

衝撃弾性波法によるボックスカルバートの施工管理

Quality control of Box Culvert by Impact Elastic Wave Method

秋松 和正	土谷組	土谷 勝彦	土谷組
Kazumasa Akimatsu	Tsuchiyagumi	Katsuhiko Tsuchiya	Tsuchiyagumi
斉藤 晃史	土谷組	岩井 大輔	土谷組
Koushi Saitou	Tsuchiyagumi	Daisuke Iwai	Tsuchiyagumi
佐伯 英俊	土谷組	極檀 邦夫	アイテックス技術協会
Hidetoshi Saeki	Tsuchiyagumi	Kunio Gokudan	iTECS Association

ボックスカルバートのコンクリート強度を表面縦弾性波速度から推定し、設計強度が規定を満足しているか検討した。インパルスハンマーと加速度計を用いて、段階的に測定間距離を変えながら時間差を求めて最小2乗法により表面縦弾性波速度を決定する方法を検討した。コンクリート打設時期の違いによって表面縦弾性波は少し異なった。表面縦弾性波速度の平均 4072m/s を円柱供試体の圧縮強度と弾性波速度から得られた校正式に代入したところ、設計強度 24MPa に対して圧縮強度は 38MPa と推定された。

keyword ボックスカルバート，表面縦弾性波速度，最小2乗法，残差，強度推定

1. まえがき

コンクリート構造物の施工管理，品質管理に対する社会的要請が高まっている。そこで，ボックスカルバートを対象にして衝撃弾性波法（iTECS法）に適用して，表面縦弾性波測定をおこない，コンクリートの圧縮強度を推定し，施工管理技術の向上を目指して検討することとした。測定内容は（独）土木研究所による微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領（案）¹⁾に準じた。

測定要領に記載されている下記の注意事項はほぼ遵守できた。測定を開始する前には，測定位置の設計図及び既存資料より，測定対象のコンクリート構造物の設計諸元（コンクリートに関する資料，構造物の形状，配筋状態など）を事前に確認する。事前調査結果に基づき測定方法や測定位置等について、施工計画書に記載し提出するとともに，発注者の承認を受けるものとする。また，衝撃弾性波試験については、圧縮強度推定において検量線（キャリブレーション）が必要であり，円柱供試体を作製し，強度と推定指標の定量的な関係を求める。

2. 測定内容について

ボックスカルバートの状況

測定したボックスカルバートの用途は農業用水路である。内側寸法は，高さ 2000mm 幅 2400mm で延長は 45.900m である。上流から A,B,C,D と 4 ブロックに分割して施工した。両端 A,D の側壁と天井の厚さは 400mm，中央 B,C の側壁と天井の厚さは 500mm である。高炉セメントを用いて，スランプ 8cm，最大骨材寸法は 25mm，設計強度は 24MPa である。底板下部に均しコンクリート 100mm を打設した。上部は盛土厚さ約 2m で，幅員 11 m の道路が建設される予定である。

主鉄筋は直径 19mm，間隔は 250mm ピッチ，かぶり厚は 100mm である。コンクリートの打設時期は 2 月という冬季であったのでジェット

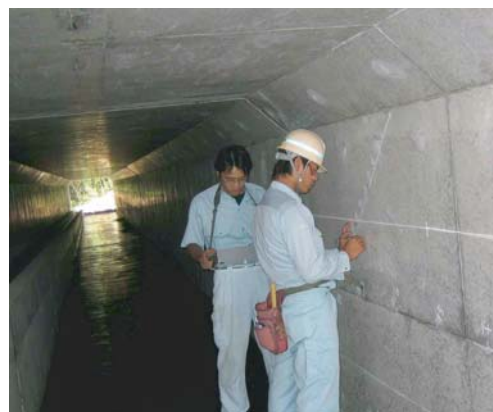


写真-1 ボックスカルバートの測定

ヒーターを使用し養生した。ボックスカルバートの支持地盤は、現地盤が不良なため除去して、A,D 区間は 500mm，C,D 区間は 1000mm を良好な砂地盤に置換した。

表面弾性波速度による強度推定について

試験回数などは、前記の「コンクリート構造物の強度測定要領（案）」¹⁾ に準拠した。A,B,C,D における測定は、それぞれについて 3 測線とした。コンクリート表面にジャンカ、コールドジョイント、ひび割れなどがある部分は避けた。表面縦弾性波の測定線は、鉄筋の影響を避けるため斜め 45 度とした。測定結果に何らかの異常が観察される場合や測定波形が安定しない場合は測定箇所を変更した。

表面縦弾性波の到達時間差の測定

今回はインパクトにインパルスハンマー (PCB086C03) を使用する方法を採用した。コンクリート表面に長さ 1000mm の測定線を描き 100mm 間隔に目盛りを記し、100mm, 200mm, 300mm … 1000mm に測点を設け、0mm に加速度計を固定した。インパルスハンマーは 100mm, 200mm, 300mm … の測点中心の打撃によるずれが小さくなるように注意して 5 回ずつ測定した。打撃の強さは、手加減によったので多少の違いは許容した。加速度計の受信波形がほぼ類似した波形が得られることを確認しながら波形データを測定装置 (iTECS-4) に記録した。

測定終了後にパソコンに測定波形データを移動して打撃入力波形と加速度計の受信波形から時間差を読みとった。表面弾性波速度は、縦軸に測定距離、横軸に波形から読み取った時間差をプロットして最小 2 乗法によって回帰式を求めた。この表面弾性波速度を、別の試験によって求められている圧縮強度-弾性波速度の校正式 (円柱供試体) に代入してボックスカルバートのコンクリート強度を推定した。

3. 実験結果および考察

3-1. インパルスハンマーの接触時間

インパルスハンマーで指定された測点を打撃すると打点直下のコンクリート表面の影響を受ける。一定の強さの打撃を心がけても、粗骨材、細骨材、セメントペーストなどから構成される複合物としての影響を受けることになる。また、年数が経過したコンクリートでは表面劣化や内部の欠陥の影響を受ける。今回は新設の構造物なので、表面の状態は良好である。A ブロックの 3 測線、1 測線について 45 点、3 測線で 135 点のハンマー接触時間のヒストグラムを図-1 に示す。ハンマーの接触時間の読み取り誤差は、1.5 マイクロ秒程度の誤差がある。

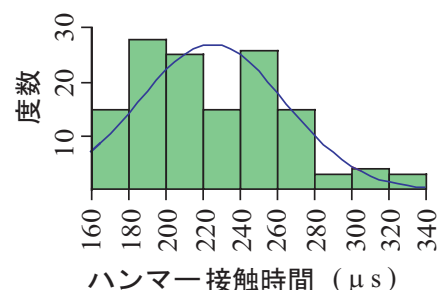


図-1 接触時間の分布

ハンマーの接触時間は、 $160\mu s$ から $340\mu s$ と予想以上にバラツキは大きい。 $280\mu s$ 以上の値はハンマーが斜めに衝突した可能性が高い。接触時間の長い場合の時間差を検証したところ、平均値よりもずれる偏差が大きいことが確認できた。ハンマー打撃による入力信号のバラツキは避けられないが接触時間の変動は小さい方が望ましいので検討が必要である。インパルスハンマーの質量を軽量にすると接触時間が短くなり、高周波が卓越するので表面近傍を伝搬する。一方、ハンマー質量が重くなると弾性波の伝搬する深さは増加する。ハンマーの先端は、鋼球のような曲率をもつ形状が望ましい。

3-2. 測点ごとの受信波形

図-3 に、インパルスハンマーによる入力波形と加速度計による受信波形を示した。入力波形の立ち上がり点を同一線上に並ぶように調整してある。インパルスハンマーと加速度計の距離が短いと伝搬する弾性波のエネルギーが大きいので波形の立ち上がりの始点は明瞭である。

しかし、距離が長くなると波形の立ち上がり点は微少になり始点を決定するのが難しくなる。

iTECS-4 のソフトでは、波形の振幅を拡大して読みとることが可能であるが、弾性波の伝搬エネルギーの減衰による影響は避けられない。300mm における時間差は、最大値と最小値の範囲は $3\mu s$ である。600mm における時間差の範囲は $4\mu s$ 、900mm の範囲は $9\mu s$ である。一般的に、入力波形と受信波形の距離が長くなると読みとり誤差が大きくなる傾向がある。コンクリートの縦弾性波の伝搬速度は約 $4000m/s$ であるので $1\mu s$ では $4mm$ となる。900mm での範囲は 9 は $9 \times 4 = 36mm$ となる。

このような大きなバラツキ誤差の原因は何によって生じるのか。インパルスハンマー打点と加速度計との距離誤差は微少である。次にインパルスハンマーの打撃による誤差を観測しても数 mm 以内である。コンクリートは、粗骨材、細骨材、セメント、AE 材、鉄筋からなる複合構造体である。弾性波の伝搬には微少空隙の影響が大きい。

sanslone らは、明瞭に観測されるレイリー波を用いて検証する方法を 1997 に ACI に発表している²⁾。サンプリングクロックが 1μ のとき、R 波測定の不確かさの合計は、2.8% であると述べている。そこで、明瞭な R 波によって P 波の速度を求めてみた。

$$V_p = \frac{1 + \mu}{0.87 + 1.12\mu} \sqrt{\frac{2(1 - \mu)}{(1 - 2\mu)}} V_R$$

ポアソン比を 0.20 とすると、 $V_p = 1.79V_R$ となるので $V_R = 2261m/s$ を代入すると $V_p = 4047m/s$ となった。一方、距離と時間差による表面縦弾性波速度は、3-3 の回帰計算によって $V_p = 4072m/s$ である。R 波から求めた V_p との差は、 $25m/s$ で 0.6% と微少なため R 波による検証は有効である。

3-3. 距離と時間差による表面弾性波速度の決定

図-4 は、縦軸に入力信号と受信信号の測定間距離を取り、横軸に入力信号と受信信号の時間差を取った。ひとつの測定箇所について 3 本の測定線を設けることになっているので、各距離について 5 点 \times 3 本 = 15 点をプロットした。回帰計算により、直線回帰式は、距離 = $-4.6 + 4072$ 時間差となり、相関係数 $R^2 = 0.996$ を得た。回帰式の勾配を示す 4072 は、表面弾性波速度となるので単位は m/s である。切片 -4.6 の標準誤差は 3.6、傾き 4072 の標準誤差は 23.1 であった。相関係数 $R^2 = 0.996$ はきわめて良好な値であるが線形回帰が妥当であるかを残差によって検討することにした。残差は、測定値 Y と回帰式に当てはめた \hat{Y} の差である。

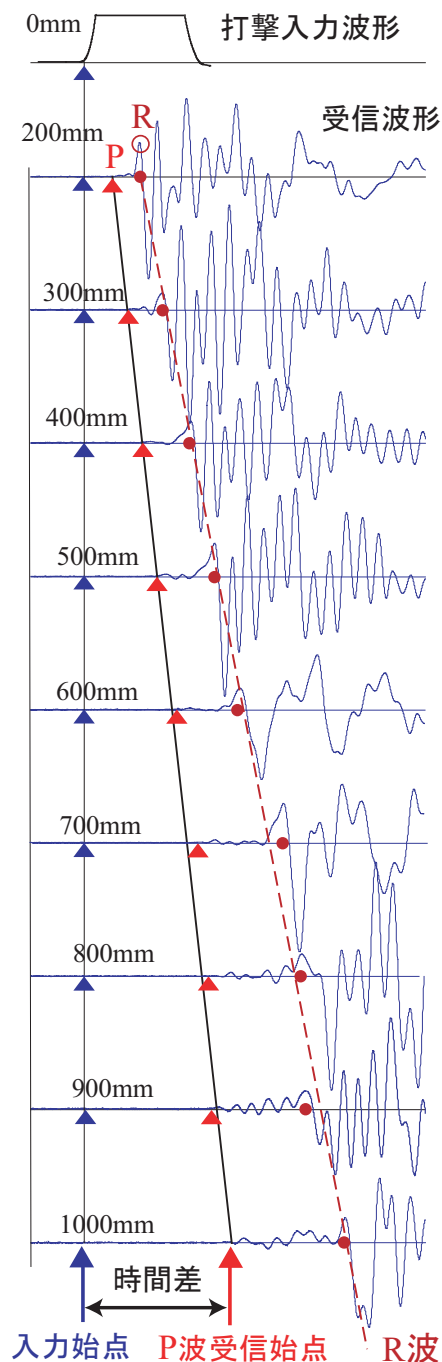


図-3 受信波形と時間差

線形回帰が妥当であれば残差のヒストグラムは正規分布の形になる。ここでは残差を時系列で表示して検討した（下側の残差の図）。分布が長方形の帯であれば時間による時間効果は作用していないことを示している。長方形の帯が上向きの傾きを持つときは時間効果を考慮しなければならない。また、台形が横になった形を示す場合は、時間によって残差の変動幅が増加しているので重み付き最小2乗法を用いるべきである。図-4の残差の分布はほぼ帯状であるので線形回帰は妥当と思われる。残差がプラス側に偏る場合、あるいはマイナス側に偏る場合は何らかの系統誤差があると考えられるので検討が必要である。

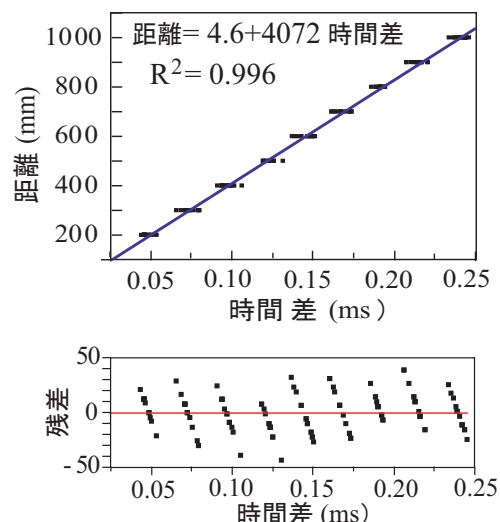


図-4 弾性波速度の回帰式と残差

3-4. 距離と時間差による表面弾性波速度の決定

図-5は、(独)土木研究所共同研究報告書(3)による弾性波速度と圧縮強度の相関図である³⁾。ボックスカルバートの円柱供試体の28日の測定値、 $V_p=3950\text{m/s}$ 、 $F_c=33.3\text{MPa}$ を黒丸で記入した。測定した表面弾性波速度 $V_p=4072\text{m/s}$ を、の校正式に代入する $F_c = 0.0398 \times 4072 - 123.8$ で、強度推定値は $F_c = 38.2\text{MPa}$ となる。

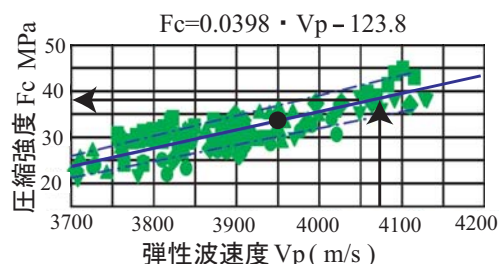


図-5 弾性波速度と圧縮強度推定

4. まとめ

表面弾性波速度を測定しコンクリート強度を推定する方法を実際のボックスカルバートに適用して検討した。

- インパルスハンマーによる打撃入力波形はコンクリートの表層を伝搬して加速度計に達する。表面縦弾性波(P波)は距離に比例して減衰するので加速度計の受信波形から立ち上がり始点を決定することが難しくなるので、明瞭に観測できるレーリー波(R波)も測定して検証することが望ましい。
- 測定距離を変えて時間差を測り、直交座標に図示する方法はコンクリート内部の品質が把握できる。表面縦弾性波速度の回帰式を計算するときは、測定距離と時間差の平均値をプロットするよりも、測定値そのものをプロットして残差を図示して検討すると回帰式の妥当性や測定結果の問題点を発見することができる。
- 今後の課題として、コンクリートの品質とインパルスハンマーの質量の関係、表面縦弾性波の立ち上がり始点の決定方法、表面P波とレーリー波R波との相関、円柱供試体の多重反射速度と表面縦弾性波速度および実構造物の多重反射速度との関連などを検討する必要がある。

参考文献

- (独)土木研究所：微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領(案)，2006,06
- M.J.Sansalone, W.B.Streett：IMPACT ECHO, BULLBRIER PRESS ITHACA,N.Y.1997
- 非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究報告書，(独)土木研究所，2005,01