

衝撃弾性波を用いた既設水路トンネル の健全度診断

Evaluation to the Safety of Existed Tunnel structures by using impulse elastic wave

河村直明¹・江川顕一郎²・呉佳曄³

Naoaki Kawamura and Kenichirou Egawa and Jiaye Wu

¹正会員 工修 東京電力株式会社 (〒100-8560 東京都千代田区千代田1-1-3)

kawamura.naoaki@tepcoco.jp

²正会員 (株) セントラル技研 (〒192-0063 東京都八王子市元横山町1-2-13)

³正会員 工博 (株) セントラル技研 (〒192-0063 東京都八王子市元横山町1-2-13)

It is well known that the existence of cracking in concrete lining, especially its progress, has profound influence on the safety of rock-embedded tunnels, which validates the extreme importance of monitoring the cracking status. Unfortunately, no satisfactory non-destructive method is currently available to detect the cracking depth, which is one of the most important parameters of concrete crack. In this paper, we report a new high-precision non-destructive testing method. We believe that precise measurement of concrete crack status as well as careful monitoring of cracking progress will lead to greatly improved precision in safety evaluation of civil structures, including tunnels.

Key Words : Waterway tunnel, Crack depth, Surface wave, Non-destructive testing method

1. はじめに

山岳地帯が多い我が国では、古くから道路、鉄道、水力発電などで広くトンネルが利用され、これらの多くは、経年化が進行しているため、的確かつ効率的な維持管理の必要性が益々高まっている¹⁾。

特に、従来のいわゆる在来工法で築造されたトンネルは、NATM や TBM による近年のトンネルに比べ、周辺地山の緩みが大きく、覆工巻厚の確保や天端空洞の充填も十分でないケースが多い。このため、地山の緩み圧や塑性圧によって覆工コンクリートにひび割れ等の変状が生じやすく、これらの変状とその進行度、巻厚、強度特性等を詳細に把握してトンネル全体の健全度を評価することがトンネル管理者の重要な使命となっている。

このうち、評価の指標であるひび割れ等の変状については、これまでトンネル内面からの目視観察が主体であったため、覆工内部の進展状況まで把握することは一般に行われていなかったが、ひび割れ深さを効率的に探査できれば、変状が発生した覆工の挙動を追跡することで、より精度の高いトンネル診断が可能となる。

このような観点から、表面波の中で最もエネルギー

の大きいレイリー波の減衰特性に着目した、新しいコンクリートひび割れ探査手法を開発し、発電用水路トンネルなどで試験実施を積み重ね、その適用性を実証した^{2),3)}。併せて、同手法を応用した覆工コンクリートの強度、及び力学特性の探査手法について、測定精度、適用範囲等を検討した。

本稿では、上記のひび割れ探査手法とその適用性について述べるとともに、これらの探査によって得られるひび割れ深さを含む変状データと覆工コンクリートの巻厚⁴⁾、強度データ等に基づき、逆解析を実施することによって、トンネル周辺地山の緩み圧や塑性圧の進展に伴う覆工の変状現象を再現し、覆工の残存耐力とトンネル安定度を評価する新たな診断モデルについて考察する⁵⁾。

2. レイリー波を用いたコンクリートのひび割れ探査手法

覆工表面の目視観察からは困難であった深さ方向へのひび割れの進展状況把握のために開発した探査手法の詳細は、既存の参考資料を参照いただくこととし、ここでは概要について記述すると以下の通りである。

(1) 新しい探査手法の原理と特徴

a) レイリー波の特性

新たに開発した探査手法は、衝撃弾性波の1つである表面波の中のレイリー波を用い、伝播途中でひび割れの存在によって減衰する性質と楕円形を描きながら進行する位相速度を利用している^{6),7)}。

レイリー波は次のような特性を有している。

- ①媒体表面を打撃した際に発生する弾性波の中では、エネルギーが最大である。
- ②位相速度は、媒体のせん断剛性に依存し、振幅は、表面からの深度の増加とともに急激に減少する。

これらの特性は、コンクリートの非破壊探査を行う上で優れた利点となっている。まず、表面打撃により発生する弾性波のエネルギーは、P波、S波と比較して、レイリー波が最大であり、実体波に比べレイリー波の減衰は少ない。

このようにレイリー波は非破壊探査において信号の採取に優れた波である。レイリー波の波動伝播の方向は、媒体の動きにほぼ直交した楕円形状で運動しており、速度はせん断剛性に依存しており、振幅はせん断剛性の大きさを表し、その変化によりひび割れの程度を知ることができる。

また、レイリー波の大部分のエネルギーは表面から1倍波長の範囲内に収まり、測定に使用するハンマーの大きさを変えることで、発生する波の波長を変え、対象とする測定深度を変えることができる。

これまで測定した範囲ではハンマーの種類により測定深度は0.2~1.2m程度まで変えることができ、ひび割れの深さは0~1.2mまで探知可能であり、トンネルの覆工の探査には十分である。

b) ひび割れ深さの推定原理

レイリー波の伝播過程では、幾何減衰と媒体の粘性減衰により、波の振幅=エネルギーは徐々に減少していくが、補正により一定値を保つようにすることが可能である。こうして一定に保たれた状態がひび割れの無い健全部であり、ひび割れが存在すると、それ以降では波のエネルギーが減少し振幅は小さくなる(図-1)。また、ひび割れが深く、レイリー波の波長が短くなる程その変化の度合いが大きくなり、ひび割れの有無及び深さを推定することができる。

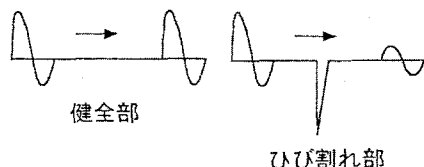


図-1 レイリー波によるひび割れ探査の概念

この原理を用いて、ひび割れの深さを測定するには、ひび割れの深さHと振幅の比Xとの関係进行评估する

必要がある。しかし、これを理論的に算定するのは非常に難しいため、ここでは、図-2に示す対数関係と仮定し、式(1)のように表す。

$$H/\lambda = C \lg(X) + C_0 \quad (1)$$

ここに、H：ひび割れ深さ、λ：波長、X：振幅比(ひび割れ後の各センサーで採取した振幅の平均値と前の振幅の平均値との比)、CとC₀は定数

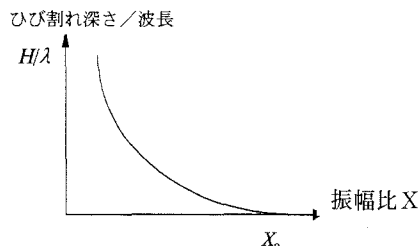


図-2 ひび割れ深さ(H/λ)とXの関係

図中にはコントロール点があり、ひび割れがない場合にはH=0であり、補正済みの振幅比X₀=1になり、したがってC₀=0となる。室内にて、幅1.5mmの人工的なひび割れを入れたコンクリートブロックを作成して、定数Cと波長λの相関を求めた。その結果は図-3のとおりであり、最小二乗法で直線回帰すると、次式が得られる。

$$C = -0.7429\lambda \quad (2)$$

よって、ひび割れ深さは次のとおりとなる。

$$H = -0.7429\lambda \lg(X) \quad (3)$$

なお、図-3の実験結果は、発振方式(ハンマーサイズ：M(34g)、S(142g)、I(465g)及び超音波発振振子(U))、発振距離(0.025m、0.1m、0.2m)及びセンサー間隔(0.05m、0.1m)を変化させて、Cとλの相関を求めたものである。

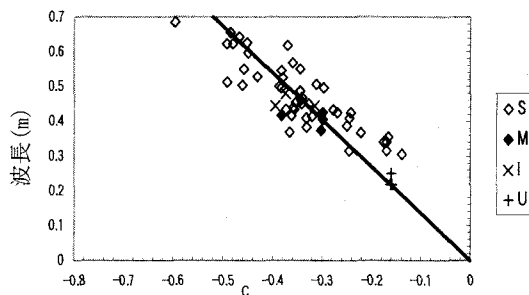


図-3 定数Cと波長λとの相関

(2) ひび割れ探査システムと探査精度

本探査手法のシステム化には、まず、ひび割れを挟み8個のセンサー(間隔10cm)を用いて計測する詳細探査システムを開発した。この詳細探査システムの精度について、コア抜きによる検証を行った結果は、図-4の通りで相関係数は0.95以上となり、超音波法に比べ良い精度となっている。

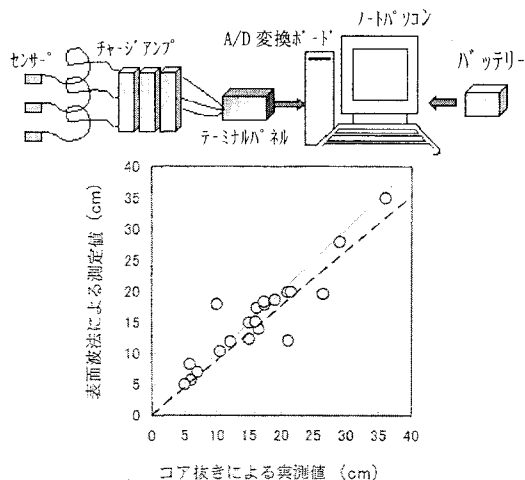


図-4 詳細探査システムと測定結果

また、本システムの1測線当たりの探査所要時間は概ね次の通りとなった。

- ①ハード部セットとシステム起動：約30分
- ②1測線の計測：約15分
- ③セットを分解し次測線へ移動：約30分

このため1箇所4測線を探査すると移動時間を考慮すると1日に2～3箇所程度しか探査できないことから、作業時間の短縮が課題となった。そこで、探査精度の低下を許容して探査時間の短縮化を図るため、簡易探査システムの構築を行った。

簡易探査システムのハード構成は、全体を片手で持ち運び出来るようノート型パソコンとし、電源は全て乾電池仕様としている。また、人力でセンサーとコンクリートとの接触面を同一状態に保つため、センサー先端を拡大させ、密着を良くする柔軟性のあるプラスチック材料を内部に充填した(図-5)。

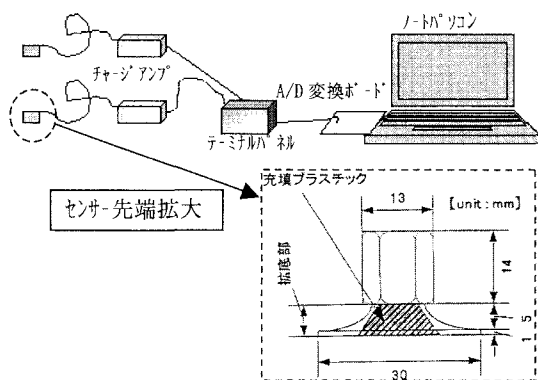


図-5 簡易探査システムの概要

簡易探査システムの精度についてコア抜きによる実測値と比較して検証した結果は、図-6に示すの通りであり、相関係数は0.77と詳細探査に比べかなりばらつきが大きな結果となった。その原因としては、センサーとの密着を手動にせざるを得ないこ

と等、システムの簡素化に起因する要因である。

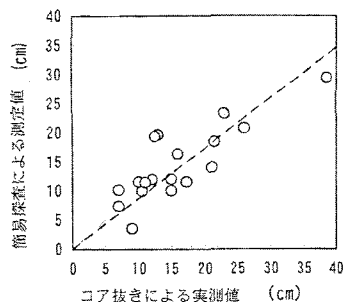


図-6 簡易探査法によるひび割れ深さ測定結果

簡易探査システムの測定精度向上方策の1つに、双方向発振手法がある。これは、図-7に示すように2個のセンサーを使用する場合、まず左側のch1から発振してch1→ch2の順にデータを採取し、次にそのままの状態でch2→ch1と逆の順番でデータを採取して、この両方向で測定した結果を平均することで、センサーの貼付け程度の影響や各チャンネル間の誤差などを除去しようとするものである。

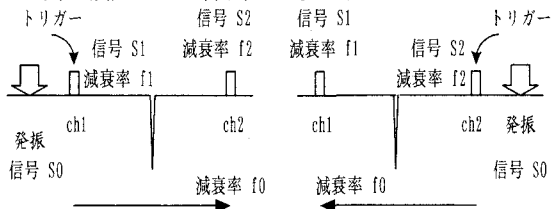


図-7 双方向発振による誤差低減原理

双方向発振手法の数学的原理は、発振信号の大きさを S_0 、ch1とch2で採取した信号をそれぞれ S_1 、 S_2 とし、ひび割れによる減衰率を f_0 、ch1とch2のセンサーの固定法等による減衰率をそれぞれ f_1 、 f_2 とすれば、ch1から発振した場合の信号比 η_1 は、

$$\eta_1 = S_2/S_1 = f_2 \cdot f_0/f_1 \quad \text{----- (4)}$$

ch2から発振した場合の信号の信号比 η_2 は同様に

$$\eta_2 = S_1/S_2 = f_1 \cdot f_0/f_2 \quad \text{----- (5)}$$

式(1)、(2)を平均処理すると、減衰率の真値は次式の通りで、チャンネル間の誤差等が除去できる。

$$f_0 = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} \quad \text{----- (6)}$$

(4) 覆工コンクリート強度の推定

本探査手法に使用するレイリー波の位相速度は、前述の通りせん断剛性に依存している。

一方、コンクリート強度は、セメントペーストマトリックスの強度と遷移帯の強度に依存しているが、骨材とセメントマトリックスの間のマイクロクラックや空隙が関係を複雑にしている^{8),9)}。一般的に、中・低強度コンクリートは、低応力段階ではマトリックス中にひび割れが発生しないといわれているが、この状態でもせん断付着ひび割れと呼ばれる安定し

たひび割れが粗骨材の近傍にすでに存在している。応力が増加すると、マトリックス中にひび割れが発生し、マトリックスや遷移帯中のひび割れは最終的には結合し破壊面を構成する。したがって、中・低強度コンクリートの場合は、その破壊プロセスから、一軸圧縮強度とせん断剛性は密接な関係があると考えられる。また、前述の通りレイリー波の位相速度もせん断剛性に依存していることから、せん断剛性を介して一軸圧縮強度はレイリー波の位相速度より推定が可能となる。

ひび割れ簡易探査システムを使用して測定した、レイリー波の位相速度と一軸圧縮強度の関係は図-8に示す通りである。

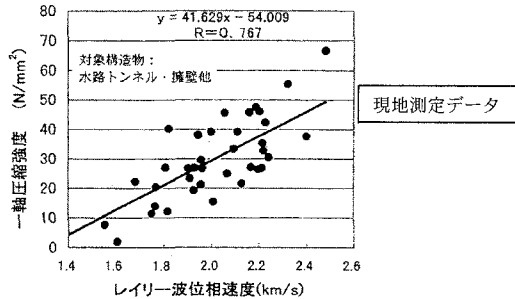


図-8 一軸強度とレイリー波位相速度との相関

本手法による場合は、図-9¹⁰⁾に示す超音波による場合やシュミットハンマーの場合と比較し相関性が向上しているが、若干大きなばらつきが認められる。

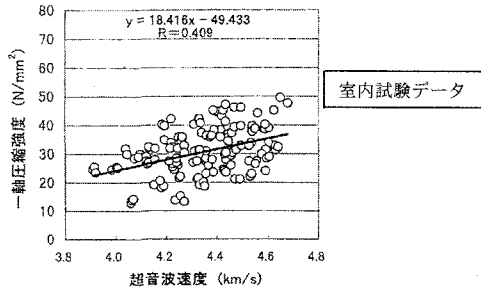


図-9 一軸強度と超音波速度との相関

この原因は、せん断剛性の歪レベルの低い部分から強度推定をしていることや、強度自体が水-セメント比、セメントの質等多くの要因に影響されることが想定される。

3. 発電用水路トンネルにおけるひび割れ探査事例

(1) トンネル概要

ひび割れ探査を行った水路トンネルのうち、測点数の多い下記3地点の探査結果の概要を紹介する。

Aトンネルは、無圧水路トンネルで、トンネルの

竣工は1923年であり、建設時の記録によると工事は難航し、木製支保工が何本も変形、折損したとされている。トンネル断面は、直径約3mの標準馬蹄形で、トンネル延長は10kmである。地質不良箇所を中心に縦断方向、横断方向ともにひび割れが多数覆工コンクリートに発生している。

Bトンネルは、無圧水路区間と圧力水路区間を有し、トンネルの竣工は、昭和初期の経済不況の時期の1993年である。無圧水路区間のトンネル断面は、直径約2mの標準馬蹄形、圧力水路区間は、直径約2.5mの円形となっている。トンネル覆工の状況は、無圧区間のアーチ天端付近の一部で、縦断方向のひび割れが発生している。

(2) 探査方法および探査箇所

探査は、図-10に示すような2軸ホイール付きの作業台車を組立て、これを移動しながら、前述の簡易探査システムを用い、卓越ひび割れの深さ及びコンクリート強度を調査した。既往のトンネルにおける探査延長、測点数等は表-1に示す通りである。

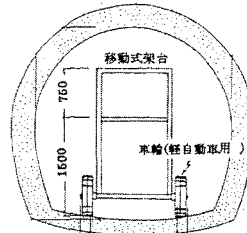


図-10 トンネル断面と作業台車

表-1 A, Bトンネル探査内容

	延長	項目	探査数
Aトンネル	10.0km	ひび割れ深さ コンクリート強度	117
Bトンネル	6.5km	ひび割れ深さ コンクリート強度	129

(3) 探査結果

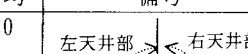
a) ひび割れ発生位置と深さ

Aトンネルのひび割れ深さと位置は、表-2に示す通りスプリングラインより上方のアーチ天井部縦断方向に多数分布し、下方側壁にはその半数程度であった。また、スプリングラインはコンクリート打設の打継目であり、この部分には貫通ひび割れが約30%あった。ひび割れ深さの平均値は、側壁部で20cm、天井部で13cm程度であった。

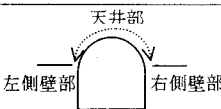
Bトンネルは、表-3に示すように、アーチ天井部に縦断方向に多く分布し、下方側壁にはほとんどなかった。ひび割れ深さの平均値は、側壁部で10cm、天井13cm程度であり、天井の貫通ひび割

れは 5%程度と極僅かとなっている。

表－2 Aトンネルひび割れ深さ測定結果

位置	測点数	平均	備考
右側壁部	17	20	
左側壁部	18	13	
右天井部	41		
左天井部	47		

表－3 Bトンネルひび割れ深さ測定結果

位置	測点数	平均	備考
右側壁部	1	10	
左側壁部	2		
天井部	22	13	

b) コンクリート強度

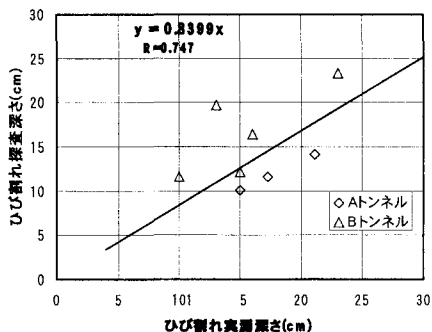
Aトンネルの覆工コンクリートは、一軸圧縮強度が 31.7～18.5N/mm²、平均 25.3N/mm² と推定され、として十分な強度を有していた。ただし、部位別に見ると強度の相違が認められ、特に天端部には巻厚も不均一、レイリー波の位相速度により強度推定が困難な箇所も数力所あった。

Bトンネルは、一軸圧縮強度が 48.3～22.6N/mm²、平均 33.7N/mm² と推定され、覆工コンクリートとして十分な強度を有していたが、Aトンネルと同様、部位による相違が認められ、天端部では平均 24.4N/mm² に対して側壁部では 26.3N/mm² とやや大きくなる傾向が確認された。

(4) 適用性評価

上記トンネルに対する簡易探査システムによる探査実績より、適用性評価をすると以下の通りである。

- ① 簡易法によるひび割れ深さの探査結果及びコンクリート強度探査結果のうち、ひび割れ深さの精度検証結果を図－11 に示す。図より、コア抜きによる実測結果とほぼ一致している。



図－11 A、Bトンネルひび割れ深さ探査結果

- ② 探査期間は、実績からトンネル延長 10km の区間に対して、準備を含めて約 5 日（昼間作業、29

回／日測定）となり、通常の発電所停止期間内での探査が可能と考えられる。

- ③ 現地作業面での改良点は以下の点が挙げられる。

- i) 手押し方式によるセンサーの取付け方の改善
- ii) 計測システムの改良（評価自動化 等）

上記の通り開発した簡易探査システムは、探査精度、時間とも十分適応性を有するものと判断される。

4. ひび割れ探査結果を用いた既設トンネルの診断

(1) 水路トンネルにおけるひび割れ発生状況

発電用水路トンネルに発生するひび割れについてはこれまでの内部点検、電磁波レーダーによる空洞探査や今回の新しいひび割れ探査等の結果から、次のようにパターン分けすることができる。

a) 横断方向を主体とするひび割れ

覆工の全断面にわたりトンネル横断方向あるいは若干斜め方向に発生しているひび割れは、厚さ方向に深く進行し貫通しているケースも多い。これらは、トンネル長手方向の打継目処理により生じるものやコンクリート打設の不具合によるコールドジョイントに起因するものが多く、安定上の問題は少ないと考えられる。ただし、中には断層のズレや地すべりなど地山の変状による場合もあり、ひび割れ等の進行性に対する監視は必要である。

b) トンネル軸方向を主体とするひび割れ

トンネル軸方向に発生するひび割れのパターンは、1～2本のひび割れがほぼ独立して一定の長さで進展しているものや、数本のひび割れがグループ状に進展しているなど様々なケースがある。

これらの様相は、地山からの外力、覆工の断面形状、背面の状況等に規定される。例えば、ほろ型トンネル側壁は、側圧により側壁中央に曲げ引張領域が生ずる。また、アーチ上部に空洞があれば、側圧の作用によりアーチ部上部にも曲げ引張領域が生じやすく、その引張応力がコンクリート強度を上回れば、ひび割れが発生することになる。このように、ひび割れ特性は、地山からの外力と覆工の耐力に関係し、ある限度以上になれば覆工破壊するため、トンネル管理上ひび割れの発生原因の推定と進行状況の把握が非常に重要となる。

(2) ひび割れの逆解析によるトンネル診断の考え方

これまでの既設水路トンネルの診断は、ボーリングを主体とした地質調査や覆工巻厚、強度等の調査の結果に基づき行われてきたが、力学的なメカニズムに立脚した合理的な判断基準を導入していると

は言い難い。トンネル構造の力学的支持機構とは、トンネルに作用する周辺地盤からの作用土圧と、それに抵抗する覆工コンクリート部材の曲げ及びせん断耐力とのバランスによるものと考えられる。

そのため現在実施している検討では、トンネル覆工に発生しているひび割れの位置や深さのデータに基づき、地山からの外力について逆解析によりシミュレート（図-12）することにより、ひび割れの発生している覆工コンクリートの破壊メカニズム（極限耐力）を考慮した、より合理的なトンネルの健全度診断について提案することを目的としている。

この提案手法を反映したトンネル診断フローは、図-13¹¹⁾に示す通りで、前述の探査手法で得られるひび割れ深さ、コンクリート強度のほか、地中レーダー等で得られる覆工巻厚、背面空洞の状況を既知情報とすることで、比較的簡便に解析条件を設定することができる。また、トンネル覆工の力学的安定度や空洞充填、内巻き補強等の効果を定量的に評価は、調査等から得られる情報より地山からの外力分布状況を逆解析することで評価可能と考えている。

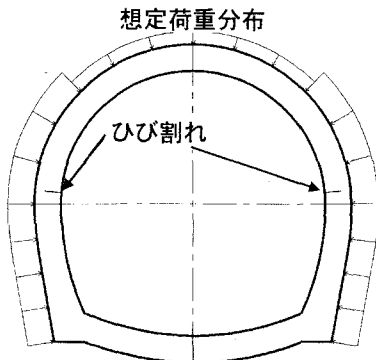


図-12 地山からの外力の逆解析のイメージ

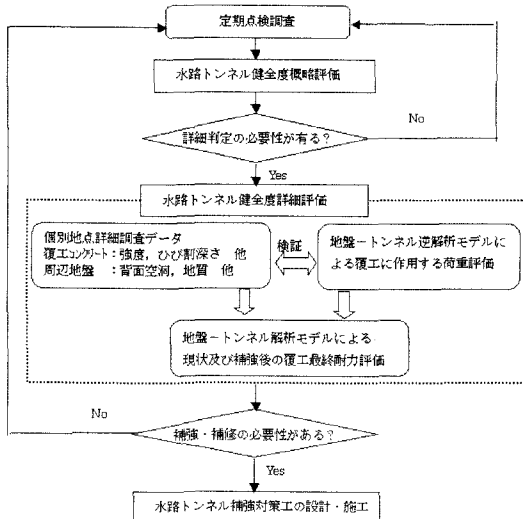


図-13 トンネル診断手法基本フロー

5. おわりに

山岳トンネルには古いものも多く、発電用水路トンネルを見ると、その半数以上が建設後 50 年以上経過し、その中には覆工に変状が発生しているものもあり、適宜補修が行われている。

最近では、比較的新しいトンネルでも、覆工コンクリートの剥離等の変状が生じ事故が発生し、社会的問題となった例もある。本文では、覆工に生じるひび割れの深さを主体とする新しい探査技術に基づいた、既設トンネル診断手法を提案した。

今後、我国の社会基盤整備における、補修・再生技術の向上は益々重要となると考えられ、この状況を踏まえ、本論はできるだけ科学的・技術的根拠に基づいた内容となるよう心掛けたが、一部検討不足もあると認識しており、ご批判を賜れば幸甚である。

なお、以上の新技術のうち、レイリー波を用いたひび割れ深さの非破壊探査手法は特許公開中であり、コンクリート強度推定法及び逆解析を用いたトンネルの安定性の診断法は、特許出願中である。

参考文献

- 1) 朝倉俊宏：山岳トンネルの変状発生機構とその対策，トンネルと地下，pp.55-65，1999.6.
- 2) 舍川他：新しいひび割れ深さ探査技術の開発，トンネル工学研究論文・報告集 第10巻，土木学会，pp.55-62，2000.
- 3) Nakamura, T. etc：A New Non-Destructive Testing Method for Crack and its Application to Tunnel Structure, *Modern Tunneling Science and Technology*, IS-Kyoto 2001.
- 4) 江川他：地中レーダーの水路トンネル調査への適用に関する研究，電力土木，No.203，pp.13-22，1986.
- 5) 桜井春輔：情報化施工における逆解析，土木学会論文集No.652/III-51，pp.1-10，2000.6.
- 6) F.E.Richart, Jr., J.R.Hall, Jr., R.D.Woods, 岩崎敏男, 島津晃臣：土と基礎の振動，鹿島出版会，1970.
- 7) 長岡洋介：振動と波，裳華房，1998.
- 8) P.Kumar Mehta, Paulo J.M.Monterio, 田沢栄一, 佐伯昇訳：コンクリート工学-微視構造と材料特性，技報堂出版，1998.8.
- 9) 笠井芳夫他：コンクリート総覧，技術書院，1998.3.
- 10) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，1983.
- 11) 中村隆幸他：表面波による覆工の非破壊探査と劣化診断，トンネルと地下，Vol.35 No.1, pp.45-53, 2004. 1.