

表面波によるトンネル覆工コンクリート健全度評価法の検討

小山 昭¹・京谷 孝史²・岩館 礼²・斎藤 秀樹^{3*}・鶴原 敬久⁴・曾根 好徳⁵

¹鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 青森新幹線建設局（〒030-0801 青森市新町2-2-4）

²東北大学 大学院 工学研究科 土木工学専攻（〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3）

³応用地質株式会社 エンジニアリング本部（〒305-0841 つくば市御幸が丘43）

⁴応用地質株式会社 東北支社（〒983-0043 仙台市宮城野区萩野町3-21-2）

⁵名古屋大学 減災連携研究センター（〒464-8601 名古屋市千種区不老町）

*E-mail: saito-hideki@oyonet.oyo.co.jp

従来、コンクリートの強度推定などの目的で利用されてきた弾性波は、主として実体波P波であるが、トンネル覆工のように発受振を表面のみで行わざるを得ない条件では、P波の計測は専門技術者でなければ難しい。そこで、表面発受振でも良好なデータを容易に取得できる表面波を利用することとし、まず、トンネル覆工のような薄い板状の媒質において、表面波が正しく計測できることを、模型実験と数値解析により確認した。次に表面波速度がコンクリートの強度と相関があることを、室内試験結果により示した。最後に、異なる深さや角度を模擬したひび割れ模型実験により、表面波の伝播特性に対するひび割れの影響を調べた。その結果、表面波の減衰特性により、ひび割れの深さを推定できることがわかった。

Key Words : non-destructive testing, seismic wave, surface wave, tunnel lining, concrete, crack depth

1. はじめに

トンネル覆工コンクリートの構造体としての強度は、コンクリート自体の強度のほかに、覆工厚さの変化やジャンカ（打設されたコンクリートの一部に粗骨材が多く集まってできた空隙の多い不良部分）などの存在に伴う不均質性、ひび割れの分布や経年的な強度低下などの影響を受ける。このため、コア採取など特定の箇所を対象とした試験だけからでは、構造体としての強度を把握することが難しい。コンクリートの弾性波速度と強度にある程度の相関関係があることに着目すると、弾性波速度の分布を把握することによりコンクリートの構造体としての強度を把握できる可能性がある。コンクリートの強度を弾性波速度から推定する手法については多くの既往研究がある。覆工コンクリートでは、コアリングなどにより採取した試料を用いて弾性波速度を容易に求めることができるが、原位置のトンネル覆工では、表面でしか弾性波の発振と受振ができないので主たる波動成分は表面波となること、板としての境界条件となるので測定される弾性波速度が半無限媒質中の弾性波速度とは異なる場合があることなど、測定上の問題がある。そこで、まず表面波によって、覆工コンクリートの健全度診断が可

能かどうかの検討を行う。さらに、表面波を用いてコンクリートのひび割れ深さを推定する方法について、模型実験および数値解析によって検討する。

2. コンクリートにおける弾性波計測

トンネル覆工コンクリートでの弾性波計測では、図-1に示すとおり、コンクリート表面で弾性波を発受振せざるを得ない。ハンマー等で表面に垂直方向に打撃し発生させた弾性波を、表面に垂直な感度成分を持つ受振センサで受振したときの波形記録を同図下段に示す。波の伝

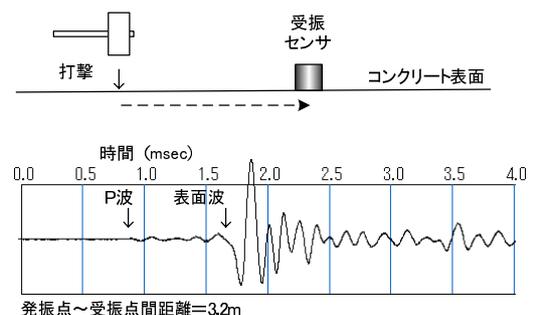


図-1 コンクリート表面における弾性波計測例

播方向に振動するP波は、それと直交方向の発受振によって観測した場合、その振幅が非常に小さく、これに比べて後続の表面波は大きな振幅を有する。このことから、コンクリート表面における弾性波計測では、P波を正しくとらえるのは専門技術者でなければ容易ではなく、表面波を計測するほうが容易であるといえる。そこで、トンネル覆工の強度劣化診断に、計測が容易な表面波を使用することを考える。

表面波を覆工コンクリート診断に使用するには、以下に示すようないくつかの問題点がある。①P波と異なり表面波は後続波であるため、たとえば覆工背面からの反射波の出現などが表面波の同定に影響を及ぼす恐れがある。②覆工コンクリートという板状部材を伝播する波動を扱うため、覆工厚さと波長の関係で表面波速度が正しく求められないことが懸念される。③従来の弾性波によるコンクリート強度推定には主としてP波が用いられてきたため、表面波計測から求められるS波速度と強度の関係が十分に調べられていない。以上の3点について、模型実験や数値解析によって検討する。

3. 表面波を用いるコンクリート健全度診断に関する基礎的検討

(1) 表面波の同定

P波の測定では波形記録中の初動に着目すればよいので、バックグラウンドノイズに対してS/N比の高いデータを取得することができれば、その同定は容易である。一方、表面波は必ず後続波となるため、屈折波や反射波などの影響を受けることが考えられる。しかしながら、表面打撃発振によって発生する表面波はP波などに比べ

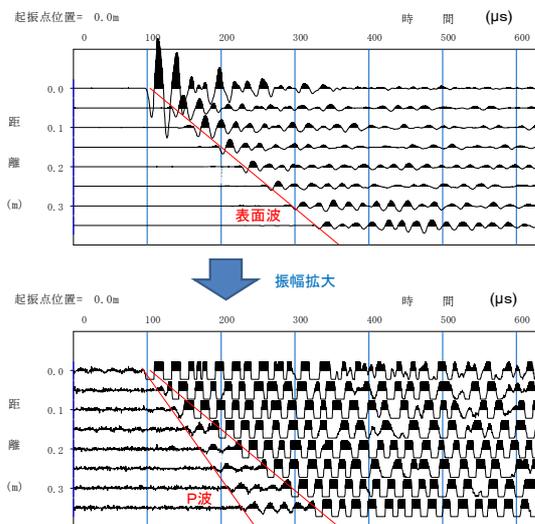


図-2 マルチチャンネル弾性波計測の例

て大きなエネルギーを有するため、波形の振幅が大きく表面波の同定は容易であると考えられる。ただし、表面波の初動を読みとるのは難しいため、受振距離の異なる複数の波形記録（マルチチャンネルデータ）から、表面波速度を決定するのが妥当である。図-2はコンクリート表面に5cm間隔に設置した加速度計により超音波発振による弾性波を測定した際の波形記録を示す。図の上下段は同じ測定記録であり、上段は波形の最大振幅が飽和しないようにプロットしたもの、下段はP波初動が読みとれるよう振幅を拡大してプロットしたものである。P波振幅はバックグラウンドノイズに隠れてしまうほど小さいが、表面波はそれに比べてはるかに大きい振幅を持ち、計測が容易なことがわかる。

また、トンネル覆工のような板状の部材において影響が懸念される反射波の出現について、数値シミュレーションで検討した。図-3は、覆工厚が20cm、30cm、40cmの場合のFEMによる波動伝播シミュレーションの例を示す。図示した時刻は、表面波が距離30cmの受振器に到達した瞬間であるが、覆工厚20cmのケースでは同時に底面からの反射波も到達している。反射波は覆工が厚いほど出現時間が遅くなるので、他の2ケースではまだ受振器に到達しない。このように、覆工厚が薄い場合には反射波が表面波より先に受振器に到達することがあり受振距離が長いほど影響を受けやすいが、反射波の振幅は非常に小さいことやマルチチャンネル波形記録上の見かけ速度が大きく異なることなどから、表面波計測にとってはほとんど問題ないと言える。

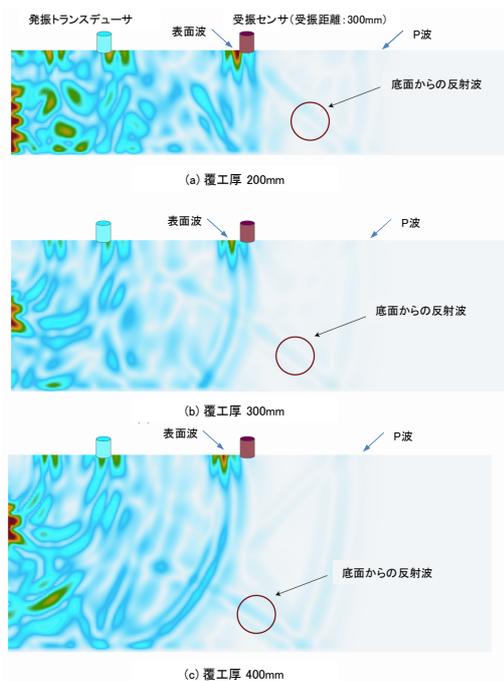


図-3 覆工厚が異なる場合の弾性波動シミュレーション例
(入力波の周波数：30kHz)

(2) 板状部材を伝播する表面波

斎藤(2009)¹⁾は、平板を伝わるP-SV波の分散について整理しているのので、これに基づいて検討する。その中で、基本モードの波は高周波数側でレイリー波速度に収束することが示されている。この時の“高周波”とは、S波速度 β と板の厚さの半分 H で正規化された無次元周波数 (fH/β) が1.0以上となる周波数であることが示されている。いま、 $\beta=2,500\text{m/s}$ 、 $f=10\text{kHz}$ とすれば、 $fH/\beta=1.0$ 以上となる H は0.25m、すなわち厚さが50cm以上の板であれば、レイリー波速度が正しく求められることを示唆している。もし、厚さ20cm程度まで正確にレイリー波速度を求めたい場合は、25kHz以上の周波数の波を伝播させればよいことがわかる。以上のことは、言い換えれば波長が板の厚さの1/2よりも短ければ、正しいレイリー波速度を求められることを意味している。対象とする覆工厚を考慮して、上記のような周波数の波を使用することを前提とすれば、表面波の分散を考える必要はなく、図-2のように、マルチチャンネルデータの位相の並びから、表面波速度を直接求めることは妥当と言える。

板の厚さを変えた時に表面波速度に変化が見られるかどうか、コンクリート模型実験によって確認した。

図-4に、覆工コンクリートを模擬して作製したコンクリートスラブ模型を示す。模型表面の対角線上に、10cm

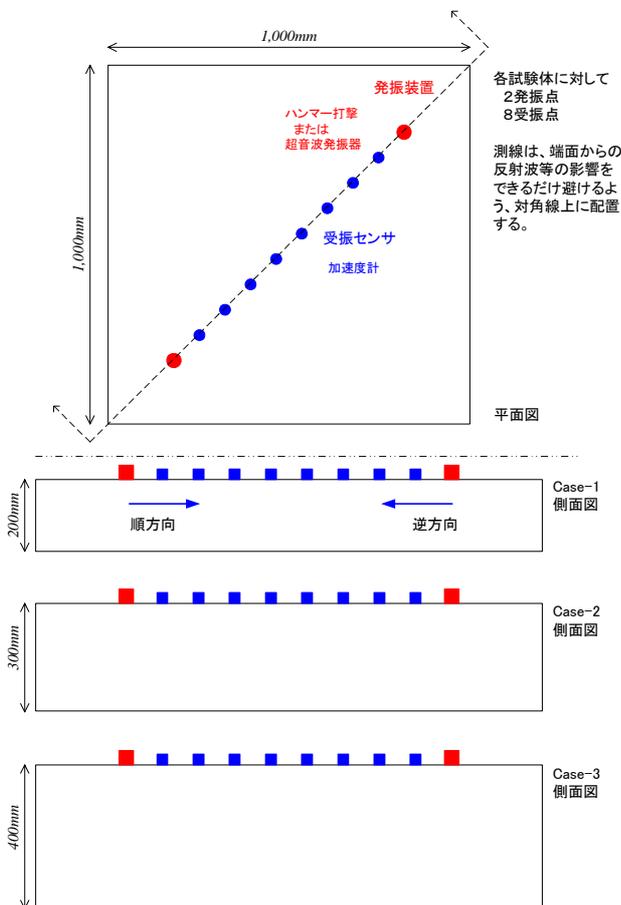


図-4 弾性波実験用コンクリートスラブ模型

間隔で8個のセンサ（加速度計）を設置し、その両端に各1点の発振点を設けた。発振には超音波トランスデューサ、鋼球（ $\phi 10\text{mm}$ ）、小ハンマ、片手ハンマ（500g）の4種類を用いた。発振点近傍の受振波形から、表面波の周波数を読みとると、超音波の場合50kHz、鋼球の場合40kHz、ハンマー2種では30kHz程度であった。それぞれの発振器具の順方向と逆方向の測定で求めた表面波速度を図-5に示す。

厚さの異なる3種類の模型において、周波数の異なる発振器具による順・逆方向の測定で求めた表面波速度は、2.1~2.3km/sの範囲にあり、厚さ30cmという中間的な厚さの模型の速度が最も高い傾向にあるものの、模型材料のばらつきや速度の決定誤差の範囲内と思われる、系統的な違いは見られないと言える。この実験における表面波の波長は、周波数が最も低い30kHzの波の場合でも7~8cm程度なので、最も薄い20cmの覆工厚に対しても、その1/2より短く、すべてのケースでレイリー波速度を正確にとらえているものと判断できる。

以上のように、鉄道トンネルの覆工コンクリートとして想定される範囲の厚さに対して、現実的に使用可能な発振器具によって、表面波速度を正確に測定できることがわかった。

(3) S波速度と強度の関係

弾性波速度とコンクリートの強度（一軸圧縮強さ）の関係については多数の研究がある。しかしそのほとんどがP波速度によるものである。一方、表面波速度は主としてS波速度によって決まる。コンクリートのP波速度とS波速度には概ね一定の関係が認められると考えられるが、念のためS波速度と強度の関係を室内試験により確認しておく。図-6は、5カ所の道路および鉄道トンネルの覆工コンクリートから採取された47個のコア試料の一軸圧縮強さと超音波速度測定による V_p （P波速度）

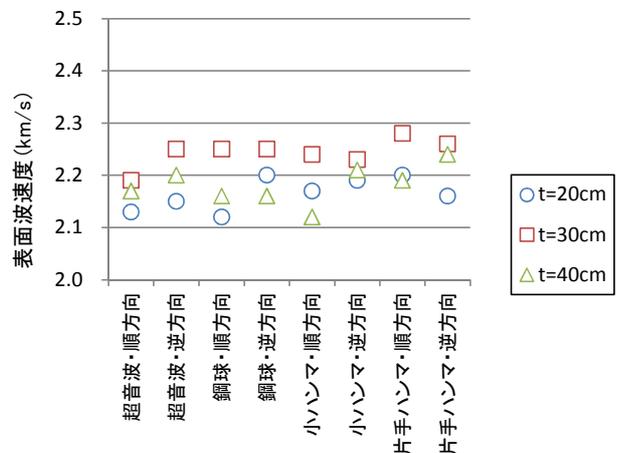


図-5 コンクリートスラブ模型における表面波速度

とVs (S波速度) の関係を示すものである。同図には速度値から算出した動ポアソン比も併せて示した。ばらつきは大きいものの、Vp、Vsともに一軸圧縮強さと正の相関を示していることがわかる。

ところで、本研究の表面波計測で測っているレイリー波速度とS波速度の関係は動ポアソン比によって異なるが、図-6に示したトンネル覆工コンクリートの動ポアソン比の範囲(概ね0.25~0.35)であれば、レイリー波速度はS波速度の約92~93%である。すなわちこの範囲で、レイリー波速度とS波速度の比は概ね一定なので、レイリー波速度を用いて強度を推定することも可能と言える。

4. 表面波を用いたひび割れ深さの推定

(1) 既存のひび割れ深さ試験法

コンクリートのひび割れ深さを求める試験法としては、超音波のひび割れ先端からの回折波を利用し、時間遅れや位相の反転から深さを推定する方法が知られている²⁾。最近では、呉ほか(2003)³⁾やChai et al.(2010)⁴⁾が表面波を用いてひび割れ深さを推定する方法を提案している。これらはいずれもひび割れを通過する際に表面波(レイリー波)が減衰すること、減衰の程度は、ひび割れが深いほど、また波長が短いほど大きいことなどの特徴を利用している。これらの研究は、いずれもコンクリート表面に垂直なひび割れを想定しているが、本研究では、ひび割れが傾斜している場合についても検討することとした。

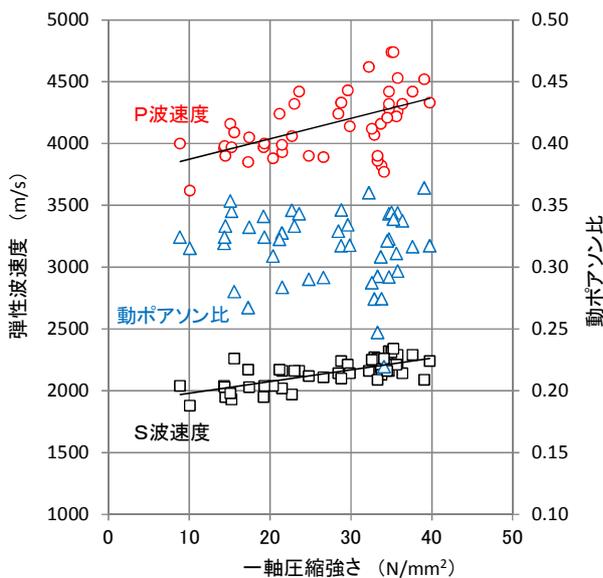


図-6 トンネル覆工コンクリートのコア試料による一軸圧縮強さと弾性波速度、動ポアソン比の関係。

(2) ひび割れを通過する表面波の減衰

表面波の伝播特性として、表面に溝などがあると振幅減衰が起こることが古くから知られている。その概念図を図-7に示す。溝の深さによる表面波の減衰特性を理論的に導くことはできないため、両者の定量的な関係を求めるため、模型実験と数値解析を行うこととした。

a) ひび割れを模擬した石膏模型実験

ひび割れの深さとひび割れの傾斜角が表面波の伝播特性に及ぼす影響を調べるため、模型実験を行った。模型は図-8に示すように、石膏を用いて作製した。ひび割れは、石膏をのこぎりで切除しながら、順次その深さを増加させ、異なる深さで弾性波計測を実施した。あらかじめ深さの異なるひび割れを作製した模型を作ることができるが、模型自体のばらつきが実験に悪影響を及ぼす恐れがあるため、一つの模型を使い、徐々にひび割れ深さを深くする方法をとった。また、のこぎりでの切断が容易なことから石膏を使用した。なお、ひび割れの表面とのなす角を90°、60°、30°の3通りとし、3つの模型を作製した。図-9には測定系模式図を示す。

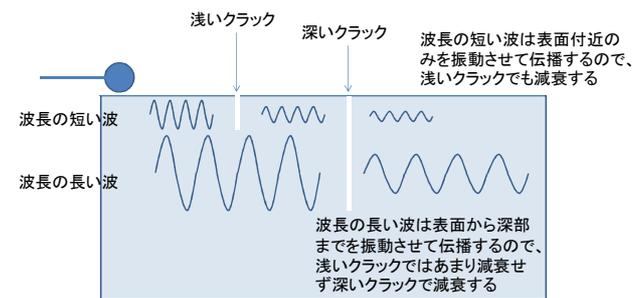


図-7 ひび割れによる表面波減衰の概念図

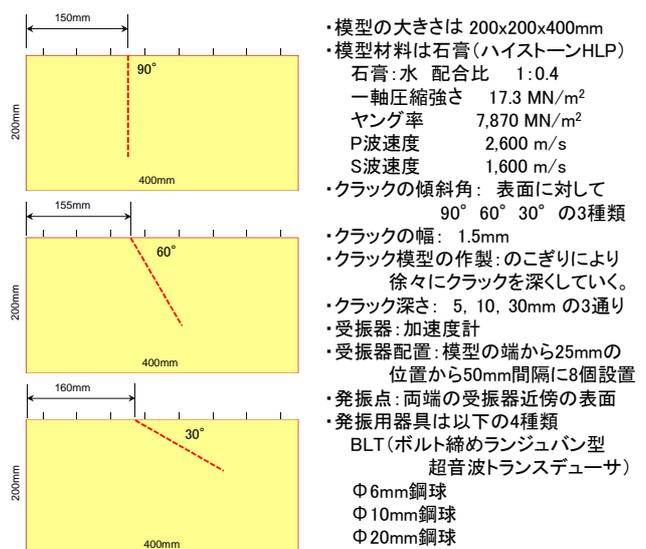


図-8 ひび割れ実験用の3種類の石膏模型

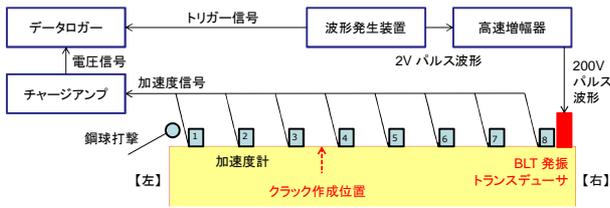


図-9 ひび割れ模型実験の測定系模式図

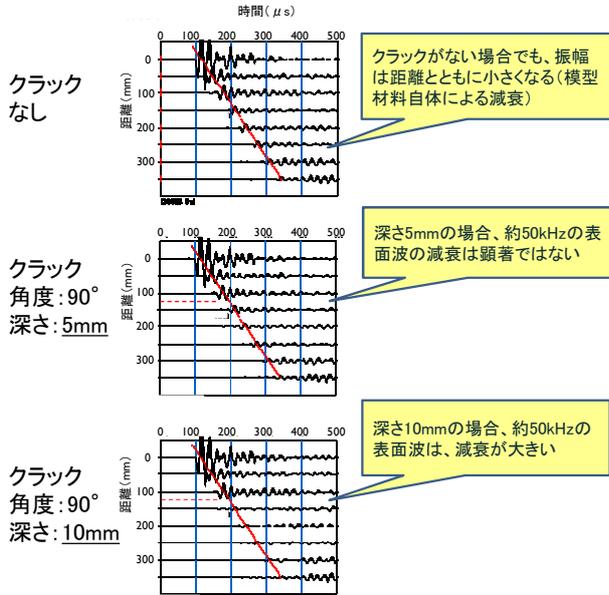


図-10 クラック深さが異なる場合の波形記録例

図-10に、測定結果の一例を示す。クラックがない場合でも距離とともに振幅は減衰する。これは幾何減衰や模型材料自体による減衰である。クラックが深くなるにつれて、クラックを挟んだ2つの受振波形の振幅比が大きくなるが、その定量的な評価法は後述する。

b) ひび割れを模擬した数値実験

石膏模型実験と同一の条件で、FEMによる波動伝播シミュレーションを行った。結果の一例を図-11に示す。同図(a)の健全モデル（クラック無し）に対して、(b)のクラック深さ10mmの場合には振幅が小さく（減衰が大き）くなっており、(c)の深さ30mmでは振幅が著しく低下し、(d)の深さ50mmでは、クラック位置で表面波が遮られているように見える。数値計算による表面波の伝播は、模型実験で実測した波形と整合する結果であった。

c) ひび割れの深さ・傾斜角と表面波減衰の関係

石膏模型実験データから表面波減衰とひび割れ深さの関係を求めるため、図-12に示すようなデータ整理を行った。すなわちクラックを通過する前後2受振点ずつの振幅値から振幅比を求めた。ただし、クラックがない場合でも振幅は距離とともに減衰するので、図-10に示したようなクラックがない場合の実験で得られた振幅減

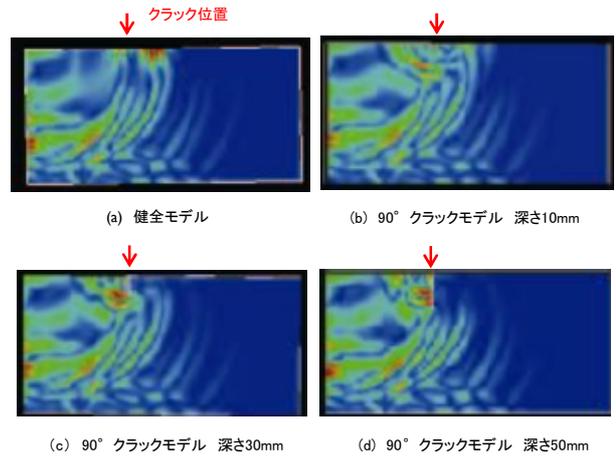


図-11 石膏模型と同一条件のFEMによる波動伝播シミュレーション例（入力は50kHzリッカーウェーブレット、発振から150μs後のスナップショット）

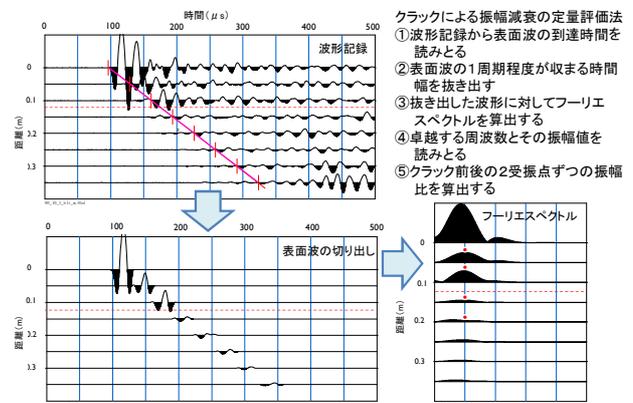


図-12 クラックを通過する際の表面波の減衰の評価法

衰分を補正して、クラックのみによる影響と考えた。

データの分析は、図-13に示すように、横軸にクラック深さ d と波長 λ の比(d/λ)をとり、縦軸に上記の方法で求めた補正後の振幅値をとってグラフにした。波長 λ は、受振波形から読み取った卓越周波数 f と表面波速度 Vr から、 $\lambda=Vr/f$ によって求めた。クラック傾斜角の異なる3種類の模型について、測線左側からの発振記録データを上記の方法で整理したのが、図-13である。図を見ると角度が90°および60°の場合には、振幅比のプロットはほぼ同じ傾向を示すものの、30°の場合だけは振幅比が全体に大きい（減衰が小さい）。次に、同一のデータについて、横軸を d/λ の代わりに h/λ として整理した。ここで、 h は図-14に示すように、クラック先端（最深部）のコンクリート表面からの垂直深さとした。横軸を h/λ として整理した結果を図-15に示す。この図を見ると、3種類のクラック角度によらず、ほぼ同一の曲線で近似できることがわかる。すなわち、表面波の減衰からは、クラックの傾斜角にかかわらず、クラック先端の表面からの深さ（ h ）を推定できると言

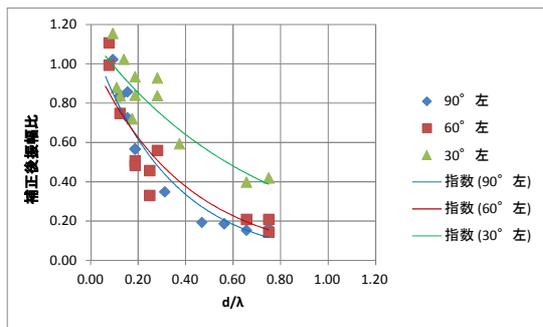
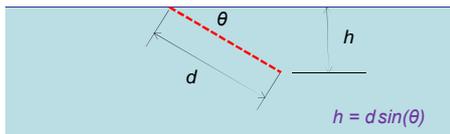


図-13 波長とクラック深さの比に対する補正後振幅比



θ: クラック角度
d: クラック深さ(表面からのクラック沿いの深さ)
h: クラック先端の表面からの垂直深さ

図-14 クラック深さの測り方

える。このことは、測線右側からの発振記録においても同様であり、左右の違いは顕著ではなかった。また、数値シミュレーションからも同様の結果が得られた。

5. 結論

トンネル覆工コンクリートの健全度評価を目的として、表面での計測が容易な表面波の利用を検討した結果、以下の結論を得た。

- ① マルチチャンネルデータを取得することにより、表面波の同定は容易である。
- ② 覆工厚20cm以上のコンクリートの評価には、30kHz以上の弾性波を使用すれば正確な速度が得られる。
- ③ 表面波速度とコンクリートの強度には相関がある。
- ④ 表面波の減衰特性から、ひび割れの深さ(角度によらず、ひび割れ先端のコンクリート表面からの垂直深さ)を推定することが可能である。

A STUDY ON EVALUATION METHOD FOR TUNNEL LINING CONCRETE BY SEISMIC SURFACE WAVES

Akira OYAMA, Takashi KYOYA, Rei IWADATE,
Hideki SAITO, Takahisa TSURUHARA and Yoshinori SONE

The authors have been studying on establishing an efficient method for evaluating tunnel lining concrete. Although there are many research works on non-destructive testing method using seismic waves, almost all methods treated P-waves. Since P-waves are difficult to obtain when both source and receivers are on the concrete surface, we considered using surface waves. As the results of both physical model and numerical model experiments, we found that the surface wave velocity could be used as an index of concrete soundness. We also found that the amplitude attenuation of surface waves passing a crack could be used to determine the depth of the crack.

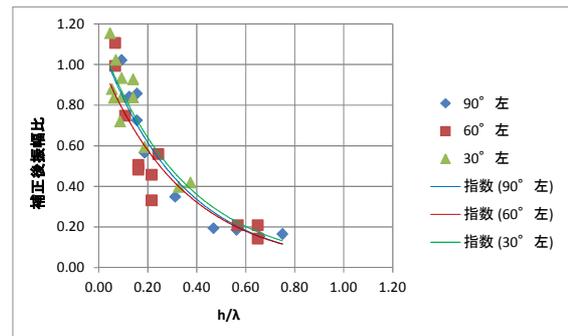


図-15 波長とクラック先端の表面からの垂直深さの比に対する補正後振幅比

6. おわりに

表面波を用いるトンネル覆工コンクリートの健全度診断法について、基礎的検討を行い、その可能性を示した。今後は、条件の異なる模型実験や数値解析を行うとともに、現場での計測・解析・評価システムを構築していきたい。

参考文献

- 1) 斎藤正徳：地震波動論，p.539，東京大学出版会，2009。
- 2) 日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，1994。
- 3) 呉 佳嘩，堤 知明，江川顕一郎：表面波を用いたひび割れ深さの新しい測定技術，コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集，日本非破壊検査協会，pp.243-252，2003。
- 4) Chai, H. K., S. Momoki, D. G. Aggelis, and T. Shiotani : Characterization of Deep Surface-Opening Cracks in Concrete: Feasibility of Impact-Generated Rayleigh-Waves, ACI Materials Journal, pp.305-311, May-June 2010.