

ねばり強い防潮堤に関する研究

神戸の減災研究会

(株)ニュージェック 山本龍

1. はじめに

■背景

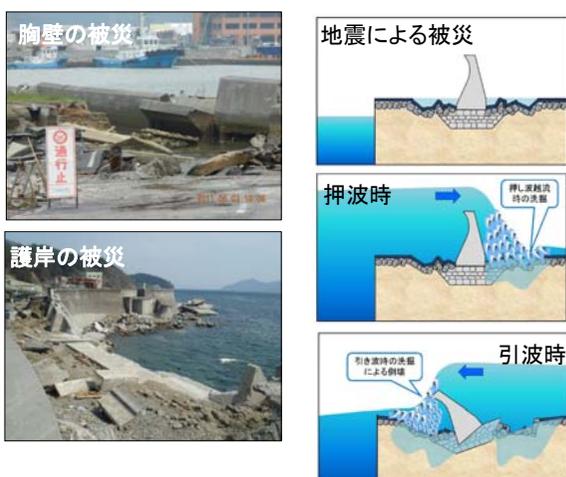
- 東日本大震災により、我が国は大きな人的・経済的損害を受けた。
- 地震および津波によって被災しながらも全壊には至らず、津波による被害を軽減できた施設もあった。
- これらの教訓を踏まえ、津波に対する防災および減災目標の明確化が重要視されている。
- 特に“減災効果”を目的とした構造を「ねばり強い構造」と言われている。
- 近い将来発生する可能性が高い「南海トラフ巨大地震」に伴う最大クラスの津波に対して、ねばり強い防潮堤の整備が望まれている。

1. はじめに

■被災事例

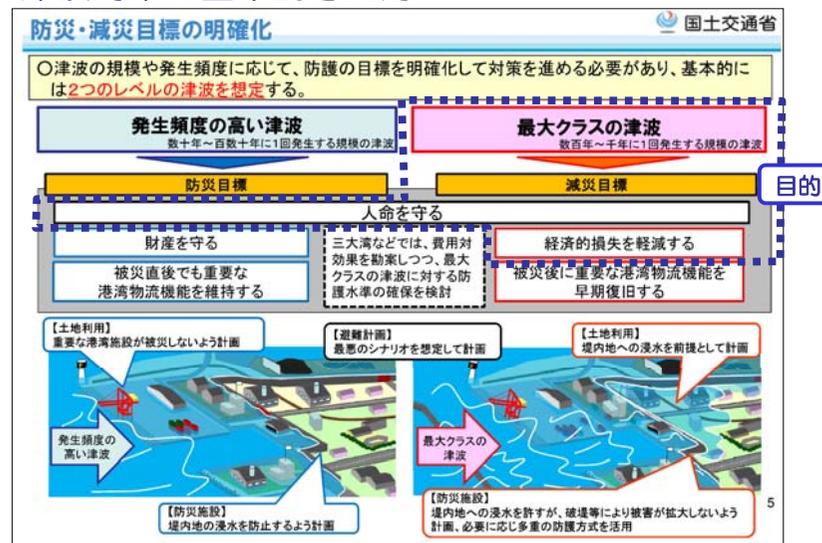


■被災メカニズム



1. はじめに

■津波対策の基本的考え方



2. ねばり強い防潮堤の検討の流れ

(1) 検討対象断面の選定

(2) 最大クラスの津波を引き起こす地震動の想定

(3) 最大クラスの津波の想定

(4) 防潮堤の要求性能の設定

(5) 性能照査方法

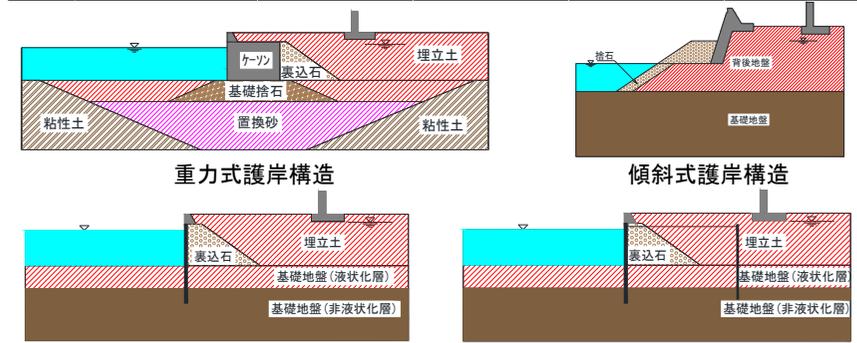
(6) 安定性の照査と対策検討

5

2-1. 検討対象断面の選定

■対象地域の護岸構造形式

| | | 護岸及び岸壁等 構造形式別延長(概数) | | | |
|---------|---------|---------------------|-------|-------|---------|
| 護岸の構造形式 | | 直立型 (重力式) | 傾斜型護岸 | 自立式矢板 | 控え直杭式矢板 |
| 計 | 概算延長(m) | 26,958 | 9,804 | 5,213 | 4,991 |
| | 内訳(%) | (57%) | (21%) | (11%) | (11%) |

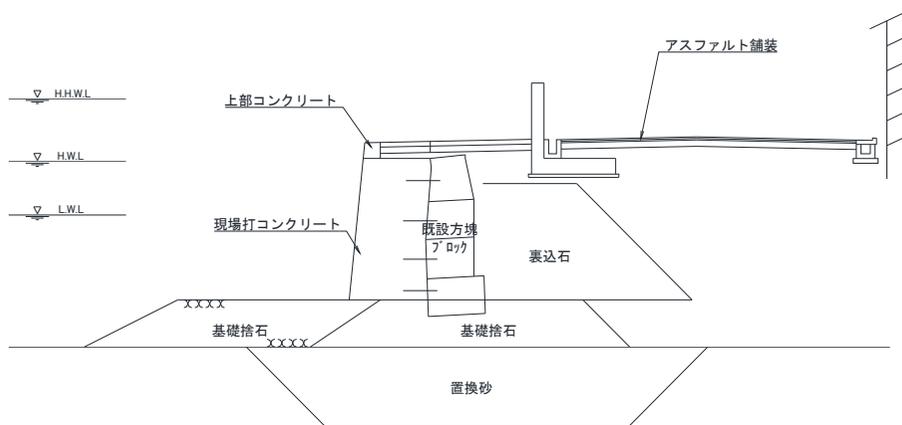


代表的な護岸構造(イメージ図)

6

2-1. 検討対象断面の選定

■検討モデル断面(重力式護岸構造)



7

2-2. 最大クラスの津波を引き起こす地震の想定

■南海トラフ巨大地震を対象とする。

■現在、以下の地震動が公開、提案されている。

- ①内閣府が公開している地震動
- ②(国研)港湾空港技術研究所が提案している地震動

| モデル名称 | モデルの妥当性検証方法 | 目的 |
|------------------|---|--|
| SMGAモデル (内閣府) | 東北地方太平洋沖地震の観測記録を基に、震度が適切に評価できていることを確認することにより行っている。 | 地震動の作用により、各地点における震度が精度よく算出することを主目的としている。 |
| SPGAモデル (港空研) | 耐震検討を視野に入れ、地震波形、スペクトル、及びPSI値が適切に評価できていることを確認することにより行っている。 | 耐震検討用の地震動の評価を主目的としている。 |

8

2-4. 防潮堤の要求性能の設定

■ **目的**：越流しても防護施設は粘り強い構造にすることにより、施設に致命的な損傷がないようにして“減災”を目的とする。

■ **要求性能**：想定される作用に対してある程度の損傷が発生するものの、損傷の程度が施設として致命的とならず、人命の安全確保に重大な影響が生じない範囲に留まること。(安全性の確保)

■ **性能規定**：下表の通り。

| 位置 | 性能規定 |
|-----|-----------------------------------|
| 護岸部 | 護岸前面マウンドの被覆材が津波流速に対して流されないこと。 |
| 胸壁部 | 胸壁の凹凸変位量が壁厚以下とする。 |
| | 胸壁の外部安定(滑動・転倒・支持力)に対して安定性を満足すること。 |
| | 胸壁の内部安定(部材のせん断・曲げ)に対して安定性を満足すること。 |
| | 越流による洗掘防止を図ること。 |

13

2-5. 性能照査方法

■ **地震後の被災状況の推定**

各種解析コードに基づく動的解析手法を用いて、津波が来襲する直前の施設の変形状態を予測する。

■ **津波に対する照査**

● **津波波力に対する安定性の照査**

津波シミュレーションから推定した津波水位から津波波力を算定し、静的荷重として胸壁に作用させることで、所要の安定性の照査を行う。

● **津波流速に対する安定性の照査**

津波シミュレーションから推定した津波流速から、捨石マウンドの被覆材の所要重量を照査する。

14

2-5. 性能照査方法

■ **津波波力の算定**

<谷本式>

$$\eta^* = 3.0a_1$$

$$p_1 = 2.2 \rho_0 g a_1$$

$$p_U = p_1, \quad p_L = p_2$$

ここに、

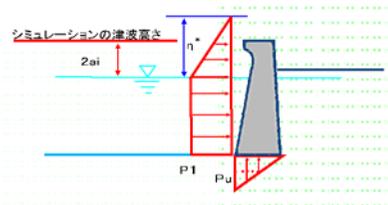
η^* ：静水面上の波圧作用高さ(m)，

a_1 ：シミュレーション等の津波高さ(静水圧面からの高さ)の1/2(m)，

$\rho_0 g$ ：海水の単位体積重量(KN/m³)， P_1 ：基準面における波圧強度(KN/m²)，

P_2 ：直立壁背面における負圧(KN/m²)， p_U ：直立壁前面下端における揚圧力(KN/m²)，

p_L ：直立壁背面下端における揚圧力(KN/m²)



■ **被覆材料の所要重量の算定**

$$M_d = \frac{\pi \rho_r U_d^6}{48 (y_d)^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

ここに、

M_d ：捨石等の安定質量(t)， ρ_r ：捨石等の密度(t/m³)，

U_d ：捨石等の上面における水の流れの速度(m/s)， g ：重力加速度(m/s²)，

y_d ：イソバッシュ(isbash)の定数(埋め込まれた石：1.20，露出した石：0.86)．

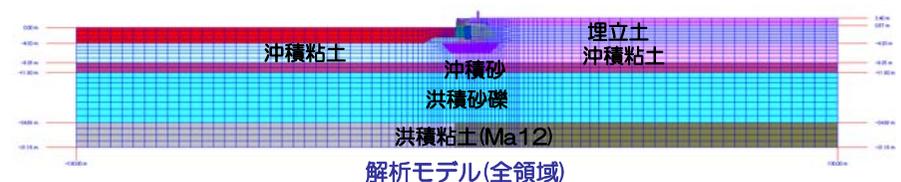
被覆ブロックの場合には1.08．

S_r ：捨石等の水に対する比重， θ ：水路床の軸方向の斜面の勾配(°)

15

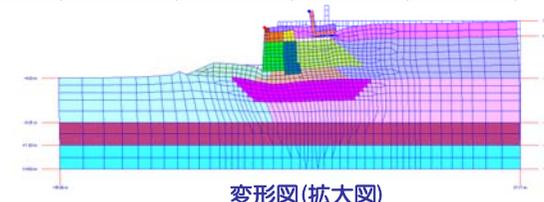
2-6. 安定性の照査と対策検討

■ **地震後の被災状況の推定**



解析モデル(全領域)

| 位置 | 水平変位(m) | 鉛直変位(m) | | | |
|----|---------|---------|------|------|------|
| | | 地震沈下 | 排水沈下 | 地殻変動 | 計 |
| 胸壁 | 1.76 | 0.70 | 0.03 | 0.10 | 0.83 |



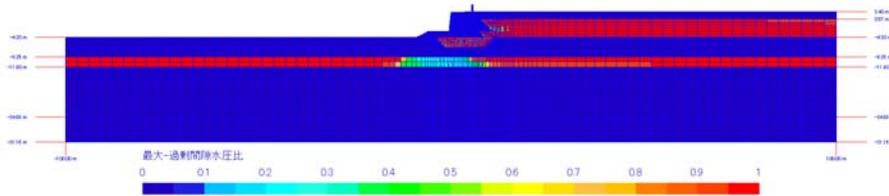
変形図(拡大図)

16

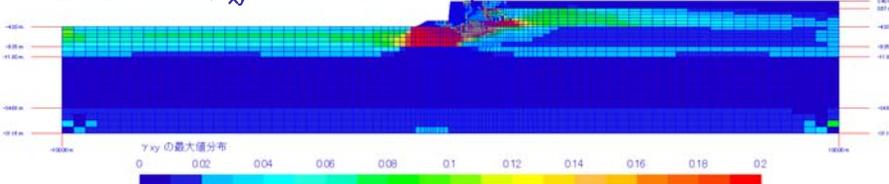
2-6. 安定性の照査と対策検討

■地震後の被災状況の推定

・過剰間隙水圧比の最大値分布



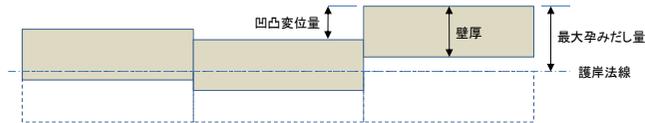
・せん断ひずみ γ_{xy} の最大値分布



2-6. 安定性の照査と対策検討

■地震後の被災状況の推定(目地開き)

- ブロック間における水平方向の相対変位により凹凸変位量が生じ、目地開きが生じる可能性がある。
- 既往の地震被災調査(*)より、「凹凸変位量は法線孕み出し量の約1/2」であることが報告されている。
- 「残留水平変位量×1/2 ≤ 壁厚」を満足させる必要がある。



重力式護岸の最大孕み出し量と凹凸変位のイメージ図

目地開きの被災事例

(*)一井康二, 高橋宏直, 中村隆, 赤倉康寛: 地震時における重力式岸壁の許容被災変形量の評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, K-4, 1998.

2-6. 安定性の照査と対策検討

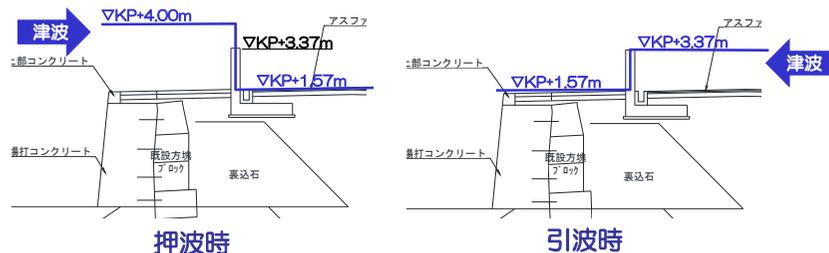
■津波時の安定性照査

| 位置 | 被覆材の重量 (kg) | 津波の条件 | | | |
|--------|-------------|-------|------------|-------------|-------------|
| 前面マウンド | 100 | 津波 | 津波流速 (m/s) | 前面水位 KP+(m) | 背面水位 KP+(m) |
| 防潮堤天端 | | 押波時 | 3.3 | 4.00 | 1.57(地表面) |
| 地表面 | | 引波時 | — | 1.57(地表面) | 3.37(沈下後天端) |

| 位置 | 沈下前標高 KP+(m) | 沈下量 (m) | 沈下後標高 KP+(m) |
|-------|--------------|---------|--------------|
| 防潮堤天端 | 4.20 | 0.83 | 3.37 |
| 地表面 | 2.40 | 0.83 | 1.57 |

※1) 前面: 海側水位, 背面: 陸側
 ※2) 設計潮位はHWLとする

構造物の条件



2-6. 安定性の照査と対策検討

■津波時の安定性照査

| 状態 | 項目 | 耐力および作用力 | | 評価 | |
|-----|----------|----------|----------------|------------------|----|
| 押波時 | 防潮堤 | 滑動 | 36.46(kN/m) | < 39.11(kN/m) | NG |
| | | 転倒 | 147.12(kN・m/m) | > 77.08(kN・m/m) | OK |
| | | 偏心傾斜 | 4432.3(kN・m/m) | > 827.40(kN・m/m) | OK |
| | | 曲げ | 91.32(kN・m) | > 38.60(kN・m) | OK |
| | | せん断 | 96.06(kN/m) | > 46.58(kN/m) | OK |
| | 護岸前面マウンド | 被覆材重量 | 100(kg) | < 152(kg) | NG |
| 引波時 | 防潮堤 | 滑動 | 36.46(kN/m) | > 25.42(kN/m) | OK |
| | | 転倒 | 42.13(kN・m/m) | > 27.79(kN・m/m) | OK |
| | | 偏心傾斜 | 1216.5(kN・m/m) | > 634.50(kN・m/m) | OK |
| | | 曲げ | 46.67(kN・m) | > 9.82(kN・m/m) | OK |
| | | せん断 | 131.64(kN・m/m) | > 16.36(kN・m/m) | OK |
| | 護岸前面マウンド | 被覆材重量 | — | > — | — |

2-6. 安定性の照査と対策検討

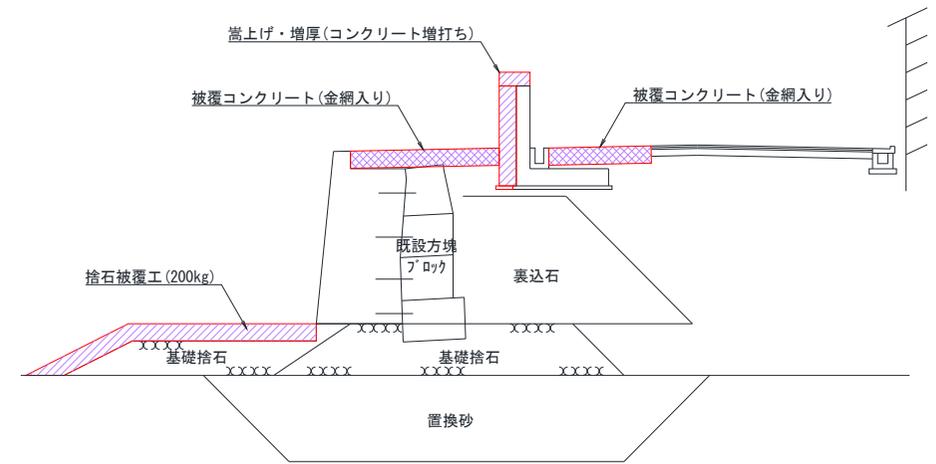
■ 構造の弱点部と対策方針(案)

| 状態 | 構造の弱点部 | 対策方針(案) |
|-----|-------------------|---|
| 地震時 | 堤体の目地開き | 「凹凸変位量(0.88m) ≥ 壁厚(0.40m)」となるため、目地開き部からの津波侵入により、背後の浸水域拡大につながる。 ⇒0.50mの増厚を想定 |
| | 施設天端高の沈下 | 津波の越流を許し、背後の浸水域拡大につながる。 ⇒0.40mの嵩上げを行う。 ⇒0.40mの嵩上げを想定 |
| 津波時 | 堤体の安定 | 堤体の滑動に関する安定性が不足し、防潮堤の破堤が懸念される。 ⇒堤体のコンクリート増打ちを実施し、堤体重量の増加による滑動抵抗力の向上を図る。 |
| | 護岸前面マウンドの被覆材の必要重量 | 津波流速に対してマウンド材の必要重量を満足しないため、護岸の安定性に影響が生じる可能性がある。 ⇒津波流速に対して必要重量を満足するマウンド被覆工を実施する。 ⇒200kg程度の被覆石を想定 |
| | 津波越流による堤体背後の洗掘 | 津波越流時の堤体背後の地盤の洗掘を受ける懸念がある。 ⇒洗掘対策として、堤体前背面に洗掘防止被覆工を実施する。 ⇒金網入りコンクリート被覆を想定 |

21

2-6. 安定性の照査と対策検討

■ 対策断面(案)



22

2-6. 安定性の照査と対策検討

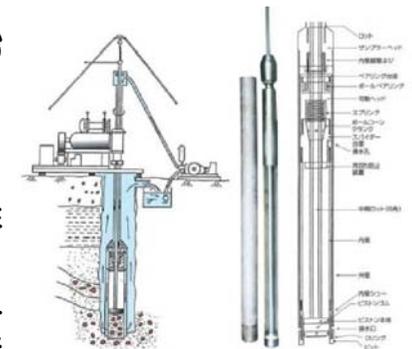
■ 津波時の安定性照査(対策断面)

| 状態 | 項目 | 耐力および作用力 | | 評価 | |
|-----|----------|----------|-----------------|-------------------|-----|
| 押波時 | 防潮堤 | 滑動 | 69.11 (kN/m) | > 53.88 (kN/m) | OK |
| | | 転倒 | 214.85 (kN・m/m) | > 104.68 (kN・m/m) | OK |
| | | 偏心傾斜 | 4839.8 (kN・m/m) | > 898.4 (kN・m/m) | OK |
| | | 曲げ | 282.06 (kN・m) | > 46.32 (kN・m) | OK |
| | | せん断 | 709.19 (kN/m) | > 60.55 (kN/m) | OK |
| | 護岸前面マウンド | 被覆材重量 | 200 (kg) | > 152 (kg) | OK |
| 引波時 | 防潮堤 | 滑動 | — | > — | — |
| | | 転倒 | — | > — | — |
| | | 偏心傾斜 | — | > — | — |
| | | 曲げ | — | > — | — |
| | | せん断 | — | > — | — |
| | | 護岸前面マウンド | 被覆材重量 | — | > — |

23

3. 非排水繰返し強度特性に及ぼすサンプリング方法の影響

- 地震による施設の変形は背後の埋立土や沖積砂等の液状化の程度に大きく影響を受ける。
- 液状化強度を正確に評価するためには、高品質な試料を採取する必要がある。
- 既設防潮堤の基礎地盤において、同一深度から2つのサンプラー(三重管サンプラー・GSサンプラー)を用いて沖積砂を採取し、非排水繰返し三軸試験を行い、各種サンプラーによる試料の変形および液状化強度特性について検討した。



GSサンプラー構造図

24

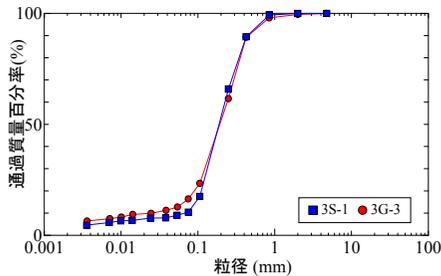
3. 非排水繰返し強度特性に及ぼすサンプリング方法の影響

■採取試料の物理試験

S: 三重管サンプリング試料
G: GSサンプリング試料

| | |
|------------------------------------|----------|
| 採取深度 G.L.(m) | -7.0~8.0 |
| 土質区分 | 砂 |
| N値 | 14~16 |
| S波速度 V_s (m/s) | 180 |
| 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 1.750 |

| | | |
|---------------------------------------|--------|-------|
| 試料名 | 3S-1 | 3G-3 |
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.597 | 2.574 |
| 礫分含有率 (%) | — | 0.5 |
| 砂分含有率 (%) | 89.6 | 83.1 |
| 細粒分含有率 (%) | 10.4 | 16.4 |
| 均等係数 U_c | 3.0 | 13.0 |
| 曲率係数 U_c' | 1.4 | 3.4 |
| 平均粒径 D_{50} (mm) | 0.19 | 0.19 |
| 最大乾燥密度 d_{max} (g/cm ³) | 1.550 | 1.514 |
| 最小乾燥密度 d_{min} (g/cm ³) | 1.068 | 1.065 |
| 相対密度 D_r (%) | 84~102 | 62~71 |



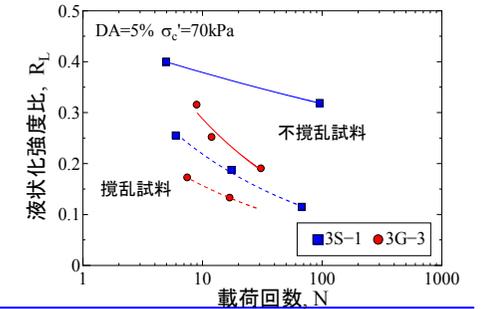
試料の粒径加積曲線

25

3. 非排水繰返し強度特性に及ぼすサンプリング方法の影響

■液状化試験

- 三重管サンプラーで採取した3S-1の液状化強度比は、GSサンプラーで採取した3G-3の液状化強度比よりも大きくなった。
- 3S-1は相対密度が大きいいため、液状化強度も大きい結果になったものと考えられる。
- 完全に乱した試料における液状化強度比は、各サンプラーで採取した試料における液状化強度比の約0.5倍となる。試料の乱れが液状化強度に大きな影響を与えている。

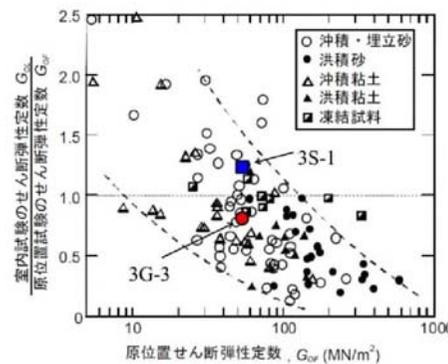


26

3. 非排水繰返し強度特性に及ぼすサンプリング方法の影響

■試料採取時の品質評価

- 3S-1のせん断剛性は原位置のせん断剛性より高い。⇒試料の密実化が影響していると考えられる。
- 3G-3のせん断剛性は原位置のせん断剛性より低い。⇒試料の応力履歴が微視構造に変化を与えたためと考えられる。



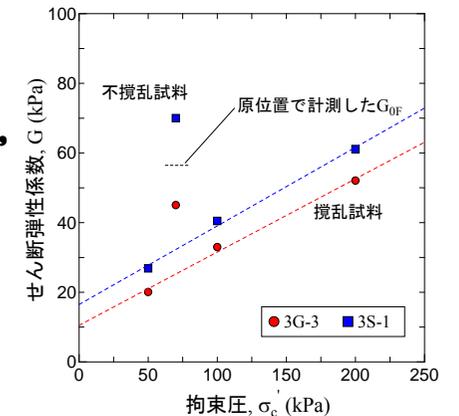
初期せん断剛性の比較

27

3. 非排水繰返し強度特性に及ぼすサンプリング方法の影響

■試料採取時の品質評価

- 各サンプラーから採取した試料の密度と同じになるように供試体を作製し、飽和、圧密終了後にBE試験を行った。
- 試料の微視構造が完全に乱れることでせん断剛性は大きく低下することが分かる。



せん断弾性係数の比較

28

4. まとめ

- 既存の防潮堤を「ねばり強い構造」とするための主要な検討内容について紹介した。
 - 対策工の検討では、地震による施設の変状を踏まえた上で、津波に対する検討を実施する必要がある。
 - 地震時の施設の変形を精度良く推定する際には、埋立土や沖積砂の正確な液状化強度を把握することが課題である。
 - 原位置の液状化強度を評価する上では、原位置密度と近い状態の試料を採取できるGSサンプラーが有効であることが示唆された。
-

ご清聴ありがとうございました。
