人工干潟の安全性評価におけるMASWの適用性の検討

Applicability of MASW Technology to Safety Assessment of Artificial Intertidal Flats

渡部要一¹·佐々真志²·林 宏一³·山田耕一⁴

Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Koichi HAYASHI and Koichi YAMADA

Most of the artificial intertidal flats are filled with dredged clay and have a sand capping. Immediately after the construction, because the dredged clay has not consolidated, a safety assessment system is strongly required to avoid a person who is caught in a soft clay layer at a place where sand capping is significantly thin. The authors have applied MASW method to various types of intertidal flats, and confirmed that the MASW is very useful method to efficiently survey the stratigraphy of intertidal flats. In this study, the MASW was applied to three intertidal flats: an artificial flat which was immediately after the filling; an artificial flat which was about ten years after the filling; and a natural muddy flat which has deposited over many years. Through these investigations, it was confirmed that MASW technology is useful to evaluate the safety of artificial intertidal flats.

1. はじめに

干潟生態系の維持・再生は、河口・沿岸域の環境保全 において重要な要素であり、各地で人工干潟の造成が試 みられている.多くの人工干潟では、航路・泊地の浚渫 で発生した浚渫土砂が造成に使われ、表層に層厚0.5mほ どの覆砂が施される.このため、造成直後は圧密が進行 しておらず、覆砂層厚が十分に確保されていないと干潟 利用者が表層の覆砂を踏み抜いてしまう可能性もあり、 安全管理のための簡易な評価手法の開発が求められてい る.本稿では、人工干潟の安全性評価手法として多チャ ンネル型表面波探査(MASW)(Park ら, 1999; Hayashi・ Suzuki, 2004)の適用性を検討する.

2. 造成直後の干潟における調査内容

人工干潟として造成したばかりの徳山下松港人工干潟 (図-1)の土砂堆積構造を把握するため、2009年4月27~ 28日の干出時に図-2に示す測線A~FでMASWを実施し た.本論文では、岸沖方向の代表的な測線A,沿岸方向 の代表的な測線Cの結果を示す.徳山港における天文潮 位によると、調査期間中の最大潮位差は約3.2m、最低潮 位は0.0mであった.

ジオフォンと呼ばれる高感度の速度型地震計(上下動) 24個を1m間隔に取り付けたランドストリーマー(稲崎, 1998)を測線に沿って牽引し、4m移動する毎に,前方の 地盤表面をカケヤで鉛直に叩いて多数の周波数成分から

1	正会員	博(工)	(独)港湾空港技術研究所 地盤·構造部
2	正会員	博(工)	土質研究チームリーダー (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
3		博(工)	主任研究官 応用地質(株) 技術本部 技術研究所
4	正会員		五洋建設(株) 技術研究所

なるレーリー波を発生させ、ジオフォンで波形を記録した.記録された波形を逆解析することにより、せん断波 速度の測線に沿った断面分布(せん断波速度構造)を得



図-1 徳山下松港周辺と調査位置



図-2 徳山下松港人工干潟においてMASWを実施した調査測 線の位置

ることができる.測線に沿って水準測量も実施した.当 該干潟における調査状況を図-3に示す.

3. 造成直後の干潟における調査結果

MASWによって得られたせん断波速度構造を図-4に示 す.地盤表面の微地形は,水準測量結果を反映して描い てある.硬さや軟らかさの指標であるせん断剛性 G_0 は, $G_0 = \rho_t \times v_s^2$ によってせん断波速度 v_s と関係づけられるの で,せん断波速度の「高」「低」は,地盤剛性の「高」 「低」すなわち「硬」「軟」を表している.ここで, ρ_t は 土の湿潤密度である.以下では、岸沖方向と沿岸方向の 測線の代表としてそれぞれ測線Aと測線Cで得られたせ ん断波速度構造について議論する.

岸沖方向の測線Aの結果を見ると,海岸線近傍(距離 0m)では,標高-2mに現れているせん断波速度が200m/s 以上の硬い層は,距離15mで標高-8m以深に達しており, 急激に深くなっていることがわかる.また,人工干潟造 成前に存在していた砂斜面地盤はせん断波速度80m/s以 上の層に相当すると考えられるが,その表面は距離50m で標高-8mに達しており,当該地区の施工前の深浅測量 結果と整合する.沖に向かうほど内部が軟らかくなり, 距離100mよりも沖側ではせん断波速度30m/s以下と軟弱 であり,多くの場所で25m/s以下,ところによっては 20m/s以下と評価された.表層1m程度はせん断波速度が 40~50m/s程度となっており,覆砂層は内部よりも硬い ことがわかる. 沿岸方向の測線Cの結果を見ると、測線の始点(距離 0m)近傍は中仕切り堤の影響によりやや硬くなっており、 測線の終点(距離280m)付近では、海岸線に近づくため に測線Aの始点近傍と同様に急激に深くなる硬い層が捉 えられている.干潟内部に埋め立てられた浚渫土砂はせ



図-3 徳山下松港人工干潟におけるMASWの実施状況





N34°23'22"

図-5 尾道糸崎港人工干潟でMASWを実施した調査測線の位置



図-6 尾道糸崎港人工干潟におけるMASWの実施状況

ん断波速度が25~30m/sで均質かつきわめて軟弱である. MASWは、層厚0.5m以上に施工されたという覆砂の厚 さを厳密に評価できるほどの精度はないが、少なくとも 均質な厚さに施工されていることは確認できる.細かな 議論になるが、干潟表面には微地形が形成されており、 このうち凸な部分(バー)では、わずかではあるが凹な 周辺部分(トラフ)よりせん断波速度が高くなっている. これは、干出時に地下水位が下がる箇所ではサクション の発達に起因した圧縮変形の蓄積により土が密になって いくメカニズム(佐々・渡部, 2005; Sassa · Watabe, 2007) と整合する結果である.

0.5mの覆砂厚の下では、トラフのように水没した状態 であっても約5 kN/m²の圧密圧力が粘土層表面に作用す る.この状態で圧密が進めば、粘土層表面の非排水せん 断強さは5 × 0.25 = 1.25 kN/m²程度まで増加するものと 考えられる.ここで0.25は圧密圧力に対する非排水せん 断強さの比を表す強度増加率の典型的な値である. 覆砂 がなくても、足の面積0.09m²(正方形)の人の場合、計 算上5.14×1.2×1.25×0.09×1000/9.8=70 kgまでの 体重なら立てることになる.ここで、5.14は粘土の支持 力係数,1.2は基礎(足)を正方形と仮定した場合の形状



図-7 不知火干潟でMASWを実施した調査測線の位置



図-8 不知火干潟におけるMASWの実施状況

係数である. 覆砂厚が0.5mあれば, 応力分散によって足 の面積を0.5m²以上に換算できるので、同様の計算によ り体重400 kg程度までなら立てることになり、覆砂の効 果は非常に大きいことがわかる. 覆砂の土被り圧は小さ な圧密圧力であるが、時間の経過とともにある程度の深 さまで圧密が進行すれば、上述のような支持力が発現さ れるようになると期待できる.このことから、圧密の進 行程度をモニタリングすることは、覆砂厚を確認するこ とともに重要であるといえる.図-4に示したせん断波速 度構造では、せん断波速度が25m/s以下の非常に軟らか い状態にある粘土層まで捉えられており、圧密が排水境 界(粘土層表面)から進行して次第に強度が増し,硬く なっていく様子を十分にモニタリングできることが示唆 される.

4. 安全性評価手法へのMASWの適用性

造成直後の干潟との比較のために、造成からある程度 の時間が経過した人工干潟として尾道糸崎港人工干潟に おける調査結果、ならびに、長い年月を費やして堆積し た天然の泥質干潟として不知火干潟における調査結果も 取り上げることにする.

人工干潟の成功事例として知られる尾道糸崎港人工干 潟は, 1984~1996年に造成された.人工干潟造成前は, 潮間帯の岸沖方向の幅が40~150mの痩せた砂質干潟で あった.海岸線から150~300mの位置の海底を置換砂に より地盤改良して潜堤を構築し、もともとの干潟堆積土 砂と潜堤の間を厚さ0~4mの浚渫土砂で埋め、表層に 0.5mの覆砂を施した状態になっている。 浚渫土の埋立層 厚は徳山下松港人工干潟よりも薄いが、造成方法として はほぼ同様であり,尾道糸崎港人工干潟は,砂質地盤上 に浚渫粘土で造成された軟らかい地盤が載った二層構造 になっている.人工干潟造成により,特に干潟中央部付 近において、潮間帯の幅は著しく拡大した. 尾道糸崎港 人工干潟における調査測線を図-5に、また、調査状況を 図-6に示す、MASWによる調査は、大潮(潮位差約3.0m) に合わせ2005年8月3~5日の干出時に実施した.本論文 では干潟全体を網羅する沿岸方向測線A-A'の一部(距離 150~460m)と代表的な岸沖方向測線C-C'の結果を示す.

不知火干潟は、大野川河口に広がる広大な泥質干潟で あり、1960年代の不知火干拓の造成後、泥土が次第に厚 くなった. 潟スキーなどを用いなければ人が立ち入るこ とができないほどに軟弱な状態にある自然泥質干潟であ る. 不知火干潟における調査測線を図-7に, また, 調査 状況を図-8に示す. MASWによる調査は, 大潮(潮位差 約4.0m)に合わせ2005年8月18~20日の干出時に実施 した. 調査に当たっては, 干潟走行機(エンジンで大型 のパドルを駆動するボート)を利用した. 本論文では, 代表的な岸沖方向測線Bの一部(距離-20~285m)の結 果を示す.

尾道糸崎港人工干潟と不知火干潟において得られたせん断波速度構造については、渡部・佐々(2006)や Watabe・Sassa(2008)に詳しく示されているが、ここでは、徳山下松港人工干潟で得られた結果(図-4)と同様のせん断波速度の色づけに描き直し、図-9と図-10にそれぞれ示した.

尾道糸崎港人工干潟の結果を見ると,徳山下松港人工 干潟と同様の施工方法により造成されたにも拘わらず, 全体的に硬くなっている印象を受ける.これは,造成直 後には超軟弱な状態にあったと考えられる浚渫土砂にお



いて, 圧密が進行したために時間の経過とともに硬化し たとして説明することができる. なお, 表層覆砂の大部 分でせん断波速度が45~55m/sの範囲にあり、造成直後 から著しい変化はないものと考えられる. 一部にせん断 波速度が70m/sに達する箇所があるが、これは現地の状 況として砂州の位置に対応しており, 干出に伴いサクシ ョンの発達が繰り返され,弾塑性圧縮変形が蓄積されて 密になったとして説明される(佐々・渡部, 2005; 渡部・ 佐々, 2006; Sassa · Watabe, 2007; Watabe and Sassa, 2008). また,砂州のように凸地形となっている箇所で は内部よりも表層の方が硬く, 覆砂層の存在を識別でき るが、大部分は覆砂のせん断波速度と浚渫土砂のせん断 波速度が同程度になっていて, 覆砂層の存在を識別でき ない. なお、せん断波速度が35~40m/s程度の箇所があ るが、これは澪筋によって表層の覆砂が侵食された位置 に対応しており、表層でせん断波速度が45~55m/sとな る箇所には覆砂があることを間接的に確認できる.

不知火干潟の結果を見ると、人が立ち入れないほどに 超軟弱な泥質状態にあるにも拘わらず、内部の土砂の堆 積状況は、尾道糸崎港人工干潟よりもやや硬くなってい る.これは、長い時間をかけて堆積した自然干潟である ために、自重による圧密が進行していることを示唆して いる.一方、表層泥土は、覆砂がないため人が立ち入れ ないほど軟弱な状態にあるが、実際に干潟に静かに降り 立ってみると、大人のひざくらいまで潜ったところで静 的に立つことはできる.このことから、自然の泥質干潟 の表層の超軟弱な状態はMASWで捉えられていない可能 性もあるが、内部の状態は、実際の現地の状況と整合し ているものといえる.

以上から,徳山下松港人工干潟に見られるように,造 成直後の人工干潟内部の浚渫土砂は,自然干潟ではたと え泥質干潟であったとしてもあり得ないほどに超軟弱な 状態にあるものの,覆砂によって人が歩ける程度の表層 強度を発現していることがわかる.このため,表層の覆 砂が薄い箇所があった場合,そこを万一踏み抜いてしま うときわめて危険であるともいえる.しかしながら,尾 道糸崎港人工干潟のように,粘性土の圧密が十分に進行 すれば,人が踏み抜いてしまう危険性は小さくなる. MASWは,これらの干潟の状態をせん断波速度構造とし て十分な精度で捉えられており,安全性評価手法として 有用であるといえる.

5.まとめ

本稿では、人工干潟の安全性評価手法としてMASWの 適用性を検討した.その結果得られた主要な知見を以下 にまとめる.

- 1)人工干潟造成直後の干潟内部の浚渫土砂は、自然干 潟では、たとえ泥質干潟であったとしてもあり得ない ほどに超軟弱な状態にあるものの、表層の覆砂が均質 に施工されているために人が歩ける程度の表層強度を 発現している、表層の覆砂が薄い箇所があると、そこ を踏み抜いてしまう可能性があり、安全管理が重要で ある.
- 2)造成後に十分な時間が経過した人工干潟では、浚渫 土砂の圧密が進行して十分な強度が発現され、安全な 状態になっていることが確認できた。
- 3)人工干潟の安全性について,覆砂厚の均質性や内部 土砂の圧密の進行状況を調査する方法として,MASW は地盤表面から簡便かつ十分な精度で評価できること が確認できた.

徳山下松港人工干潟における今回の調査は、まさに造 成直後の状態を捉えたものであり、今後、圧密の進行や 粘土のシキソトロピーによって、経時的に次第に硬くな っていくものと期待される.今後の上述の地盤構造の変 化について、MASWによる調査・モニタリングを継続的 に実施していく予定である.

謝辞:現地調査の実施に当たっては、中国地方整備局な らびに九州地方整備局に多大なるご協力をいただいた. ここに記し感謝の意を表す.また、本研究の一部は科学 研究費補助金(基盤研究(B)課題番号20360216)を受 けて実施したものである.

参考文献

- 稲崎富士(1998):「ランドストリーマー」を用いた都市域での高分解能S波反射法探査,物理探査学会第98回学術講演会論文集,pp.114-117.
- 佐々真志・渡部要一(2005):砂質干潟の土砂環境場における サクション動態とその果たす役割.海岸工学論文集,第52 巻, pp. 981-985.
- 渡部要一・佐々真志(2006):干潟堆積構造の地球物理学的評価と形成要因 砂質・泥質・砂泥二層干潟 –,海岸工学論 文集,第53巻,pp.1236-1240.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004) : CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics, Vol. 35, pp. 7-13.
- Park, C.B., miller, R.D., Xia, J. (1999): multichannel analysis of surface waves, Geophysics, Vol. 64, No. 3, pp. 800-808.
- Sassa, S. and Watabe, Y. (2007) : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575
- Watabe, Y. and Sassa, S. (2008) : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation, Marine Geology, Vol. 252, pp. 79-88.