

## 6. 災害発生現場の地質

### 6. 1 当該現場の地質の変遷

倉敷市地域は近世以降さかんに干拓が行われた地域である。江戸時代から明治時代にかけて倉敷、玉島地域の干拓事業が進められ、陸域が急速に拡大していった。水島地域はその干拓地を流れていた東高梁川の河口部にあたる。この東高梁川が廃川となった旧河床が、昭和18年に飛行機工場建設のために埋め立てられたが、これがその後の広大な水島工業地帯に発展した埋立地の造成の始まりとなった（倉敷市コンビナート防災審議会・倉敷市消防局、1995）。

図6.1.1は水島地域の地形区分図である。同図中に示した赤線及び赤丸が当該工事であるトンネル（横坑）と発進到達立坑の位置である。発進到達立坑は、埋立地にあたる。

同図中には、埋立地の他、山地、沖積低地、干拓地の領域を記載している。山地は干拓が行われる前まで島であったことが分かっている。平野は沖積低地、干拓地、埋立地に区分できるが、沖積低地は干拓以前から陸地であった地形で、小規模な谷底平野と、海浜からなる。海浜の部分も小規模であるが、後浜の微高地が残っている。

干拓地はかつて干潟であった場所を、堤防によって海水を遮断して陸地化したものである。標高は0～1mと低い。干拓後から大正の河川改修までの間、東高梁川が連島から水島港へ流れていた。その流路付近には自然堤防による微高地が形成された。埋立地は工場建設を目的に太平洋戦争中から造成が始まった。浅海であった土地が盛土によって埋め立てられ、標高4mほどの陸地が形成されている。限られた地域ではあるが玉島では江戸時代の埋め立てによって造成された土地がある。

鈴木<sup>1)</sup>は、水島地域の地層を3層に区分している。砂層及び泥層（C及びD層）、砂及び泥層（B層）、礫層（洪積層）である。沖積層基底面は、砂及び泥層（B層）と礫層（洪積層）の境界である。図6.1.2(a)に沖積層基底の等深線図を示す。当該工事のトンネルは水深約23mの箇所を掘進することから、礫層（洪積層）に位置していたことがわかる。また、同図(b)に表層地質図を示しているが、表層は砂層であることがわかる。

さらに、同図(a)の地質断面図（CD間）を見ると、図6.1.3のようになり、点線で示した箇所が当該工事付近である。表層からの層順は、沖積層基底面までで①盛土、②砂層及び泥層、③砂及び泥層、④礫層となる。また、当該工事付近の海底地盤の層順は、①砂層及び泥層、②砂及び泥層、③礫層となる。

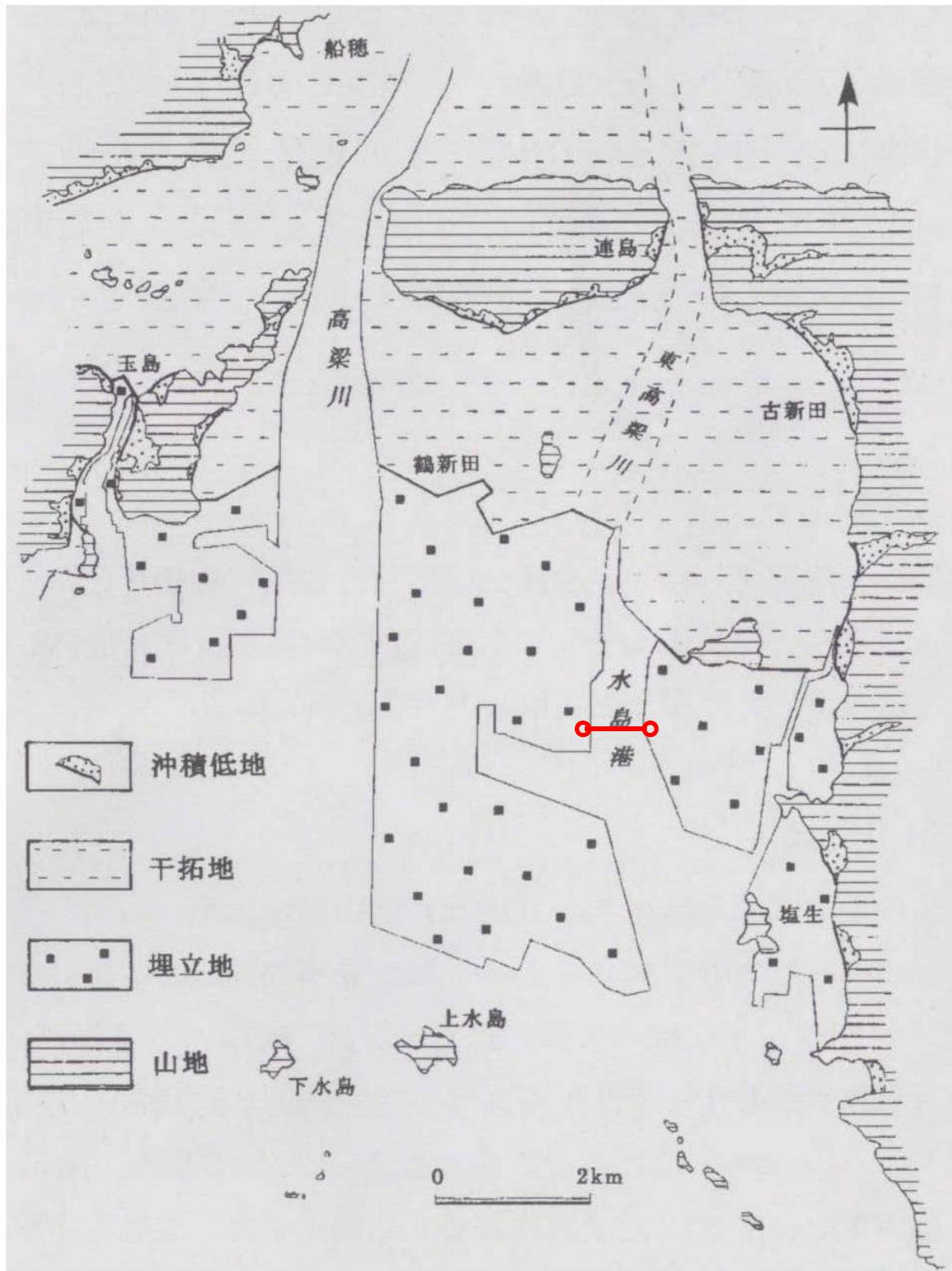
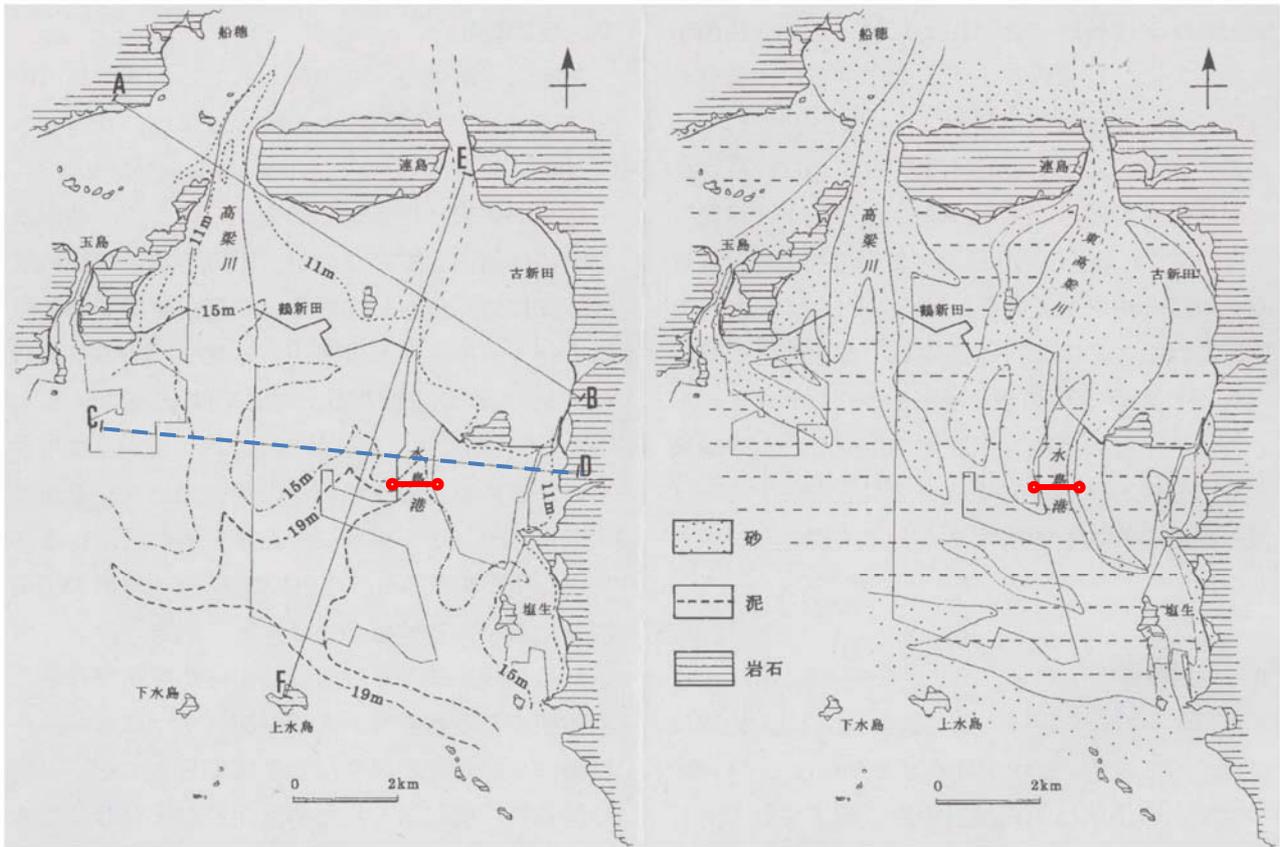


図 6.1.1 水島地域の地形区分図（鈴木茂之：倉敷市水島地域の沖積地盤地質，岡山大学地球科学報告書 2006 年第 13 巻第 1 号，2006.<sup>1)</sup>に一部加筆）（赤線は当該工事のトンネルの位置を示している。）



(a) 沖積層基底の等深線図

(b) 表層地質図

図 6.1.2 水島地域の沖積層基底の等深線図と表層地質図

(鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第 13 巻第 1 号, 2006.<sup>1)</sup>に一部加筆) (赤線は当該工事のトンネルの位置を示している。)

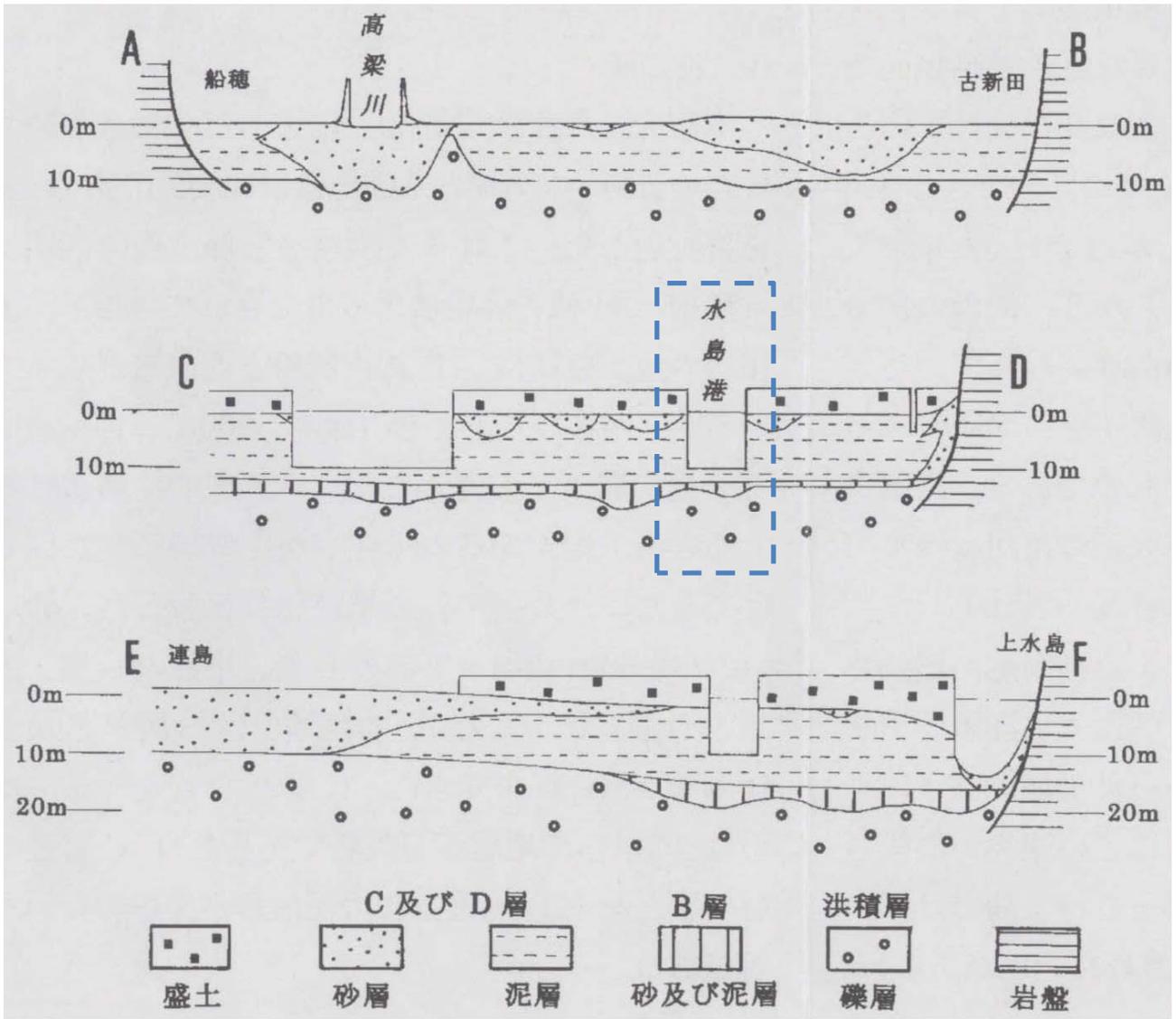


図 6.1.3 水島地域の沖積層の地質断面図

(鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第 13 巻第 1 号, 2006.<sup>1)</sup>に一部加筆) (青線は当該工事付近である。)

## 6. 2 海底地盤調査

海底トンネル事故周辺における海底地盤の地形及び地質（地層）の状態を把握するために船位測量、水深測量及び音波探査を実施した。また、海底地盤内の構造物（シールドマシン又はセグメント）と事故時に発生した海底地盤の陥没部の位置も確認した。

調査海域は、岡山県倉敷市水島港東部海域であり、a)から d)までの4点で囲まれる海域である。

- a) 緯度 34°29'59.2" 経度 133°44'36.5"
- b) 緯度 34°29'59.0" 経度 133°44'26.7"
- c) 緯度 34°30'08.1" 経度 133°44'26.2"
- d) 緯度 34°30'08.3" 経度 133°44'33.6"

調査内容を以下に示す。

- (1) 船位測量（音波探査と同時に実施）
- (2) 水深測量（音波探査と同時に実施）
- (3) 音波探査
  - a) 音源：ブーマー
  - b) 受信器：マルチチャンネル（4ch：チャンネル間隔 2.5m）

調査期間は、2012年3月17日～2012年3月18日である。

### 6. 2. 1 調査方法及び調査機器

本調査では、ブーマーを音源としたマルチチャンネル曳航式音波探査を実施した。調査状況の写真を図 6.2.1 に示すとともに、以下に、調査範囲、船位測量、水深測量及び音波探査について述べる。



図 6.2.1 調査状況

#### 6. 2. 1. 1 調査範囲

調査範囲を図 6.2.2 に示す。調査は、測線（ここでは「調査測線」という。）に沿って実施した。調査測線は、計 13 測線である。南北に NS-5 から NS+5 まで計 11 測線、東西に EW-1 と EW-0-2 の計 2 測線である。このうち、NS-0 は海底地盤の陥没部上を通ることを意図した南北の測線であり、EW-0-2 は海底シールドトンネルの頂部上を通ることを意図した東西の測線である。

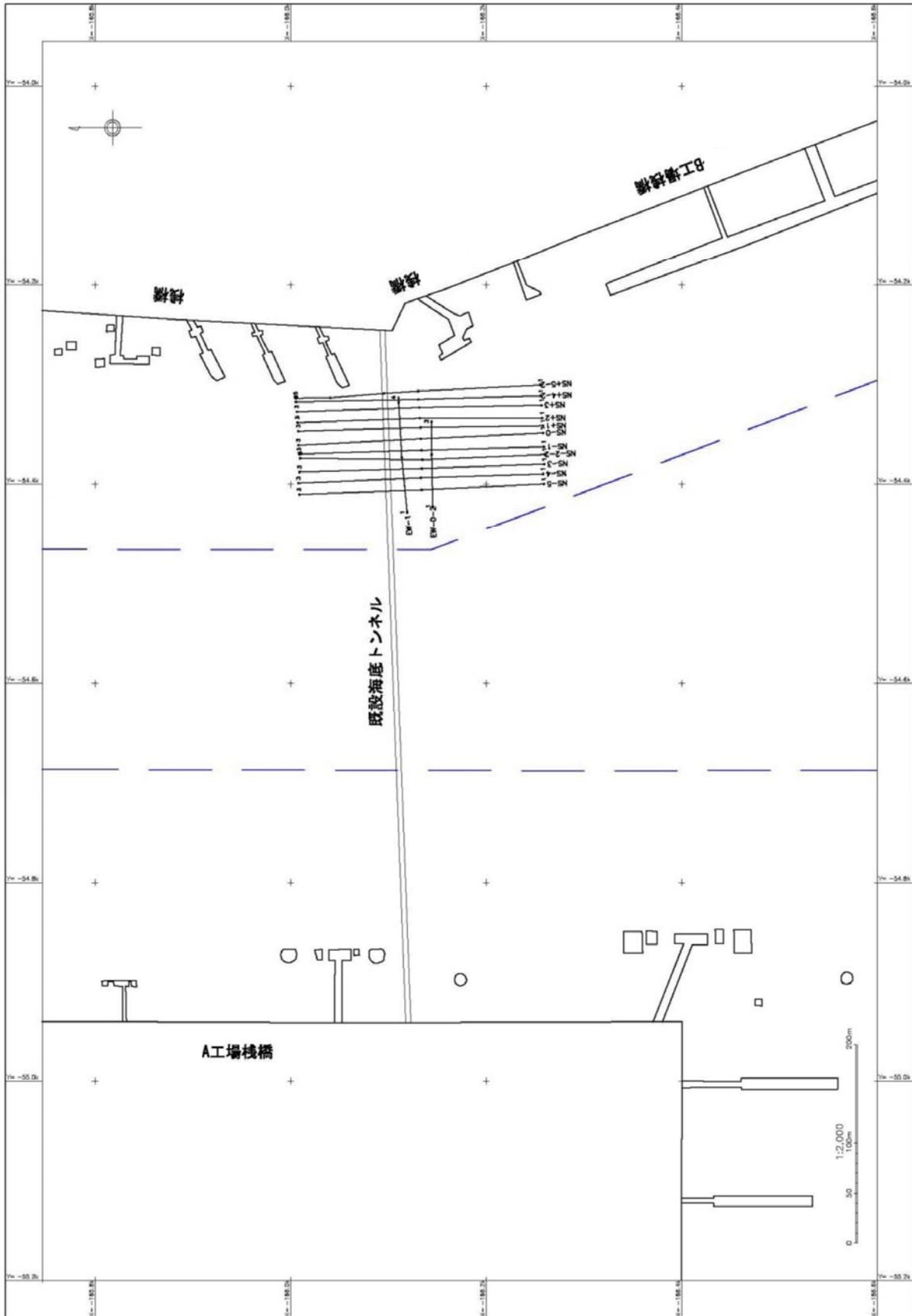


図 6.2.2 調査範囲

## 6. 2. 1. 2 船位測量

船位測量とは、船の現在の位置を平面直角座標第 5 系（世界測地系）により計測することをいう。船位測量は衛星測位法的一种である GPS（Global Positioning System）により行い、測定精度を上げるために海上保安庁のビーコン補正情報を使用したディファレンシャル方式 GPS（Differential GPS; DGPS）を適用した。

以下、測定方法及び DGPS 装置について述べる。

### （1）測定方法

GPS は、多数の人工衛星から発信される時刻信号から、各衛星と受信機との距離を求めて受信機の位置を測定する方法である。この方式は、通常の実験機の使用方法では±10m 程度の測位誤差を伴うのが一般的である。このため、正確な位置座標が求められている陸上基地局に GPS を設置し、陸上基地局の位置座標と GPS 測位による位置座標との比較を行い、この情報を常時移動局（調査船）に提供し補正することにより、移動局の測位精度向上を図る。

本調査では、海上保安庁が放送している DGPS 用の補正情報（ビーコン）を陸上基地局からの情報として利用した。

### （2）DGPS 装置

調査に使用した DGPS 受信装置は、DGPS 受信機（ビーコン一体型）、アンテナ及び誘導用パソコンで構成されている。装置の配置は、アンテナを調査船の上空が開けた場所に取り付け、その他の装置を操舵室に設置する。

調査船の船位データは時刻、X、Y 座標（平面直角座標系第 5 系[世界測地系]）、移動速度（船速）などからなり、船上の誘導用パソコンで処理され、調査船の誘導及びマルチチャンネル音波探査の発振制御に使用される。また、船位データは、船上の誘導用パソコンのハードディスクに 1 秒ごとに保存される。

DGPS の規格・性能を表 6.2.1 に、測定概念図を図 6.2.3 に、その構成図を図 6.2.4 にそれぞれ示す。

表 6.2.1 DGPS の規格・性能

名称	規格・性能
DGPS 受信機 ・アンテナ (一体型)	Trimble EVEREST マルチパス低減技術 DGPS : 12ch L1 帯アンテナ ビーコン用 2ch 及び SBAS 精度 : 約 1m (ディファレンシャルモード)
誘導用パソコン	CPU : 1.50 GHz メモリ : 1GB HDD : 80GB
DGPS ビーコン局	位置 : 北緯 34° 05' 24" 東経 132° 59' 29" 送信周波数 : 321 kHz データ送信レート : 200bps
イベント コントローラ (発振制御器)	出力 : リレー接点 チャンネル数 : 4ch

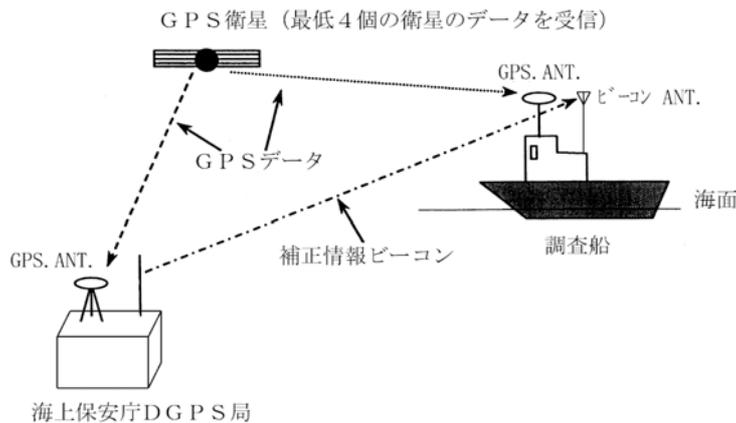


図 6.2.3 DGPS による船位測量の概念図

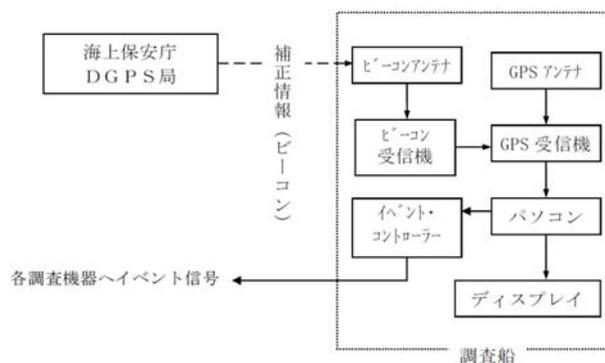


図 6.2.4 DGPS の構成図

### 6. 2. 1. 3 水深測量

水深測量とは、水深を計測することである。本水深測量は、音響測深法により音響測深機（千本電気社製：PDR-1300）を使用して実施した。以下、水深測量の方法及び音響測深機について述べる。

#### （1）水深測量の方法

水深測量は、音響測深機の本体を調査船の観測室に、超音波の送受波器を調査船の舷側に設置して行う。音響測深機は送受波器から超音波を発信し、海底面で反射して戻ってくる超音波を送受波器で受信する。受信された超音波は電気信号に変換され、発信してから戻ってくるまでの往復時間に対応した海底面の起伏を記録紙上に連続的に描く。

音波の水中伝播速度は海水の温度、塩分濃度などに応じて変化するので、実際的水深は、バーチェックによる実測水深と音響測深機が示す水深目盛との差によって補正される。本調査で行った補正は、 $-1.0\%$ である。

#### （2）音響測深機

本調査で使用した音響測深機は、記録部とケーブルで接続された送受波器とで構成され、このうち記録部は記録器と制御回路の機能を備えている。音響測深機の動作原理は次のとおりである。制御回路から送受信部の送信側に音波発生同期信号が送られると、所定の周波数の持続時間を持つパルス波が発生する。このパルス波が送受波器の送信側で電気エネルギーから超音波に変換され、水中へ発信される。水中を伝播し海底面で反射して戻ってきた超音波は、送受波器の受信側で受波され、再び電気エネルギー（信号）に変換される。この信号は送受信部を通り、連続した海底面として記録器の記録紙上に表示される。

なお、本調査では深レンジを使用し、吃水は調査全体を通して  $0.8\text{m}$ 、紙送りは  $40\text{mm}/\text{分}$  とした。本調査で使用した音響測深機の規格・性能及び構成図は、それぞれ表 6.2.2 及び図 6.2.5 のとおりである。

表 6.2.2 音響測深機の規格・性能

名称	規格・性能
記録器	最大可測深度：浅=125m、深=250m 精度： $\pm(0.03+\text{水深} \times 1/1000)\text{m}$ シフト：浅=15m、深=30m×8段 記録縮尺：浅=1/100、深=1/200 発信回数：浅=5回/秒、深=2.5回/秒 紙送り：40, 60, 80, 120mm/分 *デジタル出力有り
送受波器	周波数：200 kHz 指向角：半減全角 6°

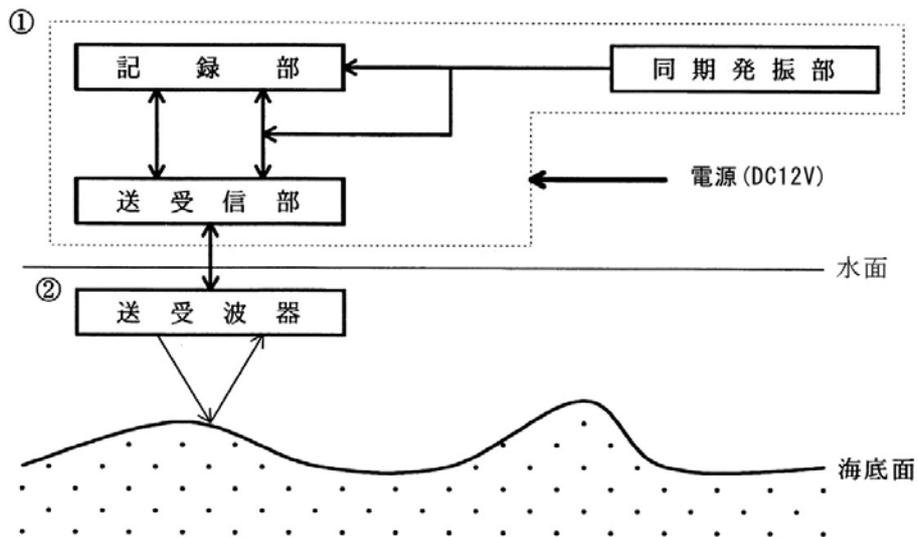


図 6.2.5 音響測深機の構成図

#### 6. 2. 1. 4 音波探査

音波探査とは、音波を利用して海底面、海底面下の地層、構造物の有無等を探査することをいう。本音波探査は、ブーマーを音源とするマルチチャンネル音波探査により実施した。

マルチチャンネル音波探査は、図 6.2.6 のように 1 つの音源から発振され海底下から反射してくる音波を多チャンネルの受波器（ストリーマケーブル）を利用して受信し、チャンネルごとにデジタル化（量子化）して収録パソコンに保存する。収録されたデータはコンピュータにより、S/N 比（Signal to Noise ratio）の向上をはじめとする、様々なデータ処理を行うことにより、高精度、高分解能のアナログ記録断面に変換される。

以下、探査方法及び装置の概要について述べる。

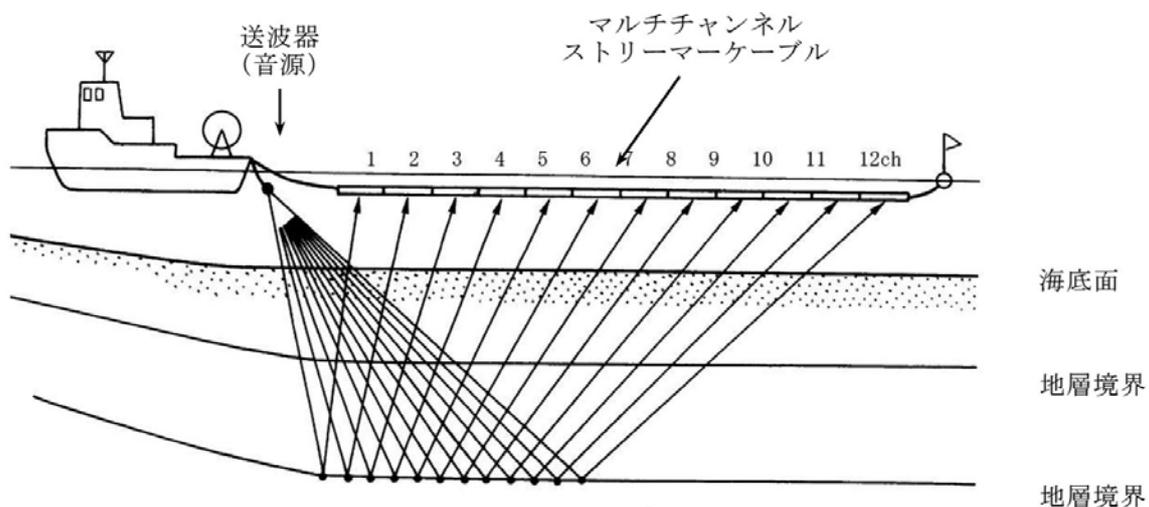


図 6.2.6 マルチチャンネル曳航式音波探査の概念図

##### (1) 探査方法

調査は、音波探査装置の本体を調査船に設置し、それに連結する送波器及び受波器は船尾から所定の距離及び深度で曳航して行う。調査船は速度を約 3~4 ノット (1.5~2.1 m/sec) に保ち、所定の間隔で音波を発振し、音波が海底面、地層境界などで反射して戻ってくる場所を受波器で捕捉しながら調査測線上を航行する。多成分の受波器で捕捉された音波は、デジタル変換器 (LX-110) によりチャンネルごとにアナログ信号がデジタル信号に変換され、パソコンのハードディスクに所定のフォーマット (TAFFmat) で収録される。

調査時の品質管理は、最も音源に近いニア・チャンネル (1ch) をアナログ記録断面図としてモニターに表示するとともに、全トレースの信号波形を収録パソコンのモニター画面上に表示させて行った。

なお、デジタル・マルチチャンネル方式は、共通反射点 (CMP) 重合を基本とするために、船位及び発振間隔の精度が重要な要素となり、調査船の直線誘導及び等間隔での発振は、誘導用のパソコン画面に表示される船位・船速を基にして、インターバルタイマーに

よって制御した。表 6.2.3 に船速、発振間隔、探査深度の対応表を示す。水面からの探査深度の算出に当たっては、音速を 1500m/sec と仮定しており、発振点からの音波は地層境界等に反射して受信点にて受波されるまで往復の距離を伝播するため、探査深度はその半分となる。

本調査の観測条件は 2012 年 3 月 17 日に実施したテスト走航の結果により決定し、その一覧表及び概略図は、表 6.2.4 及び図 6.2.7 にそれぞれ示すとおりである。発振間隔は、水深が十数 m であること、モニター記録での反射記録の見え方等を考慮し 0.625m とした。取得データ長は、次の発振までであるので調査時の船速によって可変であるが、データを SEG-Y (ファイル形式) 変換する際、0.2sec (探査深度約 150m) で固定した。測点間隔は、125m (約 200 ショット) とした。

表 6.2.3 船速、発振間隔、探査深度の対応表

船速		0.625m 毎発振 発振間隔 sec	音速 1500m/sec 探査深度 m
ノット	m/sec		
3.0	1.54	0.40	304
3.1	1.59	0.39	294
3.2	1.65	0.38	285
3.3	1.70	0.37	276
3.4	1.75	0.36	268
3.5	1.80	0.35	260
3.6	1.85	0.34	253
3.7	1.90	0.33	246
3.8	1.95	0.32	240
3.9	2.01	0.31	234
4.0	2.06	0.30	228

表 6.2.4 観測条件一覧表

調査方式		ブーマー方式
送波部	送波器 (音源)	ブーマー 電磁誘導振動素子 1 個 送信電圧 : 3.55 kV
	発振エネルギー	150 J
	送波器の深度	0.3 m
	発振間隔	約 0.625 m
受波器	受波器の型及び素子数	圧電型振動素子 5 素子/ch
	チャンネル数	4 ch
	チャンネル間隔	2.5 m
	受波器の深度	0.5 m
デジタル記録	収録時間	次の発振まで。 SEG-Y (ファイル形式) 変換時に 0.2 sec でカット。
	A/D 変換 (量子化)	24 bit
	サンプリング周波数	10,000 Hz
モニター記録	受信周波数	1,000 ~ 2,000 Hz
	記録掃引時間	0.1 sec
	記録深度範囲	約 75m
	記録方式	感熱紙
	記録密度	100 Line/inch
	有効記録幅	254 mm (10 inch)
測点間隔	125 m (約 200 ショット毎)	
船速	3 ~ 4 ノット (= 1.54 ~ 2.06 m/sec)	

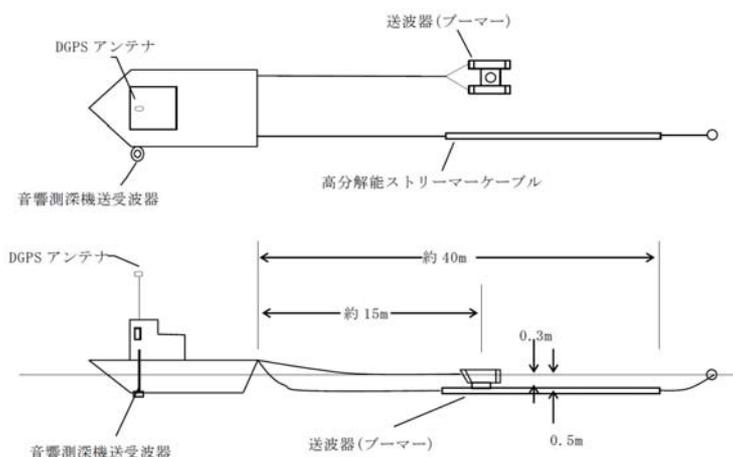


図 6.2.7 ブーマー方式マルチチャンネル音波探査の概略図

## (2) 装置の概要

探査装置は、主に発振部、受信部及び記録部で構成されている。本調査で採用した探査装置の規格・性能を表 6.2.5 に示す。また、装置の構成を図 6.2.8 に示す。装置の作動機構の概要を以下に述べる。

### (a) 発振部

本調査で使用した送波器（音源）は、ブーマーである。

ブーマーは電磁誘導振動式の送波器で、平面上のコイルに電流を一瞬流し、これに近接して配置されている非磁性銅製円盤の反発作用により音波を発生させる装置である。

### (b) 受信部

送波器（音源）から発振された音波は、海底面、地層境界面などで反射し、再び海面付近に戻ってきたところを受波器（ストリーマーケーブル）で捕捉される。

ストリーマーケーブルの構成は、調査船側からストリーマーケーブルを水中に沈める比重の大きいトーイングリーダー、音波を受波するアクティブセクション、ケーブル末端コネクタの防水を兼ねるケーブルエンドセクション及び安全航行のためのロープとテールブイである。

ストリーマーケーブルで捕捉された反射波は、船上にある増幅器を経て、アナログ信号とデジタル信号に分けて記録部で収録される。

### (c) 記録部

記録部はデジタル変換器、収録パソコン、アナログ用受信器、モニター記録機等で構成されている。

デジタル信号は変換器を通して、入力した反射信号に増幅、エリアスフィルタ、A/D 変換などを施し、収録パソコンへ保存される。保存されたデータはデジタル変換器の所定のフォーマット (TAFMat) で収録されるため、調査終了後、SEG-Y フォーマット (米国物理探査学会[SEG]のフォーマットの 1 つ) に変換し、再度ハードディスク、DVD-R 等に保存される。

アナログ信号はアナログ用受信機を通して、入力した反射信号に増幅、フィルター等を施し、モニター記録機に出力される。

表 6.2.5 音波探査装置の規格・性能

	名称	規格・性能
発振部	送信機	方式：電磁誘導方式 送振出力：50~350 J (50 J 毎に調整可能) 高圧直流電圧：2.5~3.9 kV コンデンサー容量：48 $\mu$ F 高圧開閉回路：SCR 使用電源：AC 200-240 V, 45-65 Hz 消費電源：平均 2.0 kVA
	送波器	方式：圧電磁誘導モノパルス方式 送信出力：最大 300 ジュール
受信部	ストリーマ ケーブル	チャンネル数：4 ch チャンネル間隔：2.5 m 素子数：5 素子 (GeoSpace MP-18-200) 感度：42 volt/bar
	増幅器 (プリアンプ)	
デジタル 記録部	デジタル 変換器	量子化：16 or 24 bit 入力チャンネル：32ch サンプリング周波数：1.5 kHz ~ 96 kHz
	収録パソコン	CPU：3 GHz メモリ：4 GB HDD：500 GB 書き込みメディア：DVD-RAM
モニター 記録部	受信機	利得：100dB フィルター：20 ~ 15000 Hz (バンドパス) TVG：可 AGC：可
	記録機	記録レンジ：1/32 ~ 8 sec 記録幅：12.7 cm or 25.4 cm 記録方式：感熱方式 記録密度：75, 100, 150, 200 本/inch

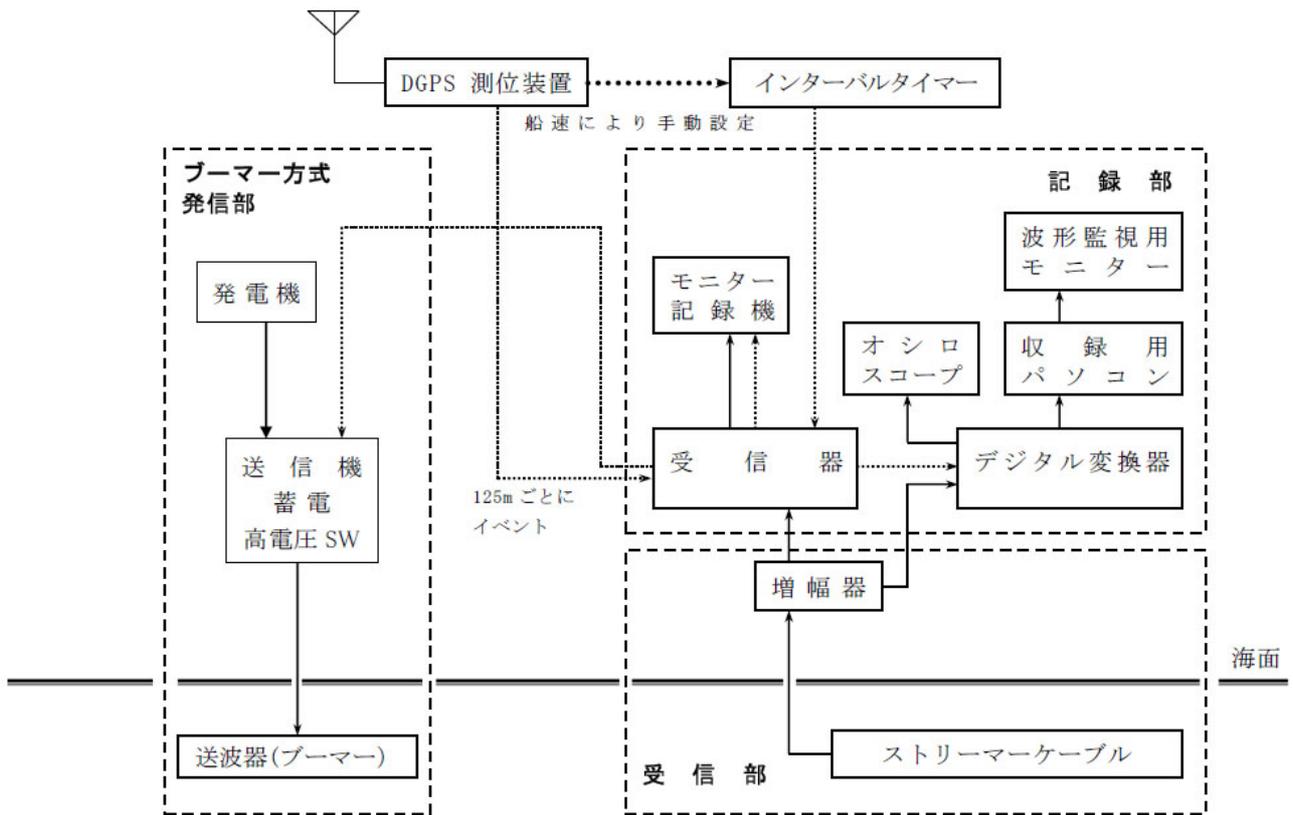


図 6.2.8 ブーマー方式マルチチャンネル音波探査の構成

### (3) 計測されたデータの解析

#### (a) 計測されたデータの概要

本調査で取得されたデータは、船位測量データ（デジタル）、測深データ（デジタル・アナログ）及び音波探査データ（デジタル・アナログ）である。これらのうち、船位測量データ及び測深データのデジタルデータは、調査測線の開始から終了まで1秒毎に収録されている。

船位測量データは、平面直角座標系第5系（世界測地系）のXY座標であり、測深データは、基本水準面（CDL）から海底面までの水深である。基本水準面（CDL）とは、潮位の基準面の1つで、その地点の平均水面から主要四分潮の半潮差の和だけ差引いた高さの仮定の面であり、水深を表す基準として港湾ごとに運輸省令によって定められている。

音波探査データにおいて、発振点（ブーマー）と受信点（ブーマーに最も近いストリーマケーブル内の1ch）の船位測量が重要になる。図6.2.9に調査機器設置図を示す。同図のGPSの位置から26.2m後方に発振点と受信点の中間点（CDPポイント）がある。各測線において125m毎の中間点（CDPポイント）のXY座標を表6.2.6に示す。また、図6.2.2に示した調査測線図の各測線は表6.2.6のXY座標を基に描かれたものである。図6.2.2にも測点1、2、3（測線EW-1については測点4まで、測線NS+5-2については測点5まで）をプロットしている。また、図6.2.9に示すPDR-1300が音響測深機の位置である。

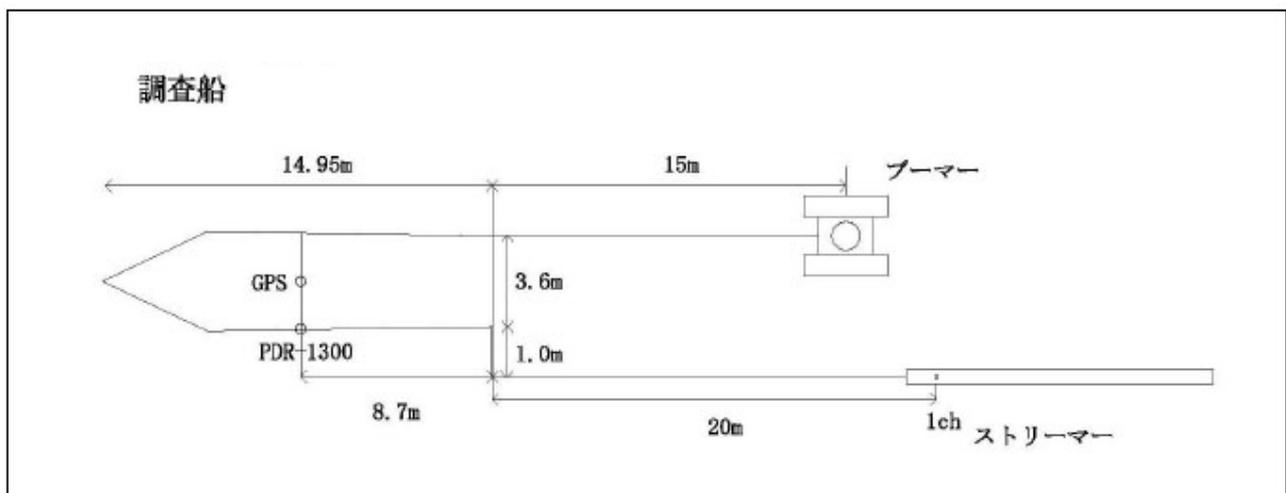


図 6.2.9 調査機器設置図

表 6.2.6 各測線における 125m 毎の発振点（ブーマー）と受信点（1ch）の中間点の XY 座標（世界測地系、平面直角座標第 5 系）

測点 測線	1		2		3		4		5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
EW-0- 2	- 166145.44	- 54422.21	- 166144.31	- 54370.19	- 166144.17	- 54337.18	-	-	-	-
EW-1	- 166119.16	- 54428.15	- 166113.76	- 54373.01	- 166110.51	- 54317.79	- 166110.40	- 54313.32	-	-
NS-5	- 166259.10	- 54399.68	- 166134.07	- 54405.50	- 166008.92	- 54410.16	-	-	-	-
NS-4	- 166258.20	- 54389.51	- 166133.18	- 54393.43	- 166008.09	- 54398.76	-	-	-	-
NS-3	- 166259.43	- 54379.68	- 166134.39	- 54384.14	- 166009.18	- 54387.58	-	-	-	-
NS-2-2	- 166259.79	- 54370.03	- 166134.87	- 54375.22	- 166009.73	- 54373.84	-	-	-	-
NS-1	- 166259.11	- 54362.27	- 166133.84	- 54365.74	- 166008.89	- 54369.57	-	-	-	-
NS-0	- 166258.08	- 54348.49	- 166133.08	- 54354.34	- 166007.96	- 54360.78	-	-	-	-
NS+1	- 166258.02	- 54341.19	- 166132.94	- 54343.00	- 166007.79	- 54346.63	-	-	-	-
NS+2	- 166257.33	- 54333.37	- 166132.12	- 54333.56	- 166007.05	- 54338.06	-	-	-	-
NS+3	- 166256.68	- 54320.63	- 166131.62	- 54322.99	- 166006.49	- 54327.18	-	-	-	-
NS+4-2	- 166255.83	- 54311.13	- 166130.61	- 54314.78	- 166005.41	- 54317.30	-	-	-	-
NS+5-2	- 166255.52	- 54300.28	- 166130.52	- 54306.50	- 166095.47	- 54308.77	- 166040.59	- 54313.16	- 166005.33	- 54313.49

(b) 音波探査記録の波形データ処理及び解析断面図の作成

観測で得られたブーマー音波探査記録は、記録紙を媒体としたアナログ記録（モニター記録）及び電子媒体（パソコンのハードディスク等に収録）のデジタル記録である。デジタル記録は電子媒体のままでは解析できないため、データ処理を行いアナログ記録に変換する必要がある。データ処理の方法については、朝倉(1982)<sup>2)</sup>が詳しい。地質構造解析に使用する記録（解析断面図）は、データ処理により変換されたアナログ記録断面図（処理記録断面図）である。

適用したデータ処理のフローチャート及びパラメータを図 6.2.10 に示す。



処理項目	パラメータ
[1] 書式変換	
[2] ジオメトリの設定	
[3] トレース編集	
[4] 振幅回復	
[5] フィルタ	Low-cut : 300 Hz
[6] ソースウェーブレット デコンボリューション	Gap length : 0.6 ms Operator length : 25.6 ms
[7] 共通反射点ギャザー	
[8] 速度解析	
[9] NMO 補正	
[10] CMP 重合	
[11] 水深補正	
[12] マルチチャンネル デコンボリューション	Gap length : 0.4 ms Operator length : 6.4 ms
[12] マルチチャンネル デコンボリューション	Gap length : 1.6 ms Operator length : 25.5 ms
[13] 帯域通過フィルタ	500 ~ 2000 Hz
[14] 記録断面図の表示	水平縮尺 : 16 Trace/cm 鉛直縮尺 : 300 cm/sec (1:250)

図 6.2.10 データ処理のフローチャートとパラメータ

## 6. 2. 2 調査結果

調査結果は6. 2. 2. 1海底地盤の地形、6. 2. 2. 2海底地盤の地質（地層）、6. 2. 2. 3トンネルの設計計画座標と音波探査結果の比較に分類し、それぞれについて以下に示す。

### 6. 2. 2. 1 海底地盤の地形（船位測量及び水深測量の結果）

水深測量によって得られた海底地形図を図 6.2.11 に示す。海底地形は、0.5m ごとの等深線で表示している。また、色が濃くなるほど、水深が深いことを示している。なお、基本水準面（CDL）からの水深に統一している。このために 10 分ごとの潮高を岡山県の管理する水島港の検潮所から入手し使用している。さらに、各測線と測点もプロットしている。

調査海域は、N 栈橋の北側ドルフィン前面から西側に 100m、南北方向に 200m の範囲で、水深は概ね 10.5m から 13.0m と全般に平坦な海域である。

同図において、測線 EW-0-2 と測線 NS-0 が交差するあたりに当該事故によって出来たと思われるほぼ円形の陥没部（直径約 16m、海底面からの深さ約 3.8m）が認められる。陥没部は、周囲から崩れ落ちた土砂、浮泥等が堆積し、事故発生直後より浅くなっている可能性もある。

また、調査海域北側の海底地形は、第 6 号栈橋（8 号、9 号バース）に出入港する船舶によると思われる地形の凹凸（比高約 2.0m）が見られる。すなわち、出入港する船舶のスクリューによって、航路上は海底面が侵食され、航路の間は巻き上げられた土砂が堆積している。この傾向は栈橋近くで顕著であり、沖に向かって凹凸は小さくなる。

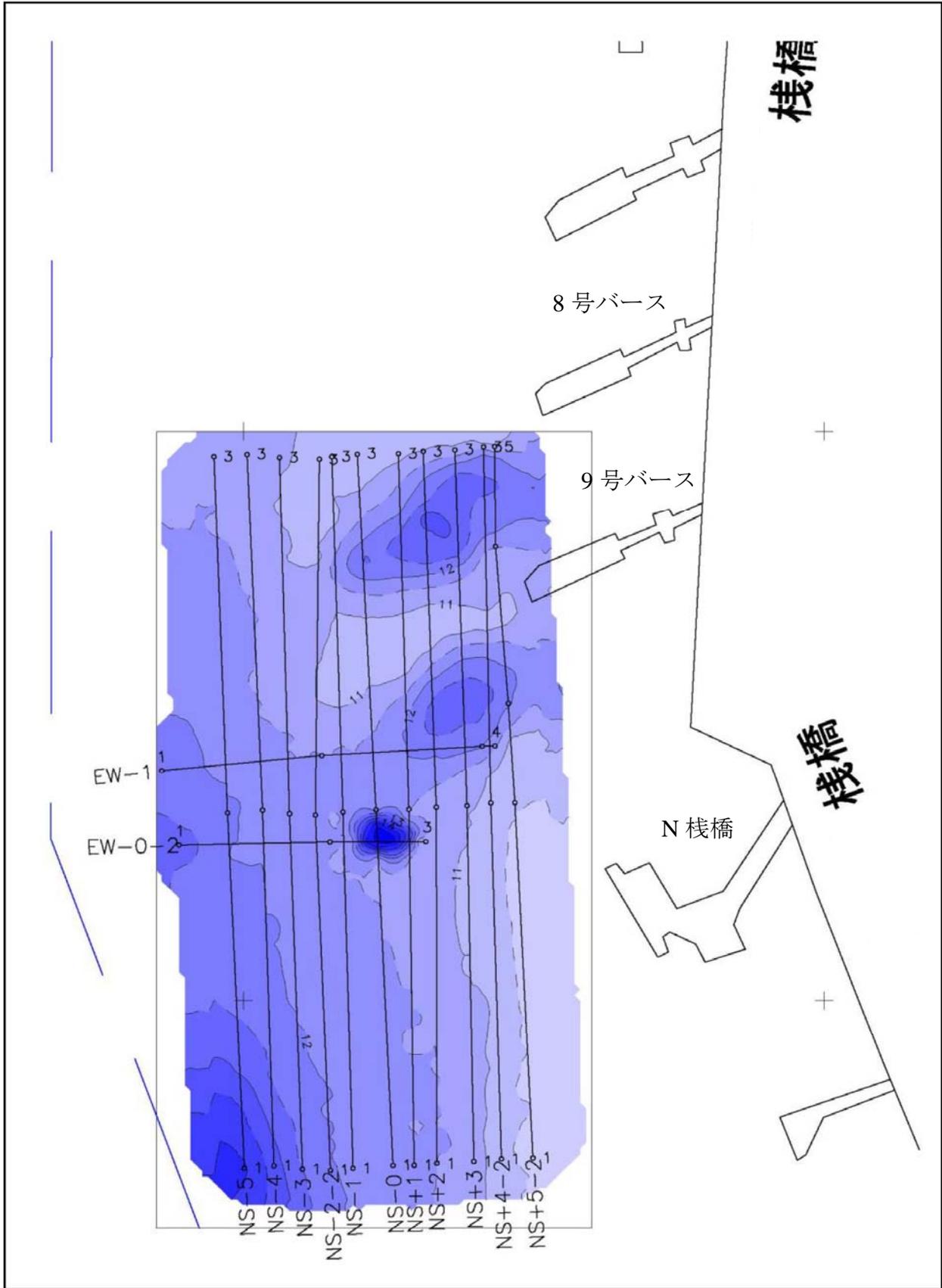


図 6.2.11 調査海域の海底地形図

## 6. 2. 2. 2 海底地盤の地質（地層）（船位測量及び音波探査の結果）

処理記録断面図を解析し、音響層序区分を実施した結果、各測線の解析断面図が得られる。各測線の解析断面図を図 6.2.12～図 6.2.24 に示し、それらの図の凡例を図 6.2.25 に示す。縦軸は、発振点（ブーマー）から発振された音波が受信部に受波されるまでの経過時間を示しており、1 目盛が 0.01sec であることから、 $0.01\text{sec} \times 1500\text{m/sec} \div 2 = 7.5\text{m}$  と基本水準面からの深さに換算することもできる。横軸は、発振点と受信点の中間点（CDP ポイント）の番号（約 0.625m 毎）を示しており、測点 1、2、3 の XY 座標（表 2.5.1）から横軸を平面直角座標第 5 系に変換することも可能である。

本海域に分布する地層は I 層から III 層までの 3 層に区分される。以下、各層の概要を述べる。

### (1) I 層

全体的に反射面に乏しい白抜きの地層である。反射強度が弱いことから、層相は未固結のシルト、泥または浮泥と想定される。層厚は約 1～2m で、NS-5～NS-3 測線の南部及び EW-0-2、EW-1 測線の西部では層厚が厚くなるが、これは水島航路の浚渫後、I 層が厚く堆積したためと思われる。

### (2) II 層

上面の反射が非常に強く、内部に若干の水平層理を伴う地層である。上面の反射が非常に強いこと及び事故直後に潜行したダイバーが陥没部の壁面にこぶし大の礫を確認していることから、本層は礫層を主体としていると考えられる。層厚は変化に乏しく 5～10m である。本層内には、一部音波散乱層が含まれており、それより下位の情報を判読できない。

### (3) III 層

本調査の最下層で上面のみ確認でき、本層上面の直下に海底面及び II 層上面の強い二重反射（疑似情報）が見られることから内部構造は不明である。上面は東西測線である EW-1 測線では所々強い反射を伴い比較的明瞭に見えるが、南北測線では若干不明瞭であり、連続した反射面を判別することは難しい。内部構造が判読できないことから、層相は不明である。また、本層の下限が判読できないことから、層厚も不明である。

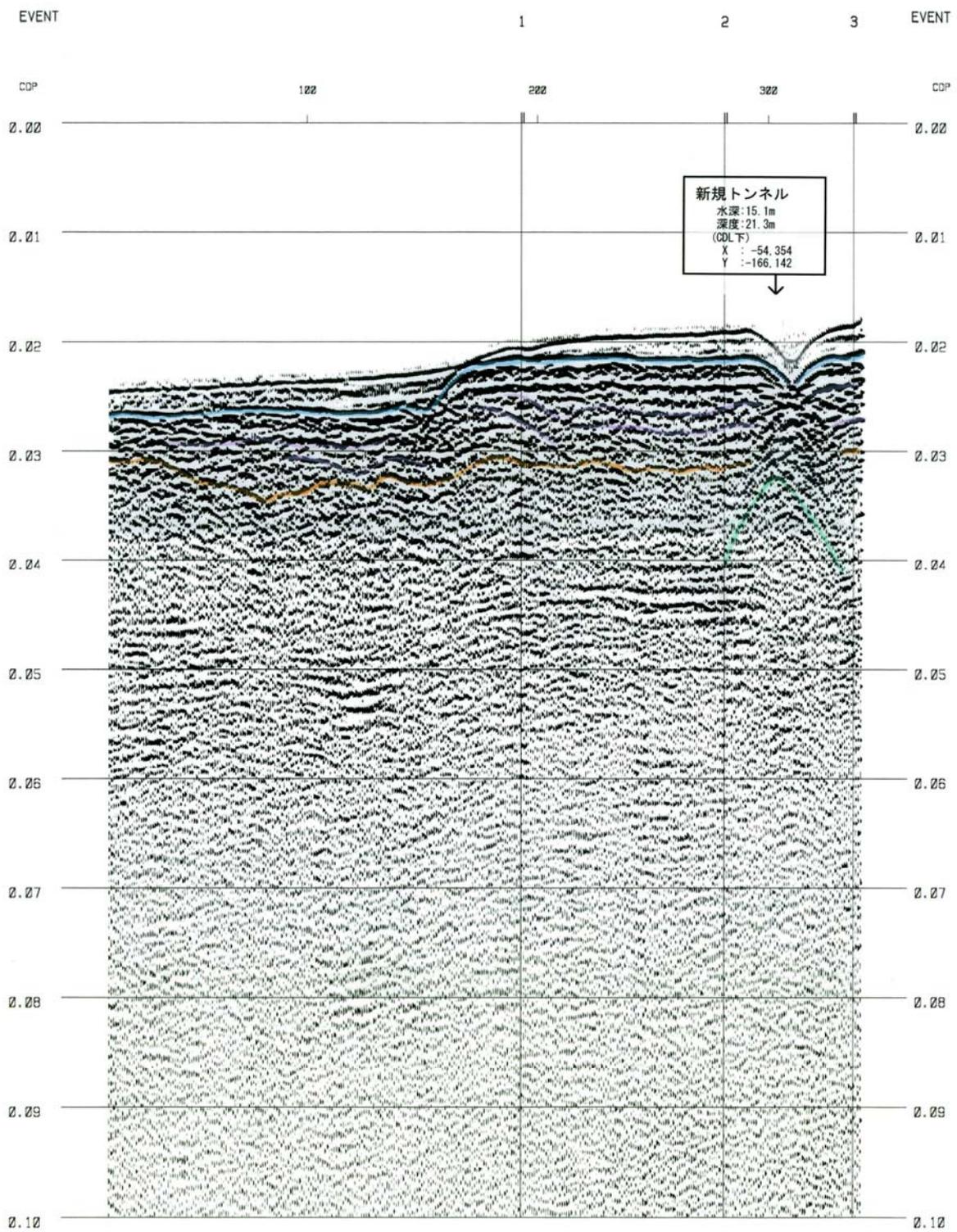


図 6.2.12 測線 EW-0-2 における解析断面図

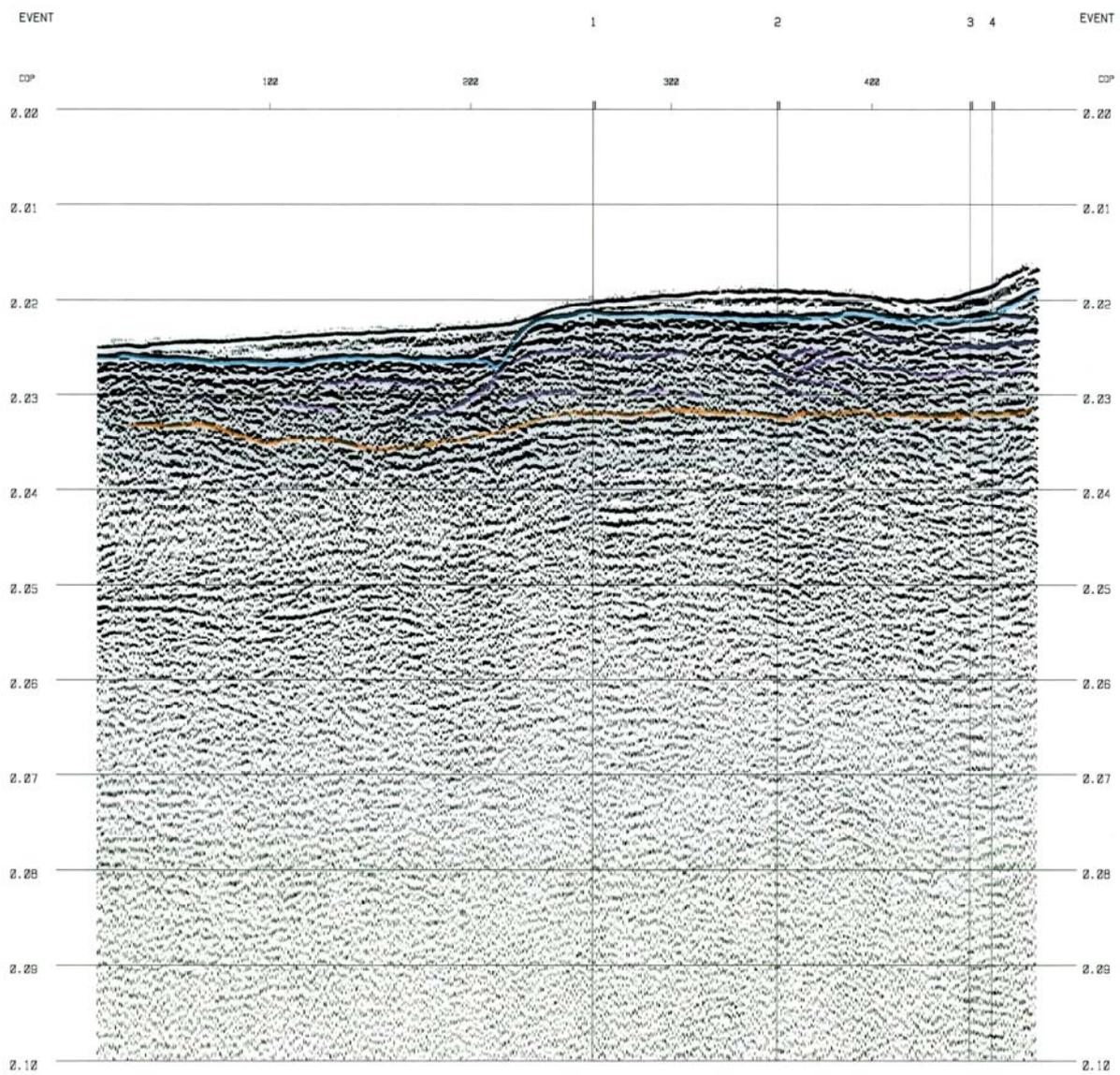


図 6.2.13 測線 EW-1 における解析断面図

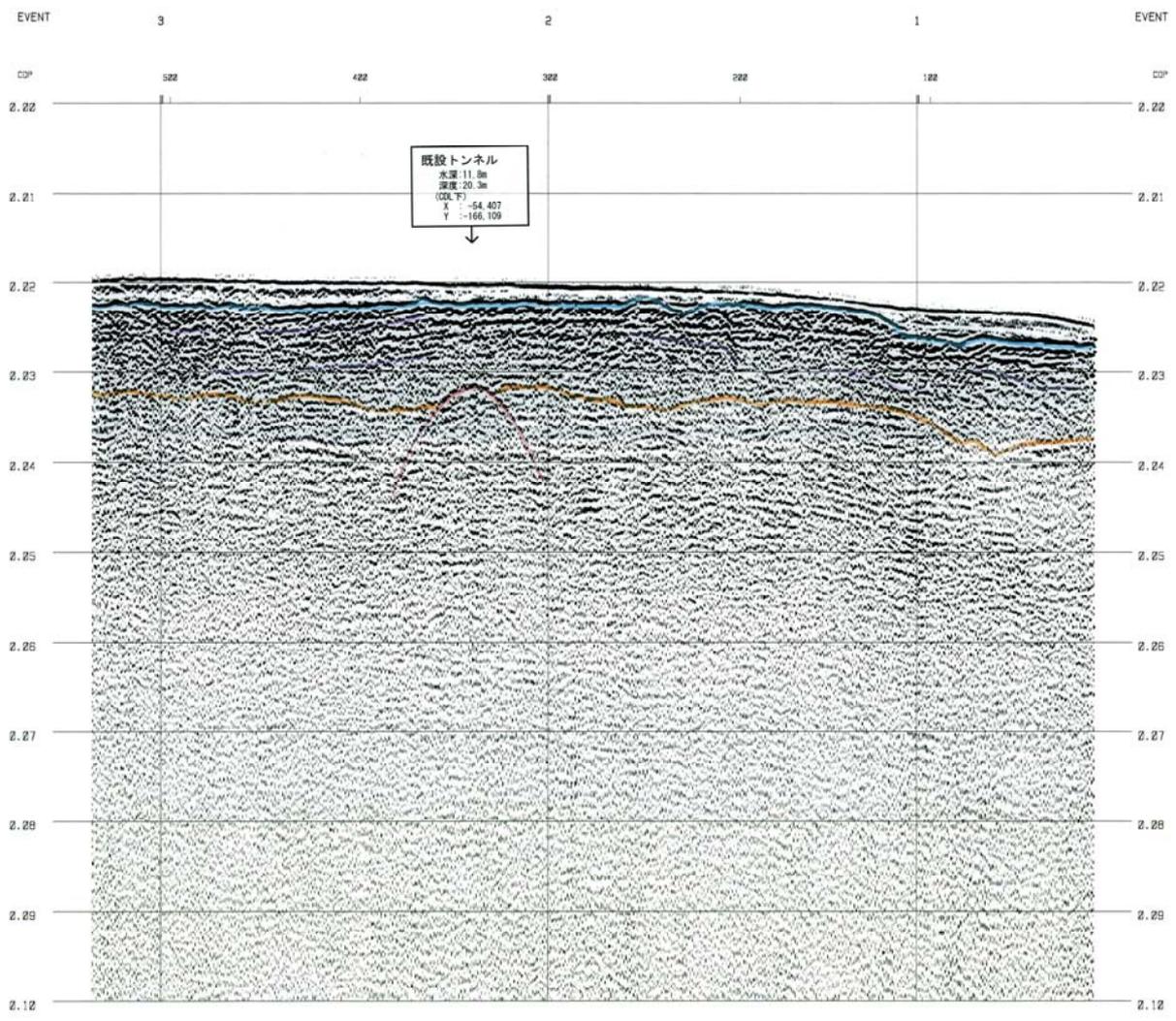
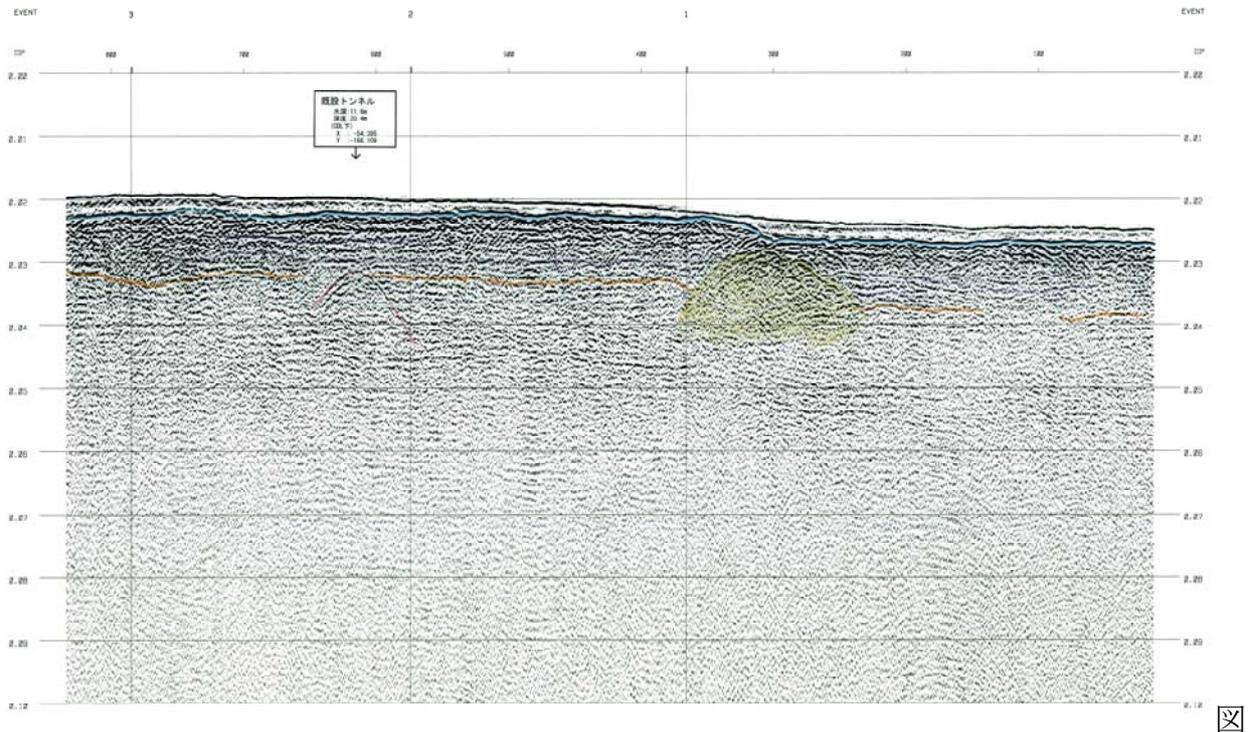


図 6.2.14 測線 NS-5 における解析断面図



6.2.15 測線 NS-4 における解析断面図

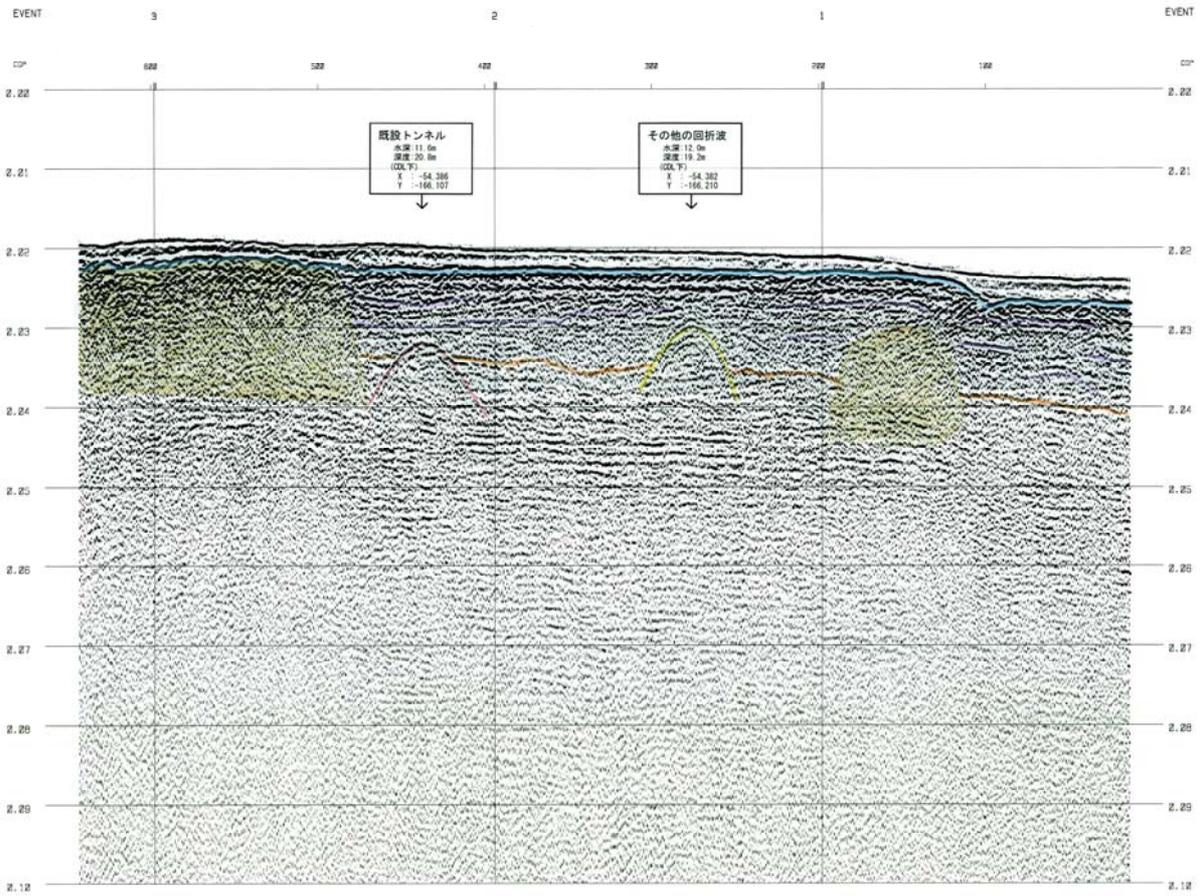


図 6.2.16 測線 NS-3 における解析断面図

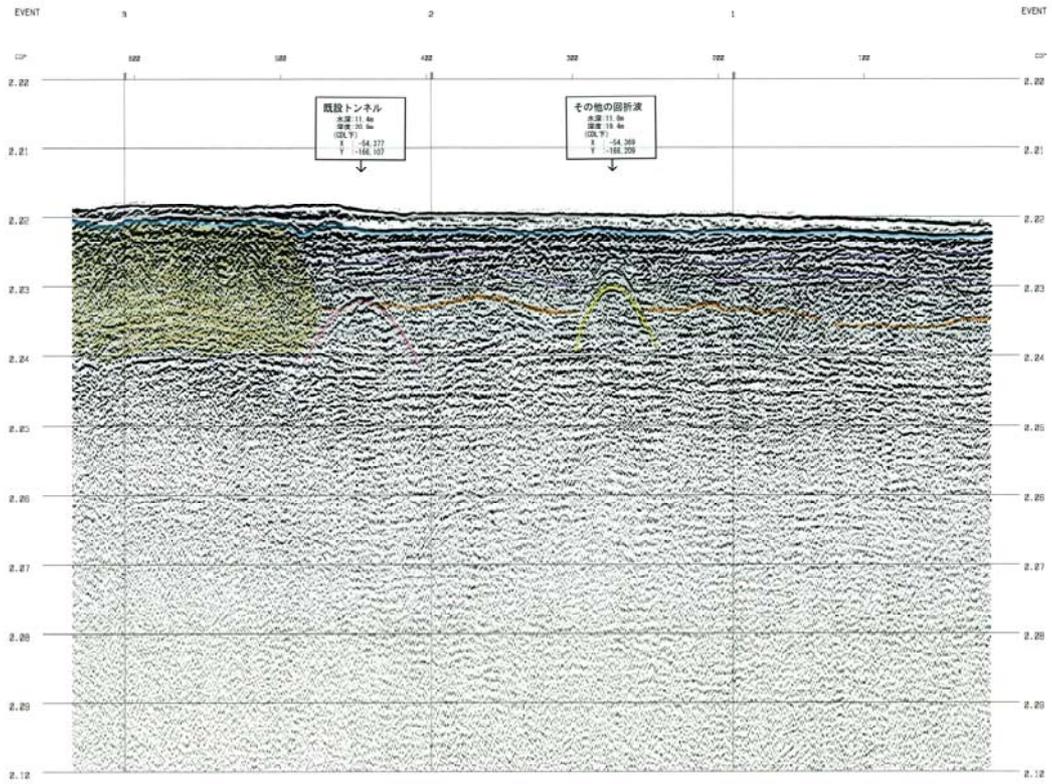


図 6.2.17 測線 NS-2-2 における解析断面図

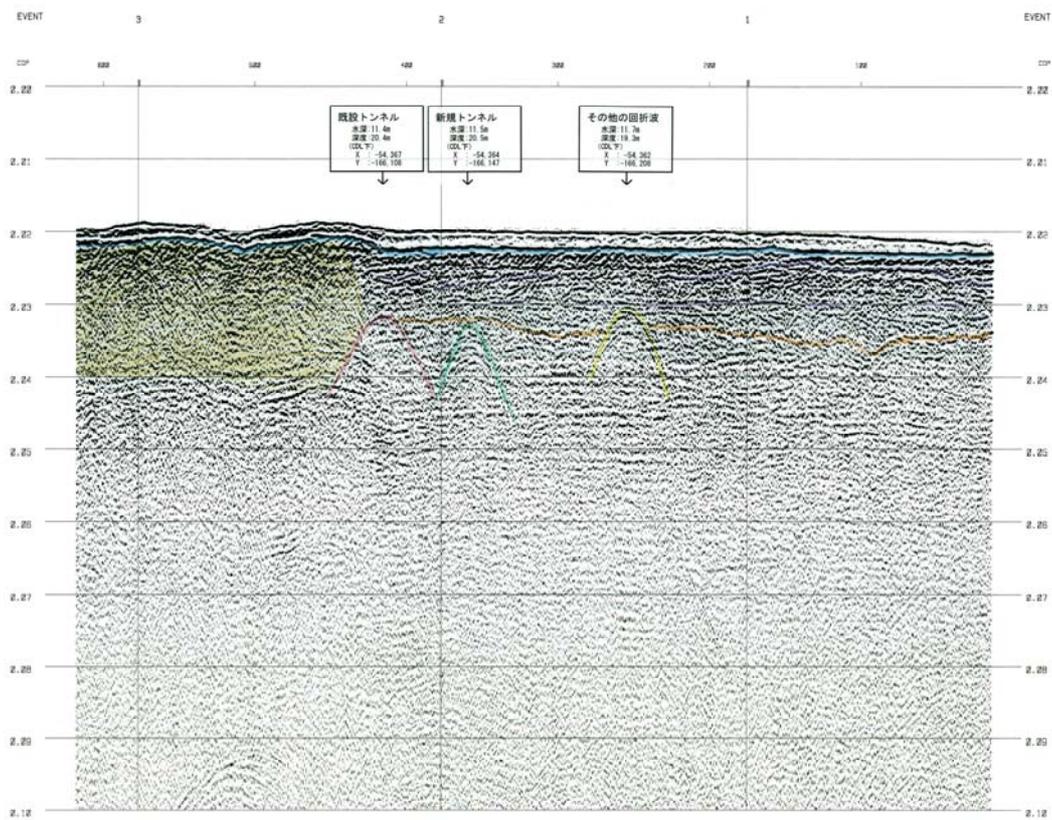


図 6.2.18 測線 NS-1 における解析断面図

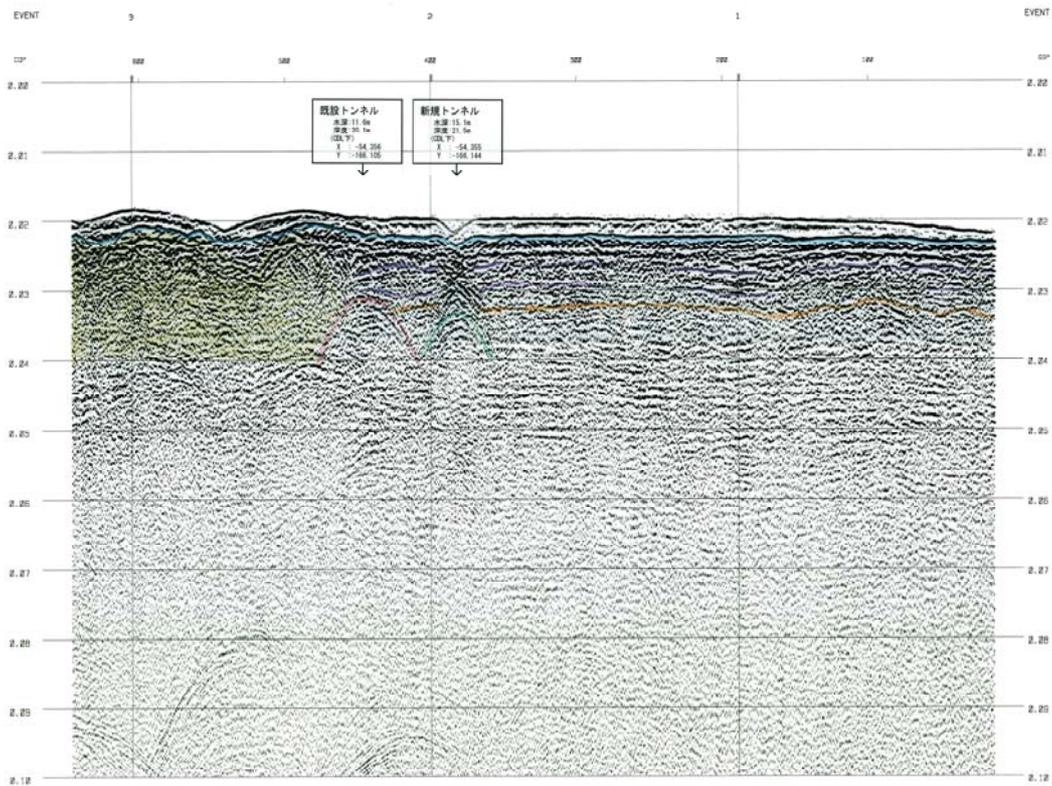


図 6.2.19 測線 NS-0 における解析断面図

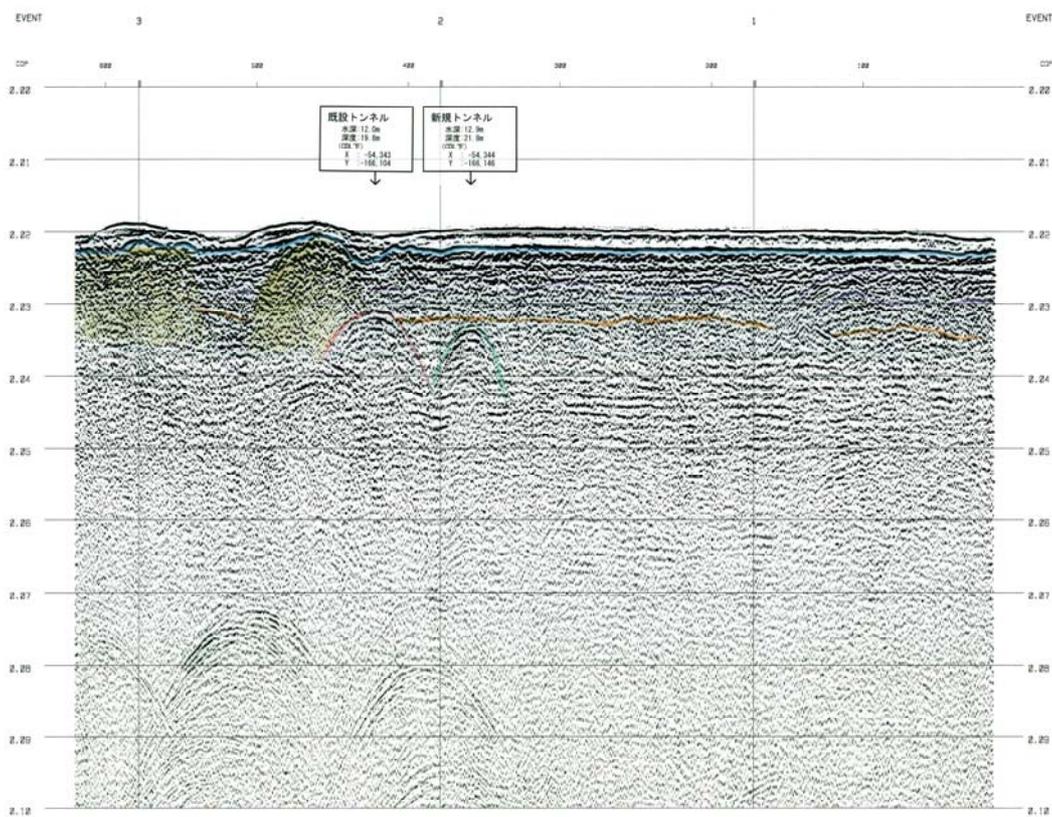


図 6.2.20 測線 NS+1 における解析断面図

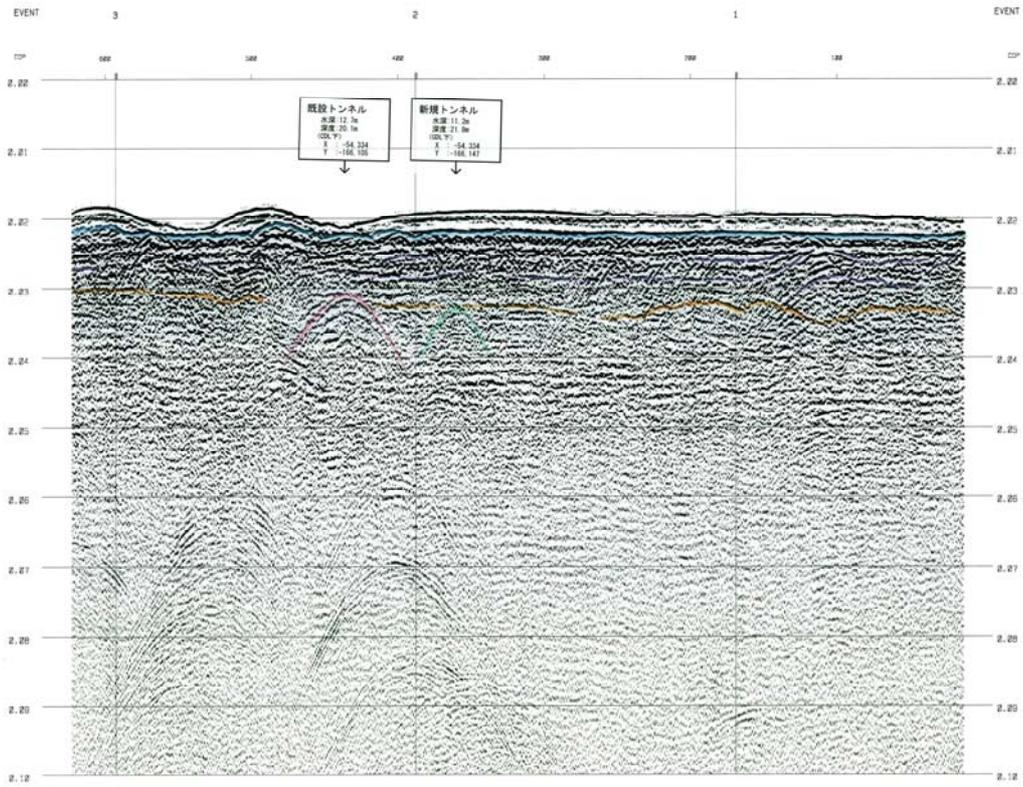


図 6.2.21 測線 NS+2 における解析断面図

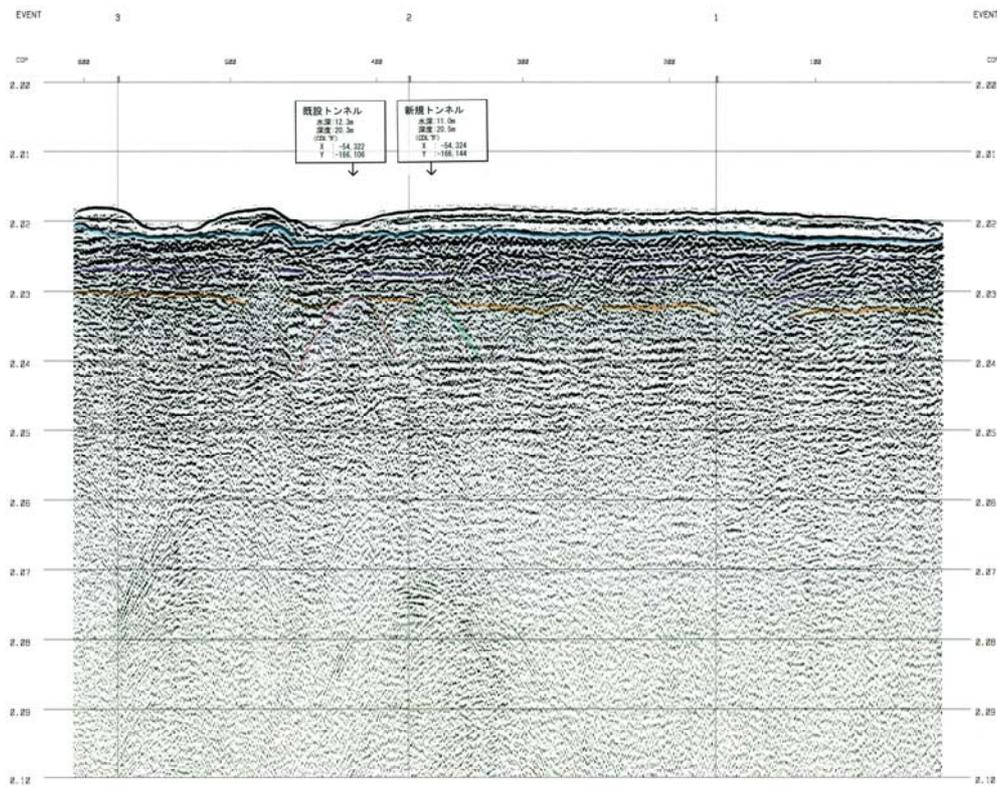


図 6.2.22 測線 NS+3 における解析断面図

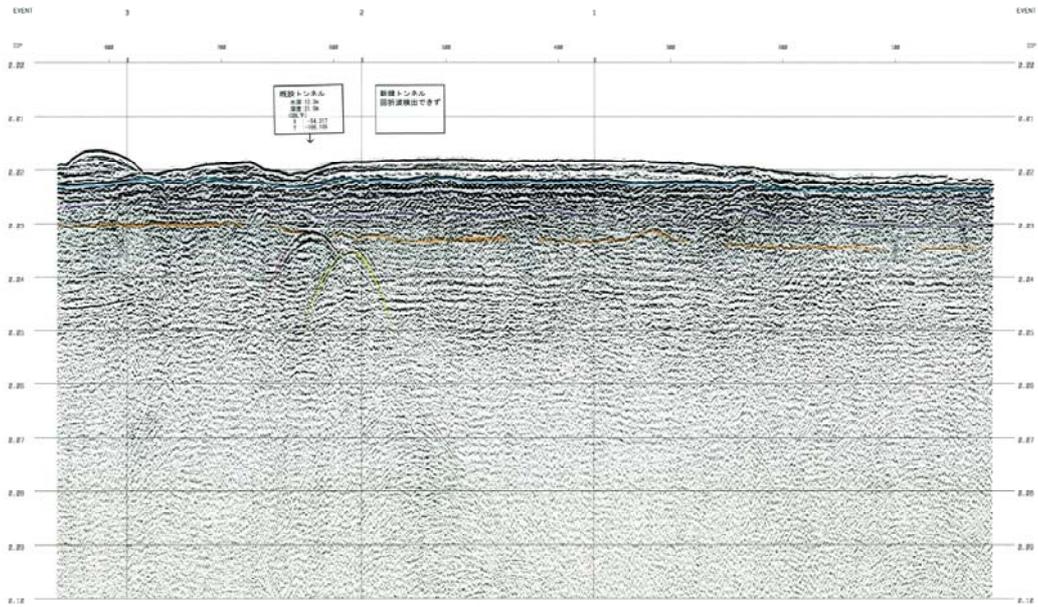


図 6.2.23 測線 NS+4-2 における解析断面図

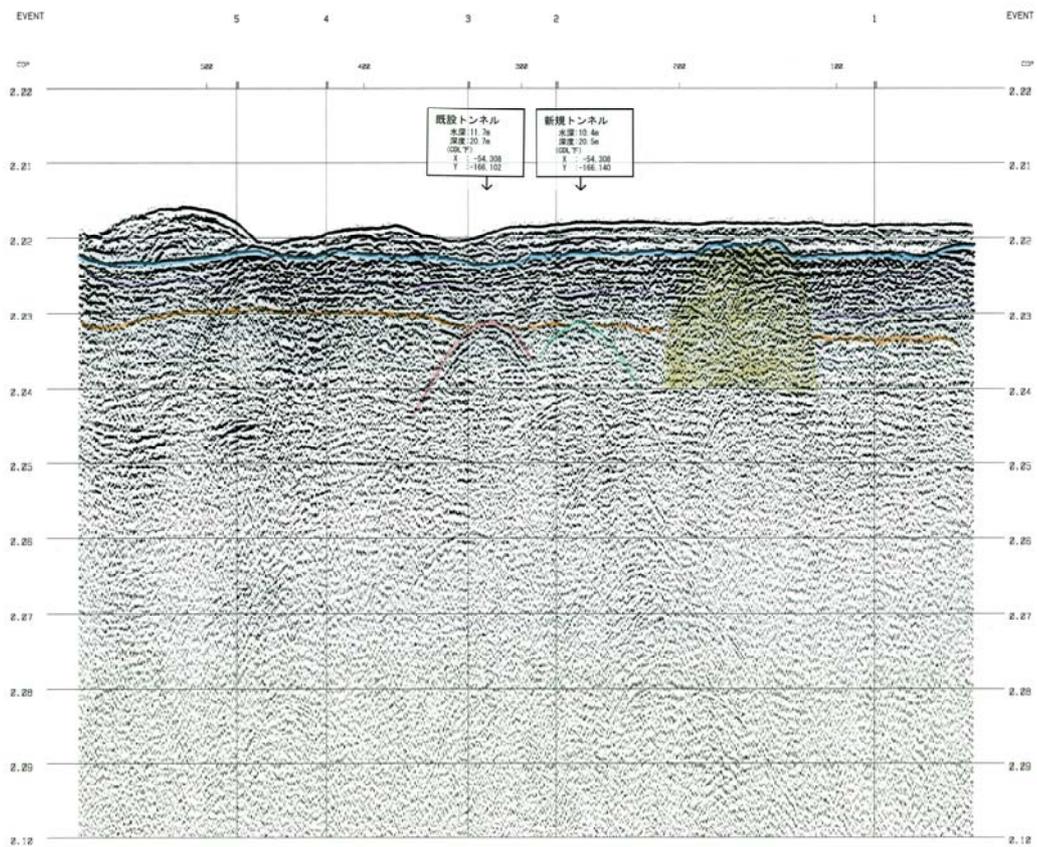


図 6.2.24 測線 NS+5-2 における解析断面図

# 凡例

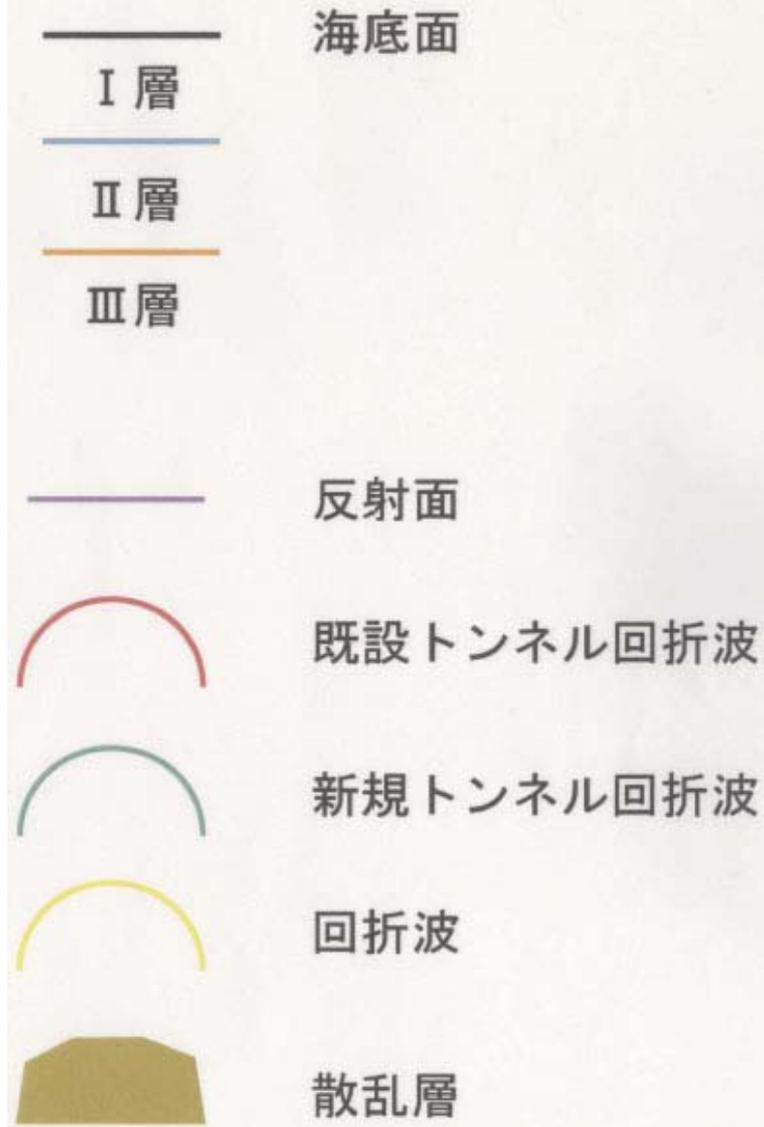


図 6.2.25 図 6.2.12～図 6.2.24 までの凡例

## 6. 2. 2. 3 トンネルの位置

### (1) 音波探査結果からわかるトンネルの位置

埋設トンネルは、音波探査記録上では円形の断面形状ではなく、回折波（双曲線状の擬似反射面）として現れる（図 6.2.12～図 6.2.24 参照）。回折波は第 1 パイプライン付近、当該事故が発生したトンネル付近の複数の測線で連続的に確認されたほか、さらに 1 箇所でも連続的に確認された。全体的に、回折波の明瞭な所（反射強度：強）と不明瞭な所（反射強度：弱）がランダムに存在し、また、第 1 パイプラインとトンネルの回折波の幅に顕著な差があった。

第 1 パイプラインにおいて、測線 NS-5～NS+5 の南北方向の全測線で回折波が確認できる。当該事故のトンネルにおいて、測線 NS-1～NS+5（測線 NS+4 を除く）の 6 測線で回折波が確認できる。このうち、顕著な反射が見られるのは測線 NS+1 である。海底下の深度は 6.2～10.6m で、第 1 パイプラインに比べて同じか少し深い傾向を示す。陥没部の中心である測線 NS-0 よりも西側 10m の位置にある測線 NS-1 でも回折波が確認できる。少なくとも海底面の陥没を引き起こした現象は切羽面の直上ではなく、より後方で発生したものと推測される。

そのほかに連続する回折波が測線 NS-3～NS-1 の 3 測線で海底下約 7.6m に確認された。この箇所に埋設されている構造物等の情報は無いので、回折波が連続して確認された原因は不明である。

### (2) 音波探査結果とトンネルの設計計画座標との比較

解析断面図から、NS-2-2 から NS+5-2 までの断面図を平面直角座標第 5 系に変換し、XY 座標でトンネルの回折波、第 1 パイプラインの回折波、トンネルの設計計画座標と比較した結果を図 6.2.26、図 6.2.27 に示す。図 6.2.26 において、トンネル及び第 1 パイプラインの回折波は、それぞれの設計計画座標とほぼ一致しており、トンネルの位置の特定ができていくことがわかる。また、図 6.2.27 から、地盤の陥没部の中心座標（X= -54353.02, Y= 166143.33）は切羽面より後方（発進立坑側）にあることがわかる。

また、解析断面図から、縦軸を基本水準面からの深さ、横軸を平面直角座標第 5 系に変換し、トンネルの設計計画座標と比較した結果を図 6.2.28～図 6.2.30 に示す。

図 6.2.28 は測線 NS+3（ほぼ 88 リングの横断面）を実測座標に変換したものである。同図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標は、 $X_{88R} = -166141.82$ 、 $Y_{88R} = -54322.79$ 、 $MP_{88R} = 19.8m$  であり、トンネル頂部の設計計画座標（ $X_{88Rd} = -166142.2493$ 、 $Y_{88Rd} = -54323.1220$ 、 $MP_{88Rd} = 22.9679m$ ）との差は $\Delta X = X_{88Rd} - X_{88R} = -0.33m$ 、 $\Delta Y = Y_{88Rd} - Y_{88R} = -0.43m$ 、 $\Delta MP = MP_{88Rd} - MP_{88R} = 3.17m$  である。平面直角座標第 5 系の XY 座標の計測精度は $\pm 1.5m$  以内であるが、基本水準面からの深さの精度はそれ以下となっている。これは、基本水準面からの深さの算出に当たって、音波が深さ方向に一定の速度 1500m/sec で伝播すると仮定しているが、実際には音波がそれよりも早い速度で砂礫層を通過する。そのような仮定が深さの精度に影響を与えており、実際にはトンネルの回折波頂部の座標

MP<sub>88R</sub>-19.8m より深い箇所にトンネルが存在するものと考えられる。

図 6.2.29 は測線 NS-0 (ほぼ 110 リングの横断面) を実測座標に変換したものである。同図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標  $X_{110R} = -166144.51$  は、陥没部の中心座標  $X_f = -166143.33$  よりも 1.2m ほど切羽から立坑を見て右側に存在する。

図 6.2.30 は測線 EW-0-2 (ほぼトンネルの縦断面) を実測座標に変換したものである。同図を見ると、トンネルの回折波頂部の座標  $Y_f = -54356.62$  は、陥没部の中心座標  $Y_f = -54353.02$  よりも 3.6m ほど到達立坑側に存在する。トンネルの設計計画座標と比較すると、陥没部の中心は、110 リングの直上に当たることがわかる。ただし、精度は $\pm 1.5m$  であることと、1 リングの長さが 1.4m であることを考慮すると、110 リングの直上だと断定することはできない。

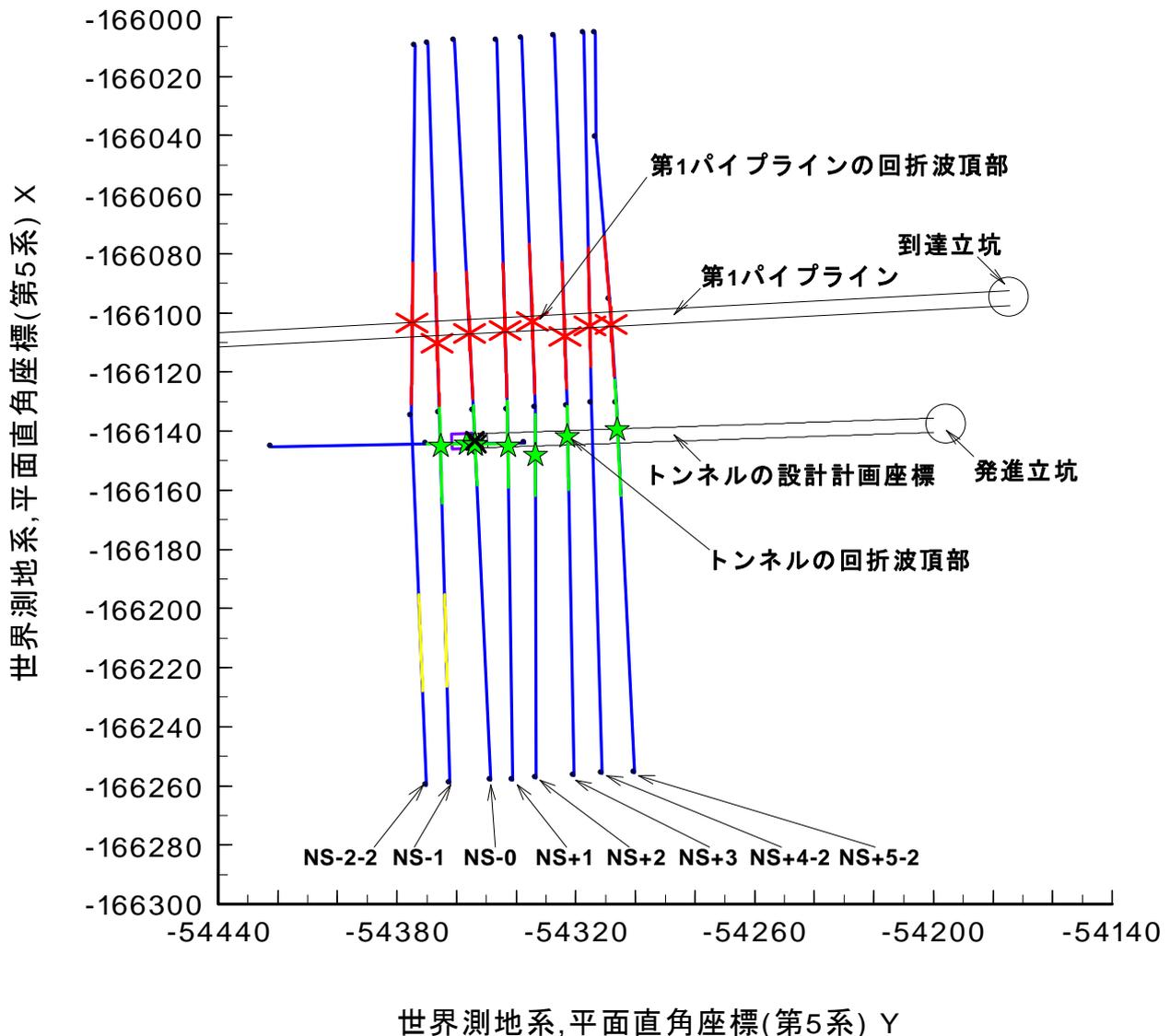


図 6.2.26 世界測地系 [平面直角座標 (第 5 系)] XY 座標における音波探査結果と当該事故のトンネルの設計計画座標との比較

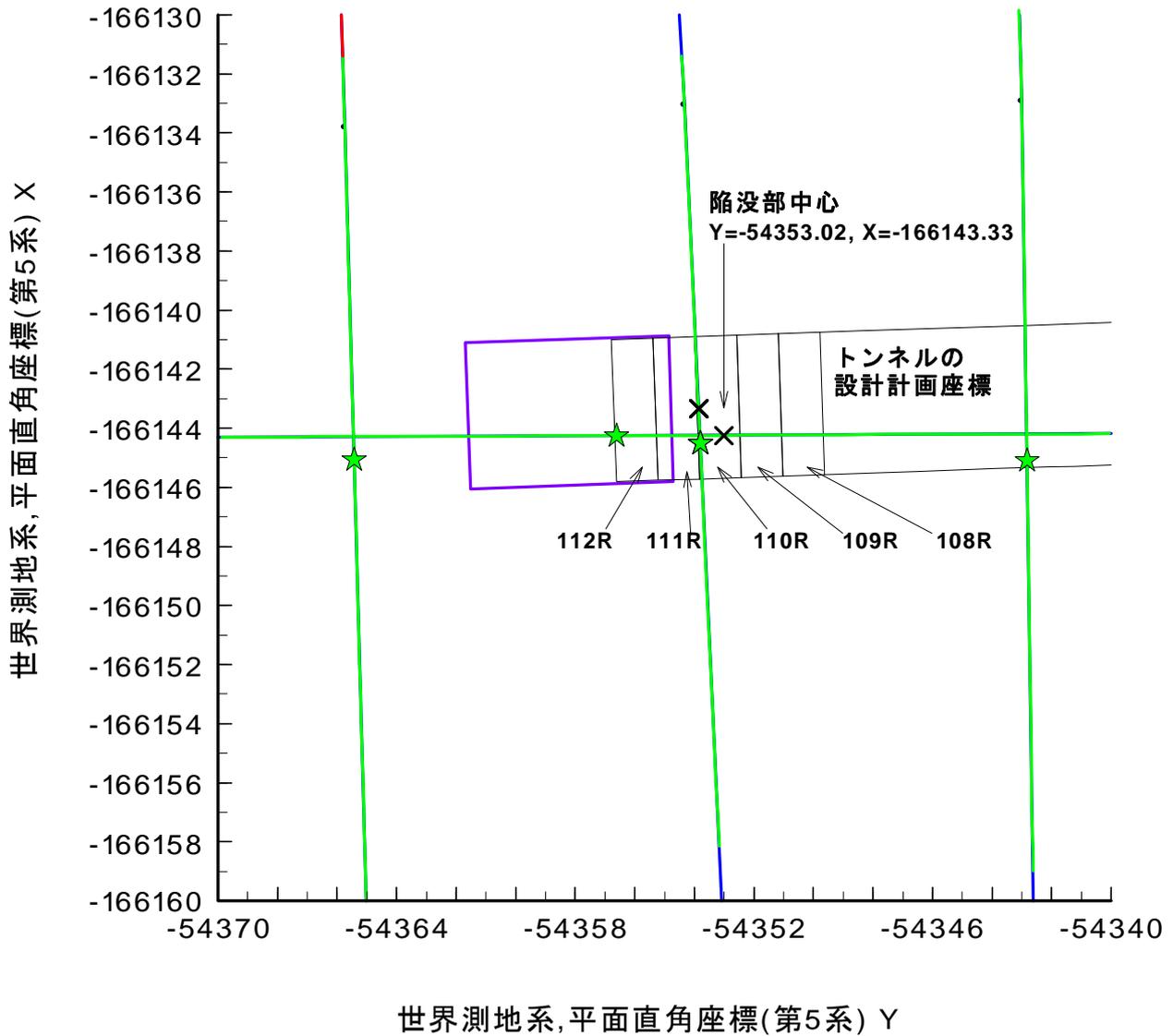


図 6.2.27 世界測地系 [平面直角座標 (第 5 系)] XY 座標における音波探査結果と当該事故のトンネルの設計計画座標との比較 (拡大図)

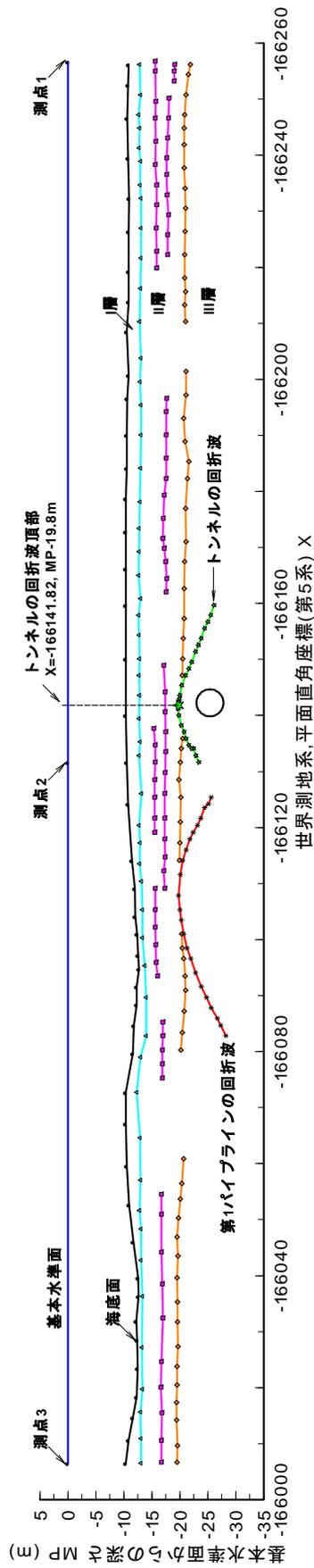


図 6.2.28 測線 NS+3 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較

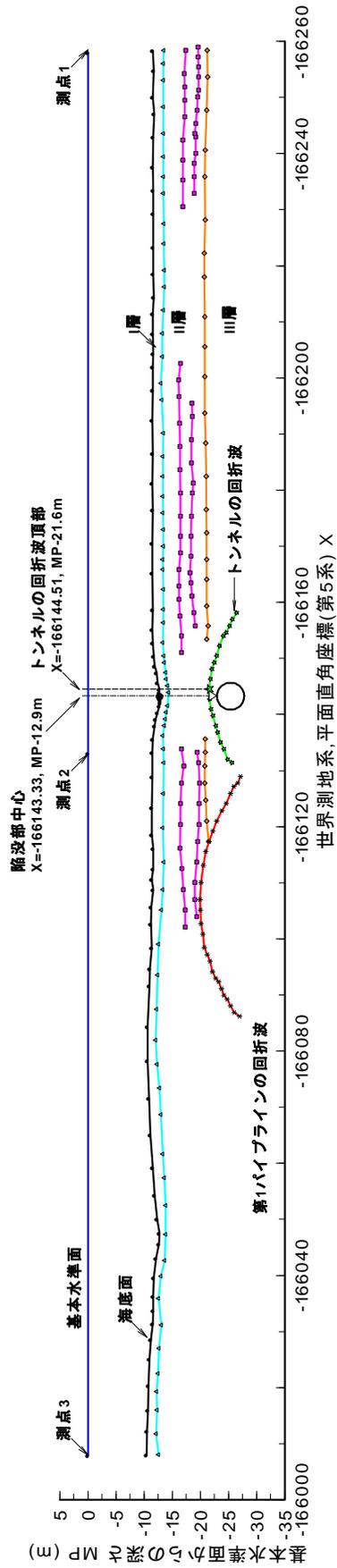


図 6.2.29 測線 NS-0 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較

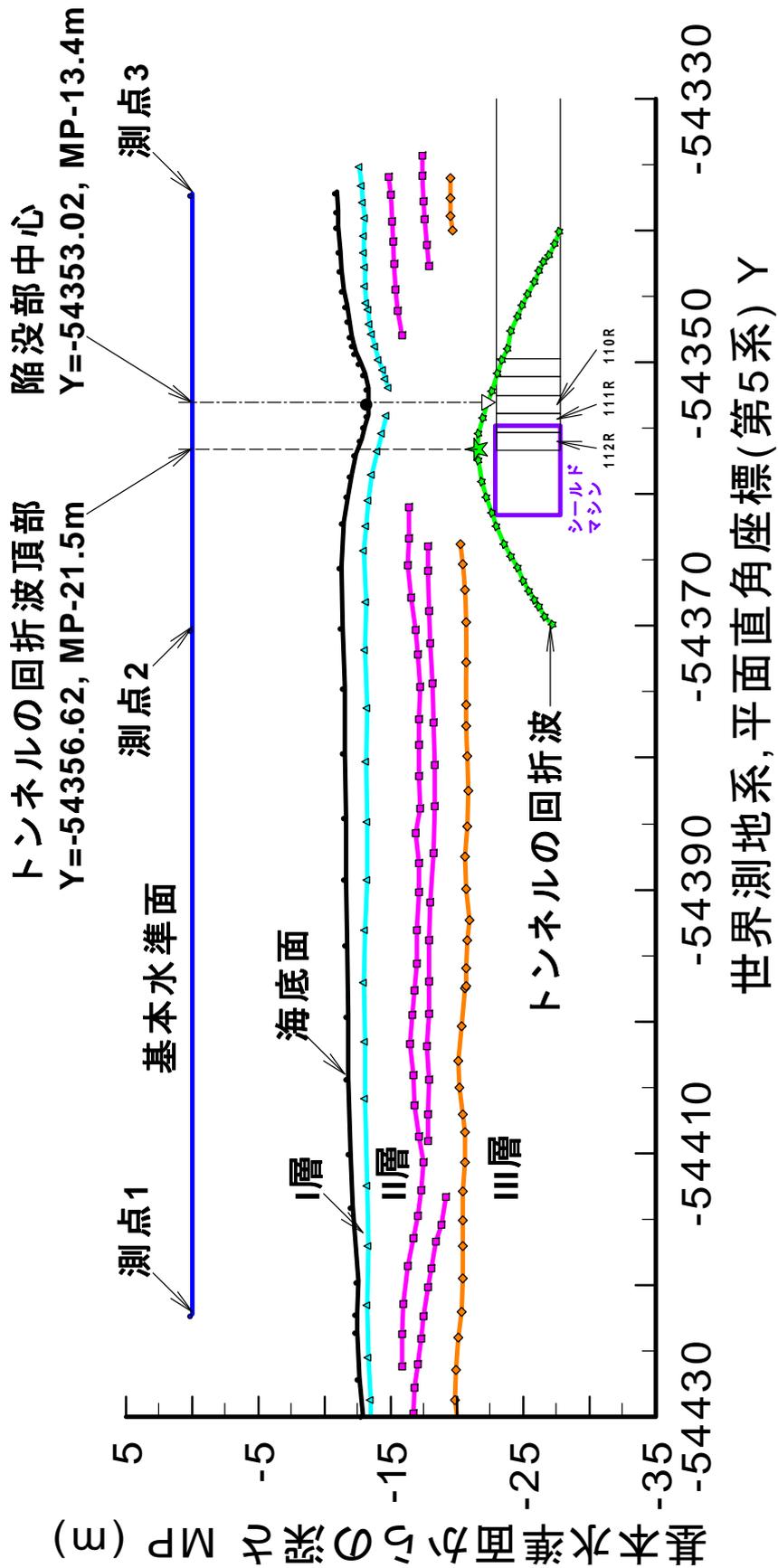


図 6.2.30 測線 EW-0-2 における音波探査結果とトンネルの設計計画座標の比較

## 6. 3 災害発生現場付近から採取した試料の分析

### 6. 3. 1 地盤材料の粒度試験

地盤材料は礫、砂など粗粒土からシルト、粘土などの細粒土まで様々な大きさのものが入り交じって構成されている。このような地盤材料を構成する土粒子の粒径の分布状態を「粒度」という。粒度は、土の物理的性質や力学的性質と密接な関係があることが知られており、各国にて基準化されている。図 6.3.1 に日本の土粒子の粒径区分とその呼び名を示す。

日本では、粒径 75mm 未満を対象とした試験方法として「土の粒度試験方法 (JIS A 1204)」があり<sup>3)</sup>、粒径 75mm を超える石分を対象とした地盤材料の粒度を求める方法として「石分を含む地盤材料の粒度試験方法 (JGS 0132)」がある<sup>4)</sup>。細粒分から石分まで幅広く含む当該採取試料では、両者の試験を行い、結果を組み合わせて粒度を示した。

		粒径 (mm)								
		0.005	0.075	0.25	0.85	2	4.75	19	75	300
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石 (コブル)	巨石 (ボルダー)	
		砂			礫			石		
細粒分		粗粒分						石分		

図 6.3.1 土粒子の粒径区分と呼び名

#### 6. 3. 1. 1 粒度試験方法の概略

##### (1) 石分を含む地盤材料の粒度試験方法 (JGS 0132)<sup>4)</sup>

粒子径が 75mm 以上の石分を含む地盤材料の粒度を求める試験方法であり、粒径 75mm 未満の土質材料の粒度を求めるには後述する土の粒度試験方法 (JIS A 1204) を適用する。

試験方法を図 6.3.2 (上側) に示す。なお、本試験方法では、採取する試料の量を最大粒径に応じて表 6.3.1 のようにすることが規定されているが、海底下からの採取であり採取した量が限定されていることから各ケース約 50kg の試料にて試験を実施している。

##### (2) 土の粒度試験方法 (JIS A 1204)<sup>3)</sup>

高有機質土以外で、粒径が 75mm 未満の土を対象とした試験方法である。試験手順を図 6.3.2 (下側) に示す。まず、試料を粒径により 2mm 以上と 2mm 未満の 2 つに分ける。粒径 2mm 以上の土粒子は水洗いを行った後、ふるい分析を行う。粒径 2mm 未満の土粒子は沈降分析を行った後、粒径 0.075mm 以上の土粒子を水洗いし、ふるい分析を行う。

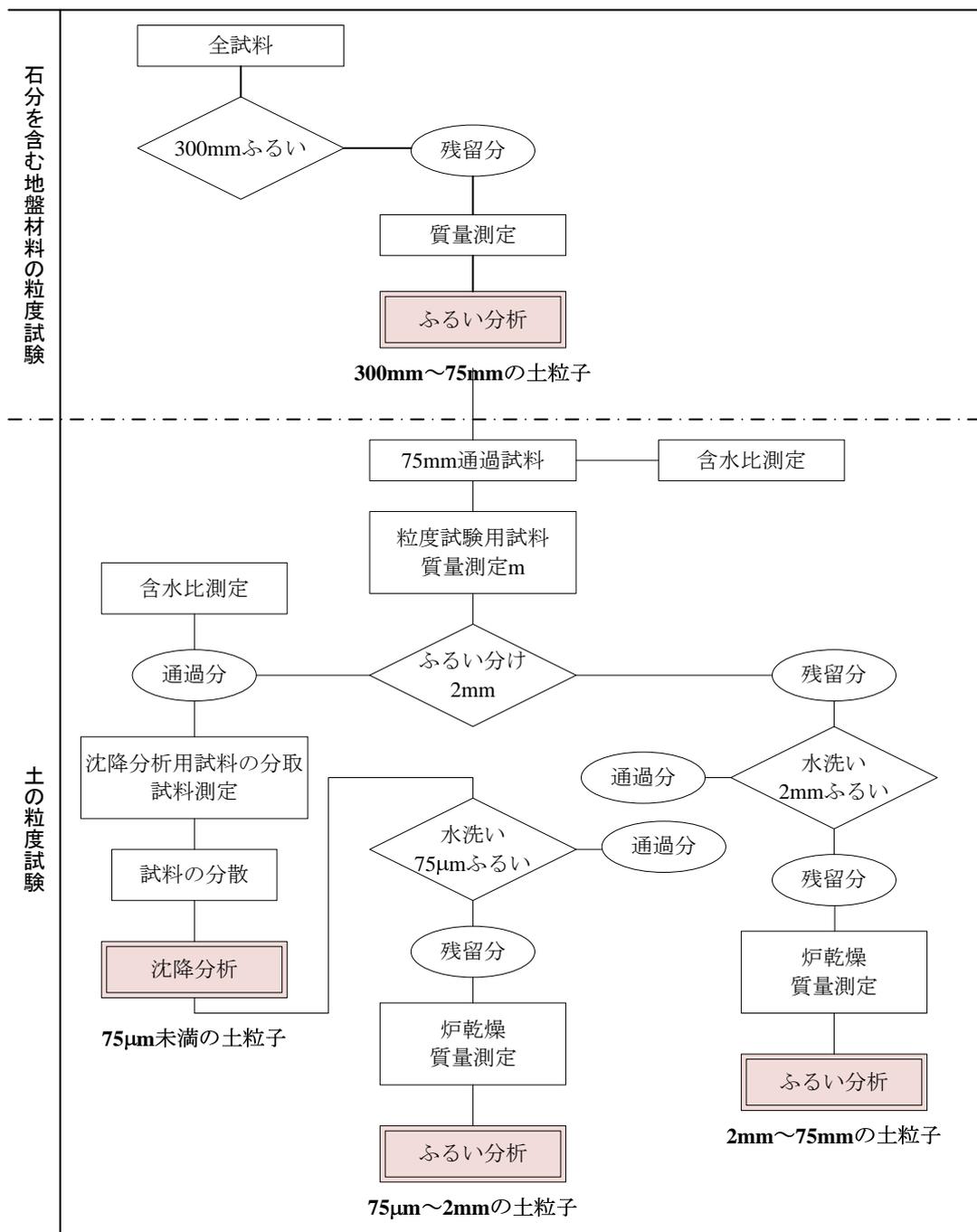


図 6.3.2 粒度試験方法の手順（上側：石分を含む地盤材料の粒度試験方法，下側：土の粒度試験方法）

表 6.3.1 採取する試料の最小質量の目安（参考）

試料の最大粒径 mm	試料質量 kg
300	750~1500
125	100~200

### 6. 3. 1. 2 粒度試験結果

粒度試験結果を表 6.3.2~6.3.3 に、各ケースの粒径加積曲線を図 6.3.3 にそれぞれ示す。ここで、均等係数と曲率係数は、土の粒度の広がりや形状を数値化したものであり、均等係数は粒径加積曲線の傾きを表すもので、大きくなるほど粒径の幅が広いことを示している。細粒分 5%未満の粗粒土に対し、 $U_c \geq 10$  の土は「粒径幅の広い」といい、 $U_c < 10$  の土を「分級された」という。一方、曲率係数は、粒径加積曲線のなだらかさを表すもので、 $U'_c$  が 1~3 の場合に「粒径幅の広い」といえる。

粒度試験にて得られたこれらの結果は、後述する工学的分類や透水性の推定に用いる。

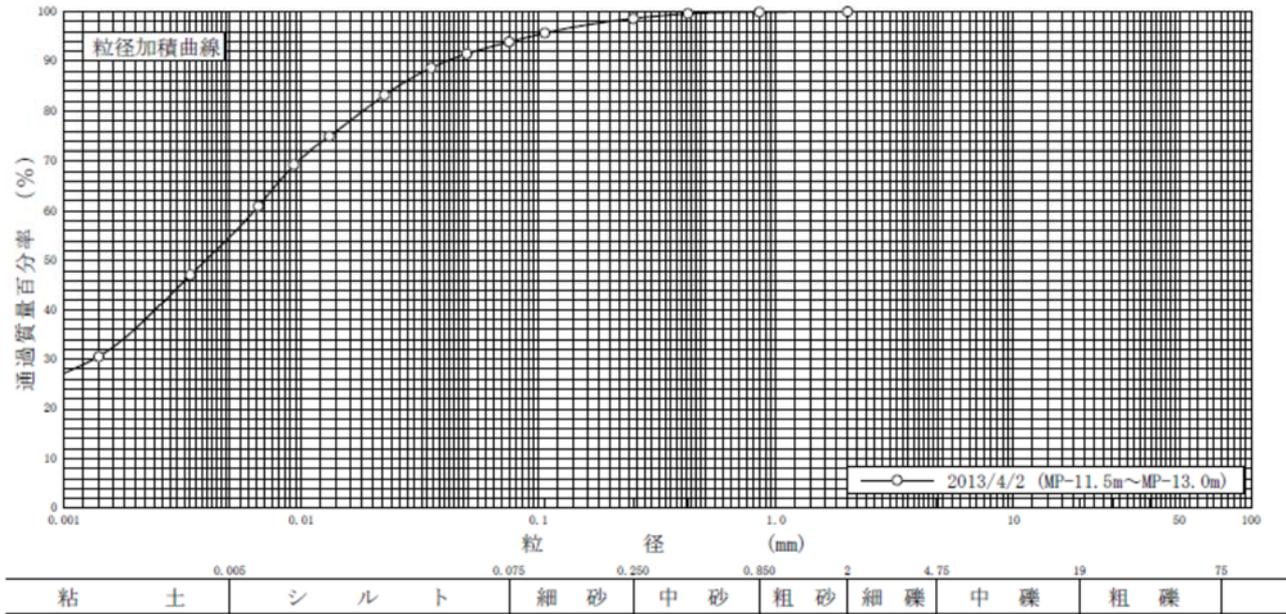
表 6.3.2 粒度試験結果一覧（その1 粒径区分毎の質量百分率）

試料 No.	材料種類	石分			礫分				砂分				シルト分 %	粘土分 %
		%	巨石	粗石	%	粗礫	中礫	細礫	%	粗砂	中砂	細砂		
1	土質材料	-	-	-	<b>0</b>				<b>6.1</b>	0.1	1.3	4.7	<b>39.1</b>	<b>54.8</b>
2	土質材料	-	-	-	<b>22.5</b>	11.6	8.6	2.3	<b>12.0</b>	3.2	5.0	3.8	<b>22.4</b>	<b>43.1</b>
3	土質材料	-	-	-	<b>80.1</b>	44.9	27.7	7.5	<b>17.2</b>	5.4	10.4	1.4	<b>2.7</b>	
	地盤材料	<b>5.8</b>	0.0	5.8	<b>75.5</b>	42.3	26.1	7.1	<b>16.2</b>	5.0	9.8	1.4	<b>2.5</b>	
	土質材料	-	-	-	<b>68.6</b>	41.6	21.8	5.2	<b>20.4</b>	6.4	10.2	3.8	<b>5.2</b>	<b>5.8</b>
4	土質材料	-	-	-	<b>80.6</b>	54.4	20.9	5.3	<b>18.6</b>	3.6	12.2	2.8	<b>0.8</b>	
	地盤材料	<b>4</b>	0.0	4.0	<b>77.4</b>	52.2	20.1	5.1	<b>17.8</b>	3.4	11.7	2.7	<b>0.8</b>	
5	土質材料	-	-	-	<b>79.1</b>	46.2	26.5	6.4	<b>20.2</b>	8.1	11.2	0.9	<b>0.7</b>	
6	土質材料	-	-	-	<b>78.0</b>	42.0	28.3	7.7	<b>20.5</b>	7.2	11.6	1.7	<b>1.5</b>	
	地盤材料	<b>2.7</b>	0.0	2.7	<b>75.9</b>	40.9	27.5	7.5	<b>19.9</b>	7.0	11.3	1.6	<b>1.5</b>	
7	土質材料	-	-	-	<b>76.4</b>	54.2	17.2	5.0	<b>22.5</b>	8.7	12.9	0.9	<b>1.1</b>	
	地盤材料	<b>1.9</b>	0.0	1.9	<b>74.9</b>	53.2	16.8	4.9	<b>22.1</b>	8.6	12.6	0.9	<b>1.1</b>	
8	土質材料	-	-	-	<b>81.1</b>	43.8	29.5	7.8	<b>18.2</b>	6.8	9.7	1.7	<b>0.7</b>	
9	土質材料	-	-	-	<b>78.1</b>	47.0	24.3	6.8	<b>21.0</b>	8.5	10.6	1.9	<b>0.9</b>	
10	土質材料	-	-	-	<b>88.9</b>	53.9	29.2	5.8	<b>10.9</b>	5.1	5.5	0.3	<b>0.2</b>	
	地盤材料	<b>8.2</b>	0.0	8.2	<b>81.6</b>	49.5	26.8	5.3	<b>10.0</b>	4.7	5.0	0.3	<b>0.2</b>	
11	土質材料	-	-	-	<b>90.7</b>	55.6	29.8	5.3	<b>9.0</b>	3.3	5.1	0.6	<b>0.3</b>	
	地盤材料	<b>7</b>	0.0	7.0	<b>84.4</b>	51.7	27.7	5.0	<b>8.3</b>	3.0	4.8	0.5	<b>0.3</b>	
12	土質材料	-	-	-	<b>89.1</b>	62.1	23.7	3.3	<b>10.5</b>	3.2	6.5	0.8	<b>0.4</b>	
	地盤材料	<b>2.9</b>	0.0	2.9	<b>86.5</b>	60.3	23.0	3.2	<b>10.2</b>	3.1	6.3	0.8	<b>0.4</b>	
13	土質材料	-	-	-	<b>93.5</b>	57.8	32.2	3.5	<b>5.8</b>	1.8	3.4	0.6	<b>0.7</b>	
	地盤材料	<b>1.8</b>	0.0	1.8	<b>91.8</b>	56.8	31.6	3.4	<b>5.7</b>	1.8	3.3	0.6	<b>0.7</b>	

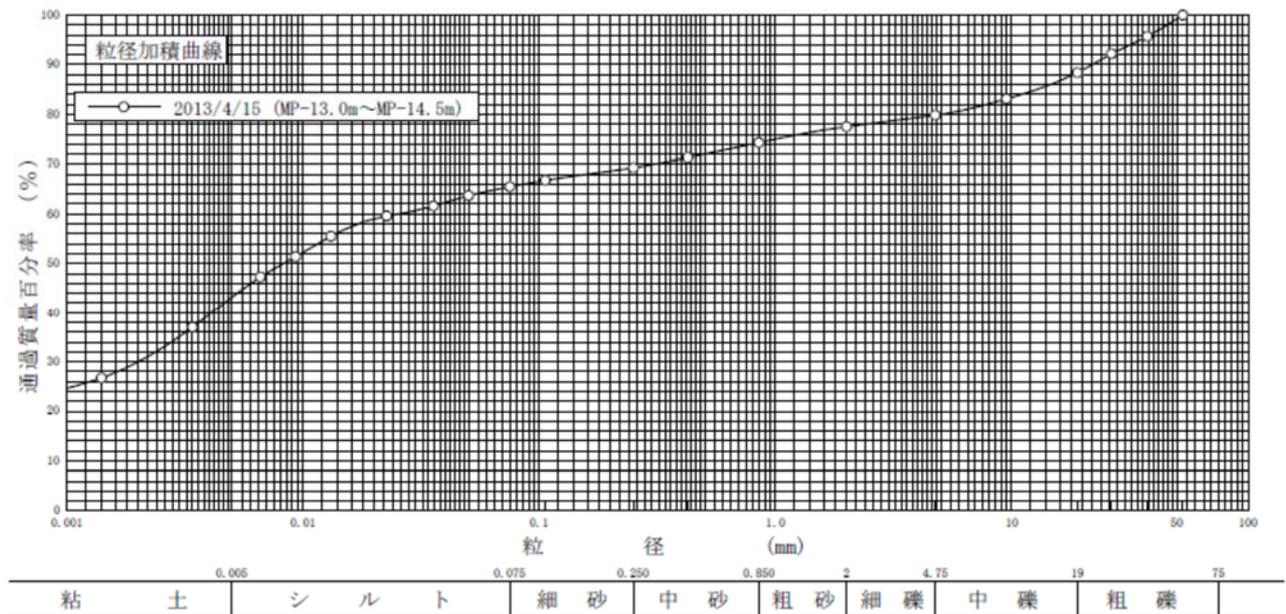
（採取位置は図 6.3.8 のとおりである。）

表 6.3.3 粒度試験結果一覧（その2 最大粒径，通過質量百分率，均等係数，曲率係数）

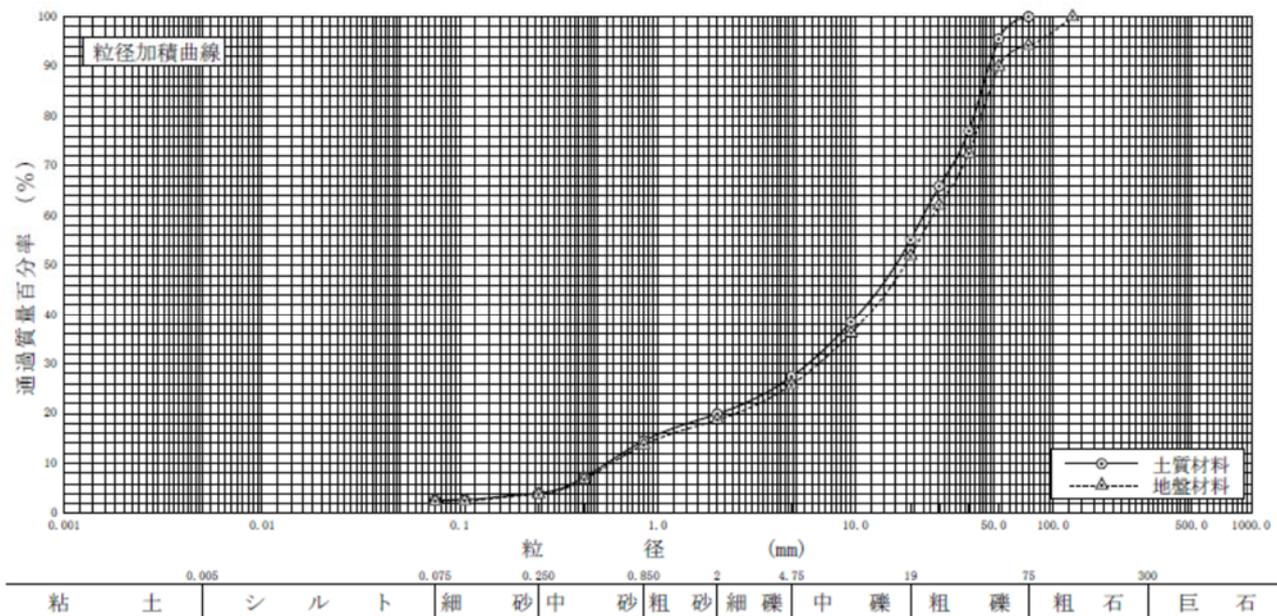
試料 No.	材料種類	最大粒径 (mm)	60%粒径 D <sub>60</sub> (mm)	50%粒径 D <sub>50</sub> (mm)	30%粒径 D <sub>30</sub> (mm)	20%粒径 D <sub>20</sub> (mm)	10%粒径 D <sub>10</sub> (mm)	均等係数 U <sub>c</sub>	曲率係数 U' <sub>c</sub>	土粒子の密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	使用した分散剤
1	土質材料	2	0.0063	0.0039	0.0013	-	-	-	-	2.645	ヘキサメタリン酸ナトリウム, 10ml
2	土質材料	53	0.025	0.0083	0.0020	-	-	-	-	2.653	ヘキサメタリン酸ナトリウム, 10ml
3	土質材料	75	22	16	5.8	2.0	0.55	40	2.8	-	-
	地盤材料	125	25	18	6.5	2.5	0.59	42	2.9	-	-
	土質材料	75	20	13	1.6	0.48	0.040	500	3.2	2.655	ヘキサメタリン酸ナトリウム, 10ml
4	土質材料	75	28	22	8.0	2.3	0.42	67	5.4	-	-
	地盤材料	125	30	24	8.8	2.7	0.44	68	5.9	-	-
5	土質材料	75	232	17	6.1	1.8	0.70	33	2.3	-	-
6	土質材料	75	20	14	4.9	1.5	0.57	35	2.1	-	-
	地盤材料	125	21	15	5.2	1.7	0.59	36	2.2	-	-
7	土質材料	75	30	23	5.9	1.3	0.64	47	1.8	-	-
	地盤材料	125	31	23	6.3	1.3	0.65	48	2.0	-	-
8	土質材料	75	21	16	6.3	2.3	0.73	29	2.6	-	-
9	土質材料	75	23	17	5.5	1.6	0.67	34	2.0	-	-
10	土質材料	75	27	21	11	6.1	1.6	17	2.8	-	-
	地盤材料	125	31	24	12	7.0	1.9	16	2.4	-	-
11	土質材料	75	27	22	12	7.5	2.6	10	2.1	-	-
	地盤材料	300	30	24	13	8.4	2.6	12	2.2	-	-
12	土質材料	75	32	26	15	9.0	1.6	20	4.4	-	-
	地盤材料	125	33	27	15	9.4	1.7	19	4.0	-	-
13	土質材料	75	25	22	15	10	4.8	5.2	1.9	-	-
	地盤材料	125	25	22	15	10	5.0	5.0	1.8	-	-



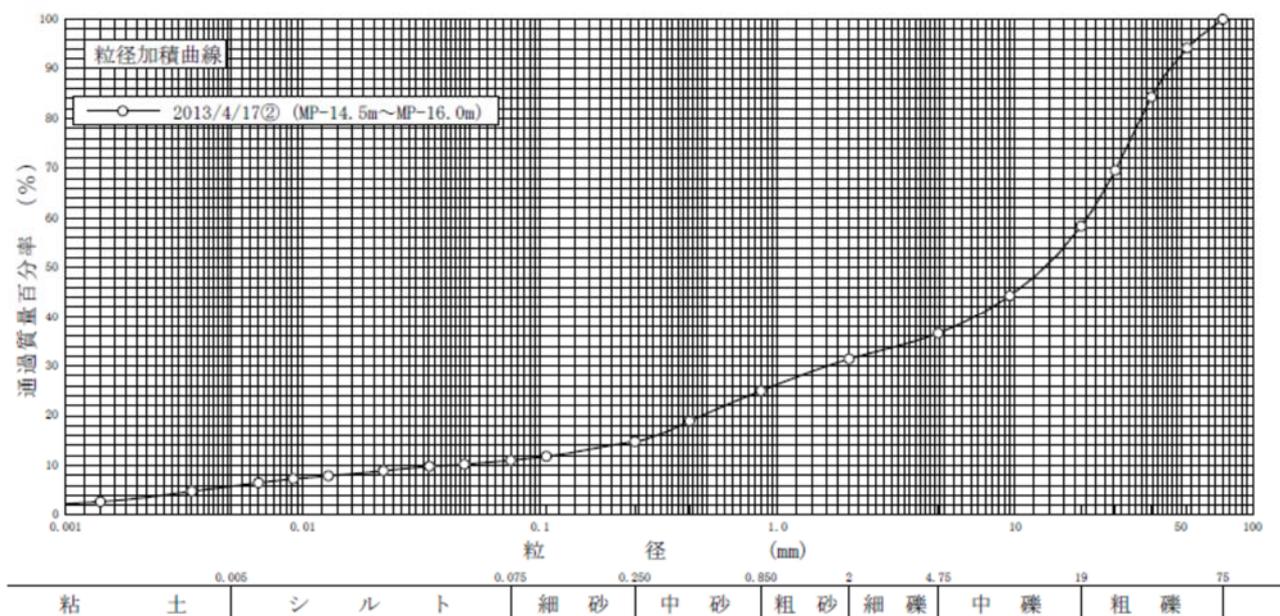
(1) 試料 No.1



(2) 試料 No.2

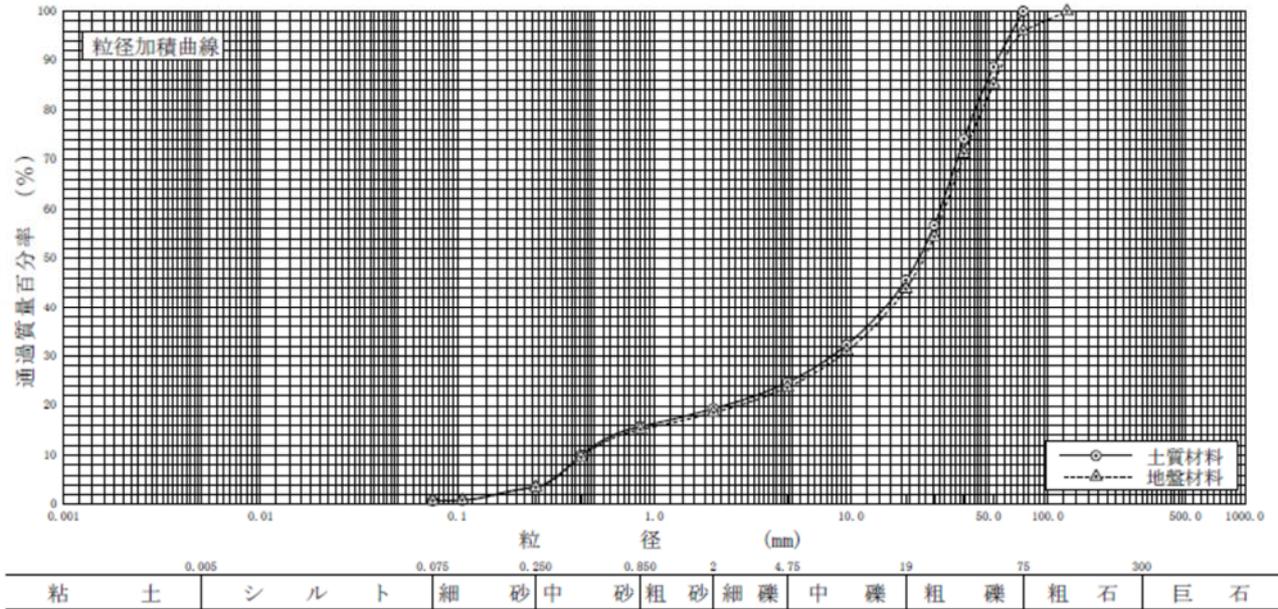


3-①

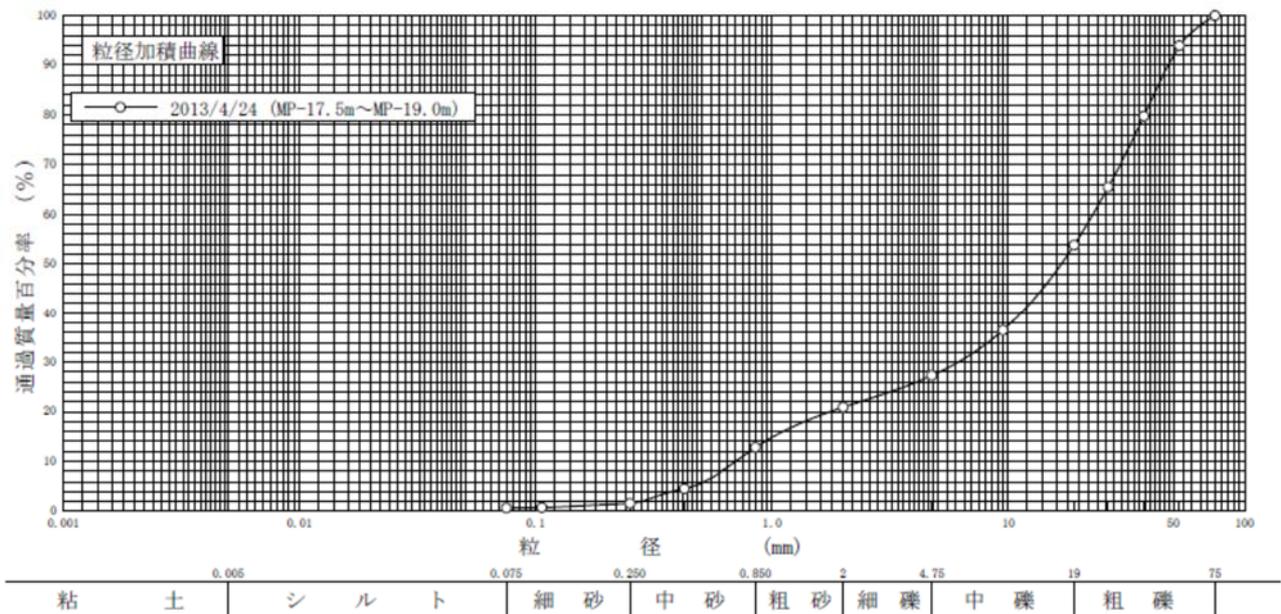


3-②

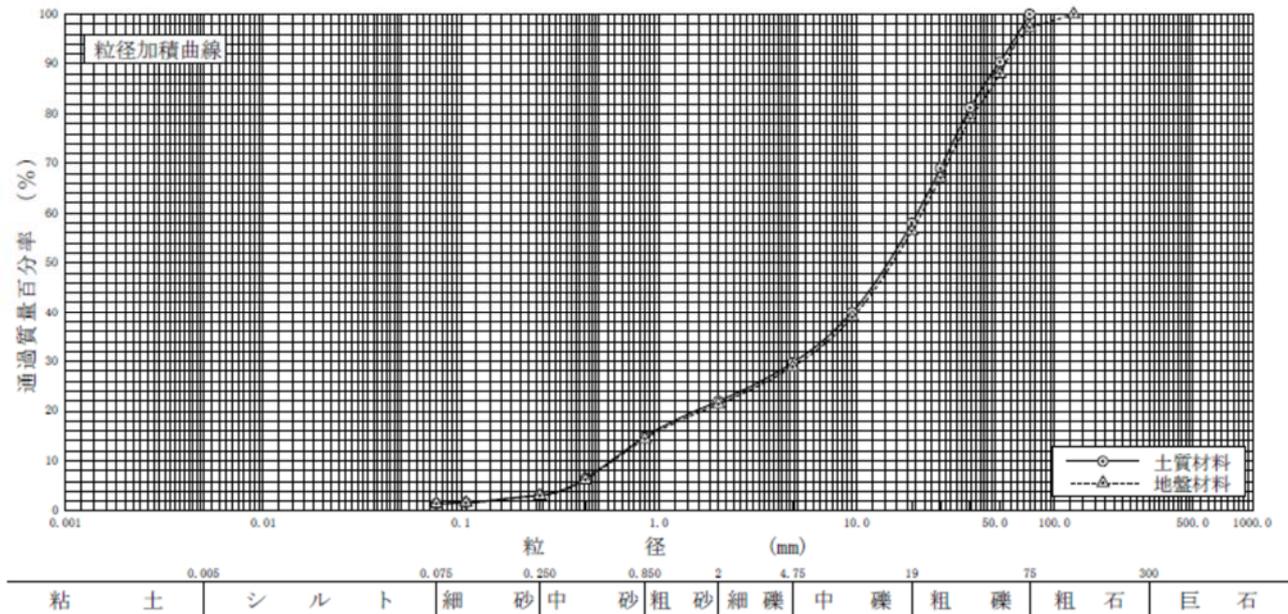
(3) 試料 No.3



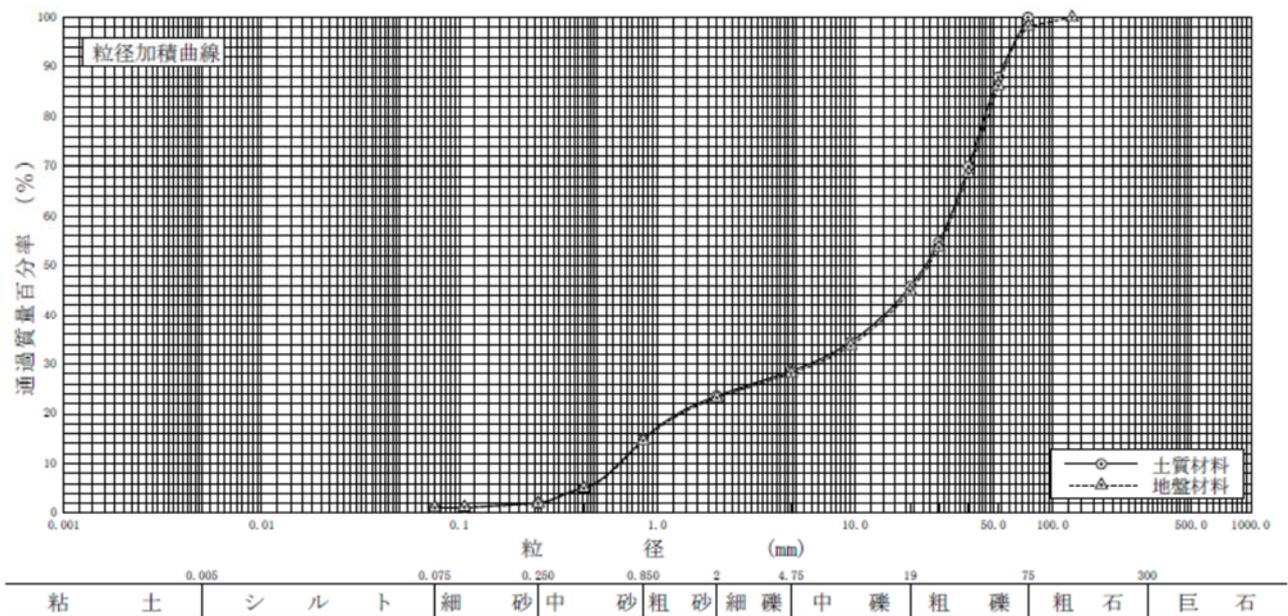
(4) 試料 No.4



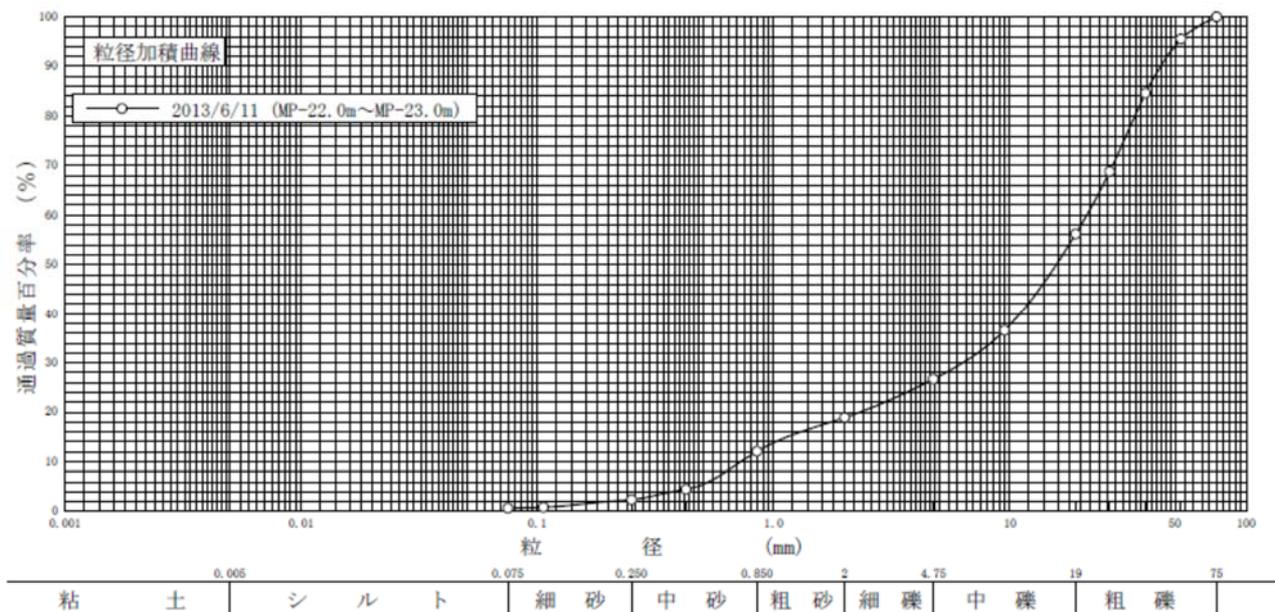
(5) 試料 No.5



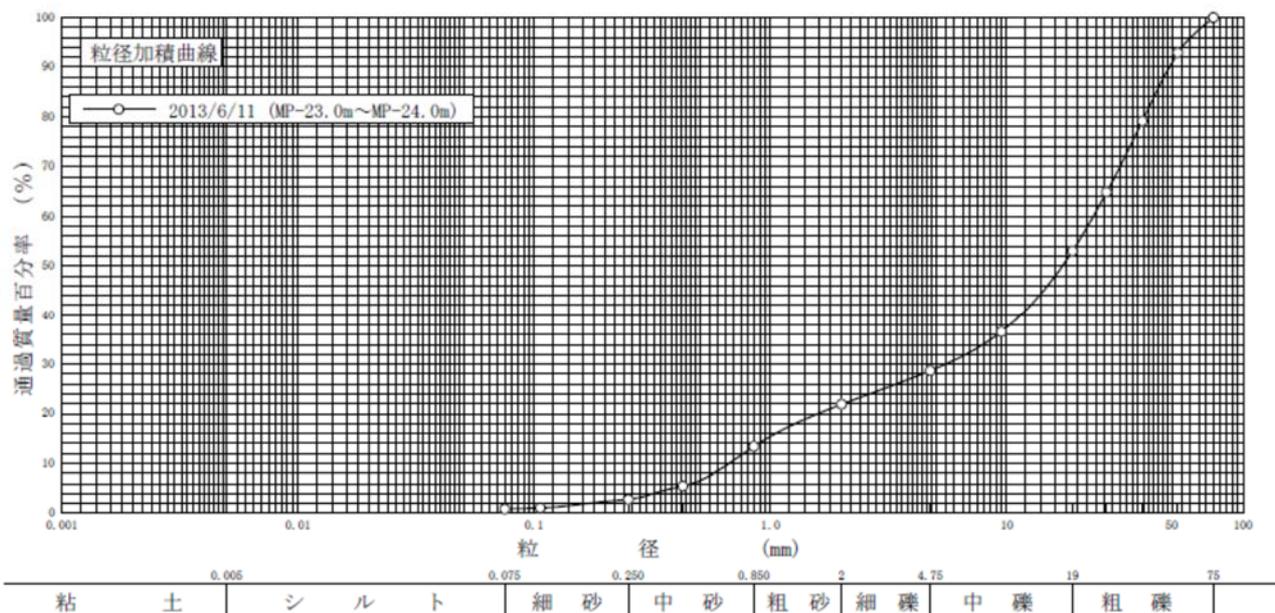
(6) 試料 No.6



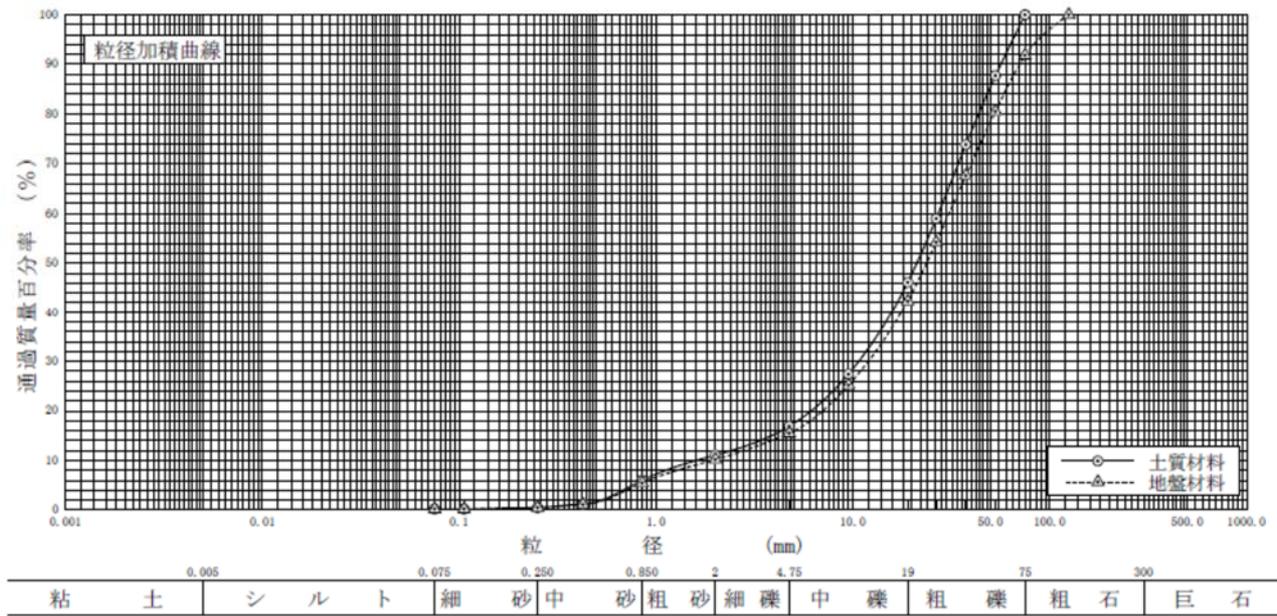
(7) 試料 No.7



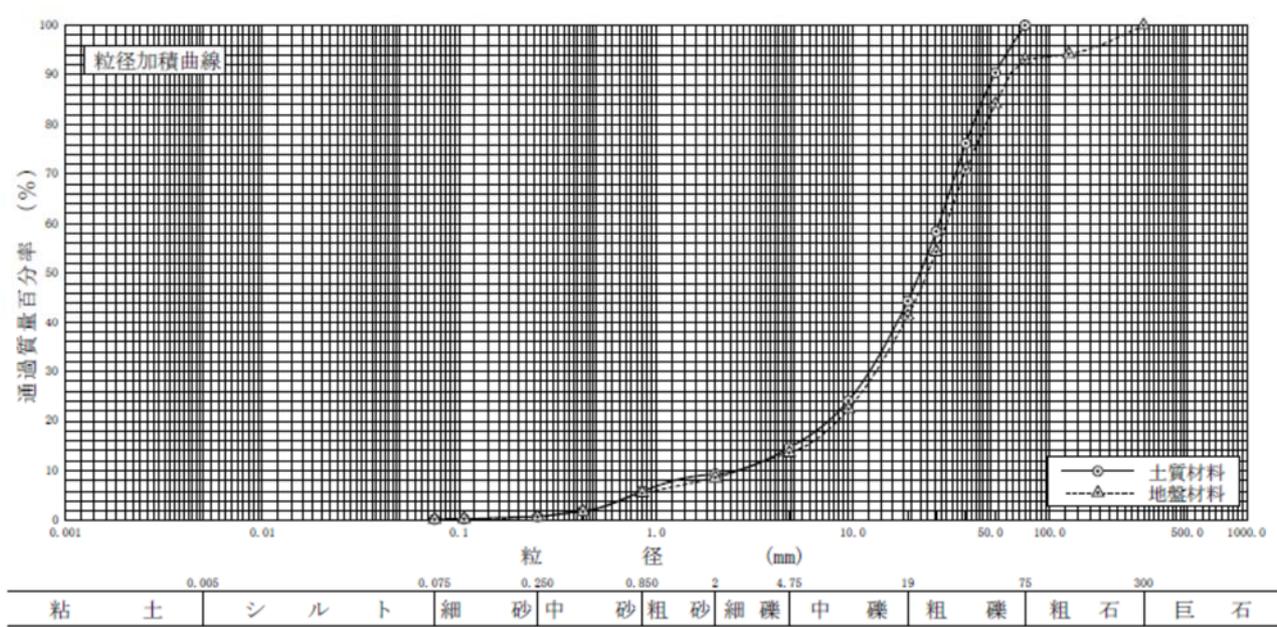
(8) 試料 No.8



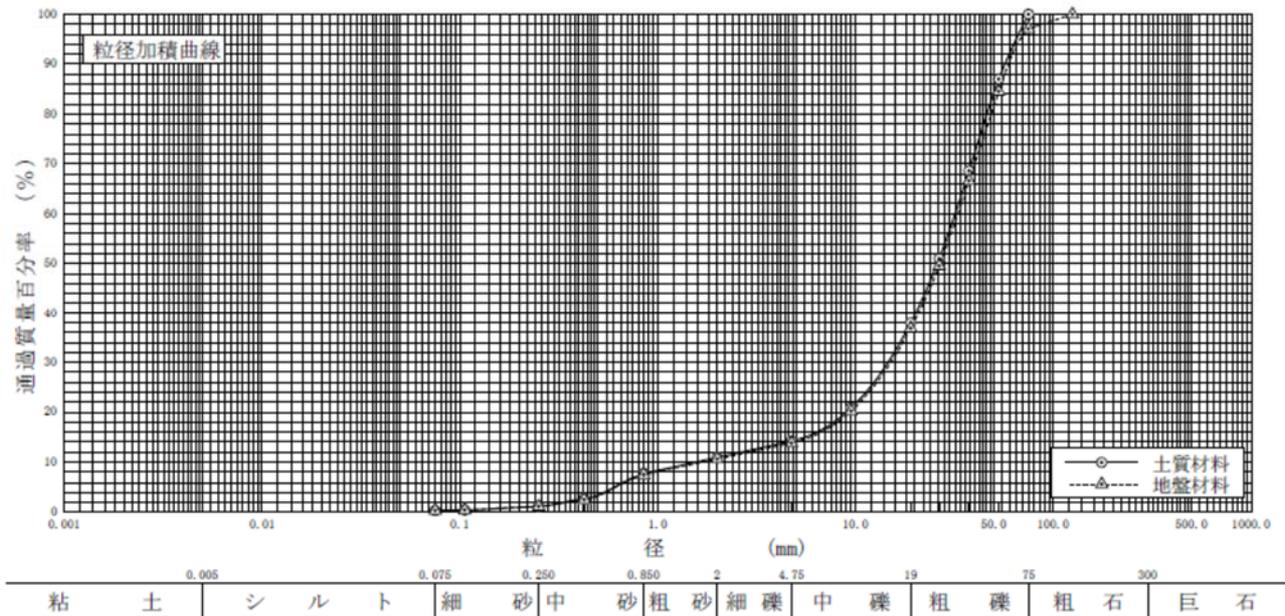
(9) 試料 No.9



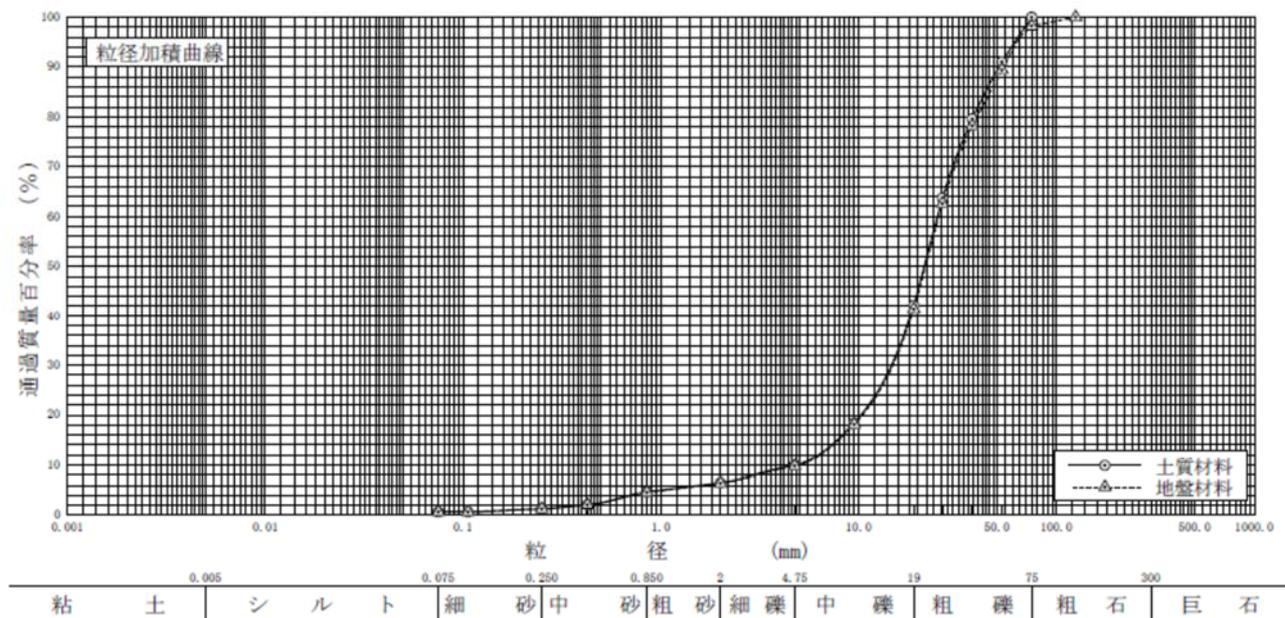
(10) 試料 No.10



(11) 試料 No.11



(12) 試料 No.12



(13) 試料 No.13

図 6.3.3 各採取箇所における試料の粒径加積曲線

### 6. 3. 2 地盤材料の工学的分類

地盤材料の観察による評価や、粒度、液性限界・塑性限界などの比較的簡単な試験の結果に基づいて、地盤材料を工学的特徴の類似したグループに分類することを「地盤材料の工学的分類」という。礫や砂などの粗粒分の多い材料の工学的性質は、粒度に強く依存している。一方、シルトや粘土などの細粒分の多い材料の工学的性質は、コンシステンシーに強く依存している。地盤材料の多くは、粗粒分と細粒分の両方を含んでいるので、粒度とコンシステンシー限界に基づいて分類される<sup>5)</sup>。

ここでは、採取した試料について実施した「石分を含む地盤材料の粒度試験」，「土の粒度試験」，「土粒子の密度試験」（細粒分が多い採取試料）から地盤材料の工学的分類を行った結果を示す。

#### 6. 3. 2. 1 工学的分類方法の概略

地盤材料は粒径によって図 6.3.4 に示すように岩石質材料，石分まじり土質材料，土質材料に区分される。土質材料は，観察，粒度，液性限界・塑性限界等に基づいて分類する。

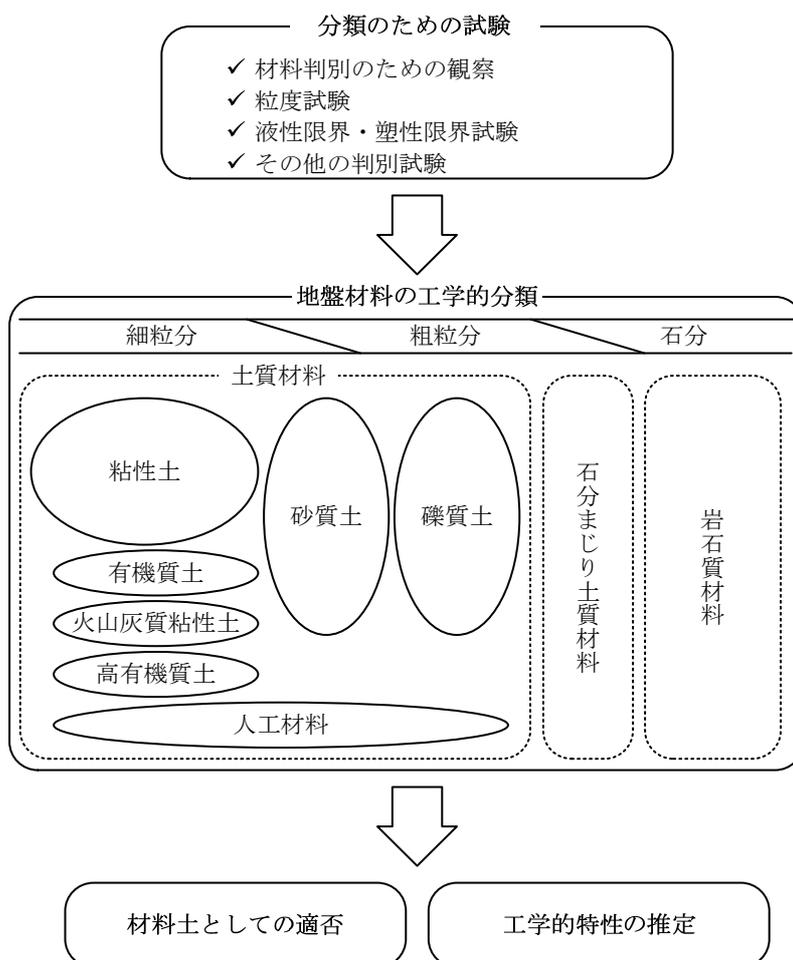


図 6.3.4 地盤材料の工学的分類

### 6. 3. 2. 2 地盤材料の分類

#### (1) 地盤材料の分類体系

粒径 75mm 以上の石分を含む地盤材料は、粒径によって図 6.3.1 のように粒径区分され、それぞれ呼び名が定められている。また地盤材料の工学的分類体系は、図 6.3.5 のように定められている。

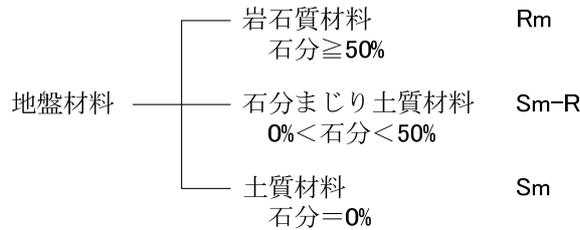


図 6.3.5 地盤材料の工学的分類体系

#### (2) 土質材料の大分類

粒径 75mm 未満の土質材料は、主に観察によって、粗粒分または細粒分の含有率、礫分または砂分および有機物の多少、人工材料であるかどうかによって図 6.3.6 にしたがって大分類される

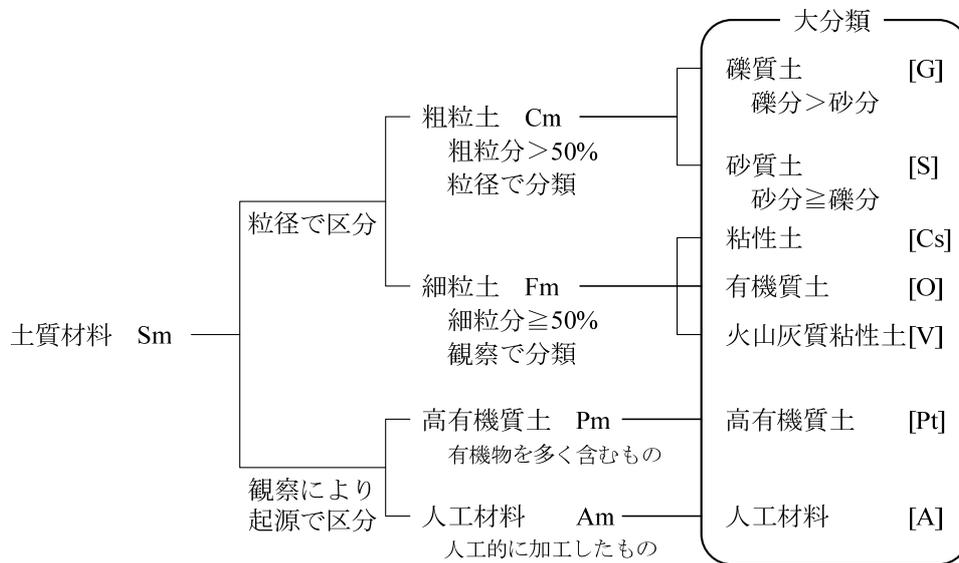


図 6.3.6 土質材料の工学的分類体系 (大分類)

### (3) 土質材料の中小分類（粗粒土）

土質材料のうち粗粒土の工学的分類体系を図 6.3.7 に示す。礫質土は礫分が砂分よりも多い土質材料であり、その分類は図 6.3.7 のように礫分、砂分および細粒分の含有率によって礫 {G}，砂礫 {GS}，細粒分まじり礫 {GF} に中分類し、さらに細粒分、砂分の含有率によって小分類する。砂質土は砂分が礫分よりも多い土質材料であり、その分類は図 6.3.7 のように礫分、砂分および細粒分の含有率によって砂 {S}，礫質砂 {SG}，細粒分まじり砂 {SF} に中分類し、さらに細粒分、砂分の含有率によって小分類する。

#### 6. 3. 2. 3 地盤材料の工学的分類結果とボーリング調査結果との比較

採取地点毎の地盤材料について「6. 3. 1 地盤材料の粒度試験」にて得られた粒度組成等から地盤材料を工学的に分類したところ、図 6.3.8 のような結果となった。なお、図 6.3.8 左側には、鑑定嘱託書 I-2013-05 添付資料 2 水島ルネッサンス計画ボーリング調査工事報告書（抄）写し のボーリング柱状図（ボーリング名：JE.1，調査位置：岡山県倉敷市潮通 2-1）の土砂採取深度付近の土質区分，記事を併せて記載してある。このボーリング柱状図に記載されている土質区分は主に目視観察（一般的に体積混合比を反映しているものと見られる）で判別しており，地盤材料の工学的分類と一義的に対応していない。公益社団法人地盤工学会では，判別・分類指標の異なる両者の対応表として表 6.3.4<sup>6)</sup> のようなものを示しており，立坑でのボーリング柱状図とシールド機前面から採取した土砂の傾向は概ね一致する。

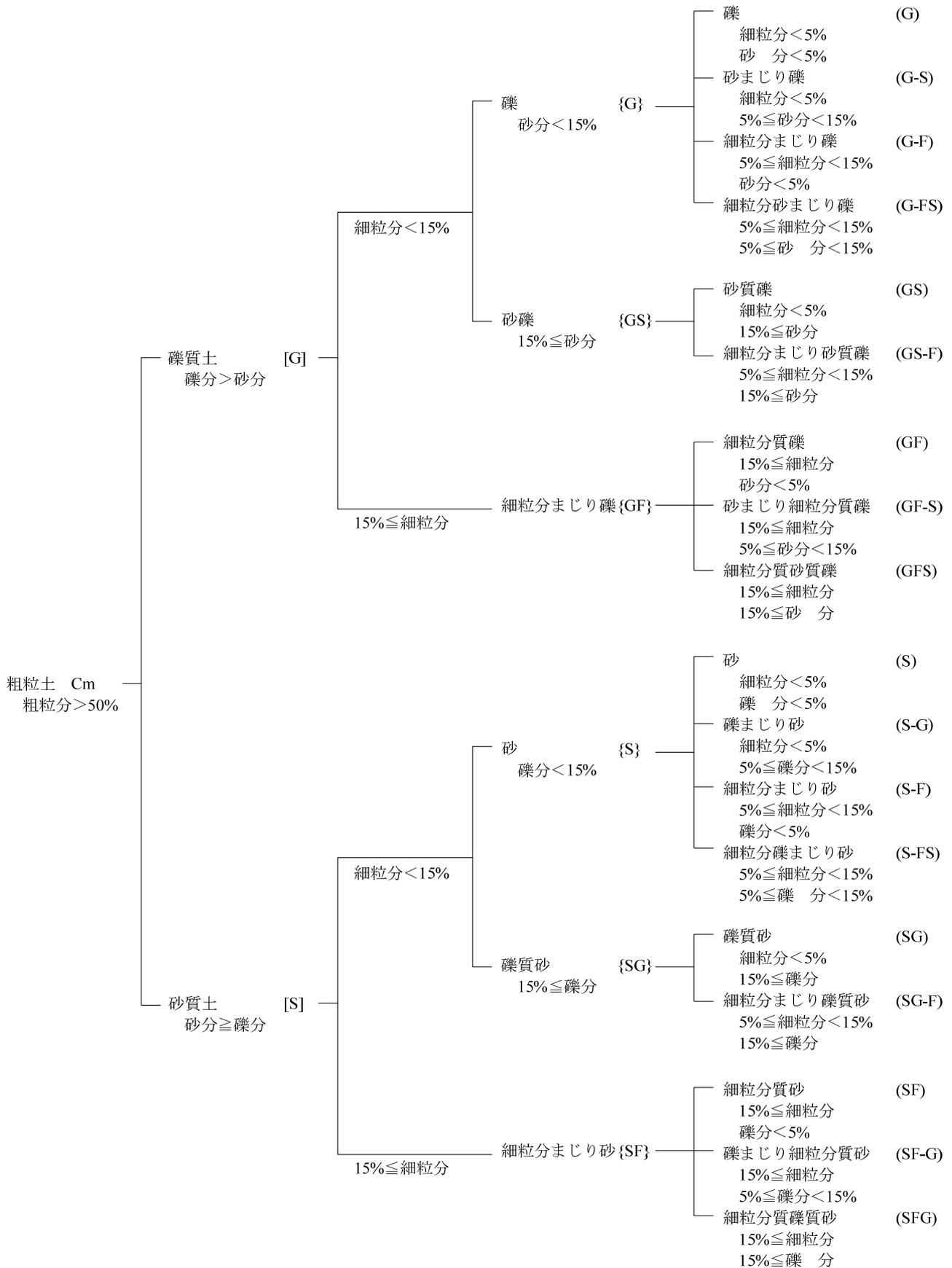


図 6.3.7 粗粒土の工学的分類体系

深度 ( $\text{m}$ )	鑑定囑託書別添資料2 ボーリング柱状図			試料No.	地盤材料の工学的分類名
	土質区分	記事			
-11.50					
-11.79	砂質 シルト	比較的均質。粘性中位。 所々シルトをブロック状に混入。 所々貝殻片を極く少量混入。 下部、砂分の含有多い。		1	砂まじり細粒土 (F-S)
-14.79	砂 礫	$\phi 2\sim 50\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体。 所々 $100\sim 150\text{mm}$ の玉石混入。 マトリックスは細砂で、若干細粒分含有。		2	砂まじり礫質細粒土 (FG-S)
-15.14	玉石混じり 砂 礫	$\phi 2\sim 70\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫からなり、 $\phi 30\sim 50\text{mm}$ の礫を主体とする。所々 $100\sim 120\text{mm}$ 玉石混入。		3	粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R) / 細粒分まじり砂質礫 (GS-F)
-15.94	玉石混じり 砂 礫	$\phi 2\sim 70\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫からなり、 $\phi 30\sim 50\text{mm}$ の礫を主体とする。所々 $100\sim 120\text{mm}$ 玉石混入。			
-16.64	砂 礫	$\phi 2\sim 30\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体		4	粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R)
-17.24	礫混じり 細 砂	$\phi 2\sim 50\text{mm}$ の礫混入。粒径均一。			
-18.39	砂 礫	$\phi 2\sim 50\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体。 マトリックスは細砂～中砂。		5	粒径幅の広い砂質礫 (GWS)
				6	粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R)
	砂 礫	$\phi 2\sim 50\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体。 マトリックスは細砂で若干細粒分を含有。		7	粒径幅の広い砂質礫-R (GWS-R)
				8	粒径幅の広い砂質礫 (GWS)
				9	粒径幅の広い砂質礫 (GWS)
-23.69					
-24.24	粘土混じり 細 砂	粒径均一。		10	粒径幅の広い砂まじり礫-R (GW-SR)
	粘土質 砂 礫	$\phi 2\sim 30\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体。 マトリックスは粘土質細砂～砂質粘土。		11	粒径幅の広い砂まじり礫-R (GW-SR)
				12	粒径幅の広い砂まじり礫-R (GW-SR)
-27.04					
-27.99	砂 礫	$\phi 2\sim 50\text{mm}$ の亜円礫～亜角礫主体。 所々細砂をブロック状に混入。		13	分級された砂まじり礫-R (GP-SR)

図 6.3.8 採取地点毎における立坑のボーリング柱状図の土質記載箇所（左）と地盤材料の工学的分類名（右）

表 6.3.4 地盤材料の分類名と現場土質名との対応 <sup>6)</sup>を加筆修正

現場土質名		地盤材料の分類名				
大区分	小区分	大分類	中分類	小分類		
礫質土	玉石まじり礫 礫（粗礫・中礫・細礫） 砂まじり礫 腐植物（貝殻・火山灰）まじり 礫	粗粒土	礫	礫		
	玉石まじり砂礫 砂礫 粘土まじり砂礫 有機質砂礫 火山灰質砂礫・凝灰質砂礫			砂まじり礫		
				粗粒分まじり礫		
			粗粒分砂まじり礫			
	砂質土		砂（粗砂・中砂・細砂） 礫まじり砂 腐植物（貝殻・火山灰）まじり 砂	粗粒土	砂	砂
						砂礫 粘土まじり砂・粘土質砂 有機質砂 火山灰質砂・凝灰質砂
細粒分まじり砂						
砂礫 粘土まじり砂・粘土質砂 有機質砂 火山灰質砂・凝灰質砂		砂質土	礫質砂		細粒分まじり砂	
					礫質砂	
					細粒分まじり礫質砂	
砂礫 粘土まじり砂・粘土質砂 有機質砂 火山灰質砂・凝灰質砂	砂質土	細粒分	砂質礫			
			細粒分まじり砂質礫			
			細粒分質砂質礫			

### 6. 3. 3 各採取地点毎の透水係数の推定

#### 6. 3. 3. 1 透水性の目安「透水係数」

土の透水性を表す目安として透水係数がある。透水係数は速度の次元を持ち、主に間隙の半径で代表される土の構造と間隙流体の粘性係数に支配される。図 6.3.9 に透水係数と地盤材料の大まかな区分を示す。礫の  $k=10^0(\text{m/s})$  程度から粘土の  $k=10^{-12}(\text{m/s})$  程度まで 10 の 12 乗ほどの広範囲にわたる<sup>7)</sup>。

		透水係数 $k$ (m/s)											
		$10^{-11}$	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$
透水性		実質上不透水		非常に低い		低		中		高		高い	
対応する土の種類		粘性土		微細砂, シルト, 砂-シルト-粘土混合土				砂および礫			清浄な礫		

図 6.3.9 透水係数と地盤材料区分

土中の間隙流体の流れが管中の流れで近似できると考えると、間隙比（間隙率）や粒子の代表径と関連づけて透水係数の値を考えることができる。このような概念で多くの研究者が透水係数の概略値の推定を行っている。ここでは、採取地点毎の採取試料の透水係数について「6. 3. 1 地盤材料の粒度試験」によって得られた粒径加積曲線の通過質量百分率の所定値に相当する粒径から透水係数の概略値を推定した。

#### 6. 3. 3. 2 透水係数の推定方法

透水係数を推定する方法として様々なものが提案されているが、ここでは以下の推定方法について記載した。

- (1) Creager（クレーガー）の提案表<sup>8)</sup>
  - (2) 工藤らの粗粒材を対象とした透水係数算定式<sup>9)</sup>
  - (3) 森田らの幅広い種類の土の既往試験結果に基づく透水係数算定式<sup>10)</sup>
- 以下、これらの推定方法について説明する。

##### (1) Creager（クレーガー）の提案表<sup>8)</sup>

クレーガーは代表径として、20%粒径  $D_{20}$  を用いて透水係数の概略値を求める表 6.3.5 を提案した。クレーガーの提案表は、 $D_{20}$  だけから透水係数を推定できることや、この表から指数関数の近似式で表記できるため、我が国の現場では多用されて現在に至っている。このクレーガーの提案表は、特殊土の一つである均等係数の小さい「レス土」を含むアメリカ合衆国中部にある 4 つのダムサイトにて実施された数百例の浸透試験結果から得られた平均的な値であって、原文には「現場における極めて大まかな概算値を表す。密度、温度あるいは間隙率の違いが透水係数には大きな違いになる」との断りがある。また、 $D_{20}$  が 2.0mm の細礫までが対象となっている点に注意が必要である。

今回各層から採取した試料の  $D_{20}$  を見ると、2.0mm 以上の試料も散見されるが、指数関数式に代入し外挿することで透水係数を算出している。今回使用した式を下記に示す。

$$k = 0.0034D_{20}^{2.2954}$$

ここで、 $k$  : 透水係数(m/sec)

$D_{20}$  : 20%粒径

表 6.3.5 クレーガーによる  $D_{20}$  と透水係数

$D_{20}$ (mm)	$k$ (cm/sec)	土質分類	$D_{20}$ (mm)	$k$ (cm/sec)	土質分類
0.005	$3.00 \times 10^{-6}$	粗粒粘土	0.18	$6.85 \times 10^{-3}$	微粒砂
0.01	$1.05 \times 10^{-5}$	細粒シルト	0.20	$8.90 \times 10^{-3}$	
0.02	$4.00 \times 10^{-5}$	粗砂シルト	0.25	$1.40 \times 10^{-2}$	中粒砂
0.03	$8.50 \times 10^{-5}$		0.3	$2.20 \times 10^{-2}$	
0.04	$1.75 \times 10^{-4}$		0.35	$3.20 \times 10^{-2}$	
0.05	$2.80 \times 10^{-4}$		0.4	$4.50 \times 10^{-2}$	
0.06	$4.60 \times 10^{-4}$	極微粒砂	0.45	$5.80 \times 10^{-2}$	粗粒砂
0.07	$6.50 \times 10^{-4}$		0.5	$7.50 \times 10^{-2}$	
0.08	$9.00 \times 10^{-4}$		0.6	$1.10 \times 10^{-1}$	
0.09	$1.40 \times 10^{-3}$		0.7	$1.60 \times 10^{-1}$	
0.10	$1.75 \times 10^{-3}$	微粒砂	0.8	$2.15 \times 10^{-1}$	粗粒砂
0.12	$2.6 \times 10^{-3}$		0.9	$2.80 \times 10^{-1}$	
0.14	$3.8 \times 10^{-3}$		1.0	$3.60 \times 10^{-1}$	
0.16	$5.1 \times 10^{-3}$		2.0	$1.80 \times 10^{-0}$	

(2) 工藤らの粗粒材を対象とした透水係数算定式<sup>9)</sup>

工藤らは粗粒材を対象として粗粒材の透水係数に影響すると考えられる、粒度および密度に着目し、これらを変動要因とした透水試験を行い、粒径と間隙比から粗粒材の透水係数の算定法を検討した。実験式の同定には間隙比が考慮できる Poiseuille 式を採用して以下の式を提案した。

$$k = 0.406 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} D_{30}$$

ここに、 $k$  : 透水係数

$\gamma_w$  : 水の密度 (0.99910g/cm<sup>3</sup>)

$\mu$  : 水の粘性係数 (0.0114dyn · s/cm<sup>2</sup>)

$e$  : 間隙比 (  $e = n/(1-n)$  )

$D_{30}$  : 30%粒径

$U_c$  : 均等係数

(3) 森田らの幅広い種類の土の既往試験結果に基づく透水係数算定式<sup>10)</sup>

森田らは国内の約 200 個の室内透水試験結果とその土の粒度試験結果を用いて粒度特性値と間隙率を加味した透水係数推定式を提案している。彼らが提案した式を下記に示す。

$$k = 0.052(D_{30})^{1.5} U_c^{-0.8} n^{4.4}$$

ここに、 $k$ ：透水係数

$D_{30}$ ：30%粒径

$U_c$ ：均等係数

$n$ ：間隙率（%値の 1/100）

上記に示したいずれの推定方法もかなりの推定誤差を伴うものとして認識されていることや、適用範囲が限定されていることに注意が必要である。また、(2) や (3) の透水係数推定式では、試料の間隙率  $n$  や間隙比  $e$  が重要な要素となっている。しかし地層中の試料の締め固まり程度は不明なことが多い。そのため一般的には透水係数のオーダーを決める場合に利用されることが多い。当該鑑定では、立坑のボーリング調査の結果から相対密度が「密な～非常に密な」結果であったことや、水理公式集より未固結地盤の有効間隙率は表 6.3.6 のように示されていること等から、今回の透水係数の推定には、表 6.3.6 のうち洪積砂礫層の有効間隙率 15～20 を参考として、 $n=10, 15, 45$  として検討を行った。

表 6.3.6 有効間隙率の参考値（未固結地盤）<sup>11)</sup>

地層	間隙率	有効間隙率	地層	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

6.3.3.3 各種推定方法から得られた透水係数

表 6.3.7 に各採取地点において推定された透水係数を一覧で示す。上記のように透水係数の推定には誤差を伴うものとして認識されているが、いずれの推定方法によっても、砂礫層の透水係数は  $10^{-2} \sim 10^3$ (m/s) に位置し、粘土層の透水係数は  $10^{-8} \sim 10^{-5}$ (m/s) に位置している。なお、(2)、(3) の算定式は間隙率に支配されるが、当該地盤は比較的密な地盤であることから間隙率  $n$  は小さいことが想定されており、 $n=15$  程度が妥当な値である。

表 6.3.7 様々な推定方法から得られた各採取地点から採取された試料の透水係数

試料 No.	地盤材料の分類名	分類記 号	粒度物性値			推定透水係数 $k$ (m/s)						
			20%粒径 $D_{20}$ (mm)	30%粒径 $D_{30}$ (mm)	均等係数 $U_c$ (mm)	Creager 提案表	工藤らの透水係数算定式			森田らの透水係数算定式		
							間隙率 $n$			間隙率 $n$		
							10	15	45	10	15	45
1	砂まじり細粒土	F-S	—	0.0013	-	-	$7.4 \times 10^{-8}$	<b><math>2.8 \times 10^{-7}</math></b>	$1.8 \times 10^{-5}$	—	—	—
2	砂まじり礫質細粒土	FG-S	—	0.002	-	-	$1.8 \times 10^{-7}$	<b><math>6.6 \times 10^{-7}</math></b>	$4.3 \times 10^{-5}$	—	—	—
3	粒径幅の広い砂質礫-R	GWS-R	2.5	6.5	40	$3.1 \times 10^0$	$1.9 \times 10^0$	<b><math>7.0 \times 10^0</math></b>	$4.5 \times 10^2$	$1.8 \times 10^{-2}$	<b><math>1.1 \times 10^{-1}</math></b>	$1.3 \times 10^{+1}$
	細粒分まじり砂質礫	GS-F	0.48	1.6	500	$6.3 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	<b><math>4.3 \times 10^{-1}</math></b>	$2.7 \times 10^1$	$2.9 \times 10^{-4}$	<b><math>1.7 \times 10^{-3}</math></b>	$2.2 \times 10^{-1}$
4	粒径幅の広い砂質礫-R	GWS-R	2.7	8.8	67	$3.8 \times 10^0$	$3.4 \times 10^0$	<b><math>1.3 \times 10^1</math></b>	$8.3 \times 10^2$	$1.9 \times 10^{-2}$	<b><math>1.1 \times 10^{-1}</math></b>	$1.4 \times 10^1$
5	粒径幅の広い砂質礫	GWS	1.8	6.1	33	$1.4 \times 10^0$	$1.6 \times 10^0$	<b><math>6.2 \times 10^0</math></b>	$4.0 \times 10^2$	$1.9 \times 10^{-2}$	<b><math>1.1 \times 10^{-1}</math></b>	$1.4 \times 10^1$
6	粒径幅の広い砂質礫-R	GWS-R	1.7	5.2	35	$1.3 \times 10^0$	$1.2 \times 10^0$	<b><math>4.5 \times 10^0</math></b>	$2.9 \times 10^2$	$1.4 \times 10^{-2}$	<b><math>8.5 \times 10^{-2}</math></b>	$1.1 \times 10^1$
7	粒径幅の広い砂質礫-R	GWS-R	1.3	6.3	47	$6.7 \times 10^{-1}$	$1.7 \times 10^0$	<b><math>6.6 \times 10^0</math></b>	$4.3 \times 10^2$	$1.5 \times 10^{-2}$	<b><math>9.0 \times 10^{-2}</math></b>	$1.1 \times 10^1$
8	粒径幅の広い砂質礫	GWS	2.3	6.3	29	$2.6 \times 10^0$	$1.7 \times 10^0$	<b><math>6.6 \times 10^0</math></b>	$4.3 \times 10^2$	$2.2 \times 10^{-2}$	<b><math>1.3 \times 10^{-1}</math></b>	$1.7 \times 10^1$
9	粒径幅の広い砂質礫	GWS	1.6	5.5	34	$1.1 \times 10^0$	$1.3 \times 10^0$	<b><math>5.0 \times 10^0</math></b>	$3.2 \times 10^2$	$1.6 \times 10^{-2}$	<b><math>9.5 \times 10^{-2}</math></b>	$1.2 \times 10^1$
10	粒径幅の広い砂まじり礫-R	GW-SR	7.0	12	17	$3.6 \times 10^1$	$6.3 \times 10^0$	<b><math>2.4 \times 10^1</math></b>	$1.5 \times 10^3$	$8.9 \times 10^{-2}$	<b><math>5.3 \times 10^{-1}</math></b>	$6.7 \times 10^1$
11	粒径幅の広い砂まじり礫-R	GW-SR	8.4	13	10	$5.6 \times 10^1$	$7.4 \times 10^0$	<b><math>2.8 \times 10^1</math></b>	$1.8 \times 10^3$	$1.5 \times 10^{-1}$	<b><math>9.2 \times 10^{-1}</math></b>	$1.2 \times 10^2$
12	粒径幅の広い砂まじり礫-R	GW-SR	9.4	15	20	$7.3 \times 10^1$	$9.9 \times 10^0$	<b><math>3.7 \times 10^1</math></b>	$2.4 \times 10^3$	$1.1 \times 10^{-1}$	<b><math>6.5 \times 10^{-1}</math></b>	$8.2 \times 10^1$
13	分級された砂まじり礫-R	GP-SR	10	15	5.2	$8.4 \times 10^1$	$9.9 \times 10^0$	<b><math>3.7 \times 10^1</math></b>	$2.4 \times 10^3$	$3.2 \times 10^{-1}$	<b><math>1.9 \times 10^0</math></b>	$2.4 \times 10^2$

#### 6. 4 本章のまとめ

- (1) 水島地域の地質に関する既往の研究から、当該工事付近の海底地盤の層順は、沖積層基底面までで①砂層及び泥層、②砂及び泥層、③礫層である。
- (2) 海底地盤調査から、本災害発生箇所付近の海底地盤は、トンネル位置である約 23m 以深までで概ね 3 層に区分できる。
- (3) 海底地盤調査から、本災害後に海底地盤に生じた窪みの中心座標は、トンネルの設計計画座標と比較すると、110 リングの直上に当たる。
- (4) シールドマシン前面から採取した土砂試料を分析した結果、立坑でのボーリング柱状図と傾向は概ね一致する。
- (5) 既往の研究からいくつか提案されている透水係数の推定方法を用いて本試料の透水係数を算出したところ、砂礫層の透水係数は  $10^{-2} \sim 10^3$ (m/s)に位置し、粘土層の透水係数は  $10^{-8} \sim 10^{-5}$ (m/s)に位置していた。

## 参考文献

- 1) 鈴木茂之: 倉敷市水島地域の沖積地盤地質, 岡山大学地球科学報告書 2006 年第 13 巻 第 1 号, 2006.
- 2) 朝倉夏雄: 初心者のための反射法データ処理, 物理探鉱, 第 35 巻, 第 6 号, pp.47-70, 1982.
- 3) 地盤工学会編: 第 3 編 物理試験 第 4 章粒度試験 4.2 土の粒度試験, 地盤材料試験の方法と解説, pp.115-125, 2009.
- 4) 地盤工学会編: 第 3 編 物理試験 第 4 章粒度試験 4.4 石分を含む地盤材料の粒度試験, 地盤材料試験の方法と解説, pp.125-127, 2009.
- 5) 地盤工学会編: 第 2 編地盤材料の工学的分類, 地盤材料試験の方法と解説, pp.51-92, 2009.
- 6) 地盤工学会編: 第 4 編地盤材料の工学的分類, 土質試験の方法と解説, pp.212-245, 2000.
- 7) 例えば, 日下部治: 土木系大学講義シリーズ⑦ 土質力学, コロナ社, 266p, 2004.
- 8) Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J. : Engineering for dams, Vol. III : Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, p. 649, 1944.
- 9) 工藤アキヒコ, 西方卯佐男, 玉野浩之, 浅田昌蔵: 粗粒材の透水係数算定式に関する一検討, 第 34 回地盤工学研究発表会 (東京), pp.135-136, 1999.
- 10) 森田悠紀雄, 坪田邦治, 西垣誠, 小松満: 粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法, 土と基礎, Vol. 53, No.7 pp. 5-7, 2005.
- 11) 土木学会編: 水理公式集昭和 46 年改訂版, p365, 1974.