわかる。また、現地調査時間は圧倒的に画像取得技術の方が短いことがわかる。これらに鑑み、断水時間の制約を受ける場合や大断面・長距離トンネルにおいては画像取得技術の適用を検討することが肝要である。



参①図-1 目視調査費比較



参①図-2 目視調査に係る現地調査時間比較

参考資料②

裏込注入材の逸走防止対策

参考② 裏込注入材の逸走防止対策

1. 逸走防止対策の必要性

裏込注入工法の適用に際しては、裏込注入材が充填範囲外に逸走して設計注入量を大幅に上回る量の注入材が必要になる場合や、土かぶりが小さい箇所から裏込注入材が地表に漏出する場合がある。後者においては、水路トンネルの途中に開削で施工された土かぶりの非常に小さい暗渠構造区間が挟まれているような場合に、トンネル内からは構造区別がつかず、前後のトンネル区間と同様に暗渠区間に裏込注入を実施して、裏込注入材が地表に漏出した事例がある。このように裏込注入材の逸走に伴う問題を防ぐために、逸走防止対策が必要である。

2. 土かぶりが小さい区間に適用した逸走防止対策事例

(1) 漏出の発生が懸念される区間の明確化

土かぶりが小さい区間、地表部に陥没跡がある箇所、沢や湧水が想定される区間など、懸念される箇所を明確にするため、土かぶりが $5D$ (D は掘削外径) 程度以下となる箇所を抽出し、坑内の注入箇所と地上の関係を明確化する。

土かぶりの厚さにより、「通常注入区間」、「重点注意区間」等の区分を行い、それぞれの区間に応じた施工方法を用いることにより漏出の発生を防止する。また、土かぶりが小さく、トンネル内に空洞が確認されていても注入する必要が無い区間は「注入回避区間」とする。その際は、注入回避区間への裏込注入材の逸走を防止する処置を講じる。

(2) 注入圧力、注入孔間隔、注入位置の工夫

1) 通常注入区間

施工実績に基づき、注入圧力は 0.2MPa 以下、注入孔間隔は 5m として施工を行う。

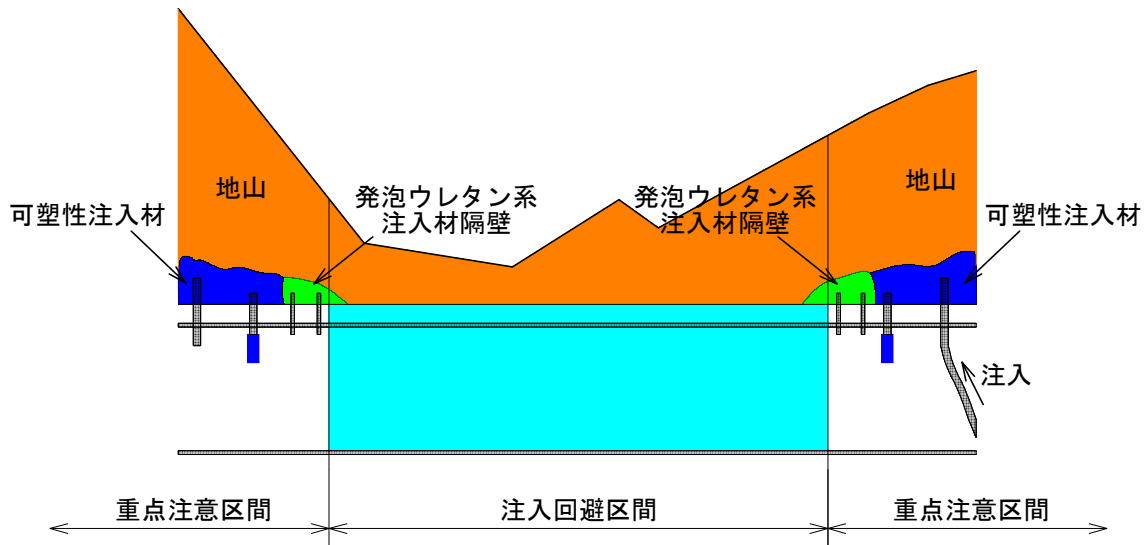
2) 重点注意区間

土かぶりが小さい区間において漏出を防止するために、低い注入圧力での確実な充填を目的として、注入孔間隔を半分の 2.5m とする。なお、試験施工において、注入間隔を狭くするだけで十分に充填できないという状況が発生した場合には、注入孔を追加する。また、逆に漏出が発生する事態が生じた場合は、注入圧力を 0.15MPa 、 0.1MPa と段階的に低下させて状況を勘案しながら調整することが有効である。

注入完了の判定は、次注入孔等からの裏込注入材の流出、若しくは注入圧力が設定した圧力に至った場合とする。

3) 注入回避区間

「注入回避区間」については、重点注意区間における裏込注入が注入回避区間に逸走し、漏出することが無いように、重点注意区間と注入回避区間との間に隔壁を設置し、裏込注入材の逸走を防止する。隔壁は水中での発泡が可能な発泡ウレタンによる。参②図-2.1 に対策の模式図を示す。



参②図-2.1 土かぶりが小さい区間の逸走防止対策例

3. 充填範囲外への逸走防止対策事例

(1) 計画概要（ストックマネジメント技術高度化事業による検証例）

充填範囲外への逸走として、充填範囲前後バレルへの流出が想定される。充填範囲バレルの前後にストッパーグラウトを設置し、充填範囲外への逸走を防止する。ストッパーグラウトには、大規模な仮設を伴わず、極力小規模な注入に最適な発泡ウレタン（40倍発泡）を適用する。

ストッパーグラウトの施工範囲は充填対象バレル継目の前後1m幅とする（参②図-3.1参照）。注入量は、注入用の削孔（ $\phi 32\text{mm} \times 2$ 列@300mm）で空洞厚を確認し、想定注入量を算定する。

(2) 物性値

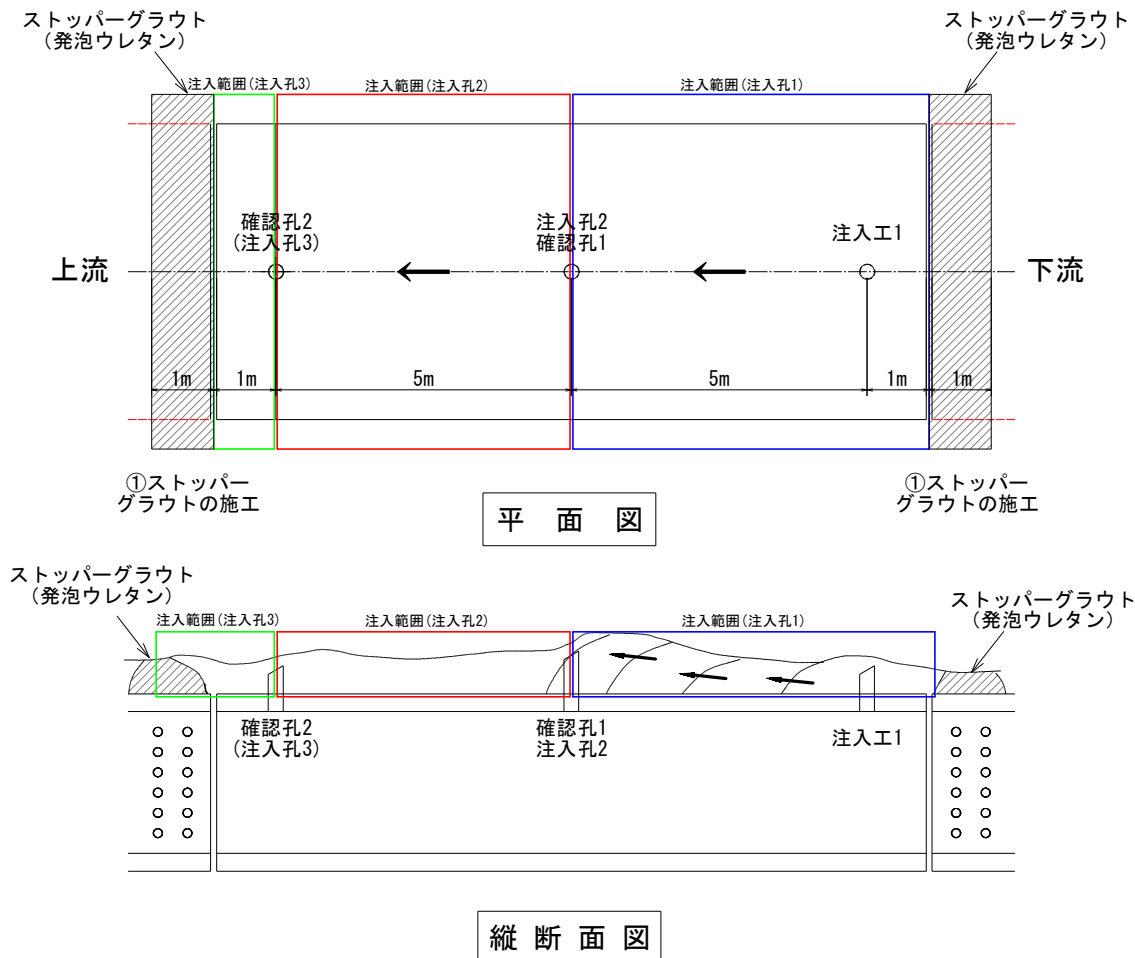
ストッパーグラウトに適用する注入材（発泡ウレタン）の物性値を参②表-3.1に示す。

参②表-3.1 ストッパーグラウト材の物性値

項 目	発泡ウレタン	
混合液比重	1.20	
発泡倍率（倍）	40	+4.4
		-3.6
密度（ kg/m^3 ）	30 ± 3	
圧縮強度（MPa）	0.17	+0.13
		-0.03
曲げ強度（MPa）	0.28	+0.18
		-0.05

(3) ストッパーグラウトの効果

ストッパーグラウトについて、注入材の充填範囲外への逸走を防止する効果が確認できた。特に空洞が大きく、局所的な変状箇所の対策のように、充填範囲が限定される場合の逸走防止対策として有効な手法である。



参②図-3.1 ストッパーグラウト概要図

参考資料③

対策工法の効果が期待される期間

参考③ 対策工法の効果が期待される期間

1. 対策工法の効果が期待される期間

水路トンネルの長寿命化対策を行う際は、対策前の施設の性能低下状態や使用環境等を踏まえて、対策の目的や対策後の施設の要求性能、施設の予定供用期間（又は機能保全コスト算定期間）を設定した上で、対策後の施設が対策工法の効果が期待される期間中、対象となる変状や性能低下要因に対して所要の性能が発揮される工法・材料を選定する必要がある。

ここでいう「対策工法の効果が期待される期間」については、「対策後の施設又は部位の耐用期間」として、工法・材料自体の耐久性に対象施設の状態等を考慮して定める必要がある。具体的には、個々の施設の機能診断調査や施設監視結果等により施設の性能低下の特性が明らかである場合や、営農形態の変化等に伴い今後、水利システム全体の見直し（二期事業）を行う等により現施設の予定供用期間が明確である場合等、個々の施設の事情を踏まえて検討する。

「対策後の施設又は部位の耐用期間」については、工法・材料自体の耐久性に対策後の既設管の性能低下や既設管と対策工法の相互作用等の不確かさを加味して、対策工法別に参考値として参③表-1を示す。

なお、対策後の施設又は部位の耐用期間については、継続的な機能診断調査や施設監視の結果より実際の施設の劣化進行状況を見極めて、適宜、見直す必要がある。

参③表-1 対策後の施設又は部位の耐用期間（参考値）

工法名	適用目的	工法材料の耐久性（注1）	期待される耐用期間
裏込注入工法	補修 （主に漏水対策） 補強 （主に耐荷性の回復・向上）	50 年 ※長期曝露試験や湿熱劣化による促進試験により照査	30 年
鋼板内張工法	改修（自立管） （主に耐荷性の回復・向上）	50 年 ※工場製品であり既製鋼管と同品質。既製鋼管の性能低下実態を踏まえ耐久性は 50 年以上と判断	40 年
既製管挿入工法	補修 （主に水密性、通水性の回復又は向上）	50 年 ※工場製品であり既製管と同品質。既製管の性能低下実態を踏まえ耐久性は 50 年以上と判断	35 年
	改修（自立管） （主に耐荷性の回復・向上）		40 年
製管工法	補修 （主に水密性、通水性の回復又は向上）	50 年 ※繰り返し載荷試験等により照査。コンクリート・超高強度繊維補強コンクリートと同品質であり耐久性は 50 年以上と判断	30 年
	改修（自立管） （主に耐荷性の回復・向上）		35 年・40 年 （注2）
接着工法	補修 （主に水密性、通水性の回復又は向上） 補強 （主に耐荷性の回復・向上）	50 年 ※促進中性化試験・引張接着性試験等により耐久性は 50 年以上と判断	30 年 （注3）
ロックボルト補強工法	補強 （主に耐荷性の回復・向上）	50 年 ※ロックボルトの素材は工場製品であり既製鋼材と同品質。既製鋼材の性能低下実態を踏まえ耐久性は 50 年以上と判断	30～25 年 （注4）
ライナープレート建込工法	補強 （主に地山の劣化抑制と新たな覆工構築による耐荷性向上）	50 年 ※ライナープレートの素材は工場製品であり既製鋼材と同品質。既製鋼材の性能低下実態を踏まえ耐久性は 50 年以上と判断	40～35 年 （注5）

（注1）：対策後の施設（又は部位）の耐用期間については、継続的な施設の機能診断調査や施設監視の結果より実際の施設の性能低下の進行状況を見極めて、適宜、見直していくものである。

（注2）：裏込充填材に構造部材としての強度を期待する工法については 35 年、裏込充填材に背面地山の反力を伝達する機能を期待する工法については 40 年とする。

（注3）：表面被覆工法は工法に期待される耐用期間を 20 年に想定して付着強度試験や摩耗試験が行われている。接着工法における付着強度は、増厚材の付着強度に加えてアンカー固定しているため 30 年の耐用期間を想定することが可能である。また、摩耗試験については耐用期間 30 年相当の摩耗厚さが確保される。これらのことから接着工法の期待される耐用期間は 30 年とする。

（注4）：摩擦式ロックボルトに標準的な溶融亜鉛めっき（HDZT77 相当）を施す場合の耐久性は、めっき皮膜の耐用期間と同等と判断し 25 年とする。一方、摩擦式ロックボルトに高耐食性めっきを施す場合の耐久性は、

めっき皮膜の耐久性に支配されないため耐用期間を 30 年とする。定着材式ロックボルトで溶融亜鉛めっきを施す場合の耐久性は、めっき皮膜の耐久性に支配されないため耐用期間を 30 年とする。なお、めっき皮膜の耐用期間は「溶融亜鉛めっきの耐食性」（亜鉛めっき鋼構造物研究会）を参考に 25 年程度とする。溶融亜鉛めっきを施さない場合や自立不能孔壁（自穿孔方式等）に適用するロックボルトのように標準的なめっきが剥げるおそれがある場合の耐久性は、鋼材の腐食速度に支配されるため適切に腐食代を設けるとともに腐食代に応じた耐用期間を設定する。また、ロックボルトの頭部が水路内に露出する場合は、防錆処理（塗装工等）の耐用期間に従い個別に設定しなければならない。

- (注 5) : ライナープレートの亜鉛めっき付着量は片面 450g/m^2 (HDZT63) であり、田園地帯・山間地帯における大気中の腐食速度（片面）は平均で $6\sim 10\text{g/m}^2/\text{年}$ であるので、概ね母材の耐用期間（50 年）と同等の耐久性を有すると考えられる。ただし、大気や用水が強い腐食性を有する場合はめっきの腐食速度に応じた耐用期間を設定する必要がある。ここでは、気中部の部材の期待される耐用期間は 40 年とし、水中部の部材の期待される耐用期間は 35 年とする。

【コラム】対策後の施設又は部位の耐用期間について

1) 本書に示す耐用期間

構造物の耐用期間には、以下の3種類の考え方があるが、本書では、対策後の施設又は部位の耐用期間は、『機能的耐用期間』として整理する。

- i) 経済的耐用期間：物理的、機能的視点のみならず、市場性の視点を含め、経済的に市場性を有するであろうと考えられる期間。期間は比較的短い。
- ii) 機能的耐用期間：構造物の部位・部材又はシステムの性能低下に伴う安全性の低下、修繕費・運用費の増加、交換部品の不足、修繕不能等の問題を生じることなく、通常範囲内の維持管理により支障なくその機能を発揮すると期待できる部位やシステムの耐用期間。期間は経済的耐用期間と物理的耐用期間の中間。
- iii) 物理的耐用期間：コンポーネントの物理的劣化に伴う耐用期間であり、工学的判断に基づいて決定される。部分的な修繕や部品の交換を繰り返して動く限り使う。部材そのものの物理的耐久性で、期間は比較的長い。

農業水利施設の機能保全の手引きにおける定義は以下のとおり。

『耐用期間』は、“施設の水利用性能、水理性能、構造性能が低下すること等により、必要とされる機能が果たせなくなり、当該施設が供用できなくなるまでの期間として期待できる年数”と定義されており、“施設管理者が通常行う標準的な施設管理や軽微な補修等を行うことによって実現される平均的な年数。標準耐用期間とは直接関係しない”と解説されている。この定義上の耐用期間は、上記の耐用期間の区分のうち、『機能的耐用期間』といえる。

『標準耐用期間』は、“土地改良事業における経済効果の測定に必要な諸係数に示された施設区分、構造物区分ごとの設計に規定した供用目標年数”と定義されており、“税法上の減価償却期間を規定するものであることから、耐用期間の検討の目安として活用できる。本来であれば、施設の重要度等に応じて、要求性能と設計耐用期間を設定して設計を実施すべきであるが、設計耐用期間を設定するためには、劣化メカニズムの解析や劣化予測を行い、施設の劣化期間を把握する必要がある。しかし、現時点では施設の劣化期間を把握することが困難であるため、当面、設計耐用期間は標準耐用期間を準用して設定する。ただし、個別に設定できる場合はこの限りではない”と解説されている。この定義上の耐用期間は、上記の耐用期間の区分のうち、『経済的耐用期間』といえる。

2) 対策後の施設又は部位の耐用期間の設定について

対策後の施設（又は部位）の耐用期間を『機能的耐用期間』として、工法・材料自身の耐久性に対策後の施設の耐久性評価に係る不確かさを踏まえて、

『工法・材料自身の長期耐久期間 $\times$ (1－リスク係数の累計)』の式により算定するものとする。

i) 工法材料の長期耐久性

工法・材料自身の耐用期間は 50 年とし、その耐久性を室内試験により照査する。

ii) 対策後の施設の耐久性評価において配慮すべき不確かさ（リスク）

対策後の施設又は部位の機能的耐用期間を検討する上で考慮すべきリスク（不確実性）とその係数を以下のとおり設定する。

- ・地下構造物のため対策後の施設状態の日常点検や再劣化対策が困難【 $\alpha_1 : 0.1$ 】
- ・対策後の施設の性能低下予測と低下時の施設状態の想定が困難【 $\alpha_2 : 0.1$ 】
- ・覆工と対策工法の相互作用が不明確【 $\alpha_3 : 0.1$ 】
- ・事前に照査しきれない施工時の気温や施工延長、断面寸法等の現場施工条件上による裏込注入材・裏込充填材の現場充填性や強度発現のバラツキの施設性能への影響が不明確（ただし、裏込充填材が構造部材ではなく補強部材に背面地山の反力を伝達する基礎材料とする場合は本リスクを考慮しない）【 $\alpha_4 : 0.1$ 】
- ・ロックボルト補強工法やライナープレート建込工法において、めっき皮膜の耐久性に支配される場合【 $\alpha_5 : 0.1$ 】

参③表-2 対策後の施設又は部位の耐用期間（参考値）で考慮した耐久性評価のリスク

工法名	適用目的	対策後の施設の耐久性評価のリスク
裏込注入工法	補修 (主に漏水対策) 補強 (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工の性能低下予測が困難 (α_2) ・背面地山の長期安定性が不明確 (α_3) (湧水等の作用による再空洞化のおそれ) ・施工条件による現場充填性や強度発現のバラツキ (α_4)
鋼板内張工法	改修 (自立管) (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3)
既製管挿入工法	補修 (主に水密性、通水性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工の性能低下予測が困難 (α_2) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3)
	改修 (自立管) (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3)
製管工法	補修 (主に水密性、通水性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工の性能低下予測が困難 (α_2) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3) ・構造部材である裏込充填材の施工条件による現場充填性の確保 (α_4)
	改修 (自立管) (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3) ・構造部材である裏込充填材の施工条件による現場充填性の確保 (α_4) (注1)
接着工法	補修 (主に水密性、通水性の回復・向上) 補強 (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工の性能低下予測が困難 (α_2) ・覆工と補強材の相互作用が不明確 (α_3) ・付着性のバラツキに伴うリスク (α_4)
ロックボルト補強工法	補強 (主に耐荷性の回復・向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・覆工の性能低下予測が困難 (α_2) ・背面地山の長期安定性が不明確 (α_3) ・周面摩擦抵抗のバラツキに伴うリスク (α_4) ・防錆材の耐久性に伴うリスク (α_5) (注2)
ライナープレート建込工法	補強 (主に地山の劣化抑制と新たな覆工構築による耐荷性向上)	・日常点検が困難 (α_1) ・背面地山の長期安定性が不明確 (α_3) ・防錆材の耐久性に伴うリスク (α_5) (注3)

(注1) 裏込充填材に構造部材としての強度を期待する工法については α_4 を適用し、裏込充填材に背面地山の反力を伝達する機能を期待する工法については α_4 を適用しない。

(注2) めっき皮膜の耐久性に支配される場合に α_5 を適用する。高耐食性めっきを施す場合や定着材式ロックボルトで溶融亜鉛めっきを施す場合は α_5 を適用しない。

(注3) 大気や用水が強い腐食性を有する場合に α_5 を適用する。

参考資料④

設計注入量の設定方法

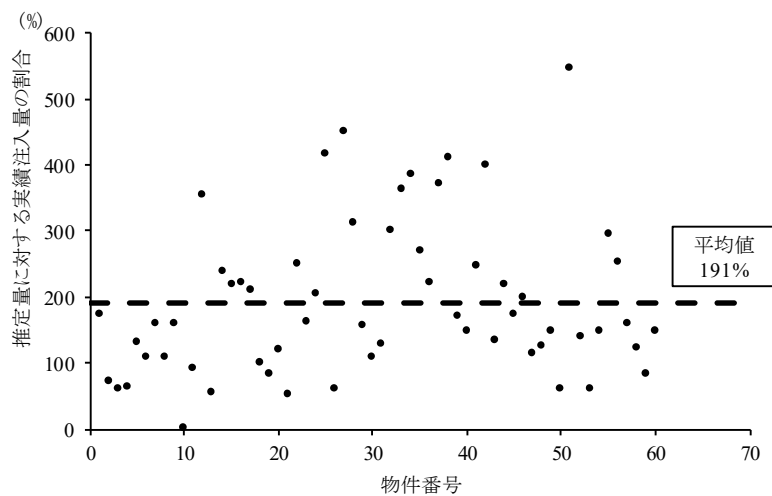
参考④ 設計注入量の設定方法

1. 設計注入量（割増率）の設定

参④図-1.1 は、60 地点の各種トンネルにおける背面空洞への実績注入量と電磁波レーダー法による推定注入量の相関を調べたものである。注入材料は発泡ウレタン及び可塑性注入材である。覆工背面空洞量は、多角形算出法（従来算出法）で推定したものである。

可塑性注入材及び非セメント系注入材（発泡ウレタン）は推定注入量と実績注入量の割合が 2 倍程度である。一方、非可塑性注入材は、地山の地質により推定注入量と実績注入量の割合が 10 倍にも及ぶ場合があることが報告されている。

（参考：森充広他、農業用水路トンネルの機能診断への電磁波レーダ法の適用、農土誌 76(9)）



参④図-1.1 非セメント系注入材及び可塑性注入材の推定注入量と実績注入量の相関

（臨床トンネル工学研究所 技術研究部会トンネル維持管理委員会、平成 24～25 年度のデータを改変して転載）

裏込注入工法では、設計注入量（推定注入量）と実績注入量の乖離が多くのケースで見られる。調査方法、背面空洞量の推定方法、注入範囲、使用材料等の違いにより乖離の程度は様々であるが、設計段階でいかに精度良く設計充填量を算定するかは大きな課題である。

設計量に比べて実績量が大幅に増加すると、注入施工時間が増加し、所定の工期内に注入作業が完了しなくなったり、予算が不足したりするなどの問題が生じる。このため、工事発注に際しては、推定注入量の割り増しを行い、設計注入量を設定している事例もある。

裏込注入材料により逸走等の特性が異なり、割増率は一般に「非セメント系注入材＜可塑性注入材＜非可塑性注入材」の順に多くなる傾向にある。また、調査方法や背面空洞量の算定方法によっても割増率が変動する可能性があるため、これらも考慮して割増率を設定する必要がある。

従来、道路トンネルでは割増率を考慮していなかったが、近年は 1.5 倍や 2.0 倍の割増率を設定して工事発注されるケースが増えている。

参④図-1.1 の実績による割増率を使った場合の設計の空洞充填量は、式 1.1 で求めることができる。

$$W=V\times\alpha\cdots\cdots\cdots\text{式 1.1}$$

ここに、 W ：設計空洞充填量（ m^3 ）

V ：調査結果に基づく想定空洞量（多角形算出法による）（ m^3 ）

α ：注入量割増率

（可塑性注入材及び発泡ウレタン系注入材の場合は $\alpha=2.0$ 、その他の場合は別途検討）

ここで示した α （注入量割増率）は多角形算出法により想定した空洞量に対する割増率であり、三次曲線法等により想定した場合には適用できないので留意するものとする。また、非可塑性注入材については、地質によるバラツキが大きいため別途検討する。

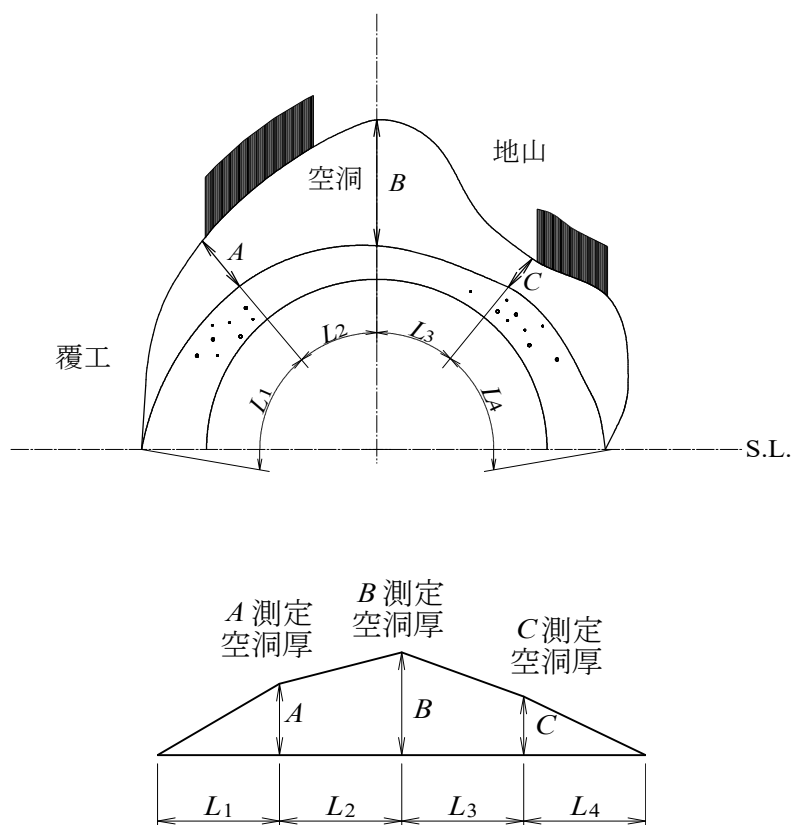
ただし、施工に当たっては、注入材の選定・組み合わせ、注入方法の選定等により、注入材の逸走の低減化を図る必要がある。裏込注入材の逸走防止対策については、本書の参考資料②「裏込注入材の逸走防止対策」を参照されたい。

2. 背面空洞量の算定方法

調査孔又は電磁波レーダー法等の結果を用いた背面空洞の設計数量は、以下に示す多角形算出法、又は三次曲線算出法により断面積を算出し、平均距離法で求めるものとする。電磁波レーダー法等により連続的に背面空洞を探索している場合は、縦断方向 1m ごとに空洞断面積を算定し、平均距離法により全体の背面空洞数量を算定する。なお、各手法の横断方向の空洞端部は、他のスプリングラインの空隙がゼロと仮定して擦り付けるものとする。

国営造成水利施設ストックマネジメント推進事業（技術高度化事業）における検討実績では、多角形算出法に比べ、三次曲線算出法は、1.4～1.5 倍程度の空洞量となっている。また、1 測線→3 測線→5 測線の順で、空洞量が減少する傾向にあったことを報告している。これらの適用性については、上述した割増率の適用と併せて適切に選定しなければならない。

(1) 多角形算出法（3 測線）の場合



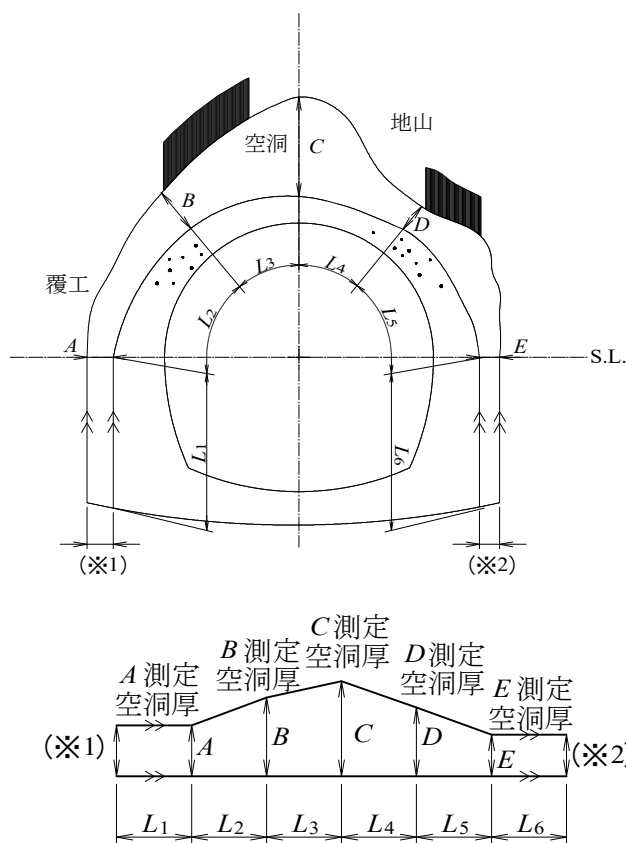
空洞量は一般に背面空洞調査結果を基に、次式で算出する。

設計注入量 = Σ (空間断面積 $\times$ 施工区間長)

$$\text{断面積} = \frac{L_1 \cdot A}{2} + \frac{(A+B) \cdot L_2}{2} + \frac{(B+C) \cdot L_3}{2} + \frac{L_4 \cdot C}{2} \dots\dots\dots \text{式 1.2}$$

参④図-2.1 多角形算出方法（3 測線）

(2) 多角形算出法（5 測線）の場合



空洞量は一般に背面空洞調査結果をもとに、次式で算出する。

設計注入量 = Σ (空間断面積 $\times$ 施工区間長)

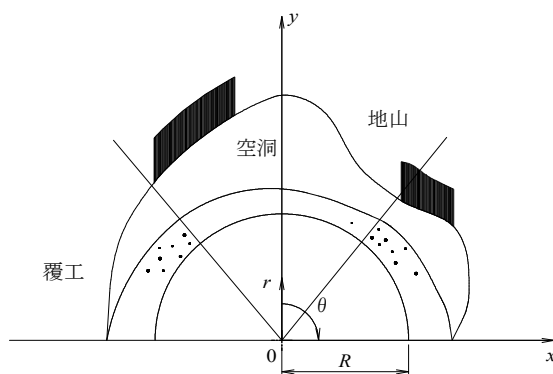
$$\text{断面積} = L_1 \cdot A + \frac{(A+B) \cdot L_2}{2} + \frac{(B+C) \cdot L_3}{2} + \frac{(C+D) \cdot L_4}{2} + \frac{(D+E) \cdot L_5}{2} + L_6 \cdot E \cdots \cdots \text{式 1.3}$$

参④図-2.2 多角形算出方法 (5 測線)

(3) 三次曲線算出法 (参考)

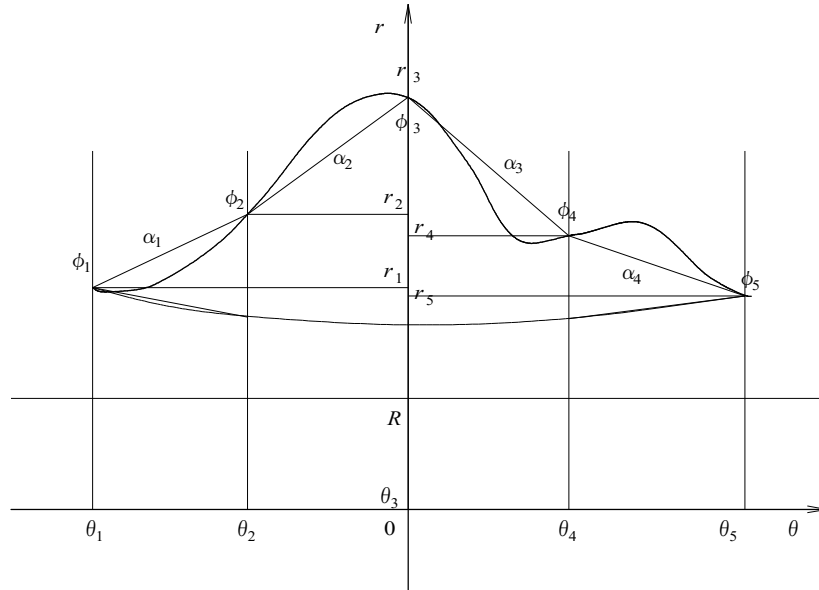
① モデルの設定

トンネル横断面モデルを参④図-2.3 のように設定する。



参④図-2.3 トンネル横断面モデル

既知の覆工厚及び空洞厚をもとに、各点がなめらかに結合するようにする。曲線の形状は、 $r-\theta$ 座標で表した状態で3次曲線になるように設定する（参④図-2.4）。



(r_i, θ_i) : 各点の極座標

V_i : 各点の空洞厚

t_i : 各点の覆工厚

α_i : 各点を結ぶ直線の傾角

ϕ_i : 各点における接線傾角

ただし、覆工厚の場合 $r_i = R + t_i$

空洞厚の場合 $r_i = R + t_i + V_i$

また、角度に関する関係は以下のとおり

$$\alpha_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} \quad \phi_i = \frac{\alpha_{i+1} + \alpha_i}{2} \quad (\text{両端以外})$$

$$\phi_1 = \alpha_1 + |\alpha_1 - \phi_2| \quad (\text{左端})$$

$$\phi_5 = \alpha_4 + |\alpha_4 - \phi_4| \quad (\text{右端})$$

参④図-2.4 曲線形状の条件

② 曲線の条件

3 次曲線の一般式は式 1.4 で表される。なめらかな結合条件は 1 次微分に関する条件式も関与するため、ここでは微分式まで含めて、式 1.4～1.5 に示す。

$$r = \frac{1}{6}k\theta^3 + \frac{1}{2}m\theta^2 + n\theta + p \cdots \cdots \text{式 1.4}$$

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{1}{2}k\theta^2 + m\theta + n \cdots \cdots \text{式 1.5}$$

単区間の両端における境界条件は下式 1.6～1.9 で表される。

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)_{\theta=\theta_i} = \phi_i \cdots \cdots \text{式 1.6}$$

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)_{\theta=\theta_{i+1}} = \phi_{i+1} \cdots \cdots \text{式 1.7}$$

$$(r)_{\theta=\theta_i} = r_i \cdots \cdots \text{式 1.8}$$

$$(r)_{\theta=\theta_{i+1}} = r_{i+1} \cdots \cdots \text{式 1.9}$$

これらの 4 式をまとめると、次の 4 元連立方程式 式 1.10 となる。

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2}\theta_i^2 & \theta_i & 1 & 0 \\ \frac{1}{2}\theta_{i+1}^2 & \theta_{i+1} & 1 & 0 \\ \frac{1}{6}\theta_i^3 & \frac{1}{2}\theta_i^2 & \theta_i & 1 \\ \frac{1}{6}\theta_{i+1}^3 & \frac{1}{2}\theta_{i+1}^2 & \theta_{i+1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_i \\ m_i \\ n_i \\ p_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_{i+1} \\ r_i \\ r_{i+1} \end{bmatrix} \cdots \cdots \text{式 1.10}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\theta_i^2 & \theta_i & 1 & 0 \\ \frac{1}{2}\theta_{i+1}^2 & \theta_{i+1} & 1 & 0 \\ \frac{1}{6}\theta_i^3 & \frac{1}{2}\theta_i^2 & \theta_i & 1 \\ \frac{1}{6}\theta_{i+1}^3 & \frac{1}{2}\theta_{i+1}^2 & \theta_{i+1} & 1 \end{bmatrix} \quad k = \begin{bmatrix} k_i \\ m_i \\ n_i \\ p_i \end{bmatrix} \quad \phi = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_{i+1} \\ r_i \\ r_{i+1} \end{bmatrix}$$

とおくと、パラメータベクトルは式 1.11 で表される。

$$Ak = \phi$$

$$k = A^{-1}\phi \cdots \cdots \text{式 1.11}$$

パラメータ毎に記述すると、以下のとおりに表される。

$$k_i = \frac{6}{(\Delta\theta)^3} [\Delta\theta(\phi_i + \phi_{i+1}) - 2(r_{i+1} - r_i)] \cdots \cdots \text{式 1.12}$$

$$m_i = \frac{2}{(\Delta\theta)^2} [\Delta\theta(\phi_i + 2\phi_{i+1}) - 3(r_{i+1} - r_i)] \cdots \cdots \text{式 1.13}$$

$$n_i = \phi_{i+1} \cdots \cdots \cdots \text{式 1.14}$$

$$p_i = r_{i+1} \cdots \cdots \cdots \text{式 1.15}$$

これらのパラメータを用いて、 (r, θ) をプロットすると、3 次曲線の覆工線あるいは地山線を描くことができる。ただし、 (r, θ) の関係は式 1.16 による。

$$r = f(\theta) = \frac{1}{6}k_i(\theta - \theta_{i+1})^3 + \frac{1}{2}m_i(\theta - \theta_{i+1})^2 + n_i(\theta - \theta_{i+1}) + p_i \cdots \cdots \cdots \text{式 1.16}$$

③ 空洞容積の算出

式 1.16 において、変数 θ を Θ に変換すると扱いやすいので、式 1.17 のように表現する。

$$r = f(\theta) = g(\Theta) = \frac{1}{6}k_i\Theta^3 + \frac{1}{2}m_i\Theta^2 + n_i\Theta + p_i \cdots \cdots \cdots \text{式 1.17}$$

ただし、 $\Theta = \theta - \theta_{i+1}$

各セグメントの空洞容積は、式 1.18 によって計算される。

$$S = \int_{\theta_{i+1}}^{\theta_i} \frac{r^2}{2} d\theta = \int_0^{\Delta\theta} \frac{r^2}{2} d\Theta \cdots \cdots \cdots \text{式 1.18}$$

結果は、式 1.19 で表される。

$$S = \sum_{j=1}^7 D_j (\Delta\theta)^j \cdots \cdots \cdots \text{式 1.19}$$

各パラメータは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} D_1 &= -\frac{p_i^2}{2} & D_2 &= \frac{n_i p_i}{2} & D_3 &= -\frac{n_i^2 + m_i p_i}{6} \\ D_4 &= \frac{k_i p_i + 3m_i n_i}{24} & D_5 &= -\frac{3m_i + 4k_i n_i}{120} \\ D_6 &= \frac{k_i m_i}{72} & D_7 &= -\frac{k_i^2}{504} \end{aligned}$$