

落錐パルスのWavelet解析を用いた大型斜面崩壊実験場における地下水状態推定に関する研究

A STUDY ON ESTIMATION OF GROUNDWATER CONDITION BY WAVELET ANALYSIS OF PULSE GENERATED BY WEIGHT DROP ON LARGE SCALE LANDSLIDE EXPERIMENT

松本健作¹・岡田崇²・玉置晴朗³・矢澤正人⁴・名倉裕⁵・
酒井直樹⁶, 植竹政樹⁶, 宋東烈⁷・中村公紀⁸・清水義彦⁹

Kensaku MATSUMOTO, Takashi OKADA, Haruo TAMAKI, Masato YAZAWA, Hiroshi NAGURA, Naoki SAKAI, Masaki UETAKE, Dong-Yeul SONG, Kiminori NAKAMURA and Yoshihiko SHIMIZU

¹正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 工学研究科社会環境デザイン工学専攻
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²学生会員 工修 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

³非会員 教学 (株)数理設計研究所 代表取締役 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町1066-101)

⁴非会員 (株)数理設計研究所 専務取締役 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町1066-101)

⁵非会員 工修 (株)数理設計研究所 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢町1066-101)

⁶正会員 博士(工) (独)防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁷非会員 工博 群馬産業技術センター 研究開発グループ独立研究員
(〒379-2147 群馬県前橋市亀里町884-1)

⁸学生会員 工学 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁹正会員 博士(工学) 群馬大学大学院教授 工学研究科社会環境デザイン工学専攻
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

A large scale experiment of slope collapse was performed by large scale rainfall system in National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Four acceleration sensors were settled in the experimental slope. And weight drop experiment was performed near by the slope for estimation of change of the soil condition by rainfall. Measurement results of groundwater in the slope corresponding to the process of the collapse of the slope. Weight drop experiment and Wavelet transform of measured acceleration pulse by weight drop experiment were performed to examine the change of soil condition by rainfall. The result shows that the frequency characteristics of weight drop pulse changed corresponding to water volume in the slope. It shows that wavelet analysis of pulse signal by weight drop can estimate the change of soil condition on slope collapse by rainfall

Key Words: Slope collapse, Groundwater, Weight drop experiment, Wavelet transform

1. 序論

降雨による斜面崩壊は土砂生産の主因であり, そのメカニズムの解明は重要な課題である. 一般にはいくつかの要因が複合的に作用して斜面崩壊が発生するが, 直接的には降雨の浸透による過剰間隙水圧の増大と,

それによるせん断応力の低下がもたらす構造不安定が原因であると考えられる. 斜面崩壊のメカニズム解明に向け, これまで様々な取り組みが為されてきており, 鈴木ら¹⁾は, 土壌中の透水係数と不透水層の勾配を考慮した斜面浸透流モデルを実際の崩壊地に適用し浸透流解析を行うことで, 降雨履歴と浸潤線の挙動の対応について現地の状況を再現している. また, 安ら²⁾は山

腹斜面土層内のパイプ状の空洞をモデル化したモデルを提案し、実験データとの比較によって、その有効性を示している。また、AWAL³⁾らによっても地すべり現象3次元浸透流解析が為され、やはり室内実験による比較が為されている。これらの取り組みにおいて、それぞれの手法の有効性が確認される一方で、実際の崩壊斜面を対象とし、それによる知見を、直接、防災・減災に生かす為の取り組みについては、より一層困難な状況にあるといえる。その原因は、実際の斜面では土質や植生の被覆状況など複雑な条件下での現象であり、加えて、崩壊の可能性が高く危険性の高い、それ故にデータの重要性が高い現場において、安全性の面から計測データを得ることが難しいことによる。酒井ら⁴⁾は、防災科学研究所の大型降雨実験施設を用いて、降雨による斜面崩壊実験を行い、様々な土質、斜面勾配および降雨の条件下で実験を行うことで、斜面崩壊場における地下水が、平衡状態や急峻な水位上昇など、複雑な分布および挙動を示しながら崩壊にいたることを示し、その特性に基づいた斜面崩壊の早期予測手法の提案を行っている。著者⁵⁾は、同じく大型斜面崩壊実験を行って、MEMS型加速度センサによる崩壊の微弱な兆候を、最大で崩壊の20分前に検知可能であること、および計測される加速度波形信号のWavelet解析^{6),7)}によって、更に早期に検知できる可能性があることを明らかにしてきた。

そこで本研究では、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設を用いた大型斜面崩壊実験を行い、降雨による斜面内部の体積含水率の経時変化を計測し、散水開始から崩壊に至る一連の過程における地下水の挙動と土の物性値との相関性について考察を行った。併せて、実務上有益な知見を得るため、斜面内における体積含水率と加速度の波形特性との相関性について検討を行った。

斜面崩壊の監視を行うには、現状では地下水および変位あるいは傾斜をモニタリングすることが標準的となっているが、実際に崩壊の危険性が高くなっているエリアにこれらセンサを設置するのは安全面から困難である場合が多い。一方でMEMS型加速度センサは、比較的ラフに、任意の角度で埋設した状態から、重力加速度の常時感知によって傾斜計同様の機能を有し、加えて、加速度の波形情報を与えるため、近年、注目されている斜面崩壊の監視センサの一つである。この、比較的現地においても計測データの得やすい加速度波形データと斜面崩壊の主因たる体積含水率の相関性を明らかにすることができれば、実務上有益な知見となると思われる。加速度波形は常時微動によってもたらされるが、S/N比の制約によって、本実験においては十分なデータが得られないことが予想されたため、本研究では斜面崩壊実験装置の至近で小規模な落錐実験を試み、そのパルス信号を予め斜面内に埋設しておい

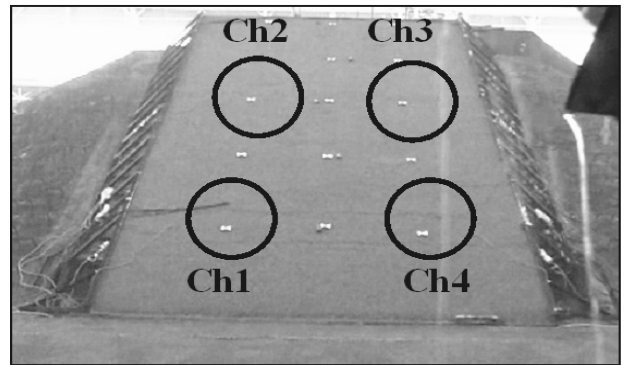


写真-1 実験斜面の外観と加速度センサ埋設位置

表-1 実験斜面の緒元

斜面幅	4m	土砂堆積	40m ³
斜面長	10m	乾燥密度	1.44g/cm ³
斜面厚	1m	含水比	0.084
斜面高	5m	散水強度	50mm/h
傾斜角	30°	給水強度	15mm/h

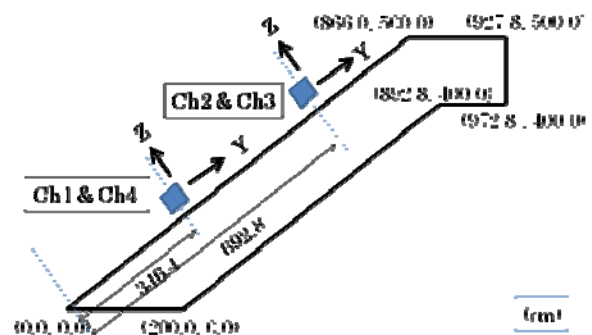


図-1 実験斜面の側面図及び加速度センサの軸設定

た4器の加速度センサによって計測することで、パルスの伝播特性と体積含水率の相関性について検討を行うこととした。計測波形に信号処理については、既に本実験条件下における有効性が確認されている⁵⁾Wavelet変換を用いた検討を行うものとする。

2. 大型斜面崩壊実験の概要

実験は、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設を用いて、防災科学技術研究所、消防研究センターおよび(株)数理設計研究所との共同研究として行った。実験斜面にはCh(チャンネル)1~4の4器の加速センサを埋設した。実験斜面の外観および加速度センサの埋設位置を写真-1に、実験斜面の緒元を表-1に、また、実験斜面の側面図および加速度センサの軸設定を図-1に示す。加速度センサの軸設定は斜面横断方向をX軸、斜面接線方向をY軸、そして斜面法線方向をZ軸とした。

表-2 体積含水率測点一覧表

	下段	中段	上段
上層(15cm)	VW1-1	VW2-1	VW3-1
中層(45cm)	VW1-2	VW2-2	VW3-2
下層(85cm)	VW1-3	VW2-3	VW3-3

単位(m)

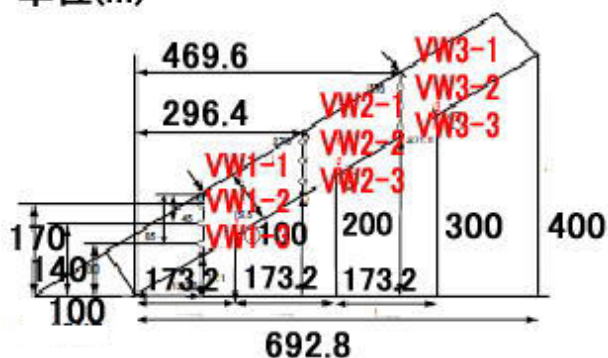


図-2 土壌水分計設置状況

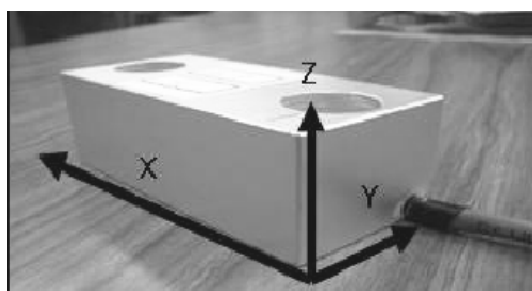


写真-2 加速度センサの外観

表-3 加速度センサの諸元

計測原理	静電容量型	A/D変換	12bit
計測軸	3軸	レンジ	64dB
Sampling	1600Hz	サイズ	3×3×8cm
計測範囲	±1.5G		

降雨による斜面内部の地下水状態を計測するため、誘電率から土壌水分を測定する土壌水分計（デカゴン社製ECH20）を設置し、散水開始から崩壊までの体積含水率の測定を行った。斜面の上中下段の3断面に、土槽表面から15cm、45cmおよび85cmの各3測点、計9測点で土壌水分を測定した。表-2に各水分計の位置と名称を、図-2に、表-2に対応した土壌水分計の設置状況を示す。加速度計測に使用した加速度センサは（株）数理設計研究所によって本研究の為に独自開発され、IT強震計⁸⁾の標準仕様として採用されているMEMS型加速度センサであり、3軸方向の加速度をサンプリング周波数1,600Hzで計測できる。静電容量型であり、静的な加速度に対する感度を有しているため、重力加速度を常時検知可能であるため、センサの姿勢を計測できる。これによ



写真-3 落錐実験の様子



写真-4 崩壊後の様子

て傾斜計としての機能も有している。外観を写真-2に、諸元を表-3に示す。埋設にあたっては、長さ20cmのボルト2本をセンサに設置した状態で埋設することによって、周囲の土砂の挙動を捉えやすくする工夫をしてある。振動の伝播特性の検討から散水による土の物性値変化の状態推定を行う為の落錐実験は実験斜面下端から6mの位置で行った。錐は、1個10kgの鉄製円柱を3個連結し、計30kgとした。この錐を地上80cmの高さから落下させ、その振動を計測した。落錐位置至近に、斜面内の各Chの値を正規化するために、Ch5として、斜面に埋設したものと同一加速度センサを設置し、加速度の計測を行った。写真-3に落錐実験の様子を示す。落錐は散水開始の17分前から開始し、連続5回落下させて1セットとした。これによって、15分間隔での斜面内加速度計におけるパルスの伝播特性の検証を行う。

崩壊は、散水開始から3時間4分、総散水量153.3mmの時点で発生した。写真-4に、側面からみた崩壊後の様子を示す。写真中の白枠で示した部分が実験斜面の外側の鉄枠部分であり、崩壊によって下部の土砂が大きく前にせり出している様子が確認できる。図には示していないが、時間経過に伴い、全体的には斜面下部が孕み出し、斜面上部が埋没するような形で変形を始め、中部から下部にかけて斜面横断方向に亀裂が発生し、崩壊に至るという状況であった。

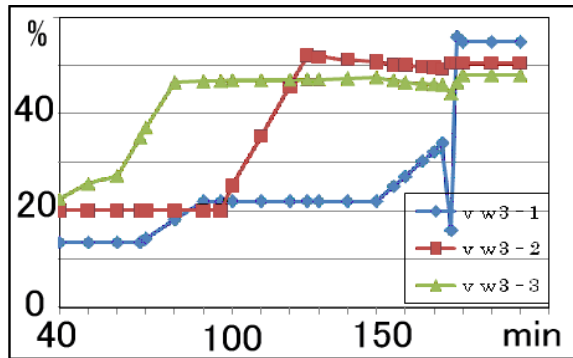


図-3-(1) 体積含水率の経時変化(上段)

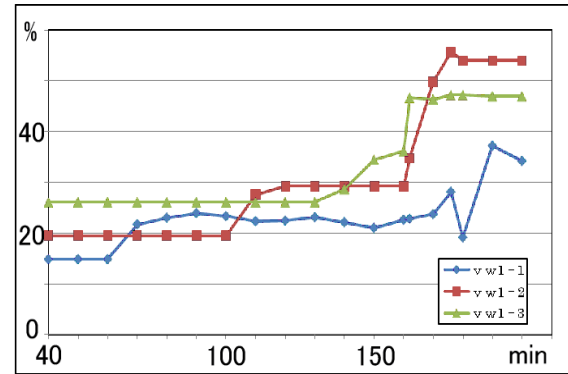


図-3-(3) 体積含水率の経時変化(下段)

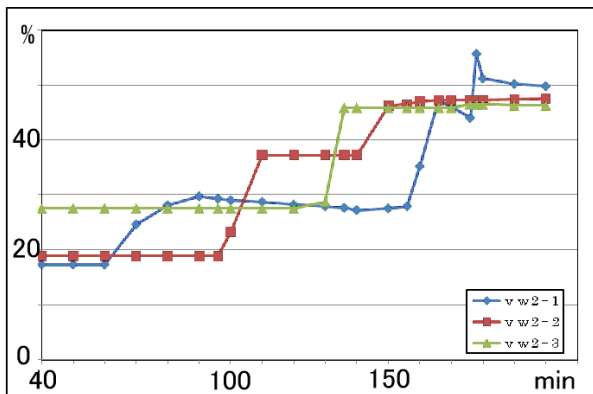


図-3-(2) 体積含水率の経時変化(中段)

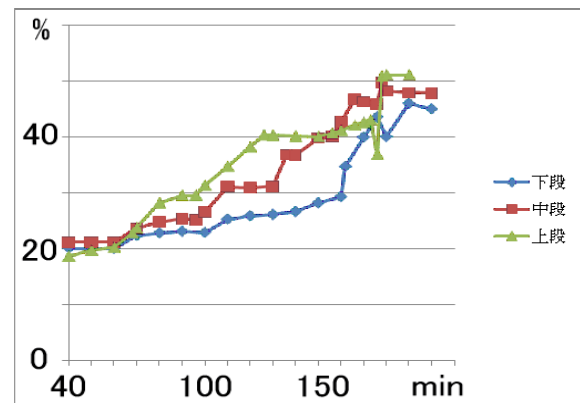


図-4 各断面における体積含水率の平均

3. 崩壊斜面場の地下水特性

図-3-(1)～(3)に、測定された体積含水率の経時変化を示す。各図共に、横軸は時間(min)、縦軸は体積含水率(%)である。横軸で180分の時点で崩壊が発生している。崩壊させるための本実験前に、一定の体積含水率を与えた土砂状態にする為、先行降雨として30mm/hの降雨を3時間与え、また、無限斜面条件を設定するために、本実験開始の1.5時間前から、斜面上部より15mm/hの給水を行った。このため、図-3-(1)～(3)共に、初期状態の時点で20%前後の体積含水率を示している。各断面共に、先行降雨の浸透によって初期状態から下部ほど含水率が高い状態となっている。図-3-(1)を見ると、VW3-3(上段断面の下部)で、散水開始から60～70分と最も早く含水率が50%付近まで上昇していることが分かる。崩壊発生時の180分の時点でもVW3-3は50%近い値でほぼ一定値で推移している。下部の含水率に注目すると、含水率45%近くに増加するタイミングが、VW3-3(上段断面下部)が30分後、VW2-3(中段断面下部)が140分後、最後にVW1-3(下段断面下部)が160分後と、上段から下段へ順に浸透が進行していることが分かる。体積含水率の変化は比較的急勾配でステップ状に増加している。これは全体的に徐々に水分量が増加するのではなく、含

水率の高いエリアが次第にその分布を広げていくような浸透過程であることが伺える。VW3-2、VW2-2およびVW1-2の各断面における中部の含水率の変化に注目すると、全断面共に100～110分後にステップ状に増加している。ただし、増加量は断面毎に異なっており、上段では50%強であるのに比べ、下段ではこの時点では30%に留まり、その後、崩壊につながる大変形開始時の160分後まで、30%のまま一定値のまま留まっている。140～160分における中部での水分量上昇は中段断面においても見られる。上部における含水率の急上昇は最も遅く、VW3-1(上段断面上部)およびVW2-1(中段断面上部)では崩壊による大変形および周囲の亀裂の影響によるものと思われる急峻な変化が見られる。VW1-1(下段断面上部)を見ると、崩壊直前にも、他断面で見られるような顕著な変化が見られない。これらの結果から、今回の斜面崩壊が、上段および中段断面部での地下水位が上昇し、それらが上部にまで達することで崩壊に至った過程が推察できる。散水による土壌水分の増加が斜面全体でどのような傾向を示していたのかを検討するために、図-4に図-3-(1)～(3)で示した体積含水率の、断面毎の平均を算出したものを示す。図-4を見ると、各断面における体積含水率が時間経過に伴って増加していることが分かる。断面間での比較を行うと、初期状

態ではほぼ同じ20%前後であるが、上段断面の体積含水率が、他断面よりも早く増加し、下段断面の増加が最も遅いことが分かる。崩壊直前の170～180分後付近では、下段断面における体積含水率が急上昇しており、最終的には3断面全てで50%前後の含水率となった後、崩壊に至ったことが明らかになった。

4. 落錐パルスの伝播特性

本大規模斜面崩壊実験は、一様砂を使用し、敷設および締め固めを均一にし、先行降雨と給水によって崩壊実験直前における斜面内の水分量が等しくなったところで建屋全域から均等に散水するという規格化された条件下で行われたものであるが、体積含水率の測定結果は、上中下部のいずれの場所でも一時的に最大含水率を示すなど局所的に様々な挙動が見て取れた。これは、雨水の浸透によって下部から飽和領域が広がり、浸潤面が層状に分布して上昇していく、という概念から外れた結果であり、ここでは示していないが、複数回行われた同様の実験においても、斜面崩壊場における地下水は、やはり局所性の高い複雑な挙動を示した。大型実験における物理諸量の制御の難しさを示す結果でもあるが、実スケールにおいては、極力規格化された条件下であっても地下水の挙動は複雑なものとなっていることが分かる。このような地下水の状態を把握することは、斜面崩壊の危険度を検討するうえで極めて重要な要因となるが、実際の監視対象エリアにおいて、必ずしもその地下水の状態を観測できる訳ではない。

本研究で用いた加速度センサは、従来の傾斜型斜面崩壊監視装置同様の機能を有しながら、加速度信号の計測によって更に詳細な情報を与えるものであるため、近年注目を集めており、一部、実用的に使用され始めている。そこで、本研究では、斜面近傍で落錐実験を行って、斜面内に埋設された加速度センサによって計測されるそのパルスの伝播特性が、散水による水分量の増加による土の性状変化によってどのように変化するか、またその状態を推定することができるかどうかについて検討を行うこととした。計測された加速度信号の解析にあたっては、時間一周波数平面での解析が可能であるWavelet解析を使用した。斜面崩壊場における加速度信号のWavelet解析の有効性については既報⁵⁾に報告済であるので、ここでは基礎式のみ示す。連続Wavelet変換の基礎式を式(1)に示す。

$$(w_{\psi} f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (1)$$

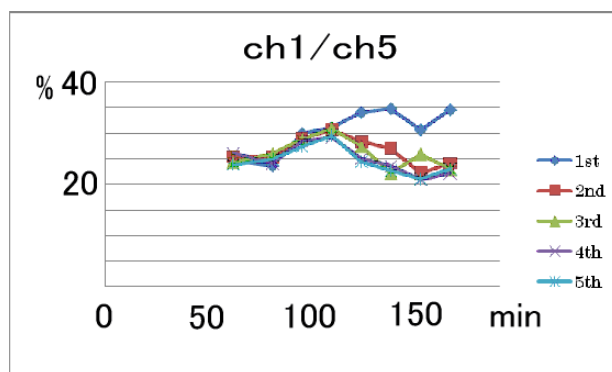


図-5 落錐パルスの最大値の経時変化

ここで、 a はスケールパラメータ、 b はトランスレートパラメータ、 $f(x)$ は解析対象信号、 $\psi(x)$ はMother Waveletである。Mother WaveletにはDaubechies5を用いた。式(1)は $(b, 1/a) = (2^j k, 2^j)$ と置換することで、式(2)に示すように、離散Wavelet変換に変換することができる。

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \psi(2^j x - k) f(x) dx \quad (2)$$

図-5はCh1における落錐パルスの最大値の経時変化を示したものである。図中には1セットの落錐実験を実施した、連続5回の結果を1st～5thとして示している。各値は落錐実験の至近で計測したCh5の値で除して無次元化した値を示している。横軸は時間(分)、縦軸は(%)である。図を見ると、計測開始時点ではCh5の25%の信号が伝播されており、連続5回のパルス強度がほぼ同じであることが分かる。120分を過ぎた辺りから1stパルスのみ、その伝播強度が増しており、その後の2nd以降5thまでがほぼ一定の値になっている。1stパルスの増大は、散水の影響によって土中の含水率が変化し、パルスが伝播し易くなったためであり、2nd以降の低減は、1stパルスの振動によって土の性状に変化が起きたものと思われる。

これらの詳細なメカニズム解明は現在検討中であり、今後の課題であるが、パルスの伝播強度と土中水分量との間に強い相関性があることが分かった。

ここで、図-5において性状変化が起きていたと考えられる120分の前後として、それぞれ90分後と150分後における落錐パルス信号のWaveletマップを図-6-(1)および(2)に示す。両図共に、上段図が原信号、中段図が比較のために示したFFTの結果、下段図がWaveletマップである。上段図は横軸が時間(sec)で縦軸が加速度(gal)、中段図は横軸が周波数(Hz)で縦軸がパワースペクトル値、下段図は横軸が時間(sec)で縦軸がスケールパラメータである。スケールパラメータは周期の関数で

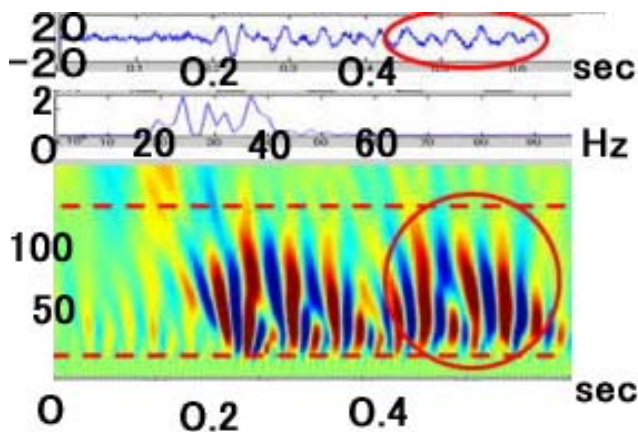


図-6-(1) 落錘パルスのWaveletマップ(90分後)

あり、縦軸の値が大きいほど低周波成分を意味する。図-6-(1)を見ると落錐による振動が約0.2秒程度発生した後、更に0.2秒程度の後続振動が見られる。この後続振動は斜面周囲の鉄棒などの構造物および底面からの反射波が伝播しているものと考えられるが、本研究ではこの後続振動の特性解明は行っていない。Waveletマップを見ると、原信号で振動がみられる時間帯に対応して、前後2つの分布が明瞭に見られる。ここで、更に散水時間が経過した図-6-(2)のWaveletマップを見ると、後続の振動成分が見られなくなっていることが分かる。最初の振動成分の分布自体も、図-6-(1)に比べると、縦軸の存在範囲もやや高周波成分側に限定された狭い領域に分布している傾向も見てとれる。これは、土中水分量の増加によって土の物性が変化し、振動成分の伝播特性に変化を及ぼしたことが原因であろうと考えられる。両者の比較から、降雨によって土砂の物性が変化し、周波数成分の発生域やその時間帯が時間経過に伴って大きく変化している事が分かる。降雨による土砂の物性変化を、このような落錐パルスの検証によって捉える事ができることが分かった。今後、更にデータを蓄積すれば、落錐パルスの伝播特性から土壌水分変化による土の性状変化を推定できる可能性があることが確認できた。

5. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 大型斜面崩壊実験における土中の体積含水率の変化が強い局所性を示し、必ずしも下層より水分量が一律に増加する訳では無い計測結果となった。
- 2) 落錐パルスの伝播特性と土壌水分量には明瞭な相関性が見られることが明らかとなった。また、今後のデータの蓄積によって、落錐パルスの伝播特性から土壌水分の変化による土の性状変化を推定できる可能性があることを示した。

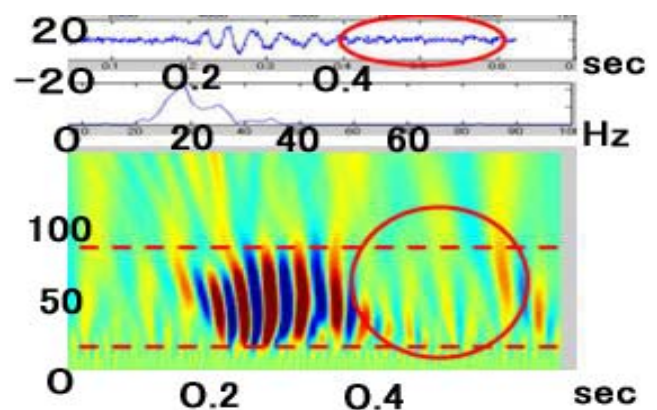


図-6-(2) 落錐パルスのWaveletマップ(150分後)

参考文献

- 1) 鈴木雄太郎・真野明：豪雨に対する斜面崩壊地の浸透流解析，土木学会水工学論文集、第47巻，pp. 271-276, 2003.
- 2) 安賢旭・市川温・堀智晴・椎葉充晴：山腹斜面におけるパイプマトリクス流連成モデルの開発，土木学会水工学論文集，第51巻，pp. 445-450, 2007.
- 3) Ripendra AWAL, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, Yasuyuki BABA and Hao ZHANG: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON 3D TRANSIENT SEEPAGE AND SLOPE STABILITY OF LANDSLIDE DAM FAILURE, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.53, pp.61-66, 2009.
- 4) 酒井直樹・植竹政樹・福園輝旗：豪雨時の斜面を不安定化させる飽和度および水位分布の形成機構の実験的検討，地盤工学会第44回地盤工学研究発表会，pp. 1691-1692, 2009.
- 5) 松本健作・玉置晴朗・矢澤正人・福園輝旗・酒井直樹・岡田崇・竹澤弘久・宋東烈・小葉竹重機・清水義彦：Wavelet 変換を用いた大型斜面崩壊実験場における加速度センサによる信号特性の検証と崩壊の兆候検知に関する研究，土木学会応用力学論文集，Vol.11, pp.937-945, 2008.
- 6) 榊原進：ウェーブレットビギナーズガイド，東京電気大学出版局，1995.
- 7) 石川康宏：臨床医学のためのウェーブレット解析，医学出版，2000.
- 8) <http://www.eic.eri.utokyo.ac.jp/ITKyoshin/Kenkyukai/index.html>

(2009年9月30日受付)