

衝撃弾性波法を適用した新設コンクリート構造物での圧縮強度推定 および内部欠陥探査に関する検討

Study on Inspection Items for Newly-Constructed Reinforced Concrete Structure by The Impact Elastic Wave Method

リック(株) 岩野 聡史
独立行政法人 土木研究所 森濱 和正
アプライドリサーチ(株) 境 友昭
iTECS 技術協会 極檀 邦夫

筆者らは衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物の非破壊試験について研究をしている。衝撃弾性波法は簡便な測定方法であることや、適用範囲が広いことから、コンクリート構造物の維持管理に有効に利用できるものと期待される。今回の実験では、新設構造物において、衝撃弾性波法により圧縮強度、内部状況、ひび割れ深さを測定し、新設構造物での衝撃弾性波法の適用方法について検討したので、その結果について報告する。

キーワード：衝撃弾性波法、新設構造物、圧縮強度、部材形状、ひび割れ深さ

1. はじめに

筆者らは、衝撃弾性波法を用いた新設構造物の非破壊試験について研究をしている^{1) 2)}。コンクリート構造物は供用年数が経過すれば様々な要因により劣化することから、適切な維持管理が必要であるとされているが、新設時に検査を実施すれば、今後の維持管理において有効な情報が得られるものと期待される。さらに、新設時の検査は施工管理においても有効な手段になると期待される。その中で衝撃弾性波法は、簡便な測定方法であることからより多くの測定結果が得られることや、波長の長い弾性波を利用することから、減衰の影響や内部の鉄筋、骨材の影響を受けずに適用範囲が広いことが特長となり、有効に利用できるものと期待される。そこで、今回の実験では、新設構造物において、衝撃弾性波法により圧縮強度の推定、弾性波の反射深さの測定による内部状況の推定、ひび割れ深さの測定を行い、新設構造物での衝撃弾性波法の適用方法について検討した。

2. 実験概要

実験を実施した構造物の概要を表1に示す。構造物は5種類で、16部材について実験した。コンクリート種類は6種類である。

測定内容は全部材について圧縮強度を推定した。また、ひび割れが目視で確認された1部材に対して、ひび割れ深さを測定した。さらに、3部材に対しては弾性波の反射深さの測定によるコンクリート内部状況の推定を行った。

これらの測定結果とコア採取による測定結果等を比較し、衝撃弾性波法による測定結果を検証した。

表1 実験を実施した構造物、測定内容

構造物	測定部材	コンクリート種類	測定内容	
L	P35	床版	27-8-20BB	圧縮強度、ひび割れ深さ
		柱上部	30-8-20N	圧縮強度
		柱下部	30-8-20N	圧縮強度
	P36	床版	27-8-20BB	圧縮強度
		柱上部	30-8-20N	圧縮強度
		柱下部	30-8-20N	圧縮強度
	P37	床版	27-8-20BB	圧縮強度
		柱上部	30-8-20N	圧縮強度
		柱下部	30-8-20N	圧縮強度
M	π型 ラーメン橋	橋脚	36-12-20H	圧縮強度
		垂直材	36-12-20H	圧縮強度
N	PCホロースラブ橋	主桁	36-8-20H	圧縮強度、内部状況
P	橋脚	フーチング	24-8-20BB	圧縮強度、内部状況
Q	橋台	フーチング	27-8-20BB	圧縮強度
		堅壁	27-8-20BB	圧縮強度、内部状況
		バラベット	27-8-20BB	圧縮強度

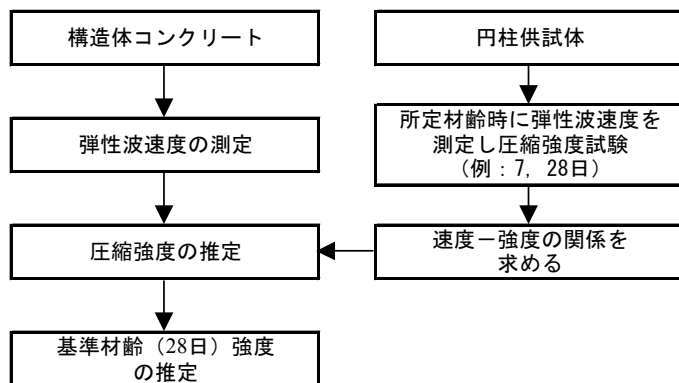


図1 弾性波速度測定による圧縮強度推定手順



写真1 円柱供試体での弾性波速度測定

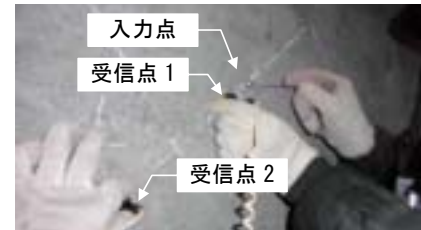


写真2 構造体コンクリートでの弾性波速度測定

3. コンクリートの圧縮強度推定実験結果

3.1 圧縮強度推定方法

推定手順を図1に示す。本測定は、①コンクリート中を伝搬する弾性波の速度は、ポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例すること、②弾性係数とコンクリートの圧縮強度には正の相関関係があること、①、②より、弾性波速度と圧縮強度には正の相関関係があることから、両者の関係式を換算式として、構造物自体のコンクリート（構造体コンクリートと呼ぶ）で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定するものである。

弾性波速度と圧縮強度の関係式は、これまでの実験でコンクリートの配合等により変化することが確認されている¹⁾。そこで、弾性波速度から圧縮強度への換算式は、各部材でコンクリートの打設時に製作した円柱供試体で、材齢を変化させて弾性波速度と圧縮強度を測定して両者の関係を調査し、決定した。なお、円柱供試体の養生方法は封緘養生、水中養生の2種類、円柱供試体の材齢は28日程度までである。

構造体コンクリートでの弾性波速度の測定状況を写真2に示す。コンクリート表面に鋼球で打撃を与えると、図2の模式図に示すとおり、内部を球面状に伝搬する弾性波が発生する。入力点、受信点1,2を一直線上に設定し、コンクリート表面を伝搬する弾性波の到達時間差を計測して、受信点1,2の距離差から弾性波速度を測定した。また、受信点1,2の距離差は200, 300, 400mmと100mm間隔で1000mmまで変えて測定し、全測定結果の平均値から弾性波速度を決定した。

以上のように構造体コンクリートで測定した弾性波速度と、弾性波速度から圧縮強度への換算式により、圧縮強度を推定した。しかし、構造体コンクリートでの測定は工程の都合上、若材齢時に測定を実施した場合があり、この場合では強度発現が十分でないことから、ここで得られた圧縮強度推定結果は構造物の合否判定基準に利用することはできない。そこで、判定基準に利用できる測定結果として、基準材齢(28日)強度を式(1)の材齢変化による強度変化の予測式³⁾により推定した。

$$f_{C28} = \left(\frac{a+bt}{t \times d} \right) \times f'_c(t) \quad (1)$$

ここに、 t は材齢(日)、 a, b, d はセメントの種類によって変化する係数である。

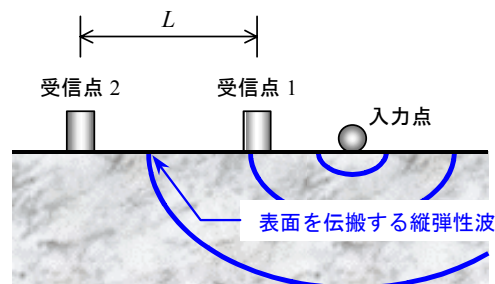


図2 弾性波伝搬模式図

3.2 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度との関係調査結果の一例を図3に示す。

図3より、構造物Lでの弾性波速度4000m/s程度での圧縮強度は35N/mm²程度であるのに対し、構造物Pでは30N/mm²程度となり、コンクリートの配合によって弾性波速度と圧縮強度の関係は異なることが分かる。一方、養生方法について比較すると、封緘養生と水中養生では同一直線上の関係を示していることが分かる。

これから、円柱供試体で測定した弾性波速度 V_p とコンクリートの圧縮強度 f_c の式(2)に示す関係式を、最小二乗法により、各構造物の部材毎に、封緘養生と水中養生の両養生方法を混在させて求め、ここで得られた関係式を弾性波速度から圧縮強度への換算式として決定した。

$$f_c = a V_p + b \quad (a, b: \text{係数}) \quad (2)$$

3.3 構造体コンクリートでの圧縮強度推定結果

各構造物、部材の構造体コンクリートで弾性波速度を測定し、換算式から圧縮強度を推定した。この推定結果について、一部の部材で直径25mm, 70mm, 100mmのコアを採取して実施した圧縮試験結果と比較した結果を図4に示す。なお、コア採取による圧縮試験は材齢28日で実施したことから、弾性波速度による推定結果では、式(1)により28日強度を計算して比較した。

図4より、弾性波速度による推定結果とコア採取による圧縮試験結果との誤差は、直径25mmのコアによる圧縮試験結果である構造物Nでは20%以上と大きくなったが、その他の構造物については、概ね±10%程度以内の誤差となった。

4. 弾性波の反射深さの測定によるコンクリート内部状況の測定結果

4.1 測定原理

(1) 弾性波の反射深さの測定

弾性波の反射深さ D は「3.1」に示した方法により測定する弾性波速度 V_p と、縦弾性波の多重反射により生成される周波数 f_0 から、式(3)により測定した。

$$D = V_p / (2f_0) \quad (3)$$

多重反射により生成される周波数 f_0 の測定方法および弾性波の反射深さの測定原理を以下に示す。

コンクリート表面に加速度センサーを設置し、その近傍を鋼球で打撃して、発生する振動を測定する(写真3)。コンクリート表面を鋼球で打撃すると内部を球面状に伝搬する縦弾性波が発生する。縦弾性波はコンクリートと音響インピーダンス(密

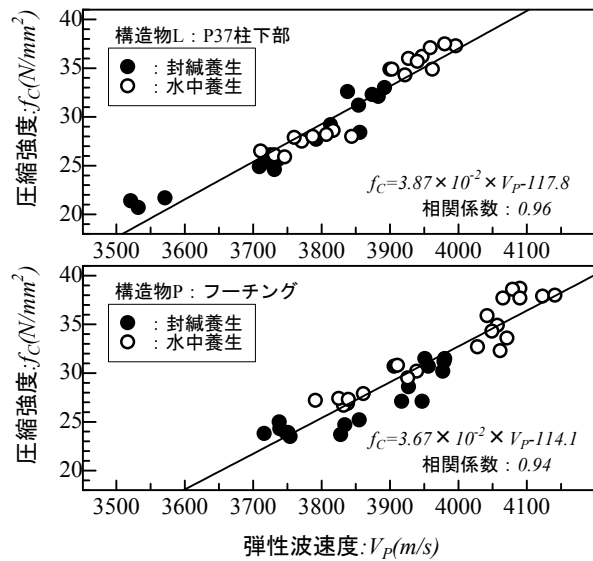


図3 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果例

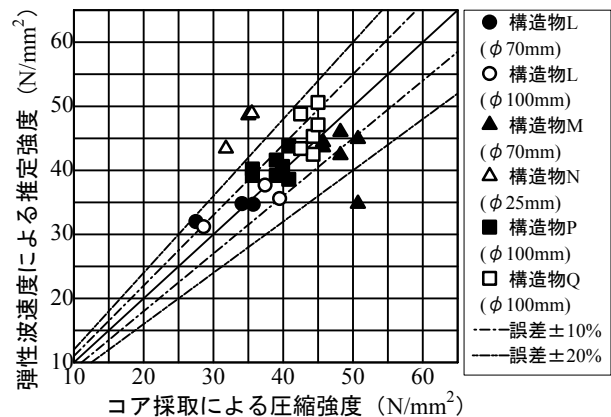


図4 コア採取による圧縮試験結果との比較



写真3 弾性波の反射深さ測定状況

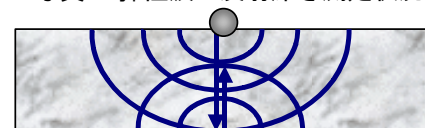


図5 コンクリート内部で多重反射する縦弾性波の模式図

度と弾性波速度の積)が異なる材質との境界面を反射面として反射することから、入力面と反射面で多重反射を繰り返すこととなる(図5)。

コンクリート表面に設置した加速度センサーでは、縦弾性波が往復して表面に到達する毎に振動が観測される。これから、この多重反射により周期性が生成されることとなる。そこで、加速度センサーの測定波形に対して周波数解析を行ない、振幅が最大となる周波数から周波数 f_0 を決定すると(図6)、この周波数は縦弾性波の往復時間の逆数であることから、式(3)により弾性波の反射深さを求めることができる。

(2) コンクリート内部状況の判断方法

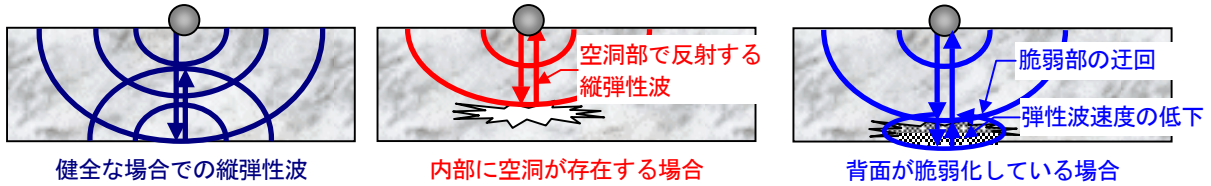


図7 各コンクリート状況での弾性波の多重反射模式図

各コンクリート状況での縦弾性波の多重反射の模式図を図7に示す。(1)により測定した弾性波の反射深さは、コンクリートが健全であれば、縦弾性波はコンクリートの背面で多重反射することから実際の厚さと一致する。これに対し、コンクリート内部に空洞等の反射面が存在する場合には、縦弾性波は欠陥部との境界面で反射することから、弾性波の反射深さは実際の厚さよりも薄くなる。また、完全な空洞には至らないまでも、ジャンカ等のセメント硬化体が脆弱化している場合には、縦弾性波は脆弱部を迂回して伝搬経路が長くなることや、脆弱部の影響により弾性波速度が低下することから、弾性波の往復時間が長くなり、測定される弾性波の反射深さは実際の厚さよりも厚くなる。

以上のとおり、測定される弾性波の反射深さはコンクリートの状況により変化することから、実際の厚さや設計上の厚さと比較することにより、コンクリート内部の状況を判断することが可能となる。

4. 2 測定結果

(1) 構造物P フーチング厚さ測定

構造物Pの厚さ1500mmのフーチング上面から弾性波の反射深さを測定した。測定点は図8に示すとおり、端面から1500mmの位置を測定線として、500mm間隔で8点とした。測定に用いた鋼球の直径は76mm(質量1795g)である。

測定結果を図9に示す。図9は縦軸に弾性波の反射深さ、横軸に測定点を示し、弾性波の反射強さをコンター表示した結果である。図9より、測定したフーチングの厚さは1500mmであるのに対し、全測定点とも深さ1500mm~1600mmで反射する弾性波が強く測定された。弾性波の反射深さが実際の厚さよりも薄くならなかったことから、コンクリート内部に空洞等の反射面は存在していないと判断される。また、弾性波の反射深さが実際の厚さよりも厚くなったが、これはコンクリート背面が捨てコンに密着していることから、弾性波は音響インピーダンスが0に近似していない材料で反射する場合には、生成される周波数が低く変化する性質があることによるもので⁴⁾、ジャンカ等の影響ではないと判断される。

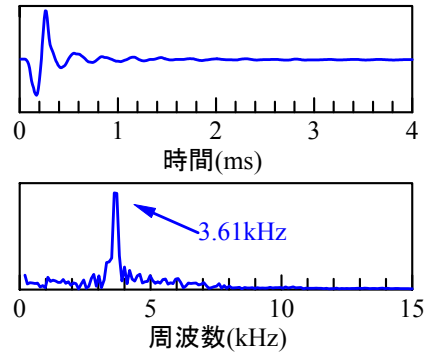


図6 測定波形(上図)と周波数解析結果(下図)の例



写真4 フーチングでの測定状況

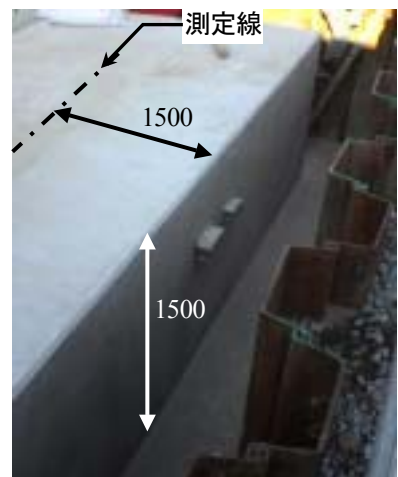


図8 フーチングでの測定位置

(2) 構造物 Q 橋台壁部

構造物 Q の厚さ 500mm の壁面で弾性波の反射深さを測定した。測定点は図 10 に示すとおり、端面から 50mm~1000mm の範囲の 20 点 (50mm 間隔) とした。測定に用いた鋼球の直径は 15mm (質量 14g) である。

測定結果を図 11 に示す。測定した壁部の厚さは 500mm であるのに対し、測定位置 50mm~400mm では深さ 400mm 程度で反射する弾性波が強く測定され、弾性波の反射深さが実際の厚さよりも薄くなった。これは深さ 250mm に埋設された止水板の影響であり、位置 400mm まで止水板が埋設されていることが判断できる。また、止水板までの深さと弾性波の反射深さは一致しないが、これは前述の音響インピーダンスが 0 に近似していない材料で弾性波が反射する場合の影響である。

位置 900mm~1000mm では、深さ 450mm 程度で反射する弾性波が強く測定され、実際の構造物の状況とは異なる結果となった。これは背面のハンチにより、背面形状が斜めになっていることから、弾性波の多重反射に影響が生じ、正確な周波数が生成されなかったものと考えられる。

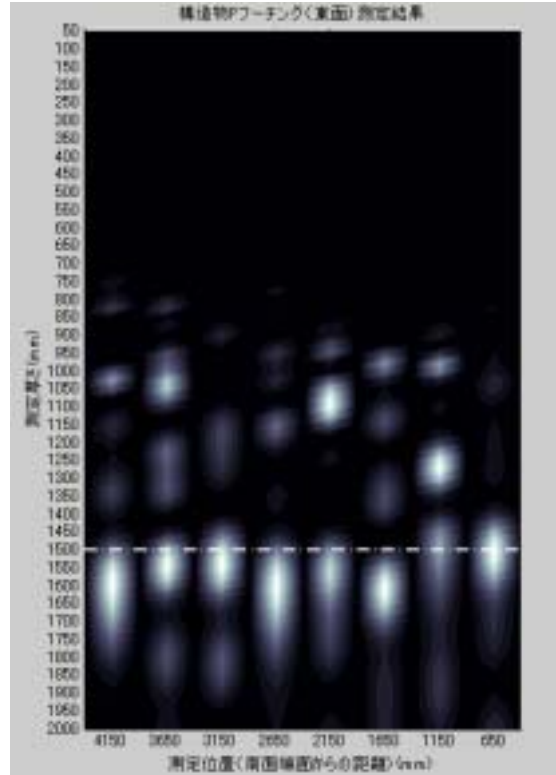


図 9 フォーシングでの弾性波反射深さ測定結果



写真 5 測定実施構造物 (橋台)

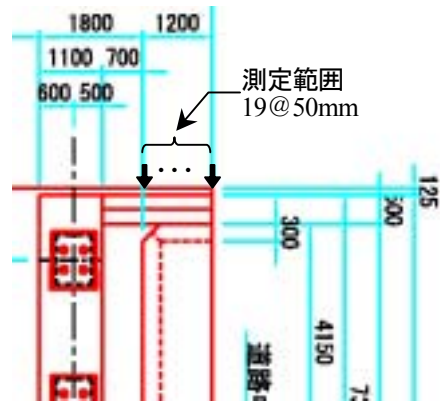


図 10 橋台での測定位置

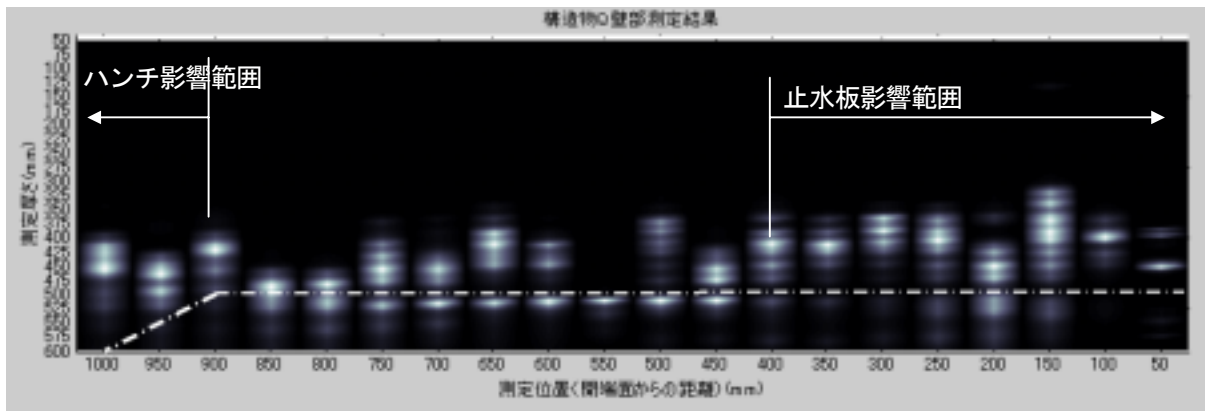


図 11 橋台での弾性波反射深さ測定結果

(3) 構造物 N PC ホロースラブ

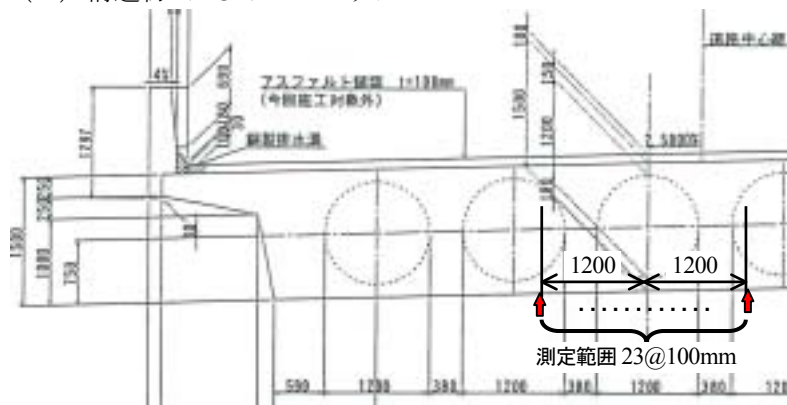


図 12 PC ホロースラブでの測定位置



写真 6 測定実施構造物 (PC ホロースラブ)

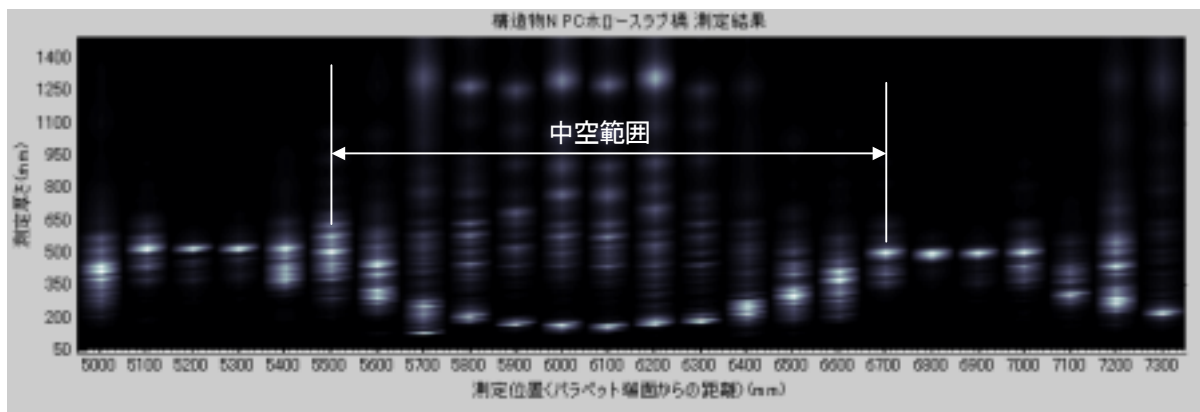


図 13 PC ホロースラブ下面での弾性波反射深さ測定結果

構造物 N の厚さ 1500mm のホロースラブ下面から弾性波の反射深さを測定した。測定点は図 12 に示すとおり、ホロースラブの中空位置を横断する方向を測定線として、100mm 間隔で 24 点とした。測定に用いた鋼球の直径は 20mm (質量 33g) である。

測定結果を図 13 に示す。設計上ホロースラブが中空とされる位置である測定位置 5500mm～6700mm では、中空の設計形状と一致して弾性波の反射深さが変化していることが確認される。これから、測定した範囲では、ホロースラブ内は設計通りに中空とされたことが確認できる。

また、中空以外の測定点については、ホロースラブの厚さ 1500mm で反射される弾性波は測定されなかった。これは直径 20mm の鋼球で入力した弾性波は深さ 160mm 程度の中空位置では多重反射するが、深さ 1500mm 程度のホロースラブ背面では多重反射するには波長が短いことから、ホロースラブ背面での多重反射による周波数は生成されなかったものと考えられる。

5. ひび割れ深さの測定結果

5. 1 測定方法, 測定原理

測定状況の例を写真 7 に示す。受信点, ひび割れ中心部, 打撃点が一直線上になり, かつ, 受信点と打撃点の中心がひび割れ中心部になるように受信点と打撃点を設定した。

この状況で発生する縦弾性波の模式図を図 14 に示す。縦弾性波は圧縮波としてコンクリート内部に伝搬し, ひび割れ先端を回折することとなる。縦弾性波がひび割れ先端を回折するときの角度 θ は距離 L によって異なるが, 受信点に最初に到達する縦弾性波は $\theta <$ 臨界角では引張波, $\theta >$ 臨界角では圧縮波となる。



写真 7 ひび割れ深さ測定状況例

また、受信点で最初に引張波が到達した場合と最初に圧縮波が到達した場合では測定波形は変化し、受信点に加速度計を設置する本法では、引張波が到達した場合では下に凸形状、圧縮波が到達した場合では上に凸形状となる。

以上から、受信点で最初に測定される波形は、 $\theta < \text{臨界角}$ の場合では下に凸形状、 $\theta > \text{臨界角}$ の場合では上に凸形状となる。従って、 L を徐々に長く変化させて、受信点で最初に測定される波形に着目すれば、上に凸形状となる L の最小値が $\theta = \text{臨界角}$ となる距離 L_0 であると判断できる。

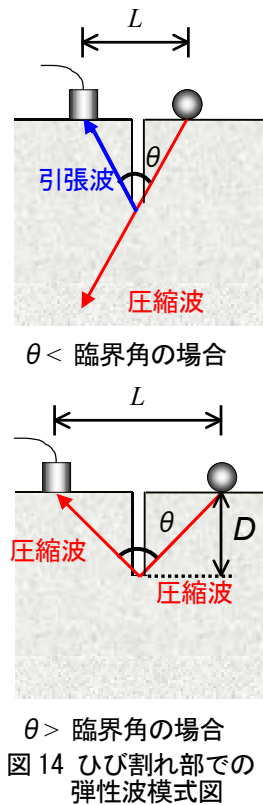
コンクリートでの臨界角は約 90° であることから、以上のように距離 L_0 を求め、ひび割れ深さ D を式(4)により測定した。

$$D = L_0 / 2 \tag{4}$$

5. 2 測定結果

構造物 L の床版側面の南面 2 点、東面 1 点、北面 1 点の計 4 点でひび割れ深さを測定した。測定結果を図 15 に示す。図 15 より、入力・受信点間距離 L を徐々に長く変化させると、最初に測定される波形は、ある距離を境に下に凸形状から上に凸形状へと変化した。これから、式(4)によりひび割れ深さを測定すると、65mm~130mm となった。

実際のひび割れ状況を確認するため、測定した 4 点でコアを採取した。コアの状況の一例として、南面①と東面で採取した結果を図 16 に示すと、コアは深さ約 100mm まで採取したが、ひび割れ深さは採取したコアの深さ以上であった。しかし、このひび割れは採取したコアを完全に分断するものではなく、側面でも南面①では深さ 85mm、東面では深さ 39mm と密着する点が



$\theta < \text{臨界角}$ の場合
 $\theta > \text{臨界角}$ の場合
図 14 ひび割れ部での弾性波模式図

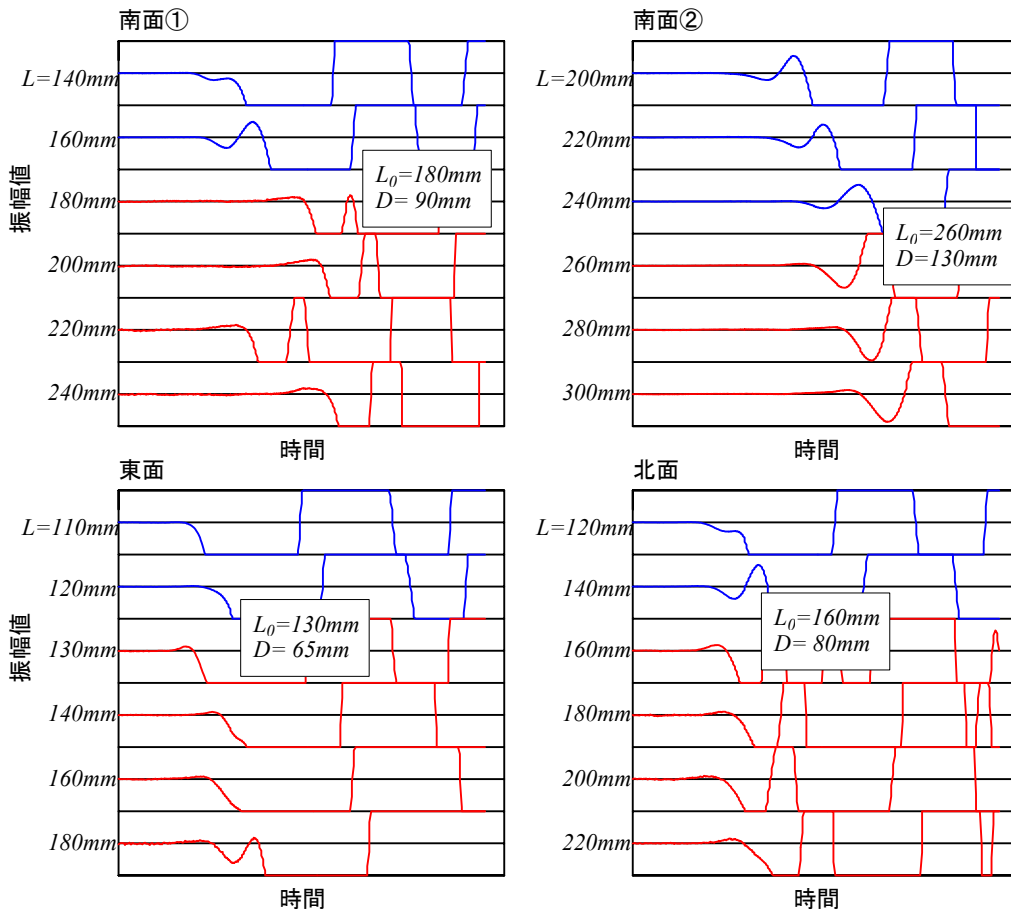


図 15 ひび割れ深さ測定結果

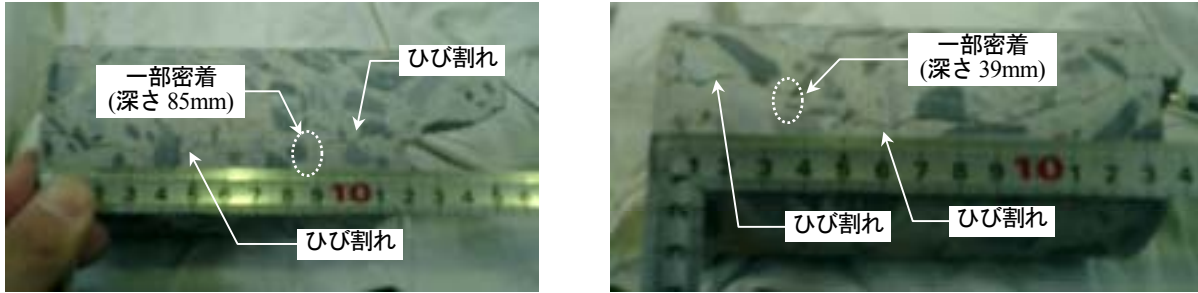


図 16 ひび割れ位置で採取したコアの状況 (左図：南面①, 右図：東面)

確認されるように、内部では所々に密着している点が存在していると推測される。側面で確認された密着位置までの深さと測定結果との比較を表 2 に示すと、両者は近い結果となった。これから、今回の測定方法、原理では、測定点からひび割れが密着する位置までの最短距離が測定されたものと考えられる。

表 2 ひび割れ深さ測定結果とコア状況との比較

測定位置	コア側面での密着位置の深さ	衝撃弾性波法での測定深さ
南面①	85mm	90mm
南面②	110mm以上	130mm
東面	39mm	65mm
北面	69mm	80mm

6. まとめ

新設構造物において、衝撃弾性波法により圧縮強度の推定、弾性波の反射深さの測定による内部状況の推定、ひび割れ深さの測定を行い、新設構造物での衝撃弾性波法の適用方法について検討した。今回の実験で得られた見解を以下に示す。

- ①構造体コンクリートで弾性波速度を測定した結果から圧縮強度を推定した。その結果、材齢 28 日までの円柱供試体で測定した弾性波速度と圧縮強度の関係から換算式を決定することにより、コア採取による圧縮試験結果と概ね 10%程度以内の誤差で圧縮強度を推定できることが確認された。本手法は新設構造物の構造体コンクリートの強度を直接で評価する方法として利用できるものと期待される。
- ②弾性波の反射深さを測定することにより、コンクリート内部の状況を推定する実験を行った。その結果、コンクリート内部に空洞やジャンカ等が存在していないことや、また、止水板の設置状況やホロースラブの中空位置の確認が可能であることが示された。しかし、コンクリート背面の状況や測定する鋼球の直径（入力波長）によって、測定結果は変化することに留意する必要があるといえる。
- ③コンクリート表面にひび割れが存在する場合、表面から入力した弾性波はひび割れ先端で回折し、さらに回折角度によって性質が異なることに着目してひび割れ深さを測定した。その結果、今回の測定方法、原理では測定点からひび割れが密着する位置までの最短距離が、ひび割れ深さとして測定されることが確認された。本法は、この現象を把握したうえで適用することが必要であると考えられる。

衝撃弾性波法は、簡便な測定方法であることからより多くの測定結果が得られることや、波長の長い弾性波を利用することから、減衰の影響や内部の鉄筋、骨材の影響を受けずに適用範囲が広いことが特長となることから、コンクリート構造物の維持管理において有効に利用できるものと期待される。

なお、本研究は独立行政法人土木研究所との共同研究で行ったもので、論文は成果の一部である。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法による新設供試体でのコンクリートの圧縮強度の推定, 土木学会第 60 回年次学術講演概要集第 V 部, pp.1159-1160, 2005.9
- 2) 岩野聡史, 森濱和正: 弾性波法によるコンクリートの耐久性評価の試み, 日本非破壊検査協会 非破壊検査第 55 巻 1 号, pp.23-28, 2006.1
- 3) (社) 土木学会, 2002 年制定 コンクリート標準示方書[施工編], pp.52, 2002.3
- 4) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1887-1892, 2004.6