

## 携帯型電波発信機の土砂埋没時の性能評価

## Performance of the Portable Signal Transmitter (beacon) at Buried Condition in the Soil

土肥 聖平 Shohei DOHI (広島大学大学院工学研究科)  
一井 康二 Koji ICHII (関西大学社会安全学部)

一刻を争う土砂災害発生後の救助作業において、従来よりも迅速に要救助者を発見することを目的として、携帯型電波発信機の「ビーコン」を活用することを考えた。携帯性や連続使用性に優れたビーコンを主な対象とし、比較として出力電波が強いもの、周波数が異なるものでも埋没実験を行い、土砂による電波強度や電波到達距離の変化を計測した。また、実際の斜面とマネキンを併用した、より災害現場に近い環境での埋没実験も行った。土砂の種類、特に高い含水比下ではビーコンの電波は大きく減衰するが、周波数が低いビーコンでは減衰が少なく、災害現場において適用性が検討された。土砂に埋もれていても、ビーコンと衣服などのわずかな隙間から電波が検出できた。

キーワード：ビーコン，電波強度，周波数，埋没実験

(IGC : D02, D03)

## 1. はじめに

多くの自然災害に見舞われている日本では、土砂災害に限定しても毎年 1000 件前後発生している<sup>1)</sup>。災害発生後の救助作業は一刻を争うが、要救助者の安全性を最優先に考慮し手作業が進められることがほとんどである。そこで本研究では、携帯型電波発信機「ビーコン」を使用することで、少しでも救助作業を迅速化することを目的とした。

ビーコンとは Bluetooth などの電波信号を発信する機械であり、距離の測定や情報のやり取りを行うことができる。元々は雪山で遭難した人を発見するための「雪崩ビーコン」が活用されていたが、近年では携帯端末でも電波の受信が可能なビーコンが誕生、美術館内での案内や販売店のクーポン受け取りに用いられている例もある。このビーコンを普段から所有しておけば、仮に土砂災害に巻き込まれたとしても、地中からの電波を感知することで、従来よりも迅速に、かつ効率的に要救助者を発見できることが考えられる。

災害救助にビーコンを活用することを目的とした先行研究として、古樋ら<sup>2)</sup>によって、腕時計型のマイクロビーコンとエスパアンテナを利用した電波到来方向探知機の試作が行われており、また永井ら<sup>3)</sup>によって、雪崩ビーコンに基づいた被災者の捜索システムが提案されている。しかし、いずれも土砂に埋もれたビーコンの定量的な性能評価は行われていない。

より実践的な先行実験として、林田ら<sup>4)</sup>によって 8.5kHz の低周波数の電磁波を用いて、間隙水圧や土圧を計測するワイヤレス計測器が開発されている。土砂に埋もれてもなお 100m 離れた地点で通信ができ、10 年以上連続使用が可能である。しかし、本計測器は直径 125mm、

高さ 205mm の円筒形をしており、普段から携帯するのは困難なサイズである。また松岡ら<sup>5)</sup>によって、金属や磁性体の影響を考慮した、実際の災害現場における雪崩ビーコンの活用が検討されている。低周波なため土中埋没による減衰が少ないとされ、携帯も比較的容易ではあるが、雪崩ビーコン自体の値段が非常に高価である。救助円滑化のためのビーコンは、土砂災害警戒区域の住民に事前配布して災害時に活用されることが前提となるため、可能な限り安価であることが望ましい。

そこで、普及のしやすさ、携帯性、使用期間なども考慮し、小型かつ安価なバッファロー社のビーコン(以下タイプ A)を実際に土砂に埋没し、発信される電波強度はどう変化するか、どの程度の減衰が発生するかを計測した。比較として、周波数が低い雪崩ビーコン(以下タイプ B)、タイプ A よりも強力な電波が出力される高出力ビーコン(以下タイプ C)も用いて埋没実験を行う。表-1 に、埋没実験に使用したビーコンを示す。

また、実際に斜面崩壊を起こしてマネキンおよびビーコンを埋没する実験も行った。この実験では、より災害現場に近い状態での検証を行った。

表-1 埋没実験に使用したビーコンと性能<sup>6)</sup>

タイプ	周波数	大きさ(mm)	重さ(g)	価格(タイプAを1としたときの割合)
A	2.4GHz (class2)	26×45× 10	12	1
B	457kHz	140×80× 30	245	22.4
C	2.4GHz (class1)	83×28× 12	18	5.4



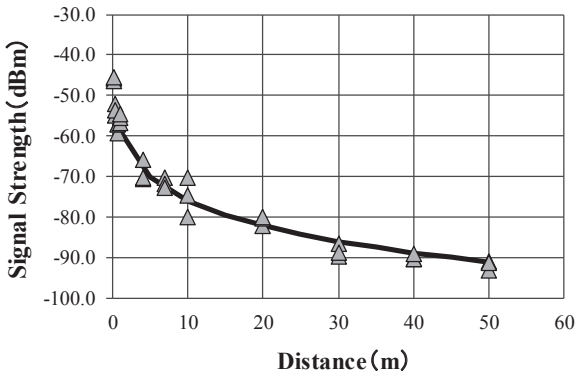


図-1 タイプ A の電波強度と距離の関係

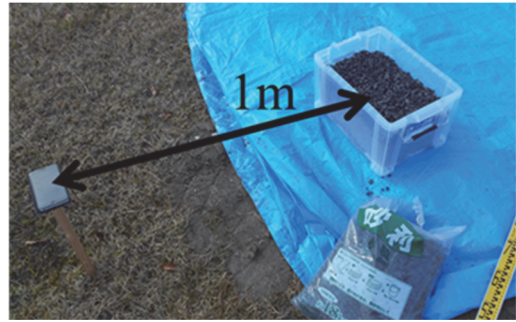


図-4 電波強度計測の様子(写真は砂利使用時)



図-2 実験に使用したコンテナ



図-3 実験に使用した土砂 4 種類

計測によって得られた電波強度と距離の関係を図-1に示す。横軸にビーコンと携帯端末の距離、縦軸にその距離で計測できた電波強度を示している。ビーコンと携帯端末の距離が離れば離れるほど、電波強度は曲線を描きながら弱くなっていくことが明瞭に分かった。

## 2.2 実験方法および電波強度低下に影響する土砂特性

埋没実験では、図-2に示すコンテナを使用した。コンテナの底の中央に電波を発した状態のビーコンを設置、その上に図-3に示す4種類の土砂をそれぞれ被せることとした。1m四方の箱を作製し、どの程度の埋没深さまで電波強度の測定ができるかを検証した予備実験では、40~50cmの埋没で計測が不安定となった。そのため、確実に電波強度の計測が行えるよう、埋没深さは20cmに固定し、それぞれの土砂においてビーコンの上にそのまま被せたケース、締め固めをしながら被せたケース、事前に加水を行い、含水比を増加させた状態で被せたケースを行った。ただし、砂利は透水性が非常に高く加水を行ってもすぐに水が抜けてしまうので、砂利のみは含水比を増加させるケースを行っていない。なお締め固めは、「JIS A 1210」に規定されている締め固め試験<sup>7)</sup>を参考に20cmの層を3回に分け、各層が一樣になるように55回ずつランマーを用いて締め固めを実施した。図-4に電波強度計測の様子を示す。

各土砂に埋没したときのタイプAの電波強度と距離の関係を図-5に示す。計測距離は最大50mとし、途中で電波が感知できなくなった場合は、その点を×印で各図中に示している。点線は埋没前の電波強度と距離の関係を表している。図からも読み取れるように、間隙の多い砂利埋没時が最も遠くまで電波が届いていたが、20cm程度の埋没でも大きな減衰が確認できた。締め固めの有無や土砂の種類によっても減衰の程度は異なるが、特に水を加えたケースでは大きく電波が遮断されることが分かった。今回用いた培養土は複数種の土や肥料となる有機物が混ぜられているだけでなく、初期状態の含水比も80%以上とかなり高いものであった。そのため、今回使用した土砂の中では最も電波を遮断する結果となった。本実験では、締め固めおよび加水の有無が電波の伝達にどの程度影響するかを検証したものであるため、土粒子密度や粒度分布など、詳細な土質データは測定していない。

## 2. 各種条件下での埋没による電波強度の変化

### 2.1 埋没前のビーコンの性能

本来のビーコンが有する性能を評価するため、電波を発信する側のビーコンと電波を受信する携帯端末の距離を任意に変化させ、その都度電波強度を測定、電波強度と距離の関係を明らかにした。携帯端末によって電波強度を計測する際、数秒間に1回のペースで計測データと計測された時刻が端末上で更新され続ける。そのため、安定してデータが更新されている状態を受信可能とみなすこととする。計測される電波強度は若干の時間的変動を伴うので、携帯端末に表示される受信強度の値も変動する。よって、計測を開始してから10秒ごとの値を3分間読み取り、その平均値をその距離での受信電波強度とした。

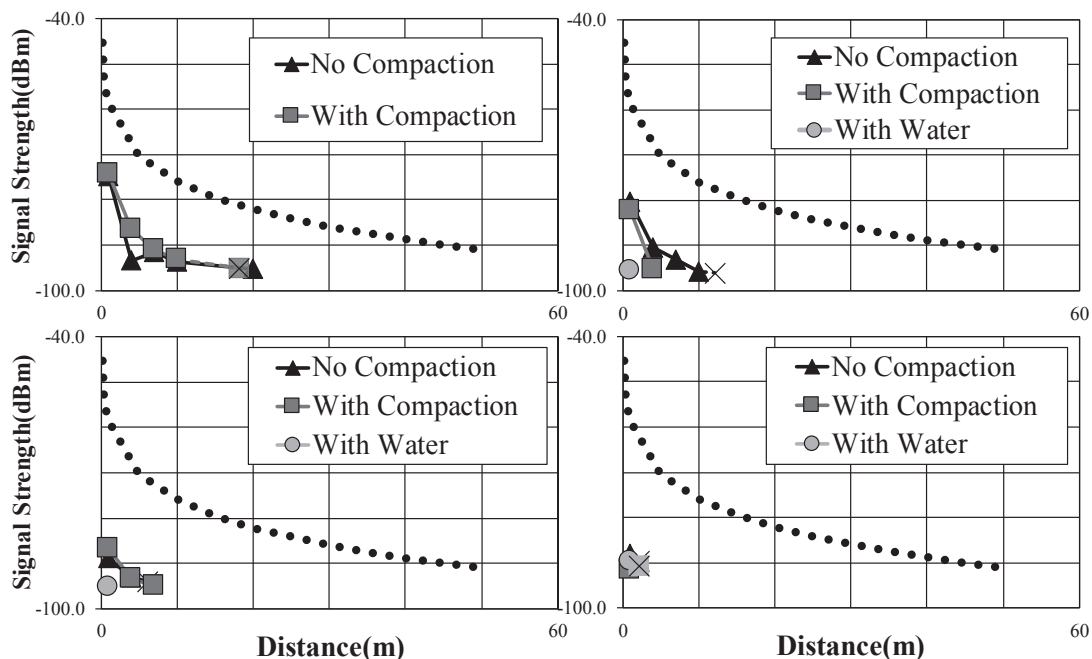


図-5 タイプ A の土砂埋没後の電波強度と距離の関係 (左上：砂利，右上：真砂土，左下：砂，右下：培養土)

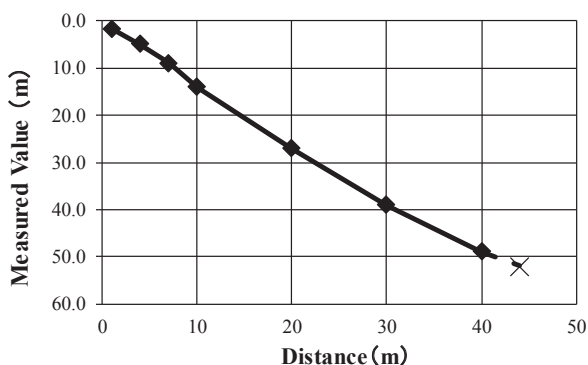


図-6 タイプ B が示す計測値と距離

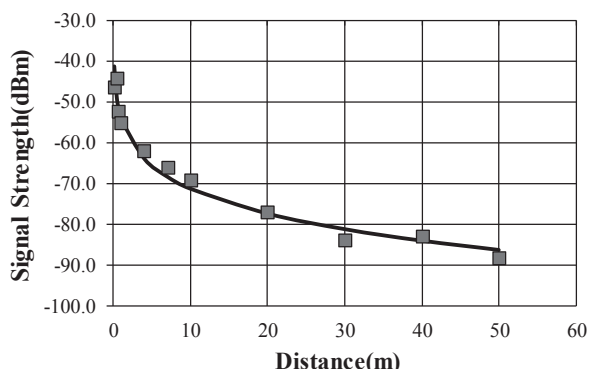


図-7 タイプ C が示す電波強度と距離の関係

### 2.3 低周波数及び高出力ビーコンによる減衰特性の比較

タイプ A のビーコンを用いた埋没実験では大きな減衰が確認でき、特に含水比に影響を受けることが分かった。このビーコンが放つ 2.4GHz の周波数は極超短波に分類され、高周波なため他からの干渉が大きく、減衰も発生しやすい。そこで、土砂の条件のみならずビーコンの性能に着目し、タイプ A よりも周波数が低いもの、出力さ

れる電波が強いものを用いて同様の埋没実験を行った。

周波数が低いものとして採用したのが、雪山で登山者が身につける雪崩ビーコンである。このビーコンの周波数は 457kHz と、タイプ A よりもかなり低い周波数となっているので、土砂による減衰は少ないと考えた。この雪崩ビーコンは電波を放出する発信モードと、電波を検知する捜索モードの両方の役割を果たすので、実験では 2 つの雪崩ビーコンを用意、片方を発信モードにしてコンテナの中に置き、土砂を被せた。その後もう片方のビーコンで計測を行った。また、雪崩ビーコンは直接両機器間の距離を計測できるので、土砂を被せていくことによる距離表示の変化を計測した。

出力される電波が強いものとして採用したのが、高出力ビーコンである。Bluetooth の電波には「class」と呼ばれる種類が存在し、電波の強さによって「class1」、「class2」、「class3」の 3 つに分けられている。それぞれの有効範囲の目安として、「class1」は 100m 程度、「class2」は 10m 程度、「class3」は 1m 程度とされている<sup>8)</sup>。タイプ A のビーコンは「class2」の電波だったが、高出力ビーコンは「class1」の Bluetooth の電波を有している。そのため、同様に土砂に埋没したとしても、タイプ A よりも遠くに電波が届くことが考えられる。

実験の方法や手順、埋没に使う土砂のケースはタイプ A の時と同様に行い、まずは土に被せていない状態の電波強度と距離の関係および計測値と距離の関係を求めた。その後、それぞれのビーコンを各条件の土砂に埋没させ、埋没前との比較を行った。

埋没前の雪崩ビーコンの計測結果を図-6 に示す。横軸は 2 つの雪崩ビーコン間の実際の距離、縦軸は受信モードの雪崩ビーコンが計測した値である。縦軸の距離が下向きに増加しているのは、タイプ A のビーコンの実験結

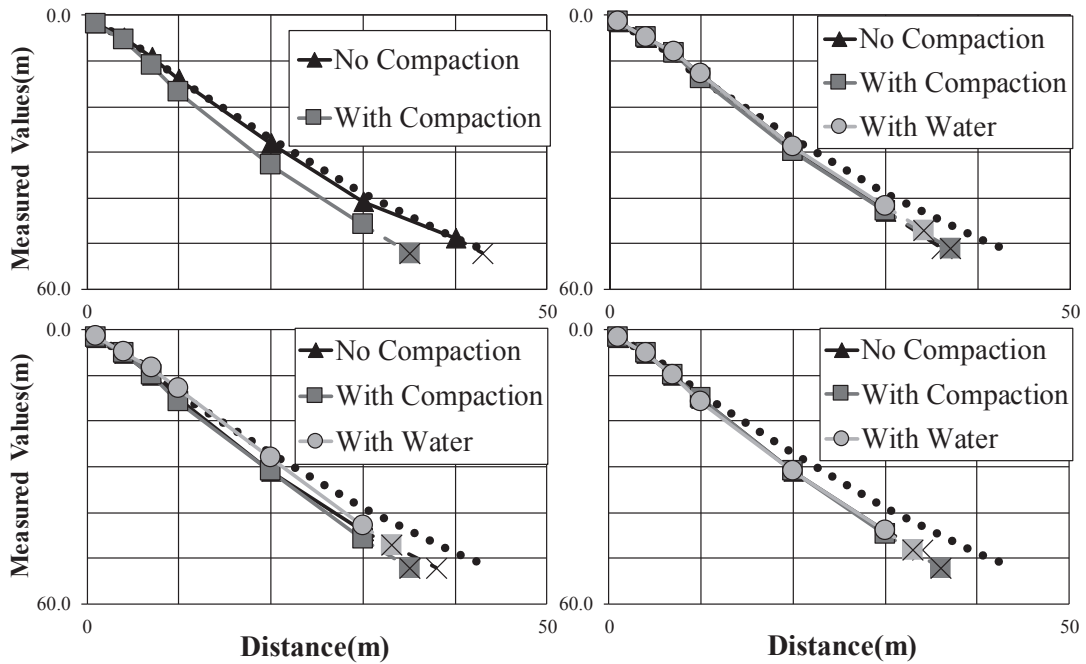


図-8 タイプ B の土砂埋没後の計測値と距離の関係 (左上：砂利, 右上：真砂土, 左下：砂, 右下：培養土)

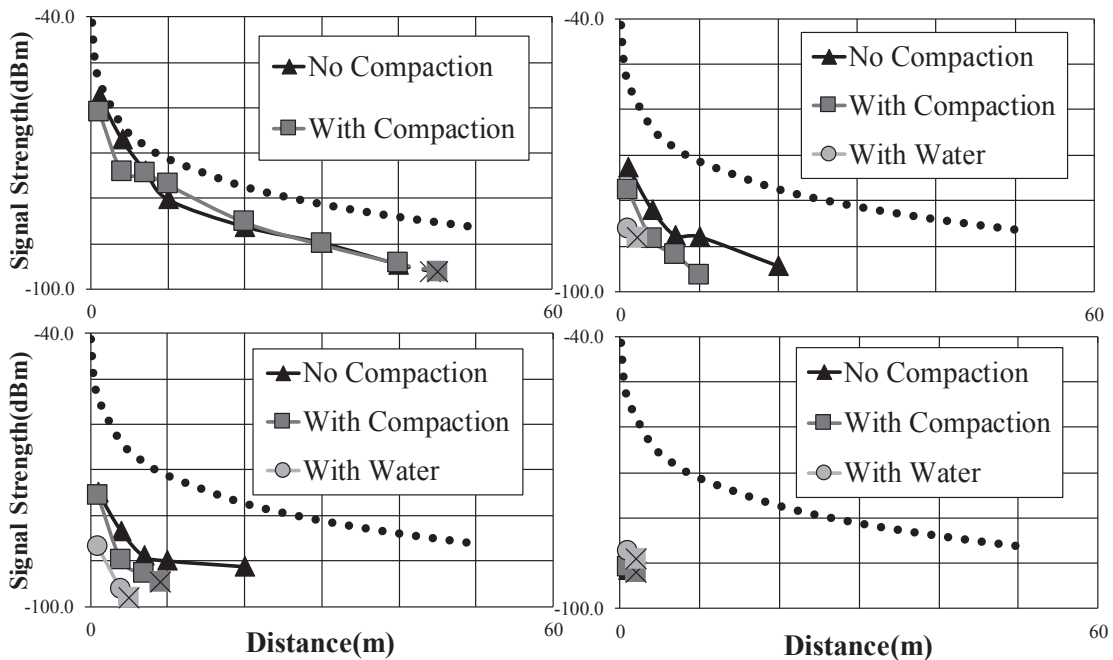


図-9 タイプ C の土砂埋没後の電波強度と距離の関係 (左上：砂利, 右上：真砂土, 左下：砂, 右下：培養土)

果と一貫性を持たせるためである。実際の距離が 1m の時はビーコンの計測距離は 1.7m, 10m の時は 14m, 40m の時は 49m と、距離が離れるにつれて誤差の絶対値も増加していることが分かる。

図-7 には高出力ビーコンの埋没前の電波強度と距離の関係を示している。タイプ A のビーコン同様、50m 程度まで電波は感知できており、距離が離れるにつれて電波強度は曲線を描きながら弱くなっていった。

雪崩ビーコンを土砂に埋没させた結果を図-8 に示しており、図中の点線は埋没前の実験結果である。砂利埋没時が最も遠くまで電波が届いていることや、高含水比

の土砂を用いた場合が最も電波が遮断されるという特性はタイプ A と同様であった。しかしながら、タイプ A ほどの減衰は見られず、元々 45m 程度まで届いていた電波は、どのケースにおいても 35m まで電波を受信できた。この違いとしては、雪崩ビーコンの電波はタイプ A よりも低い周波数であり、空気中での散乱が起きにくいと考えられる。

高出力ビーコンを埋没させた結果を図-9 に示しており、これまで同様図中の点線は埋没前の電波強度と距離の関係を表している。出力される電波が強力なため、埋没しても多くのケースでタイプ A の 2 倍程度まで電波の

表-2 実験に使用した土砂のデータ

土砂の種類	ケース1		ケース2		ケース3	
	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)
砂利	1.09	1.29	1.35	1.29	-	-
真砂土	1.06	15.51	1.64	15.51	2.07	22.18
砂	1.06	5.09	1.50	5.09	1.97	19.77
培養土	0.61	84.43	0.82	84.43	1.17	226.63

計測が可能である。特に砂利に埋没したケースでは、埋没前とほぼ同等の結果が得られている。しかし、培養土を用いた場合などの含水比が高いケースでは、タイプ A 同様電波は大きく減衰していることが確認できた。

以上の埋没実験から、電波を減衰させる要因として土砂の密度や含水比が影響していることが分かる。今回の埋没実験に使用した土砂のデータを表-2 に示すが、特に高含水比の土砂は電波を大きく遮断する性質を有することが確認できる。電波到達距離は、出力強度などのビーコンの性能にも依存するが、特に周波数の影響を大きく受けることが分かった。そして、雪崩ビーコンのように周波数が 457kHz と低いものであれば減衰は少なく、30m 以上離れた地点からでも電波の感知ができる

### 3. 斜面崩壊による埋没実験

#### 3.1 実験の概要と方法

東京の清瀬市にある労働安全衛生総合研究所にて、形成した斜面を実際に崩壊させ、マネキンを土砂に埋没させる実験が行われた。研究所の協力を得て、マネキンの衣服のズボンポケットにタイプ A のビーコンを入れた状態で埋没実験を行った。

本実験は本来、斜面崩壊によって我々の体にどういった土圧がかかるかを時間的な変化で観察することを目的としており、それと合わせて本研究の目的である、携帯したビーコンが埋没したときの電波強度の変化を計測したものである。従って、マネキンに土砂がかかるように斜面崩壊を起こし、マネキンが着用している衣服のポケットに入れたビーコンの電波が、どのように変化するかを斜面崩壊前後で計測する。この実験は、より災害現場に近い環境を想定した実験であると言える。

実験場所は労働安全衛生総合研究所内の実験棟である。図-10 のように関東ロームで角度 60°、高さ 2.5m の斜面を形成、その後、斜面下端から 1m 前方に厚さ約 20cm の L 型コンクリート擁壁を設置した。この擁壁の斜面側に、図-11 に示す通りマネキンをもたれるように座らせ、斜面が崩壊したときマネキンの顔付近まで土砂が被るような配置にする。

斜面を崩壊させる方法は 2 通りとし、1 つ目は、図-11 の状態で斜面の上部を直接 120t ショベルで崩し、人為的



図-10 関東ロームによる斜面



図-11 斜面の前方に設置した擁壁およびマネキン

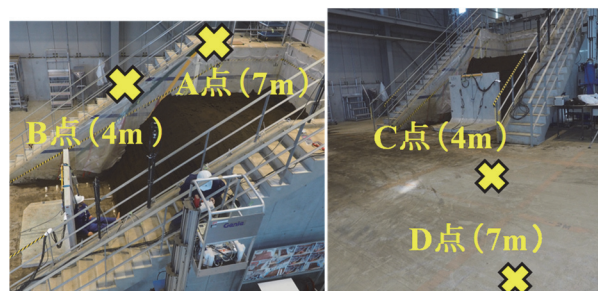


図-12 コンクリート擁壁を考慮した計測地点

な崩壊を起こす方法(以下ケース A)である。2 つ目は、斜面が自然崩壊するまで斜面上部に土砂を盛っていく方法(以下ケース B)であり、実際の斜面で起こる崩壊により近づけた方法であると言える。

各ケースの実験前後でビーコンから発せられる電波強度を比較した。計測する地点は衣服に入れたビーコンから直線距離 4m と 7m の地点とした。この時、設置したコンクリート擁壁によって電波に影響が出ることが考えられる。そのため、擁壁の影響を受けないと考えられる範囲で 7m 地点 (A 点) と 4m 地点 (B 点)、影響を受けると考えられる範囲で 4m 地点 (C 点) と 7m 地点 (D 点) の合計 4 点を計測地点とした。計測方法は今までと同様に、各計測地点で 10 秒ごとの計測を 3 分間継続し、平均したものをその計測地点の電波強度とする。両計測地点の場所を図-12 に示す。

また実験では、崩壊後の土砂の堆積厚を正確に得るために、斜面作成後擁壁を設置したとき、マネキンを設置したとき、盛土の崩壊後の 3 つの状態について、断面図をレーザー変位計による測距で作製した。

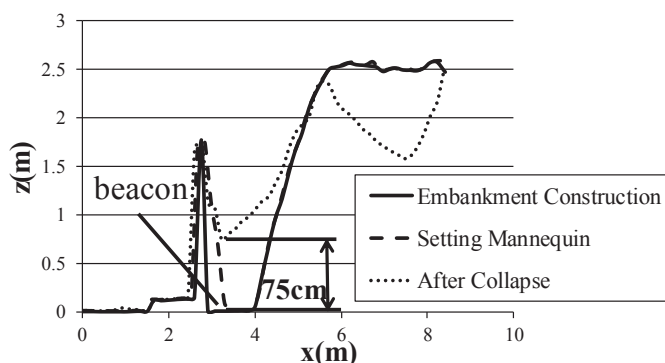


図-13 ケース A のマネキン埋没の様子および断面図

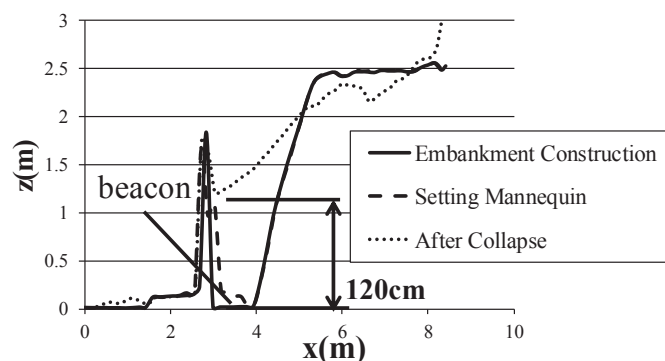


図-14 ケース B のマネキン埋没の様子および断面図

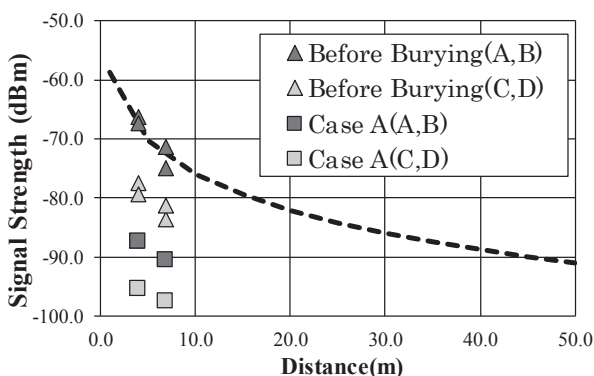


図-15 タイプ A を用いた斜面崩壊による埋没実験

### 3.2 埋没実験結果

各ケースの斜面崩壊の様子と断面図をそれぞれ図-13 および図-14 に示す。実線が盛土作製およびコンクリート擁壁設置後、破線がマネキン設置後、点線が斜面崩壊後の断面図である。また、各計測点における埋没前後の電波強度を図-15 示す。比較として、土砂に埋没していない状態の電波強度と距離の関係を破線で記している。

土砂に埋没される前の A 点と B 点の電波強度は点線付近に位置しており、衣服の影響を受けることなく、正確に電波強度の計測が行われていることが確認できる。斜面崩壊後は土砂によって大きく電波が減衰したが、関東ルームの場合は約 75cm 埋没しても 7m 離れた地点では電波を受信できることが分かった。

一方、C 点および D 点での電波は、コンクリート擁壁によるほぼ一定の減衰が確認できた。しかしながら、約

75cm 埋没かつコンクリート擁壁が存在しても 7m 離れている地点で電波を感知できることが分かった。

ケース B は斜面に土砂を盛っていき、自然崩壊させるというのが本来の方法であったが、追加で土砂を盛るのが困難になるほど土砂を盛っても崩壊することはなかったため、最終的には斜面を削って崩壊させた。人為的に崩壊させたとはいえ、ケース A よりも土砂量は大きく増加していたため、マネキンが完全に見えなくなるまで埋没した。埋没深さは最も低いところでも約 120cm であり、ビーコンの電波はどの計測地点でも届かなかった。崩壊後に、マネキンに近い点であれば電波を感知できると考えたが、携帯端末を可能な限り土砂の表面に近づけても受信できなかった。しかし、コンクリート擁壁を挟んだ直線距離約 2m の地点ではビーコンの電波を感知することができた。

いずれも、2 章で述べた各種条件下での埋没実験の結果と大きく異なる結果が得られた。コンテナ使用時と異なり、衣服とビーコンに多少の隙間が存在すること、使用したコンクリート擁壁には数カ所穴が開いている部分が存在すること、上方向よりも土砂量の影響量が少なくなる横方向を通り抜ける方が容易であったことなどがあり、より遠くまで電波が到達したと考えられる。

本実験においても、斜面崩壊によって実際にビーコンを所持したマネキンを埋没させることで、より災害現場に近い状況でのビーコンの活用性を検討することを目的とした。そのため、関東ルームの崩壊前後における間隙比や含水比などの、詳細な土砂データは計測していない。

#### 4. 結論

本研究では、災害時の要救助者発見の迅速化を目的とし、土質条件およびビーコンの性能を変化させながらタイプ A のビーコン、周波数の低い雪崩ビーコン、出力が強い高出力ビーコンの 3 種類のビーコンで、20cm の土砂埋没前後における電波強度の変化を観察した。また、より災害時の状況を再現した斜面崩壊による埋没実験も行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 本研究で使用したタイプ A および高出力ビーコンはともに 50m 以上離れても電波を感知することができた。
- (2) 条件の異なる土砂に埋没させた実験では、タイプ A は 20cm の埋没深さであっても大きく電波が減衰した。間隙の多い砂利でも 20m までしか電波は届かず、他の土砂を用いた場合は更なる減衰が確認できた。また、高含水比下では減衰が特に顕著であり、高出力の高出力ビーコンでも同様の結果が得られた。
- (3) 雪崩ビーコンの場合、減衰の特性は他のビーコンと同様であったが、低周波数を有しているため土砂による減衰は少なく、どのケースにおいても 35m 程度まで電波を受信できた。
- (4) 斜面崩壊によるマネキンの埋没実験では、ビーコンを衣服に入れたことによる電波の減衰は見られなかった。崩壊によって 75cm 程度土砂に埋没しても、7m 離れた点からビーコンの電波を感知することができた。1m 以上の埋没では計測地点での電波受信はできなかったが、場所を変えることで電波の感知が可能になることもあった。

今回行った埋没実験では、土質条件の違いによる電波強度の変化を観察したが、3 種類のビーコンすべてのケースで埋没深さは 20cm に固定して実験を行った。実際の災害現場では、要救助者が 20cm 以上埋没している可能性は非常に高いので、様々な深さにビーコンを埋没させ、深さ方向による電波強度の低減の挙動を明確にする必要がある。

また、土質条件の違いを検討するため、今回の実験では 4 種類の土砂を使用した。埋没に使用した土砂の平均粒径に関しては考慮していない。実験の結果から、含水比は電波の到達距離に影響を及ぼす因子の一つである

ことが判明したが、細粒分が多く間隙が少ない密な土砂は電波の遮蔽性が高いとも考えられる。そのため、土砂の基本的性質の一つである平均粒径と、電波強度の関係を評価することも求められる。特に雪崩ビーコンは、災害の現場において要救助者を発見することが最も期待できるため、率先して埋没実験を行うべきである。

#### 謝辞

労働安全衛生総合研究所の玉手聡氏、堀智仁氏および同研究所の方々に、斜面崩壊によるマネキンの埋没実験において本研究の実験に時間を割いていただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 内閣府：「平成 27 年度版 防災白書 土砂災害の発生状況の推移土砂災害発生件数」  
[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h27/honbun/3\\_b\\_6s\\_21\\_00.html](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h27/honbun/3_b_6s_21_00.html), (閲覧日：2017.9.27) .
- 2) 古樋 知重, 橋口 正哉, 大平 孝, 浅田 峯夫, 岡田 敏美：腕時計型マイクロ波ビーコンと携帯型電波到来方向探知機の雪中実験, 電子情報通信学会技術研究報告：信学技報, 102 巻, 51 号, pp.57-62, 2002.
- 3) 永井 智大, 鶴岡 行雄, 山口 弘純, 多田 好克：雪崩ビーコンに基づく被災者捜索システム, 電子情報通信学会技術研究報告, 111 巻, 384 号, pp.43-48, 2012.
- 4) 林田 洋一, 向後 雄二, 浅野 勇, 増川 晋, 田頭 秀和：低周波電磁波を用いたワイヤレス計測システム, 農業農村工学会誌, Vol.76, No.9, pp.801-804, 2008.
- 5) 松岡 和輝, 宮本 直輝, 岩藤 竜飛, 衣笠 哲也, 奈良高明, 吉田 浩治：ビーコンを搭載した移動ロボットによる被災者捜索の可能性検討, 中国四国支部総会・講演会 講演論文集, 2017.
- 6) 株式会社インタープロ：「Hibeacon ハイビーコン」  
<http://www.hibeacon.jp/>, (閲覧日：2017.1.12) .
- 7) JIS A 1210：2009. 突固めによる土の締固め試験.
- 8) 杉浦彰彦, 「ワイヤレスネットワークの基礎と応用」, CQ 出版社, 2003.

(2017 年 6 月 19 日 受付)

