P1-068

弾性波探査による砂防堰堤の健全性評価手法の新たな提案

（株）ダイヤコンサルタント　○尾関信幸　亀澤奈央　永野賢司　稲垣晴紀

１．はじめに

砂防堰堤において，コンクリートは大正５年から用いられてきた。このうち，昭和38年までは粗石コンクリートが用いられた期間であり，特に昭和20年頃までは砂防堰堤で主体的に採用されてきた。粗石コンクリートはコンクリート内部に数 10 cm の粗石を多数加えたもので，大半が手作業中心の時期に施工され，セメントが高価，かつ現場までの運搬が困難な状況下で，現地で容易に確保できる河床礫を堤体材料として活用されたコンクリートの一種である。純コンクリートであっても同時期であれば，粗石の投入以外の施工技術はほぼ共通している。

純コンクリートを含め，施工当時の技術を反映して，なかには強度の低い施設もあり，重大な損傷や機能の喪失が危惧されるため，長寿命化対策を推進するうえで，堤体内部の健全性評価のニーズが高まっている。

堤体内部評価のための手法としては，非破壊試験の一種である弾性波探査が注目されているが，本発表では，弾性波探査のなかでもより簡易に適用できる弾性波探査（透過法）について，コンクリート構造の砂防堰堤，特に粗石コンクリート構造の堰堤への適用を想定して，新たな視点での調査・評価手法について提案を行う。

２．弾性波の速度と劣化状況の関係

弾性波探査は，弾性波速度を強度の指標として健全性評価に用いるものである。脆弱・軟質の場合は低速度となることが一般的に知られているが，堅硬なコンクリートに亀裂が入った場合の速度への影響について，コンクリートの状況が明らかな砂防施設での試験によって考察する。

外観観察やボーリング調査から亀裂状況が既知の箇所を挟む速度値と亀裂を挟まない区間との速度差を表１に示す。

表１　亀裂状況による健全部との弾性波速度の差（km/s）

測線での堤体の状況	健全部との速度差	備考
打設面の単一の亀裂（外観観察から）	0.08	S47竣工 コンクリート堰堤
短柱・角礫状コア（亀裂群）の部分を挟む測線（ボーリングコア観察から）	1.1～2.67	S36竣工 粗石コンクリート堰堤 ボーリング孔付近で計測

単一亀裂を計測した施設は，側圧によって打設面上を袖部が 40 cm 変位し，完全に分離したことが明白である。亀裂面は打設面に沿って平滑であり，健全部との速度差は0.08 km/s である。一方，亀裂群を挟んで計測した測線では速度差は大きく，健全部との差は1.1～2.67 km/s である。

これらの比較から，単一明瞭な亀裂より，亀裂群を通過するケースの方が，速度差が大きくなっている。明瞭な亀裂であっても，密着状態の場合であると速度差への影響は小さく，また，複数の亀裂を通過する区間では，速度差への影響が大きくなることが確認された。

３．従来の弾性波探査の評価手法

従来も砂防堰堤の健全度調査で弾性波探査（弾性波トモグラフィーや透過法）が適用されてきた。いずれも通常は堤体天端と下流法下部にセンサーを配置し，弾性波トモグラフィーは堤体正面図に速度分布を，透過法は測線ごとに速度値を表示し，速度値の評価の基準は，ASTM（アメリカ工業指標をベースとした国際指標）の基準値を参考とし，ボーリングデータを有する施設については，コアの健全性によって基準とする速度値を設定し，運用している（例えば，山中，2011）。

４．昭和中期以前の砂防堰堤のコンクリートの課題

4.1 脆弱性に関する課題

昭和中期以前の砂防堰堤では，セメントの貧配合や手作業による締め固めの不十分等に起因して強度の低いものが多く，弾性波探査では，現在のコンクリートに比べて低速度が計測されることも多い。

一方，砂防堰堤では，例えば，重力式砂防堰堤（低堰堤）の場合，土石流区間でも満砂時の場合は本堤の最大圧縮強度１N/mm^{2}未満となることが多い。現代の通常のコンクリートの呼び強度は，日本では最低で18 N/mm^{2}である。ASTM基準等の通常のコンクリートを対象とした基準値で弾性波速度の基準値を設定すると，砂防堰堤の要求性能を大幅に上回る基準で運用することになる。この場合，NG評価の施設が必要以上に多発し，過剰な補強対策に結びつく。

なお，土石流区間の袖部は一般に 18 N/mm^{2}の設計基準強度で設計しており，同強度を有することが求められる。

4.2 層状脆弱部の課題

粗石コンクリートをはじめとする昭和中期までのコンクリートは，締固めが容易な上部で緻密，下部で多孔質にな

りやすく，緻密部・多孔質部のセットからなる層状構造をなしやすい。打ち継ぎ目処理や打設が適切に行われていないとコールドジョイントや打設層下部のジャンカにより，純コンクリートの施設でも層構造をなすことがある。

多孔質部は水平方向の脆弱ゾーンとなり，天端摩耗が進んだ施設で剥離状の欠損部拡大等の原因ともなる。また，もともと脆弱なうえに通水の影響等も加わり，脆弱化が進みがちとなる。

５．課題を踏まえた計測・評価手法（提案）

5.1 部位別速度値評価

上記過剰な評価を避けるため，施設・部位ごとに要求性能に応じて速度値の基準を設定することが考えられる。部位に応じた要求性能は，個別に安定計算によって求めることもできるが，砂防ソイルセメント設計・施工便覧等で提示されている値を参考とすることも考えられる。ここから要求性能（強度）に対応する速度値によって基準を求める。

弾性波速度とコンクリート強度の関係式は，岩野ほか(2003)によって提唱されているが，ボーリング調査，圧縮強度試験による補正を加えることが望まれる。

5.2 標準速度値の設定と相対比較による評価

打設を反映して，多孔質の脆弱部が層状に分布する堰堤は，水平方向に透過する測線では緻密部の速度値が，斜め透過の測線では脆弱部を通過する速度値となり，速度の異方性を有することとなる。水平透過の速度値はコンクリートの堅硬な緻密部分，すなわちその堰堤のコンクリートが適切に打設された本来の強度を反映したものとなる。また，水平透過と斜め透過の速度差は層構造による異方性の程度を示す指標になるものと考えられる（図１）。

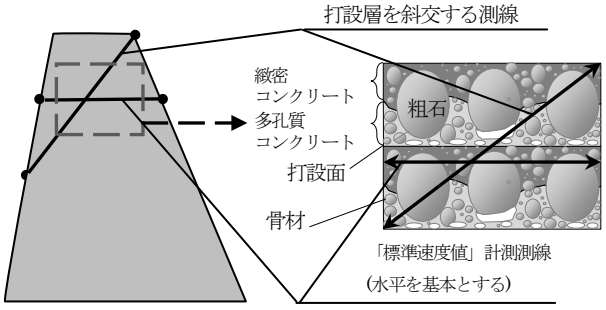

図１　水平透過，斜め透過測線の概念図

表 2 は，本研究で計測対象とした施設の水平透過と斜め透過の測線の速度，およびボーリングコア 3 試料の超音波試験によるｐ波速度値を示している。

水平透過（測線 1）に比べて斜め透過（測線 2～6）はいずれも低速度となっている。測線１の速度値は同施設のコアの供試体で計測した p 波速度値とほぼ同じ速度値となっている。供試体は柱状に採取された無亀裂のコンクリートであり，水平透過は堤体内部の損傷・劣化を受けていないコンクリートと同じ速度値が計測できたことになる。したがって，水平透過測線の速度値を標準速度値として扱う。

表 2　水平・斜め透過による弾性波速度とコアの p 波速度

(km/s)

	水平透過	斜め透過				
測線	1	2	3※2	4※2	5	6
速度値	4.67※1	3.57	2.00	2.19	3.23	3.53
⊿T/H	－	0.558	0.551	0.715	0.299	0.332
超音波（p 波）速度	4.47	4.61	4.88	平均：4.65		

※1：標準速度値として扱う。
※2：ボーリング調査により破砕が進んだ部分を透過する測線
※対象施設：昭和 36 年竣工の粗石コンクリート構造の砂防堰堤

斜め透過の測線 1～6 では，標準速度値との差が層状の脆弱部の効果となる。標準速度値との速度差：⊿T は，1.10～2.67km/s であるが，層状脆弱部の透過量の効果を補正する必要がある。層状脆弱部の透過量を鉛直距離で代表させ，⊿T/H による評価を行うことが考えられる。健全なコンクリートほど，⊿T/H は小さくなる。

この堰堤では，測線 3,4 付近と測線 5,6 付近でボーリング調査が行われている。測線 3,4 の方が⊿T/H が大きく，この付近のコアの方が破砕帯状の脆弱部を挟む状況が確認された。こられのことは本手法の有効性を支持している。

６．おわりに

本研究では，粗石コンクリートを主体とする昭和中期以前の古いコンクリートに対応した砂防堰堤の弾性波探査の測線設定や評価について，２種類の新たな考え方を示した。今後，この調査・評価手法により，長寿命化計画の策定や個々の施設の対策に活かされることを期待する。

本研究は，㈱ダイヤコンサルタントの自主研究として実施したものであるが，湯沢砂防事務所，日光砂防事務所，愛媛県，奈良県において，テストフィールドのご提供をいただいた。また，湯沢砂防事務所，日光砂防事務所からは，探査対象施設のボーリング調査・試験のデータ提供をいただいた。ここに深く謝意を表す。

引用文献

岩野聡史・森濱和正・極檀邦夫・境友昭(2003)：弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，1637-1642

財団法人砂防・地すべり技術センター(2011)： 砂防ソイルセメント設計・施工便覧．180pp

山中僚(2011)：非破壊調査による既設砂防堰堤の健全度評価，　砂防学会誌(新砂防)，Vol.63，No.5，73-77