

高周波衝撃弾性波法による岩盤斜面の内部亀裂調査

INTERNAL CRACK INVESTIGATION OF A BASE ROCK SLOPE USING THE HIGH FREQUENCY SHOCK ELASTIC WAVE METHOD

坂本浩之*・吉川正浩**・川北 稔***・山田結城****・孫 建生*****・櫻井春輔*****

HiroyukiSAKAMOTO, MasahiroYOSHIKAWA, MinoruKAWAKITA, YuukiYAMADA, SonKENSEI and SyunsukeSAKURAI

Generally it is said that collapse of a base rock slope does not have a precursor and is generated suddenly. It is necessary to conduct investigation appropriate for the purposes, such as previous data and on-site investigation, in stability examination of a base rock slope, especially an internal crack is important. Although this investigation is conducted by level drilling, it cannot carry out in many cases. In the case of a base rock slope, the installation of a drilling scaffold of a reason is because it is difficult by the factor of safety, the time necessary for completion, and research expenditure. Authors investigated the internal crack on the base rock slope of a damsite using the high frequency shock elastic wave method. Preliminary inquiry was performed by remote sensing by the introduction rock climber. The good result was obtained and that it is applicable has judged. Next, it applied to the base rock slope of a damsite. The result also with the sufficient result was able to be obtained. This paper describes the result of the technical outline of a high frequency shock elastic wave method, preliminary inquiry, and this inquiry, the applicability of this method, and a technical subject.

Key Words: internal crack, non-destroying inquiry system, shock elastic wave method

1. はじめに

岩盤斜面の崩壊は、前兆現象に乏しくかつ動きが急であるといわれている。防災を目的とした岩盤斜面の安定性の検討では、現地踏査や既往資料等による地形・地質的な現況を踏まえ、目的に応じた調査を効率的に行うことが必要となる。とりわけ岩盤崩壊の主要因となる内部亀裂、不連続面の調査は重要である。内部亀裂の調査は横ボーリングによって行われるのが一般的であるが、急崖岩盤斜面の場合、ボーリング足場の設置は安全性、工期、調査費等の条件から行うことが難しい場合が多い。

著者らは、ダムサイトにある急崖岩盤斜面の内部亀裂の位置を調べるために、微細な亀裂の検知が可能な高周波衝撃弾性波法による非破壊探査システムを用いて探査を実施した。先ず予備探査により当該岩盤への適用性を確認の後、実際に大規模な急崖岩盤斜面での本探査に適用し一定以上の成果を得ることができた。

本文では、高周波衝撃弾性波法の技術概要、予備探査における適用性の検討結果、及び本探査における登攀調査やボーリング調査結果等を考慮した探査結果と適用性、今後の技術的課題について述べる。

* 正会員 青木あすなろ建設㈱ 技術本部 企画エンジニアリング部

** 正会員 青木あすなろ建設㈱ 技術本部 企画エンジニアリング部

*** 正会員 工学博士 ㈱ドーコン 防災保全部

**** 正会員 ㈱ドーコン 防災保全部

***** 正会員 学術博士 青木あすなろ建設㈱ 技術本部 企画エンジニアリング部

***** 正会員 工学博士 (財)建設工学研究所

2. 高周波衝撃弾性波法による非破壊探査システム

(1) 技術概要

この探査システムは高周波衝撃弾性波による反射法の原理によるもので、構造物の基礎杭等の長さや亀裂探査、また岩盤の内部亀裂や転石の根入れ長探査等に適用されており、平成16年10月末現在で222件の探査実績を有する先端技術である。探査原理を図-1に示す。対象物の表面にセンサーを取り付け、その横を鋼製の打撃ハンマーで打撃し弾性波を発生させそれがトリガーとなり、計測・記録装置(以下オーリスという)で反射波形を検知する。打撃ハンマーによって発生した弾性波は対象物を伝搬し、不連続面いわゆるインピーダンスの変化によって内部亀裂面や端部で反射する。その反射波をセンサーで検知し、オーリスによって弾性波の往復伝搬時間を計測する。また、オーリスのハイパスフィルター機能によって、亀裂幅に応じて卓越する高周波数範囲の反射波を選択検知することが特徴である。

解析では記録した反射波形に基づき弾性波の往復伝搬時間と所定の伝搬速度(弾性波速度)から内部亀裂面の深度位置を式(1)によって求める。また、オーリスで選択設定したフィルターにより検知された反射波形から周波数選択特性に基づき、亀裂の幅を推測することができる。^{1), 2), 3)} 写真-1に非破壊探査システム・オーリスを示す。

$$L_1 = (\Delta t_1 \times V_p) \times 1/2 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 L_1 : センサー位置から亀裂面までの深度 (m)

Δt_1 : 計測された往復伝搬時間 (ms: ミリセカント)

V_p : 伝搬速度 (弾性波速度) (m/sec)

(2) 岩盤斜面での探査方法

足場が設置できない急崖岩盤斜面においては、安全な探査作業を行うために熟練したロッククライマーによる遠隔探査を行う必要がある。オーリス本体とセンサー間のケーブルは最大で500m程度延長が可能である。斜面頂部の安全な平地に探査基地を設け、そこで探査技術者がオーリス本体を操作する。また、信号ケーブルは探査基地から斜面にある探査箇所へ延長し、ロッククライマーが岩盤表面を打撃し信号をセンサーで受信する。受信信号はケーブルによりオーリス本体に入力される。探査作業の相互連絡はハンズフリー型の無線機器を用いて遠隔探査で行う。探査フローを図-2に示す。クライミング技術を用いて現場探査を行うことが大きな特徴である。そのため、ロッククライマーへの整形・研磨作業やセンサー取り付け方法、ハンマー打撃力等について、事前に十分な訓練が必要となる。

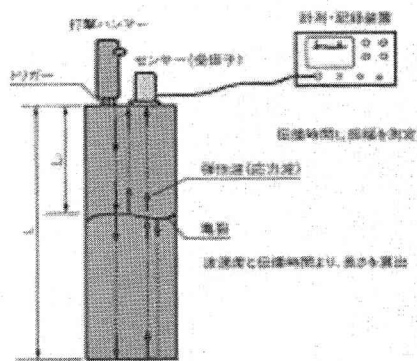


図-1 探査原理

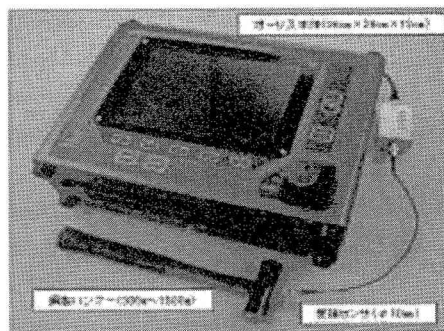


写真-1 非破壊探査システム・オーリス

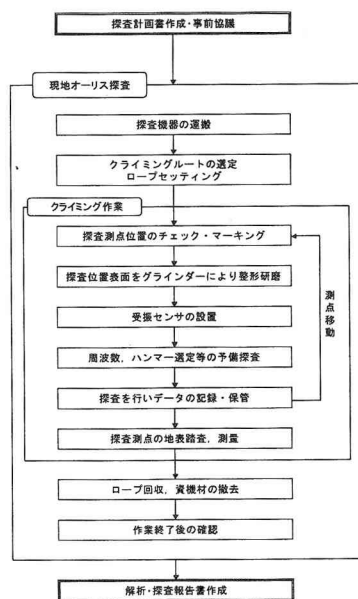


図-2 探査フロー

3. 予備探査

(1) 探査概要

ダムサイトにおける岩盤斜面に存在する不安定岩塊の内部亀裂探査への本法の適用性について、事前に確認することを目的に、ダムサイト付近で同様な地質状況の場所を選定して予備探査を行った。地質状況は、凝灰角礫岩基質であり礫と基質は密着しており、表層部では風化が進行し基質部がやや軟質化（CL～CM 級岩盤相当）していた。礫部はハンマーの打撃で澄んだ音がするが基質部ではやや鈍い音がした。地山深部では新鮮岩（CM 級岩盤以上相当）が分布していると推定された。写真-3 に予備探査状況を示す。岩盤側面には幅 10～20 mm 程度の開口亀裂が見られ、その亀裂面を串刺しにする方向をセンサー位置として、その箇所をボールの方向に鋼製ハンマーで打撃して探査を行い開口亀裂の検知を試みた。センサー位置から開口亀裂面までの距離は 1.23m であった。

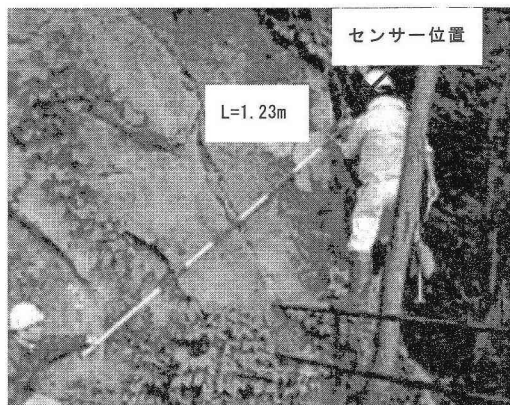


写真-3 予備探査状況

(2) 探査結果

探査の結果、開口亀裂面から再現性のある明瞭な反射波を検知することができた。実際に得られた波形図を図-3、図-4、図-5 に示す。横軸は時間、縦軸は電圧を示す。図中、A 部はハンマー打撃による入力時の衝撃波形、B 部は開口亀裂面から反射し検知された反射波形を示している。

解析では、A 部立ち上がりから B 部の立ち上がりの往復伝搬時間 Δt を計測し、式(1)により V_p を求める。解析結果を表-1 に示す。

(3) 考察

ロックライマーによる遠隔探査で、開口亀裂から明瞭な反射波を検知することができ、ダムサイトの急崖岩盤斜面への適用が可能であると判断された。また、得られた伝搬速度（弾性波速度）のバラツキは比較的小さく、その平均値は近傍のボーリングコアによる弾性波速度、約 2,500m/s と比較して表面の風化状態を考慮すると適切であると判断された。

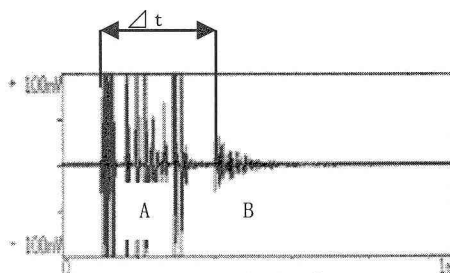


図-3 波形図①

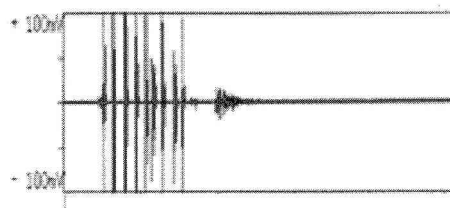


図-4 波形図②

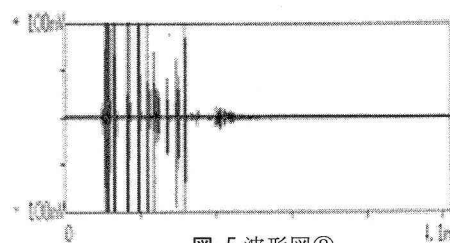


図-5 波形図③

表-1 解析結果（伝搬速度の算出）

センサー位置から 開口亀裂までの 実測長 L (m)	反射波までの 往復伝搬時間 Δt (ms)	逆算した 伝搬速度 V_p (m/s)
1.23	波形図① 1.188	2,071
	波形図② 1.211	2,031
	波形図③ 1.235	1,992
伝搬速度の平均値 V_p (m/s)		2,031

4. 本探査

(1) 探査概要

本探査の目的は、ダムサイトにある高さ約 100m、傾斜角 70～90 度の急崖岩盤斜面にある不安定岩塊について、内部亀裂及び開口亀裂の有無・深度等を探査し、内部構造推測の基礎資料とするものである。

探査対象の不安定岩塊におけるエリア別の探査測点数を表-2 に、岩塊位置を写真-4 に示す。探査測点位置は、対象岩塊の大きさや登攀調査で確認されている開口亀裂が確認できた位置と岩盤表面の凹凸等を考慮し、概ね 1 ～1.5m 間隔に設定した。探査方法はロッククライマーによる遠隔探査で実施した。探査基地でのオーリスを用いた探査状況を写真-5 にロッククライマーによる打撃状況を写真-6 に示す。探査順序は、岩塊 II-10 から II-2、I-2 の順で実施した。II-10 においては、斜面頂上部から 45 度の角度で下方へ斜めボーリングによって約 83m のコアが採取されていた。そこで、ボーリング孔の岩盤斜面近傍の位置にコアで確認された開口亀裂を探索して、予備探査で行った同じ方法で当該岩盤の伝搬速度（弾性波速度）を求めた。

(2) 探査結果

本探査は、全ての測点でトラブル無く実施することができた。探査結果の 1 例として、ここでは岩塊 II-10 の結果を示す。岩塊 II-10 の正面から見た測点位置を図-6 に示す。

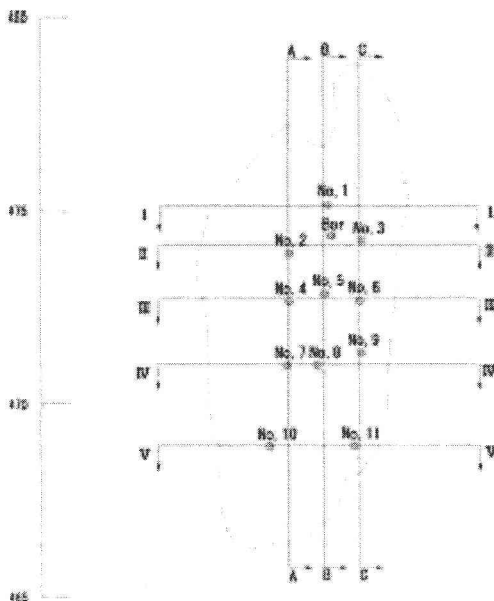


図-6 測点位置正面図（II-10）

表-2 探査エリア別の測点数

探査内容	エリア名	番号(重量)	測点数
高周波衝撃弾性波法（オーリス）	エリア I	I-2(約 50t)	6 測点
		II-2(約 1560t)	10 測点
	エリア II	II-10(約 175t)	11 測点
計		3 岩塊	27 測点

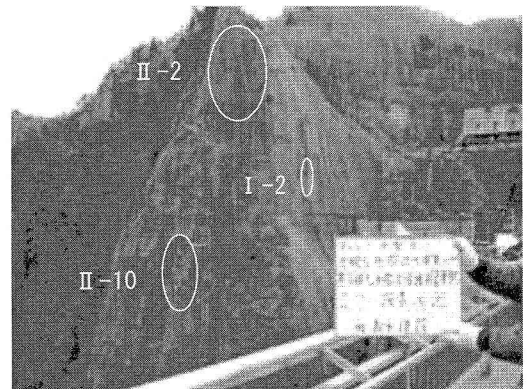


写真-4 岩塊位置写真

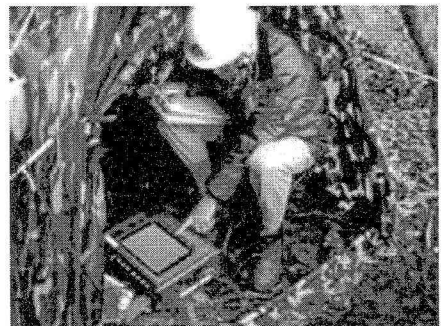


写真-5 探査状況（探査基地）



写真-6 探査状況（ロッククライマー）

1) 伝搬速度の設定

伝搬速度の校正を測点 NO.1 で行った。ボーリングコアから確認された開口亀裂位置は図-7 に示すように岩盤表面から $L=0.92\text{m}$ 位置にある。一方、この位置で検知した波形図を図-8 に示す。波形図から往復伝搬速度 $\Delta t=0.699\text{ms}$ を計測し、式(1)から伝搬速度 $V_p=2632\text{m/sec}$ を求めた。ボーリングコアから得られた弾性波速度は、 $2500\sim 3100\text{m/sec}$ の範囲にあり、ここで求めた伝搬速度と整合するものであった。したがって、以後、解析では全ての測点において、亀裂位置を求めるための伝搬速度 V_p はこの値を用いた。

2) 解析結果と考察

岩塊 II-10 における解析結果を表-3 に示す。亀裂の推定深度はこれまでの探査実績から $\pm 5\%$ の誤差を考慮し 3 波形の平均値を用い式(1)から求めた。亀裂区分は、開口亀裂と密着性の微細な亀裂に区分した。波形図では、開口亀裂は最も右側に現れ、その左側は密着性の微細な亀裂と推定できる。図-9 に測点 NO.6 で得られた波形図を例として示す。但し、登攀調査で観察された開口亀裂の情報がある場合は総合的に判断した。密着性の亀裂区分、最大亀裂幅は探査時にオーリス本体で設定した高周波数範囲を選択検知するハイパスフィルター設定値と不連続面による周波数選択特性から想定したものである。

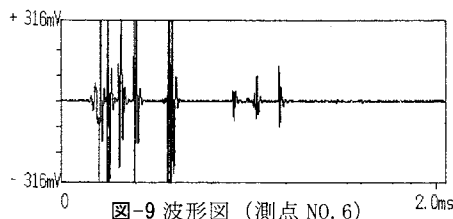


図-9 波形図 (測点 NO. 6)

推定深度、亀裂区分に基づき、点として得られた結果と登攀調査結果から内部亀裂の連続性を推定し断面図に示した。図-10、図-11 に断面図を示す。再現性は現場探査時に最も重要であり、探査測点が同じであれば何回打撃しても同等な波形が得られることをいう。ここでは、極めて良好、良好、不良に区分したが、現場探査では不良は無く、全ての測点で再現性の良好な波形を検知することができた。無線機器を用いたロックライマーによる遠隔探査は、予備探査での経験もあり支障無く実施することができた。

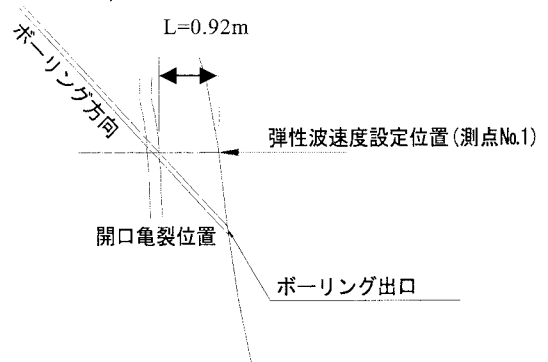


図-7 断面図 B (測点 NO. 1 付近)

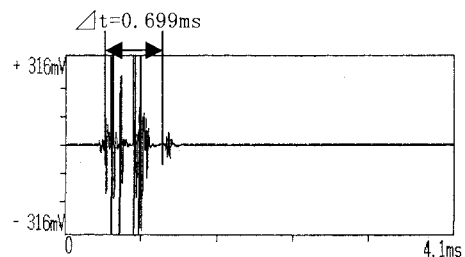


図-8 波形図

表-3 解析結果 (岩塊 II-10)

測点	反射波No.	推定深度 (m)	亀裂区分	最大亀裂幅 (mm)	再現性
No.1	①	0.53	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.79	密着性の亀裂	1.7	○
	③	0.87	開口亀裂	-	◎
No.2	①	0.46	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.53	密着性の亀裂	0.8	○
	③	0.67	密着性の亀裂	1.7	○
No.3	①	0.84	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.89	密着性の亀裂	0.8	○
	③	1.32	開口亀裂	-	◎
No.4	①	0.72	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.99	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.12	開口亀裂	-	◎
No.5	①	0.53	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.78	密着性の亀裂	1.7	○
	③	0.86	密着性の亀裂	1.7	○
No.6	①	0.91	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.15	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.42	密着性の亀裂	1.7	○
No.7	①	1.72	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.78	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.93	開口亀裂	-	◎
No.8	①	0.92	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.03	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.07	密着性の亀裂	0.8	◎
No.9	①	1.23	開口亀裂	-	◎
	②	0.68	密着性の亀裂	1.7	○
	③	0.86	密着性の亀裂	1.7	○
No.10	①	1.01	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.12	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.24	密着性の亀裂	1.7	○
No.11	①	1.41	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.59	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.75	開口亀裂	-	◎
No.12	①	0.83	密着性の亀裂	0.8	○
	②	0.91	密着性の亀裂	0.8	○
	③	1.04	密着性の亀裂	1.7	○
No.13	①	1.14	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.26	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.43	密着性の亀裂	1.7	○
No.14	①	1.63	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.71	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.81	開口亀裂	-	◎
No.15	①	0.86	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.05	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.20	密着性の亀裂	1.7	○
No.16	①	1.44	密着性の亀裂	0.8	○
	②	0.43	密着性の亀裂	1.7	○
	③	0.58	密着性の亀裂	1.7	○
No.17	①	0.81	密着性の亀裂	1.7	○
	②	0.89	密着性の亀裂	1.7	○
	③	0.99	密着性の亀裂	1.7	○
No.18	①	1.08	密着性の亀裂	1.7	○
	②	1.27	密着性の亀裂	1.7	○
	③	1.81	密着性の亀裂	1.7	○
No.19	①	1.91	密着性の亀裂	1.7	○
	②	2.11	密着性の亀裂	1.7	○
	③	2.11	密着性の亀裂	1.7	○

* 推定深度は、誤差率 $\pm 5\%$ で算出
* 再現性区分は◎：極めて良好
○：良好

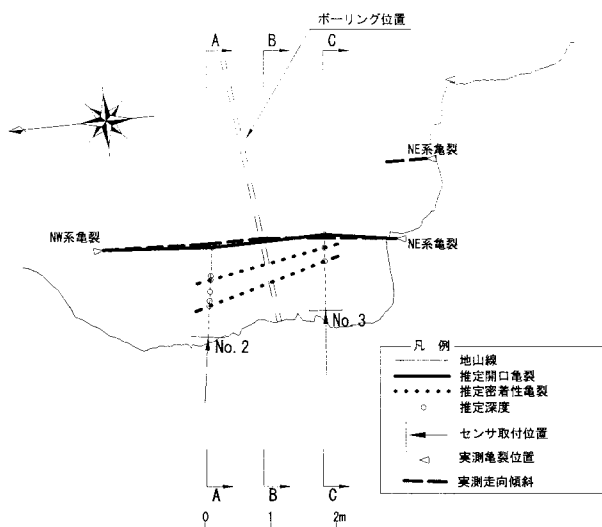


図-10 断面図Ⅱ

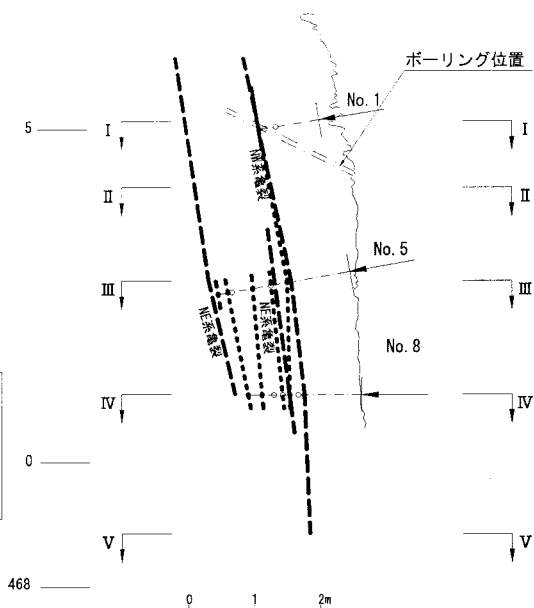


図-11 断面図B

5. まとめ

ダムサイトの急崖岩盤斜面における、ロッククライマーによる高周波 衝撃弾性波法を用いた遠隔探査は、初めての試みであったが一定以上の成果を得ることができたと考えている。但し、非破壊探査技術であるので既往資料や登攀調査結果等の情報を収集し、総合的に評価、判断していくことが重要であると考えている。今回の調査で得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。今後も探査技術の改善・向上に努める所存である。

- 1) 現場探査では、ロッククライマーによる遠隔探査を行い、高周波衝撃弾性波法（オーリス）を用いて岩盤内部亀裂から再現性の良い反射波を検知できることが確認された。
- 2) 現場探査では、対象岩塊の開口亀裂や形状寸法の確認できる箇所において、伝搬速度（弾性波速度）を比較的簡便に探査することができることが確認された。
- 3) 現場探査では、対象岩盤の地質・亀裂にも依存するが、深い深度（5m 以上）にある亀裂検知が難しかった。そのため、打撃力を大きくする必要がある、ハンマー重量を重くする等打撃方法の改善が必要である。
- 4) 解析では、オーリス本体のハイパスフィルター機能を用いることで、開口亀裂の有無、亀裂区分（開口亀裂、密着性亀裂）の推定をすることができた。
- 5) 解析では、亀裂区分の評価を定量化するために、衝撃弾性波の初期振幅値と反射波の振幅値を基準化する解析手法が有効かつ必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 特許庁：特許第 2877759 号，杭または構造物の動的診断方法（特許権者：青木あすなろ建設㈱），平成 11 年 1 月 22 日取得。
- 2) 特許庁：特許第 2944515 号，自然構造物の形状診断方法（特許権者：青木あすなろ建設㈱），平成 11 年 6 月 25 日取得。
- 3) 財団法人先端建設技術センター：オーリス（非破壊探査システム），先端建設技術・技術審査証明報告書（審査証明依頼者：（株）青木建設），平成 9 年 3 月 17 日。
- 4) 孫 建生・塩月隆久・鈴木哲也・疋田貞良：「高周波数帯域成分を用いた非破壊探査システムによる岩盤内部亀裂探査」，土木学会第 56 回年次学術講演会Ⅲ部門，pp592～593、2001 年