

2.2 堤防弱点箇所内部物性構造詳細評価技術の開発

研究予算：運営交付金（治水勘定）

研究期間：平 21～平 22

担当チーム：技術推進本部 特命事項担当

研究担当者：稲崎富士

【要旨】

長大な管理区間延長を有する河川堤防の改修・維持管理を効率的に推進するには、要改良区間すなわち弱点箇所を効率的かつ高確度で把握することが可能な現地探査技術の開発実用化が求められていた。これまでの研究の結果、ランドストリーマー方式高精度表面波探査法と牽引型比抵抗探査法あるいはスリングラム電磁探査法を組み合わせた統合物理探査を適用することによって、堤防縦断方向に存在する数 10m 規模の異常部までを検出することが可能であることがわかってきた。そこで次段階として、検出した弱点箇所内部物性構造をより詳細に把握することが可能な調査計測技術の研究開発に着手した。本研究では、堤体および基礎地盤の不均質構造をイメージングすることが可能な調査計測技術を評価、場合によっては新規開発をはかること、またそれらの手法が、浸透やすべりに関わる物性あるいは材料物性自体をどの程度把握することが可能であるかを、調査計測実験に基づいて検討する。21 年度はその一環として、簡易貫入試験および貫入孔を利用した高分解能検層手法開発および適用実験、採取コア比抵抗測定手法および装置開発、堤防植栽樹根の分布および腐朽度の把握を目的とした計測手法についての実験的検討、堤体および護岸に使用されているコンクリート材料の弾性波伝播特性についての計測実験を実施した。

キーワード：河川堤防、弱点箇所、樹根、護岸コンクリート、亀裂、トラップ波

1. はじめに

河川堤防の要改良区間を迅速かつ経済的に抽出することができれば、堤防の改修・補強を効率的に進めることが可能になる。堤体は外見的には均質に見えても、内部は横断方向・縦断方向ともに不均質な構造を有している。このような不均質内部構造が浸透性や強度に影響を与えていることは想像に難くない。既往の被災事例を検討すると、安全と判定された区間で、計画高水位以下の洪水でも漏水などの浸透現象が数多く発生している。このことは、従来の点検手法では不均質構造に由来する弱点箇所を的確には検出することが困難であることを示唆しており、このような弱点箇所を高い確度で検出することが可能な調査計測手法の開発が求められていた。これまでの研究の結果、ランドストリーマー方式高精度表面波探査法と、牽引型比抵抗探査法あるいはスリングラム電磁探査法を組み合わせた統合物理探査を適用することによって、堤防縦断方向に存在する数 10m 規模の異常部を検出することが可能であることを明らかにしてきた^{1,2)}。さらに手法の普及展開をはかることを目的とし、現地適用過程および解析評価過程のマニュアル化を進めてきた。

ところで河川堤防の安全性評価には、外力が一樣と考えられる一連区間を、過去の被災履歴および地形地質調査結果を基に区間細分し、代表断面を設定して詳細点検を実施し安全性を照査する、という手順が採用されている。安全性にかかわる情報を取得する手段としては、空中写真判読による治水地形区分、全延長にわたる目視観測、局所的な確認ボーリングおよびボーリング孔を利用した浸透特性計測などが採用されている。しかし堤体および基礎地盤は前述のように本質的に不均質であり、局所的な点検で得られた物性情報をどの程度の区間の代表値とするか、代表値として適当であるか、すなわちより問題のある物性を有する箇所が点検箇所近傍に存在しないか、を評価する手順は明確になっていない。これには堤体および基礎地盤の物性構造を空間的に把握することが可能な調査計測技術の適用開発と、物性情報自体についての検討が必要とされる。

非破壊的に2次元の地下構造を物性分布として捉えることができる物理探査手法は、このような空間的調査に有効であると期待される。実際先行研究によって開発した統合物理探査は、堤防縦断方向において数10m 程度連続する物性異常部を検出すること

が可能である。しかしその内部の詳細な物性分布を把握できる空間分解能は有していなかった。そこで本研究では、それらの測定条件を最適化し、さらに低侵襲の調査手法であるサウンディングおよび孔内計測とを組み合わせることによって、より詳細な河川堤防の内部物性分布と基礎地盤の構造把握を達成する調査計測技術を開発することを目標とした。また方法論的には、基礎実験および実堤防への適用実験によって要素手法の測定条件を評価することとした。なお適用する調査計測手法は、対象とする物性分布あるいは目的に合致するよう選択することが重要である。21年度は計測手法対象として、簡易貫入試験および貫入孔を利用した高分解能検層手法開発および適用実験、採取コア比抵抗測定手法および装置開発を、また調査計測対象としては、堤防に植栽される樹木の根系の分布を非掘削で把握する手法について実験的な検討を加えた。また堤防護岸あるいはのり覆工に使用されるコンクリート覆工背面の空洞把握手法を検討するための基礎的な実験を実施した。その結果、高密度配置による地表伝播弾性波波形解析によって、根系の卓越方位を推定可能であること、亀裂の存在により伝播弾性波が非線形に応答し、逆にその非線形応答から亀裂の位置・規模を把握することが可能であることがわかった。

2. 実験概要

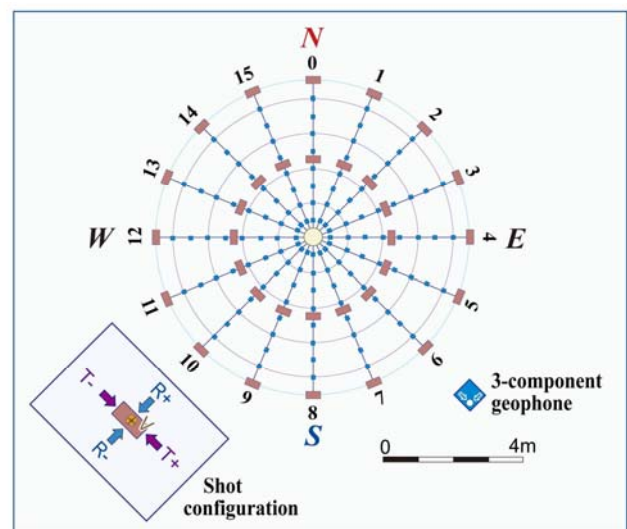
21年度に実施した計測調査実験のうち、弾性波による樹根分布推定実験およびコンクリート覆工モデルに対する弾性波伝播特性実験の概要を以下に示す。

2.1 弾性波による樹根分布推定実験

堤防などに人工的に植樹される緑化樹木は成長とともに樹根も伸張するが、樹勢減退に伴って根系が腐朽し、倒木や盛土を緩める原因となる。実際、各地の堤防に戦後植樹された桜が老木化し、樹根部が腐食して空洞ができることにより堤防の一部を損壊させる事故も生起している³⁾。樹木の根系の分布やその卓越方位を、掘削することなく低侵襲的に推定することができれば植栽の維持管理や堤防の安全性評価に役立つ情報を提供することができる。これには従来、樹幹と周辺地表間の静電容量測定⁴⁾、2次元比抵抗探査⁵⁾、高周波地中レーダー探査⁶⁾などが用いられてきており、根系のイメージングに成功している。一方弾性波を用いた手法は適用例も少なく、良好な結果も得られていないのが実情であった。たとえば久米ほか⁷⁾は、樹幹の根元をゴム製ハンマー



図－1 計測対象樹（*Albizzia* sp.）および計測機器配置状況



図－2 計測対象樹周辺における計測機器配置図

で打撃し、樹木周辺の振動分布をマッピングして根系との関連性を検討している。しかし打撃振動のレファレンスをとっていないことに加え、単点での測定波形データから「伝播速度」を求めているなど、測定方法・解析過程に問題が散見された。そこで多点同時測定・波動場分離を徹底した高密度の弾性波探査によって根系の分布を推定することが可能か否か検証することを目的として基礎的な実験を実施した⁸⁾。

土木研究所構内、地質野外実験場内に植樹されていた樹高約5mのネムノキ（*Albizzia* sp.）を対象木とした総合的な原位置調査計測実験が2009年6月に国総研緑化生態研究室によって実施された。この実験の一部を分担する形態で弾性波探査を実施した。対象木は根元部で樹径約40cm、比高約40cmの部分で二股に分岐していた（図－1）。この樹木の周囲に16

方位に測線を設定し、測線上に 50cm 間隔で放射状に 3 成分地震計を設置し（図-2）、樹幹および地面を打撃したときの波動伝播を測定した。樹芯から 4.5m と 2.25m の円周上に発振点を設け、各発振点で 5 方位（鉛直、直交 2 方向、放射 2 方向）から打撃を行ない、極性波動を発生させた。発振には重さ約 40kg の鋼製直方体を木製のカケヤで打撃する方法を採用した。また同様に樹幹根元部を 5 方位から打撃し、同様の発振を試みた。ただし鉛直発振については主幹の二股分岐部を上方から打撃することでこれに相当させているため再現性が低い傾向が認められた。波形収録には高速マルチチャンネル波形記録装置を使用し、288ch（12 測線/16 方位中×8 点×3 成分）を同時収録した。サンプル間隔は 0.25 ミリ秒、波形分解能は 24bit である。

2.2 コンクリート供試体中の弾性波動伝播特性計測実験

高潮堤防の護岸や通常堤防においてものり覆工にコンクリートが使用されている。しかしコンクリートは堤体および基礎地盤を構成する土質材料とは材料物性が大きく異なるため、両者の境界部に变形が集中して空洞が発生したりコンクリート構造物に亀裂が発生するなどの異常が発生する場合があります。これらの異常の有無を非破壊あるいは低侵襲的手法を用いて把握することができれば、堤防の安全性および維持管理に大きく貢献することが期待できる。空洞の検出手法としては一般的に地中レーダー探査が利用されているが、配筋の影響を大きく受けること、微小亀裂の検出が困難であるなどの弱点を有している。一方弾性波を用いた計測も空洞探査や亀裂探査にしばしば利用されてきた。特に打音応答解析は有用な手法として、トンネル覆工背面空洞探査などに広く用いられている⁹⁾。一方でコンクリート中を伝播する弾性波の速度情報から、コンクリート構造物の健全度を評価する手法も適用されてきている¹⁰⁾。一般に板状あるいは角柱状を呈することが多いコンクリート構造物中を伝播する弾性波は、その形状に規制された速度値をとることが理論的に知られている¹¹⁾。また亀裂や劣化部が存在すると、その近傍で特異な波群が観測されることも知られていた¹²⁾。逆に、そのような特異な波群を解析することで、コンクリート構造物中に存在する異常部を検出評価することができる可能性がある。そこで、亀裂や劣化部を含むコンクリート供試体を作成し、異常部近

傍における弾性波の伝播特性を計測する基礎的な実験を実施した。

実験にはレーザードップラー振動計（LDV）を使用した（図-3）。同装置は非接触で任意の点（表面）の速度振動を計測することができ、高精度の室内岩石物性試験などに利用されてきた¹³⁾。これにより従来使用されている加速度センサに関連する計測上の諸問題、特にセンサカップリングによる周波数応答特性の変動の影響を除外することが可能である。またセンサを構造物に設置する必要がないので、遠隔から高所位置の振動を非接触で計測することができる。この LDV を 2 台使用し、小型のハンマーで供試体を打撃した際の人工亀裂近傍での弾性波伝播特性を計測した。測点配置を図-4 に示す。厚さ 30cm のコンクリート床板打設時に厚さ 1mm のアルミ板

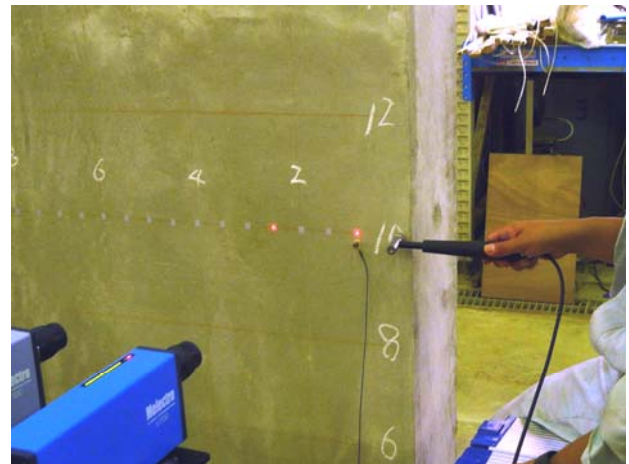


図-3 レーザードップラー振動計を用いたコンクリート供試体弾性波伝播特性計測状況

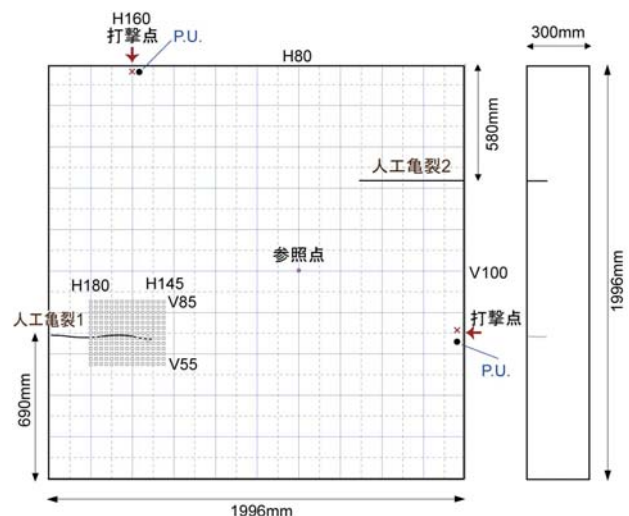


図-4 供試体寸法および人工亀裂周辺の計測点配置

を埋め込み、養生時に抜き取り幅約 2mm、深さ 10cm の人工亀裂を形成した。この人工亀裂近傍に 2.5cm 格子で合計 195 点の測点を設け、上方および側方打撃時の振動を計測した。打撃信号の強度変動および波形変動の影響を除去するために、打撃点近傍（図-4 中の P.U.点）および供試体中央部（同、参照点）においても振動を計測している。振動波形は 16bit、1MHz サンプリング、4ch 同時収録機能を有するデータ収録装置を用いてデジタル記録した。

3. 実験結果および解析検討結果

3.1 弾性波による樹根分布推定実験結果

樹幹を鉛直に打撃した時の地盤振動の鉛直成分を、東西測線上で観測した波形記録を図-5 に示す。この波形記録では、波群の特定とその伝播状況をわかりやすくするために振幅が正の部分を赤色に、負の部分を青色で表している。これにより、屈折 SV 波と後続する強振幅の表面波群を識別することができる。SV 波の見かけ速度は直達波のそれで約 90m/s、屈折波で約 210m/s と見積もられ、同実験場での既往探査結果と調和的であった。特徴的であるのは、表面波の見かけ位相速度が測線方向によって異なっていることである。すなわち、方位線 4（東方向）に比べると方位線 12（西方向）に伝播する表面波の位相速度が明らかに小さい。同様の傾向は、他の方位線における樹幹起振記録波形にも認められた。そこでいくつかの波形記録を合成し、樹幹鉛直起振波形を樹芯から 4m の距離の円周上に配置した地震計で観測した波形を並べ、方位による変化を比較してみた（図-6）。なおこの記録には 28Hz 以上を通過させる低周波帯域除去フィルタを施している。同図からは、屈折 SV 波の走時は方位線方向による変動がほとんどないのに対し、表面波の走時は方位によって変動していることが示されている。特に方位線 12-14 にかけて走時が遅延しているのが特徴的である。

本弾性波探査のほかに、3 次元比抵抗探査が国総研によって実施された。これらの計測の後、対象とした樹木は地表部が切り倒され、圧縮空気を利用した樹根の掘り起こし・根系分布の確認調査が実施された。その結果を図-7 に示す。同図からは根系が主として南東部（方位線 2-11 の範囲）に卓越伸張していることが読み取れる。根張りの範囲は樹幹からおおよそ 3m 程度であり、また方位線 1、9、13、15 の方向には主根は伸張していない。方位線 12-14 に

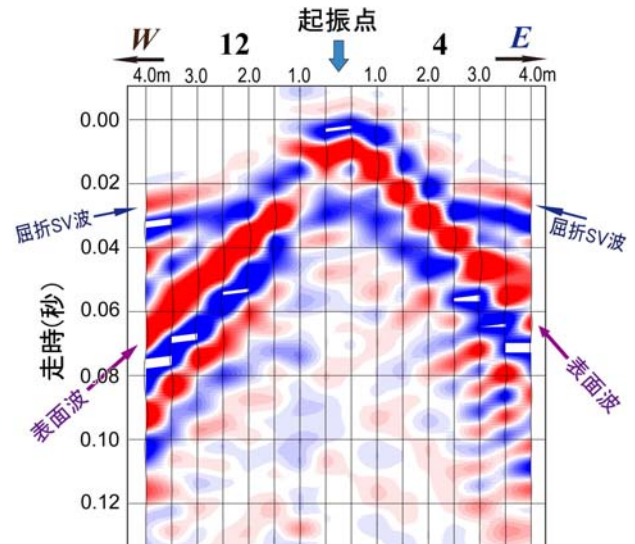


図-5 樹幹鉛直打撃時の東西測線鉛直成分波形

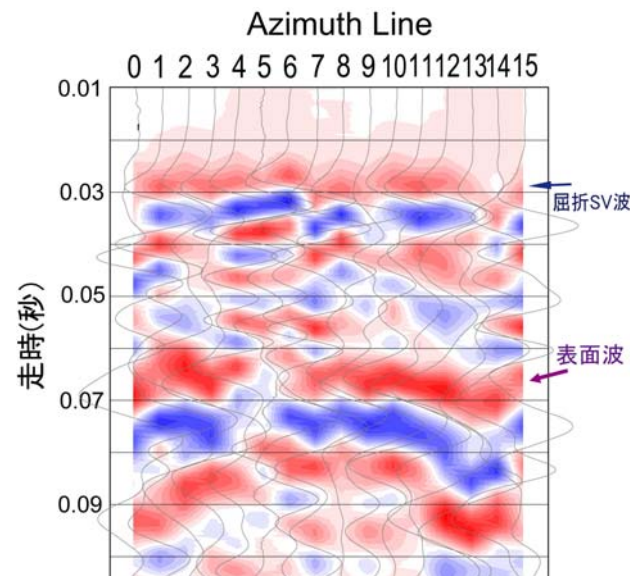


図-6 樹幹鉛直打撃時の 4m 円周上鉛直成分波形

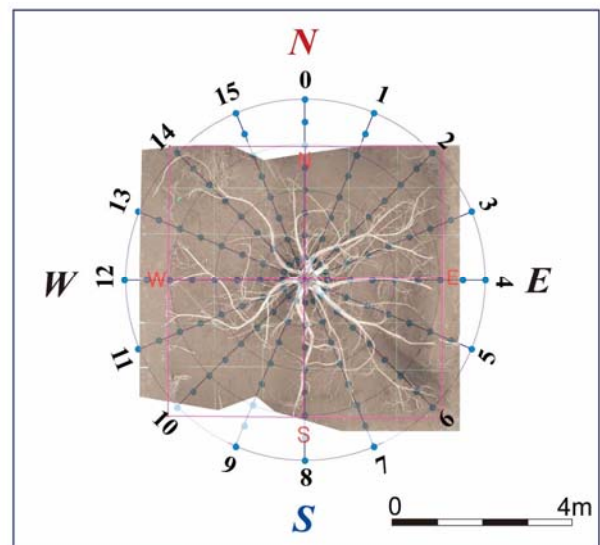


図-7 根系分布と設定測線の関係

かけての表面波走時の遅延は、主根系が当該方位に伸張していないことによって説明可能である。方位線0方向においても同様な表面波の遅延が認められる。以上の検討は予察的なものであるが、樹根が横走する深さを伝播する表面波の位相速度変化を示標にすることで、根系の卓越方向を推定可能であることを示唆している。なお直交方向からの打撃により、反転が明瞭なSH波成分も捉えることに成功したが、SV波も含め方位による速度変化は明瞭ではなかった。S波波形には屈折波群が全方位で確認されており、根系分布より地盤構造を強く反映していると解釈される。

3.2 コンクリート供試体中の弾性波動伝播特性計測実験結果

人工亀裂周辺で観測した打撃振動の鉛直成分波形を図-8に示す。同図上は、対象とする人工亀裂に対して上方約1.3mの供試体上面を打撃した時の、直下方(H160列)および参照点の観測波形である。発震には径10mmの鋼球を用い、人力で供試体を軽く打撃する方法を採用している。なお図に示した各測点での観測波形は、同一打撃振動を同時受振したものではなく、同一点での打撃振動をLDVを移動させ繰り返し観測したものである。したがって観測波形には各打撃のばらつきも含まれているが、参照点観測波形から、このばらつきの影響を評価することができる。またこの観測波形を利用してパルス波などの任意の入力波形に対する応答波形を計算することが可能である。図に示すように参照点の観測波形は振幅、形状とも相似しており、ほぼ均等な発振が保持されていたことがわかる。すなわち図左側に示した測点列における観測波形に認められる変動は、場すなわち人工亀裂の存在に起因するものであることが容易に解釈できる。図-8下は、人工亀裂の側方約1.5mに位置する供試体側面を打撃した振動を同じ測点列において観測した波形を示したものである。亀裂近傍では後続波に差異が認められるが、初動卓越波群は相似していることがわかる。

媒質中に断層や亀裂などの大きな不均質部が存在すると、その近傍において振幅の大きな特異な波群が発生することが知られ、「断層トラップ波」と称されている。本実験の結果は、コンクリート供試体中に亀裂が存在する場合トラップ波が発生すること、打撃点・測点列・亀裂方向によってその観測形態が異なること、すなわち観測結果から亀裂位置・方位

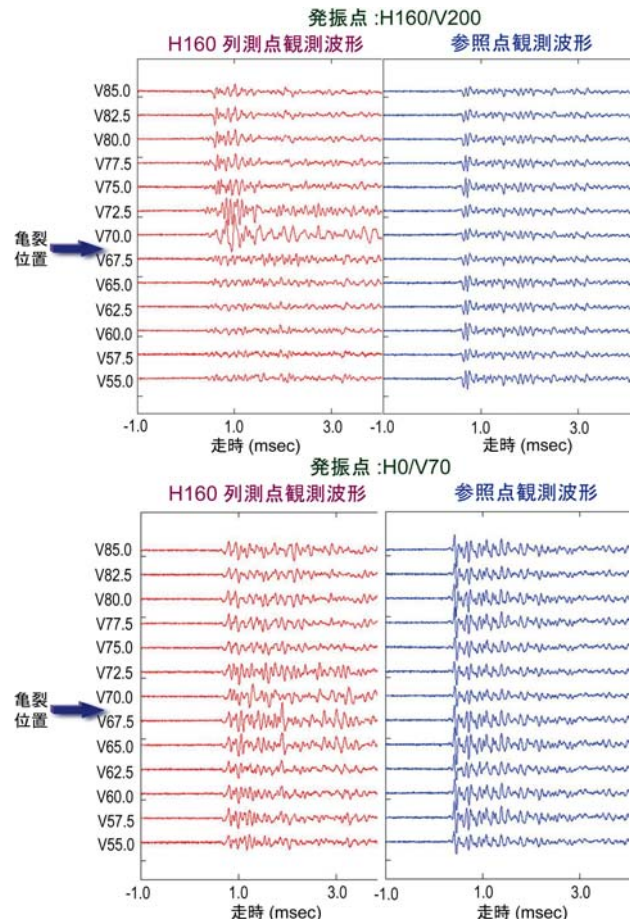


図-8 人工亀裂近傍における打撃振動波形の非線形応答。上：上方（H160/V200 端面打撃）；下：側方（H0/V70 端面打撃）

を推定することが可能であることを示している。

レーザードップラー振動計（LDV）は、原理的にレーザーの照射・反射方向の振動を測定する。したがって同一測点に対して異なる方向からLDVによる測定を実施し、その測定データ合成することで振動成分を分離解析することができる。鉛直成分および放射方向成分の2成分の打撃振動解析を実施したところ、板状の供試体の場合、打撃点近傍ではP波初動振幅が節の部分で大きく減衰することがわかった。このことはコンクリート供試体の速度測定において、震源近傍での測定データの使用に対する制約条件となりうる。

4. まとめ

非破壊で2次元の地下構造を物性分布として捉えることができる物理探査手法は、河川堤防の内部物性構造を把握する方法として有効であると期待され、実際先行研究によって開発した統合物理探査では、

堤防縦断方向において数10m程度連続する物性異常部を検出することが可能であることが示された。このような物理探査手法を詳細構造調査に適用する場合、対象とする弱点箇所における物性異常の空間的な広がりや異常の程度について吟味し、適切な探査手法を選択するとともに測定条件についての検討を加えることが重要である。

21年度は計測手法対象として、簡易貫入試験および貫入孔を利用した高分解能検層手法、採取コア比抵抗測定手法を設定し、現地適用実験によりその有用性について検討した、また対象とする弱点すなわち物性異常として、堤防に植栽される樹木の根系の分布を設定し、それを非掘削で把握する手法について実験的な検討を加えた。その結果、主根の発達する方位では、表面波の見かけ速度が大きくなること、円周上に配列した地震計アレイによって、主根の卓越伸張方位を判定できる可能性があることがわかった。今後は空間分解能を向上させる手段として、より高密度の配列の効果について検討する計画である。

また堤防護岸あるいはのり覆工に使用される板状コンクリート覆工の内部亀裂および背面の空洞把握手法を検討するための基礎的な実験を開始した。21年度はまず板状コンクリート供試体を用意し、供試体中を伝播する弾性波が内部亀裂によってどのような影響を受けるかについて、基礎的な計測実験を実施した。その結果亀裂近傍においてトラップ波が観測されること、その出現形態から亀裂の位置・規模を推定可能であることがわかった。今後より微小な亀裂、あるいは潜在亀裂の打撃振動応答について、さらに土質材料との間に生じる空洞の存在の影響について検討を加える予定である。

参考文献

- 1) 稲崎 富士(2006): 統合物理探査による河川堤防の内部構造評価, 物理探査学会第 114 回学術講演会講演論文集, 234-237.
- 2) 稲崎 富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会(2008): 河川堤防安全性評価への統合物理探査の利用, 最新の物理探査適用事例集, 105-112, 物理探査学会.
- 3) 野口 寛明(2007): 「桜堤防」の機能評価について, 平成 19 年国土交通省国土技術研究会, 自由課題部門論文集, 4p.
- 4) Dalton, F. N., (1995): In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods, Plant and Soil, 173, 157-165.
- 5) Amato, M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G., and Rossi, R., (2008): In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging, Tree Physiology, 28, 1441-1448.
- 6) 尾西 恭亮・六川 修一・加藤 徹史(2001): 高周波地中レーダによる根系の三次元探査・解析例, 物理探査学会第105回学術講演会講演論文集, 188-190.
- 7) 久米 昌彦・日置 佳之・多田 泰之(2007): 振動波を用いた緑化樹木の根系分布の推定方法に関する研究, 日本緑化工学会誌, 33, 15-20.
- 8) 稲崎 富士・飯塚 康雄・今里 武彦・永石 憲道(2009): 弾性波探査による樹根分布推定の試み, 物理探査学会第 121 回学術講演会講演論文集, 246-249.
- 9) 渡辺 文雄・岡嶋 真一・中川 博・風嵐 健志・児玉一夫・松村 武文 (1998): ウェーブレット解析を応用した構造物周辺の地盤空洞調査, 応用地質, 38, 349-358.
- 10) 土木研究所(2009): 衝撃弾性波試験(仮称)表面2点法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), 土木研究所, 10p.
- 11) 斎藤 正徳(2009): 地震波動論, 東京大学出版会, 539p.
- 12) 伊藤 久夫・桑原 保人(1995): 野島断層平林におけるトラップト波, 日本地震学会1995年度秋季大会講演予稿集, A90.
- 13) 西澤 修・雷 興林・佐藤 隆司(1996): レーザードップラー速度計による超音波計測と岩石を用いた不均質媒質の波動伝播モデル実験, 物理探査学会第 94 回学術講演会講演論文集, 92-95.

DEVELOPMENT OF HIGH-RESOLUTION MAPPING OF GEOPHYSICAL PROPERTIES OF THE VULNERABLE PART IN LEVEE SYSTEMS

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2009-2010

Research Team : Construction Technology

Research Department

(Special Unit on Geophysical
Exploration)

Author : INAZAKI Tomio

Abstract : Conventional safety assessment of levee systems usually starts from the behavioral segmentation of levee based on the damage events during past floods. Internal heterogeneity along levee body has been rarely taken into account in the segmentation process whereas the heterogeneity and the resultant weak zones in physical properties are the major vulnerability factors. It was because of its difficulty in imaging levee body as well as underlying layers by the conventional measurement techniques. We therefore developed integrated geophysical surveying for delineating such anomalies in the levee systems at low cost and with high performance. To characterize the internal geotechnical structure in delineated weak zone precisely, it is required to develop new technique or idea which can conduct the detailed mapping in the zone. Furthermore it is also essential to set measurement parameters to match the target anomalies. Then we tested the following two techniques; one was for delineating root extent in shallow depths around a planted tree, and the other was to detect hairline crack in a concrete panel, used for river wall and slope cover. The former technique was three-component seismic measurements using dense array set around the tested tree, and Laser Doppler Vibrometers (LDV) were adopted to measure acoustic waves propagating in concrete panel. As results, surface wave velocities was highlighted as a useful indicator of tree root, namely, increase in surface wave velocity was recorded in the direction where a tree root extended. The fracture-trapped waves were clearly observed adjacent the hairline crack, which indicated that physical characteristics of the trapped waves were valuable to locate and estimate cracks in concrete.

Key words : river levees, vulnerable part, plant root, wall concrete, crack, trapped wave