

非破壊試験法によるコールドジョイントの評価に関する研究

NDT TECHNIQUES FOR EVALUATION OF COLD JOINT

松山公年*・宋 泰徹*・太田資郎*・片桐英夫**・生形嘉良***

Kimitoshi MATSUYAMA , Techoru SON , Shiro OOTA, Hideo KATAGIRI and Yoshikazu UBUKATA

In the Fukuoka tunnel, blocks of lining concrete fell off to a roof of the shinkansen on jun. 27, 1999. Total weight of the concrete blocks was 200 kilograms. They came off arch wall which has cold joint of rail way tunnel and crashed a roof and pantograph of the shinkansen.

In the inspection of cold joint, visual inspection and sound inspection using hammering were carried out. These methods are qualitative and based on empirical knowledge. We had field test with non-destructive tests which are sound test, ultra sonic, elastic wave and radar. We evaluated applicability of the methods and proposed combination of NDT for inspecting cold joint.

Key Words : tunnel , concrete , cold joint , non-destructive test

1. はじめに

平成11年6月27日、山陽新幹線福岡トンネルのコールドジョイント部でコンクリート塊が剥落し、ひかり351号のパンタグラフが破損した。さらには、同年10月9日に山陽新幹線北九州トンネルで側壁コンクリートの一部が剥落しているのが発見された。これらの事故を契機に、JR西日本は平成11年10月25日から12月15日の52日間、山陽新幹線全142トンネル（延長280.495km）を対象に、延べ69,000人を動員して「山陽新幹線トンネル安全総点検」を実施した。この総点検によって安全性が確認された¹⁾。

従来、コンクリート構造物の剥離・剥落の点検は、目視観察やハンマーのたたきによる打音調査が主体で、現在もこれらの手法が用いられている。これらの調査は、剥離箇所を検出に有効な手法であるが、定性的な手法であり、剥離部の深さや規模に関する情報を定量的に得ることは困難である。また、コールドジョイントのようにコンクリート表面に直角方向に存在している打重ね部の状態・程度を打音法で把握することに限界がある。

そこで、コンクリートの剥離やコールドジョイントを定量的に調査する方法としてセンサ技術を利用した非破壊試

験法が注目されている。非破壊試験法は、コンクリートの内部欠陥に関する情報を与える手法として期待されているが、試験精度や現場への適用性が問題点として指摘されており、その適用性が十分評価されていないのが現状である。

そこで、本論文ではコールドジョイントの定義とその影響を示し、山陽新幹線福岡トンネルに発生したコンクリート塊剥落事故の原因について整理した。また、実トンネルのコールドジョイント部に対し非破壊試験による調査を実施し、コールドジョイント部および剥離部の評価への非破壊試験法の適用性に関して検討した結果を報告する。



写真 - 1 非破壊試験による調査状況（道路トンネル）

* 中央研究所 開発研究部

** コンサルタント国際事業本部 シンズリ道路開発事務所

*** 仙台支店 奥羽事務所

2. コールドジョイントの定義と影響について

(1) コールドジョイントの定義

「コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策(土木学会)」²⁾では、コールドジョイントは「すでに打込まれたコンクリートの凝結が進み、その上に新たにコンクリートを打重ねる場合に一体とならない継目」と定義され、本来一体として打込むように計画されたコンクリートにおいて、計画の不備あるいは予期せぬ施工中のトラブルによって打込みが中断し、適切な処理を行わずに新たにコンクリートを打重ねた場合に生じる一体とならない継目であるとしている。

(2) コールドジョイントの影響

コールドジョイントが構造物に及ぼす影響は、打継目と同様であると考えられることができるが、コールドジョイントは突発的な事由により発生することが多いので、発生する場所や対策が設計・計画段階で考慮されていない点が打継目と異なる。

「コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策」では、コールドジョイントを図-1に示すように軽微なコールドジョイントと、明らかに一体性が損なわれているコールドジョイントとに区分している。これは、コンクリート打設時の対応によってその程度が異なるという考えである。

コールドジョイントが構造物の性能に及ぼす影響は様々であり、表-1のように分類される。コールドジョイントが構造物の耐荷性能に及ぼす影響に関しては、無筋コンクリートではコールドジョイントの程度や構造物の種類に大きく依存するものの、一般にはコンクリートの曲げ強度、せん断強度、引張強度などが低下する。その低下の程度に関しては、コンクリートの打重ねの許容時間(例えば、練

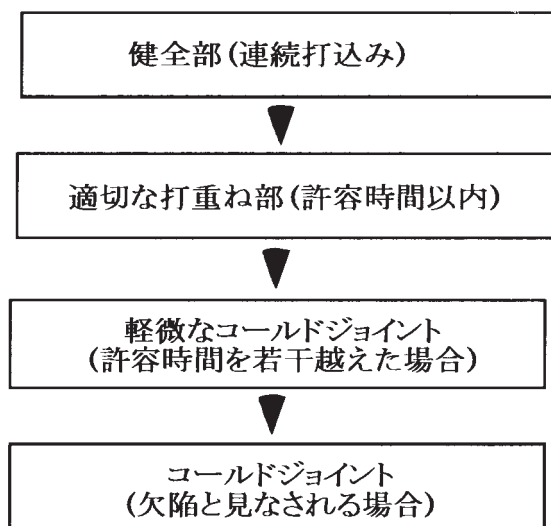


図-1 境界部の接合性による区分

混ぜ後4時間)を超えて打重ねた場合には、打重ねをしないものと比較して、打重ねの条件により強度比40~60%程度まで低下することが報告されている。

しかし、耐荷性能を求められる多くの構造物は鉄筋コンクリート構造として設計されている。この場合鉄筋コンクリート部材にコールドジョイントが存在しても、適切な打継ぎ処理を行なった打継目と同等な耐荷性能があることが示されている。

ただし、梁部材では、変位が若干大きくなることが示されている。鉄筋コンクリート構造物にコールドジョイントが発生した場合には、鉄筋腐食が生じない期間の耐荷性能には問題ないとしても、耐久性に関しては問題が残る。例えば、既往の文献では、一般的なコンクリートのコールドジョイント部では、健全部と比較して中性化速度が2~3倍程度大きくなることや、透気係数が10倍程度大きくなることが示されている。塩化物イオンの浸透も同様に促進されることが考えられる。中性化速度、透気係数、塩化物イオンの浸透性の増大は、いずれも鉄筋コンクリートの鋼材を腐食させる主な要因であるので、鉄筋コンクリート構造物に発生したコールドジョイントであっても、環境・供用条件、鉄筋のかぶりなどによっては構造物の耐久性が著しく損なわれる可能性がある。

3. 福岡トンネル剥落事故のメカニズム³⁾⁴⁾

(1) 福岡トンネルの施工状況

コールドジョイントからコンクリート塊が剥落した福岡トンネルは、1970年に工事に着手し、1975年3月に竣工している。福岡トンネルは在来工法で施工され、木矢板と鋼製アーチ支保工(150H)で、コンクリートの設計巻き厚は50cmである。図-2に福岡トンネルの掘削順序を、図-3にコンクリート打設イメージを示す。

(2) コンクリート塊剥落事故の概要

平成11年6月27日山陽新幹線福岡トンネル内で長さ約2m、重さ約200kgのコンクリート塊が、高さ約5.5mの覆工面から剥落し、トンネル通過時のひかり351号に直撃した。

表-1 コールドジョイントの発生に伴う影響

構造物の性能	悪影響
耐荷性能	欠落、せん断抵抗の低下
使用性能	漏水、遮音
耐久性能	透水、通気による鋼材の腐食
美観	外観、良好な塗装への障害、 タイルのひび割れ、浮き、剥落

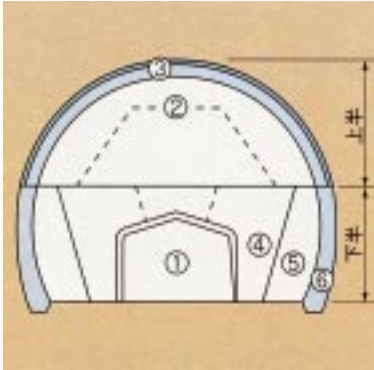


図-2 掘削順序

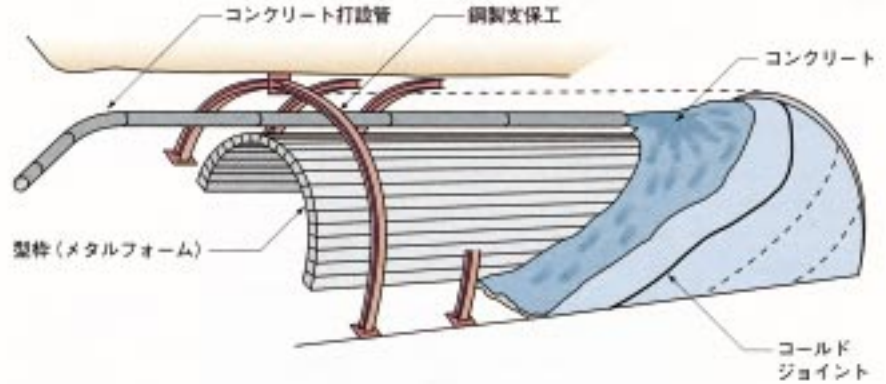


図-3 コンクリート打設イメージ

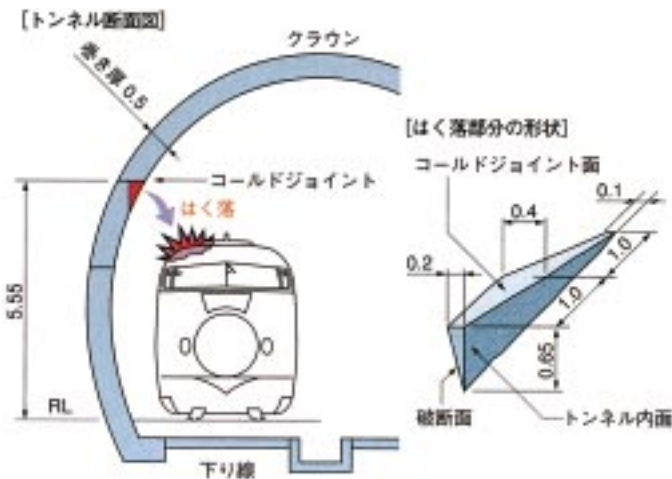


図-4 コンクリート剥落部分の概要

ひかりに直撃したコンクリート塊は、車両の屋根を約16mにわたってめくり上げ、パンタグラフを破壊した。図-4にコンクリート塊の剥落の概要を示す。剥落したコンクリート塊の剥離面のうち、コールドジョイントの面は平滑であり、一方の面は一部茶色を呈した部分があった。

(3) 剥落事故の推定原因

運輸省に設置された「トンネル安全問題検討会」で福岡トンネルの事故原因の解明が行われた⁴⁾。想定された事故のメカニズムは以下のとおりである(図-5)。

覆工コンクリート打設中にコンクリート材料の供給に中断が生じ、アーチ下部の内部にコールドジョイントが形成された。

コンクリート打設時の支保工の振動、あるいは、型枠清掃や剥離剤の不足による型枠脱型時の影響により、コールドジョイント下部の内部で広範囲にひび割れが形成された。

長期間にわたる漏水、温度変化などの影響に、空気圧変動、列車振動の繰返しの影響も加わり、残っていた接合面にも徐々にひび割れが進展し剥落した。

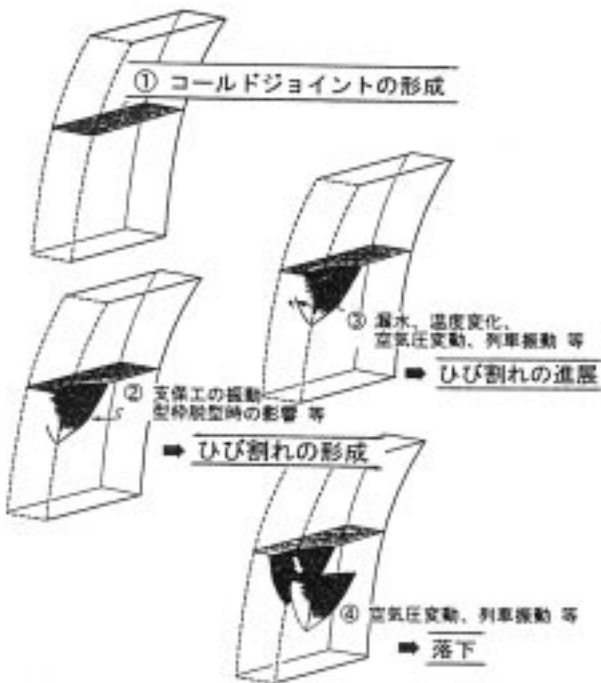


図-5 剥落事故の想定メカニズム

4. 非破壊試験法の適用実験

(1) 非破壊試験法のめぐる状況

非破壊試験法は、対象物に損傷を与えることなく内部の欠陥に関する情報を得る手法である。非破壊試験は、これまで金属及び機械分野で利用されており、その使用方法が基準化されているものも少なくない。建設分野において、建設材料の大半を占めるコンクリートはセメント、水、骨材から成る複合材料であり、金属と比べて材料の不均質、弾性波・電磁波の減衰性、対象物の大きさなどが非破壊試験法のコンクリート構造物への適用を困難にさせる要因となっているが、近年コンクリート構造物のメンテナンスの需要が高まる中、非破壊試験法のコンクリート構造物への

表 - 2 コンクリート構造物の内部欠陥に対する非破壊試験法

手法名	測定対象	調査対象	測定原理	測定方法	特徴		備考
					長所	短所	
打音法	弾性波 打撃波(打撃音)	内部欠陥	欠陥部で打撃波の反響音が異なる性質を利用。	ハンマーで表面を打撃し、その反響音を判定する。	測定が容易。直感的である。	測定結果の判定に熟練を要する。	剥離調査で最も一般的な方法である。反響音をマイクや振動センサで測定・解析する方法もある。
超音波法		ひび割れ深さ 内部欠陥 部材厚	欠陥部で超音波が反射する性質を利用。	発振子から超音波パルスを入射させ、その反射波を測定する。	測定結果(伝播時間、波形など)が記録できる。	発受振子を対象表面に密着させる必要がある。減衰の影響が大きい。鉄筋が存在すると精度が低下する。	ひび割れ深さや部材厚さ測定に使用されつつある。
レーダ法	電磁波	内部欠陥 部材厚	電磁波がコンクリートと欠陥部の界面で反射する性質を利用。	発信アンテナから周波数400MHz~1.5GHz程度の電磁波を発信し、反射波を測定する。	アンテナが非接触で連続的な測定が可能である。深さ方向の内部欠陥の位置をとらえることが可能である。	周波数を低くすれば減衰は減るが、指向性が悪くなる。鋼材からの反射が大きく、測定に影響を受ける。	トンネル覆工裏の空洞調査、舗装下の空洞調査に使用されている。
赤外線法		内部欠陥(表層部)	表層部の欠陥の存在で熱伝達が異なることで表面温度分布が変化する性質を利用。	赤外線カメラによって表面温度分布を測定する。	赤外線カメラと対象の距離を離して、広い範囲の測定が可能である。	表面温度の変化が生じるための熱源(太陽、ヒータなど)が必要である。気象条件に測定結果が左右される。	建築物外壁や吹付けのり面の剥離調査に用いられている。
放射線法		X線	内部欠陥	物質によりX線の透過度が異なる性質を利用。	放射線を用いて部材の透過画像を撮影する。	コンクリート内部状況を撮影画像より直接観察できる。	透過背面にフィルムを設置しなければならない。測定厚さの限界は40cm程度。

適用性が検討され、使用されつつある。

(2) 非破壊試験法の特徴

非破壊試験法では、対象物に物理的または電気的エネルギーを与えて、その応答を各種センサで測定する方法が一般的に用いられている。対象物に与えるエネルギーとしては、弾性波(打撃波、超音波)や電磁波(マイクロ波、赤外線、X線など)が用いられる。非破壊試験法は、使用する弾性波や電磁波の種類により、その手法が分類される。表-2に、コンクリート構造物に用いられている非破壊試験法を示す。

1) 打音法

打音法は、ハンマーで対象表面を打撃し、その反響音から判定する方法である。打音法は、コンクリート構造物の剥離調査で最も一般的に用いられている方法⁵⁾であるが、調査が容易で直感的である反面、調査結果の判定にばらつきがあり、熟練を要する特徴がある。

2) 超音波法

超音波法は、発振子から対象物に入射した超音波パルス(弾性波)が欠陥部で反射したものを受振子で測定し、超音波の伝播時間や波形の変化で欠陥を評価する方法である。コンクリートのひび割れ深さや部材厚さの測定に用いられつつあるが、センサ(発振子、受振子)を構造物に密着させる必要があること、測定精度が鉄筋の影響を受ける特徴を有する。

3) レーダ法

レーダ法は、アンテナを用いて電磁波を対象物に発信し、内部欠陥からの反射波を測定する方法である。レーダ法は対象物に対して非接触で調査できるので、連続的な調査が可能である。レーダは鋼材からの反射が大きく、調査精度に影響を受ける。現在、トンネル覆工背面や舗装下の空洞調査に使用されている。

4) 赤外線法

赤外線法は、赤外線カメラによって対象物表面の温度分布を測定する方法である。対象物表層部に欠陥があると、表面からの熱伝達が異なり、表面温度分布が変化する原理を使用している。対象物から赤外線カメラを離すことにより、広範囲の調査が可能であり、建築物外壁や吹付けのり面の剥離調査に利用されている。

5) 放射線法

放射線法は、X線を対象物に透過させて内部の鋼材や欠陥の存在で透過度が異なる性質を利用して内部状況を把握する方法である。X線を透過させる必要があるため、対象物の両側に放射部とフィルムを挟む必要がある。コンクリート中の構造の位置やグラウト状況の確認に用いられている。

これらの非破壊試験法のうち、比較的現場に適用しやすい打音法、超音波法、衝撃弾性波法、レーダ法についてトンネルのコールドジョイント部で試験を行った。赤外線法は、トンネルのような直射日光が当たらない閉鎖

された空間では、熱源を与える必要があること。放射線法は、対象物の両側に放射部とフィルムを設置する必要があるので、今回の実験に用いる試験法から除外した。

(3) 実験対象

対象トンネルの覆工コンクリートに対して、外観目視調査およびハンマーによるたたき調査でコールドジョイント部に剥離が存在する箇所を抽出した。この箇所に対して非破壊試験を実施した。図 - 6 に試験対象を示す。

(4) 試験方法

1) 打音法

打音法は、金属製ハンマーにより対象表面を打撃し、その際に発生する打撃音をデジタルテープレコーダで録音した。図 - 7 に打撃のイメージを示す。

2) 超音波法

超音波法は、コンクリート用超音波測定装置を使用した。図 - 8 に超音波法による測定イメージを示す。コールドジョイントを挟んで発振子と受振子（中心周波数50kHz）をコンクリート面にグリースを介して密着させた。発振子及び受振子をコンクリート面に当てた状態で、コールドジョイントを透過した超音波受振波形を記録した。この操作をコールドジョイント部中心に数箇所実施した。

3) 打撃波法

打撃波法は、複数個のA Eセンサを超音波の発振子の設置と同様にコールドジョイント部を中心に、コンクリート面に設置した。設置したA Eセンサの内、一つのセンサの横で、金属製ハンマーによる打撃を行なった。入力した打撃波を各A Eセンサで受振し記録した。図 - 9 に打撃波法による測定イメージを示す。

4) レーダ法

レーダ法は、コンクリート用レーダ計測装置（1000MHz）を使用した。図 - 10 に現場での走査イメージを示す。現場では、レーダアンテナをコールドジョイントに直角に走査した。この操作を濁音範囲、無濁音範囲で実施し、レーダ反射波形データを取得した。取得したデータは、ノートブック型PCにデータを転送・記録した。

(5) 試験結果

1) 打音法

打音法の結果を図 - 11 に示す。打音法の結果では、コールドジョイント下約28cmの範囲に濁音部が確認された。濁音部の周波数分析結果で、低周波数（1kHz）のピークが見られる。また、清音部では低周波数（1kHz）ではピークが見られず、3kHzまたは5kHzのピークが確認された。

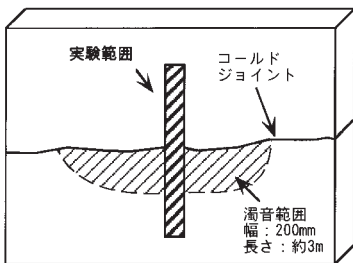


図 - 6 実験対象

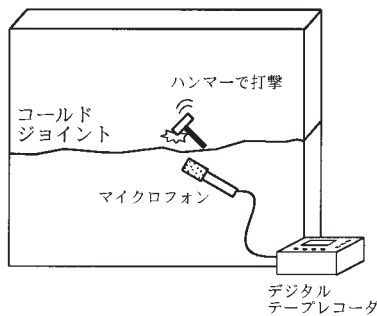


図 - 7 打音法による試験

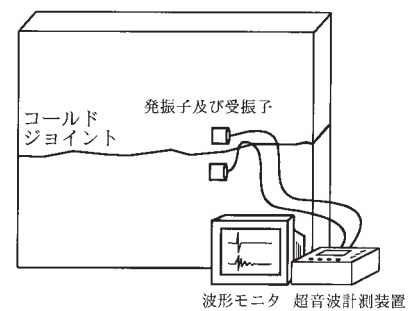


図 - 8 超音波法による試験

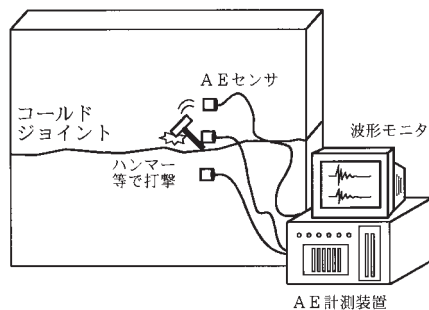


図 - 9 打撃波法による試験

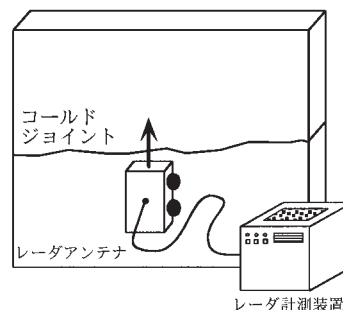


図 - 10 レーダ法による試験

2) 超音波法

超音波測定試験で得られた超音波波形例を図 - 12 に示す。超音波の伝播時間とコンクリートに対する超音波の伝播速度（伝播速度を4500m/sと仮定）から、コンクリートの厚さを推定した。この結果、コールドジョイント下10cm, 20cm, 30cmの位置に超音波法で測定されるコンクリート厚が比較的薄く、剥離部が存在していると推定された。

3) 打撃波法

打撃波法による測定結果を図 - 13 に示す。打撃波法の結果では、センサNo.3とNo.4の間に、打撃波の到達時間の遅れや減衰が見られた。

4) レーダ法

レーダ計測結果を図 - 14 に示す。レーダ計測は、コールドジョイントが存在する部分で、濁音が確認された側線（1m）と濁音が確認されない側線（1m）で実施した。レーダ計測画像で、濁音が存在する場合と濁音が存在しない場合の差は明瞭でない。また、レーダ計測画像のグレースケールを変化させて、コールドジョイント部の変化を詳細に示した場合でも、明瞭な差は認められなかった。

(6) 考 察

1) 各試験による覆工内部推定結果

実トンネルで実施した非破壊試験結果から推定される覆工コンクリートの内部状況を図 - 15 に示す。なお、非破壊試験を実施した対象面にコアドリルによる覆工コンクリートの試料を採取し、剥離面を確認した。

(a) 打 音 法

打音法による調査結果から推定される覆工コンクリートの内部状況を図 - 15(a) に示す。

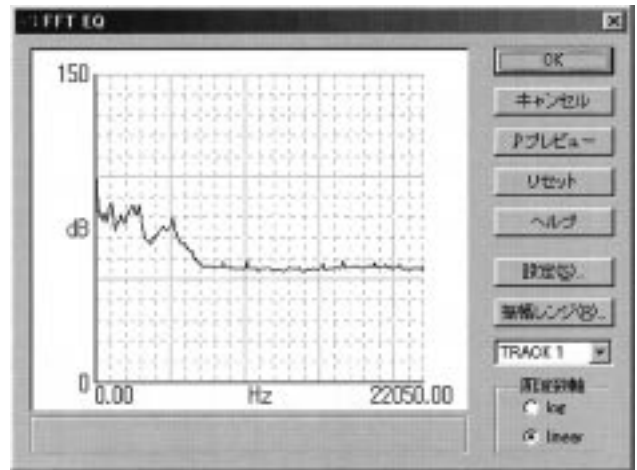
打音法は、コールドジョイントがコンクリート面に直角に存在する場合、打音に変化が生じ難いが、斜めに存在する場合または、剥離が生じている場合には、濁音として現れるので、剥離部の有無と面的な範囲の判定が可能である。

(b) 超音波法

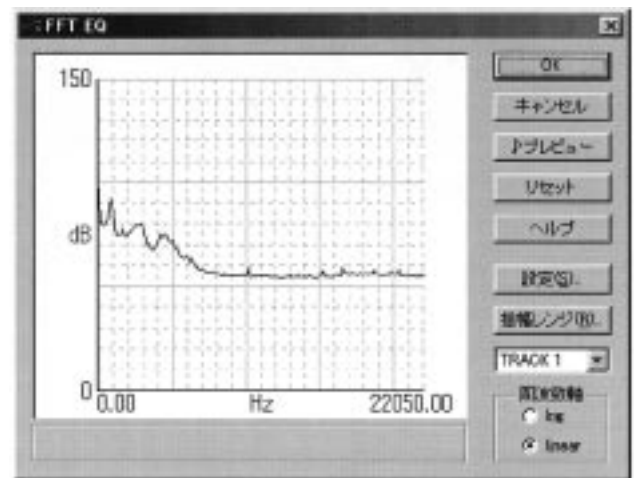
超音波法の調査結果から推定される覆工コンクリートの内部状況を図 - 15(b) に示す。超音波法による覆工厚さの推定および剥離部の深さの推定が可能である。ただし、超音波精度推定には、コア試料を採取しこれに対して超音波伝播速度を測定することが不可欠である。

(c) 打撃波法

打撃波法の調査結果から推定される覆工コンクリートの内部状況を図 - 15(c) に示す。打撃波法により覆工コンクリート内部における脆弱部または剥離の位置の推定が可能である。



打音調査結果（清音部）



打音調査結果（濁音部）

図 - 11 打音の周波数解析結果



図 - 12 超音波測定結果



図 - 13 打撃波測定結果

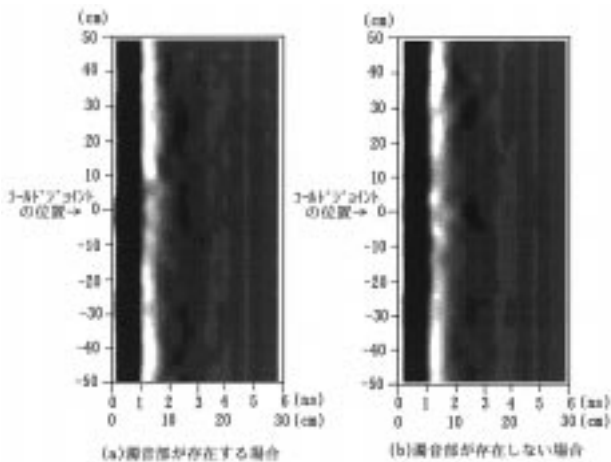


図 - 14 レーダ計測結果

(d) レーダ法

本実験結果の範囲では、レーダ法で得られる覆工コンクリートの内部の情報は少なかった。

2) 各試験方法の課題

表 - 3 に各種非破壊試験法のコールドジョイント評価への適用性を整理した。以下に各手法の課題を示す。

打音法は、簡便な方法でコールドジョイントに起因する剥離の有無と面的な範囲を把握する手法として有効である。打音法を定量的な手法として用いる場合、打音を録音し周波数分析すればある程度の違いを把握することは可能であるが、周波数分析で、明確に清音部と濁音部を判別するためには、コンクリート表面状態による影響の考慮・補正、データの蓄積によるしきい値の設定が必要である。

超音波法は、コールドジョイントの有無や、剥離部の深さを把握することが可能である。超音波法で覆工コンクリートの厚さや剥離部の深さを精度良く推定するためには、対象コンクリート中の超音波の伝播速度を確実に求める必要がある。また、センサ（発振子・受振子）をグリースで密着させる方法では作業性が悪いので、感度は低下するが突起型またはローラ型のセンサを用いて、測定作業を効率化する課題が残されている。

打撃波法は、定量的に覆工コンクリート内部の状態を把握する方法としては優れた方法であるが、超音波法のように深さ方向の情報は得ることは困難である。打撃波法は、センサの設置方法（超音波法と同様である）および打撃方法に改良の余地を残している。

レーダ法で検出可能な剥離厚さ（空隙の厚さ）は約2cm

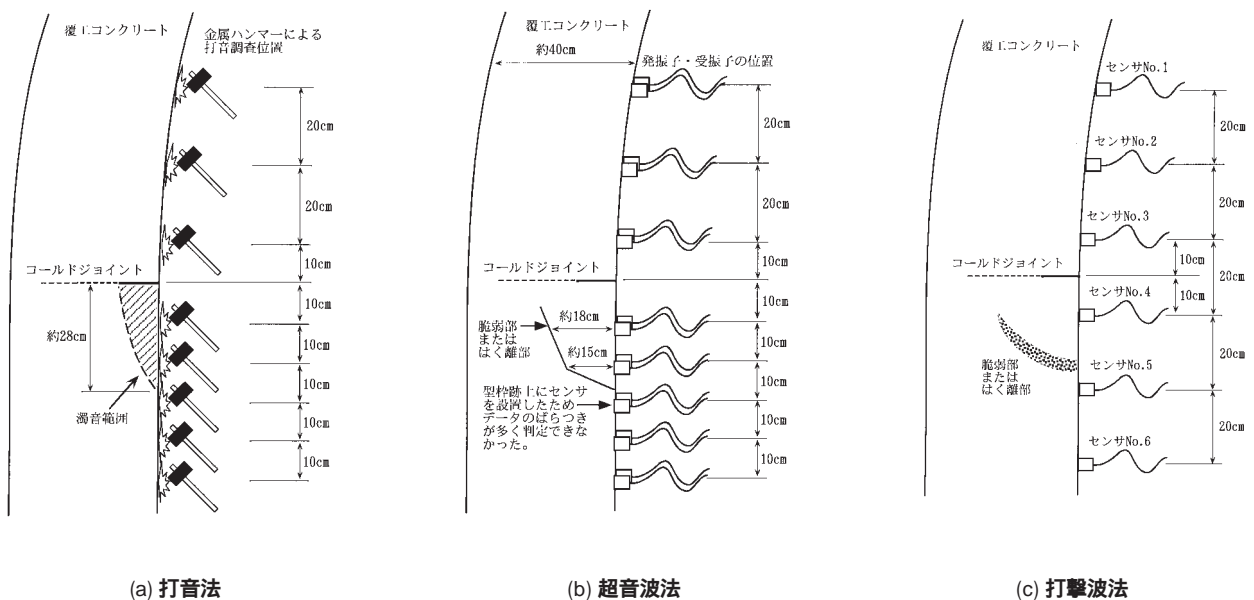
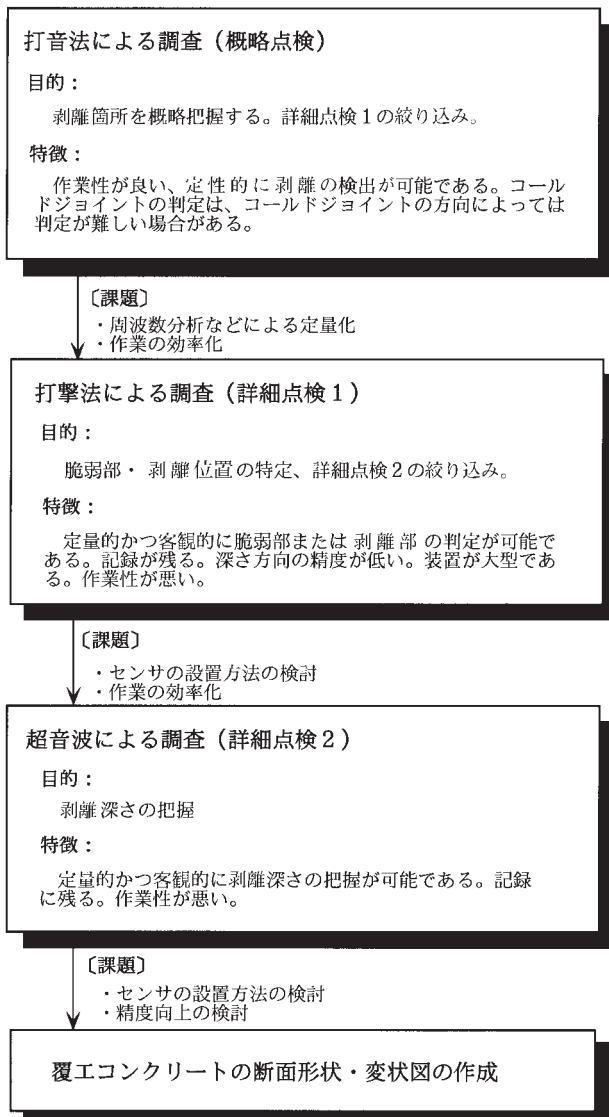


図 - 15 各試験結果より推定される覆工断面

表 - 3 各試験法の適用性と課題

試験名	原理	コールドジョイント評価への適用性	問題点	評価
レーダ法	電磁波の反射波・伝播時間を測定する。	剥離厚さが約1cm以上であれば、把握可能である。	剥離の厚さは数mmと薄く、通常の剥離は検出不可である。	△
超音波法	超音波の反射波・伝達時間を測定する。	剥離の有無及び剥離部分の深さを測定できる。	センサをコンクリート表面にグリスを介して密着させる必要がある。	◎
打撃波法	打撃波の透過波・伝達時間を測定する。	コールドジョイントの付着状況及び剥離の有無を把握できる。	センサをコンクリート表面にグリスを介して密着させる必要がある。	◎
打音法	打撃音を直接耳で聴く、または記録する。	音色の違いで剥離の有無を把握できる。	判定方法が定性的。経験が必要。	○



以上であり⁶⁾、今回のような厚さ数mmの剥離を把握するためには、ハード・ソフトの抜本的な改良が必要である。

本実験で、打音法、超音波法、打撃波法、レーダ法のコールドジョイント評価への適用性を明らかにし、課題を整理した。今後、コールドジョイントの評価に求められる調査の流れを以下に示す。(図 - 16)

謝辞：トンネルでの実験作業に協力していただいたシンズリ道路開発事務所の片桐副理事、奥羽事務所の中田副参事、生形技師に大変お世話になりました。ここに記してお礼を表します。

参考文献

- 1) 松田好史：山陽新幹線トンネル安全総点検、pp.34-39、リテック、vol.3、2000.8
- 2) 土木学会：コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策、コンクリートライブラリー103、pp.141-156、2000.7
- 3) 日経BP：落下した社会資本、日経コンストラクション、pp.38-48、1999.9.24
- 4) 土木学会：山岳トンネル覆工の維持管理を考える、第55回土木学会年次学術講演会研究討論会資料、pp.4-10、2000.9
- 5) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル(案)、pp.34-37、2000.5
- 6) 松山公年、太田資郎他：空港舗装版下空洞探査技術の開発、こうえいフォーラム第8号、pp.159-165、2000.1

図 - 16 非破壊試験を用いた調査方法