# 人工海浜の空洞化調査と不陸の発生メカニズム

Underground Cave Detection and Generation Mechanism of Unevenness on Artificial Sandy Beach

中島謙二朗1・矢山貴司2・小野信幸3・野村茂宏4・伊東啓勝5

# Kenjiro NAKASHIMA, Takashi YAYAMA, Nobuyuki ONO, Shigehiro NOMURA and Yoshimasa ITO

Concerns on a safe use of an artificial sandy beach have increased in recent years. Unevenness which is often seen on the nourished sandy beach may induce a serious accident, and therefore checking the safety of the nourished beach in advance is important. In this study, field survey to detect underground caves on an artificial sandy beach has been carried out by using a ground-penetrating radar (GPR) system. Also, in the survey site, more than 10 of unevenness were formed just after a heavy rain in the rainy season of 2010. Therefore, the generation mechanism of unevenness has been investigated in detail from analyzing the locations and the underground structure where the unevenness formed. The result is that the unevenness had formed by that the nourished sand had fallen into a space between stones lying under the nourished sand. Also, the mechanism of unevenness generation has been reproduced successfully through a simple experiment.

#### 1. はじめに

海岸法の改正以来,海岸保全施設としての「砂浜」の 安全性の確保が重要となっている.特に,明石海岸での 陥没事故の事例(土木学会海岸工学委員会,2002)は, 人工海浜の安全性を確保することの重要性を示すもので ある.

本研究は、突堤、潜堤、及び養浜を組み合わせた面的 防護工法による人工海浜が造成されている別府港海岸餅 ヶ浜地区を対象に、人工海浜の安全性を点検する調査を おこなったものである.当海岸では、2010年2月の養浜 工事完了後から8月の供用開始までの期間のモニタリン グにより、養浜の後浜部分でしばしば不陸(ここでは、 規模の小さな陥没の意として用いる)の発生が認められ た.そのため、地中レーダ探査による砂浜の空洞化の有 無を点検する調査を実施した.

また,梅雨時の激しい降雨の直後に発生した不陸について,その発生状況と人工海浜の構造から,当海岸の不陸の発生メカニズムを検討した.

## 2. 地中探查

#### (1) 探查方法

地中レーダ探査は,道路や護岸等のコンクリート構造 物の空洞化調査や埋設管の調査によく用いられる調査法 である.砂浜での探査例としては,吉河ら(2006)が海 岸の地層を探査し,砂浜の堆積過程の調査に用いた例が

1	正会員		国土交通省 別府港湾・空港整備事務所
2			国土交通省 別府港湾・空港整備事務所
3	正会員	博 (工)	(株) エコー 調査・解析部
4	正会員	修(工)	(株)田中地質コンサルタント
5	正会員	修(工)	(株) エコー 調査・解析部



図-1 人工海浜の岸沖断面形状



図-2 地中レーダ探査状況

あるが,砂浜の空洞化調査に適用された例はほとんどない.その理由の一つとして,地中レーダ探査は電磁波を 利用した弾性波探査であり,電磁波は岩盤などではあま り減衰しないが,水を多く含んだ地盤では減衰が顕著と なり,海水が混じれば更に減衰が著しく可視出来なくな るためである.本調査では,事前の不陸の発生状況が養 浜の後浜部分であったことから,その部分から波の遡上 痕跡が認められる範囲を探査範囲と設定して調査を実施 した.

地中レーダ探査による空洞化調査は,2010 年 6 月 28 日~7 月 1 日に実施した.図-1 に調査対象の人工海浜の 断面形状(標準断面)を示す.地中探査の範囲は,図-1



図-3 人工海浜の標準断面と地中探査によるレーダ反応地点及び6月30日の不陸発生位置の断面投影図



図-4 探査結果と不陸発生位置の平面分布図

において,護岸と砂浜の境目より約40mの範囲を対象とし、0.5m間隔で汀線に平行な方向に測線(延長約280m)を配置した.養浜は,潜堤の背後に海底勾配1/15で造成されており、2段階の養浜がなされている.上層の養浜砂は中央粒径0.7mmの砂が層厚2mで投入されている.

地中レーダ探査機としては, 図-2 に示すような手押し 式の NOGGIN Smart Cart System を使用し, 養浜砂の層厚 が 2m であることから, レーダ波の周波数を 250MHz(可 視深度 2.5m) で探査を実施した.

#### (2) 探査結果

図-3と図-4に,探査結果を示す.図-3は全探査測線の レーダ反応が認められた地点を標準断面上に投影した結 果であり,図-4はその平面分布図である.レーダ反応地 点は,レーダの反射強度別に色分けして表示した.また, 図中には,後述する不陸についての発生位置と代表的な 不陸の写真も併せて示している.



図-5 レーダプロファイルの例

探査結果として得られるレーダプロファイルの例を図 -5 に示す.これは、図に示すような多重の双曲線パター ンが現れる場合、その最上段の双曲線の深度において、 砂層内に空隙や礫混入等の密度の変化があることを示す ものである.これらの異常反射については、レーダの反 射強度より判断し、強い反射、やや強い反射、及び弱い 反射の3段階に分けて整理した.強い反射ほど多重の双 曲線状の反射パターンが現れるため、空洞化している可 能性が高いと判断されるものである.

図-3と図-4に見られる異常反射の分布の特徴は、砂層 の下部に石積護岸がある部分に反応地点の多くが分布し、 その沖側では少なくなっている.

#### (3) 空洞化確認調査

レーダ探査による異常反射の検出結果は、その地点に 地盤の密度変化に及ぼす何かがあることを示すものであ り、レーダ探査のみではその要因を特定できない、その ため、レーダの反応地点において、図-6に示すように集 塵機に取り付けた内径 32mm の塩ビパイプにより地中に 孔をあけ、内部に小型カメラを挿入して空洞化の有無を 確認する調査をおこなった.削孔は,集塵機による吸引 カのみで掘削するものとし、その際の感触(削孔速度の 変化等)に留意した.なお、この方法による削孔は、外 壁が崩れていくこともなく、安定した孔を簡便に作成で きるため、砂浜の内部の観察に非常に有効であった.

図-7 に内部の観察結果の一例として、削孔内の写真、 探査時のレーダプロファイル及び内部の状況の模式図を 示す.反応深度付近の削孔内の外壁に小さな窪みが観察 され、その付近では削孔時の掘削速度がやや速くなった ことから、周辺より地盤が緩んでいたことが推定された.



#### a)集塵機による削孔

図-6 集塵機による削孔と小型カメラによる内部の撮影



図-7 削孔内部の状況

他の反応地点についても窪みの規模は図-7と同程度かそ れ以下の小規模なもの(100cm<sup>3</sup>以下)であり、明瞭な空 洞は存在しなかった.

#### 3. 不陸発生要因の検討

本調査の実施期間中,時間雨量 24.5mm という, 2010 年2月の養浜完成後,最大の降雨があった直後に,図-3 及び図-4の▽で示す位置に 12 箇所もの不陸が一度に発 生した. そこで,不陸の発生要因について検討した.

#### (1) 不陸の発生と降雨の関係

不陸の発生状況から、不陸発生には降雨が影響してい ると考えられたため、別府港海岸で2010年4月より週2 回の頻度で実施されている海岸巡視調査により確認され ている過去の不陸発生個数を整理し、雨量変動の時系列 について調べた結果を図-8に示す.一度に12箇所の不陸 が発生した6月30日の午前0時~午前9時までの累積雨 量は 52mm と多く,特に午前 7 時には時間雨量 24.5mm と2月以降の最高値であった.また、図より、2個以上の 不陸発生が確認される直前には、5mm/h 以上のある程度 まとまった降雨が生じており、不陸の発生と降雨の関連 性は非常に高いと推測される.

#### (2) 不陸の発生位置

不陸の発生位置と石積護岸の高さ及び潮位との位置関 係を整理した. 図-9に、不陸発生位置下部の石積護岸の



**図-8** 養浜完了後の不陸発生状況と降水量の関係(〇は2個) 以上の不陸が確認された場合)



図-9 不陸発生位置と埋設護岸の高さ、及び潮位・地下水位 との関係

高さランク別(20cm 刻み)の不陸発生個数と潮位の出現 確率を示したものである.また,図中の2つの破線は大 潮時と小潮時の日最高地下水位の平均値を示している. 地下水位は,対象海岸の後浜部分で2009年12月~2010 年1月の2か月間実施されたときの観測値である.

図より,不陸発生位置の特徴として,以下の事項があ げられる.

- ① 全ての不陸発生位置の下部には石積護岸が埋設され ており、その上部の砂層の厚さは0.7m以下であるこ とが多かった.
- 不陸の規模は、1 リットル程度の小規模なものから、 1.5m<sup>3</sup>もの大規模なものまで大きくばらついており、 砂層厚や護岸からの距離には無関係であった。
- ③ 全ての不陸は、+190cm(大潮時の地下水位の最高到 達点)より高い位置で生じており、日常的に地下水 位の影響が及ばない範囲である.
- ④ 日常的に地下水の影響が及ぶ+160cm(小潮時の地下 水位の最高到達点)より下部では、現在まで、不陸 の発生は認められていない。

以上のことから,対象海岸の不陸の発生位置は,護岸 と砂浜の境界付近で砂層下の埋設護岸の高さが H.W.L.よ り高い位置に集中しており,潮汐や波浪の影響を直接受 ける場所ではないことから,不陸の発生要因として,激 しい降雨により,護岸埋設部分の捨石間空隙に砂が落ち 込むことによると想定された.特に,日常的に地下水位 の影響が及ばない範囲は,養浜時に人工的な水締めによ り急速な砂の充填が行われため,捨石間への砂の充填が 不十分な箇所が残され,激しい降雨時の雨水の浸透によ り不陸が生じたものと考えられる.

#### (3) 不陸発生の再現実験

不陸の発生時期と発生位置に関する整理結果より,不 陸の発生と降雨の関連性が高いことが示唆された.また, 不陸の発生位置の下部には,石積護岸が埋設されており, 捨石間の空隙に砂が落ち込むことにより不陸が発生する と想定された.そこで,降雨による不陸発生のメカニズ ムを検討するために,石積み護岸の石間空洞に砂の流出 があるような状況を砂層の下部に穴がある場合と想定し, 不陸発生のモデル実験をおこなった.

図-10に、実験の設定状況を示す.実験は、長さ42cm, 幅15cm,深さ19cmのプラスチック製容器の底に¢3.5mm, ¢11mm, ¢21mmの3種類の大きさの穴を設けた.実験容 器内には、段ボール紙で仕切りを設け、一方には適度な 水分で締固めを行った湿潤土(細〜中粒砂,粒径 0.3mm 程度),もう一方には締固めをしない乾燥土の2種類を投 入した.穴の位置は、湿潤土の投入区画の下部にあり、 乾燥土の投入区画の下部には穴はない条件とした.これ は、締め固めしない乾燥土が降雨によって沈下等の変形







図-11 不陸形成の再現実験結果

が見られるかどうかを確認するための比較対象とするためである.このような条件設定のもとで、降雨として、 噴霧機により両区画の表面全体に水を一定時間一様に散水するものとした.

図-11 に実験の状況を示す. 降雨開始後 3 分 30 秒後に 底部の 3 か所の穴より砂の流出が始まり,4 分 50 秒後に は \$\phi1nm と \$\phi3.5mm の穴の 5~10cm 程度上方で空洞が発 生し,その空洞が上部へと発達していき,降雨開始後 6 分後には表層での不陸が生じた.その後降雨を継続する と,今度は \$\phi21nm 上で空洞が発達し,9 分 40 秒後には表 層に到達した.

空洞化の状況は、地表面での不陸の径より、内部に発



図-12 石積護岸近傍の探査測線のレーダプロファイル

達する空洞の径が大きく、空洞の発達は鉛直方向に卓越 していた.また、穴からの砂の流出が始まって内部空洞 が発生してから不陸発生までは短時間で一気に生じるこ とが確認された.実験では、 ¢21mmの穴よりも¢11mmの 穴の上の空洞化が早く発生したが、これは実験での散水 のムラや容器のたわみにより中央付近に浸透水が集まり やすかったためと考えられる.

本実験で形成された不陸の形状は、現地で見られた不 陸の特徴と非常によく類似しており、現地の不陸が本実 験と同様のメカニズム、即ち、激しい降雨により捨石間 の空隙に砂が流出することにより砂層内に空洞が生じ、 それが上部に発達して不陸に至るというプロセスで生じ たものと推測できる.一方で、実験で比較対象区として 設定した乾燥土の部分では、沈下等の砂層表面の変化は 全く認められず、砂層下部に砂が流出する空隙がない場 合は砂層内の空洞化が生じないことも確認された.

# 4. 地中レーダ探査結果と不陸発生位置

今回の不陸は、地中レーダ探査の実施期間中に発生し ており、不陸の一部は前日に探査を終了した地点が含ま れていた.しかし、不陸発生前日の探査結果では、砂層 内に異常な反射は認められなかった地点で不陸が発生し、 実際に不陸が生じた位置を予測することはできなかった.

その理由として、今回の不陸発生地点は石積護岸の埋 設範囲であり、被覆石の埋設部分のレーダプロファイル は、図-12に一例を示すように非常に乱れが多く、被覆石 間の空洞をレーダ探査で特定することは非常に困難であ ること,また,被覆石間の空隙への砂の流出は,実験で 確認されたように短時間で急速に生じることが要因とし て挙げられる.

また,不陸が発生した地点についても,2.(3)で述べた 空洞確認調査を実施したが,砂層の表面から被覆石に到 達する範囲には,明瞭な空洞は確認されなかった.これ は,不陸発生後にはその空洞が充填されたためと考えら れる.

従って,地中レーダ探査による砂浜の空洞化調査は, 現段階で,石積護岸の埋設部分のような反射が複雑な箇 所以外であれば,探査結果と簡易削孔による内部確認を 併用することにより検出が可能と考えられる.

# 5. 結論

本調査で得られた主要な結論は以下の通りである.

- 地中レーダ探査と削孔による内部の点検の併用により、砂層内の空洞化の有無を点検した.
- ② 別府港海岸餅ヶ浜地区における不陸の発生要因を分析し、激しい降雨による被覆石間への砂の流出がその主要因であることを明らかにし、簡単な実験により現地と類似した不陸発生状況を再現することができた。
- ③ 護岸埋設部分では、降雨時に不陸が急速に生じて砂 層の状態が変化することと、被覆石部分のレーダ反 応は乱れが多いため、探査結果から不陸発生を予測 するには至っていない。
- ④ 護岸埋設部分は対策の必要性が認められ、既に防砂 シートと被覆石の空隙部分をフィルター層化する対 策が実施されている.また、護岸埋設部分以外については、①の点検結果より深刻な空洞化は生じていないことが確認された.

## 参考文献

土木学会海岸工学委員会 (2002): 大蔵海岸 陥没事故調査報告 書, 125p.

吉河秀朗・村上文敏・根本謙次 (2006): 地中探査レーダーによる三保半島の地形発達過程,海岸工学論文集,第53巻, pp. 636-640..