

図 2.2-7 液状化強度試験結果 (A-1-2 試料 (供試体 No. 3))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比がマイナス(負圧)まで低下(有効応力が回復)していることから、繰返し軟化と判断した。

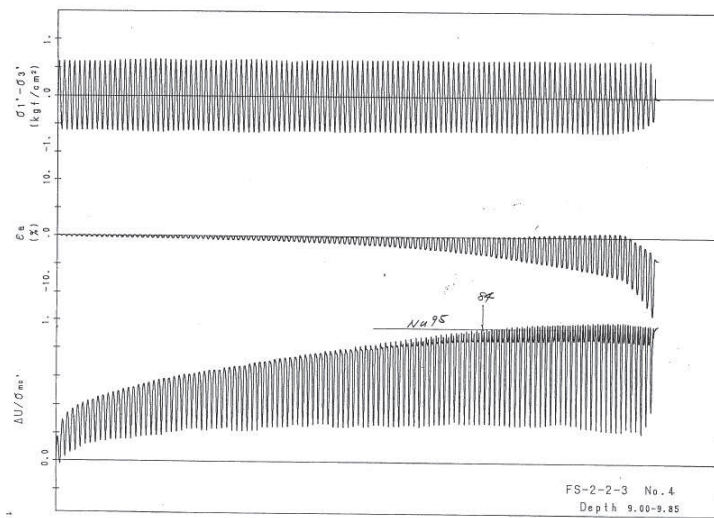


図 2.2-8 液状化強度試験結果 (A-1-2 試料 (供試体 No. 4))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比が低下(有効応力が回復)していることから、繰返し軟化と判断した。
後半の7波ではせん断破壊あるいはネッキングが発生。

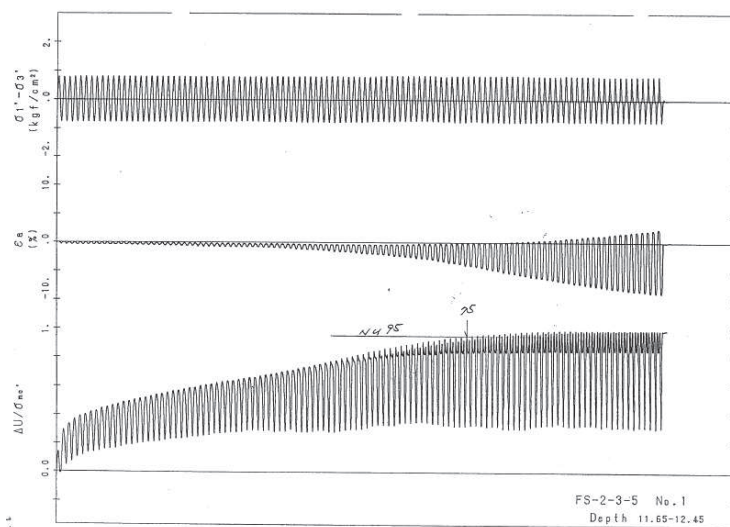


図 2.2-9 液状化強度試験結果 (A-1-3 試料 (供試体 No. 1))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比が低下(有効応力が回復)していることから、繰返し軟化と判断した。

注) A-1 シリーズの試験は、実施時期が古く、デジタルデータは無い。また、試験結果整理方法が異なる。

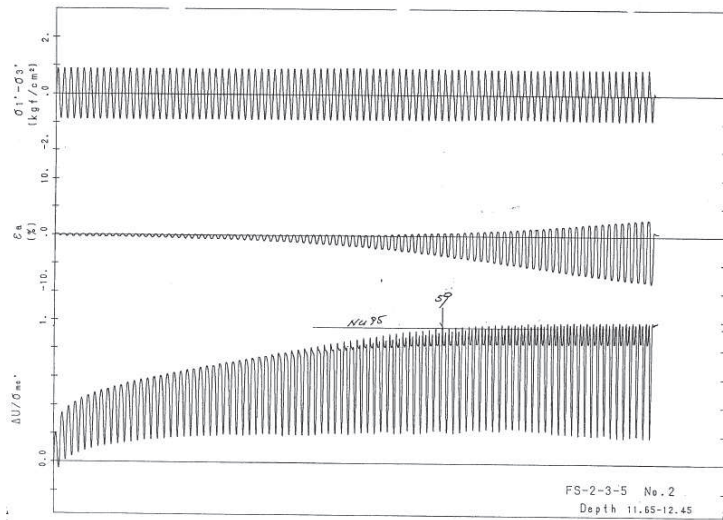


図 2.2-10 液状化強度試験結果 (A-1-3 試料 (供試体 No. 2))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比が低下 (有効応力が回復) していることから、繰返し軟化と判断した。

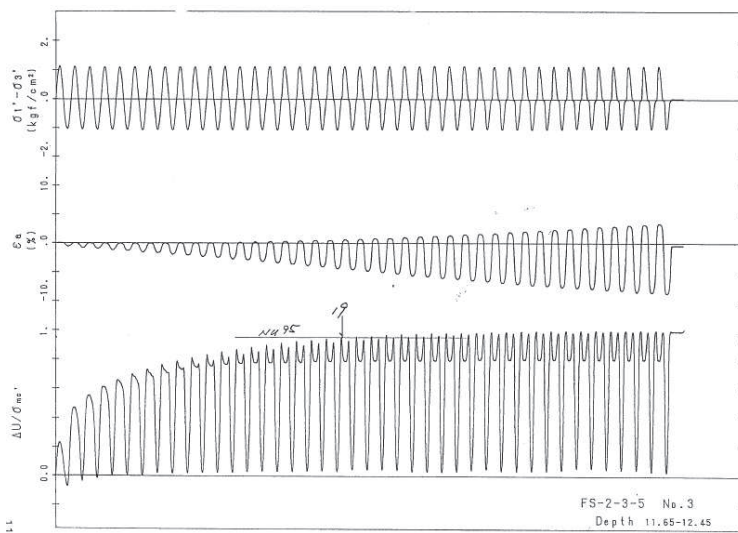


図 2.2-11 液状化強度試験結果 (A-1-3 試料 (供試体 No. 3))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比がゼロ付近まで低下 (有効応力が回復) していることから、繰返し軟化と判断した。

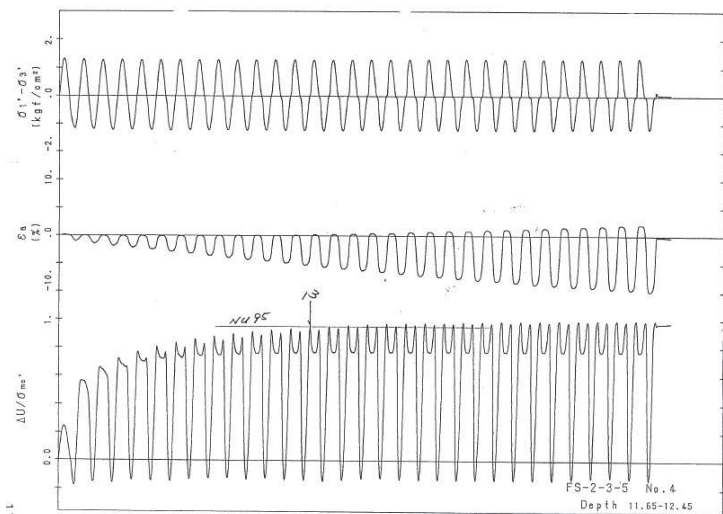
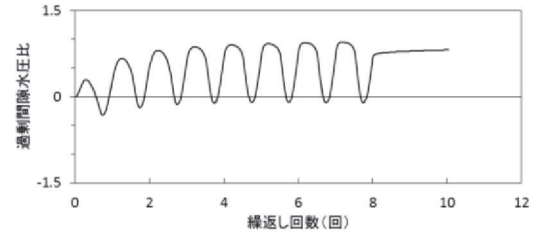
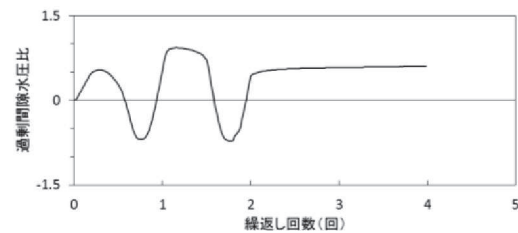
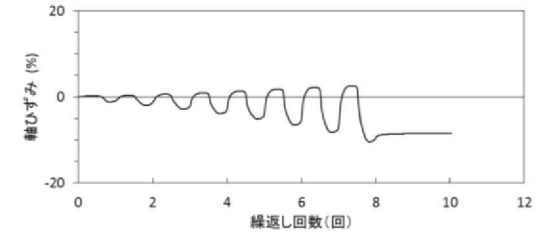
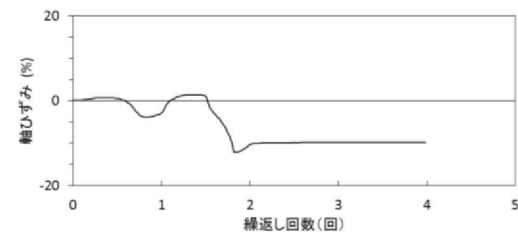
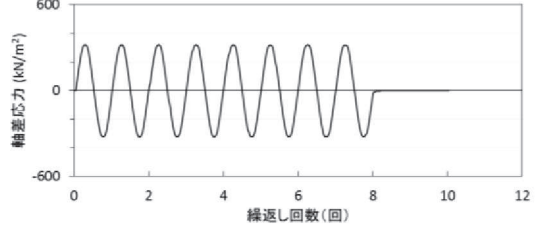
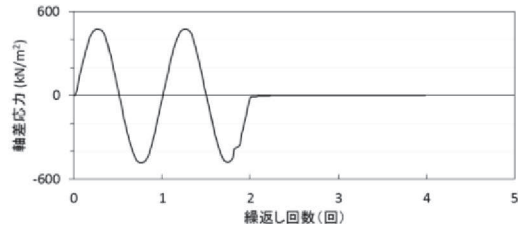
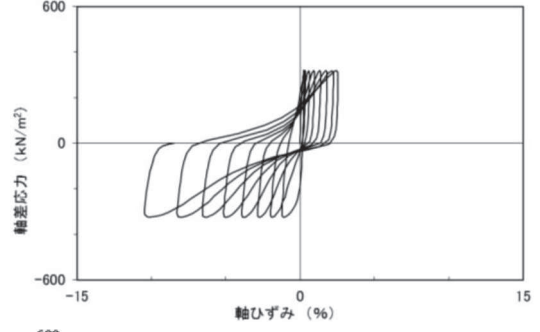
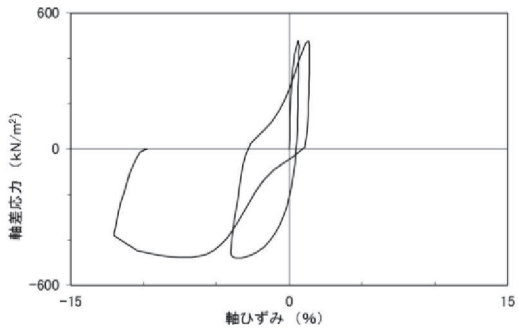
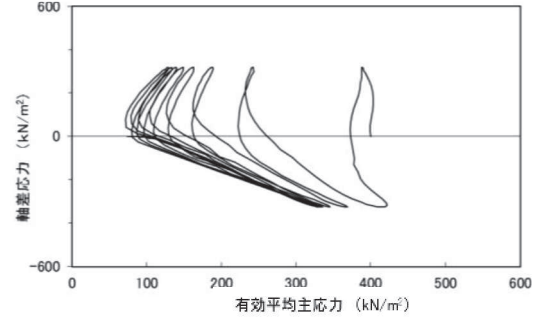
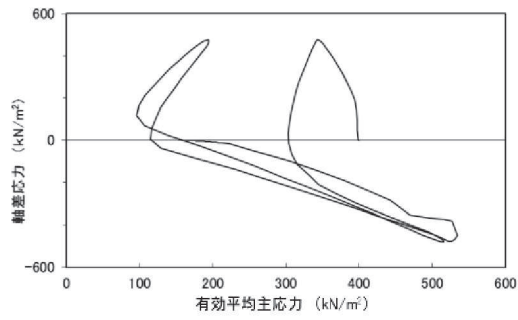


図 2.2-12 液状化強度試験結果 (A-1-3 試料 (供試体 No. 4))

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | — | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

* 間隙水圧比が 95%に達してもひずみの急増は見受けられないこと、間隙水圧比がマイナス (負圧) まで低下 (有効応力が回復) していることから、繰返し軟化と判断した。

注) A-1 シリーズの試験は、実施時期が古く、デジタルデータは無い。また、試験結果整理方法が異なる。



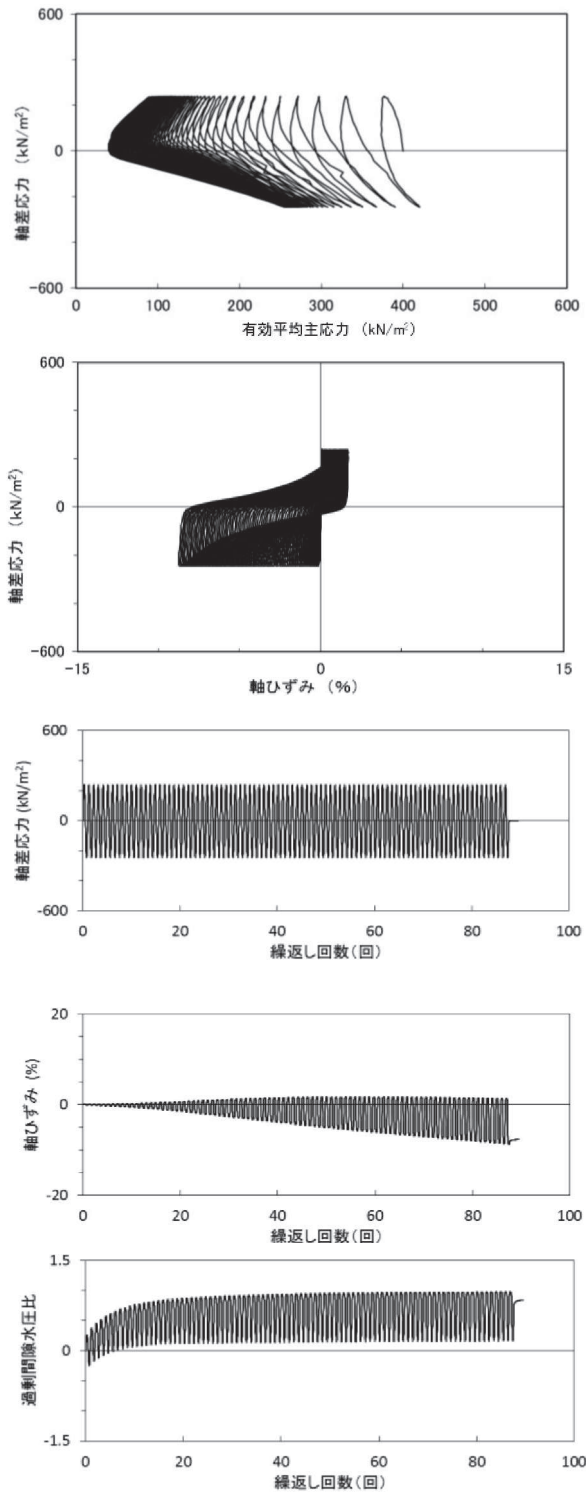
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* 応力振幅が大きく、ネッキングによるひずみ発生。

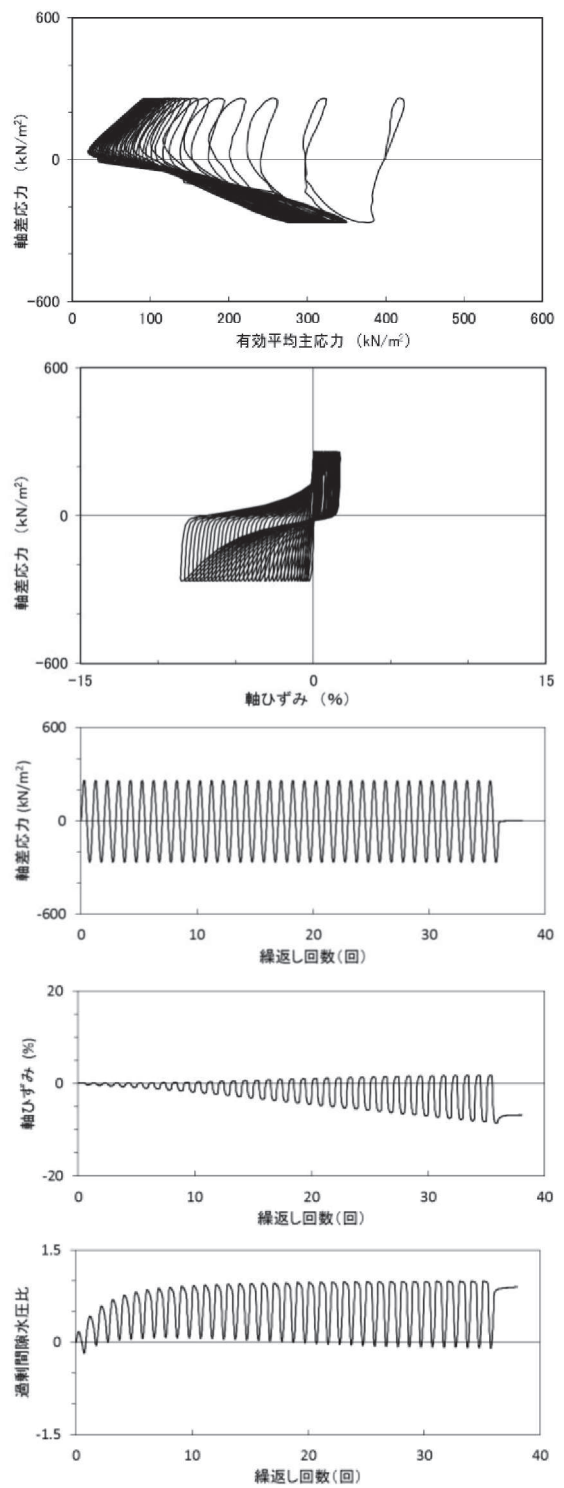
図 2.2-13 液状化強度試験結果
(A-2 試料 (供試体 No. 1))

図 2.2-14 液状化強度試験結果
(A-2 試料 (供試体 No. 2))



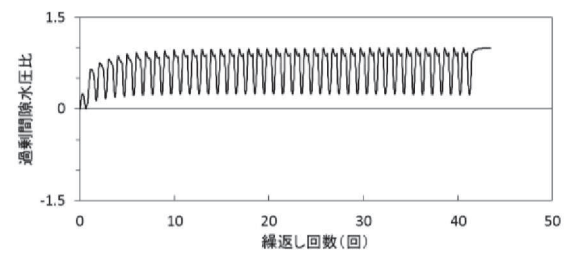
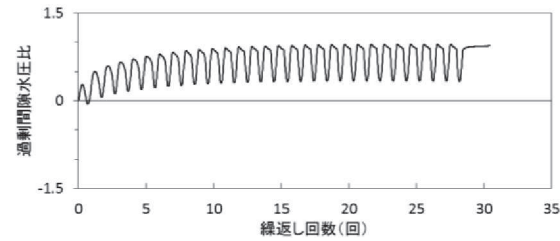
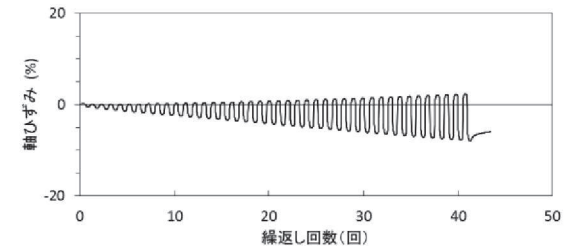
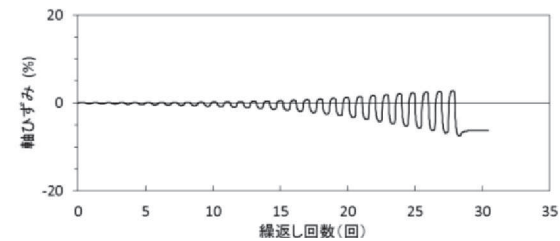
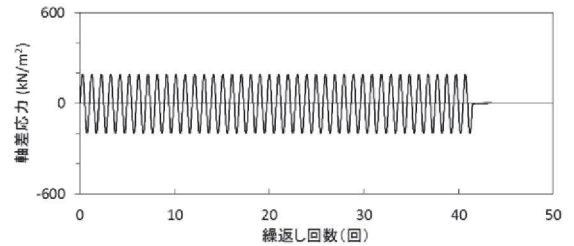
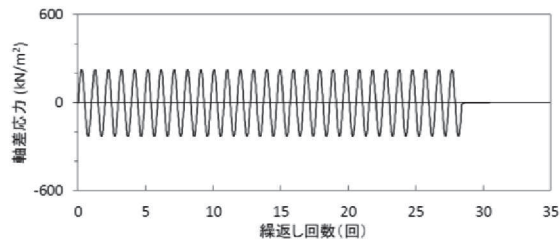
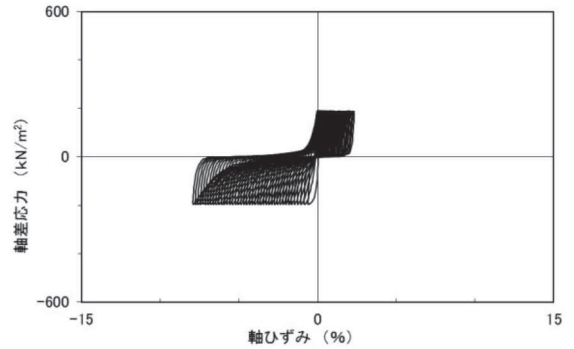
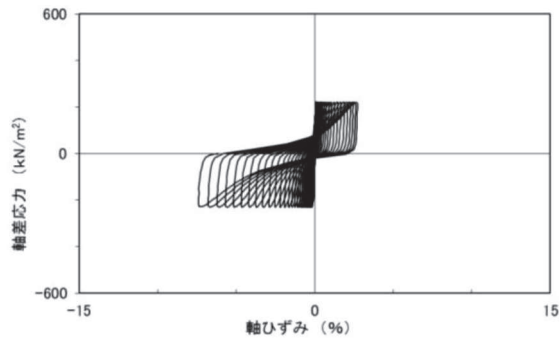
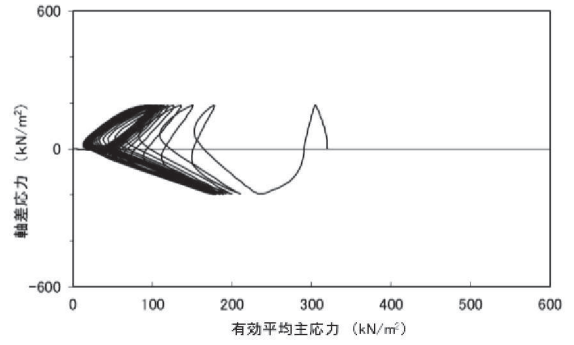
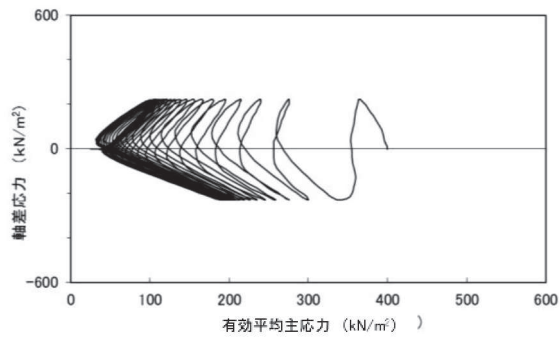
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|----------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-15 液状化強度試験結果
(A-2 試料 (供試体 No. 3))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|----------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-16 液状化強度試験結果
(A-2 試料 (供試体 No. 4))

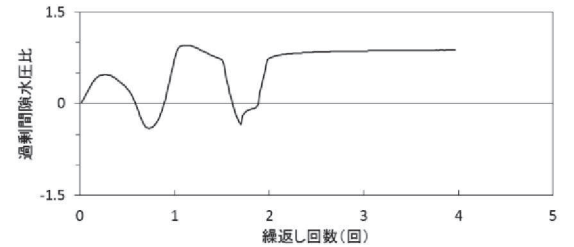
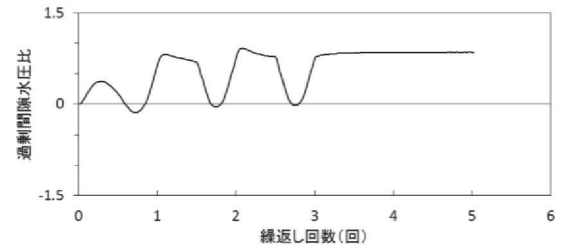
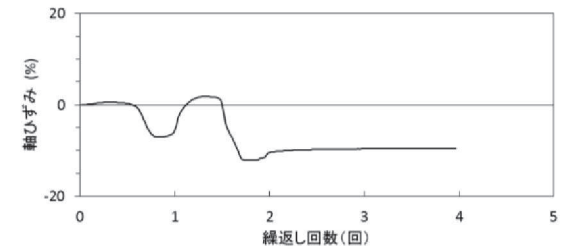
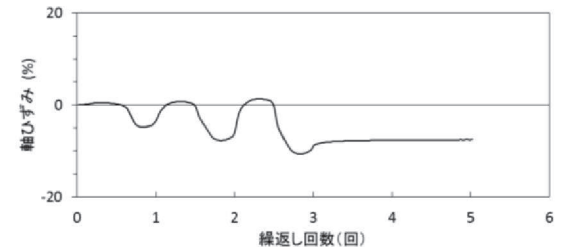
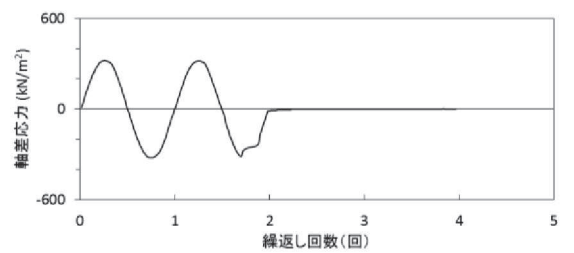
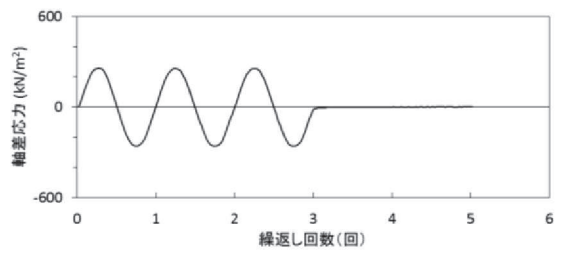
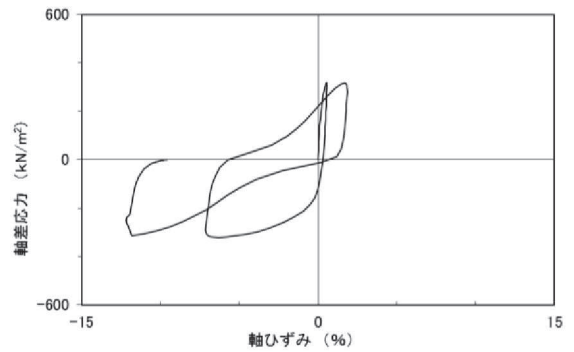
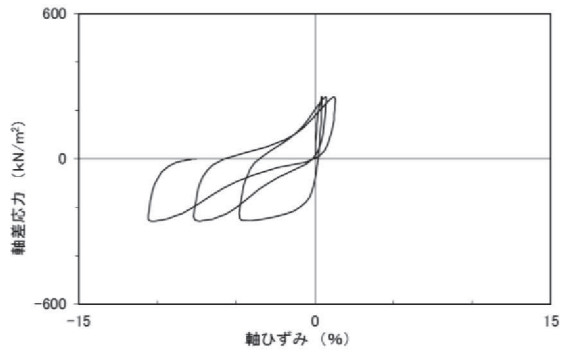
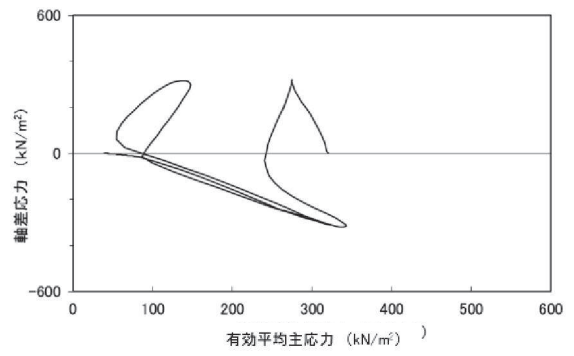
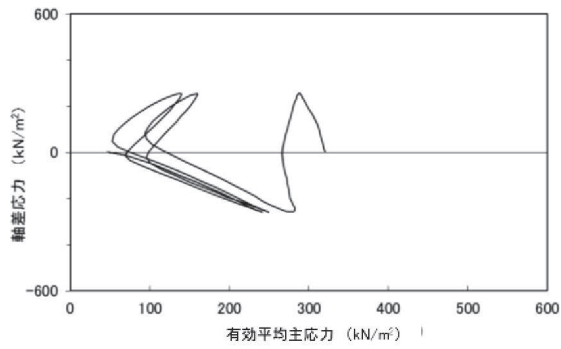


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-17 液状化強度試験結果
(A-2 試料 (供試体 No. 5))

図 2.2-18 液状化強度試験結果
(A-3 試料 (供試体 No. 1))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

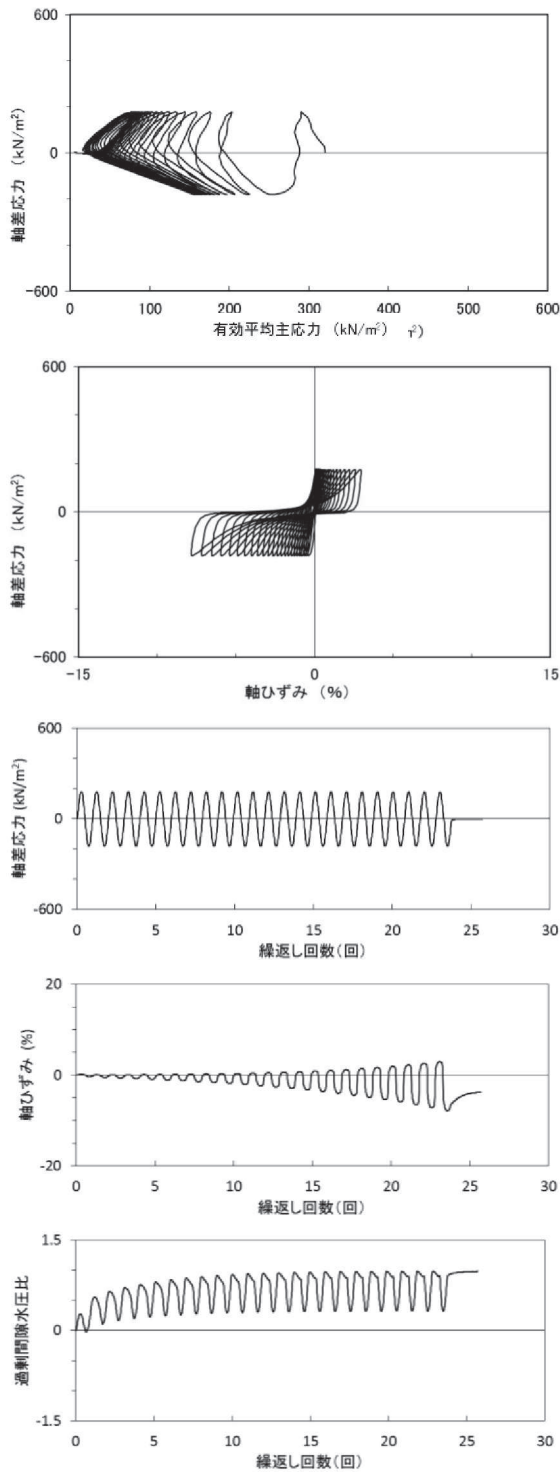
*応力振幅が大きいことによるひずみ発生

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

*応力振幅が大きいことによるひずみ発生

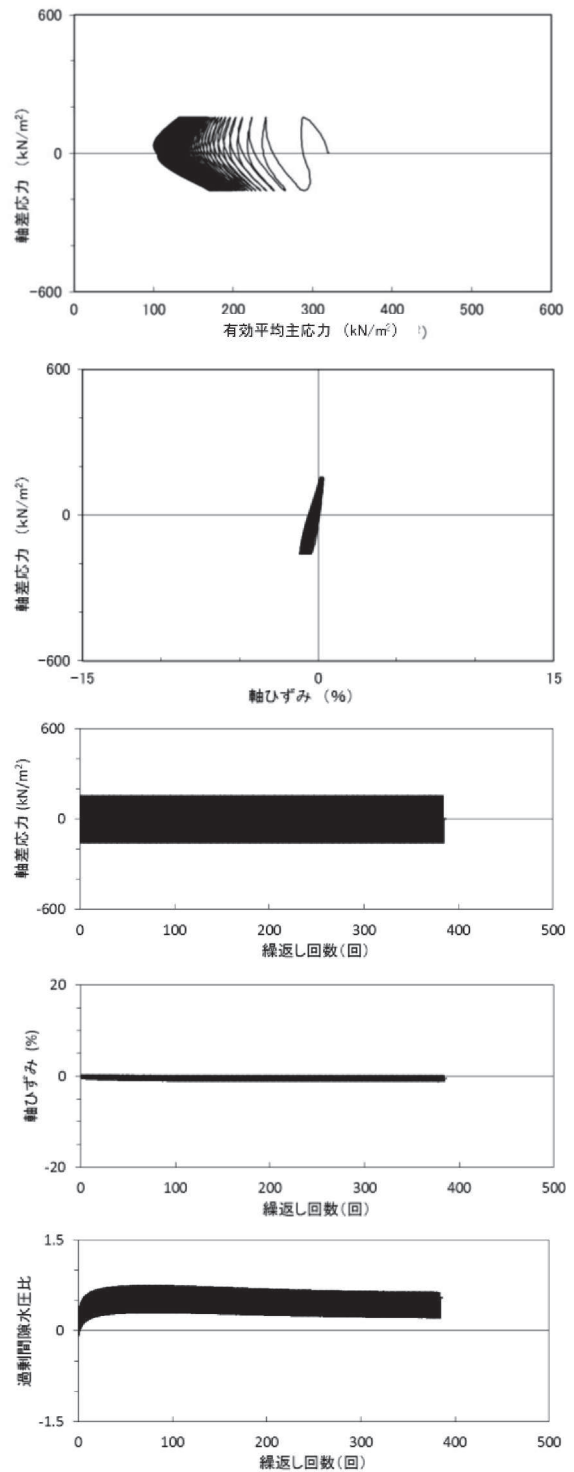
図 2.2-19 液状化強度試験結果
(A-3 試料 (供試体 No. 2))

図 2.2-20 液状化強度試験結果
(A-3 試料 (供試体 No. 3))



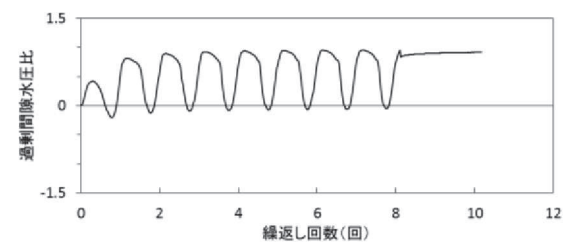
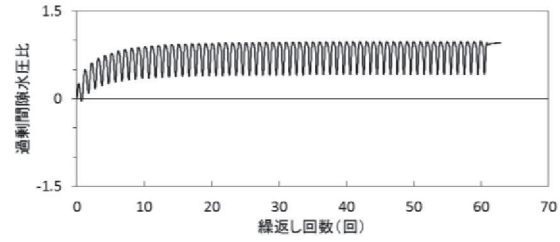
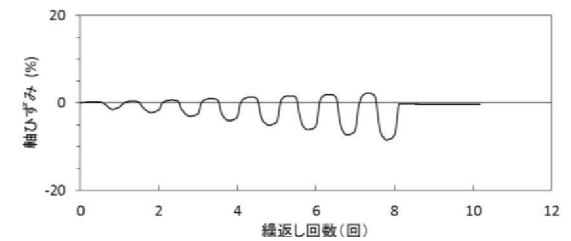
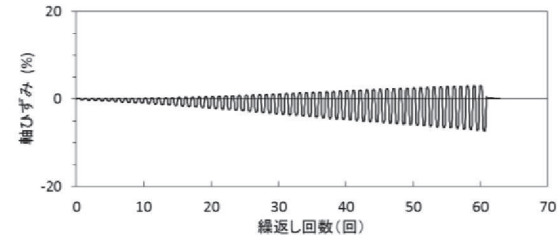
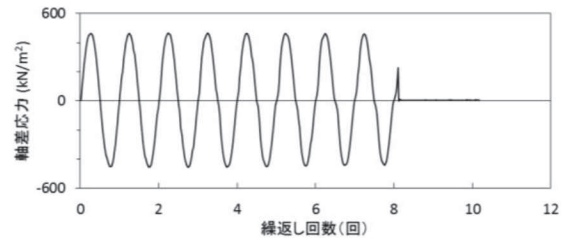
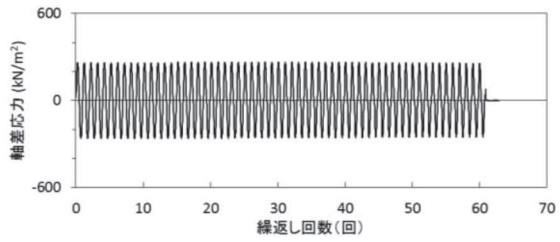
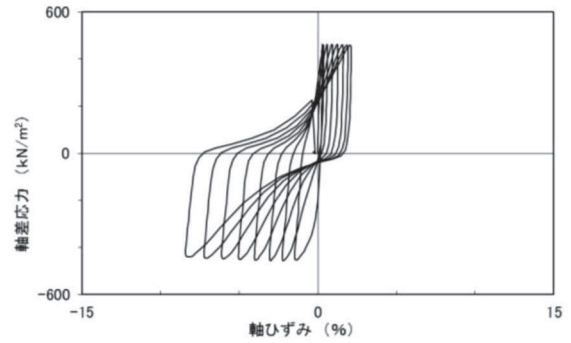
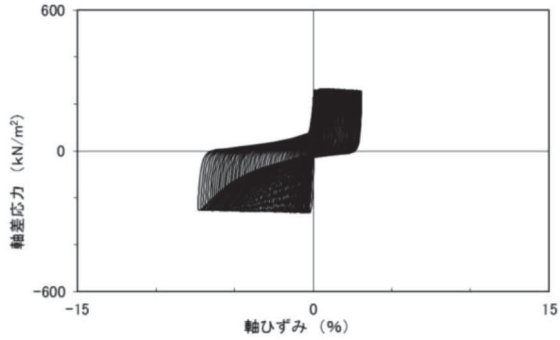
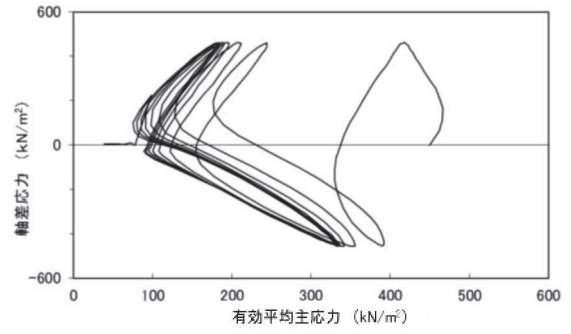
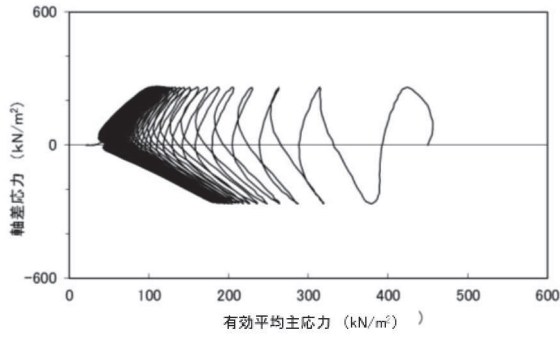
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-21 液状化強度試験結果
(A-3 試料 (供試体 No. 4))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-22 液状化強度試験結果
(A-3 試料 (供試体 No. 5))

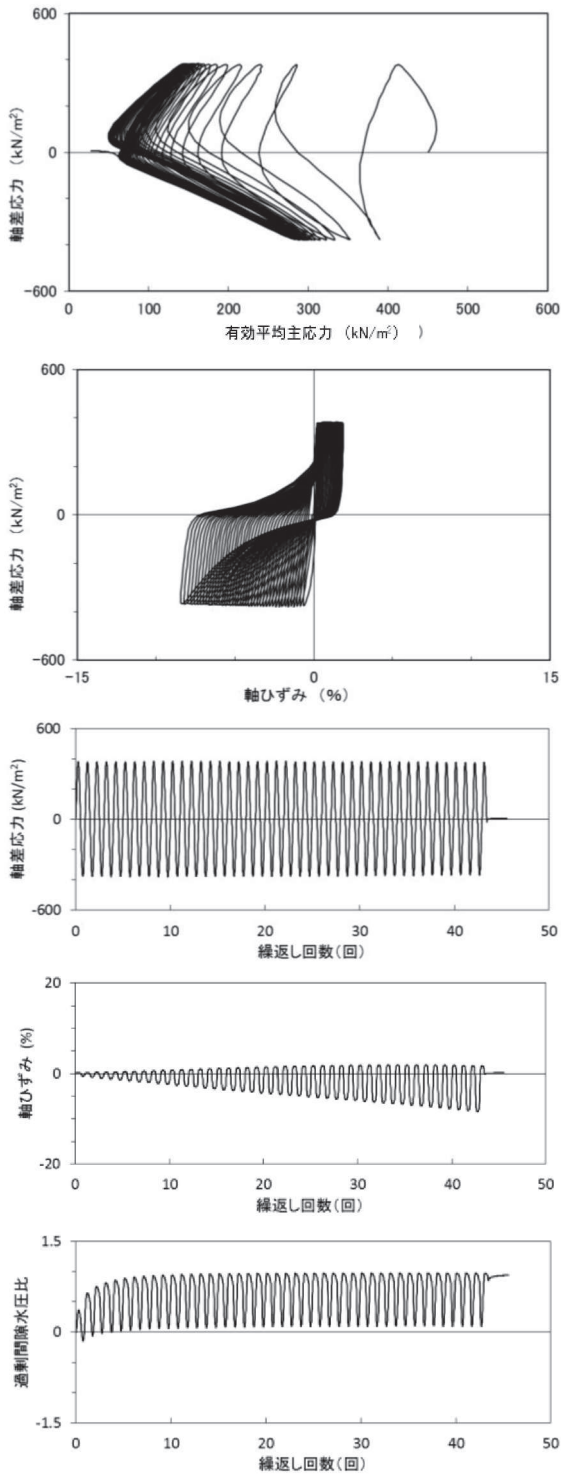


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

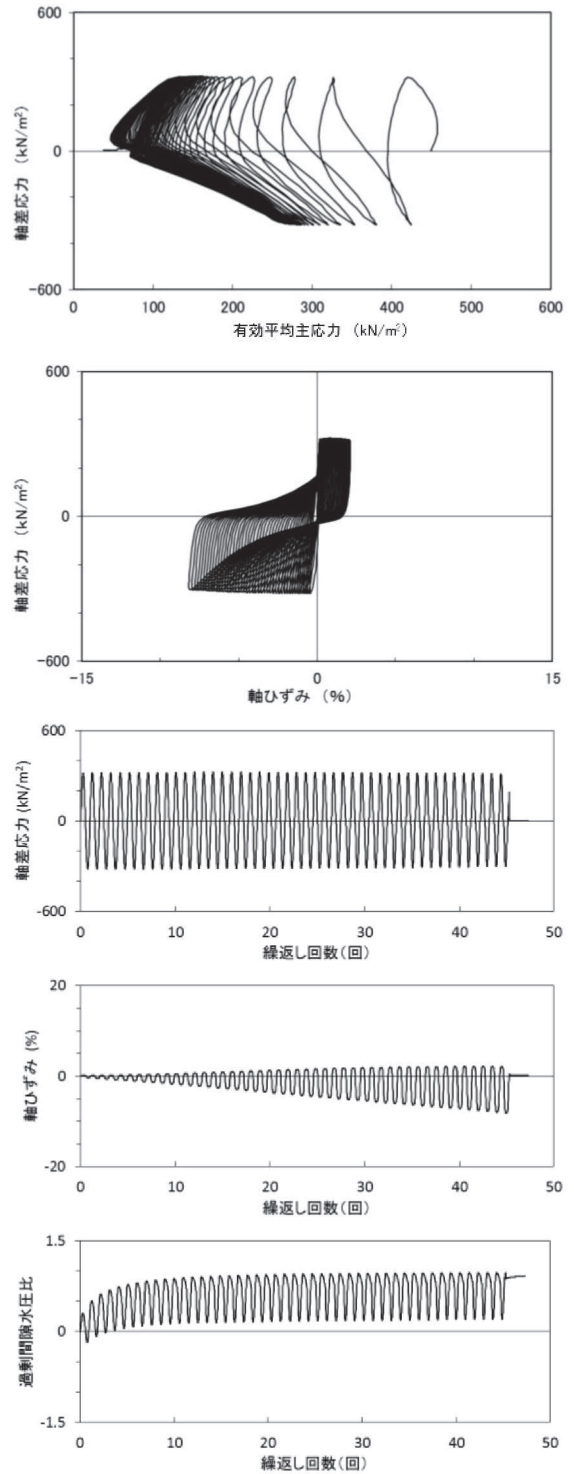
図 2.2-23 液状化強度試験結果 (A-4 試料 (供試体 No. 1))

図 2.2-24 液状化強度試験結果 (A-4 試料 (供試体 No. 2))



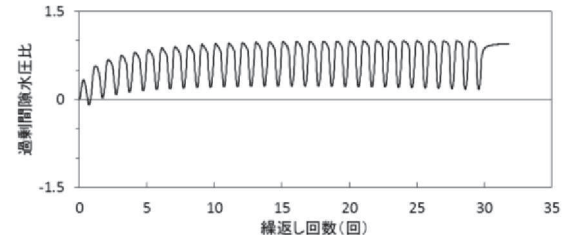
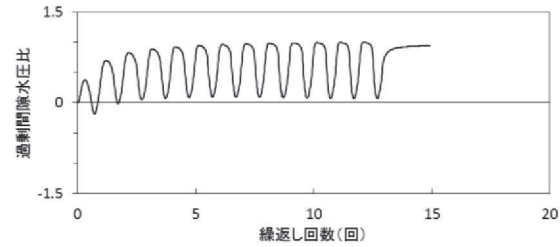
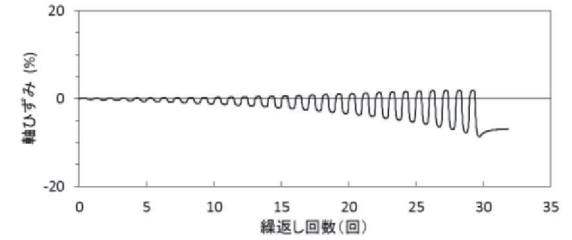
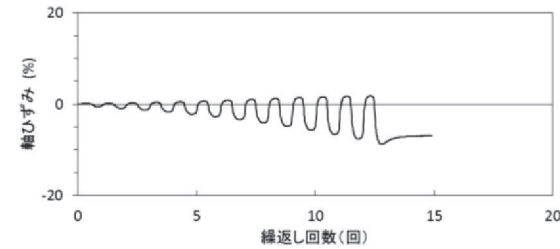
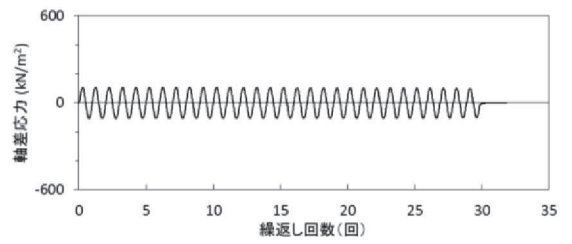
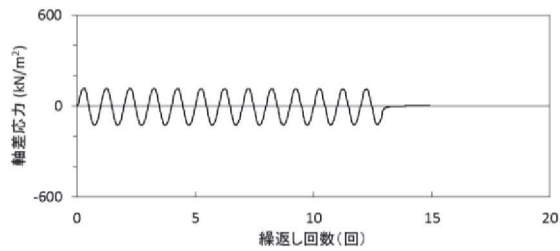
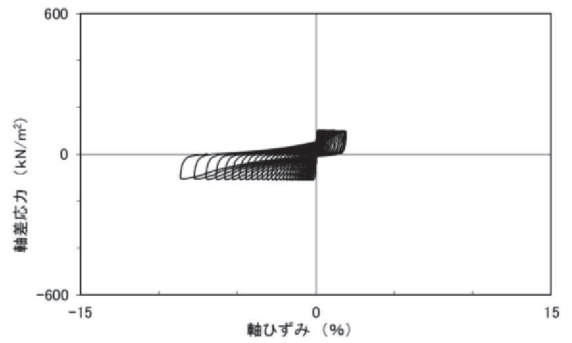
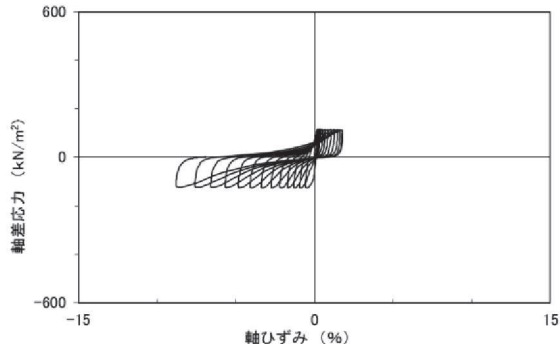
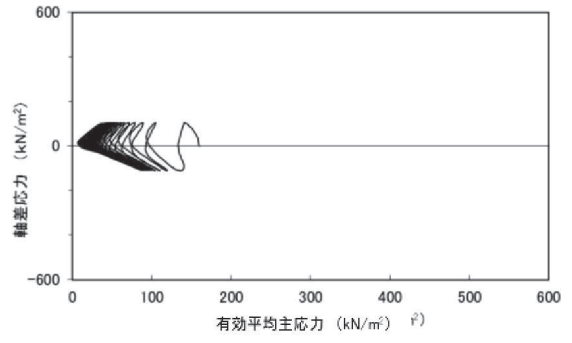
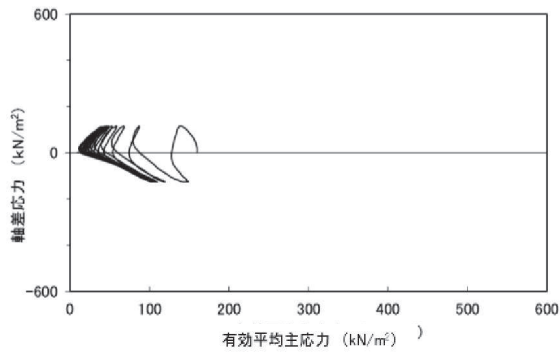
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-25 液状化強度試験結果
(A-4 試料 (供試体 No. 3))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-26 液状化強度試験結果
(A-4 試料 (供試体 No. 4))

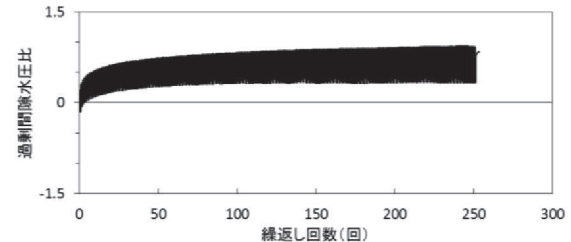
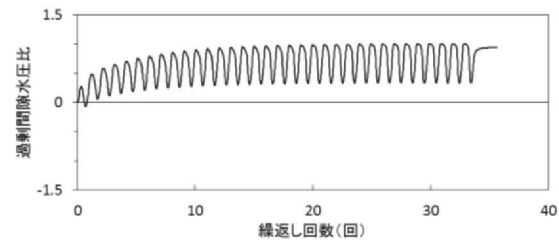
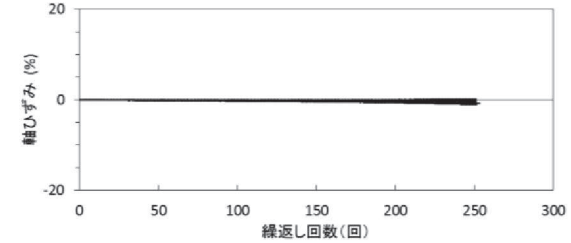
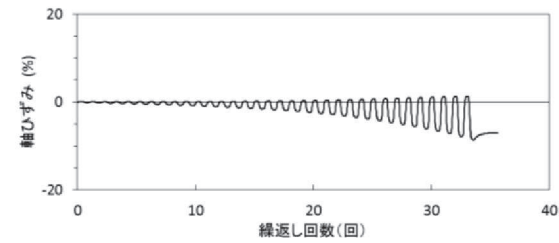
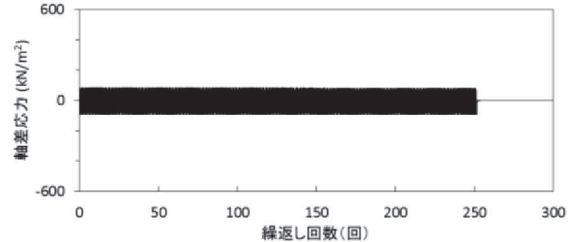
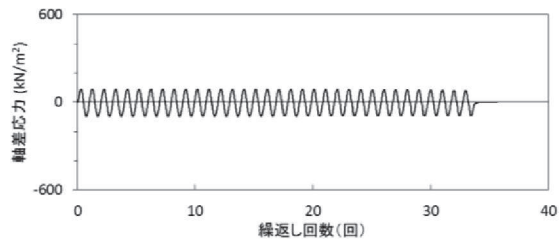
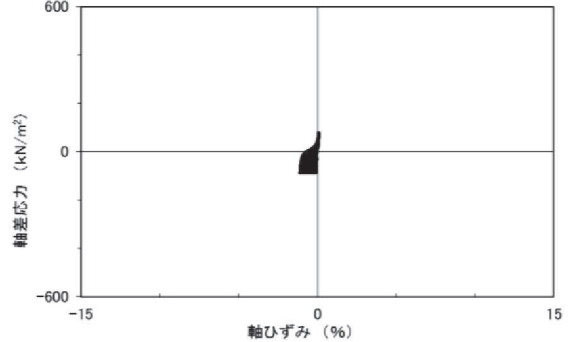
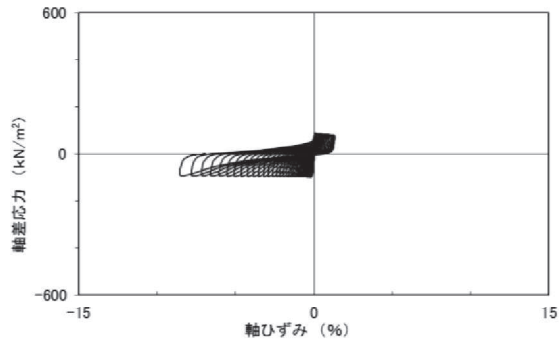
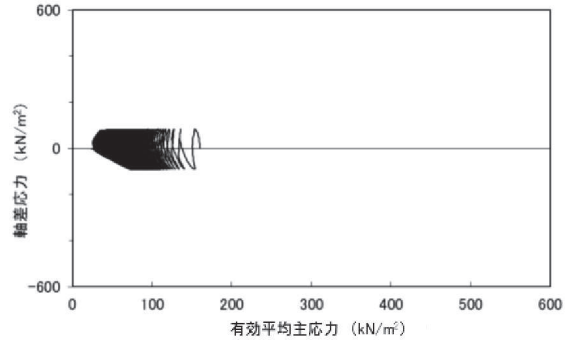
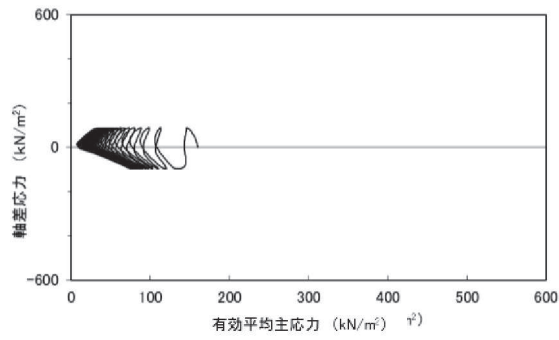


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-27 液状化強度試験結果
(A-5-1 試料 (供試体 No. 1))

図 2.2-28 液状化強度試験結果
(A-5-1 試料 (供試体 No. 2))

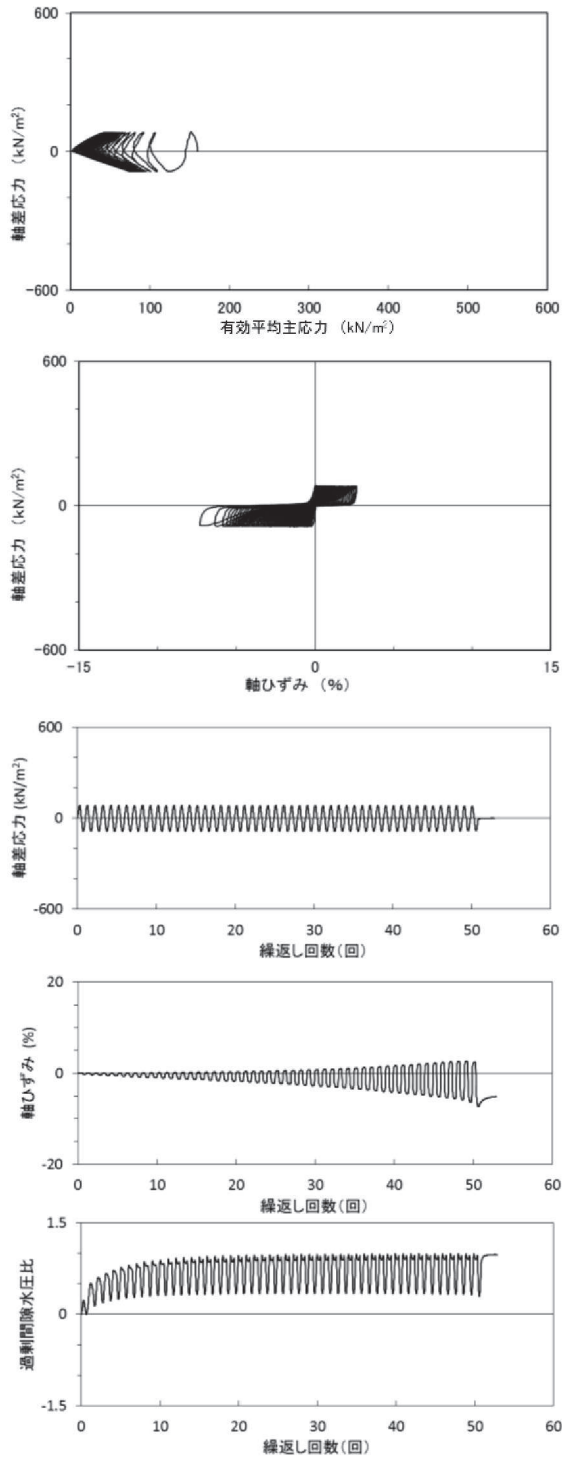


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

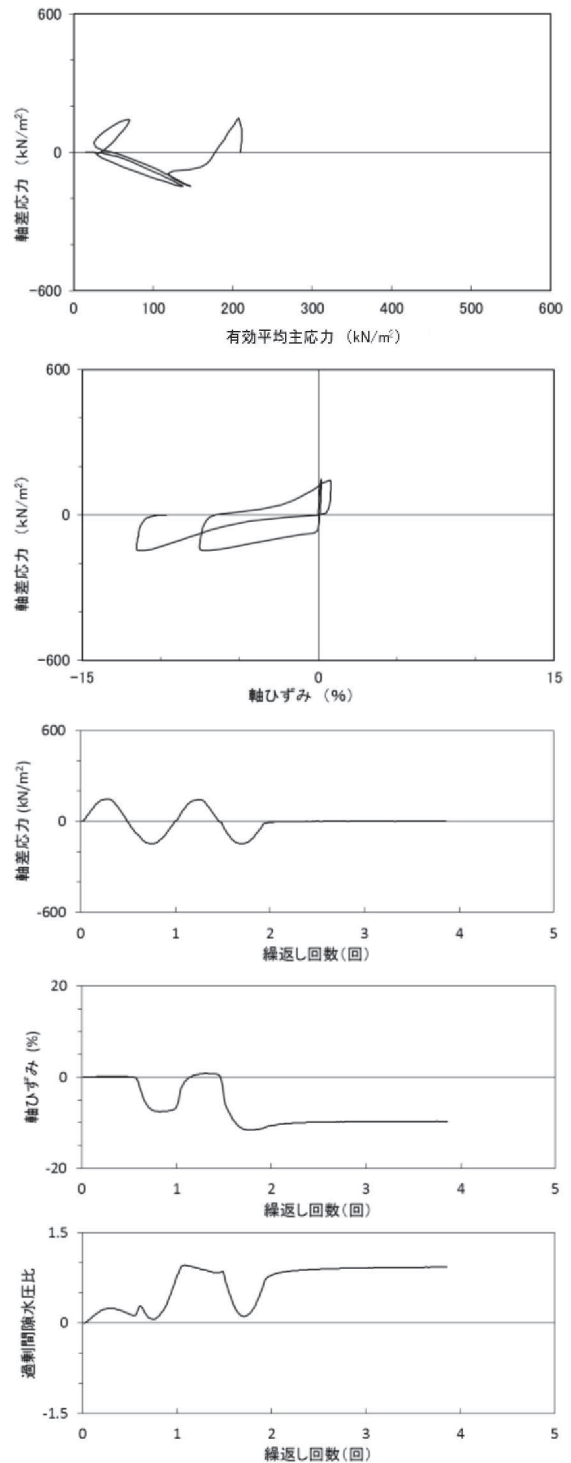
図 2.2-29 液状化強度試験結果
(A-5-1 試料 (供試体 No. 3))

図 2.2-30 液状化強度試験結果
(A-5-1 試料 (供試体 No. 4))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|----------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | ○ | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

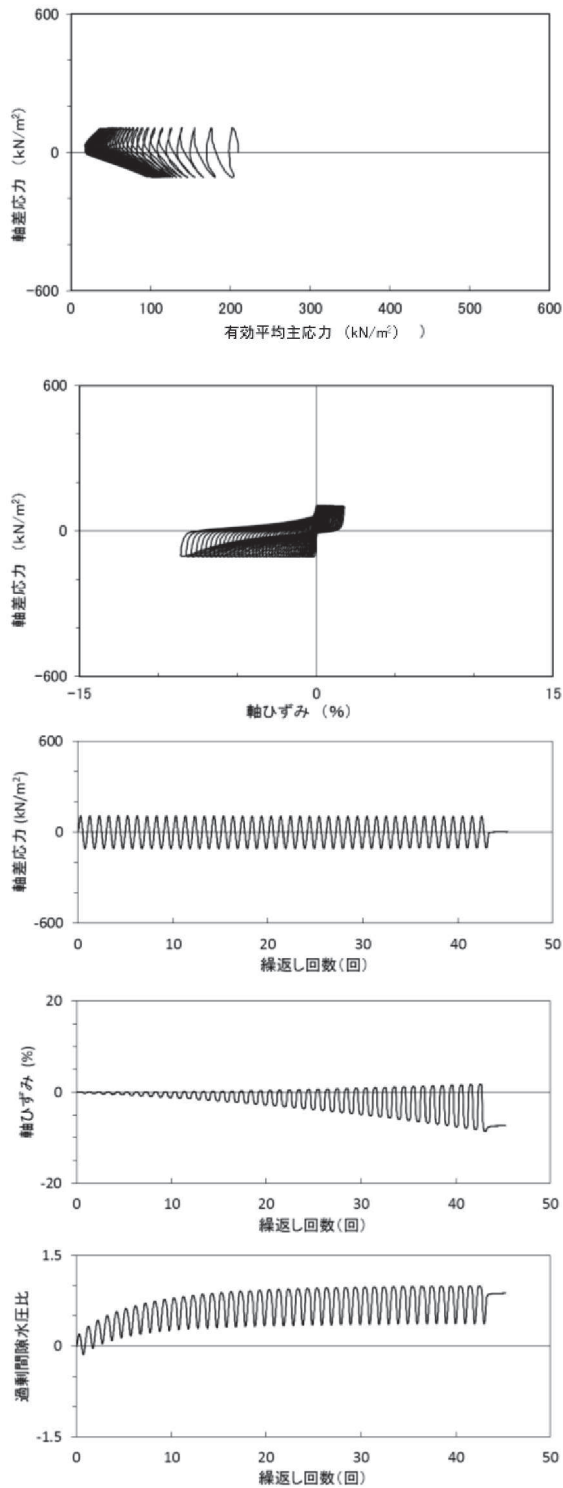
図 2.2-31 液状化強度試験結果
(A-5-1 試料 (供試体 No. 5))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|----------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する (95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する (ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する (有効応力回復) | ○ | |

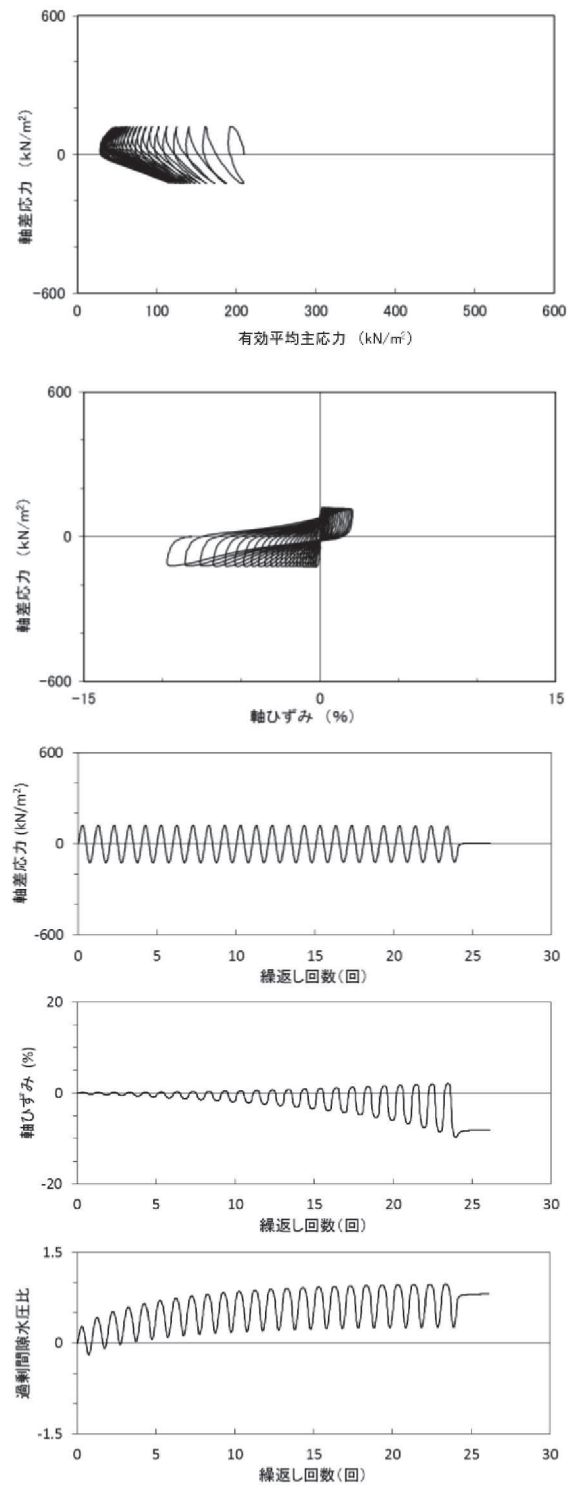
*応力振幅が大きいことによるひずみ発生

図 2.2-32 液状化強度試験結果
(A-5-2 試料 (供試体 No. 1))



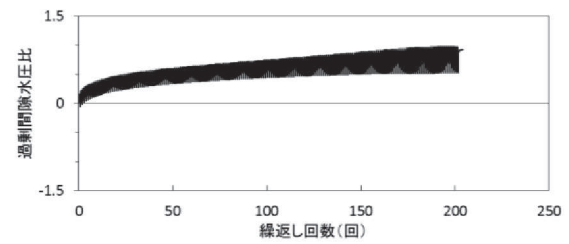
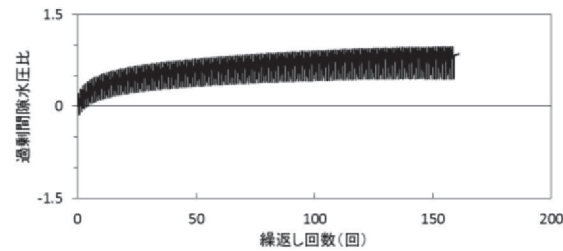
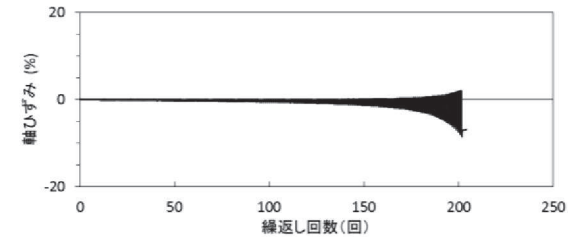
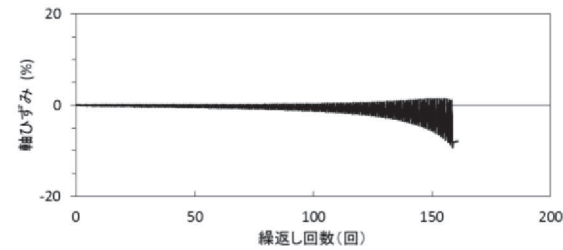
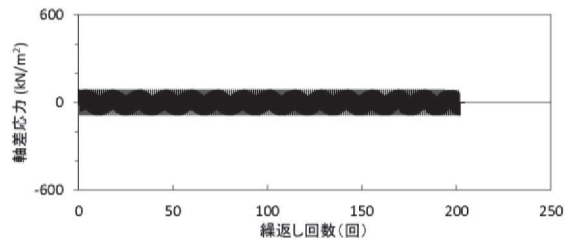
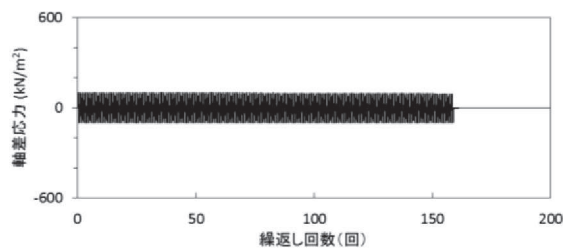
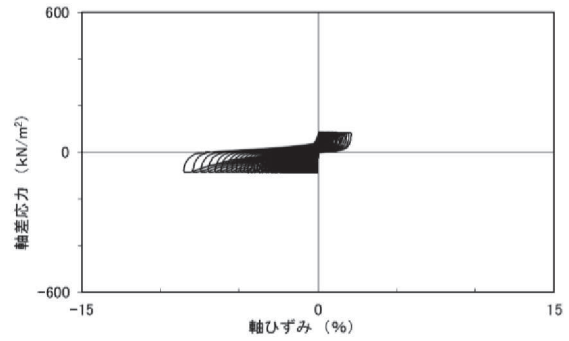
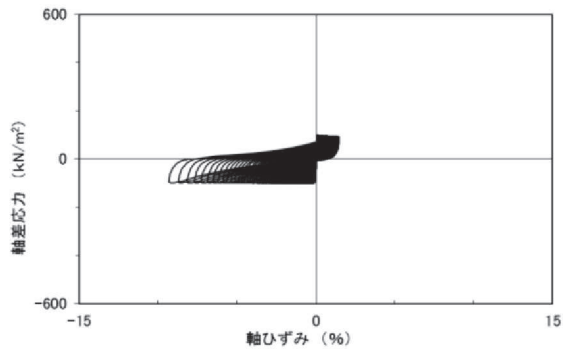
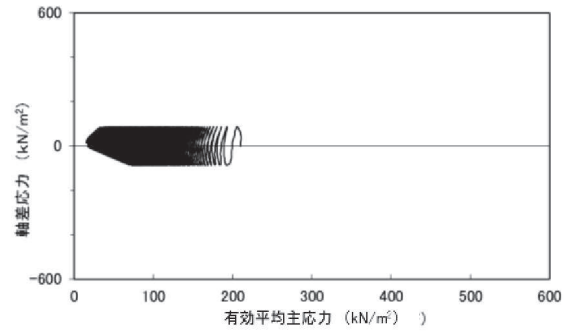
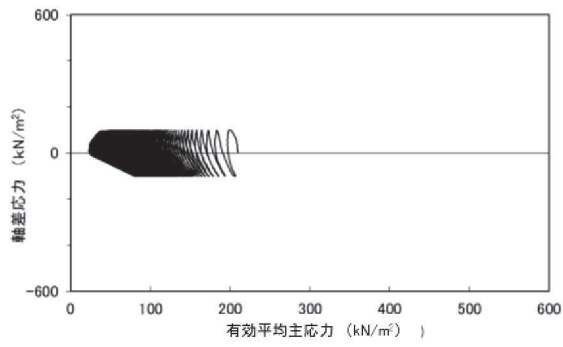
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-33 液状化強度試験結果
(A-5-2 試料 (供試体 No. 2))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-34 液状化強度試験結果
(A-5-2 試料 (供試体 No. 3))

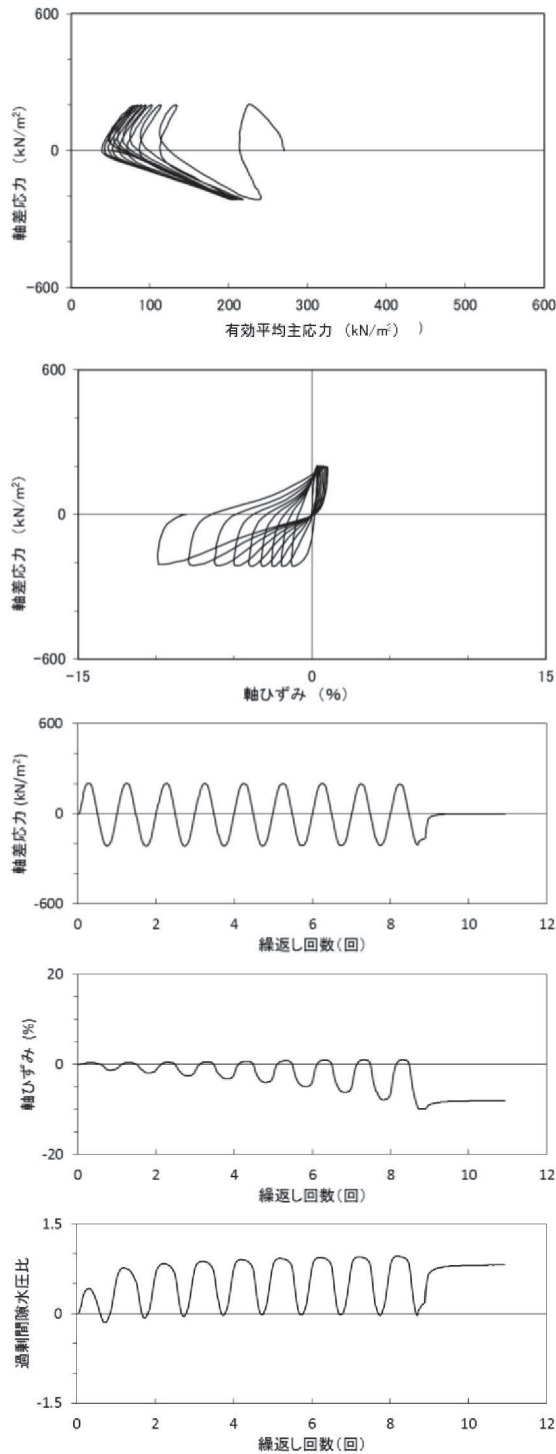


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

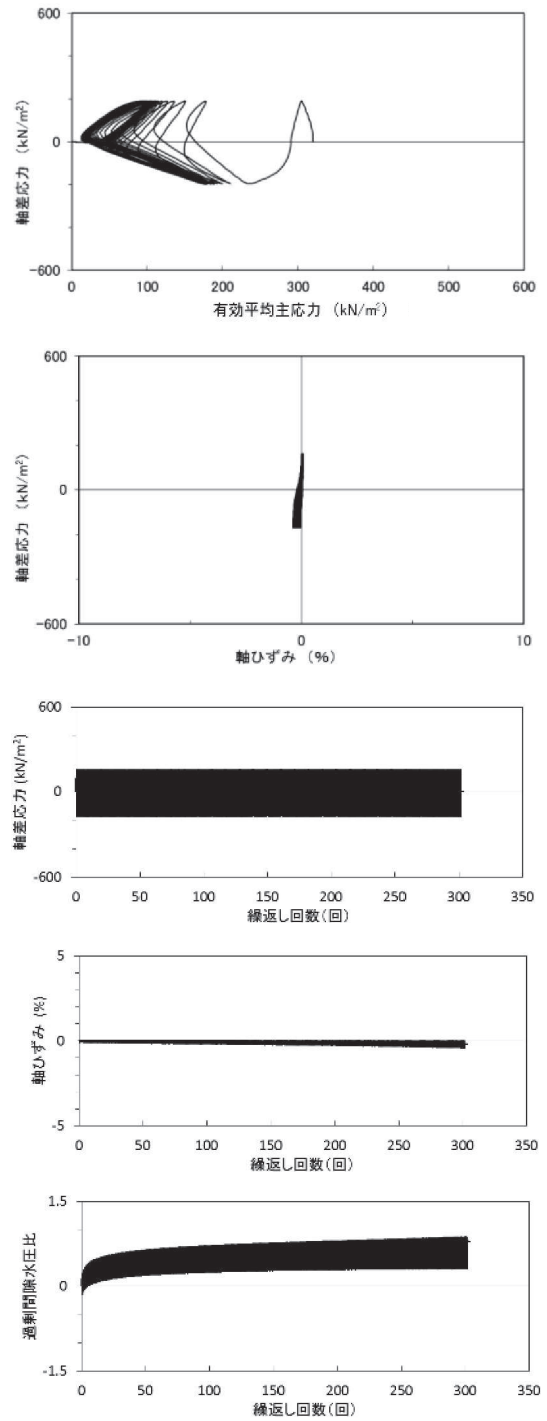
図 2.2-35 液状化強度試験結果
(A-5-2 試料 (供試体 No. 4))

図 2.2-36 液状化強度試験結果
(A-5-2 試料 (供試体 No. 5))



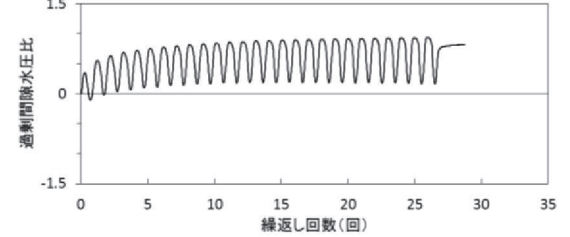
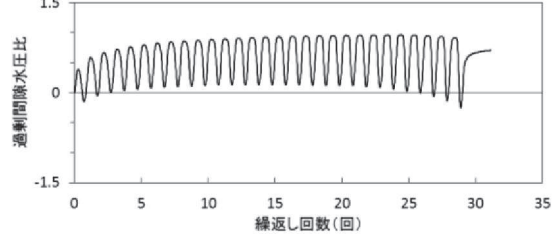
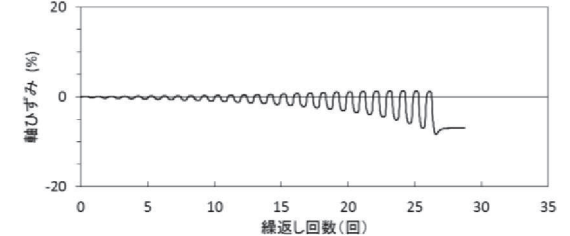
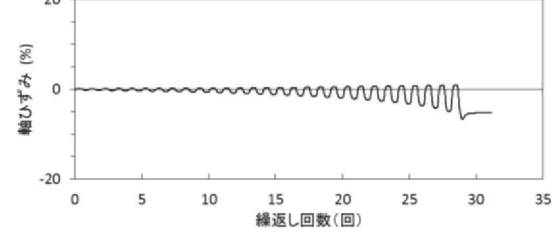
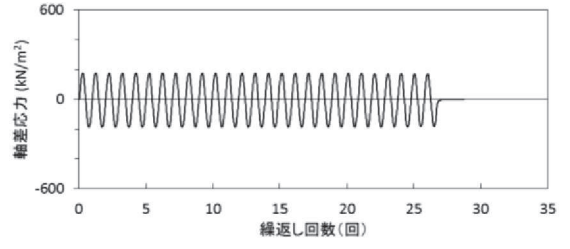
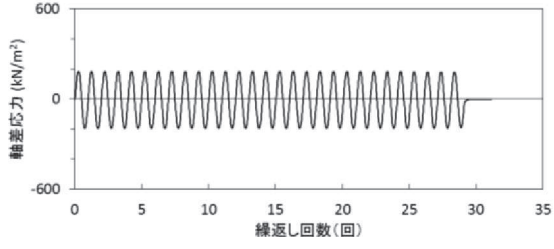
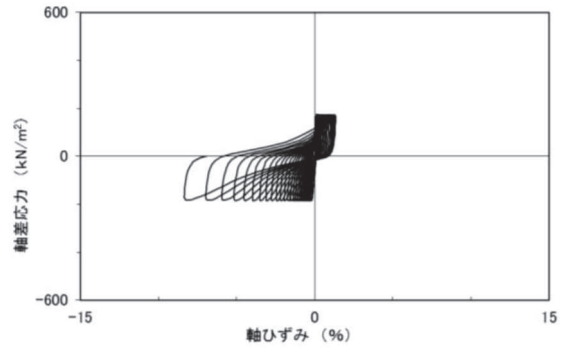
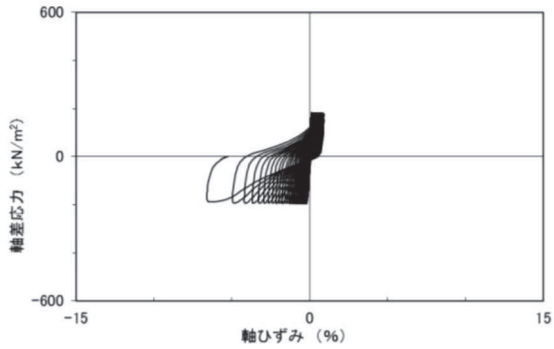
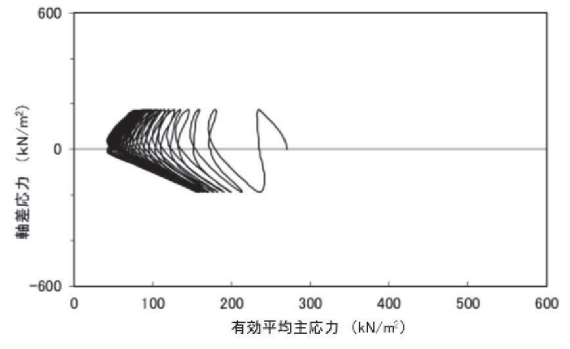
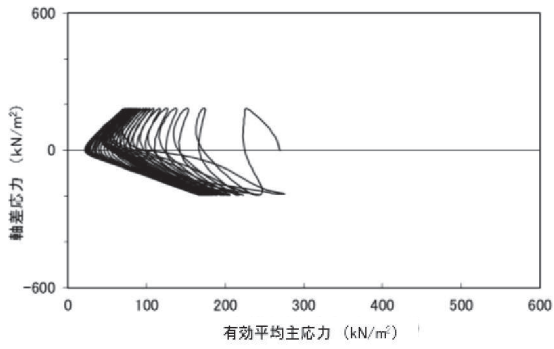
| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-37 液状化強度試験結果
(A-6 試料 (供試体 No. 1))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-38 液状化強度試験結果
(A-6 試料 (供試体 No. 2))

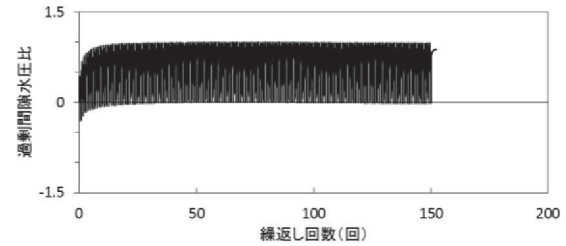
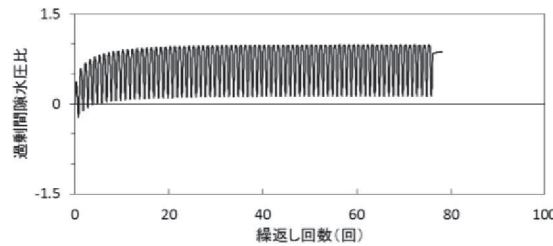
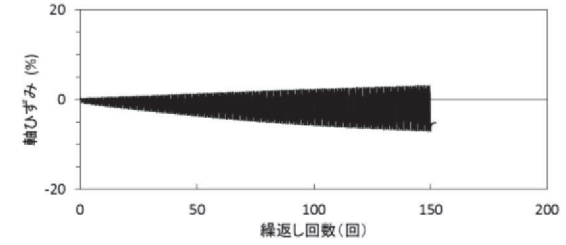
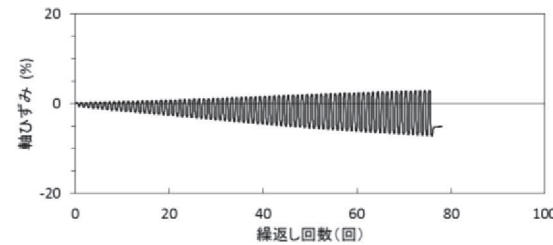
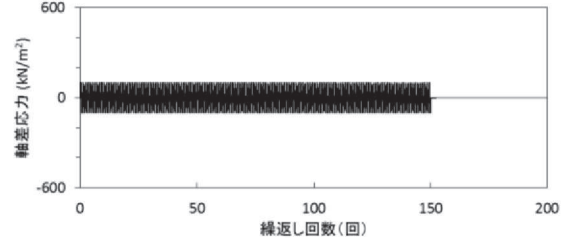
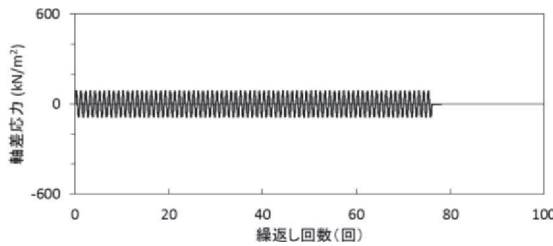
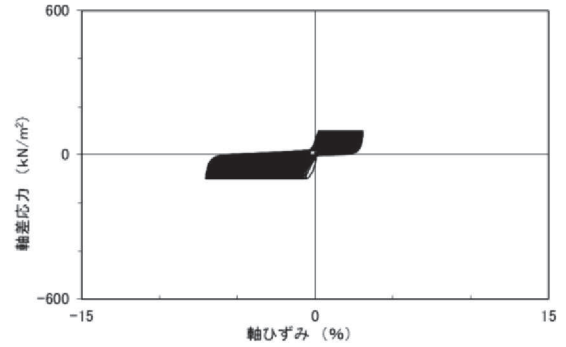
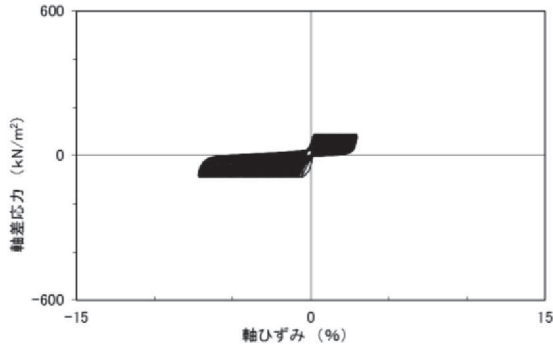
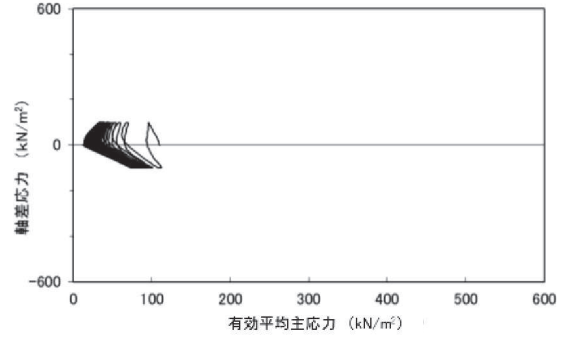
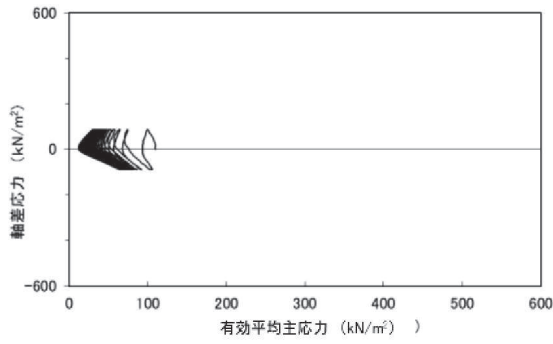


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | × | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-39 液状化強度試験結果
(A-6 試料 (供試体 No. 3))

図 2.2-40 液状化強度試験結果
(A-6 試料 (供試体 No. 4))

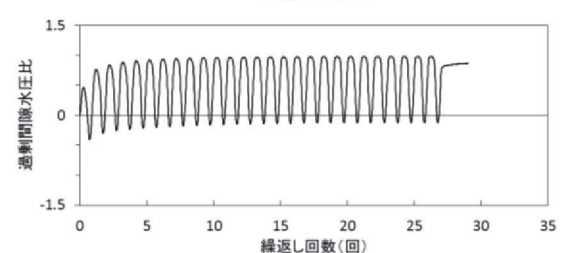
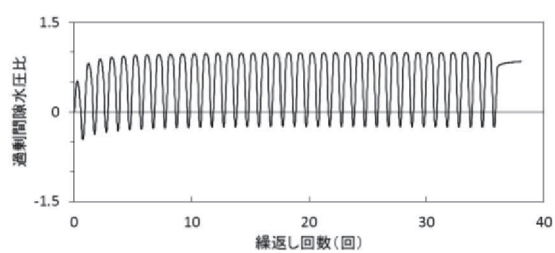
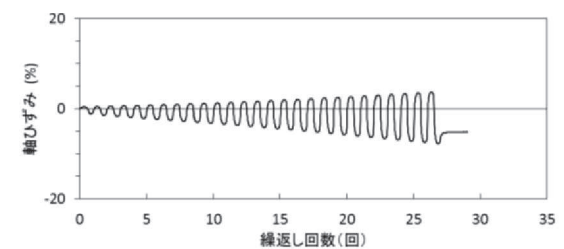
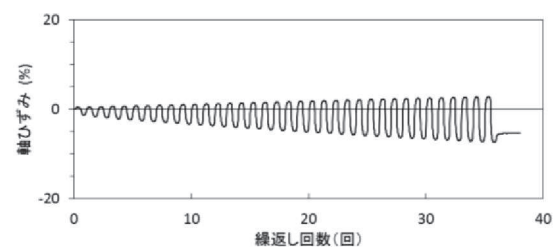
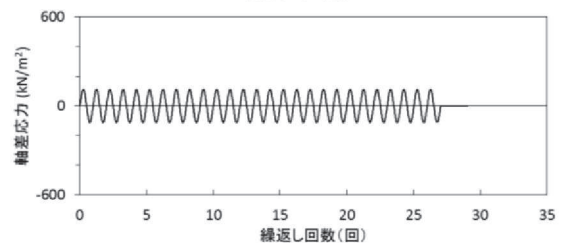
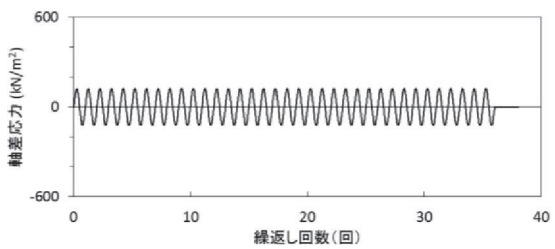
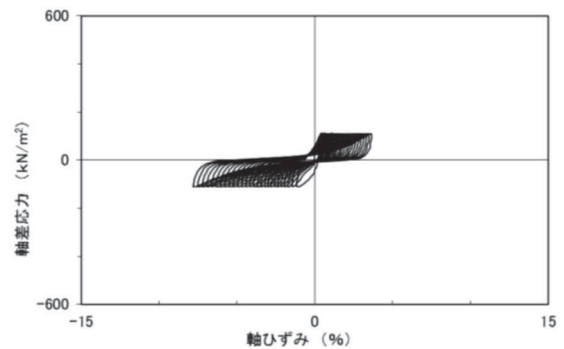
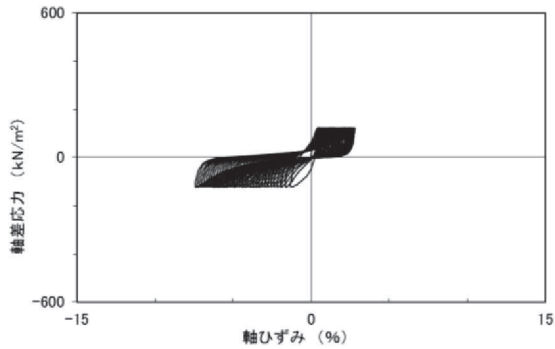
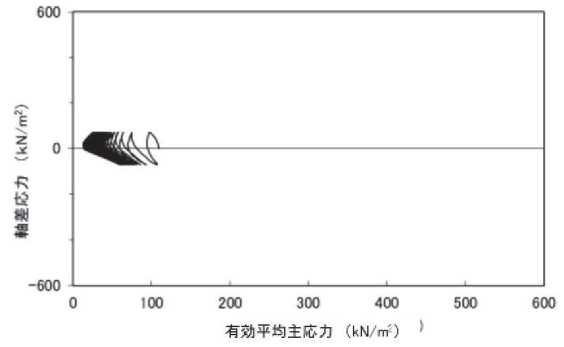
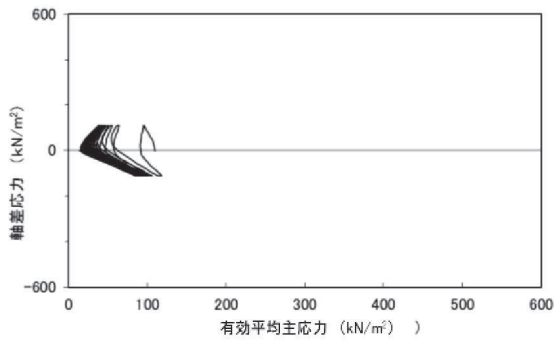


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-41 液状化強度試験結果
(A-7-1 試料 (供試体 No. 1))

図 2.2-42 液状化強度試験結果
(A-7-1 試料 (供試体 No. 2))

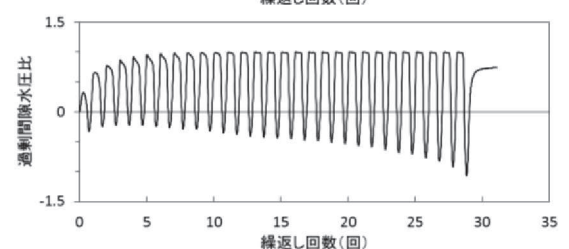
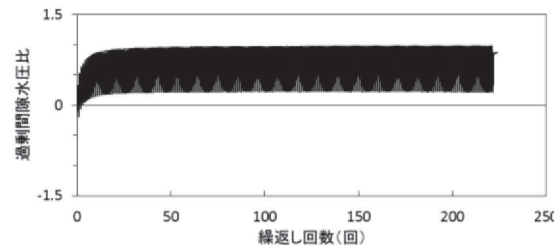
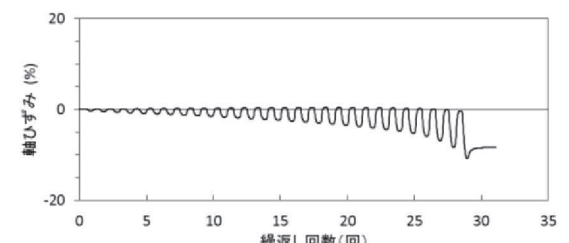
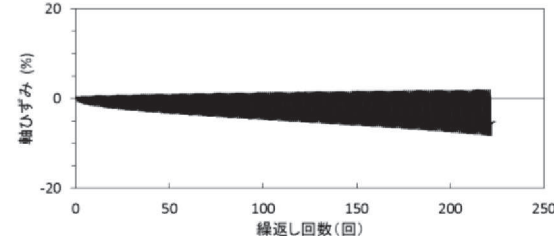
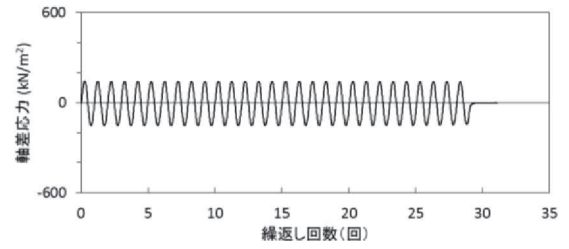
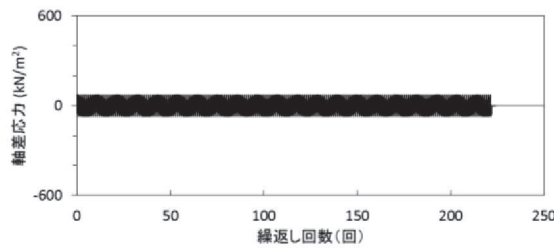
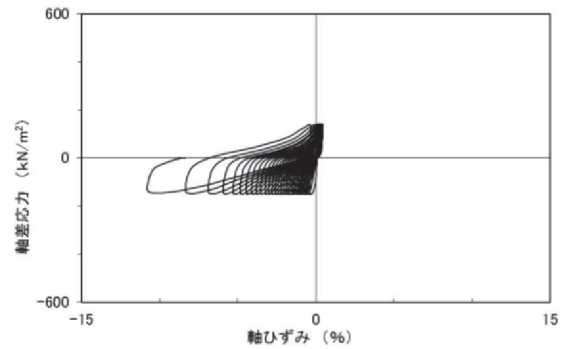
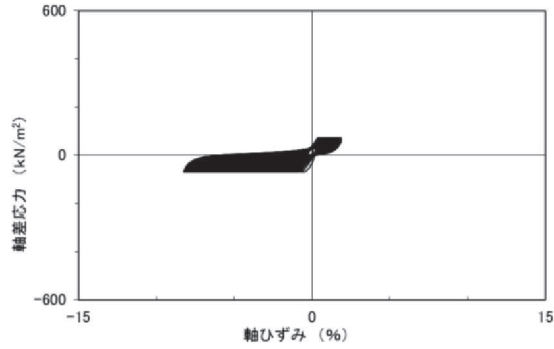
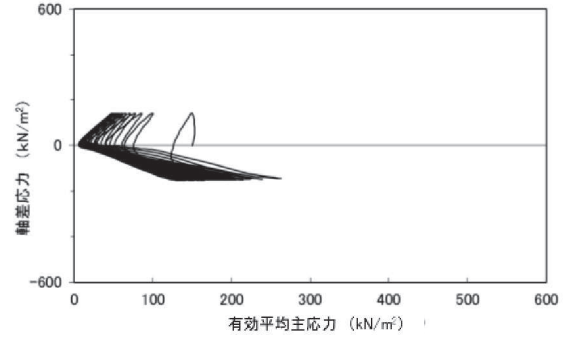
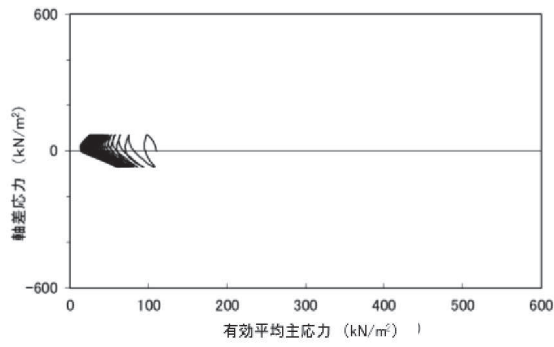


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-43 液状化強度試験結果
(A-7-1 試料 (供試体 No. 3))

図 2.2-44 液状化強度試験結果
(A-7-1 試料 (供試体 No. 4))

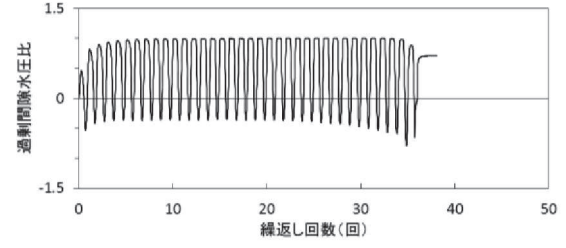
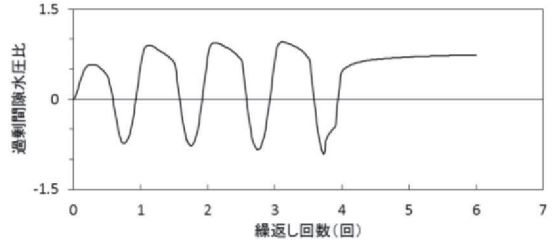
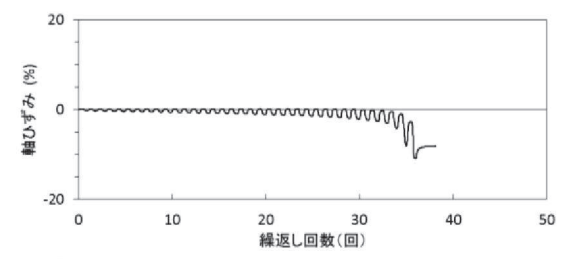
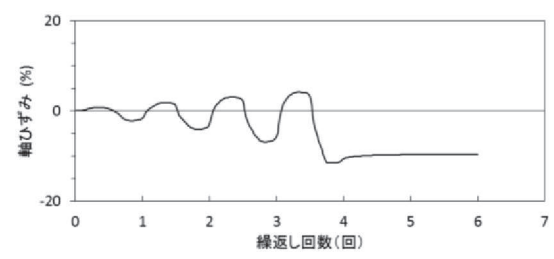
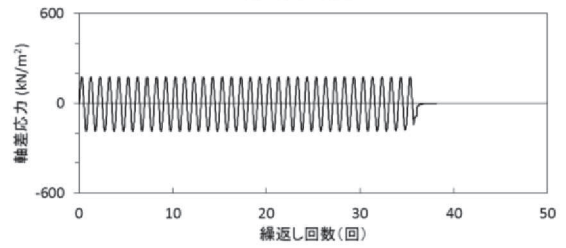
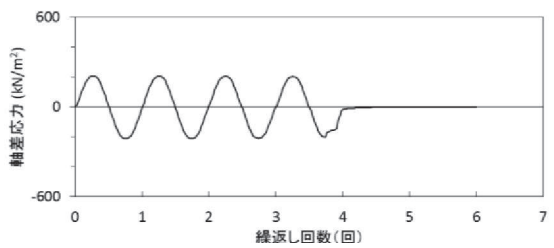
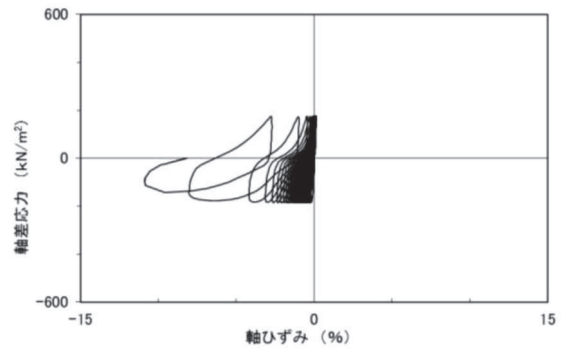
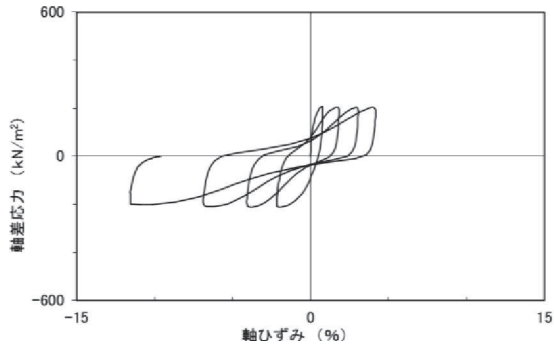
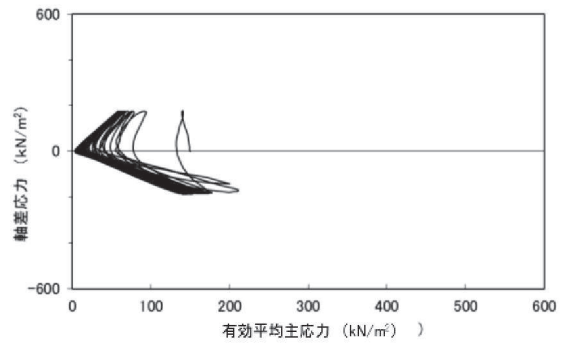
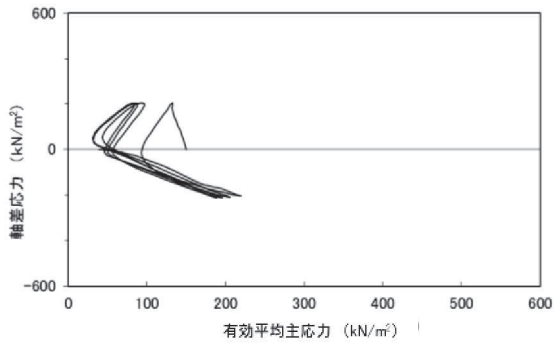


| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

図 2.2-45 液状化強度試験結果
(A-7-1 試料 (供試体 No. 5))

図 2.2-46 液状化強度試験結果
(A-7-2 試料 (供試体 No. 1))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

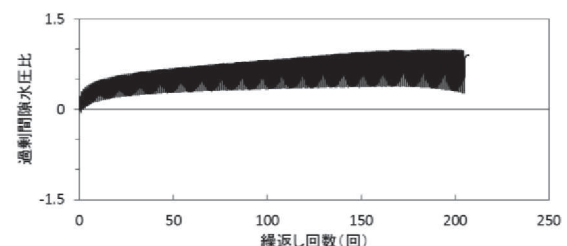
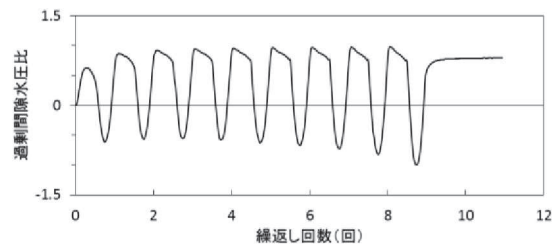
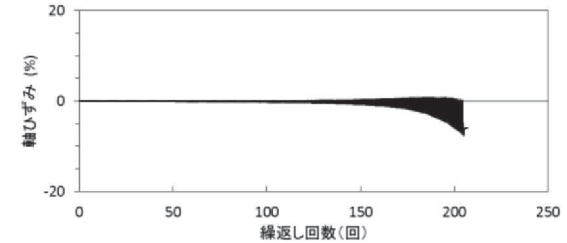
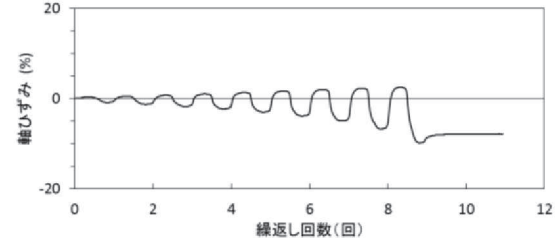
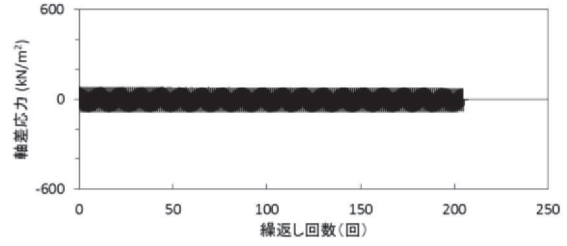
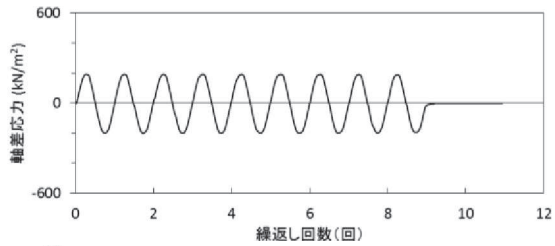
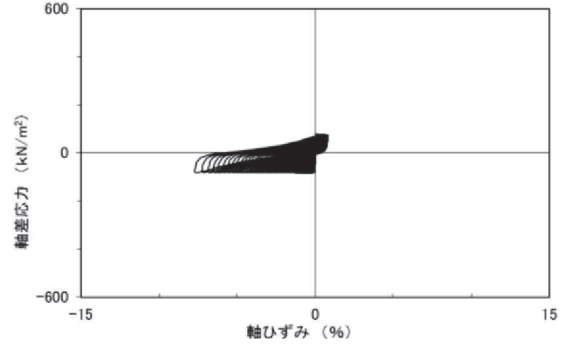
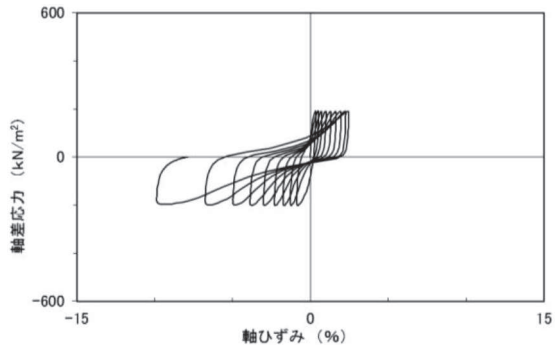
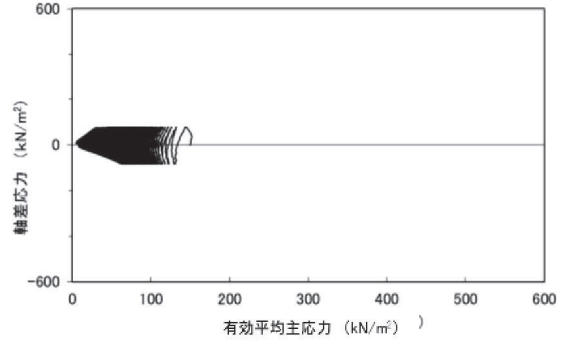
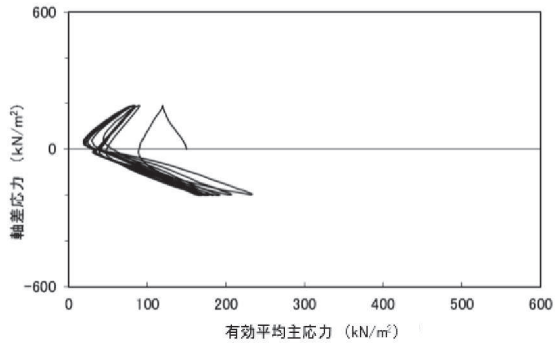
* 応力振幅が大きいことによるひずみ発生

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | ○ | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* ネッキングによるひずみ発生

図 2.2-47 液状化強度試験結果
(A-7-2 試料 (供試体 No. 2))

図 2.2-48 液状化強度試験結果
(A-7-2 試料 (供試体 No. 3))



| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|----|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 非液状化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | ×* | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |

* 応力振幅が大きく、ネッキングによるひずみ発生

| 試験結果 | | 液状化の判断 |
|---------------------------------|---|--------|
| 間隙水圧が上昇・蓄積する(95%) | ○ | 繰返し軟化 |
| 有効応力がゼロまで低下する | × | |
| 液体状となり流動する(ひずみ急増) | × | |
| ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復) | ○ | |
| | | |

図 2.2-49 液状化強度試験結果
(A-7-2 試料 (供試体 No. 4))

図 2.2-50 液状化強度試験結果
(A-7-2 試料 (供試体 No. 5))

2.3 液状化強度試験供試体写真










| | 試験前 | 試験後 |
|-------|---|--|
| A-1-1 |  | — |
| A-1-2 |  | — |
| A-1-3 |  | — |
| A-2 |  |  |
| | 左から1番目はネッキング。右から1番目は礫に沿ってせん断破壊。 | |
| A-3 |  |  |
| A-4 |  |  |

図 2. 3-1 液状化強度試験供試体写真 (旧表土) ①











| | 試験前 | 試験後 |
|-------|---|--|
| A-5-1 |  |  |
| | 右から1番目はネッキング。 | |
| A-5-2 |  |  |
| | — | |
| A-6 |  |  |
| | 左から1番目は礫に沿ってせん断破壊。左から3番目は右下礫との境界面で変形が卓越。左から4番目はネッキング。 | |
| A-7-1 |  |  |
| | — | |
| A-7-2 |  |  |
| | 左から1, 3, 4, 5番目はネッキング。左から4, 5番目は礫に沿ってせん断破壊。 | |

図 2.3-2 液状化強度試験供試体写真 (旧表土) ②





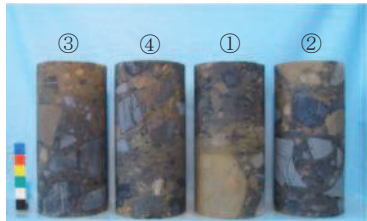
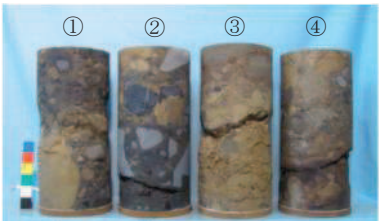






| | 試験前 | 試験後 |
|-------|---|--|
| B-1-1 |  |  |
| | — | |
| B-1-2 |  |  |
| | — | |
| B-1-3 |  |  |
| | 左から 2, 3, 4 番目はせん断破壊。 | |
| B-1-4 |  |  |
| | — | |
| B-2-1 |  |  |
| | 右から 1 番目はネッキング。 | |
| B-2-2 |  |  |
| | — | |

図 2.3-3 液状化強度試験供試体写真（盛土）①


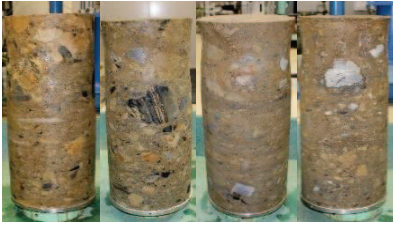










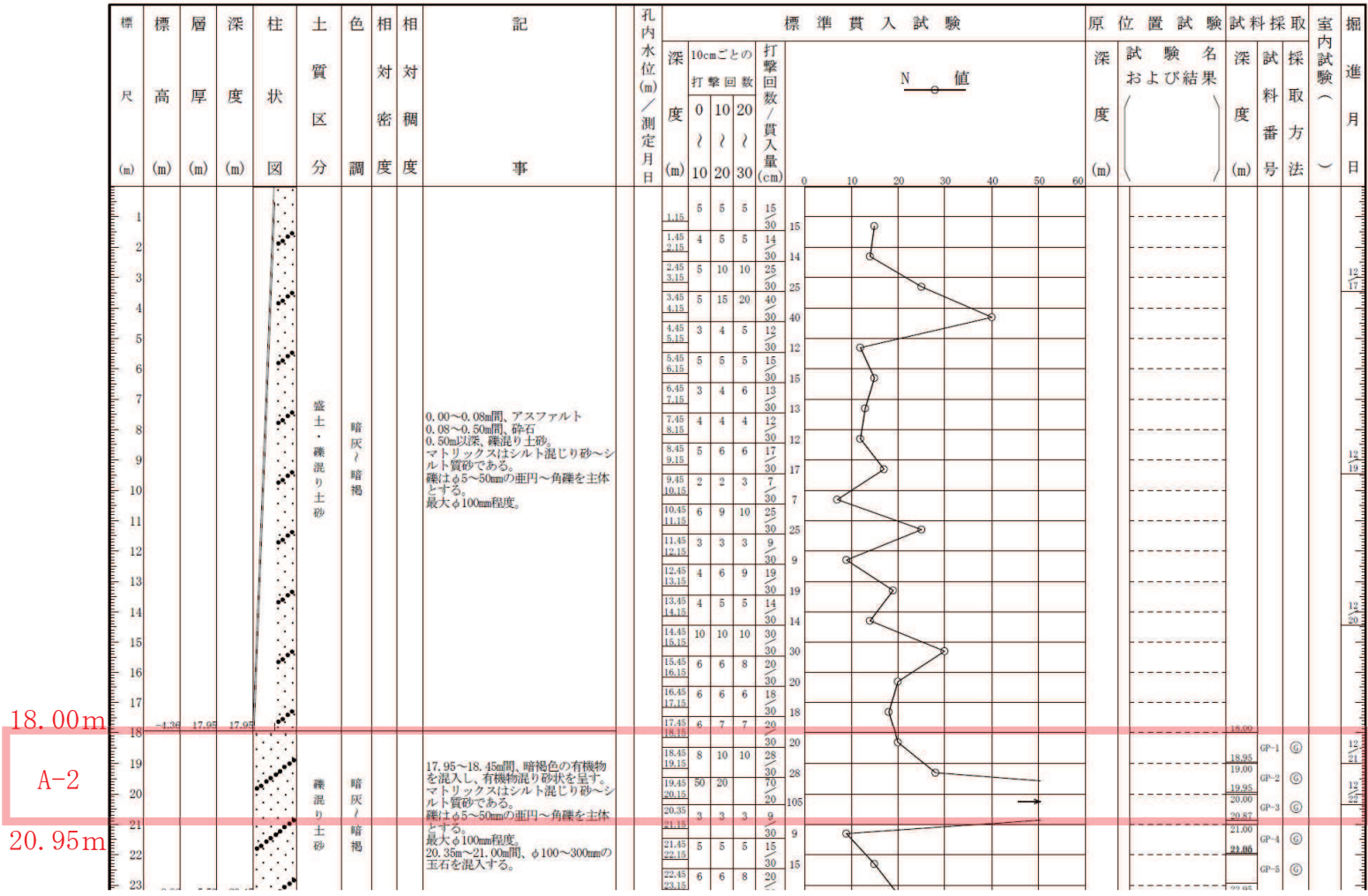
| | 試験前 | 試験後 |
|-----|---|--|
| B-3 |  |  |
| | — | |
| B-4 |  |  |
| | — | |
| B-5 |  |  |
| | — | |
| B-6 |  |  |
| | — | |
| B-7 |  |  |
| | — | |
| B-8 |  |  |
| | — | |

図 2.3-4 液状化強度試験供試体写真（盛土）②

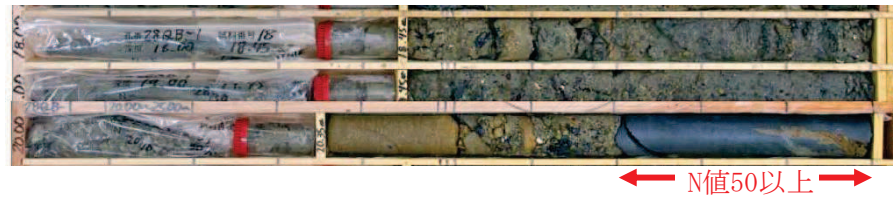
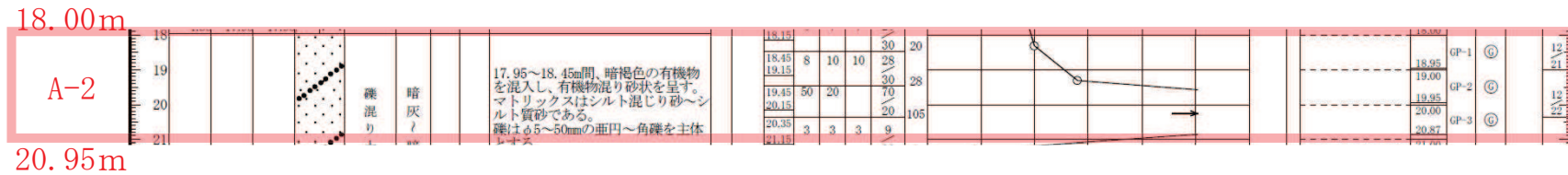
2.4 液状化強度試験試料採取深度とボーリング柱状図の対応



A-2(旧表土) : 供試体寸法 φ100

図 2.4-1(1) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-1) (ボーリング柱状図に一部加筆)

| 標尺 (m) | 標高 (m) | 層厚 (m) | 深度 (m) | 柱状 図 | 土質 区分 | 色調 | 相對 密度 | 相對 稠度 | 記 事 | 孔内 水位 (m) /測定 月日 | 標準貫入試験 | | | | | 原位置 試験 深 度 (m) | 試験名 および 結果 | 試料 採取 番号 | 採取 方法 | 室内 試験 (月 日) | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|----|----------|----------|--------|------------------------------|---------------|-----------------|----|----|----------------------|----------------------------|------------------|----------------|----------|--------------------------|--------|
| | | | | | | | | | | | 深 度 (m) | 10cmごとの 打撃回数 | | | 打撃回数 /貫入量 (cm) | | | | | | N 値 |
| | | | | | | | | | | | | 0 | 10 | 20 | | | | | | | |



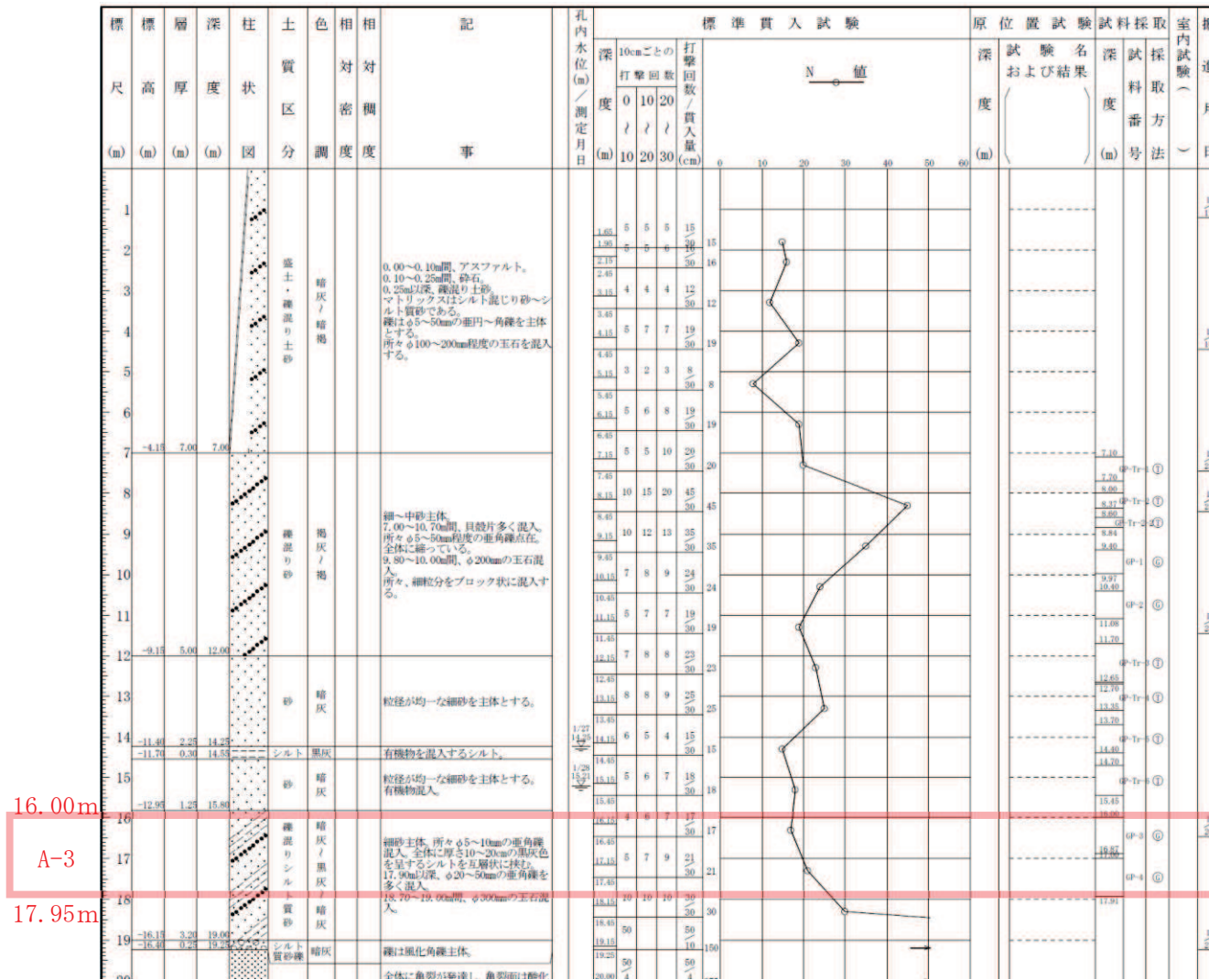
ボーリングコア写真(28QB-1 : 18.00m~21.00m)

液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図においては、N 値が 50 以上となっているが、液状化強度試験供試体の写真(下)から、液状化強度試験に用いた供試体はボーリングコア写真(上)で示す N 値 50 以上の位置から採取したものではないことを確認している。



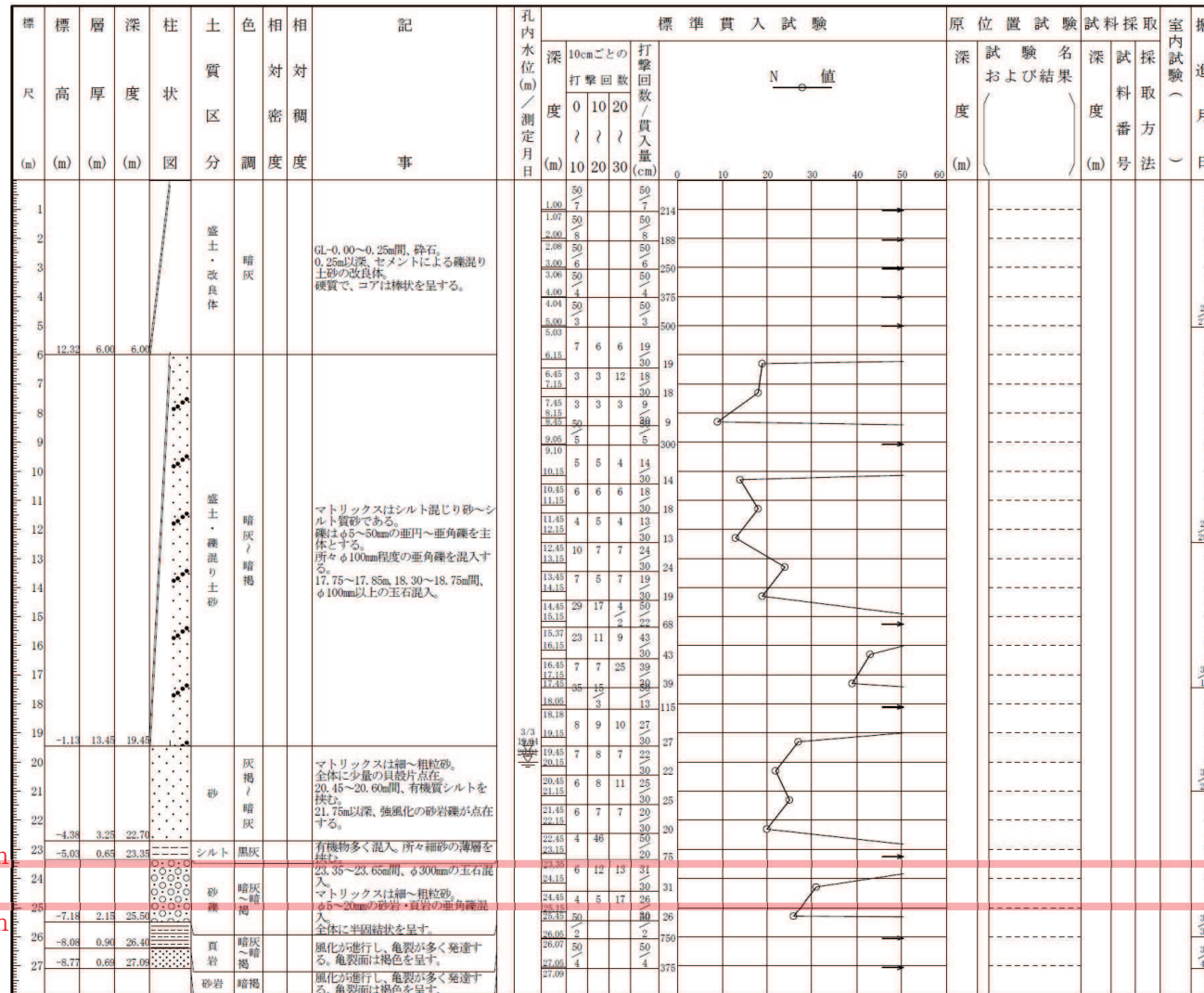
液状化強度試験供試体 (A-2 : 試験前)

図 2.4-1(2) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-1) (ボーリング柱状図に一部加筆)



A-3(旧表土) : 供試体寸法 φ100

図 2.4-2 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-2) (ボーリング柱状図に一部加筆)

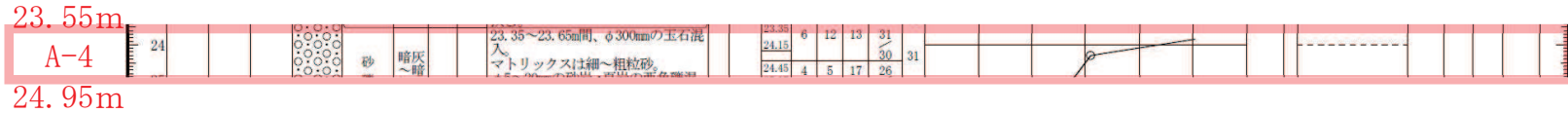


23.55m
A-4
24.95m

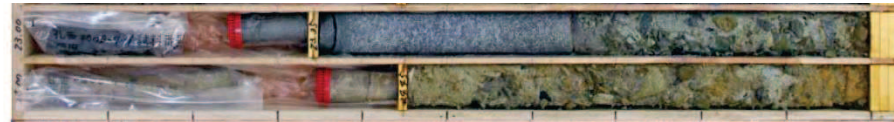
A-4(旧表土) : 供試体寸法 φ100

図 2.4-3(1) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-4-1) ボーリング柱状図に一部加筆)

| 標尺 | 標高 | 層厚 | 深度 | 柱状 | 土質区分 | 色調 | 相對密度 | 相對稠度 | 記 | 孔内水位 (m) / 測定月日 | 標準貫入試験 | | | 原位置試験 深度 (m) | 試験名 および結果 | 試料採取 深度 (m) | 採取 番号 | 室内試験 () | 掘進 月日 |
|-----|-----|-----|-----|----|------|----|------|------|---|--------------------|-----------------|--------------------|----|-----------------|--------------|----------------|----------|-------------|----------|
| | | | | | | | | | | | 10cmごとの 打撃回数 | 打撃回数 / 貫入量 (cm) | | | | | | | |
| | | | | | | | | | 事 | | 0 | 10 | 20 | | | | | | |
| (m) | (m) | (m) | (m) | 図 | | | | | | | (m) | 10 | 20 | 30 | | | | | |



← N値50以上 →



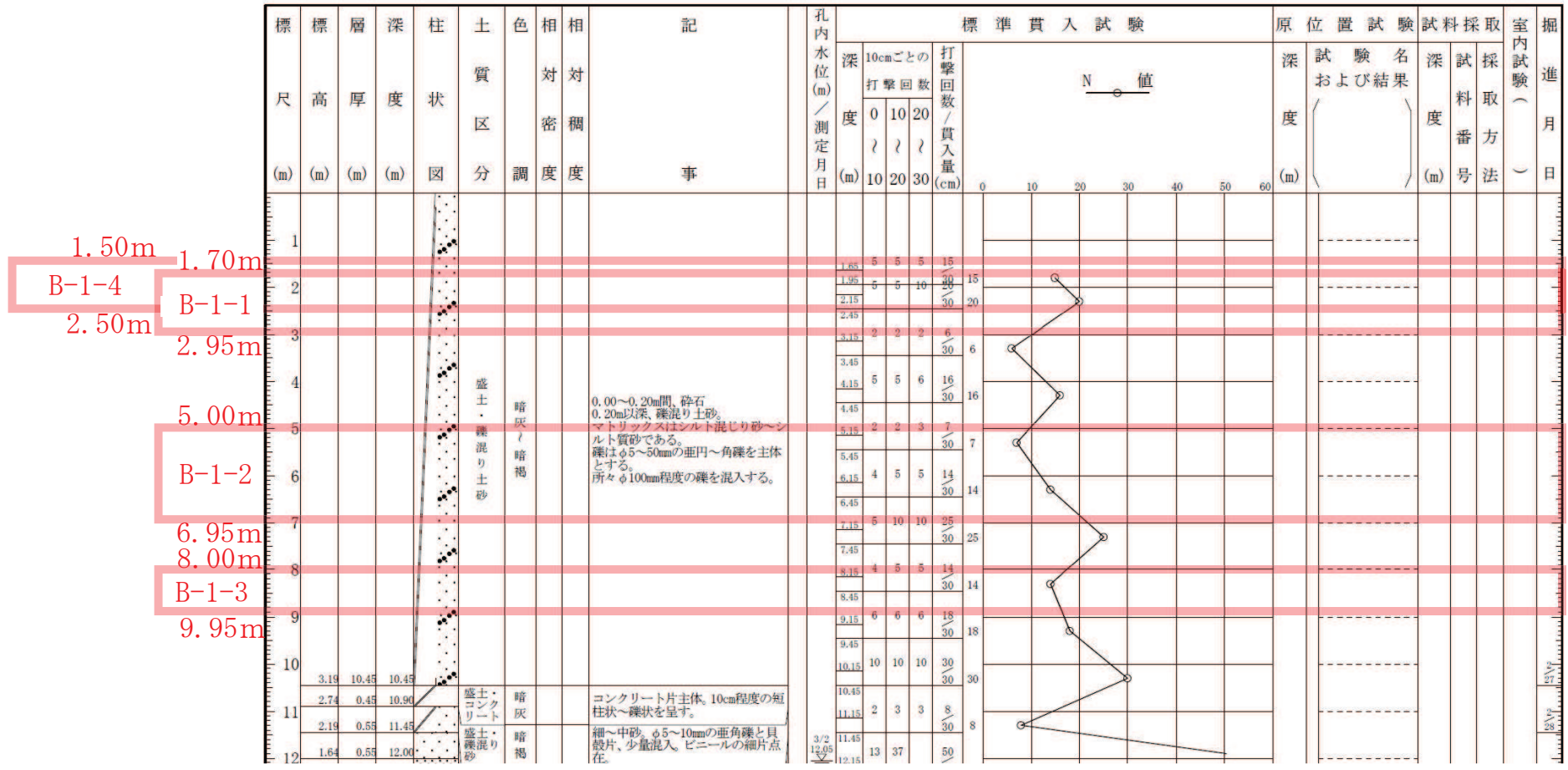
ボーリングコア写真(28QB-4-1 : 23.00m~25.00m)

液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図においては、N 値が 50 以上となっているが、液状化強度試験供試体の写真(下)から、液状化強度試験に用いた供試体はボーリングコア写真(上)で示す N 値 50 以上の位置から採取したものではないことを確認している。



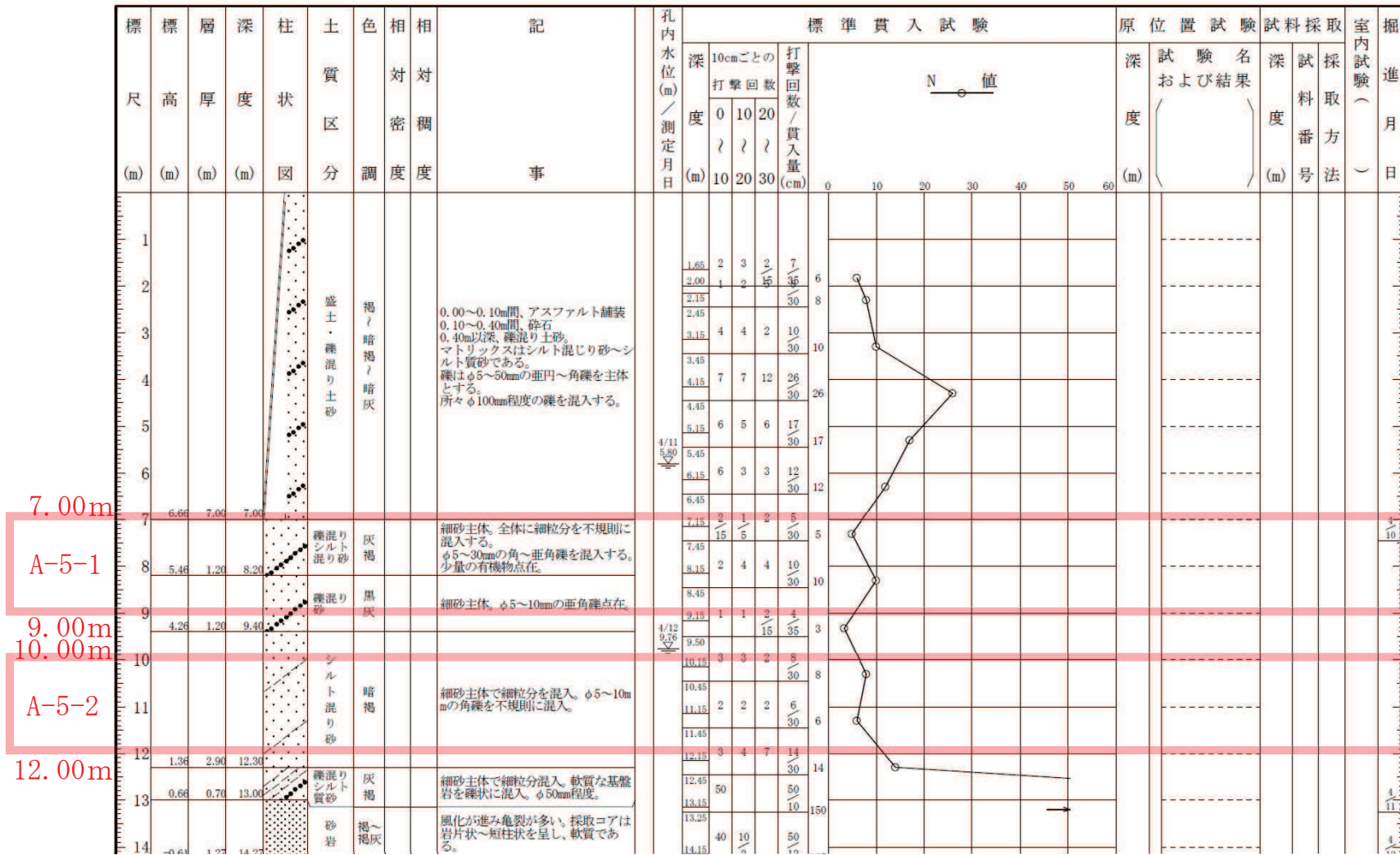
液状化強度試験供試体 (A-4 : 試験前)

図 2.4-3(2) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-4-1) ボーリング柱状図に一部加筆)



B-1-1, B-1-2, B-1-3 (盛土) : 供試体寸法 φ 100
 B-1-4 (盛土) : 供試体寸法 φ 300

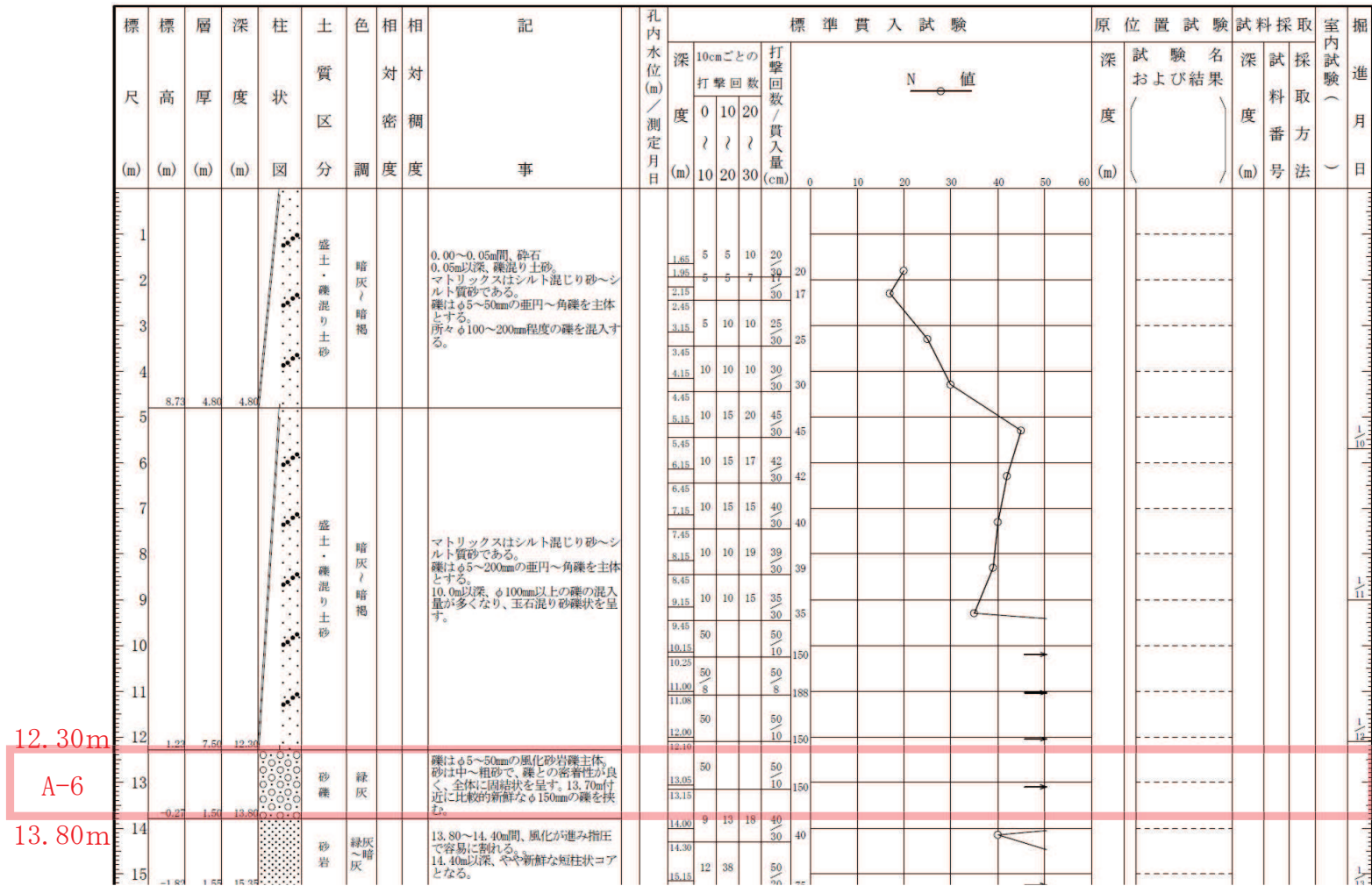
図 2.4-4 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-5) (ボーリング柱状図に一部加筆)



A-5-1(旧表土) : 供試体寸法 φ100

A-5-2(旧表土) : 供試体寸法 φ70

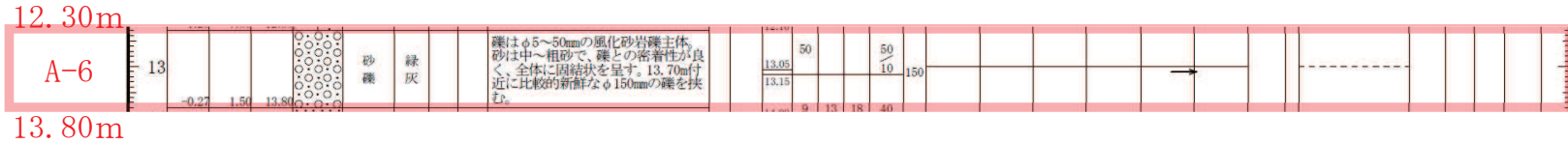
図 2.4-5 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-5-1) (ボーリング柱状図に一部加筆)



A-6(旧表土) : 供試体寸法 φ100

図 2.4-6(1) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-6) (ボーリング柱状図に一部加筆)

| 標尺 (m) | 標高 (m) | 層厚 (m) | 深度 (m) | 柱状 図 | 土質 区分 | 色調 | 相對 密度 | 相對 稠度 | 記 事 | 孔内 水位 (m) /測定 日 | 標準貫入試験 | | | | 原位置試験 | | 試料採取 番号 | 採取 方法 | 室内試験 () | 掘進 月日 | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|----|----------|----------|--------|-----------------------------|---------------|-----------------|-----------|-----------|--------|---------------|------------|----------|-------------|----------|--------------|
| | | | | | | | | | | | 深 度 (m) | 10cmごとの 打撃回数 | | | N 値 | 深 度 (m) | | | | | 試験名 および結果 |
| | | | | | | | | | | | | 0 ? ? | 10 ? ? | 20 ? ? | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



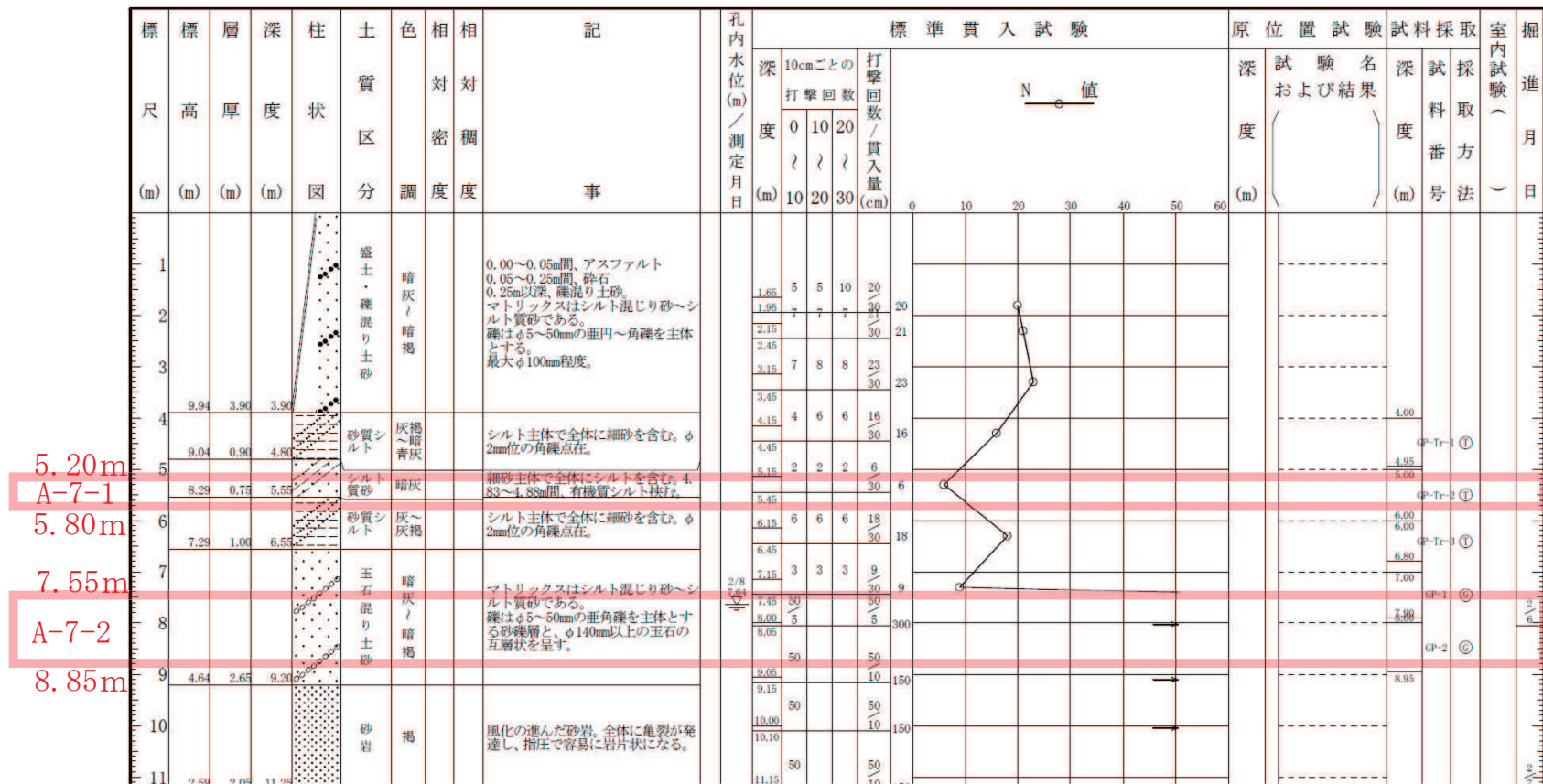
ボーリングコア写真(28QB-6 : 12.00m~14.00m)

液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図においては、N 値が 50 以上となっているが、液状化強度試験供試体の写真(下)から、液状化強度試験に用いた供試体はボーリングコア写真(上)で示す N 値 50 以上の位置から採取したものではない。また、旧表土の液状化強度特性は A-5 の結果が下限となっており、A-6 で強度特性が決まるものではない。



液状化強度試験供試体 (A-6 : 試験前)

図 2.4-6(2) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-6) (ボーリング柱状図に一部加筆)



A-7-1 (旧表土) : 供試体寸法 φ100

A-7-2 (旧表土) : 供試体寸法 φ70

図 2.4-7(1) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-7) (ボーリング柱状図に一部加筆)

| 標尺 (m) | 層高 (m) | 層厚 (m) | 深度 (m) | 柱状 図 | 土質 区分 | 色調 | 相対 密度 | 相対 稠度 | 記 事 | 孔内 水位 (m) /測定 月日 | 標準貫入試験 | | | | | 原位置 試験 深度 (m) | 試験名 および 結果 | 試料 採取 深度 (m) | 採取 方法 | 室内 試験 () | 掘進 月日 | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|----------|----|----------|----------|--------|------------------------------|---------------|-----------------|----|----|------------------------------|------------------------|------------------|-----------------------|----------|-----------------|----------|-----|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | 深 度 (m) | 10cmごとの 打撃回数 | | | 打撃 回数 /貫入 量 (cm) | | | | | | | N 値 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 0 | 10 | 20 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 0 | 10 | 20 | 30 | 60 | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|--|--|--|--|----------|---------|--|--|--|------|----|----|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 7.55m | | | | | | | | | | | 7.45 | 50 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-7-2 | 8 | | | | | 混り 土砂 | 灰 暗褐 | | | | 8.00 | 5 | 5 | 300 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.85m | | | | | | | | | | | 8.05 | 50 | 50 | | | | | | | | | | | | | | | |



ボーリングコア写真(28QB-7 : 7.00m~9.00m)

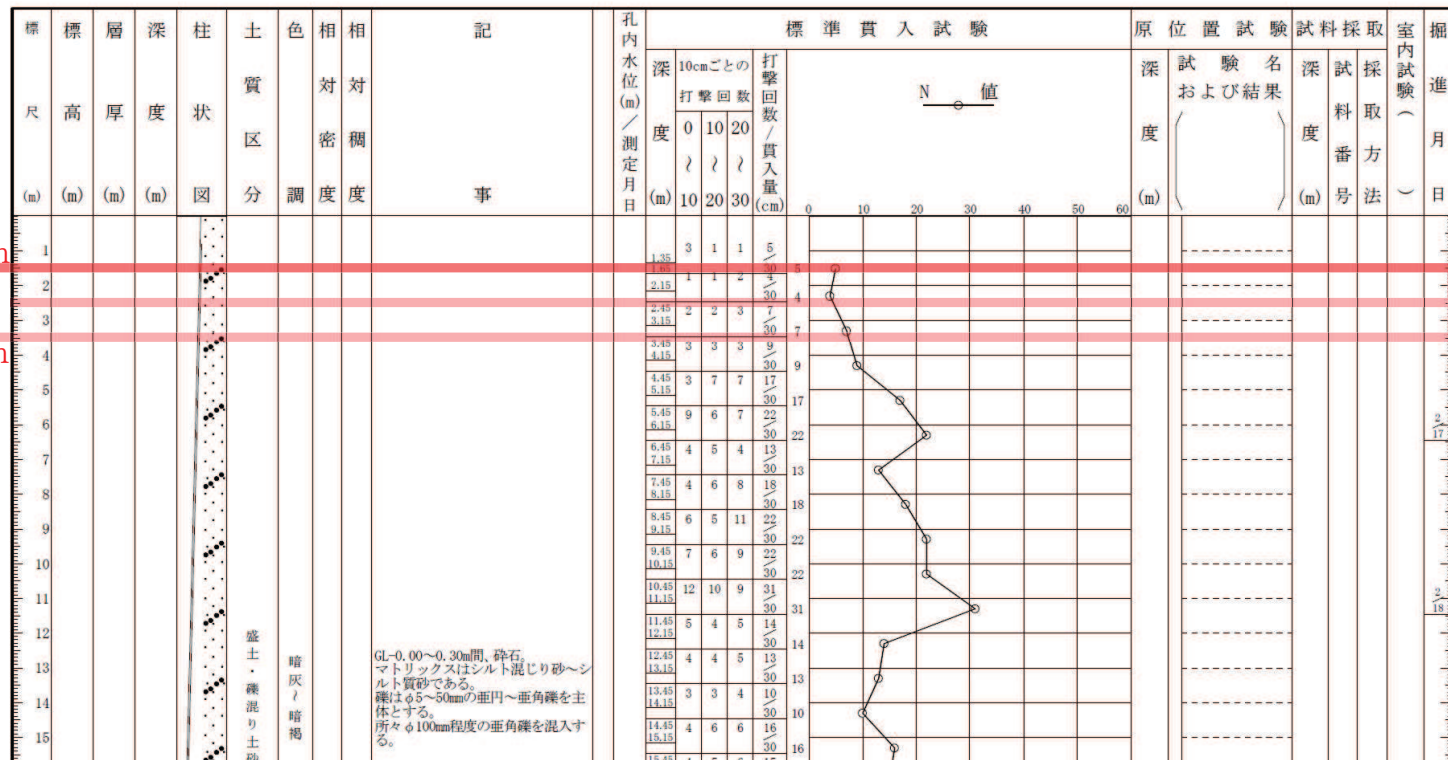
液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図においては、N 値が 50 以上となっているが、液状化強度試験供試体の写真(下)から、液状化強度試験に用いた供試体はボーリングコア写真(上)で示す N 値 50 以上の位置から採取したものではない。また、旧表土の液状化強度特性は A-5 の結果が下限となっており、A-7 で強度特性が決まるものではない。



液状化強度試験供試体 (A-7-2 : 試験前)

図 2.4-7(2) 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-7) (ボーリング柱状図に一部加筆)

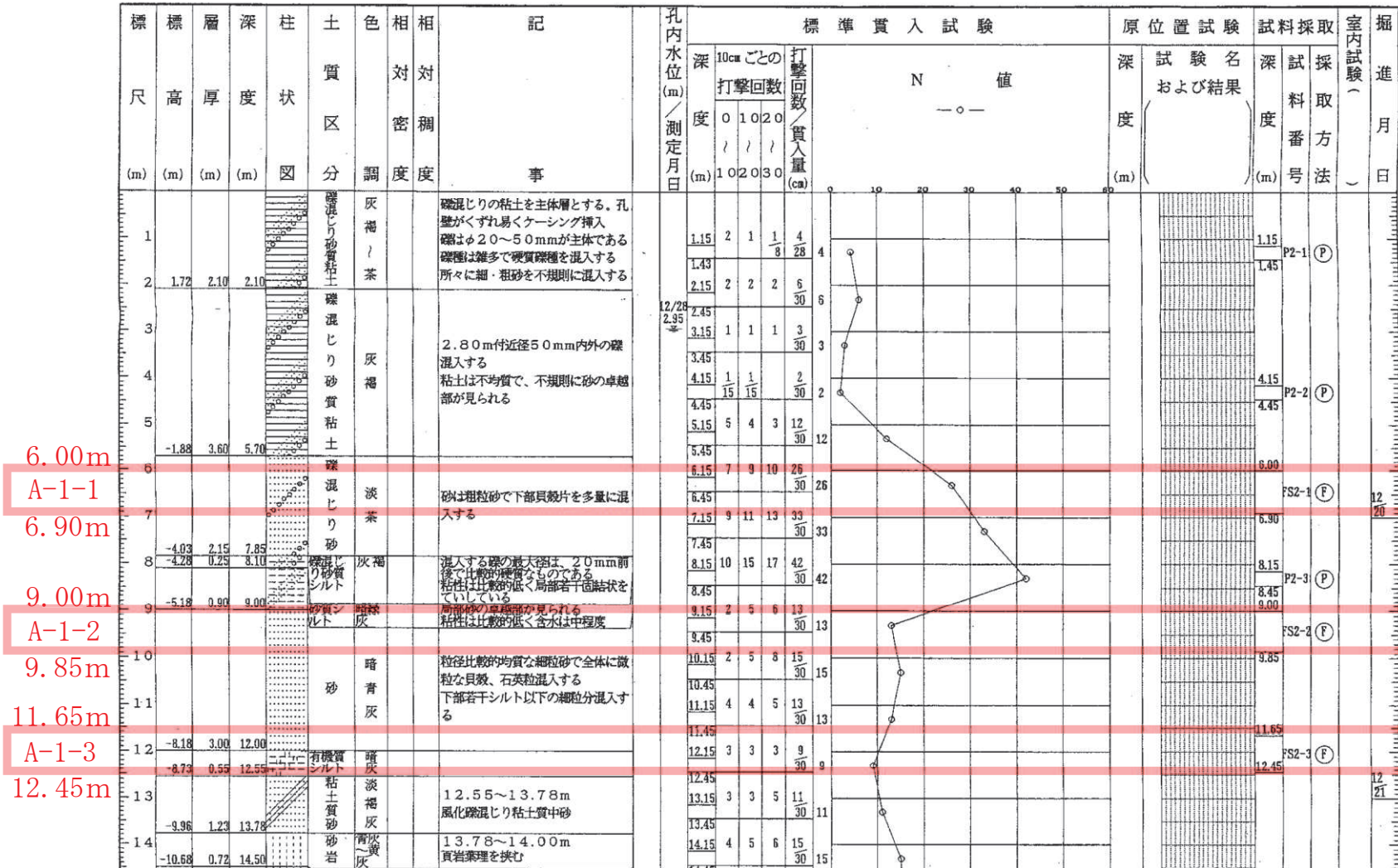
1.50m 1.50m
 B-2-2 B-2-1
 2.50m 3.45m



B-2-1(盛土) : 供試体寸法 φ 100

B-2-2(盛土) : 供試体寸法 φ 300

図 2.4-8 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (28QB-8) (ボーリング柱状図に一部加筆)



A-1-1, A-1-2, A-1-3 (旧表土) : 供試体寸法 φ50

図 2.4-9 液状化強度試験採取深度に対応するボーリング柱状図 (Fs-2) (ボーリング柱状図に一部加筆)

(参考資料 1 5) 盛土の均一性について

1. 概要

盛土は堅固な岩盤を掘削した岩砕を用いて造成したものであり、施工管理基準により施工範囲全域にわたって同様に締固められていることから、均一性が確保されている。

盛土の均一性について、盛土材料（岩砕）の母材の性状及び盛土施工の品質管理により示す。

2. 盛土の分布範囲

盛土の分布範囲について、平面図を図 2-1 に、断面図を図 2-2 に示す。

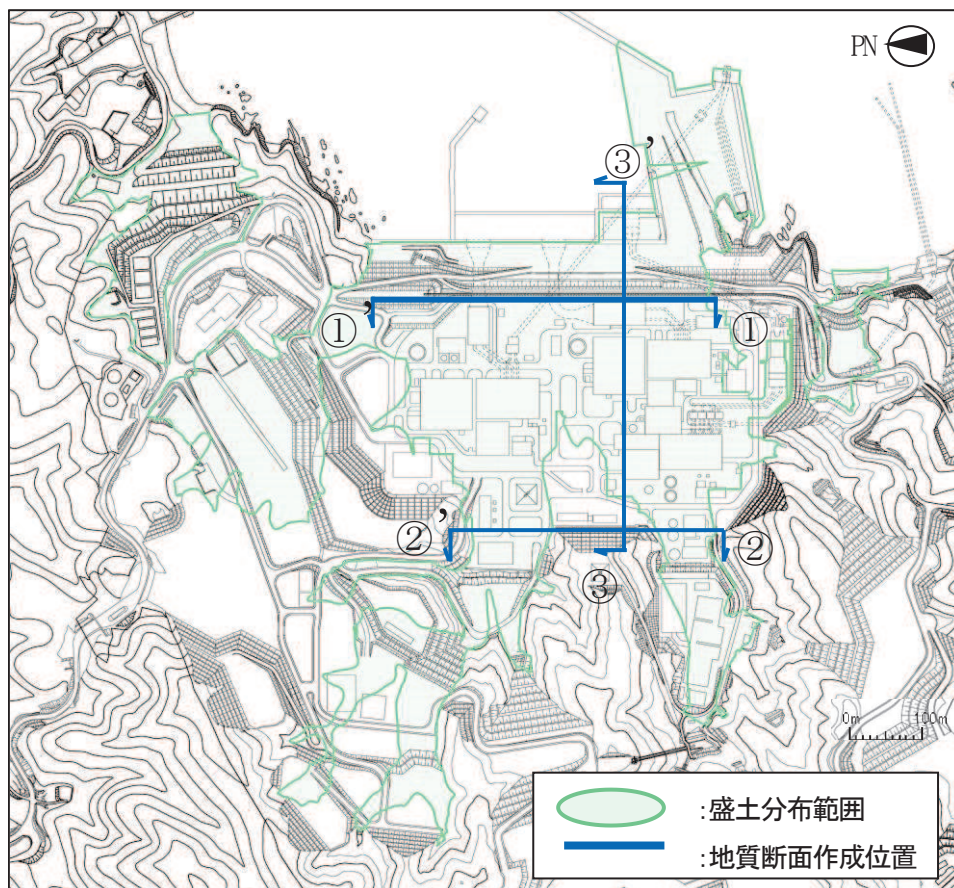


図 2-1 盛土の分布範囲（平面図）

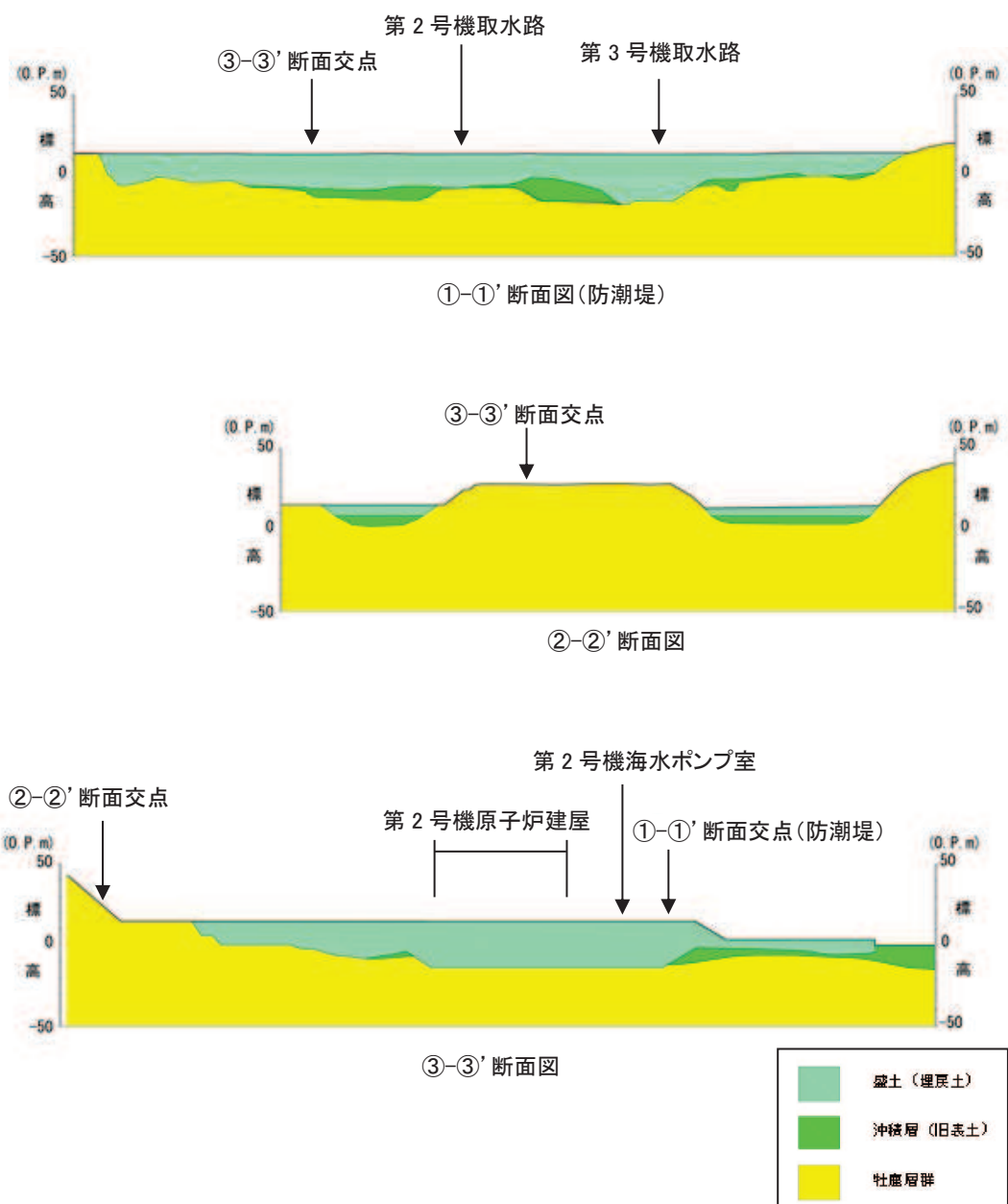


図 2-2 盛土の分布範囲 (断面図)

3. 盛土材料（岩砕）の母材の性状

盛土材料（岩砕）の母材は敷地に分布する硬岩（砂岩，頁岩主体）であり，発電所建設時の基礎掘削において発生した岩砕である。

図 3-1 に敷地の地質平面図，図 3-2 に敷地の地質断面図，図 3-3 に敷地の地質層序を示す。

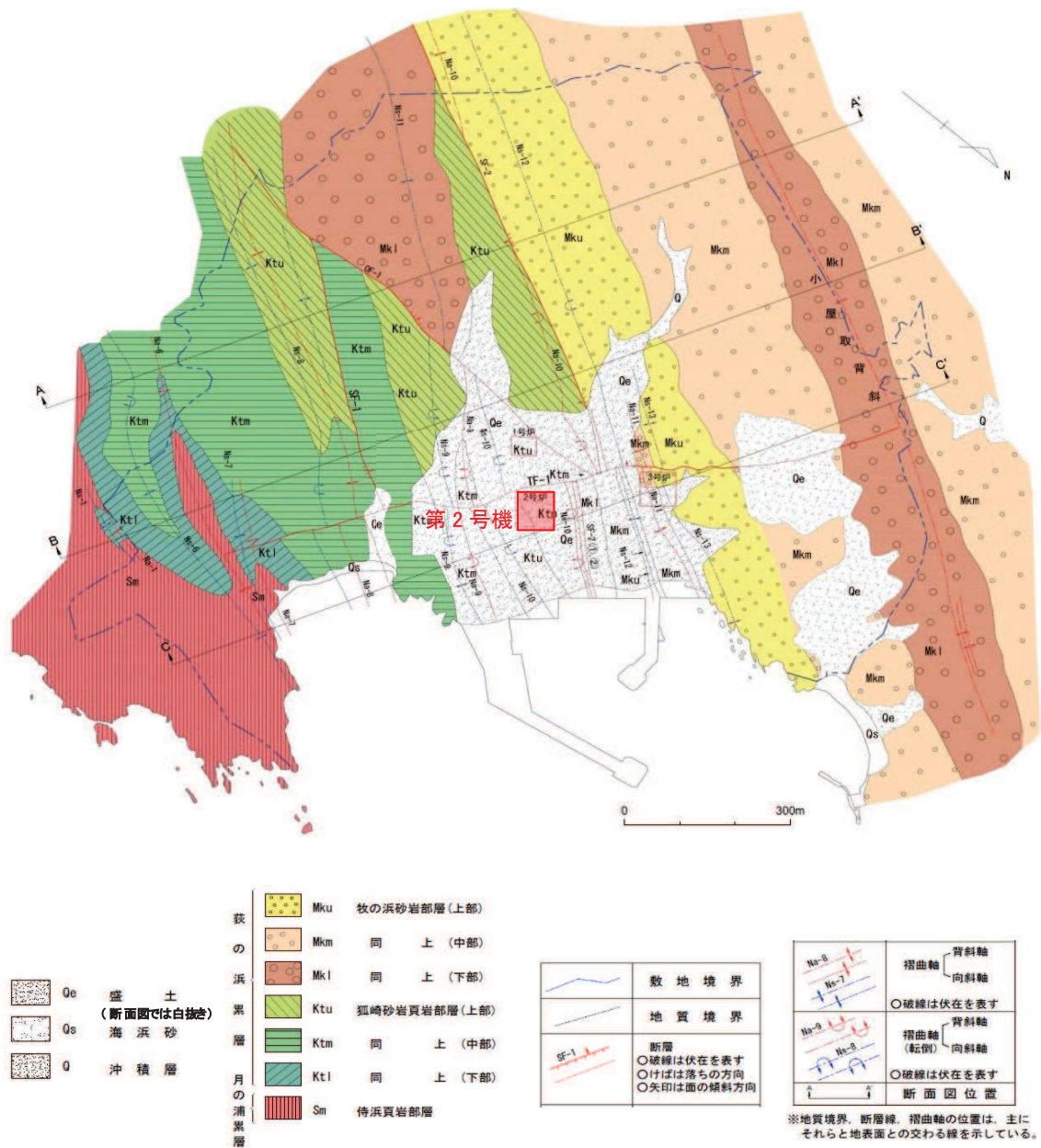


図 3-1 敷地の地質平面図

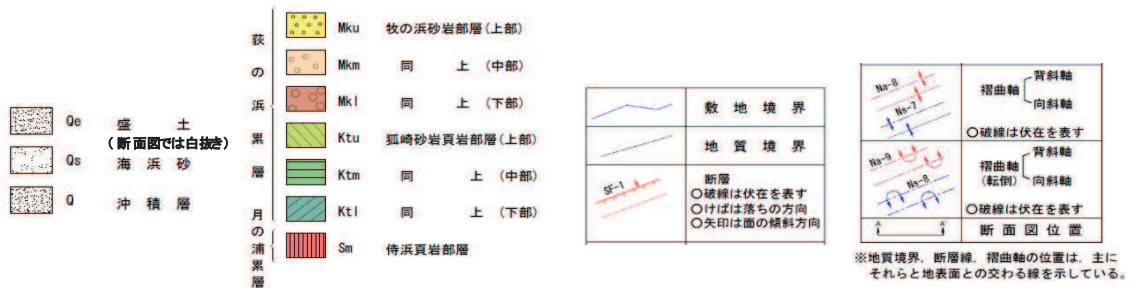
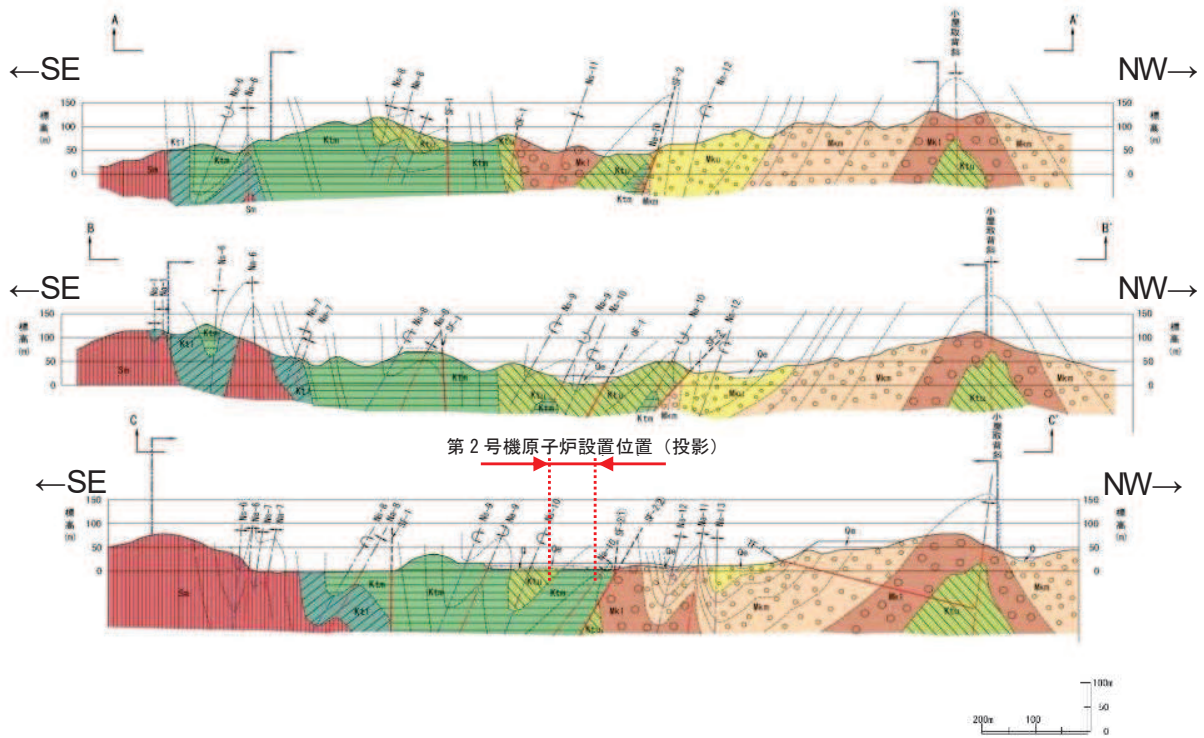


図 3-2 敷地の地質断面図

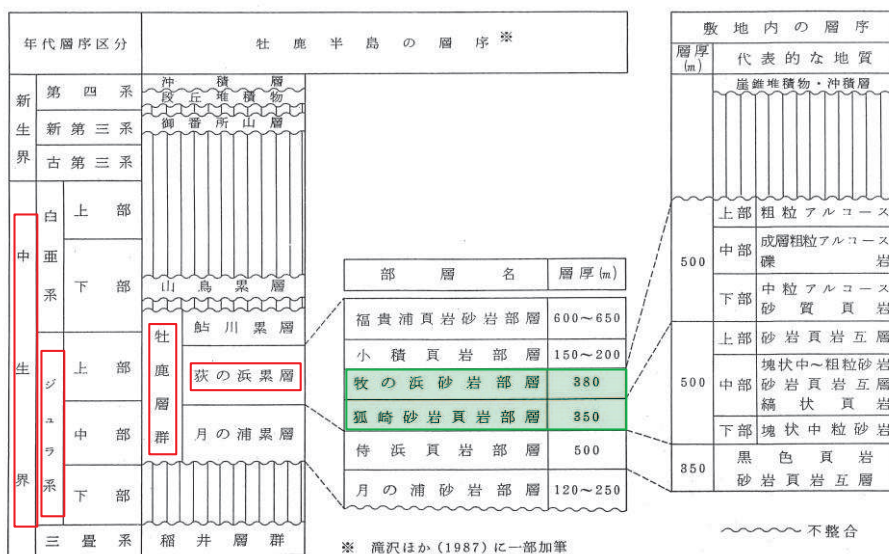


図 3-3 敷地の地質層序

盛土材料（岩砕）は、第1号機、第2号機及び第3号機の各建設段階において、岩盤に直接設置する施設（原子炉建屋、タービン建屋、制御建屋、取水口～海水ポンプ室等）の基礎掘削の際に発生した岩砕であり、発生した岩砕は最大粒径 300mm で調整し、埋戻し材料として施工している。

図 3-4 に第1号機建設時の掘削状況、図 3-5 に第2号機建設時の掘削状況を示す。

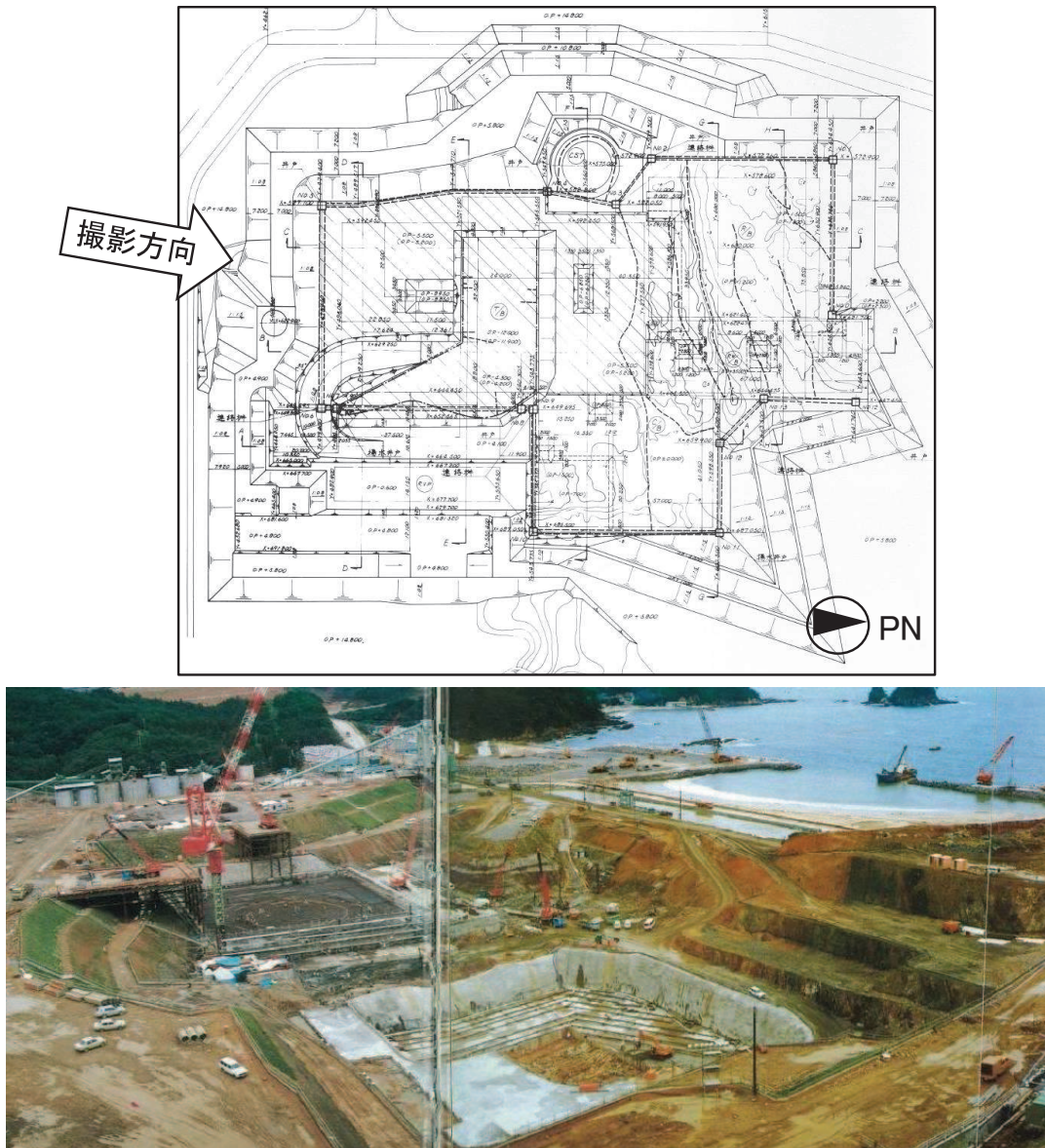


図 3-4 第1号機建設時の掘削状況

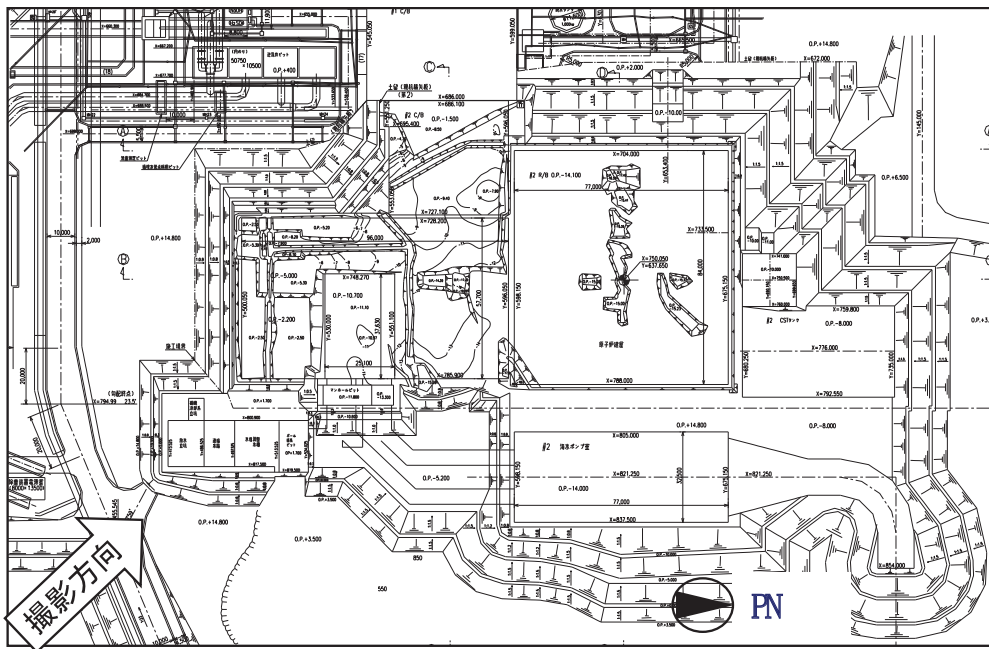


図 3-5 第 2 号機建設時の掘削状況

4. 盛土の施工・品質管理

第1号機、第2号機及び第3号機の盛土の施工に当たっては、施工管理基準を定め、これに基づき実施することで発電所敷地全域における盛土の品質を一定に保っている。

①盛土材料の選別

- ・盛土材料は原子炉建屋周辺の掘削岩盤を材料としており、粒径 300mm 以上は品質確保のため除去。
- ・掘削岩盤は、土砂仮置場に運搬し、腐葉土、粘土塊、泥等を除去し、粒径 300mm 以下の岩砕として仮置きし、造成時に使用。

②施工方法

- ・事前に試験施工を行い、十分な転圧・締固め*エネルギーを得られる重機を選定（選定した重機の例・・・敷き均し：21 tブルドーザ、転圧：8 t 振動ローラー）。
- ・撒き出し厚 30 cmとし、盛土施工エリア全域に同様の施工管理基準を適用。

③品質管理（土質試験）

- ・一定数量毎に密度・含水比及び沈下量を管理（表 4-1）。

*締固めの目的

- ・密度を高め、水の浸入による軟化・膨張を防ぐ。
- ・盛土の安定・支持力の増大を図る。
- ・盛土完成後の圧縮沈下を小さくする。

表 4-1 盛土の品質管理

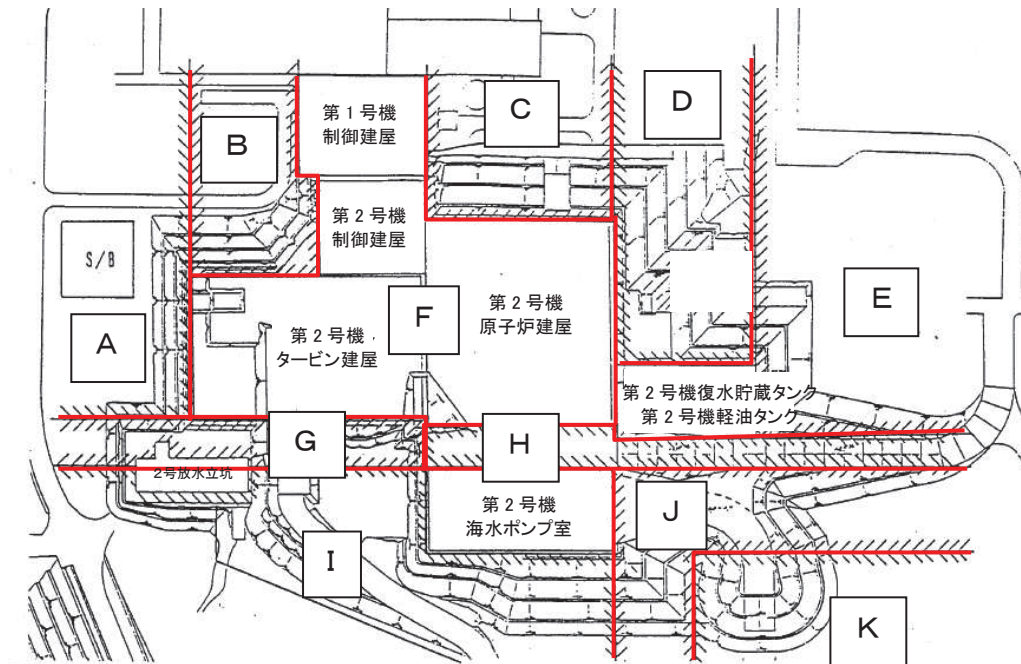
| 盛土品質管理 試験項目 | | 試験頻度・管理基準値 |
|-------------|--------------------------|--|
| 密度試験 | 水置換法： JGS 1612 | ・ 3 箇所／5000m ³ ・ γ_{dmax} * ¹ の 90%以上（締固め度 90%以上* ² ） |
| 含水比 | 土の含水比試験方法： JIS A 1203 | ・ 1 箇所／日 ・ γ_{dmax} 時の 90%以上の密度となる含水比以内 |
| 沈下板 | レベル測定 | ・ 10 箇所／日 ・ 残留沈下 50mm |
| 突固め試験 | JIS A 1210* ³ | ・ 1 回／5000m ³ |
| 粒度試験 | JIS A 1204* ³ | ・ 1 回／50000m ³ |
| 土粒子の密度試験 | JIS A 1202* ³ | ・ 1 回／50000m ³ |
| 三軸圧縮試験 | — | ・ 1 回／250000m ³ |

注記 *1：最大乾燥密度 *2：社内基準による。

*3：建設時の品質管理のために、基準に適合するよう最大粒径を調整した試料により試験を実施していたもの。

「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値」の図4.2-12で示すエリア②は第2号機建設範囲であり、第2号機建設段階における施工ブロック割と締固め度（＝乾燥密度÷最大乾燥密度（ γ_{dmax} ））の実績を図4-1及び図4-2に示す。

第2号機建設においては、盛土を複数の施工ブロックに分けて施工しているが、いずれの施工ブロックにおいても検査結果は全て管理基準（90%以上）を満たしており、一定の品質を確保している。



* : 第2号機建設時図面でのブロック分け

図4-1 盛土の施工ブロック図（第2号機建設時）

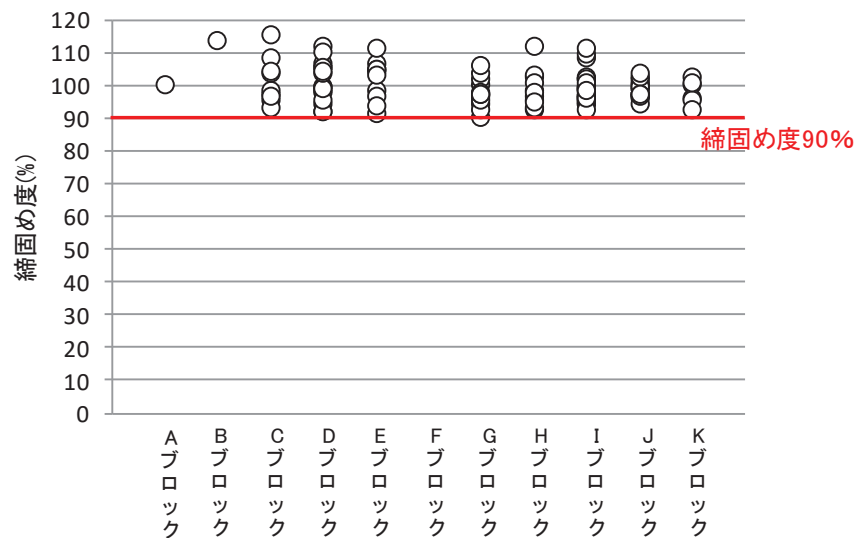
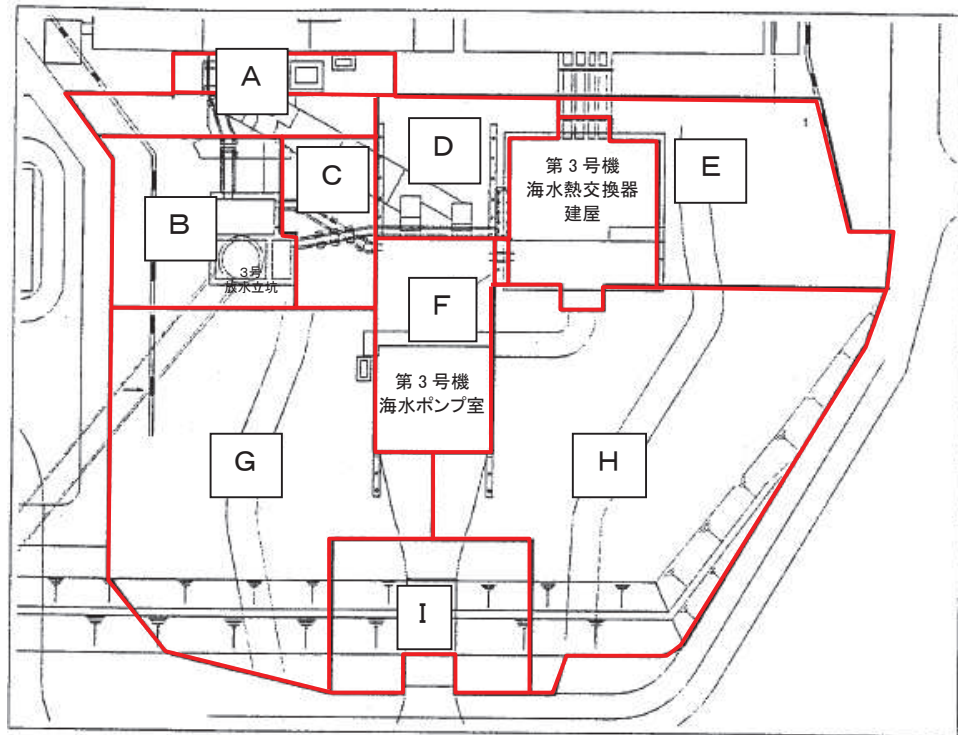


図4-2 各ブロックの締固め度（第2号機建設時）

「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値」の図 4.2-12 で示すエリア③は第 3 号機建設範囲であり、第 3 号機建設段階における施工ブロック割と締固め度（＝乾燥密度÷最大乾燥密度（ γ_{dmax} ））の実績を図 4-3 及び図 4-4 に示す。

第 3 号機建設においても、全てのブロックで検査結果は管理基準（90%以上）を満たしており、一定の品質を確保している。



* : 第 3 号機建設時図面でのブロック分け

図 4-3 盛土の施工ブロック図（第 3 号機建設時）

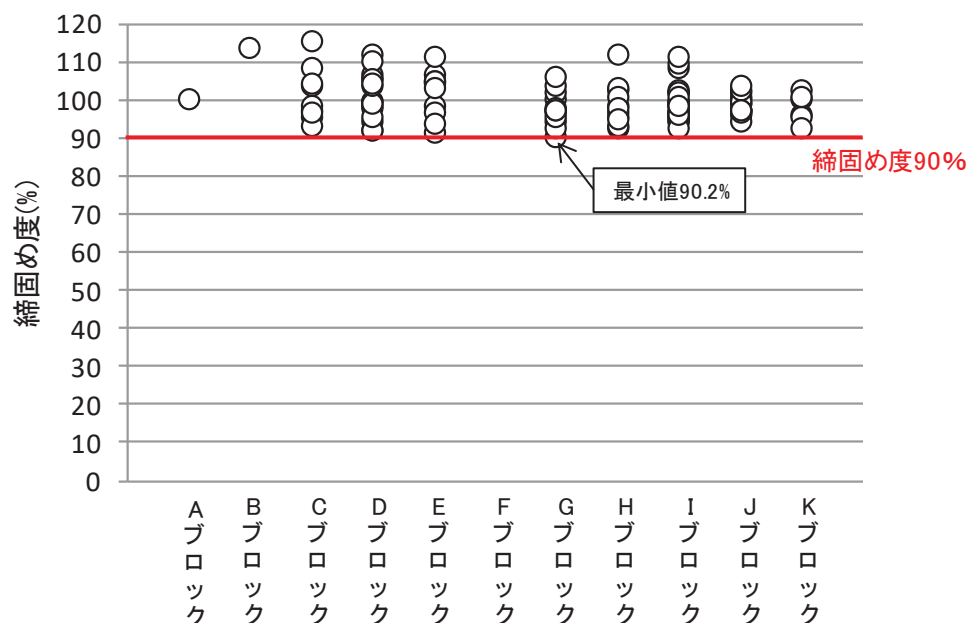


図 4-4 各ブロックの締固め度（第 3 号機建設時）

5. 盛土の基本物性の比較

5.1 各施工ブロックにおける粒度の整理

盛土の施工時期の違いが品質に影響がないことを確認するため、第2号機建設範囲及び第3号機建設範囲（「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値」の図4.2-12で示すエリア②及びエリア③）の各施工ブロックに粒度試験データを整理した。

第2号機及び第3号機建設時の施工ブロック割（図5-1）における供試体レベルのJGS「石分を含む地盤材料の粒度試験方法」による粒度分布を図5-2に示す。

号機間（エリア②とエリア③）や施工ブロック間の粒度に明瞭な傾向の違いはなく、施工時期や施工範囲による違いは認められない。

なお、盛土の物性値についてのエリア別の特徴は、「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値（3）液状化強度試験試料採取位置の選定とその代表性」に示すとおりである。

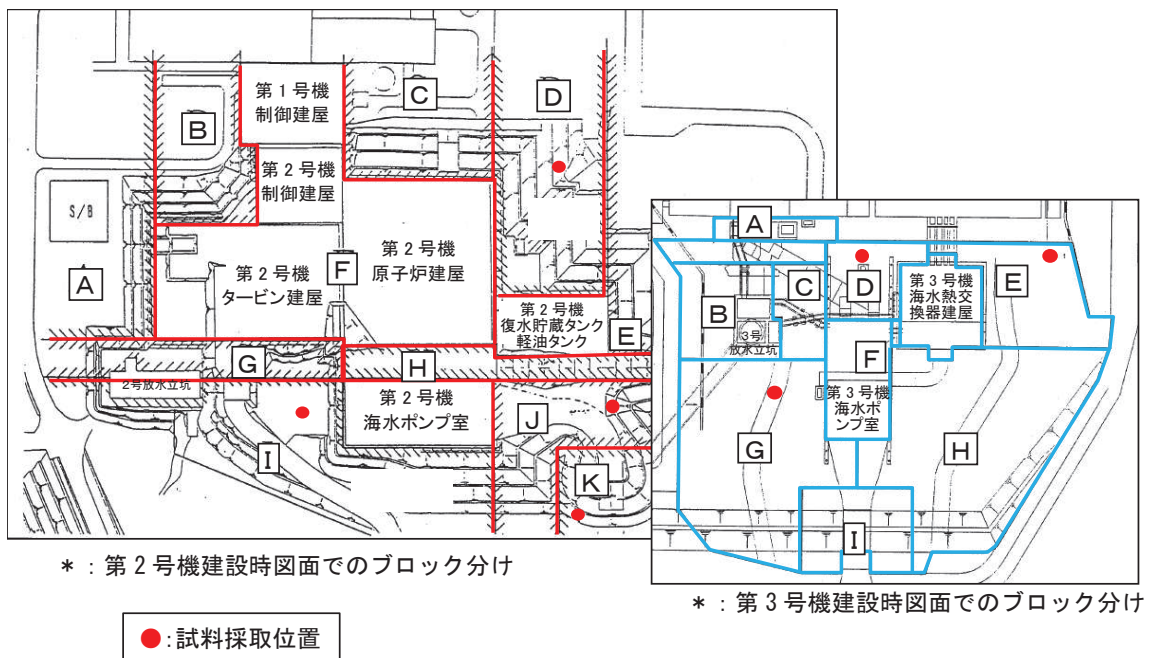
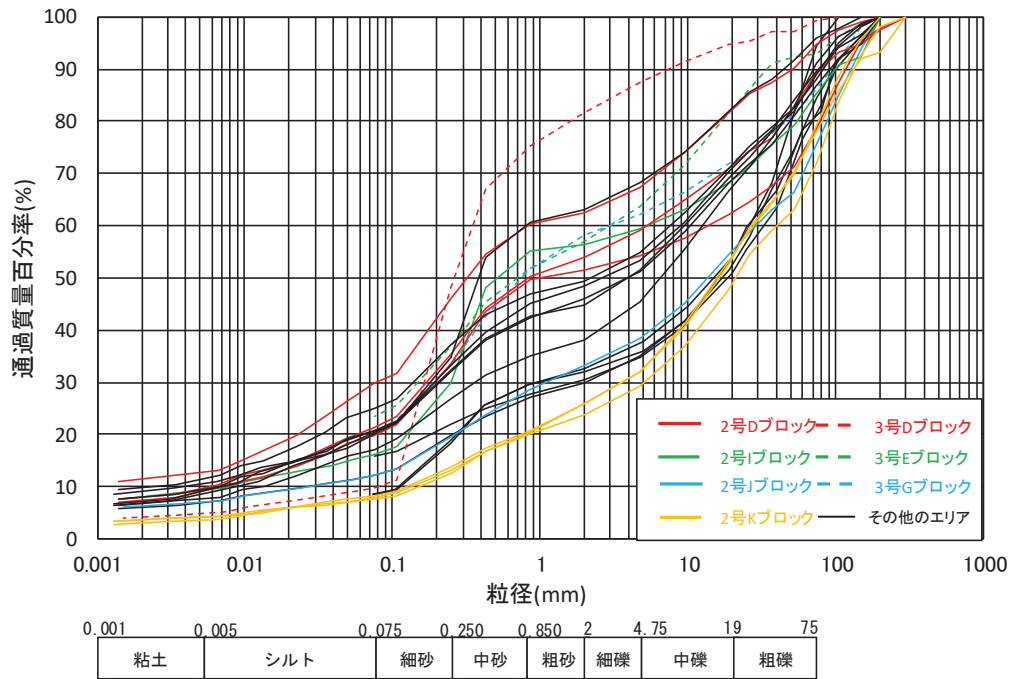


図5-1 盛土の施工ブロック図（第2号機（エリア②），第3号機（エリア③））



粒度分布 注) 沈降分析を実施していない
試料に関しては、75 μ m以上の
粒度分布のみ表示。

図 5-2 盛土の粒度分布

5.2 海側と山側（敷地側）での N 値の比較

盛土の均一性を有していることを確認するため、防潮堤よりも海側と O.P. +14.8m の山側（敷地側）の比較を行った。図 5-3 に検討断面を示す。

図 5-4 にボーリングコアと柱状図記事の比較を、図 5-5 に N 値の比較結果を示す。ボーリングコアと柱状図記事の比較結果から、B-6 孔に硬質の頁岩礫が含まれているものの、海側その他盛土材に大きな相違はない。また N 値の比較結果からは海側と山側で相違はなく、全体の N 値と比較しても大きな相違はないものと判断される。

以上から、海側と山側の盛土に相違はなく、均一性を有していると考えられる。

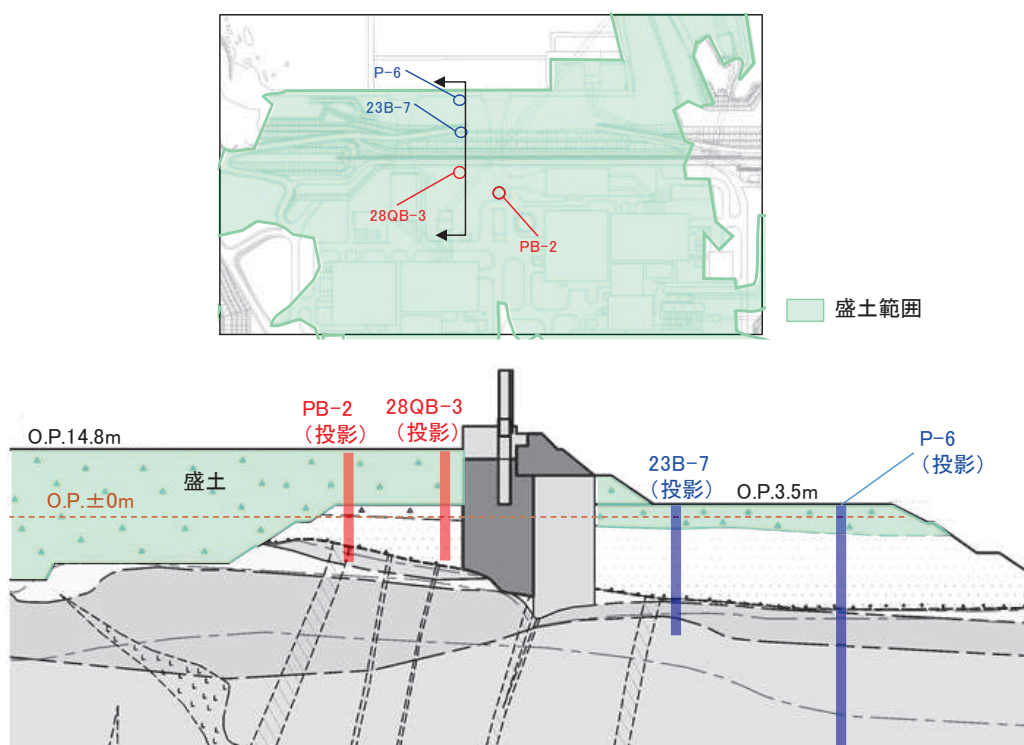


図 5-3 検討断面

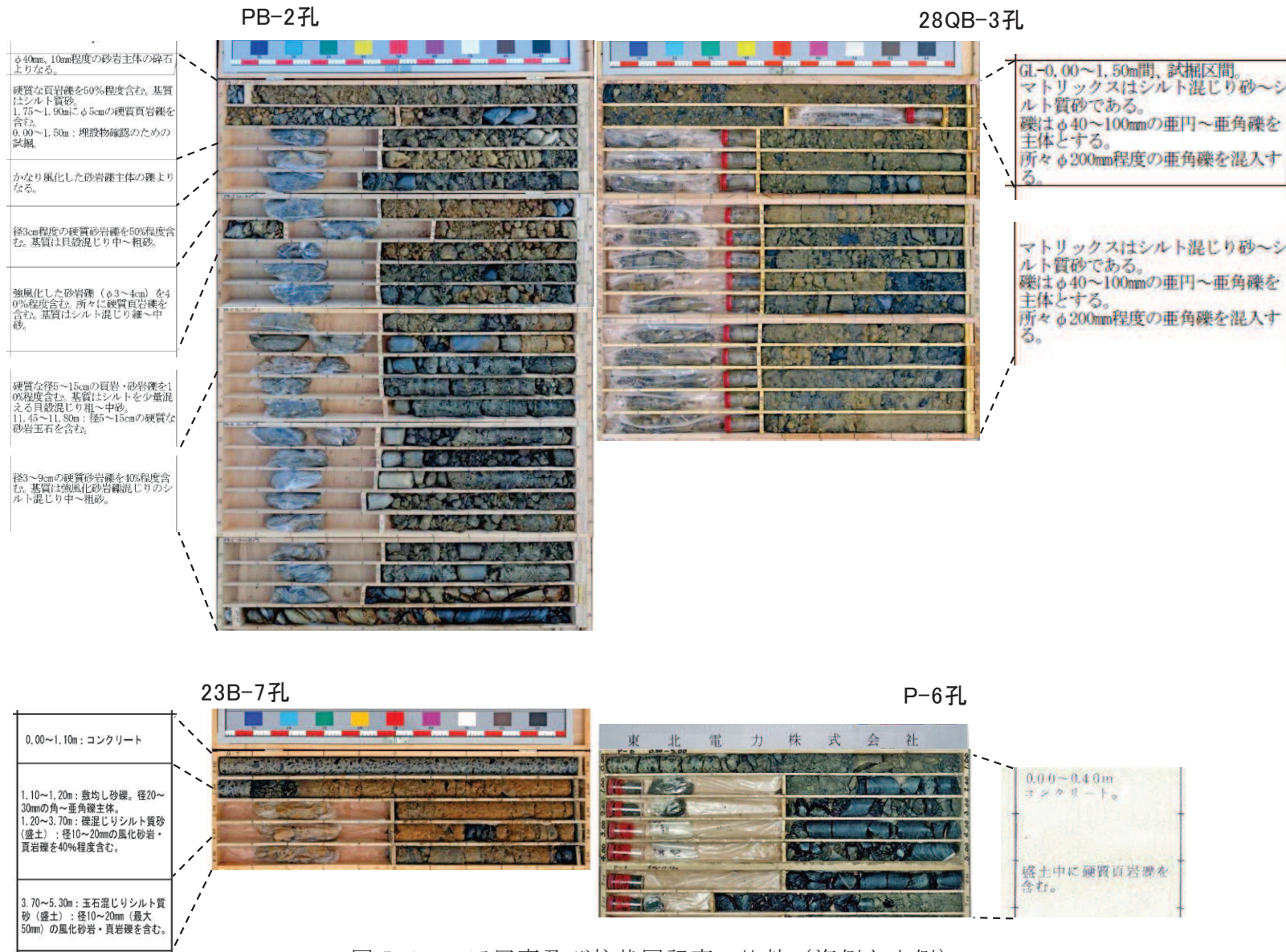


図 5-4 コア写真及び柱状図記事の比較 (海側と山側)

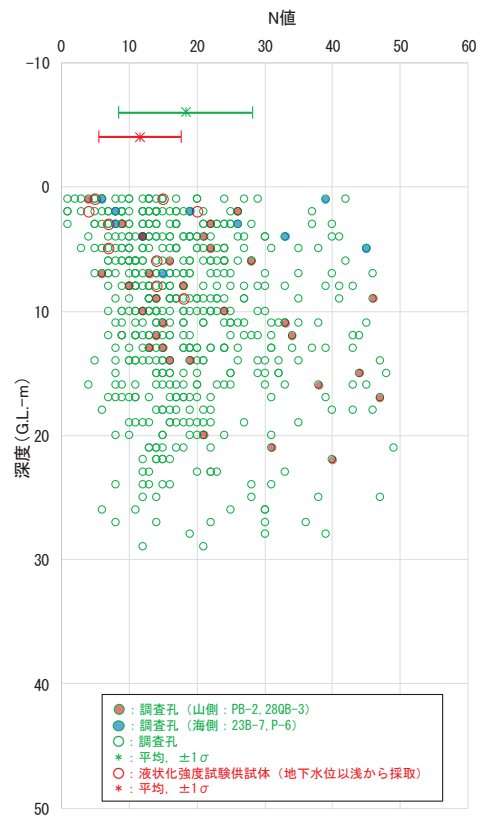


図 5-5 盛土 N 値の比較結果 (海側と山側)

(参考資料 1 6) 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震によって、女川原子力発電所の構内には不等沈下が生じたことが確認されている。この不等沈下は液状化の影響により生じていた可能性があることから、2011 年東北地方太平洋沖地震による沈下実績を整理し、沈下要因について分析を行った。

2. 2011 年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績の整理

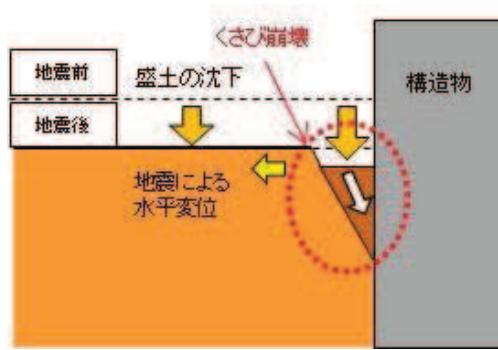
(1) 沈下測定による沈下実績

建屋や地上構造物近傍では、地震時にくさび崩壊*に伴う沈下が発生することが想定され、建屋等に接続されている非岩着のトレンチ等が沈下することで被害が生じる可能性がある。このような被害の状況を事前に把握するため、図 2-1 に示すとおり建屋や地上構造物近傍に沈下棒を設置し、沈下測定を実施している。なお、この沈下棒により埋戻し土（盛土）の圧密沈下量についても把握することが可能である。

沈下棒の構造は図 2-2 のとおりであり、水準点 No. 1 から 3 号機放水立坑の測定点を測定し、その測定点を基準に各沈下棒の天端部の標高を測定（2 級レベル）することにより、沈下板の下に存在する盛土や旧表土の沈下量を計測するものである。

実績沈下量の測定は、2011 年東北地方太平洋沖地震前後の 2 月 8 日と 3 月 27、28 日に実施しており、当該地震の影響による沈下量を把握できている。なお、同年 4 月 7 日に宮城県沖で地震（M7.4）が発生したが、この地震直後に行った設備点検で大きな変状は確認されなかったため、この地震による沈下量の測定は行っていない。

2011 年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を図 2-3 に示す。なお、沈下率については、計測した沈下量を沈下板の下に存在する盛土及び旧表土の層厚で除すことにより算出した。測定箇所 13 地点の平均沈下率は 0.87%であり、最大沈下率は 1.21%であった。



注記 * : くさび崩壊とは、構造物と周囲地盤の相対変位に起因する主働状態で生じるすべり破壊をいう。

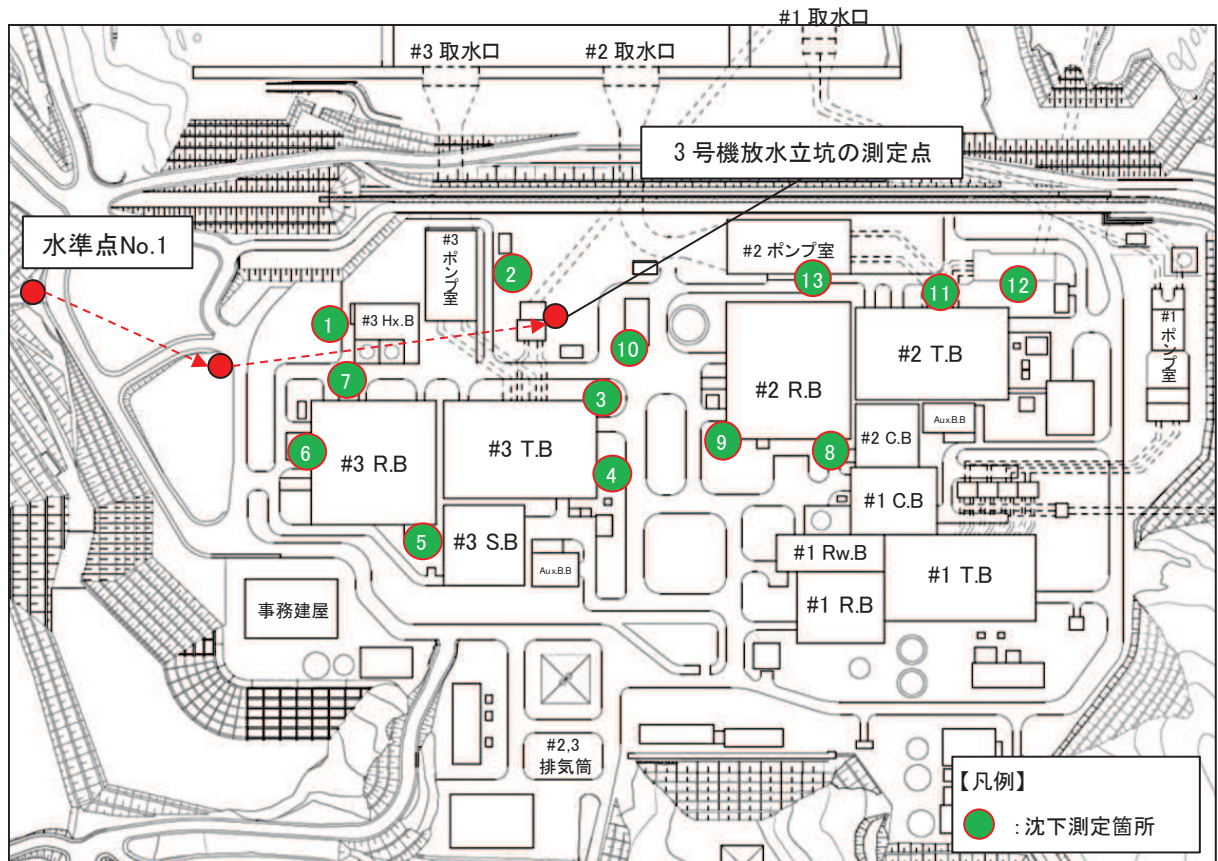


図 2-1 沈下棒の位置図

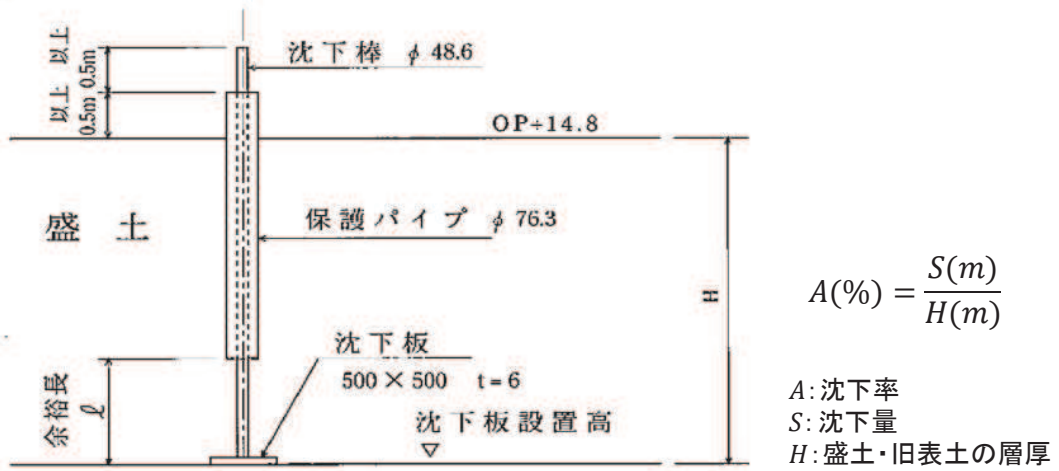


図 2-2 沈下棒の構造

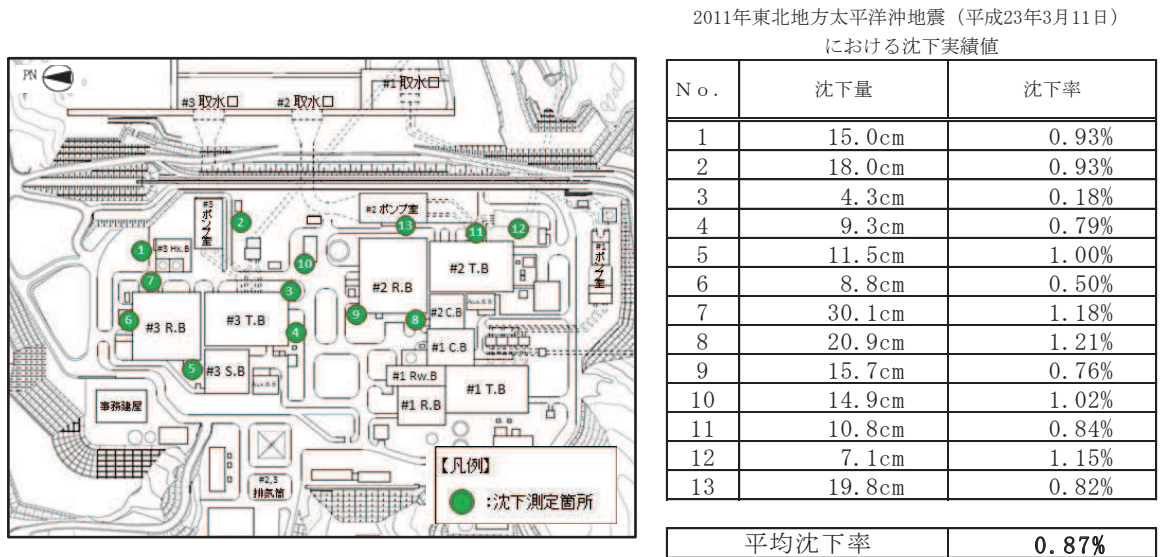


図 2-3 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績

(2) 地震後の状況写真による沈下実績

a. 地震後に顕著な沈下が確認された箇所への整理

2011年東北地方太平洋沖地震後に顕著な沈下が確認された箇所は図2-4に示す7箇所であった。各沈下の状況の詳細を図2-5～図2-11に示す。

写真から推定される沈下量及び沈下率を表2-1に示す。推定される最大沈下率は1.28%であった。

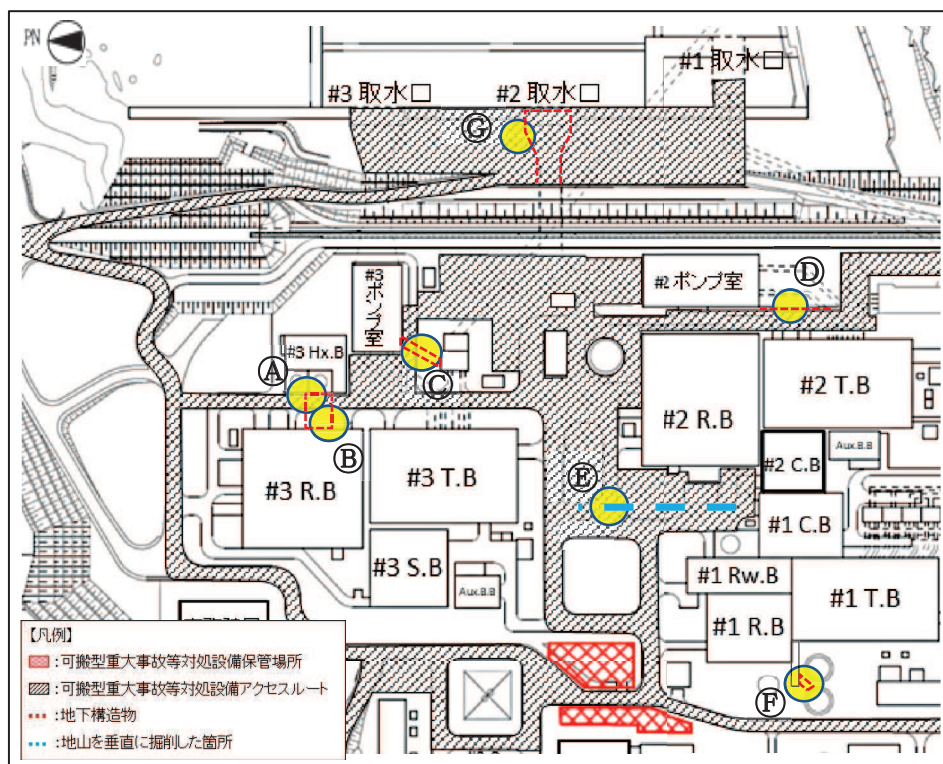


図 2-4 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下発生箇所

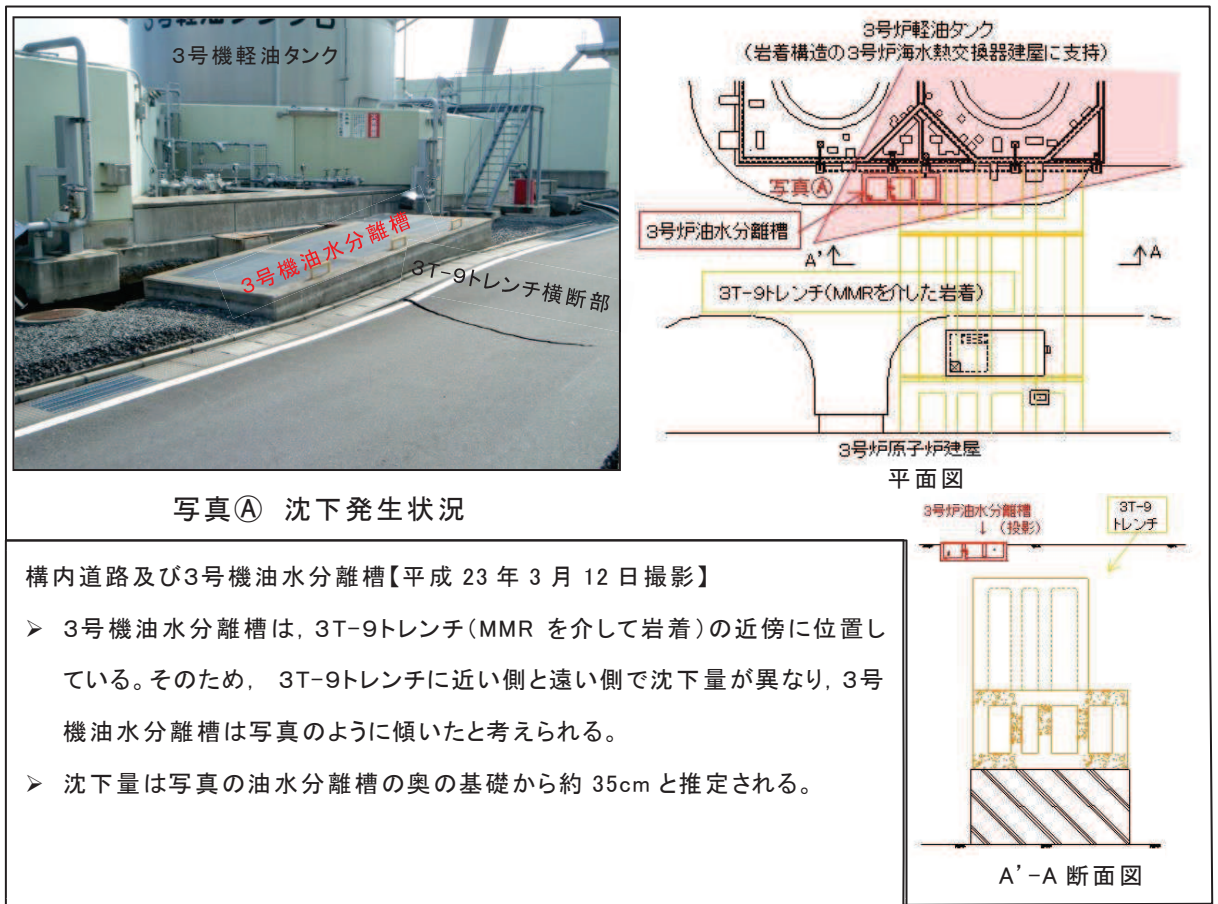
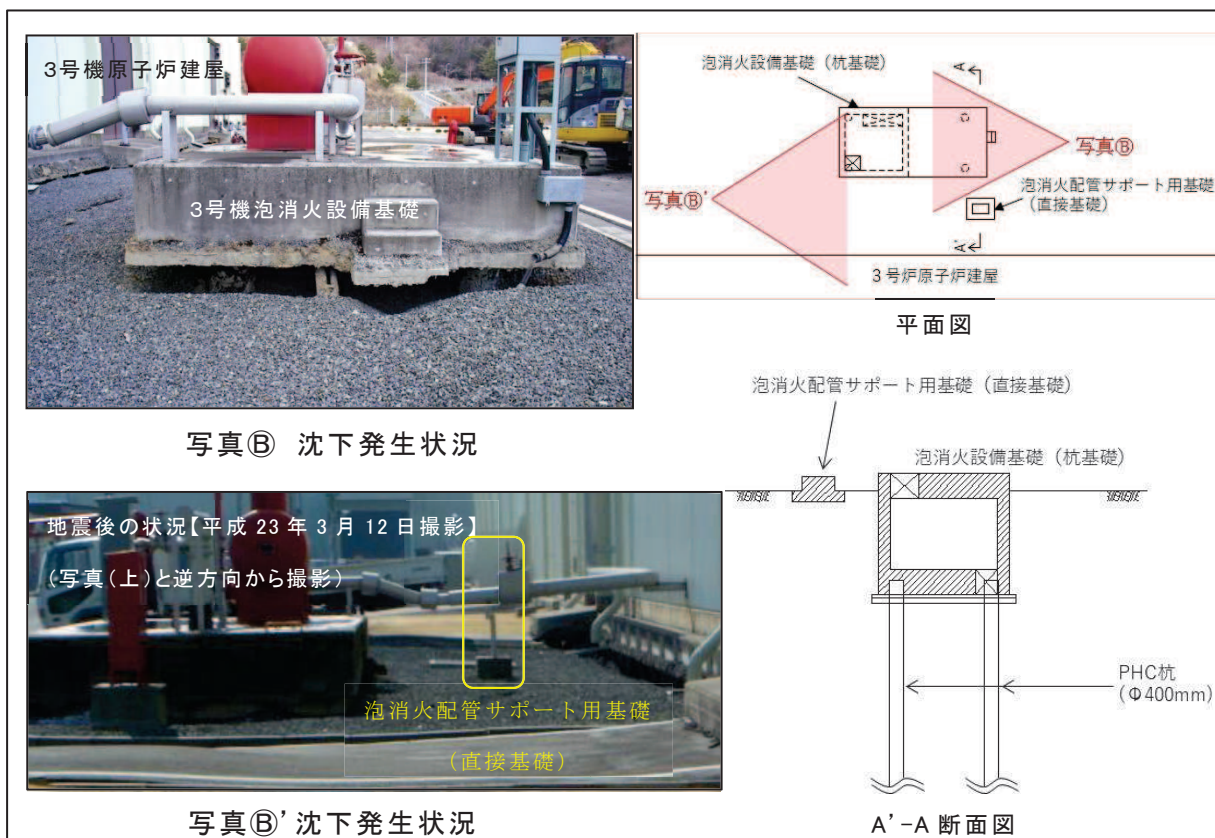


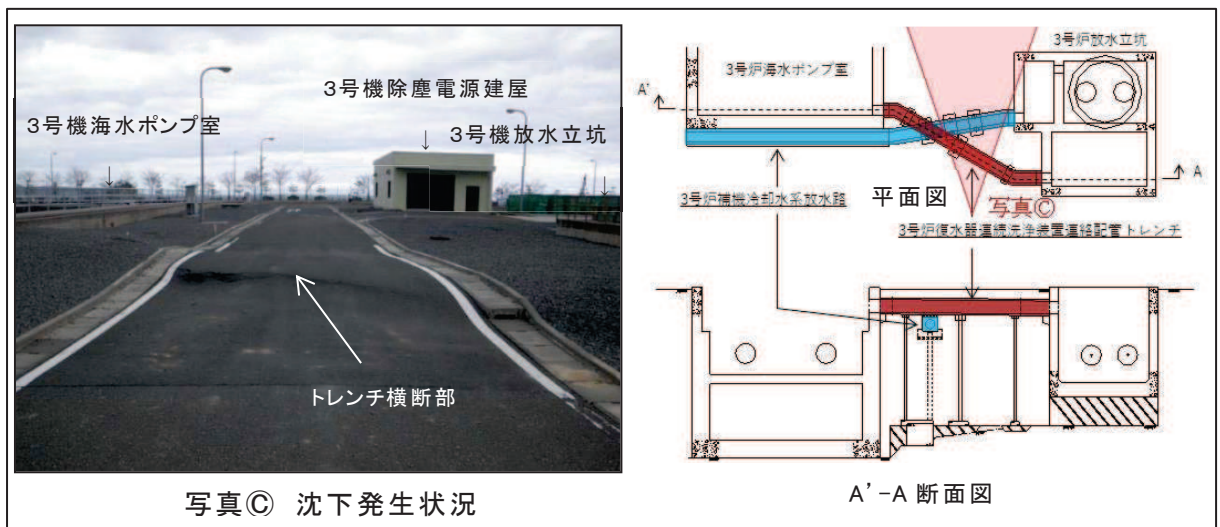
図 2-5 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況 (1 / 7)



3号機泡消火設備基礎【平成 23 年 3 月 20 日撮影】

- 3号機泡消火設備基礎は杭基礎構造（MMR を介して岩着）であるため、周辺の埋戻し部のみが沈下している（写真⑥）。
- 写真⑥では基礎に敷設されている配管が3号機原子炉建屋側に向かって下がっている状況が確認される。これは、3号機泡消火設備基礎から3号機原子炉建屋の中間にサポート部材があり、その基礎が岩着していないため沈下したことにより生じたものであり、3号機泡消火設備基礎が浮き上がったものではない（写真⑥'）。
- 3号機泡消火設備周辺の沈下量は写真から約 40cm と推定される。

図 2-6 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況（2 / 7）



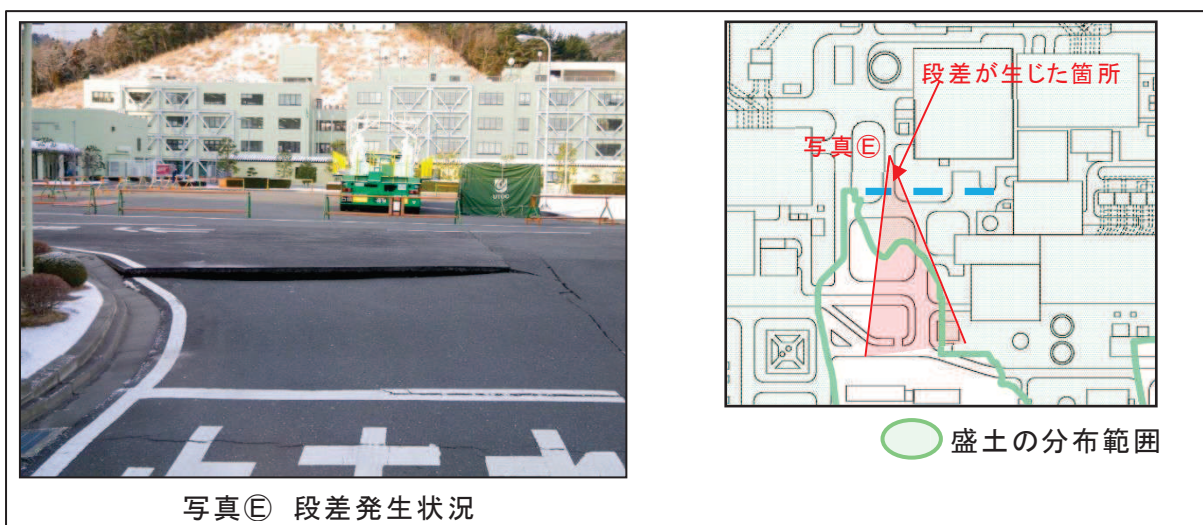
構内道路【平成 23 年 3 月 12 日撮影】(3号機海水ポンプ室脇から海側を撮影)

- 構内道路を横断して杭基礎構造の3号機復水器連続洗浄装置連絡配管トレンチが埋設されているため、周辺の埋戻し部との境界で段差が生じたと考えられる。
- 沈下量は写真右側の側溝から約 15cm と推定される。

図 2-7 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況 (3 / 7)



図 2-8 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況 (4 / 7)



構内道路【平成 23 年 3 月 12 日撮影】(2号機原子炉建屋脇から山側を撮影)

- 敷地の盛土の分布範囲から、写真手前側は埋戻し部(盛土)が分布している範囲であり、写真奥側は切土の範囲であることから、盛土層厚の違いによって段差が生じたものと考えられる。
- 沈下量は写真のアスファルト舗装の段差から約 10cm と推定される。

図 2-9 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況 (5 / 7)



図 2-10 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況 (6 / 7)

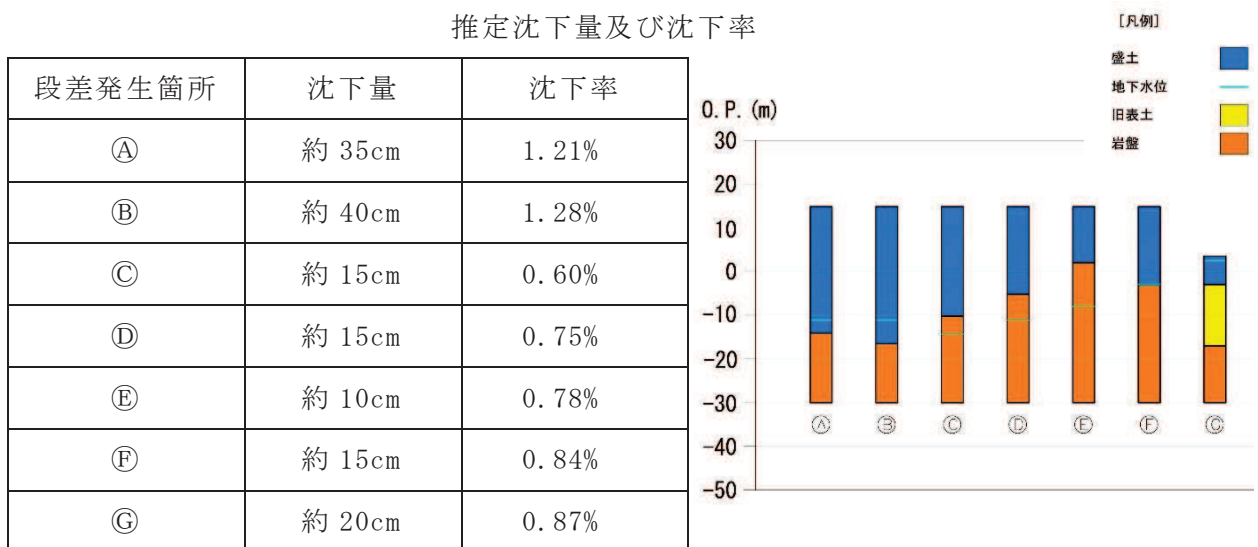


2号機取水口付近【平成 23 年 3 月 15 日撮影】

- 2号機取水口付近は、津波により浸水したため、地震による影響（液状化、噴砂等）の有無を確認することはできない。なお、道路に生じている段差は岩着している取水口と埋戻し土（盛土）の境界であり、道路上に確認される砂については、津波によって巻き上げられた海砂が堆積したものと考えられる。
- 沈下量は写真の2号機取水口（鉄筋コンクリート造）とアスファルト舗装の境界部に発生している段差から約 20cm と推察される。

図 2-11 2011 年東北地方太平洋沖地震における沈下発生状況（7 / 7）

表 2-1 2011 年東北地方太平洋沖地震における段差発生箇所の
推定沈下量及び沈下率



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

b. その他の敷地内の状況について

前項に示している地震後に顕著な沈下が確認された7地点を除き、その他の敷地内においては図2-12、図2-13に示すように不等沈下に伴う大きな変状は確認されていない。

図2-12に示す写真A及びBは1号機と3号機の建屋に挟まれているエリアであり、構内道路や緑地帯には大きな変状は確認されず、車両の通行に支障を及ぼすことはなかった。

図2-13に示す写真Cは3号機の原子炉建屋及びタービン建屋の東側のエリアであり、構内道路には大きな変状は確認されず、車両の通行に支障を及ぼすことはなかった。

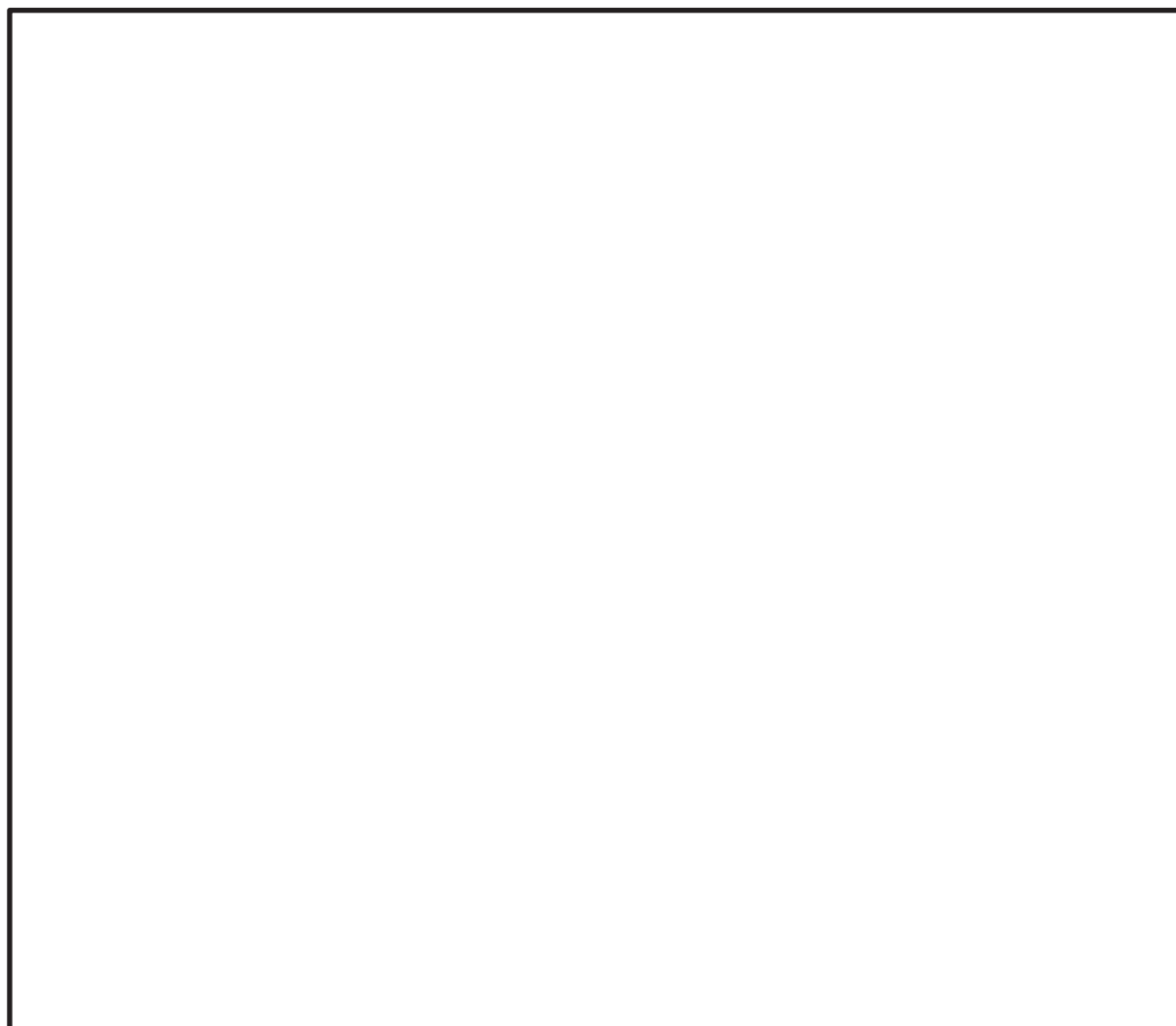


図2-12 2011年東北地方太平洋沖地震後の状況写真（3号機南側）

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

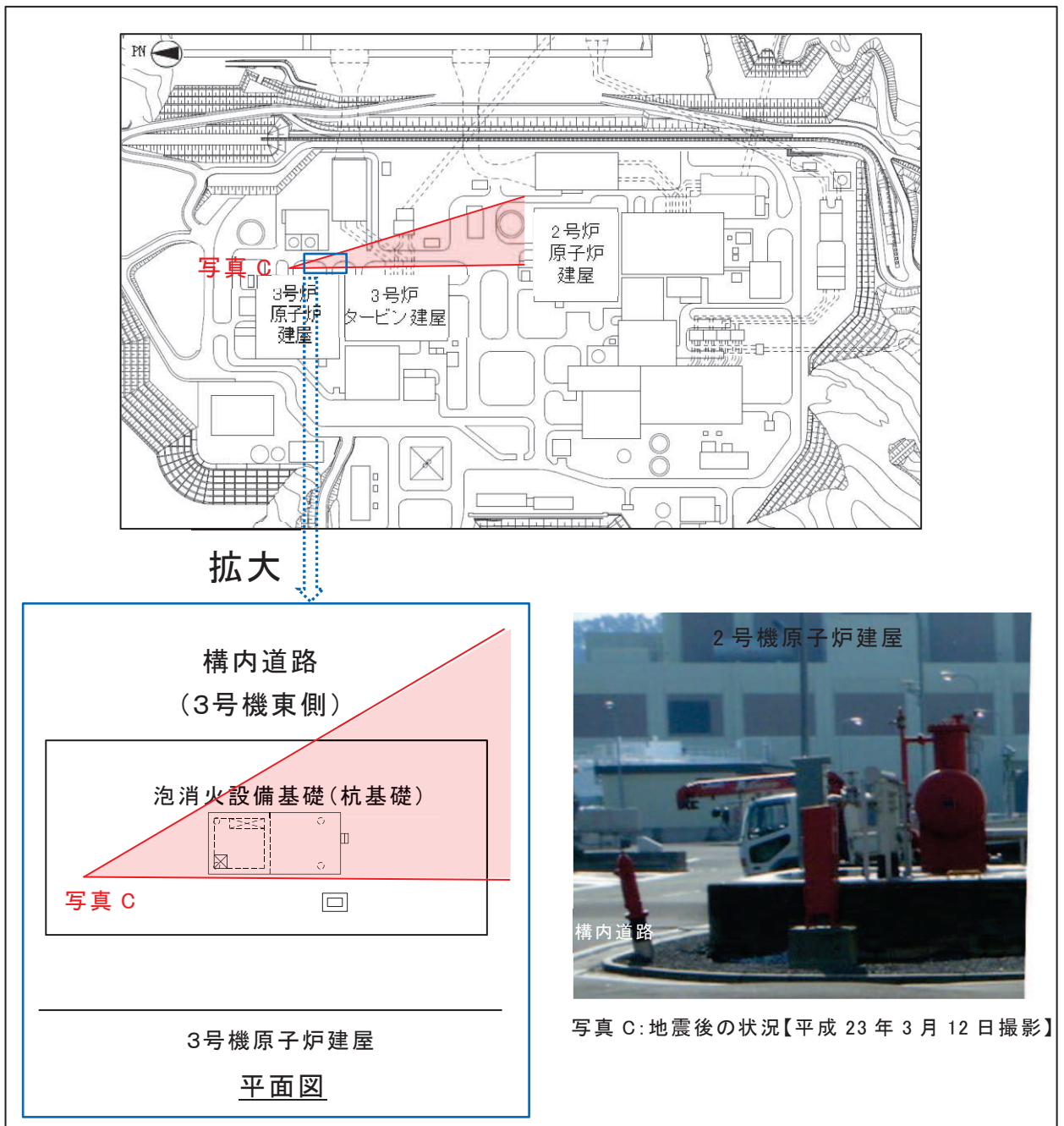


図 2-13 2011 年東北地方太平洋沖地震後の状況写真（3号機東側）

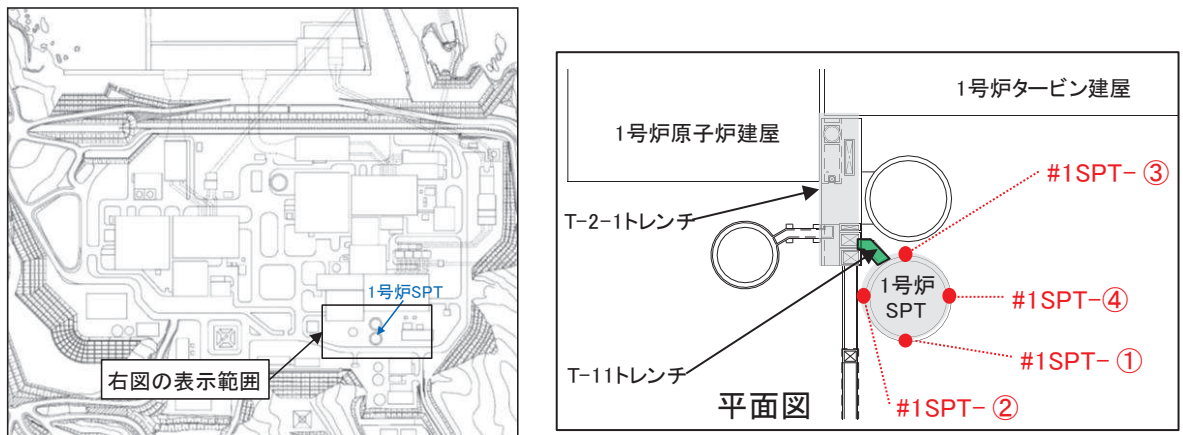
(3) 2011年東北地方太平洋沖地震後の岩着構造物の沈下について

2011年東北地方太平洋沖地震による岩着構造物（杭基礎を含む）の沈下影響を確認するため、1号機 SPT 基礎（サプレッションプール水貯蔵タンク基礎：杭基礎）、2号機海水ポンプ室（門型クレーン基礎含む）（岩着）及び3号機泡消火設備基礎（杭基礎）について、同地震を挟み2007年から2018年までの測量データを2007年に対する鉛直変位量で整理した。

a. 1号機 SPT（サプレッションプール水貯蔵タンク）基礎

1号機 SPT 基礎は杭基礎構造であり、図 2-14 に 2007 年に対する鉛直変位量の推移を示す。

その結果、1号機 SPT 基礎は、2007 年以降、±約 10mm 内で推移しており、2011 年東北地方太平洋沖地震による沈下は生じていないと考えられる。



2007年2月に対する鉛直変位量(mm)

| #1SPT | 2007年 2月 | 2008年 2月 | 2009年 2月 | 2010年 2月 | 2011年 2月 | 2011年 3月 | 2013年 2月 | 2014年 2月 | 2015年 2月 | 2016年 2月 | 2017年 2月 | 2018年 2月 |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ① | 0 | -8 | -8 | -1 | 1 | -2 | 0 | -3 | -3 | 4 | 4 | -1 |
| ② | 0 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -3 | 1 | -1 | 10 | 5 | -2 |
| ③ | 0 | 1 | 1 | -1 | 2 | -2 | -3 | 1 | -2 | 1 | 4 | -2 |
| ④ | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | -2 | -1 | -3 | -3 | 3 | 2 | -3 |

東北地方太平洋沖地震

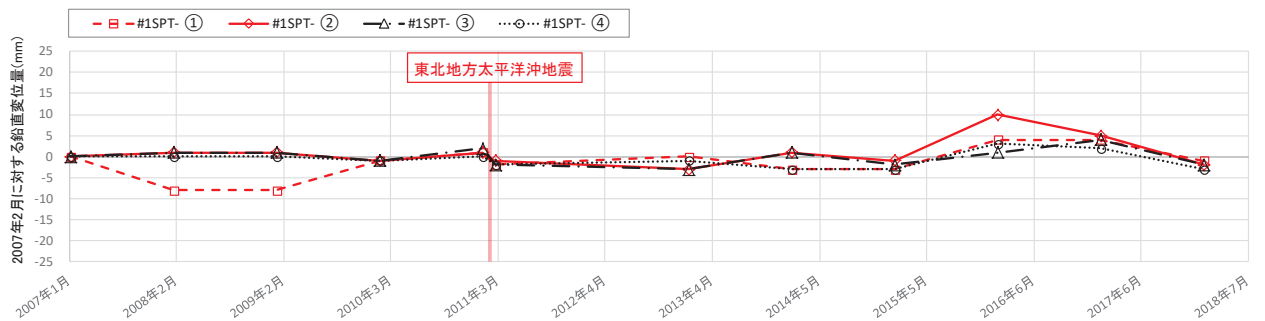
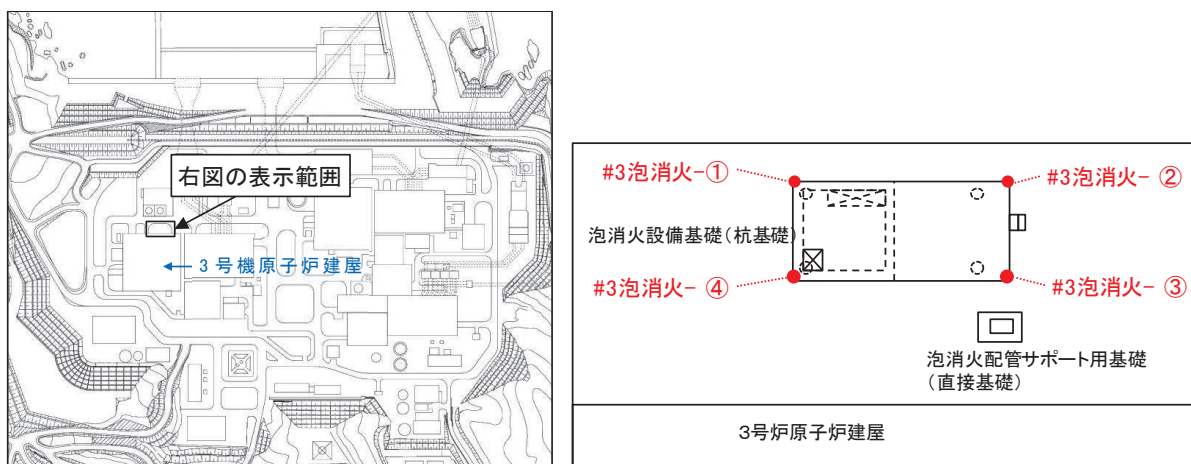


図 2-14 1号機 SPT 基礎の鉛直変位量の推移 (2007年2月に対する鉛直変位量)

b. 3号機泡消火設備基礎

3号機泡消火設備基礎は杭基礎構造であり、図 2-15 に 2007 年に対する鉛直変位量の推移を示す。

その結果、3号機泡消火設備基礎は、2007 年以降大きな変動はなく、2011 年東北地方太平洋沖地震による沈下は生じていないと考えられる。



2007年2月に対する鉛直変位量(mm)

| #3泡消火 | 2007年 2月 | 2008年 2月 | 2009年 2月 | 2010年 2月 | 2011年 2月 | 2011年 3月 | 2013年 2月 | 2014年 2月 | 2015年 2月 | 2016年 2月 | 2017年 2月 | 2018年 2月 |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ① | 0 | -2 | 1 | -3 | -1 | 0 | -4 | -5 | -3 | -2 | -1 | -2 |
| ② | 0 | -4 | 0 | -3 | -2 | 0 | -5 | -6 | -3 | -2 | -1 | -2 |
| ③ | 0 | -4 | -1 | -5 | -3 | -1 | -6 | -6 | -4 | -3 | -3 | -3 |
| ④ | 0 | -3 | 0 | -3 | -2 | 0 | -5 | -5 | -3 | -3 | -1 | -3 |

東北地方太平洋沖地震



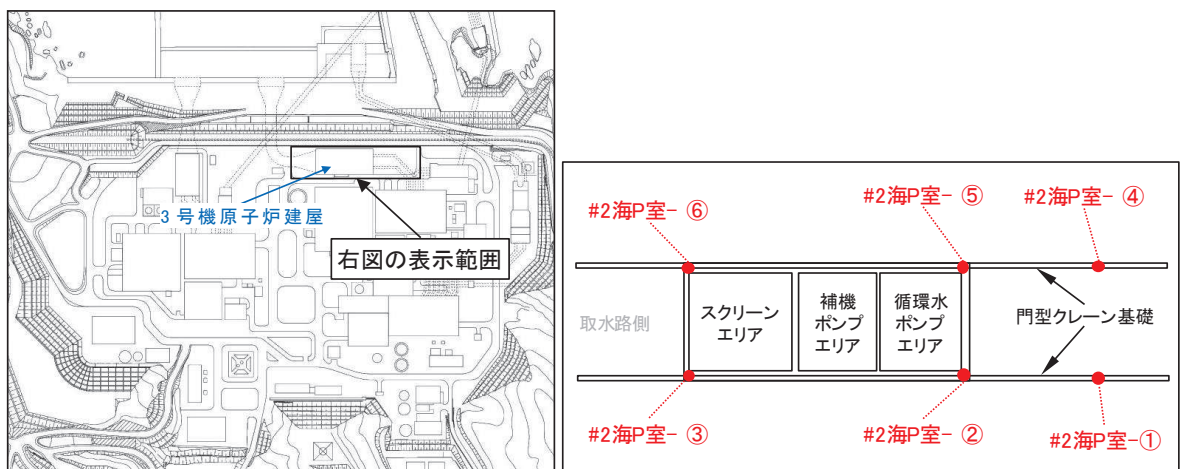
図 2-15 3号機泡消火設備基礎の鉛直変位 (2007年2月に対する鉛直変位量)

c. 2号機海水ポンプ室

2号機海水ポンプ室（門型クレーン基礎含む）は岩着構造であり，図 2-16 に 2007 年に対する鉛直変位量の推移を示す。

その結果，2号機海水ポンプ室（門型クレーン基礎含む）は，2007 年以降，±約 10mm 内で推移しており，2011 年東北地方太平洋沖地震による沈下は生じていないと考えられる。

なお，2011 年東北地方太平洋沖地震前後において，数 mm 程度の鉛直変位が生じている可能性があることから，その要因について検討を行った。



2007年2月に対する鉛直変位量(mm)

| #2海P室 | 2007年 2月 | 2008年 2月 | 2009年 2月 | 2010年 2月 | 2011年 2月 | 2011年 3月 | 2013年 2月 | 2014年 2月 | 2015年 2月 | 2016年 2月 | 2017年 2月 | 2018年 2月 |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ① | 0 | 8 | 0 | -8 | -4 | -9 | -9 | -11 | -10 | -8 | -7 | -8 |
| ② | 0 | 0 | 0 | -4 | -1 | -6 | -7 | -8 | -8 | -7 | -5 | -9 |
| ③ | 0 | 0 | 0 | -4 | -2 | -4 | -6 | -5 | -6 | -5 | -7 | -4 |
| ④ | 0 | 9 | 0 | -8 | -3 | -8 | -9 | -9 | -9 | -8 | -6 | -8 |
| ⑤ | 0 | 0 | 0 | -3 | 0 | -6 | -8 | -6 | -8 | -6 | -7 | -7 |
| ⑥ | 0 | 0 | 0 | -4 | -1 | -3 | -2 | -3 | -4 | -2 | -6 | -3 |

東北地方太平洋沖地震

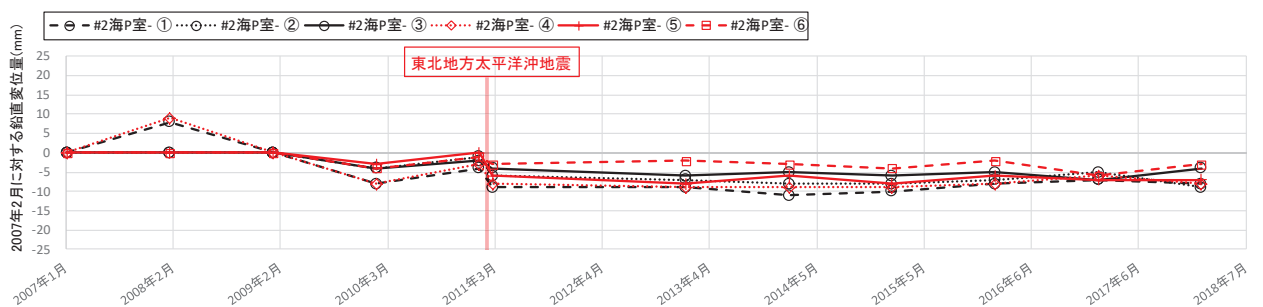


図 2-16 2号機海水ポンプ室の鉛直変位（2007年2月に対する鉛直変位量）

d. 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の鉛直変位の要因

2号機海水ポンプ室において、2011年東北地方太平洋沖地震前後で、数mm程度の鉛直変位が生じている可能性があることから、その要因について以下の検討を行った。

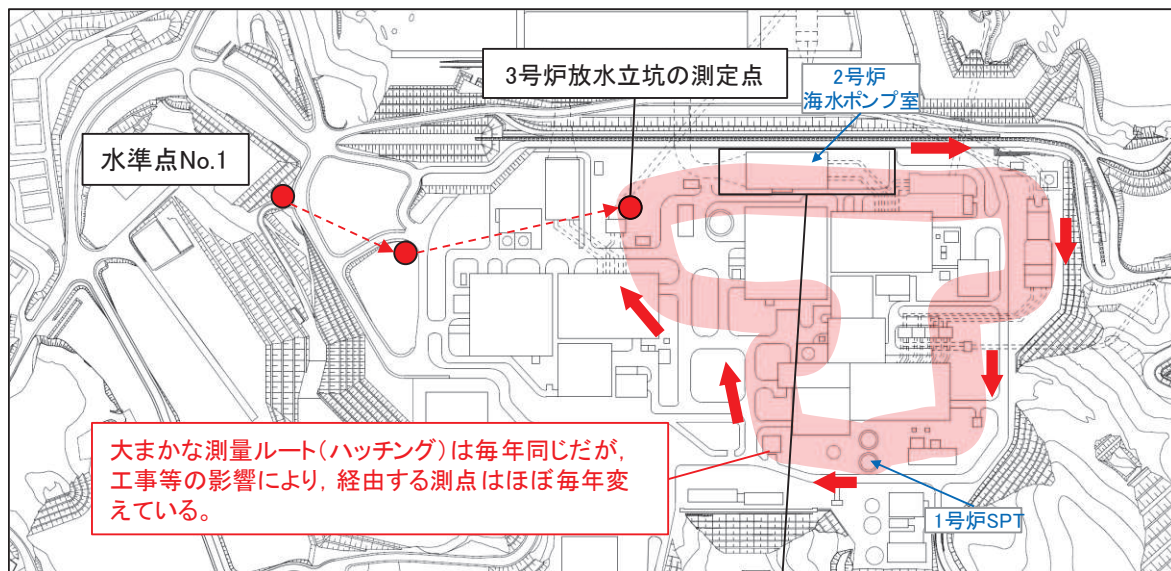
(a) 測量ルート・測点の変更に伴う影響について

敷地内の構造物の沈下測量は、図 2-17（上段）に示すとおり3号機放水立坑を基点に2号機と1号機を囲むように測量（閉路線）を実施している。なお、3号機側は3号機を囲むように測量（閉路線）を実施している。

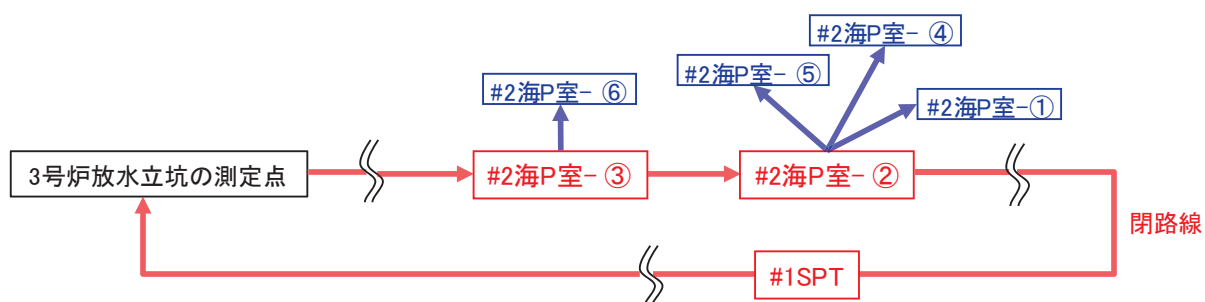
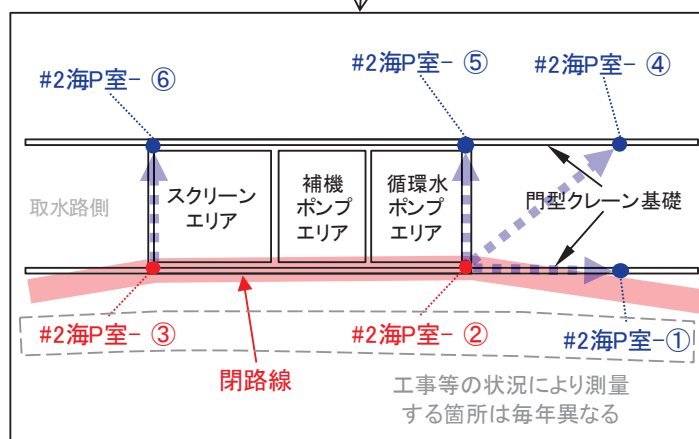
このうち、2号機海水ポンプ室の測量については、上記の測量（閉路線）で得た測点を基点に、図 2-17（中段）のようにそれぞれの測点を測量している。これらの測量ルートは、2011年東北地方太平洋沖地震前後において大きな変更はなかった（図 2-17（上段）の赤ハッチング内）。

一方、測量する測点は安全対策工事等の状況によって異なり、測点を変更したことによる測量誤差が生じていた可能性がある。ただし、測量の順序としては1号機 SPT 基礎よりも2号機海水ポンプ室を先に測量していることから、仮に2号機海水ポンプ室で測量誤差が生じているとすれば、1号機 SPT 基礎も同様の誤差が生じていることになるが、測量結果はそうになっていない。

したがって、2号機海水ポンプ室で生じている数mm程度の鉛直変位は測量ルート・測点の変更に伴うものではないと判断した。



1・2号炉関連の構造物の沈下測量ルート



沈下測量ルートのイメージ

図 2-17 測量ルート・測点の変更に伴う影響の検討

(b) 2011年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動に伴う影響について

2011年東北地方太平洋沖地震により東北地方太平洋沿岸で大きな沈降が観測され牡鹿半島周辺では1mを越える沈降が観測された(図2-18:国土地理院HP)。

女川原子力発電所では、図2-18に示すとおり、地殻変動-100cmのコンター上にほぼ位置しており、コンターの線形から東側で沈降量が大きく、西側で沈降量が少ない傾向が確認される。なお、女川(観測局:-89cm,図2-19)からM牡鹿(観測局:-107cm,図2-19)は約9km離れていることから、その間の地殻変動の勾配は約2cm/kmとなる。一方、女川原子力発電所の敷地内(O.P.+14.8m盤)の北西-南東方向(女川-M牡鹿の方向)は約600mであることから、この勾配(約2cm/km)を考慮すると、敷地内では約1.2cmの標高差が生じていることに相当する。

2011年東北地方太平洋沖地震前後における地盤変位量を把握するため、敷地内の水準点(4点)の経年変化について整理を行った。測量を実施した基準点の位置を図2-20に、測量結果による構内水準点標高の経年変化を表2-2に示す。2011年東北地方太平洋沖地震後の測量(平成23年11月)では、敷地内の地盤変位量は、全水準点においてほぼ同値(約1m沈降)であり、不等沈下の影響はなく、一様に変位していることを確認した。ただし、水準点によっては他の水準点と比べてわずかな差があり、その差は1cm程度となっている。また、至近の測量(平成29年4月)では、前回(平成23年11月)に比べ約30cm隆起していることを確認した。なお、平成23年4月7日に宮城県沖で地震(M7.4)が発生しているが、前回(平成23年11月)の測量結果はこの地震の影響も含まれていると考えられる。

敷地内の4水準点における地殻変動量(東北地方太平洋沖地震前後)について、水準点No.1(構造物の沈下測定を行った基点)を基準に他の水準点の相対変位量を示すと図2-21のとおりである。これらの差は、図2-18で示した国土地理院の報告(沈降量が西側で小さく、東側で大きい傾向)と同様である。

これらの状況を踏まえ、1号機SPTは水準点No.3、2号機海水ポンプ室は水準点No.2に近いことから、それぞれ水準点No.1との地殻変動量の差(1号機SPTは約2mm、2号機海水ポンプ室は約3mm)を考慮する。

東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 前後の地殻変動 (上下) —本震前後—
 基準期間 : 2011/03/10 — 2011/03/10 [F3 : 最終解]
 比較期間 : 2011/03/12 — 2011/03/12 [F3 : 最終解]

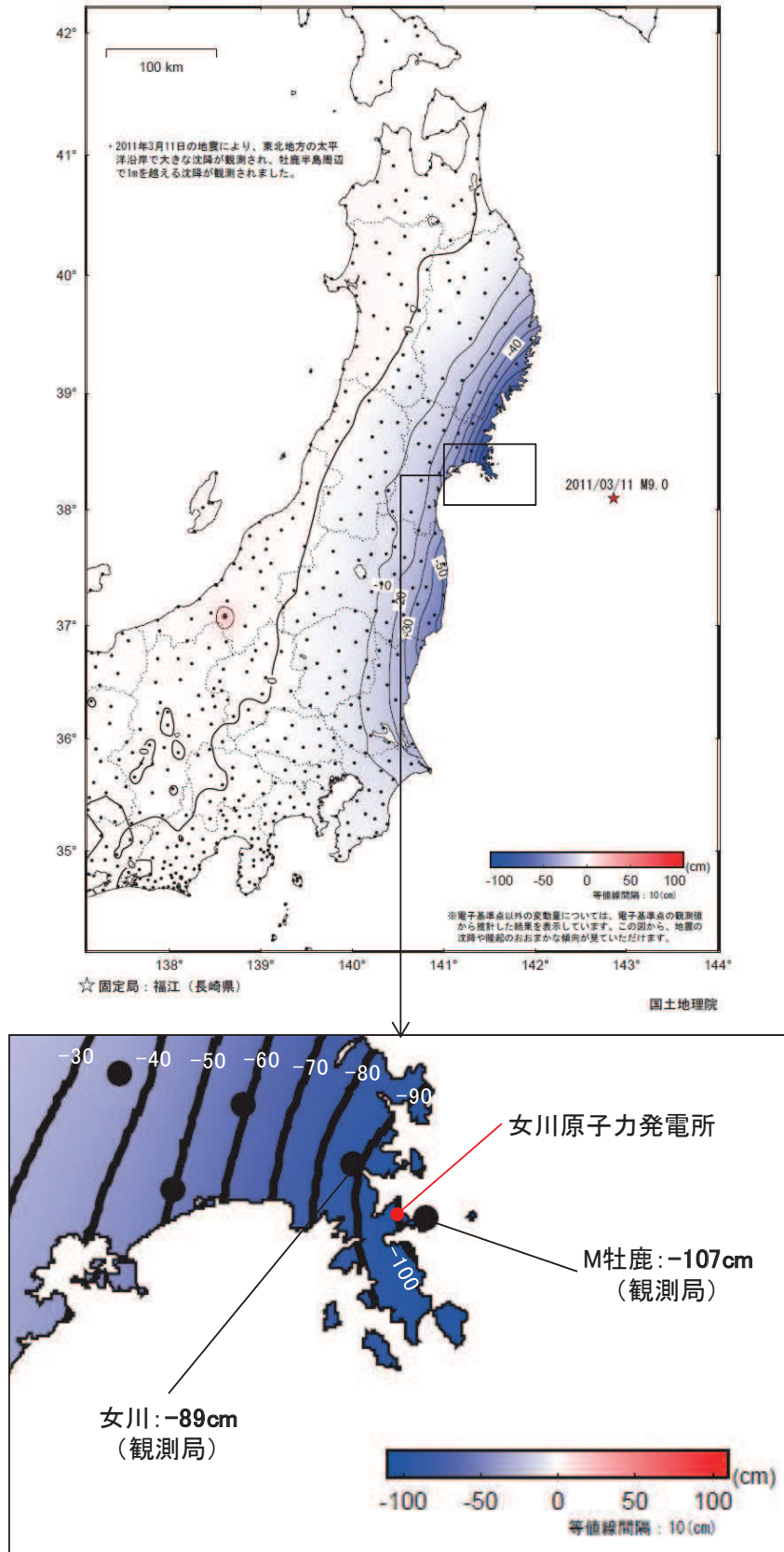


図 2-18 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 (上下)

沿岸の観測局の変動量の一覧(高さ)

| 観測局名 | 所在地 | 高さの変動量[cm] | | | | | | | | | |
|-------|----------------|--------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| | | 本震前後 (※1) | 本震翌日から 1年後まで(※2) | 本震1年後から 2年後まで(※2) | 本震2年後から 3年後まで(※2) | 本震3年後から 4年後まで(※2) | 本震4年後から 5年後まで(※2) | 本震5年後から 6年後まで(※2) | 本震6年後から 7年後まで(※2) | 本震翌日から 7年間の累積 (※3) | 本震前から 7年間の累積 (※4) |
| 東通 | 青森県下北郡東通村大字尻屋 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 | 7 |
| 東通2 | 青森県下北郡東通村大字白糠 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 7 | 8 |
| 六ヶ所 | 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駈 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 | 6 |
| S三沢 | 青森県三沢市織笠 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 |
| 三沢 | 青森県三沢市東町 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | -1 | 0 | 5 | 5 |
| 八戸 | 青森県八戸市小中野 | -1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | -1 | 1 (※8) | 3 (※8) | 3 (※8) |
| 種市 | 岩手県九戸郡洋野町種市 | -3 | -2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -3 |
| S洋野 | 岩手県九戸郡洋野町中野 | -4 | -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -3 | -7 |
| 久慈 | 岩手県久慈市宇都町 | -7 | -5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | -3 | -9 |
| S菅代 | 岩手県下閉伊郡菅代村第1地割 | (※5) | (※5) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (※5) | -21 |
| 岩泉1 | 岩手県下閉伊郡岩泉町小本 | -18 | -12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -9 | -27 |
| 宮古 | 岩手県宮古市大字津軽石 | -35 | -11 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 0 | -34 |
| 山田 | 岩手県下閉伊郡山田町織笠 | -49 | -8 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | -44 |
| 釜石 | 岩手県釜石市甲子町 | -54 | 0 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 19 | -35 |
| S大船渡 | 岩手県大船渡市二陸町吉浜 | (※5) | (※5) | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | (※5) | -46 |
| 大船渡 | 岩手県大船渡市赤崎町 | -75 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 | 30 | -45 |
| S陸前高田 | 岩手県陸前高田市小友町 | (※5) | (※5) | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 | (※5) | -38 |
| 気仙沼 | 宮城県気仙沼市笹が陣 | -65 | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 34 | -32 |
| S本吉 | 宮城県本吉郡本吉町津谷桜子 | (※5) | (※5) | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | (※5) | -29 |
| 志津川 | 宮城県本吉郡南三陸町志津川 | -68 | 12 | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 43 | -25 |
| S石巻北上 | 宮城県石巻市北上町十三浜 | (※5) | (※5) | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | (※5) | -41 |
| S石巻雄勝 | 宮城県石巻市雄勝町桑浜 | (※5) | (※5) | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | (※5) | -48 |
| 女川 | 宮城県牡鹿郡女川町大字女川浜 | -89 | 15 | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | 51 | -38 |
| M牡鹿 | 宮城県石巻市大字森磯浜 | -107 | 17 | 8 | 7 | 7 | 5 | 5 | 4 | 54 | -54 |
| 牡鹿 | 宮城県石巻市鮎川浜 | (※5) | (※5) | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | (※5) | -66 |
| S石巻 | 宮城県石巻市長渡浜 | (※5) | (※5) | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | (※5) | -51 |
| S石巻牧浜 | 宮城県石巻市牧浜 | (※5) | (※5) | 8 | 7 | 6 | 6 | 5 | 5 | (※5) | -38 |
| 矢本 | 宮城県東松島市矢本 | -50 | 13 | 7 | 6 | 5 | 5 | 3 | 4 | 44 | -5 |
| 利府 | 宮城県宮城郡利府町利府 | -29 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 25 | -5 |
| S七ヶ浜 | 宮城県宮城郡七ヶ浜町吉田浜 | (※5) | (※5) | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | (※5) | 3 |
| 名取 | 宮城県名取市岡上 | -26 | 10 | 5 | 4 | (※7) | (※7) | (※7) | (※7) | (※7) | (※7) |
| 亘理 | 宮城県亘理郡亘理町 | -22 | 6 | 5 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 22 | 0 |
| 相馬1 | 福島県相馬市中村 | -30 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 25 | -5 |
| 小高 | 福島県南相馬市小高区姥沢 | -55 | (※6) | (※6) | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 17 | -37 |
| 楢葉A | 福島県双葉郡楢葉町下小埜 | -51 | 5 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 20 | -31 |
| いわき | 福島県いわき市平四ツ波 | -48 | 7 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 22 | -26 |
| 北茨城 | 茨城県北茨城市磯原町磯原 | -45 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 17 | -27 |
| S高萩 | 茨城県高萩市高浜町 | (※5) | (※5) | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | (※5) | -28 |
| 日立 | 茨城県日立市金沢町 | -31 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 | -18 |
| 鉾田 | 茨城県鉾田市柏熊 | -24 | 8 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | -8 |
| 茨城鹿嶋 | 茨城県鹿嶋市平井 | -27 | 11 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 16 | -10 |
| 銚子 | 千葉県銚子市東小川町 | -15 | 11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | -3 |
| 千葉松尾 | 千葉県山武市松尾町富士見台 | -10 | 7 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 11 | 1 |
| 長生 | 千葉県長生郡長生村本郷 | -7 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 6 | -1 |
| 千葉大原 | 千葉県いすみ市大原 | -6 | 5 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 11 | 5 |
| 勝浦 | 千葉県勝浦市荒川 | -5 | 5 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 6 |
| 鴨川 | 千葉県鴨川市太尾 | -3 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 4 |
| 丸山 | 千葉県南房総市白子 | -3 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 3 |
| 館山 | 千葉県館山市西長田 | -3 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 |

この変動量は、長崎県の福江観測局を固定局とした場合のもので、なお、各年1年間の変動量の累積の合計と7年間の変動量の累積は、表示されている桁数より小さい桁での四捨五入の関係で一致しない場合があります。
表の見方:M牡鹿観測局を例にとると、東北地方太平洋沖地震の影響で107cm沈降し、2018年2月現在、地震前と比べて54cmの沈降となっていることを示しています。
(※1)「本震前後」は、2011年3月10日と2011年3月12日と比較したもので、主に本震による変動量を示したものです。(F3解析使用)
(※2)「本震翌日、1、2、3、4、5年後まで」は、2011年、2012年、2013年、2014年、2015年、2016年3月と、2012年、2013年、2014年、2015年、2016年3月と比較したもので、「本震6年後から7年後まで」は2017年2月と2018年2月を比較したもので、1年ごとの地殻変動量を示したものです。(F3解析使用)
(※3)「本震翌日から7年間の累積」は、2011年3月12日と2018年2月を比較したもので、本震後の変動量を示したものです。(F3解析使用)
(※4)「本震前から7年間の累積」は、2011年2月と2018年2月を比較したもので、本震とその後の動きによる変動量を示したものです。(F3解析使用)
(※5) 2011年3月12日に欠測したため。
(※6) 2012年3月に欠測したため。
(※7) 移転のため、観測局廃止。
(※8) 八戸観測局は、2018年1月20日にアンテナ交換を実施。(オフセット未補正)

図 2-19 東日本太平洋側沿岸の観測局の変動量の一覧 (高さ)

(国土地理院 HP に一部加筆)

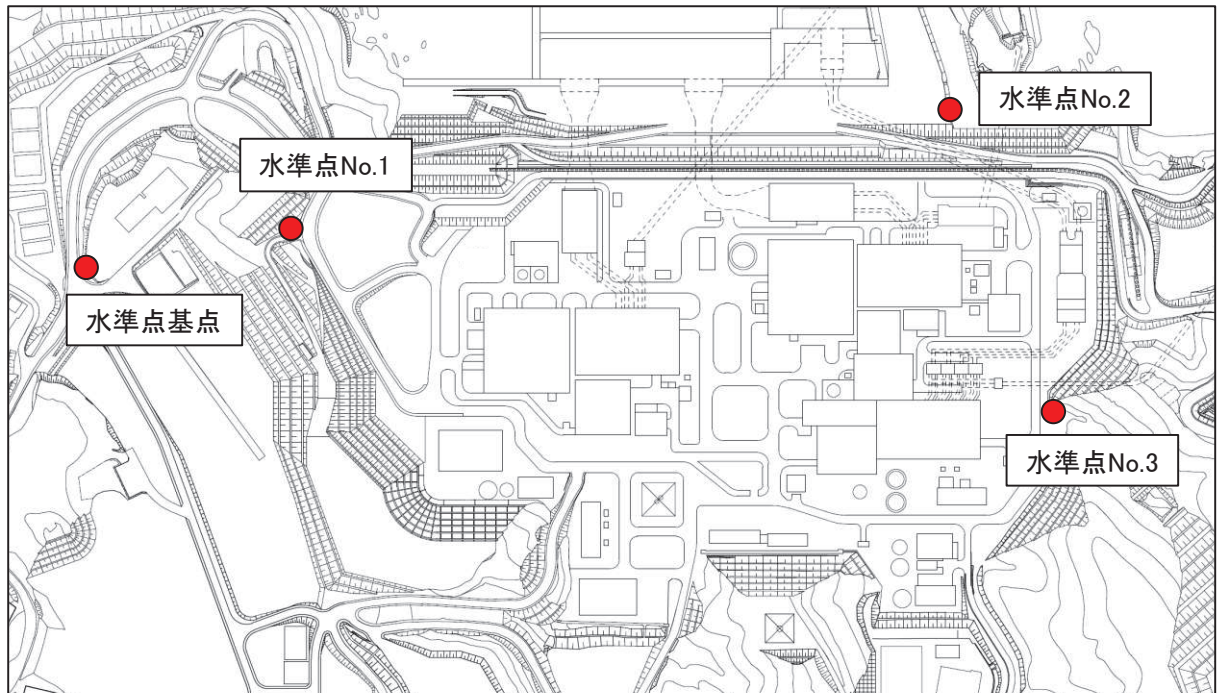


図 2-20 水準測量実施位置

表 2-2 水準点標高の経年変化（2級水準測量）*1

| 測点 | 地震前(A) 平成23年2月 | 地震後(B) 平成23年11月 | 地震後(C) 平成29年4月 | 地盤変位量 (B-A) | 地盤変位量 (C-B) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|
| 水準点 基点 | O.P.+58.226m (T.P.+57.486m) | O.P.+57.264m (T.P.+56.524m) | O.P.57.572m (T.P.56.832m) | -0.962m | 0.308m |
| 水準点 No.1 | O.P.+27.223m (T.P.+26.483m) | O.P.+26.252m (T.P.+25.512m) | O.P.26.559m (T.P.25.819m) | -0.971m | 0.307m |
| 水準点 No.2 | O.P.+14.759m (T.P.+14.019m) | O.P.+13.785m (T.P.+13.045m) | — *2 | -0.974m | — *2 |
| 水準点 No.3 | O.P.+16.088m (T.P.+15.348m) | O.P.+15.115m (T.P.+14.375m) | O.P.15.424m (T.P.14.684m) | -0.973m | 0.309m |

*1 構内の水準点のうち、水準点基点については、石巻市荻浜に設置されている国土地理院の一等水準点（5639）から2級水準測量により観測したものであり、水準点 No.1～3 については、水準点基点から2級水準測量により観測したものである。

*2 水準点 No.2 については、防潮堤かさ上げ工事に伴い撤去。

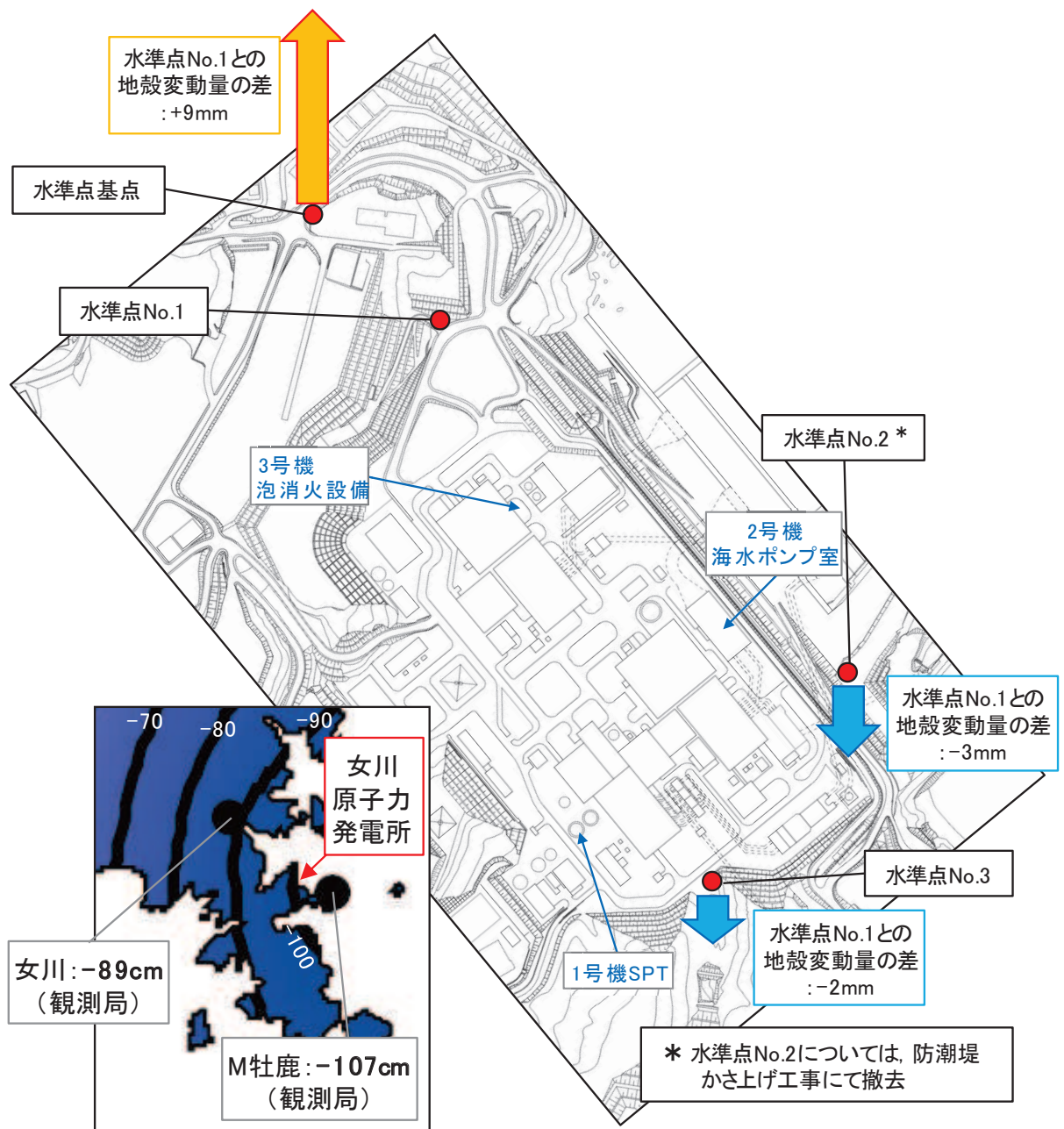


図 2-21 水準点 No.1 に対する地殻変動量の差

(c) 2011年東北地方太平洋沖地震前後の鉛直変位の要因

1号機 SPT 基礎及び2号機海水ポンプ室について、それぞれ2mm及び3mmの地殻変動量を考慮した補正を行った結果(図2-22)、補正前と大きな相違はないものの、補正前に比べて地震前後での急激な鉛直変位は解消されており、構造物としての沈下は生じていなかったと考えられる。

2011年東北地方太平洋沖地震による岩着構造物(杭基礎を含む)の沈下影響を確認するため、1号機 SPT 基礎(杭基礎)、2号機海水ポンプ室(門型クレーン基礎含む)(岩着)及び3号機泡消火設備基礎(杭基礎)について、同地震を挟み2007年から2018年までの測量データを2007年に対する鉛直変位量で整理した。

その結果、岩着構造物(杭基礎を含む)は、2011年東北地方太平洋沖地震によって沈下は生じていなかったと考えられる。

ただし、2号機海水ポンプ室については、2011年東北地方太平洋沖地震前後において、数mm程度の鉛直変位が生じている可能性があることから、その要因について検討を行った。その結果、この鉛直変位は2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動で生じた傾斜(約2cm/km)によるものであることを確認した。

以上の検討を踏まえ、岩着構造物(杭基礎を含む)は、2011年東北地方太平洋沖地震において地殻変動以外の要因で沈下していないと評価した。

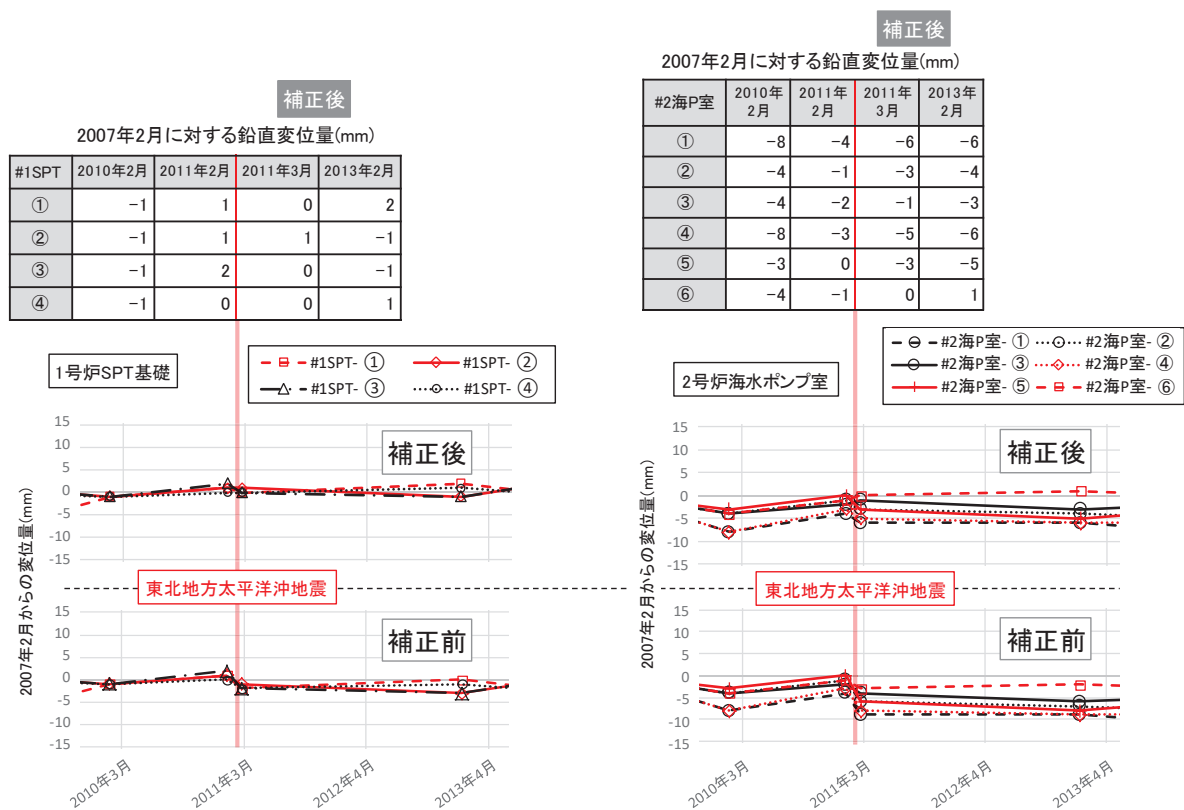


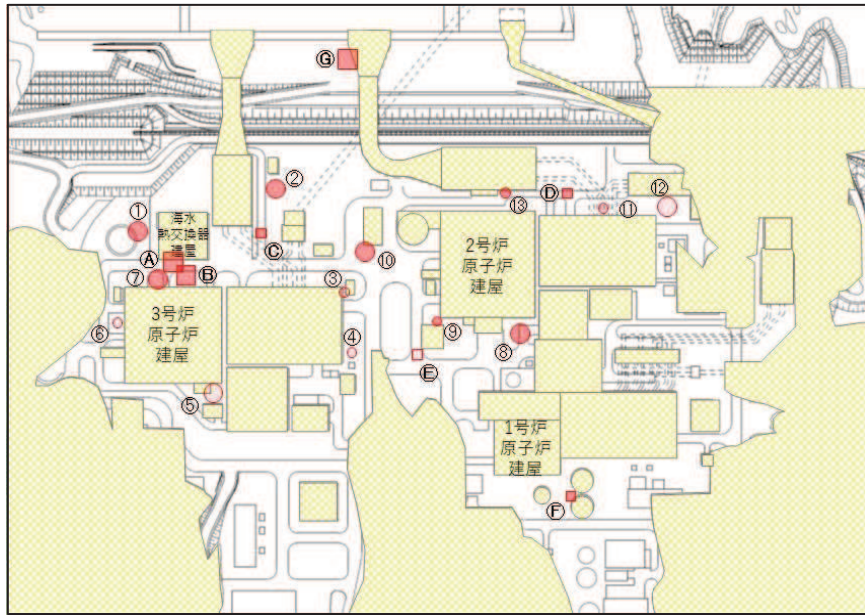
図 2-22 地殻変動量を考慮した 1 号機 SPT 基礎及び 2 号機海水ポンプ室の鉛直変位

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震による沈下量及び沈下率の分布について

2011 年東北地方太平洋沖地震後の沈下棒による沈下測定箇所，顕著な沈下が確認された箇所の沈下量及び沈下率を図 2-23 に示す。これら沈下棒による沈下測定や写真による状況確認により，2011 年東北地方太平洋沖地震による敷地内の沈下は網羅的に捉えられていると考える。

沈下棒及び写真による沈下量から，敷地内のどのエリアで沈下量が大きくなっているか検討し，以下を確認した。

- 施設と施設に挟まれたエリア（例えば，測定箇所⑦，⑧，⑬等）で比較的沈下量が大きくなっていることを確認した。
- 特に ⑦の付近で最も大きくなっていることを確認した。
- 構内道路は比較的一様に沈下しており，その量もそれほど大きくないが，建屋（施設）の近傍は局所的に沈下量が大きくなっていることを確認した。



| 測定箇所 | 沈下量 (cm) | 沈下率 (%) |
|-------------|----------|---------|
| No.1 | 15.0 | 0.93 |
| No.2 | 18.0 | 0.93 |
| No.3 | 4.3 | 0.18 |
| No.4 | 9.3 | 0.79 |
| No.5 | 11.5 | 1.00 |
| No.6 | 8.8 | 0.50 |
| No.7 | 30.1 | 1.18 |
| No.8 | 20.9 | 1.21 |
| No.9 | 15.7 | 0.76 |
| No.10 | 14.9 | 1.02 |
| No.11 | 10.8 | 0.84 |
| No.12 | 7.1 | 1.15 |
| No.13 | 19.8 | 0.82 |
| 平均(No.1~13) | 14.4 | 0.87 |
| Ⓐ*1 | 約35 | 1.21 |
| Ⓑ*1 | 約40 | 1.28 |
| Ⓒ*1 | 約15 | 0.60 |
| Ⓓ*1 | 約15 | 0.75 |
| Ⓔ*1 | 約10 | 0.78 |
| Ⓕ*1 | 約15 | 0.84 |
| Ⓖ*1 | 約20 | 0.87 |

凡例

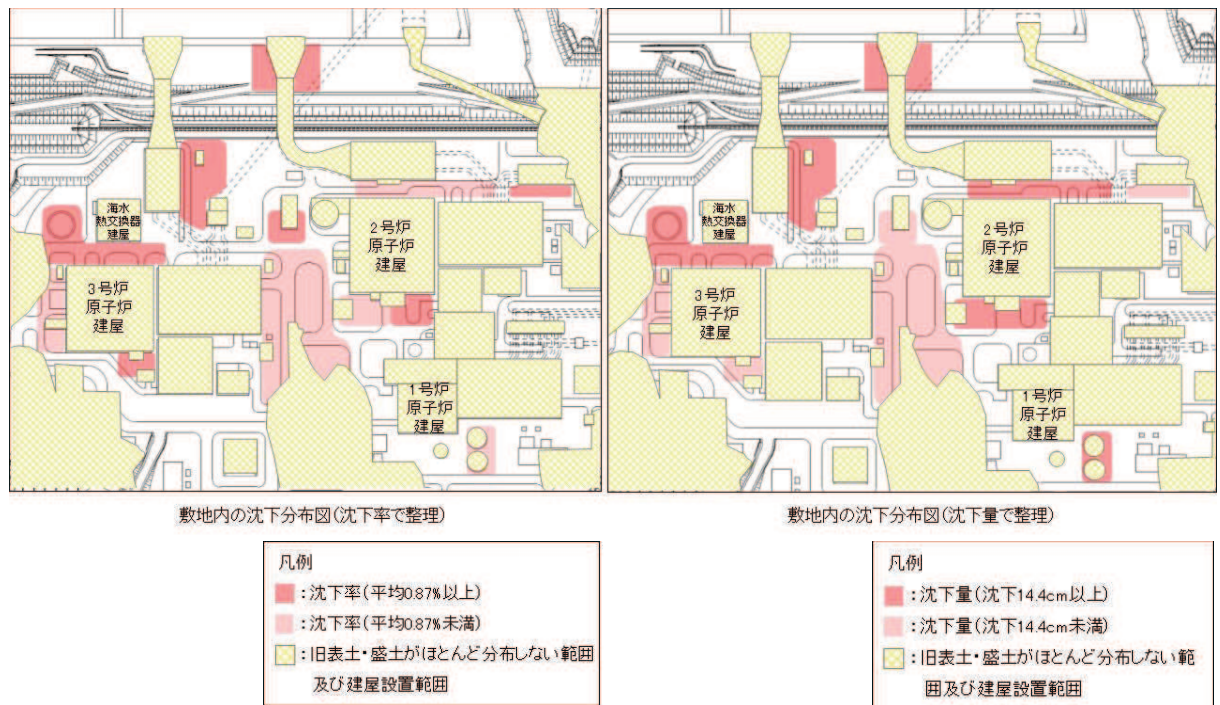
- : 沈下棒の設置位置
- : 写真より推定した沈下位置
- (黄) : 旧表土・盛土がほとんど分布しない範囲及び岩着構造物
- (赤) : 沈下率が平均0.87%以上, 沈下量が平均14.4cm以上
- (赤) (白) : 沈下率が平均0.87%以上, 沈下量が平均14.4cm未満
- (赤) (赤) : 沈下率が平均0.87%未満, 沈下量が平均14.4cm以上
- (赤) (白) : 沈下率が平均0.87%未満, 沈下量が平均14.4cm未満

* 沈下量及び沈下率については、写真からの推定

図 2-23 地震後の沈下棒による沈下測定箇所及び顕著な沈下が確認された箇所の沈下量と沈下率

また、上述の沈下実績をもとに作成した沈下率及び沈下量の分布を図 2-24 に示す。
 これらの分布から、3号機原子炉建屋と海水熱交換器建屋に挟まれたエリアで沈下が大きく、建屋近傍で局所的に沈下が大きくなっていることを確認した。

なお、敷地内の最大沈下率は3号機原子炉建屋と海水熱交換器建屋に挟まれたエリアで得られており、1.28%であった。次項にて沈下の要因分析を実施した。



* 白抜き箇所は沈下量を測定していないため、沈下量の想定が困難なエリア

図 2-24 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下率及び沈下量の分布

なお、2011年東北地方太平洋沖地震による沈下が、敷地内に残存している旧表土と関係している可能性があることから、図2-25に示すとおり、敷地内の旧表土の分布と沈下実績を重ね合わせて検討を行った。

その結果、敷地内の旧表土の分布と沈下量（沈下率）には相関がほとんどないと考えられる。

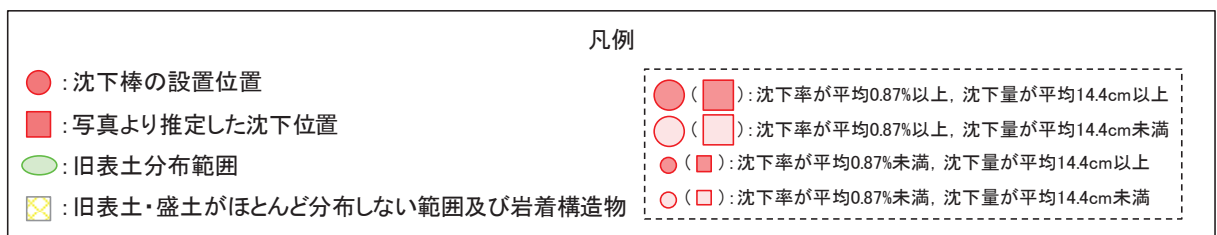
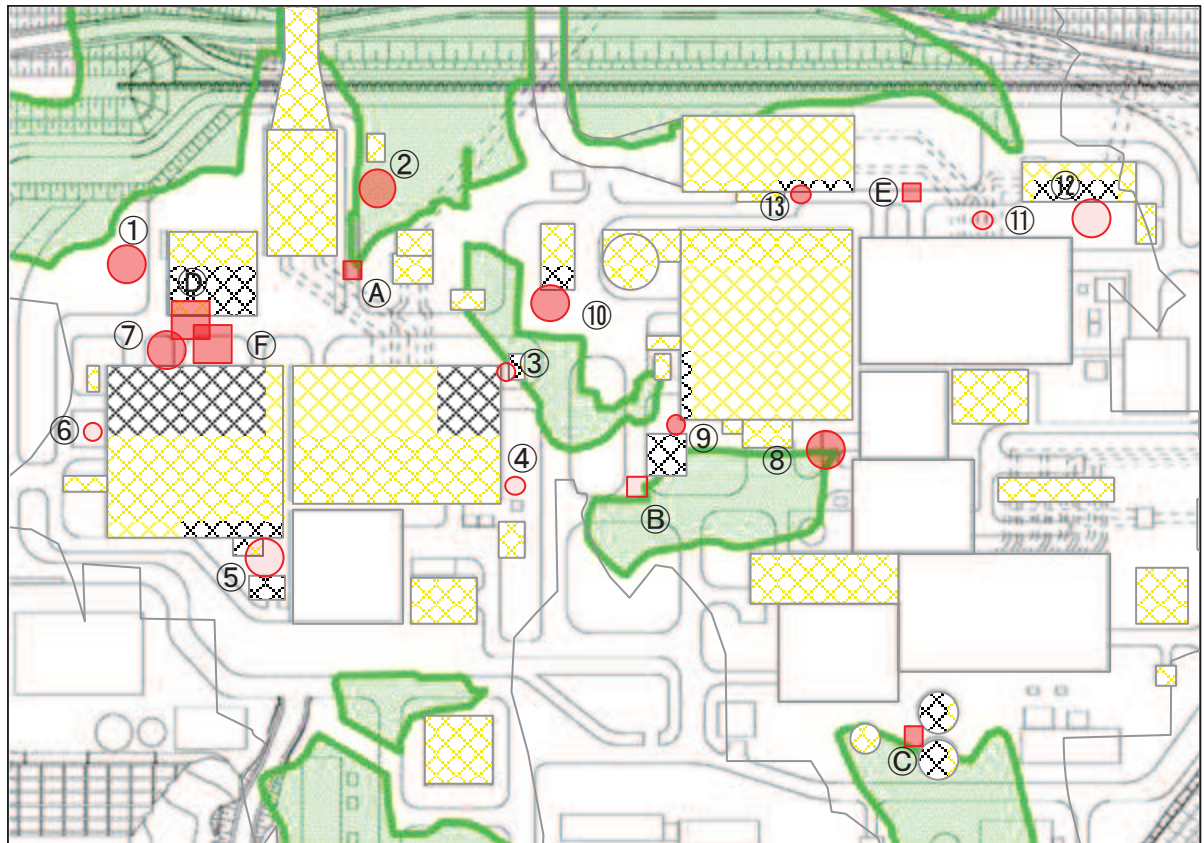


図 2-25 旧表土の分布と沈下量（沈下率）の相関

3. 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下要因

(1) 沈下測定箇所（O.P. +14.8m 盤）の沈下要因

沈下測定箇所の沈下要因としては、建屋近傍での計測であることから、建屋近傍のくさび崩壊に伴う沈下の成分を含む可能性があり、その他の要因として、不飽和地盤の繰返しせん断に伴う沈下及び飽和地盤の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下が考えられる。

2011年東北地方太平洋沖地震による液状化の有無の検討については、地震応答解析により液状化に対する抵抗率（ F_L ）を確認することで液状化判定を行う。図3-1に沈下測定箇所と地下水位低下設備の配置を示し、図3-2に沈下測定箇所の地質構成を示す。沈下測定箇所のうち No.10 以外の地点は地下水位低下設備の近傍にあるため地下水位が低くなっており、地下水位以浅の盛土厚が最も薄く有効上載圧が最も小さくなる No.10 を検討地点とした。沈下測定箇所の液状化判定の対象とする地震動は、女川原子力発電所で観測された敷地岩盤上部（O.P. -8.6m）の地震波から表層の影響を除去したはぎとり波とし、地震応答解析の解析コードは「microSHAKE/3D ver.2.3」とする。

解析の結果を図3-3に示す。地下水位以深の飽和地盤の液状化に対する抵抗率（ F_L ）は1.0を上回っており、液状化はしていなかったと考えられる。よって、沈下測定箇所（O.P. +14.8m 盤）の沈下の要因は、不飽和地盤の揺すり込み沈下であると判断される。

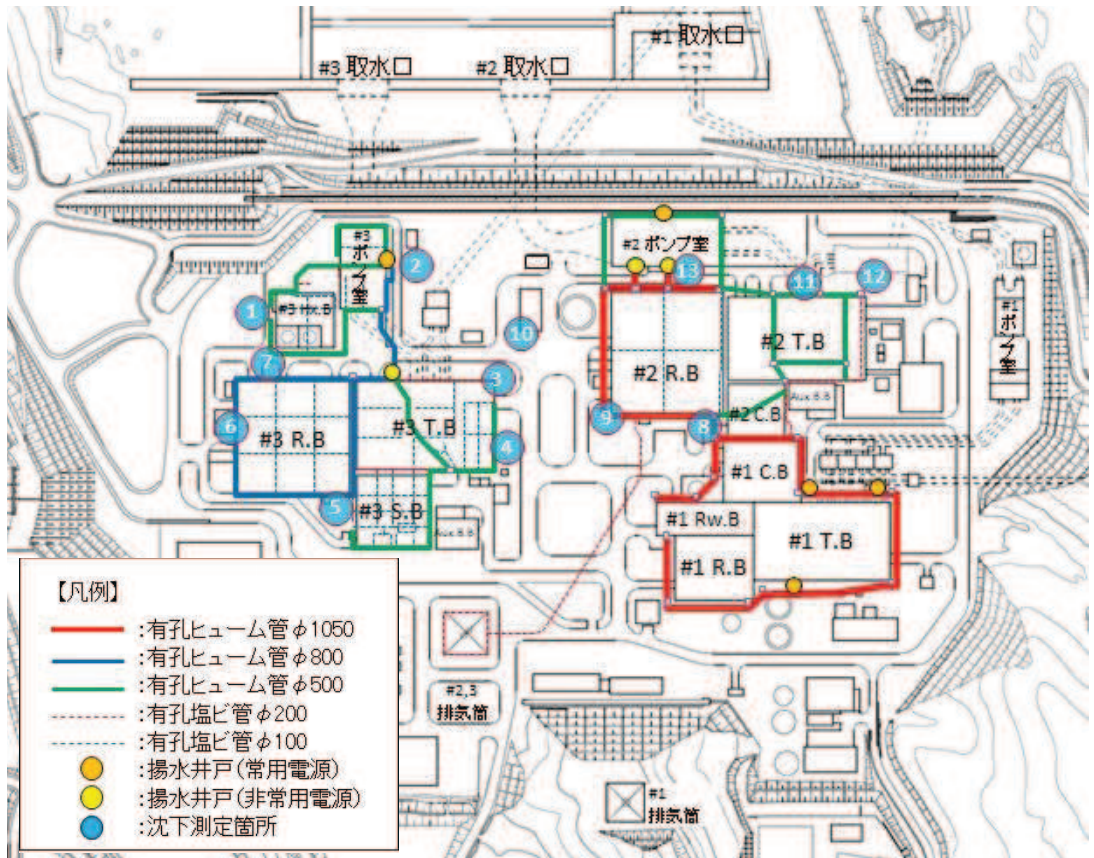


図 3-1 地下水水位低下設備の配置状況

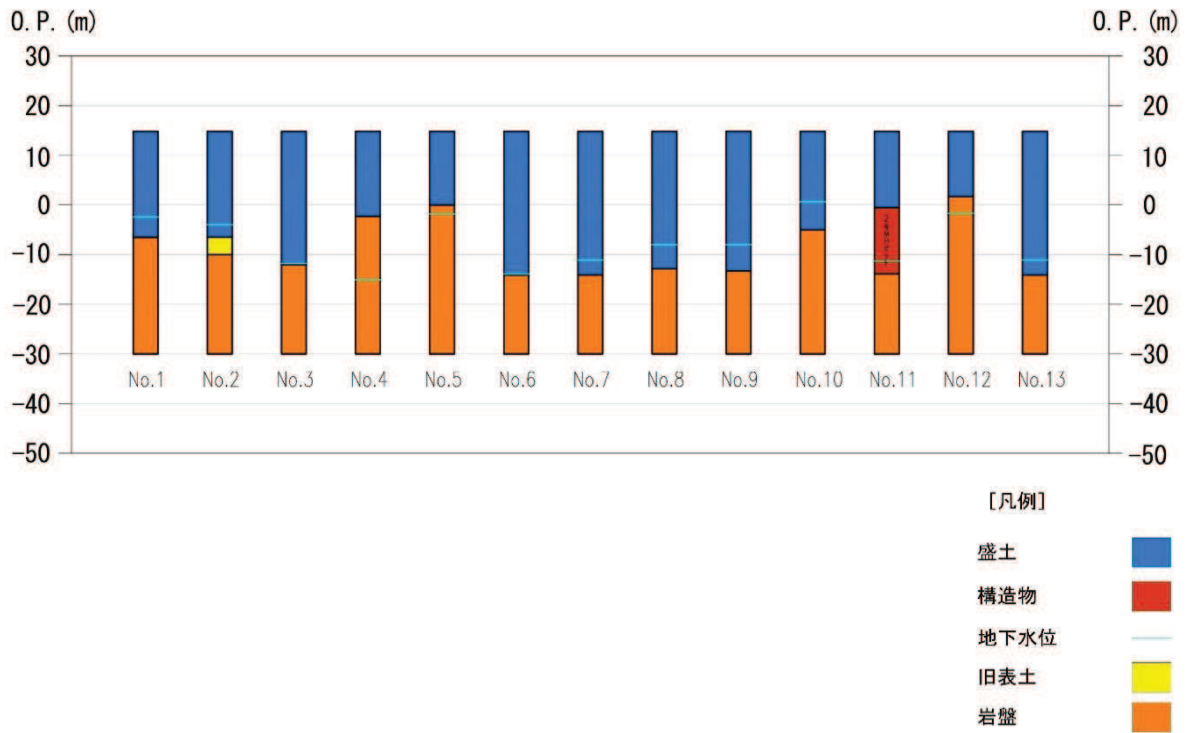


図 3-2 沈下測定箇所での地質構成



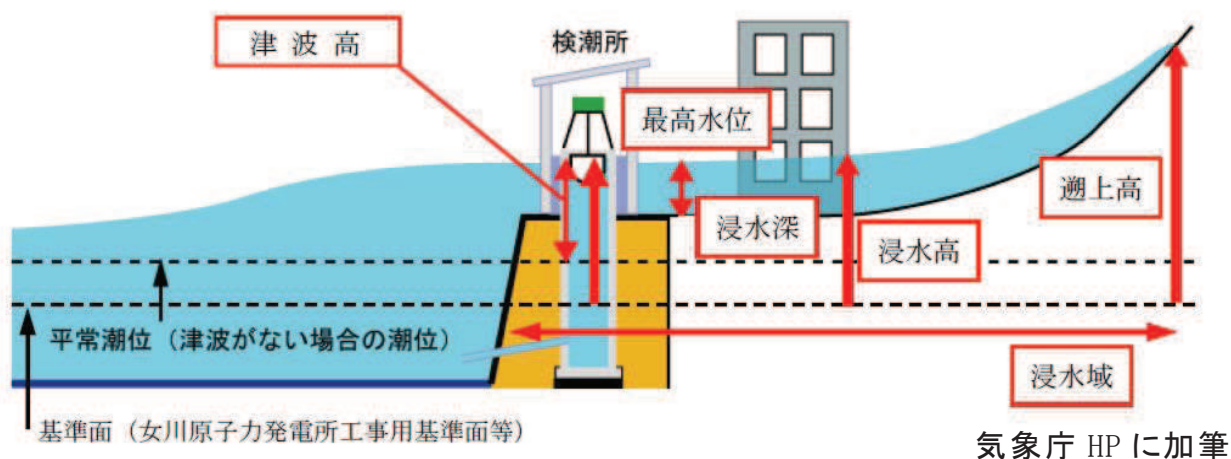
地下水位 →

| 高さ O.P.(m) | 層名称 | F _L |
|---------------|------|----------------|
| 14.800 | 盛土 | - |
| 13.450 | | - |
| 12.464 | | - |
| 11.478 | | - |
| 10.492 | | - |
| 9.506 | | - |
| 8.520 | | - |
| 7.534 | | - |
| 6.548 | | - |
| 5.562 | | - |
| 4.576 | | - |
| 3.590 | | - |
| 2.604 | | - |
| 1.618 | | - |
| 0.632 | | 1.94 |
| -0.285 | 2.01 | |
| -1.202 | 2.08 | |
| -2.119 | 2.15 | |
| -3.953 | 2.31 | |
| -4.870 | 2.39 | |
| -5.788 | 2.47 | |

図 3-3 No. 10 地点の液状化抵抗率 (F_L)

(2) O.P. +3.5m 盤の沈下要因

O.P. +3.5m 盤は 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波により浸水を受けた場所（女川原子力発電所で観測された津波高さは O.P. 約+13m）であることから、女川原子力発電所の敷地における浸水高、遡上高について、津波の痕跡調査を実施（平成 23 年 3 月 17 日～18 日，3 月 26 日）した。また、海水により運搬されたと考えられる痕跡物の到達点の追跡により津波に伴う海水の浸入の痕跡を調査した。用語の定義を図 3-4 に示す。



- ・ 最高水位：潮位計で観測された津波の高さの最高値
 - ・ 津波高：津波によって海面が上昇した高さ
 - ・ 浸水高：建屋や設備に残された津波の痕跡の高さ
 - ・ 遡上高：海岸から内陸に津波が及んだ高さ
 - ・ 浸水域：津波によって浸水した範囲
- * 痕跡高：浸水高，遡上高を総称

図 3-4 津波に関する用語の定義

女川原子力発電所の敷地における浸水高，浸水深，遡上高及び浸水域の調査結果を以下に示す。

【浸水高，浸水深】

最大浸水高は，主要な建屋が設置されている敷地前面において，屋外電動機等点検建屋に残された痕跡痕から O.P. 約+13.4m（浸水深約 10.9m）である。

【遡上高】

最大遡上高は，主要な建屋が設置されている敷地北側の法面において O.P. 約+14.0m である。また，主要な建屋が設置されている敷地前面における最大遡上高は，O.P. 約+13.8m である。

【浸水域】

海水により運搬されたと考えられる痕跡物の到達点の追跡調査により，津波に伴い海水が主要な建屋が設置されている敷地に侵入した範囲は，敷地（O.P.+13.8m）の法肩から平均約 20m であり，主要な建屋には及んでいないことを確認した。発電所敷地の海側（法肩付近）において，津波による塵芥が残留した状況を確認している。

また，調査結果の平面図を図 3-5 に，確認された塵芥の位置と写真を図 3-6 に示す。なお，ここでは地震による地盤沈下量の約 1m を考慮している。

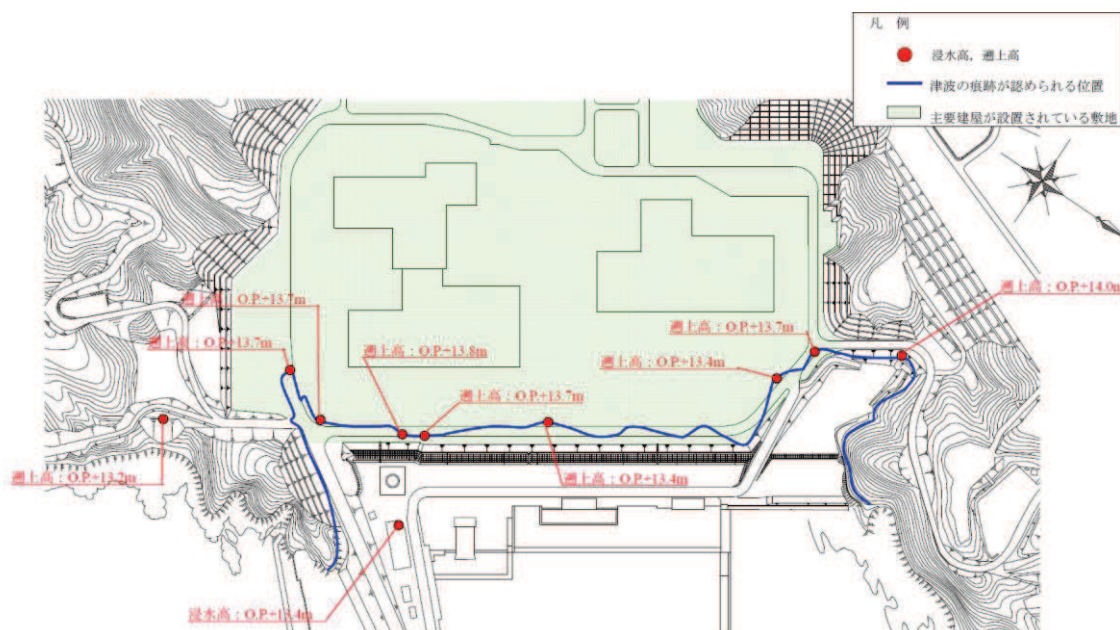


図 3-5 女川原子力発電所における津波の痕跡調査結果（その 1）

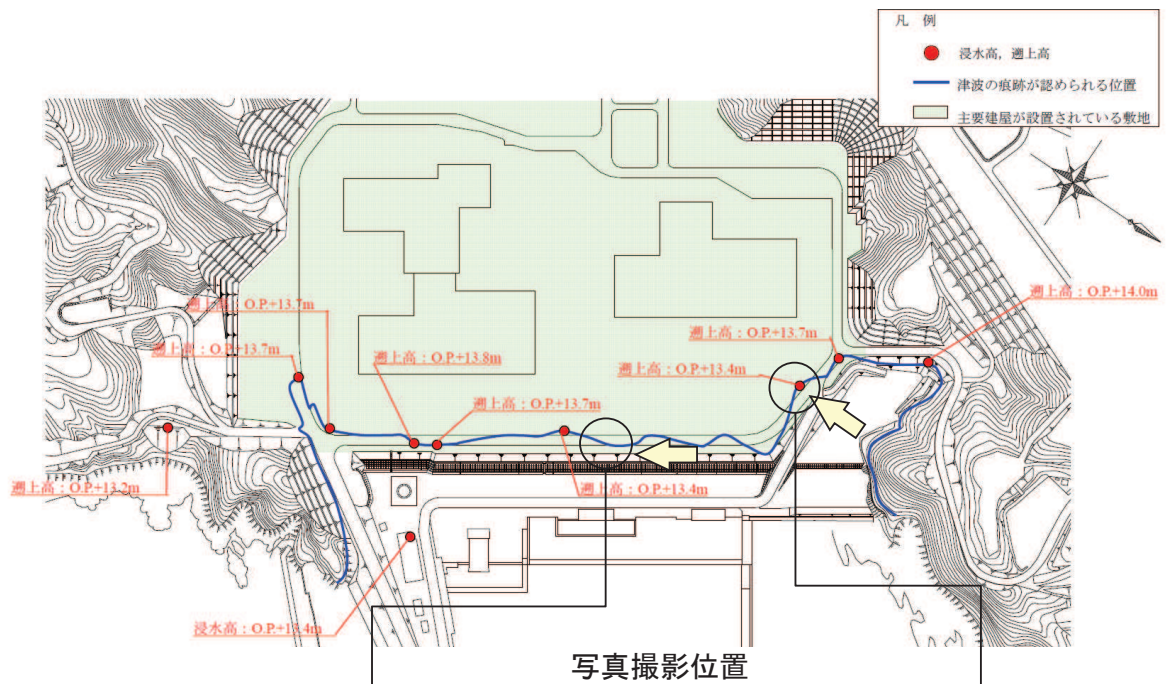


写真2 構内道路上に残留した塵芥



写真1 敷砂利上に残留した塵芥

図 3-6 女川原子力発電所における津波の痕跡調査結果 (その 2)

津波の痕跡調査結果から、O.P.+3.5m盤は浸水域となっており、液状化の痕跡である噴砂等は確認できなかった。そのため、地震応答解析により液状化に対する抵抗率 (F_L) 及び土質定数の低減係数 (D_E) を確認することにより判断した。液状化判定に用いる地震動は、女川原子力発電所で観測された敷地岩盤上部 (O.P.-8.6m) の地震波から表層の影響を除去したはぎとり波とし、地震応答解析の解析コードは「SHAKE ver.1.6」とした。

解析の結果を図3-7に示す。地下水位以深の飽和地盤の液状化に対する抵抗率 (F_L) は1.0を下回っており、土質定数の低減係数 (D_E) も1を下回る範囲が多い。よって、O.P.+3.5m盤は過剰間隙水圧の消散に伴う沈下や有効応力の減少により地盤の剛性低下が生じていた可能性が高いと考えられる。

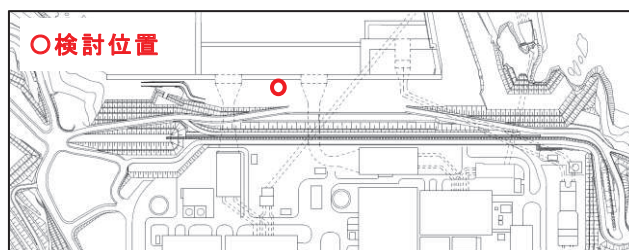


表-8.2.1 土質定数の低減係数 D_E

| F_L の範囲 | 現地盤面からの深度 x (m) | 動的せん断強度比 R | | | |
|----------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | $R \leq 0.3$ | | $0.3 < R$ | |
| | | レベル1地震動に対する照査 | レベル2地震動に対する照査 | レベル1地震動に対する照査 | レベル2地震動に対する照査 |
| $F_L \leq 1/3$ | $0 \leq x \leq 10$ | 1/6 | 0 | 1/3 | 1/6 |
| | $10 < x \leq 20$ | 2/3 | 1/3 | 2/3 | 1/3 |
| $1/3 < F_L \leq 2/3$ | $0 \leq x \leq 10$ | 2/3 | 1/3 | 1 | 2/3 |
| | $10 < x \leq 20$ | 1 | 2/3 | 1 | 2/3 |
| $2/3 < F_L \leq 1$ | $0 \leq x \leq 10$ | 1 | 2/3 | 1 | 1 |
| | $10 < x \leq 20$ | 1 | 1 | 1 | 1 |

地下水位

| 高さ O.P.(m) | 層名称 | F_L | D_E |
|------------|------|-------|-------|
| 3.500 | 盛土 | - | - |
| 2.500 | | - | - |
| 1.500 | | - | - |
| 0.400 | | 1.01 | - |
| -0.320 | 旧表土 | 0.94 | 1 |
| -1.040 | | 0.50 | 2/3 |
| -2.040 | | 0.49 | 2/3 |
| -3.040 | | 0.49 | 2/3 |
| -3.978 | | 0.50 | 2/3 |
| -4.978 | | 0.52 | 2/3 |
| -5.978 | | 0.54 | 2/3 |
| -6.978 | | 0.56 | 2/3 |
| -7.978 | | 0.59 | 2/3 |
| -8.978 | | 0.62 | 2/3 |
| -9.978 | | 0.66 | 2/3 |
| -10.978 | | 0.69 | 1 |
| -11.978 | | 0.73 | 1 |
| -12.978 | | 0.77 | 1 |
| -13.978 | 0.82 | 1 | |
| -14.978 | 0.86 | 1 | |
| -15.978 | 0.90 | 1 | |

道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編) (社) 日本道路協会, 平成14年3月 p125より抜粋)

図3-7 O.P.+3.5m盤の液状化抵抗率 (F_L) 及び土質定数の低減係数 (D_E)

(参考資料 17) 地震応答解析にて考慮する地盤物性のばらつき

1. 土木構造物の地震応答解析における地盤物性のばらつき

土木構造物の耐震評価に当たっては、構造物の周囲に分布する盛土、旧表土、岩盤、セメント改良土及び改良地盤に対し、動せん断弾性係数のばらつきを考慮した耐震評価を実施する。

動せん断弾性係数のばらつきは、各種試験結果に基づき算定する。

1.1 動せん断弾性係数のばらつき

1.1.1 B級岩盤, CH級岩盤, CM級岩盤, CL級岩盤

(1) 狐崎部層

狐崎部層の速度層構造を図 1-1 に示す。狐崎部層の B級岩盤, CH級岩盤, CM級岩盤, CL級岩盤における動せん断弾性係数 G_d のばらつきは、図 1-1 に示すせん断波速度 V_s のばらつきを考慮し算定する。

せん断波速度 V_s のばらつきは、図 1-1 に示す各ボーリング孔で測定されたせん断波速度 V_s と図 1-1 に示すせん断波速度 V_s (設計値) の標準偏差を算出し、各速度層の層厚を考慮した上で、狐崎部層全体としての変動係数を 6.7% と設定した。せん断波速度 V_s のばらつき算定結果を表 1-1 に、動せん断弾性係数 G_d の算定結果を表 1-2 に示す。

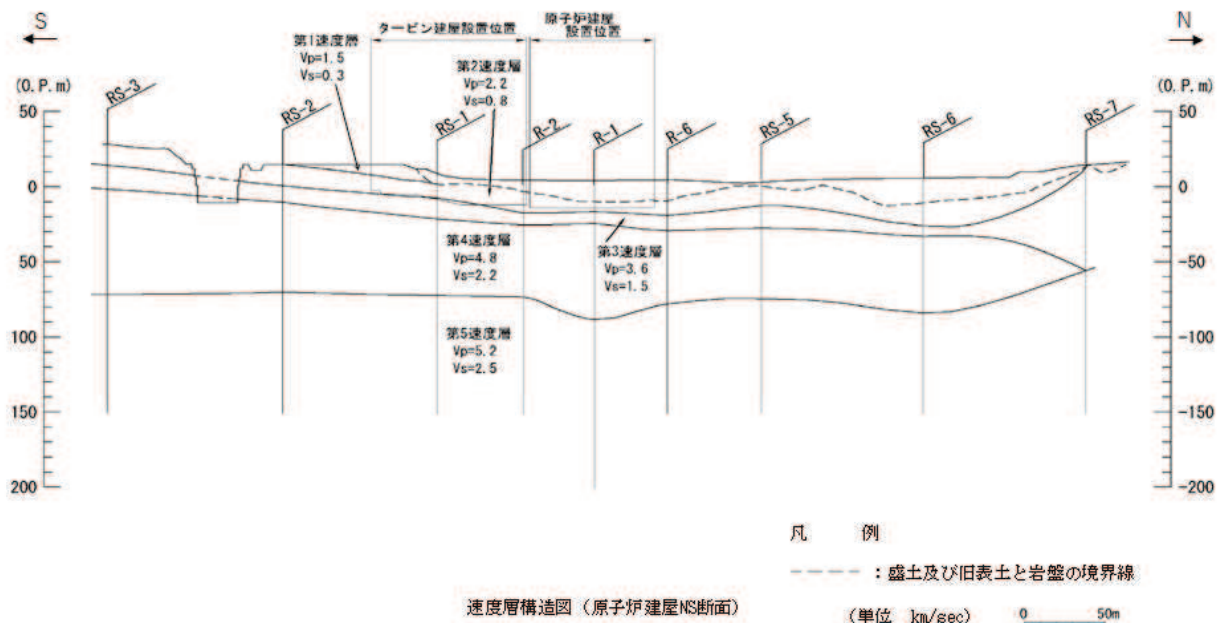


図 1-1(1) 狐崎部層の速度層構造 (原子炉建屋 NS 断面)

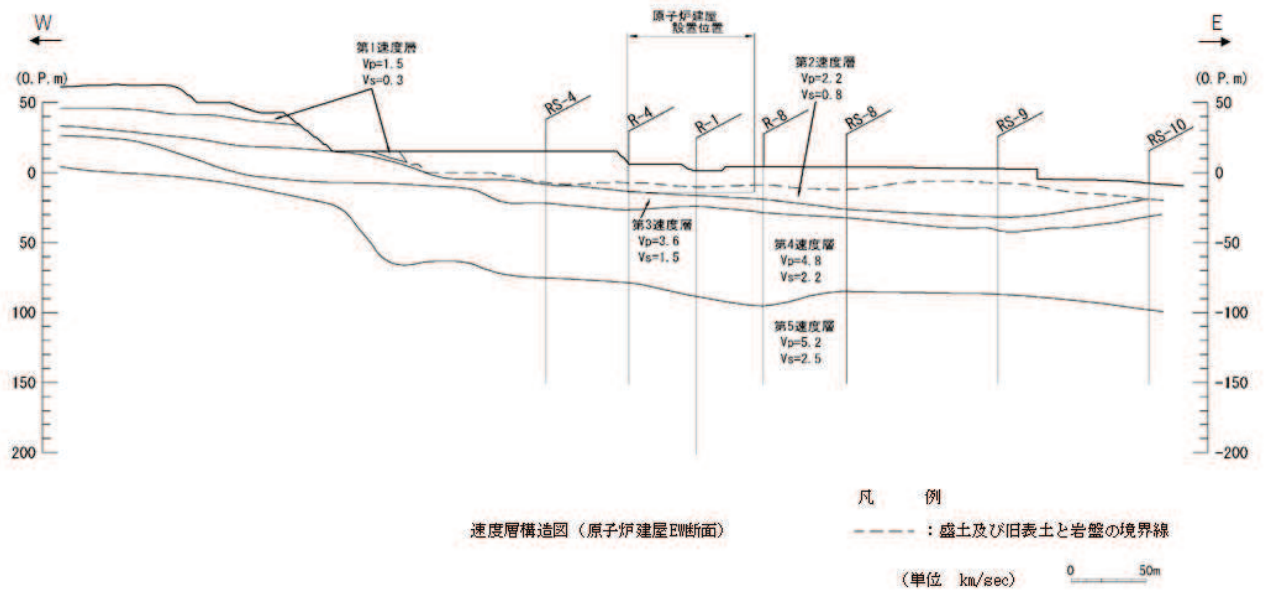


図 1-1(2) 狐崎部層の速度層構造（原子炉建屋 EW 断面）

表 1-1 狐崎部層のせん断波速度の標準偏差

| 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|---------|-----------------------|------------------------|----------|
| 第 1 速度層 | 300 | 20 | 6.7 |
| 第 2 速度層 | 800 | 54 | |
| 第 3 速度層 | 1500 | 101 | |
| 第 4 速度層 | 2200 | 147 | |
| 第 5 速度層 | 2500 | 168 | |

表 1-2 動せん断弾性係数 G_d のばらつき算定結果 (狐崎部層)

| 岩種・岩級 | | 速度層 | 動せん断弾性係数 G_d (N/mm ²) | | |
|------------------------------|---------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| B級 及び C _H 級 | 砂岩 | 第2速度層 | 1.3×10 ³ | 1.5×10 ³ | 1.7×10 ³ |
| | | 第3速度層 | 5.1×10 ³ | 5.9×10 ³ | 6.7×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 11.5×10 ³ | 13.2×10 ³ | 15.0×10 ³ |
| | | 第5速度層 | 14.4×10 ³ | 16.5×10 ³ | 18.8×10 ³ |
| | 頁岩 | 第2速度層 | 1.4×10 ³ | 1.6×10 ³ | 1.8×10 ³ |
| | | 第3速度層 | 5.2×10 ³ | 6.0×10 ³ | 6.8×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 11.8×10 ³ | 13.5×10 ³ | 15.4×10 ³ |
| | | 第5速度層 | 14.5×10 ³ | 16.7×10 ³ | 19.0×10 ³ |
| | ひん 岩 | 第3速度層 | 5.6×10 ³ | 6.4×10 ³ | 7.3×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 12.4×10 ³ | 14.2×10 ³ | 16.2×10 ³ |
| 第5速度層 | | 15.3×10 ³ | 17.6×10 ³ | 20.0×10 ³ | |
| C _M 級 | 砂岩 | 第1速度層 | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ |
| | | 第2速度層 | 1.3×10 ³ | 1.5×10 ³ | 1.7×10 ³ |
| | | 第3速度層 | 5.0×10 ³ | 5.7×10 ³ | 6.5×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 11.1×10 ³ | 12.7×10 ³ | 14.5×10 ³ |
| | | 第5速度層 | 13.8×10 ³ | 15.8×10 ³ | 18.0×10 ³ |
| | 頁岩 | 第1速度層 | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ |
| | | 第2速度層 | 1.3×10 ³ | 1.5×10 ³ | 1.7×10 ³ |
| | | 第3速度層 | 5.1×10 ³ | 5.9×10 ³ | 6.7×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 11.3×10 ³ | 13.0×10 ³ | 14.8×10 ³ |
| | | 第5速度層 | 14.1×10 ³ | 16.2×10 ³ | 18.4×10 ³ |
| | ひん 岩 | 第2速度層 | 1.3×10 ³ | 1.5×10 ³ | 1.7×10 ³ |
| | | 第3速度層 | 5.0×10 ³ | 5.7×10 ³ | 6.5×10 ³ |
| | | 第4速度層 | 11.1×10 ³ | 12.7×10 ³ | 14.5×10 ³ |
| C _L 級 | 第1速度層 | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ | 0.2×10 ³ | |
| | 第2速度層 | 1.2×10 ³ | 1.4×10 ³ | 1.6×10 ³ | |
| | 第3速度層 | 4.8×10 ³ | 5.5×10 ³ | 6.3×10 ³ | |

b. 牧の浜部層

牧の浜部層の速度層構造を図 1-2 に示す。牧の浜部層の B 級岩盤, C_H 級岩盤, C_M 級岩盤, C_L 級岩盤における動せん断弾性係数 G_d のばらつきは, 図 1-2 に示すせん断波速度 V_s のばらつきを考慮し算定する。

せん断波速度 V_s のばらつきは, 図 1-2 に示す各ボーリング孔で測定されたせん断波速度 V_s と図 1-2 に示すせん断波速度 V_s (設計値) の標準偏差を算出し, 各速度層の層厚を考慮した上で, 牧の浜部層全体としての変動係数を 7.3% と設定した。せん断波速度 V_s のばらつき算定結果を表 1-3 に, 動せん断弾性係数 G_d の算定結果を表 1-4 に示す。

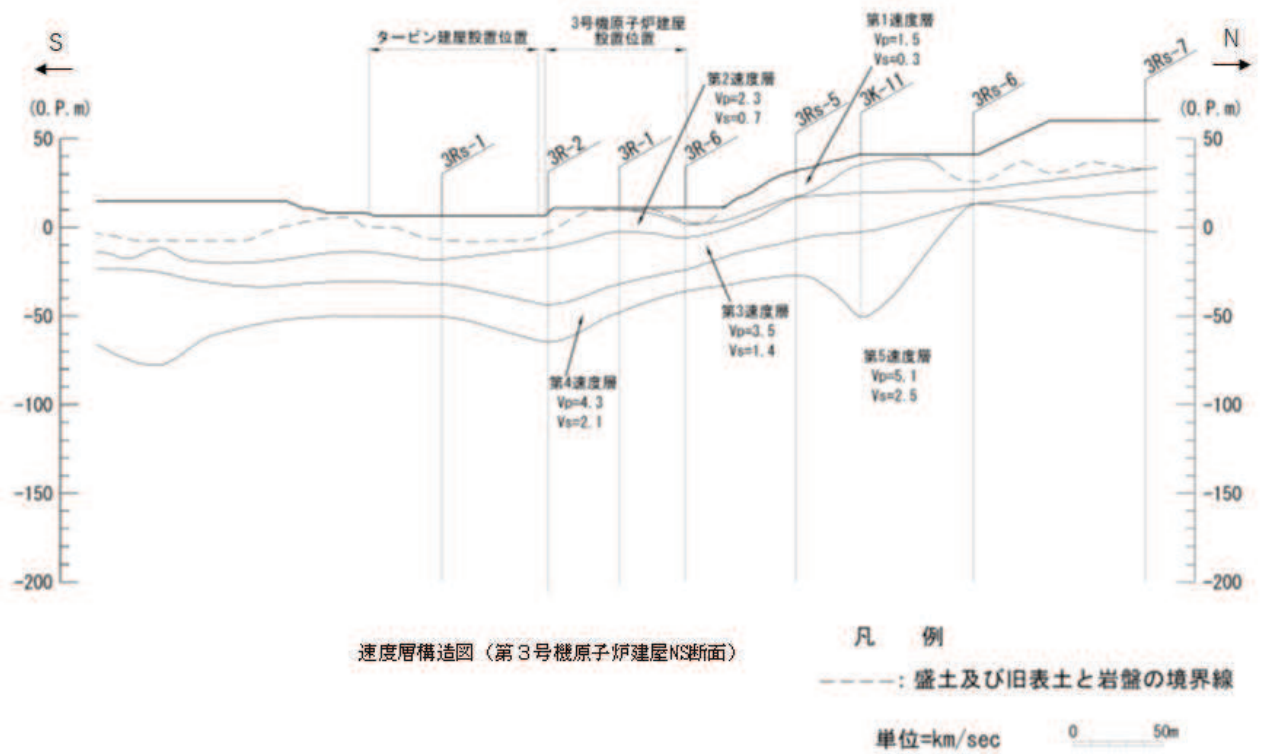


図 1-2(1) 牧の浜部層の速度層構造 (第3号機原子炉建屋 NS 断面)

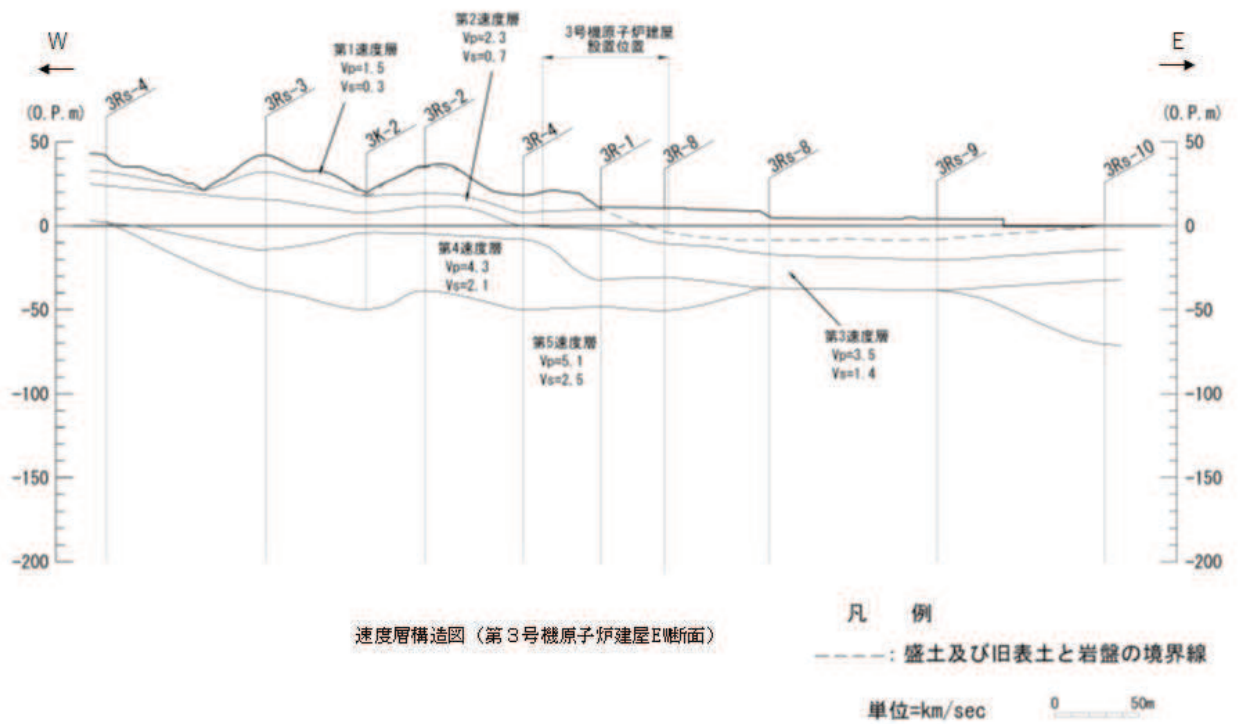


図 1-2 (2) 牧の浜部層の速度層構造 (第3号機原子炉建屋EW断面)

表 1-3 牧の浜部層のせん断波速度の標準偏差

| 速度層 | せん断波速度 Vs (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|-------|--------------------|------------------------|----------|
| 第1速度層 | 300 | 22 | 7.3 |
| 第2速度層 | 700 | 51 | |
| 第3速度層 | 1400 | 102 | |
| 第4速度層 | 2100 | 153 | |
| 第5速度層 | 2500 | 183 | |

表 1-4 動せん断弾性係数 G_d のばらつき算定結果 (牧の浜部層)

| 岩種・岩級 | | 速度層 | 動せん断弾性係数 G_d (N/mm^2) | | |
|------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| B級 及び C _H 級 | 砂岩 | 第2速度層 | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| | | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| | | 第4速度層 | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| | | 第5速度層 | 14.4×10^3 | 16.8×10^3 | 19.3×10^3 |
| | 頁岩 | 第2速度層 | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| | | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| | | 第4速度層 | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| | | 第5速度層 | 14.4×10^3 | 16.8×10^3 | 19.3×10^3 |
| | ひん 岩 | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| | | 第4速度層 | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| | | 第5速度層 | 14.4×10^3 | 16.8×10^3 | 19.3×10^3 |
| | C _M 級 | 砂岩 | 第1速度層 | 0.2×10^3 | 0.2×10^3 |
| 第2速度層 | | | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| 第3速度層 | | | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| 第4速度層 | | | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| 第5速度層 | | | 14.4×10^3 | 16.8×10^3 | 19.3×10^3 |
| 頁岩 | | 第1速度層 | 0.2×10^3 | 0.2×10^3 | 0.2×10^3 |
| | | 第2速度層 | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| | | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| | | 第4速度層 | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| | | 第5速度層 | 14.4×10^3 | 16.8×10^3 | 19.3×10^3 |
| ひん 岩 | | 第2速度層 | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| | | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 |
| | | 第4速度層 | 9.9×10^3 | 11.5×10^3 | 13.2×10^3 |
| C _L 級 | | 第1速度層 | 0.2×10^3 | 0.2×10^3 | 0.2×10^3 |
| | | 第2速度層 | 1.0×10^3 | 1.2×10^3 | 1.4×10^3 |
| | 第3速度層 | 4.0×10^3 | 4.7×10^3 | 5.4×10^3 | |

1.1.2 D級岩盤，盛土，旧表土

(1) D級岩盤，盛土，旧表土におけるばらつき算定方法

D級岩盤，盛土，旧表土のばらつきは，初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを考慮する。 G_0 のばらつきは以下の方法で算定する（図 1-3）。

- ・繰返し三軸試験結果に基づき，両対数軸上で回帰式と試験結果の残差の標準偏差 σ を求める。
- ・指数関数の係数を $\pm \sigma$ し，ばらつきを考慮した G_0 を算定する（べき級数は固定）。

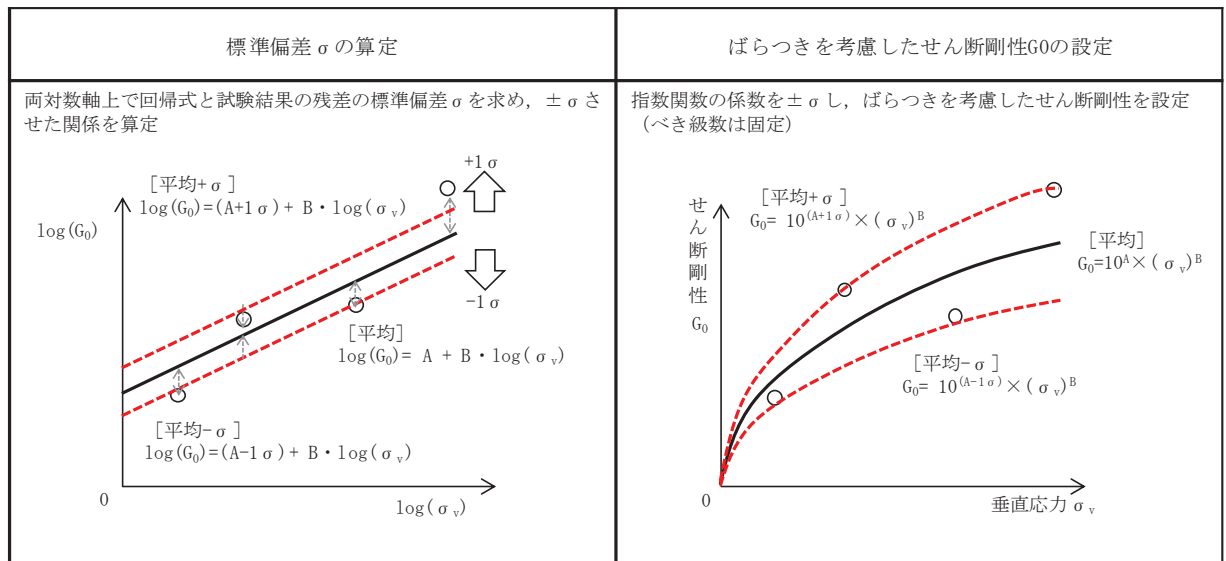


図 1-3 ばらつきを考慮した初期せん断弾性係数 G_0 の算定方法

(2) 盛土の G_0 のばらつき

(1)に基づき算定した盛土の初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを表 1-5 及び図 1-4 に示す。

表 1-5 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果（盛土）

| | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²) |
|--------------|---|
| 平均+ σ | $G_0 = 406 \sigma^{0.71}$ |
| 平均 | $G_0 = 382 \sigma^{0.71}$ |
| 平均- σ | $G_0 = 360 \sigma^{0.71}$ |

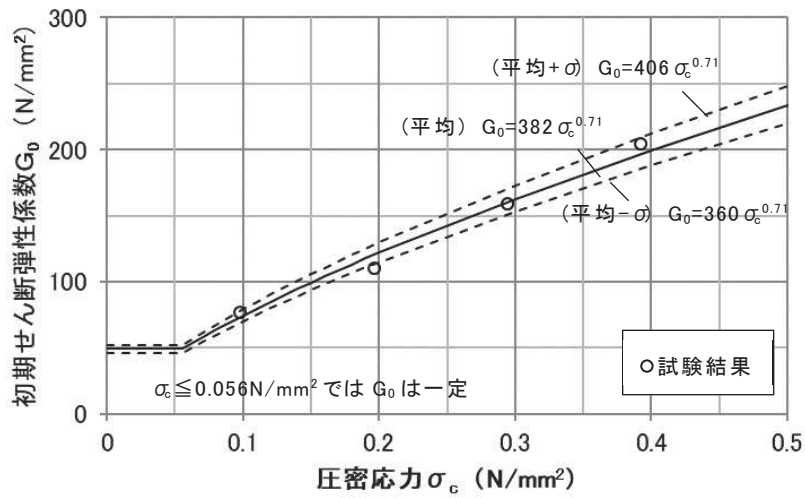


図 1-4 初期せん断弾性係数 G_0 の拘束圧依存関係 (盛土)

(3) 旧表土の G_0 のばらつき

(1)に基づき算定した旧表土の初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを表 1-6 及び図 1-5 に示す。

表 1-6 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果 (旧表土)

| | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm^2) |
|--------------|---------------------------------|
| 平均+ σ | $G_0 = 226 \sigma^{0.42}$ |
| 平均 | $G_0 = 211 \sigma^{0.42}$ |
| 平均- σ | $G_0 = 197 \sigma^{0.42}$ |

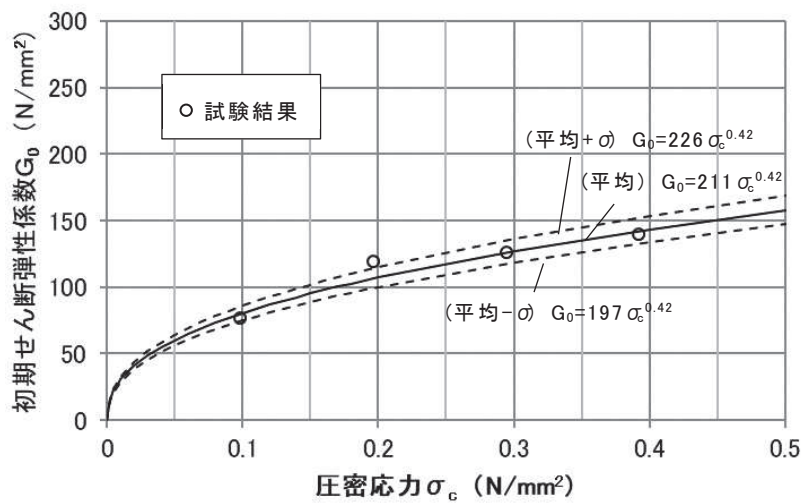


図 1-5 初期せん断弾性係数 G_0 の拘束圧依存関係 (旧表土)

(4) D級岩盤（狐崎部層及び牧の浜部層共通）の G_0 のばらつき

(1)に基づき算定した D級岩盤の初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを表 1-7 及び図 1-6 に示す。

表 1-7 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果 (D級岩盤)

| | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²) |
|---------------|---|
| 平均 + σ | $G_0 = 291.5 \sigma^{0.26}$ |
| 平均 | $G_0 = 255.4 \sigma^{0.26}$ |
| 平均 - σ | $G_0 = 223.8 \sigma^{0.26}$ |

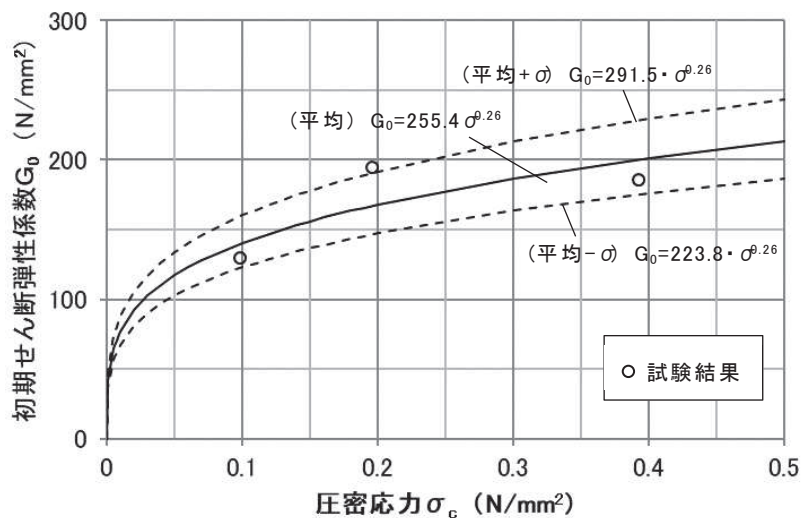


図 1-6 初期せん断弾性係数 G_0 の拘束圧依存関係 (D級岩盤)

1.1.3 セメント改良土

セメント改良土の初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきは、PS 検層の結果から得られるせん断波速度 V_s のばらつきを考慮し算定する。

算定した初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを表 1-8 に示す。

なお、初期せん断弾性係数 G_0 は下式のとおり算出する。

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

ρ : 密度 (t/m³)

V_s : せん断波速度 (m/s)

表 1-8 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果 (セメント改良土)

| | 密度 ρ (t/m ³) | せん断波速度 V_s (m/s) | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²) |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|---|
| 平均+ σ | 2.20 | 1000 | 2200 |
| 平均 | | 870 | 1670 |
| 平均- σ | | 740 | 1210 |

1.1.4 改良地盤

改良地盤の初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきは、PS 検層の結果から得られるせん断波速度 V_s のばらつきを考慮し算定する。

算定した初期せん断弾性係数 G_0 のばらつきを表 1-9 に示す。

なお、初期せん断弾性係数 G_0 は下式のとおり算出する。

$$G_0 = \rho V_s^2$$

ρ : 密度 (t/m³)

V_s : せん断波速度 (m/s)

表 1-9(1) 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果 (改良地盤, 地下水位以浅)

| | 密度 ρ (t/m ³) | せん断波速度 V_s (m/s) | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²) |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|---|
| 平均+ σ | 2.00 | 1160 | 2690 |
| 平均 | | 960 | 1840 |
| 平均- σ | | 760 | 1150 |

表 1-9(2) 初期せん断弾性係数 G_0 のばらつき算定結果 (改良地盤, 地下水位以深)

| | 密度 ρ (t/m ³) | せん断波速度 V_s (m/s) | 初期せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²) |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|---|
| 平均+ σ | 2.10 | 1160 | 2830 |
| 平均 | | 960 | 1940 |
| 平均- σ | | 760 | 1210 |

1.2 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

地盤物性のばらつきを考慮した解析ケースの詳細は、「補足-610-20 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に示す。

2. 建物・構築物の地震応答解析における地盤物性のばらつき

建物・構築物の耐震評価にあたっては、その周囲に分布する盛土、旧表土、岩盤、セメント改良土及び改良地盤に対し、せん断波速度 V_s のばらつきを考慮した耐震評価を実施する。

V_s のばらつきは、各種試験結果及び観測記録に基づき算定する。

なお、本項で示す以外の建物・構築物については「1. 土木構造物の地震応答解析における地盤物性のばらつき」に準じるものとする。

2.1 地盤物性のばらつきの設定方法

(1) 原子炉建屋，制御建屋，タービン建屋，補助ボイラー建屋，第1号機制御建屋

狐崎部層（建屋直下）の C_L 級岩盤， C_M 級岩盤， C_H 級岩盤， B 級岩盤におけるせん断波速度 V_s のばらつきは、原子炉建屋直下の各ボーリング孔で測定されたせん断波速度 V_s とせん断波速度 V_s （設計値）の標準偏差を算出し、各速度層の層厚を考慮した上で、変動係数を 7.0% と設定した。また、表層地盤のうち、表層地盤上部のせん断波速度 V_s については、非線形性を考慮することから、ばらつきは考慮しない。表層地盤下部のせん断波速度 V_s については、地震観測記録のシミュレーション解析により評価した値に基づいて設定しているため、底面地盤と同程度のばらつきとして、せん断波速度 $\pm 100\text{m/s}$ を考慮する。せん断波速度 V_s の標準偏差を表 2-1 に、せん断波速度 V_s のばらつき算定結果を表 2-2 に示す。

表 2-1 狐崎部層（原子炉建屋直下）のせん断波速度の標準偏差

| 速度層 | | せん断波速度 Vs (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|-------------------------------|-------|--------------------|------------------------|----------|
| 表層地盤上部 (O. P. 14.8m~O. P. 0m) | | *1 | - | - |
| 表層地盤下部 (O. P. 0m~基礎版底面) | | 900 | 100*2 | - |
| 底面地盤 | 第3速度層 | 1300 | 90 | 7.0 |
| | 第4速度層 | 2150 | 150 | |
| | 第5速度層 | 2440 | 170 | |

*1 表層地盤上部は、上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断弾性係数 G_0 を設定する。また、ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

*2 表層地盤下部は、底面地盤と同程度のばらつきとして、せん断波速度 ± 100 m/s を考慮する。

表 2-2 狐崎部層（原子炉建屋直下）のせん断波速度のばらつきの算定結果

| 速度層 | | せん断波速度 Vs (m/s) | | |
|-------------------------|-------|-----------------|------|--------------|
| | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| 表層地盤下部 (O. P. 0m~基礎版底面) | | 800 | 900 | 1000 |
| 底面地盤 | 第3速度層 | 1210 | 1300 | 1390 |
| | 第4速度層 | 2000 | 2150 | 2300 |
| | 第5速度層 | 2270 | 2440 | 2610 |

(2) 第3号機海水熱交換器建屋

牧の浜部層（第3号機海水熱交換器建屋直下）のC_L級岩盤，C_M級岩盤，C_H級岩盤，B級岩盤におけるせん断波速度 V_s のばらつきは，各ボーリング孔で測定されたせん断波速度 V_s とせん断波速度 V_s （設計値）の標準偏差を算出し，各速度層の層厚を考慮した上で，変動係数を7.0%と設定した。せん断波速度 V_s の標準偏差を表2-3に，せん断波速度 V_s のばらつき算定結果を表2-4に示す。

表2-3 牧の浜部層（第3号機海水熱交換器建屋直下）
のせん断波速度の標準偏差

| 速度層 | | せん断波速度 V_s (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|------------------------|-------|-----------------------|------------------------|----------|
| 表層地盤 (O.P. 14.8m～底面地盤) | | *1 | - | - |
| 底面地盤 | 第3速度層 | 1360 | 100 | 7.0 |
| | 第4速度層 | 2040 | 140 | |
| | 第5速度層 | 2520 | 180 | |

*1 表層地盤は，上載圧依存を考慮してせん断波速度と相関のある初期せん断弾性係数 G_0 を設定する。また，ひずみ依存による非線形特性を考慮する。

表2-4 牧の浜部層（第3号機海水熱交換器建屋直下）
のせん断波速度のばらつきの算定結果

| | 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | | |
|------|-------|--------------------|------|--------------|
| | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| 底面地盤 | 第3速度層 | 1260 | 1360 | 1460 |
| | 第4速度層 | 1900 | 2040 | 2180 |
| | 第5速度層 | 2340 | 2520 | 2700 |

(3)緊急用電気品建屋，緊急時対策建屋

牧の浜部層（緊急用電気品建屋及び緊急時対策建屋直下）の C_L 級岩盤， C_M 級岩盤， C_H 級岩盤， B 級岩盤におけるせん断波速度 V_s のばらつきは，各ボーリング孔で測定されたせん断波速度 V_s とせん断波速度 V_s （設計値）の標準偏差を算出し，緊急用電気品建屋及び緊急時対策建屋直下の各速度層の層厚を考慮した上で，変動係数を，緊急用電気品建屋においては 5.7%，緊急時対策建屋においては 6.7%と設定した。せん断波速度 V_s の標準偏差を表 2-5 に，せん断波速度 V_s のばらつき算定結果を表 2-6 に示す。

表 2-5 牧の浜部層（建屋直下）のせん断波速度の標準偏差

(a)緊急用電気品建屋

| | 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------|
| 表層地盤 | 第 1 速度層 (C_M 級岩盤) | 280 | 20 | 5.7 |
| | 第 2 速度層 (C_M 級岩盤) | 680 | 40 | |
| | 第 2 速度層 (C_H 級岩盤) | 670 | 40 | |
| | 第 3 速度層 (C_H 級岩盤) | 1330 | 80 | |
| 底面地盤 | 第 4 速度層 (C_H 級岩盤) | 2080 | 120 | |
| | 第 5 速度層 (C_H 級岩盤) | 2510 | 140 | |
| | 第 5 速度層 (B 級岩盤) | 2500 | 140 | |

(b)緊急時対策建屋

| | 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | 標準偏差 σ (m/s) | 変動係数 (%) |
|------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------|
| 表層地盤 | 第 1 速度層 (C_L 級岩盤) | 290 | 20 | 6.7 |
| | 第 2 速度層 (C_L 級岩盤) | 710 | 50 | |
| | 第 2 速度層 (C_M 級岩盤) | 680 | 50 | |
| | 第 2 速度層 (C_H 級岩盤) | 670 | 40 | |
| 底面地盤 | 第 3 速度層 (C_H 級岩盤) | 1330 | 90 | |
| | 第 4 速度層 (C_H 級岩盤) | 2080 | 140 | |
| | 第 5 速度層 (C_H 級岩盤) | 2510 | 170 | |
| | 第 5 速度層 (B 級岩盤) | 2500 | 170 | |

表 2-6 牧の浜部層（建屋直下）のせん断波速度のばらつきの算定結果

(a) 緊急用電気品建屋

| | 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | | |
|------|----------------------|--------------------|------|--------------|
| | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| 表層地盤 | 第 1 速度層 (C_M 級岩盤) | 260 | 280 | 300 |
| | 第 2 速度層 (C_M 級岩盤) | 640 | 680 | 720 |
| | 第 2 速度層 (C_H 級岩盤) | 630 | 670 | 710 |
| | 第 3 速度層 (C_H 級岩盤) | 1250 | 1330 | 1410 |
| 底面地盤 | 第 4 速度層 (C_H 級岩盤) | 1960 | 2080 | 2200 |
| | 第 5 速度層 (C_H 級岩盤) | 2370 | 2510 | 2650 |
| | 第 5 速度層 (B 級岩盤) | 2360 | 2500 | 2640 |

(b) 緊急時対策建屋

| | 速度層 | せん断波速度 V_s (m/s) | | |
|------|----------------------|--------------------|------|--------------|
| | | 平均- σ | 平均 | 平均+ σ |
| 表層地盤 | 第 1 速度層 (C_L 級岩盤) | 270 | 290 | 310 |
| | 第 2 速度層 (C_L 級岩盤) | 660 | 710 | 760 |
| | 第 2 速度層 (C_M 級岩盤) | 630 | 680 | 730 |
| | 第 2 速度層 (C_H 級岩盤) | 630 | 670 | 710 |
| | 第 3 速度層 (C_H 級岩盤) | 1240 | 1330 | 1420 |
| 底面地盤 | 第 4 速度層 (C_H 級岩盤) | 1940 | 2080 | 2220 |
| | 第 5 速度層 (C_H 級岩盤) | 2340 | 2510 | 2680 |
| | 第 5 速度層 (B 級岩盤) | 2330 | 2500 | 2670 |

3. 有効応力解析に用いる液状化強度特性のばらつき

建物・構築物及び土木構造物の耐震評価に有効応力解析を実施する場合、液状化検討対象層である盛土及び旧表土の液状化強度特性は、試験結果の下限值となるように設定していることから、液状化強度特性の更なるばらつきは考慮しない。

(参考資料 1 8) 盛土・旧表土の強度特性設定の考え方

1. 盛土・旧表土の強度特性

設置変更許可申請書に記載された盛土・旧表土の解析用物性値（強度特性）を表 1-1 に示す。

表 1-1 設置変更許可申請書に記載された盛土・旧表土の解析用物性値（強度特性）

| 岩種・岩級 | 強度特性 | | | |
|-------|--|---------------------|---|-------------------------------------|
| | 静的・動的特性 | | | |
| | せん断強度 τ_0 (N/mm ²) | 内部摩擦角 ϕ (°) | 引張強度 σ_t (N/mm ²) | 残留強度 τ (N/mm ²) |
| 盛土 | 0.06 | 30.0 | — | $0.06 + \sigma \tan 30.0^\circ$ |
| 旧表土 | 0.08 | 26.2 | — | $0.08 + \sigma \tan 26.2^\circ$ |

1.1 盛土の強度特性の設定について

盛土の強度特性は、敷地内で採取した盛土材の三軸圧縮試験結果から設定した。試料採取位置を図 1-1 に、三軸圧縮試験結果のうち応力～ひずみ関係を図 1-2 に、破壊包絡線を図 1-3 に示す。せん断強度の設定に当たっては、解析で発生するひずみレベルを踏まえて、試験で実施した圧縮ひずみ 15%よりも保守的に小さいひずみにおける主応力差から設定している。

よって、健全強度と残留強度をそれぞれ設定することとし、要素のすべり安全率の算定においては、せん断応力がせん断強度を下回っている場合は、非破壊と判定し健全強度を適用する。せん断応力がせん断強度を超えている場合は、せん断破壊と判定し残留強度を適用する。

一方、図 1-2 に示す応力～ひずみ関係において、圧縮ひずみ 15%程度では塑性状態であるものの、ひずみ軟化傾向が認められないことから、残留強度はせん断強度と同じ値として設定した。

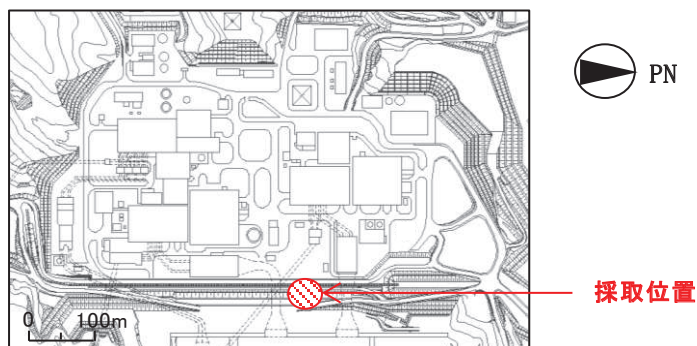


図 1-1 試料採取位置（盛土）

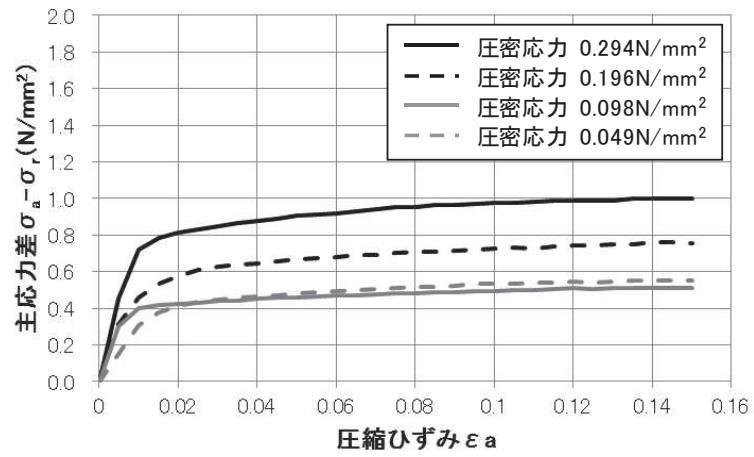


図 1-2 応力～ひずみ関係 (盛土)

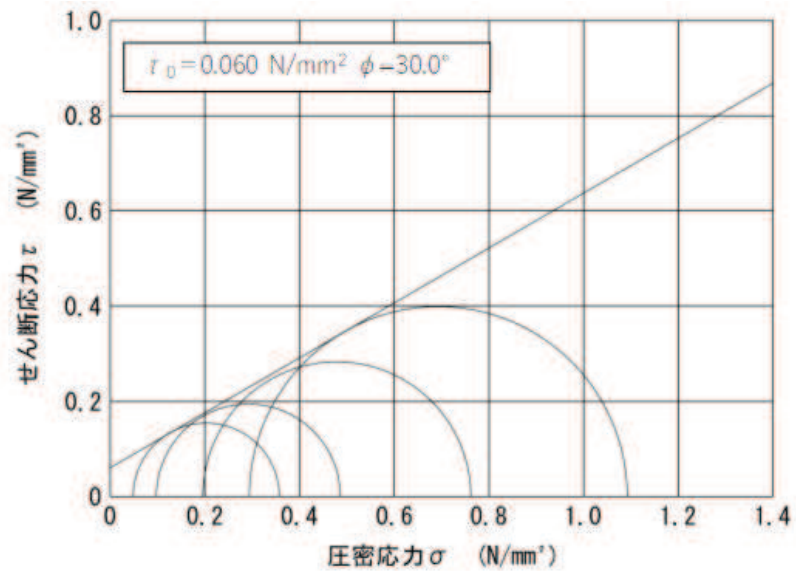


図 1-3 破壊包絡線 (盛土)

1.2 旧表土の強度特性の設定について

旧表土の強度特性は、敷地内で採取したコア試料の三軸圧縮試験から設定した。試料採取位置を図 1-4 に、三軸圧縮試験結果のうち応力～ひずみ関係を図 1-5 に、破壊包絡線を図 1-6 に示す。せん断強度の設定に当たっては、解析で発生するひずみレベルを踏まえて、試験で実施した圧縮ひずみ 15%よりも保守的に小さいひずみにおける主応力差から設定している。

よって、健全強度と残留強度をそれぞれ設定することとし、要素のすべり安全率の算定においては、せん断応力がせん断強度を下回っている場合は、非破壊と判定し健全強度を適用する。せん断応力がせん断強度を超えている場合は、せん断破壊と判定し残留強度を適用する。

一方、図 1-5 に示す応力～ひずみ関係において、圧縮ひずみ 15%程度では塑性状態であるものの、ひずみ軟化傾向が認められないことから、残留強度はせん断強度と同じ値として設定した。

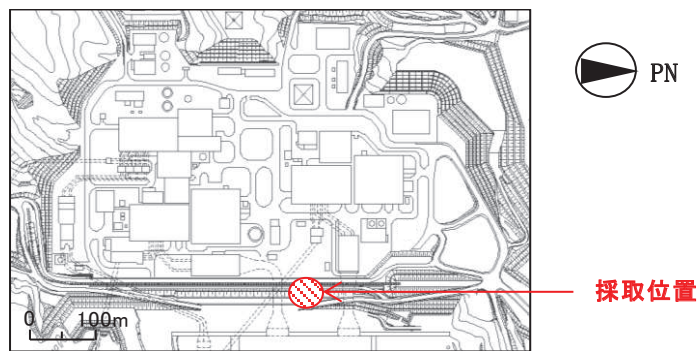


図 1-4 試料採取位置（旧表土）

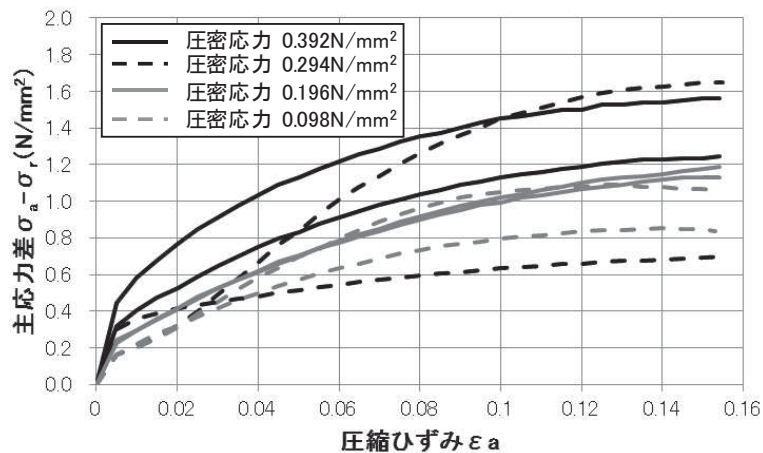


図 1-5 応力～ひずみ関係（旧表土）

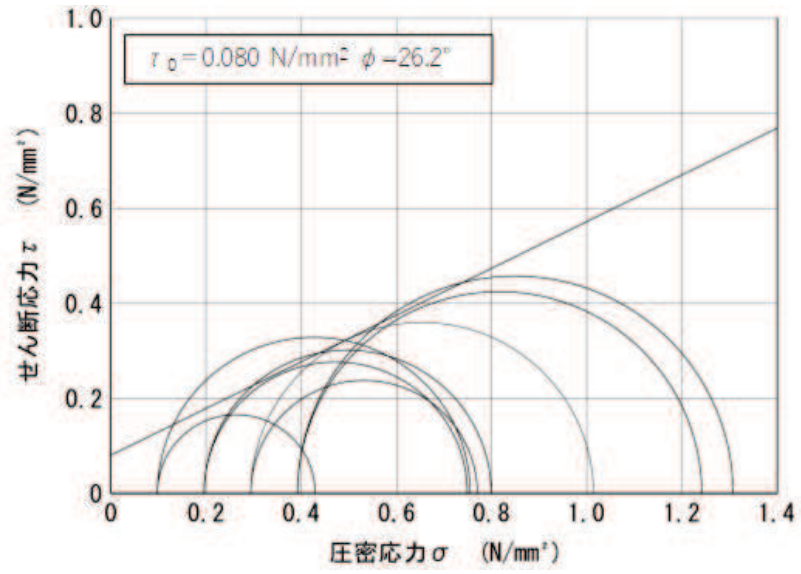


图 1-6 破坏包络线 (旧表土)

2. 基準地震動 S_s による発生せん断ひずみと三軸圧縮試験のひずみレベルの関係について
盛土・旧表土の残留強度は、「1. 盛土・旧表土の強度特性」で示すように、三軸圧縮試験においてひずみ軟化傾向が認められないことから、せん断強度と同じ値で設定している。

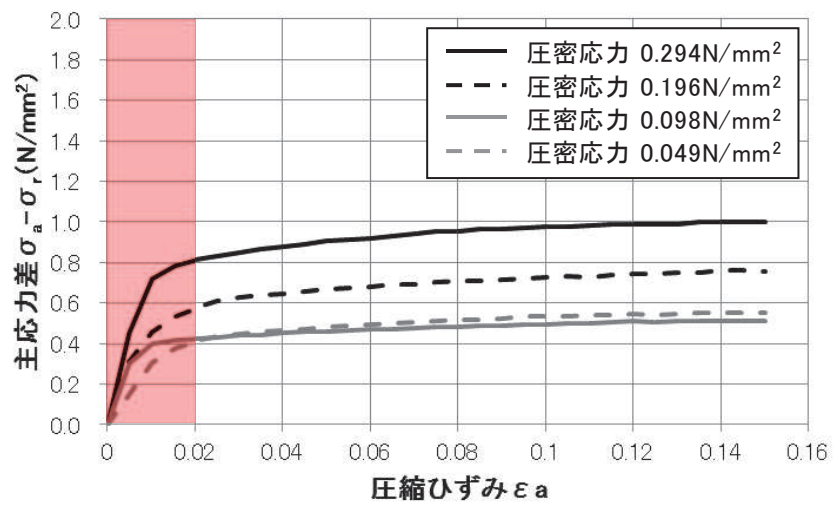
三軸圧縮試験における圧縮ひずみ ε_a は、地盤材料試験の方法と解説（（社）地盤工学会，2009年11月）に記載の下式によりせん断ひずみ γ に換算することができる。

$$\gamma = 3/2 \cdot \varepsilon_a$$

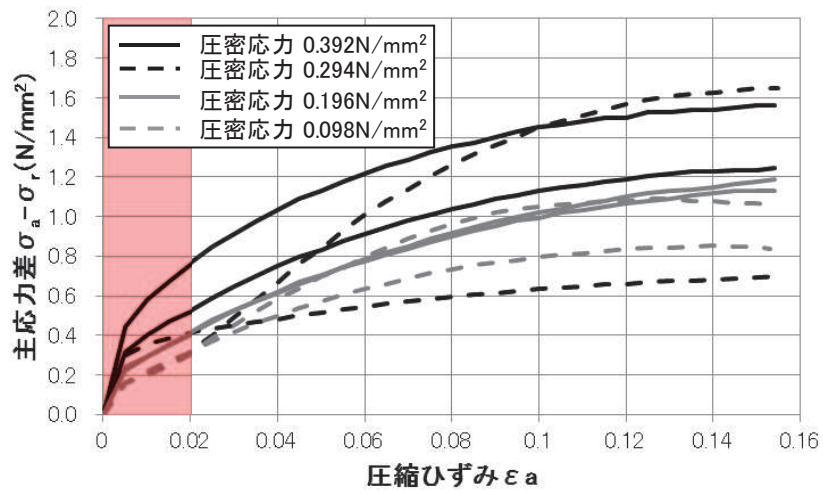
盛土・旧表土の三軸圧縮試験では、圧縮ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ 程度までの範囲においてひずみ軟化傾向が認められないことが確認されているが、これはせん断ひずみ γ に換算すると $\gamma=22.5\%$ 程度までに相当し、地盤のひずみレベルとして十分な範囲である。

また、設置変更許可申請書で示した基礎地盤の安定性評価（盛土・旧表土の残留強度を評価に使用）における二次元地震応答解析の発生せん断ひずみ γ は最大でも 3% 程度以下であり、三軸圧縮試験のひずみレベルに対し十分に小さい。三軸圧縮試験における応力～ひずみ関係と二次元地震応答解析の発生ひずみの比較を図 2-1 に示す。

なお、「補足 610-20 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」にて示している、一次元全応力解析における発生せん断ひずみ γ も 1% 程度である。



(盛土)



(旧表土)

: 地震応答解析で発生したひずみの範囲

図 2-1 応力～ひずみ関係と地震応答解析の発生ひずみの比較

3. 盛土・旧表土の設計及び工事計画認可申請におけるすべり安全率算定時の地盤強度の考え方

1. 及び 2. を踏まえた設計及び工事計画認可申請における盛土・旧表土のすべり安全率算定の地盤強度の考え方を図 3-1 に示す。

せん断応力がせん断強度を超えた場合は、せん断破壊と判定するものの、ひずみ軟化傾向が認められないことを試験で確認していることから、強度は残留強度を用いる。引張破壊と判定され、かつすべり面の垂直応力が圧縮側である場合にも残留強度を適用する。

また、図 3-1 に示す地盤強度の考え方は、解析で発生するひずみが、試験で実施しているひずみ（圧縮ひずみ 15%（せん断ひずみ 22.5%））以下であることを確認した上で適用するものである。解析で発生するひずみが試験で実施しているひずみを超える場合は、別途対応を検討する。

なお、設置変更許可申請書で示した基礎地盤の安定性評価（盛土・旧表土の残留強度を評価に使用）における二次元地震応答解析の発生せん断ひずみ γ は最大でも 3%程度以下であり、三軸圧縮試験のひずみレベルに対し十分に小さいことを確認している。

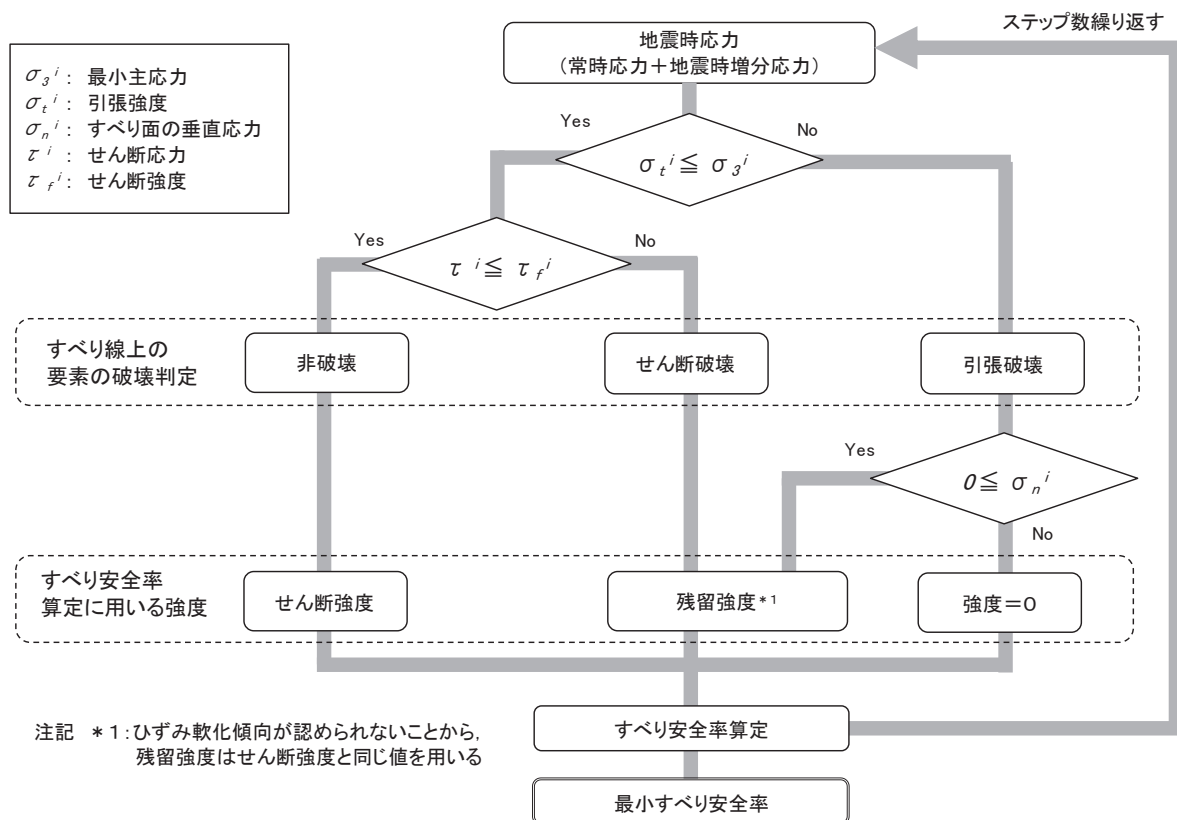


図 3-1 盛土・旧表土のすべり安全率の算定における地盤強度の考え方

(参考資料 19) 粘土分含有率について

1. 液状化検討対象層の抽出

基準地震動 S_s により液状化する可能性を否定できず、液状化評価を行う対象土質である液状化検討対象層として、道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（（社）日本道路協会，H14.3）（以下，「道路橋示方書V」という）では，以下の条件全てに該当する土層と定めている。

- ① 地下水位が G.L. -10m 以内であり，かつ G.L. -20m 以内の飽和土層
- ② 細粒分含有率が 35%以下，又は細粒分含有率が 35%を超えても塑性指数が 15 以下*¹の土層
- ③ 平均粒径が 10mm 以下で，かつ 10%粒径が 1mm 以下である土層

液状化検討対象層の抽出は，道路橋示方書Vで対象としている土層を基本とし，比較的浅部の地盤等を液状化検討対象層とするが，以下の場合も含め盛土及び旧表土を液状化検討対象層として抽出している。

- ・ G.L. -20m 以深の飽和土層
- ・ 細粒分含有率が 35%以上の飽和土層*²
- ・ 平均粒径が 10 mm以上の飽和土層

注記 *1：「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編（平成 24 年 9 月）」では「粘土分含有率 P_c が 15%以下」，「建築基礎構造設計指針 日本建築学会（2001 年）」では「粘土分（0.005mm 以下の粒径を持つ土粒子）含有率が 10%以下」との記載がある。

*2：粘土分含有率が 10%以上の土層を含む

2. 盛土及び旧表土の粘土分含有率

液状化検討対象層として，盛土及び旧表土を抽出しているが，「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編（平成 24 年 9 月）」及び「建築基礎構造設計指針 日本建築学会（2001 年）」において，液状化検討対象層の抽出の指標に粘土分含有率を採用していることを踏まえ，液状化強度試験の試料採取位置での粘土分含有率を確認した。

2.1 盛土の粘土分含有率

盛土の液状化強度試験の試料採取位置における粘土分含有率について図 1 に示す。

盛土の粘土分含有率は，平均が 8%程度で，いずれの試験値も 15%以下である。旧表土に比べばらつきは小さいが，これは，「参考資料 10」に示すとおり，盛土材料及び施工管理の観点から均一性を有するためと考えられる。

2.2 旧表土の粘土分含有率

旧表土の液状化強度試験の試料採取位置における粘土分含有率について図1に示す。

盛土の粘土分含有率は、平均が14%程度で、盛土に比べてばらつきも大きく、30%以上の試験も含まれる。

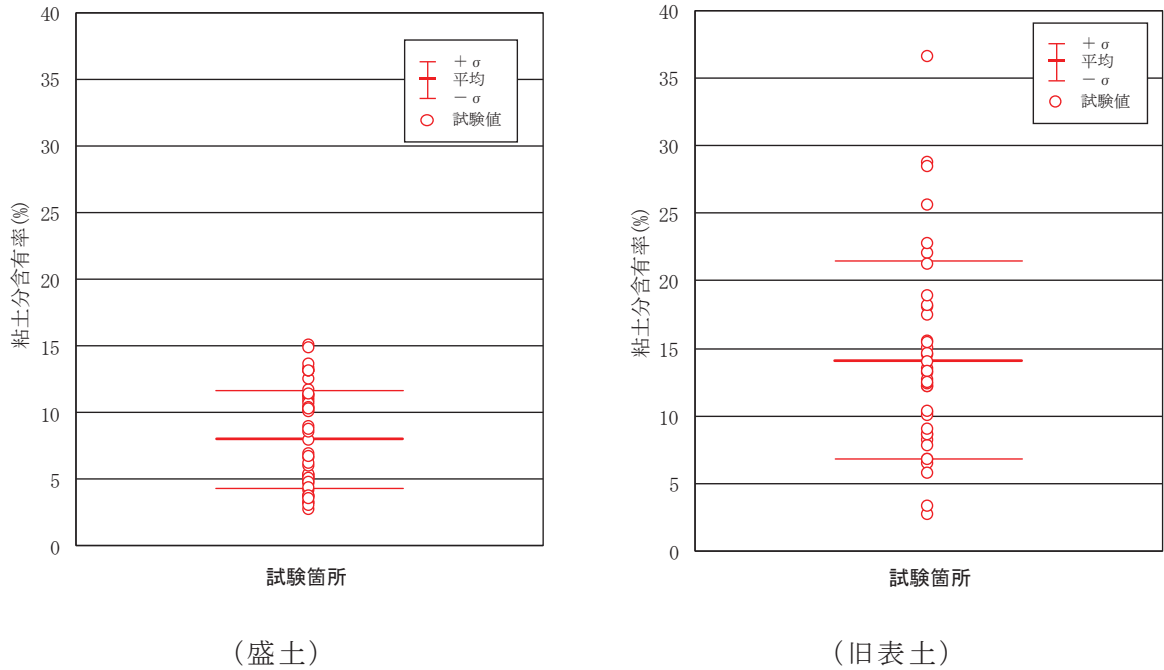


図1 液状化強度試験の試料採取位置における粘土分含有率

3. 粘土分含有率と液状化強度特性について

液状化強度試験の試料採取位置における粘土分含有率には、旧表土の粘土分含有率が30%を超える等、ばらつきが見られた。粘土分含有率が高いと液状化強度特性としては非保守的となる可能性もあることから、耐震評価における液状化強度特性としては、試験値の下限に設定することで保守性を確保することとしている。

(参考資料 20) 浸透流解析に用いた解析コード「GETFLOWS」の適用性について

1. 解析コードの概要

| | |
|---|--|
| 項目 \ コード名 | GETFLOWS |
| 使用目的 | 浸透流解析 |
| 開発機関 | (株) 地圏環境テクノロジー |
| 開発時期 | 2019 年 (初版開発時期 2000 年) |
| 使用したバージョン | Ver. 6.64.0.2 |
| コードの概要 | GETFLOWS (General purpose Terrestrial fluid FLOW Simulator) は、陸域における流体流動、物質及び熱輸送挙動を解析する 3 次元汎用数値シミュレータである。本シミュレータは、等温、非等温状態における多相多成分流体システムを対象とし、実験室スケールから流域スケールの 3 次元問題を安定かつ高速に解くことが可能である。適用事例は、一般的な地下水解析、河川流出解析、洪水・はん濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質を含む移流分散解析など多岐に渡る。 |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは積分型有限差分法を用いた 3 次元汎用数値シミュレータであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の解析に広く利用されていることを確認している。 ・水-空気 2 相流解析の標準的問題を例に、理論解と解析結果を比較し、よく一致していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 |

2. 解析手法について

2.1 一般事項

GETFLOWS は、様々な流体现象を評価するために非常に大規模な 3 次元非定常問題を高速で解析することを目的として開発されたものである。

2.2 解析コードの特徴

本シミュレーションシステムは、地表流動および地下水流動について、統一的な数学モデルの下で同時に扱うことを可能にし、対象とする水循環系をより自然に捉えることを可能にした解析コードである。

主な適用分野は、ダム建設計画や貯水・湧水量予測などの「水資源問題」、重金属、農薬等による土壌・地下水汚染や放射性廃棄物の地層処分などに代表される「水環境問題」、洪水予測、豪雨時における斜面崩壊、土石流被害予測などの「水災害問題」である。

2.2 数値解法

空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布を、三次元格子を用いてモデル化し、それぞれの格子体積および隣接格子間の絶対浸透率を正確に評価する。

三次元格子モデルの概念を図に示す。格子システムは大別して役割の異なる 3 つの層（大気層、地表層、地下地盤層）から構成される。各層の概要を以下に示す。

地表層格子では河川や斜面を流れる地表水、湖沼・海洋の停留水を表現する。層流状態の空気相の流動も同時に考慮される。地表水の移動は地表面格子層に沿う浅水流として扱い、質量保存式と拡散波近似を適用した運動量保存式により記述される。場所による地表水の移動し易さの相違は土地利用や被覆状態に応じた等価粗度係数として考慮され、個々の格子に与えられる。また、地表層の間隙率は通常 1.0 であり、毛細管圧力 0 であるが、地下浸透・湧出においては疑似毛管効果が計算され、浸透・湧出が整合的に表現される。

地下地盤層を構成する格子は、一般化ダルシー則に従った多相多成分流体流動を表現する。個々の格子には地層の水理物性（間隙率、絶対浸透率、毛細管圧力、相対浸透率）を与え、流体相圧力と飽和率、濃度が状態量（未知量）として解かれる。

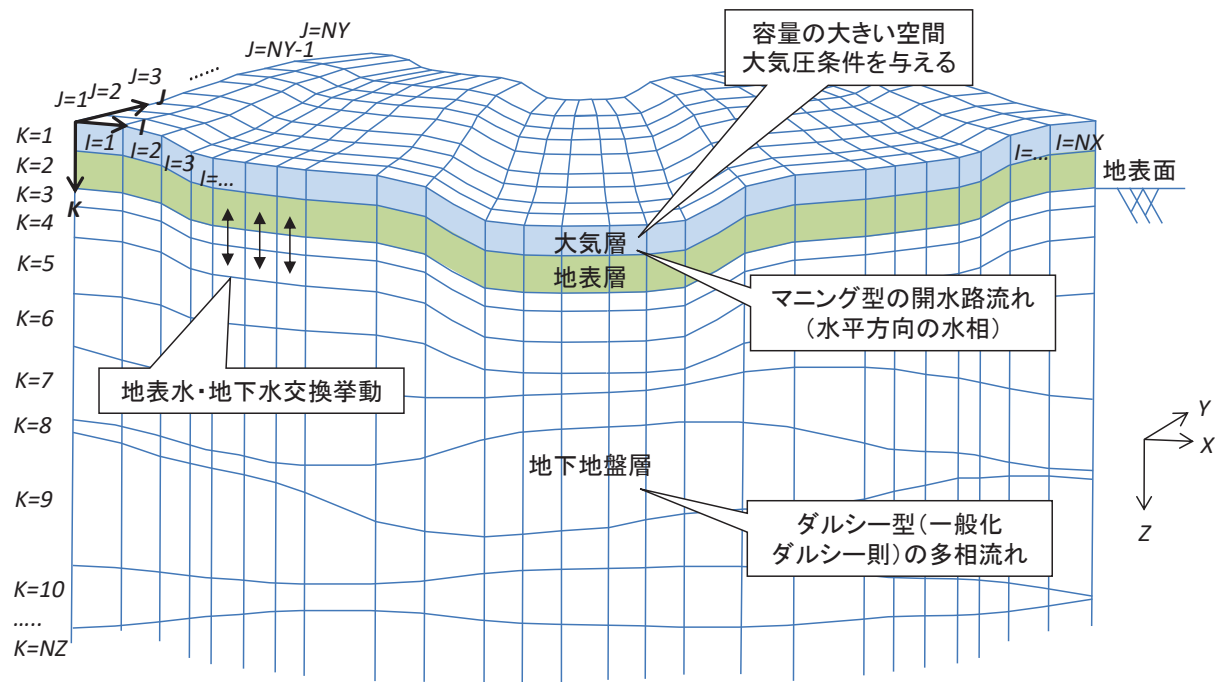


図 15-1 三次元格子モデルの概念

3. 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3. 1 検証 (Verification)

本解析コードの検証として、変水位試験における変水位の経時変化、揚水試験における被圧帯水層内圧力の経時変化、及び潮位変動問題における水位応答について解析を実施し、理論解と比較する。

3. 1. 1 室内変水位試験

(1) テストケース

断面積 A [m²]、長さ L [m]の試料の変水位試験系を対象とし、ある初期水頭差を与えた際の変水位の経時変化を求め、理論解と比較する。流出側は標準大気圧条件で定圧境界とする。

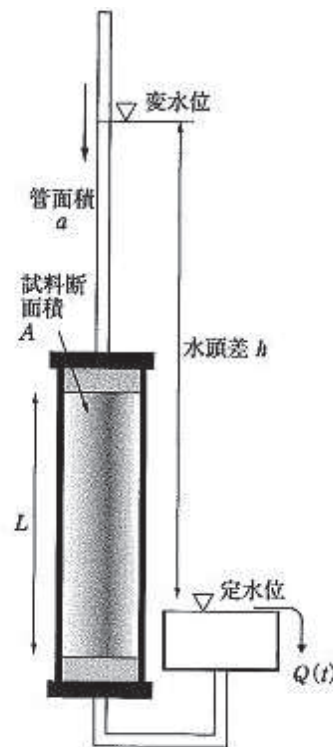


図 15-2 変水位試験系の概念図

変水位試験系の水頭差 h [m]の経時変化の理論解は次式によって与えられる。

$$\ln h = -\frac{kA}{aL}t + \ln h_0$$

ここで、 k は透水係数[m/s]、 A は試料断面積[m²]、 L はカラム長[m]、 a はカラム上部の管面積[m²]、 h_0 は初期水頭差[m]である。

(2) 解析モデル

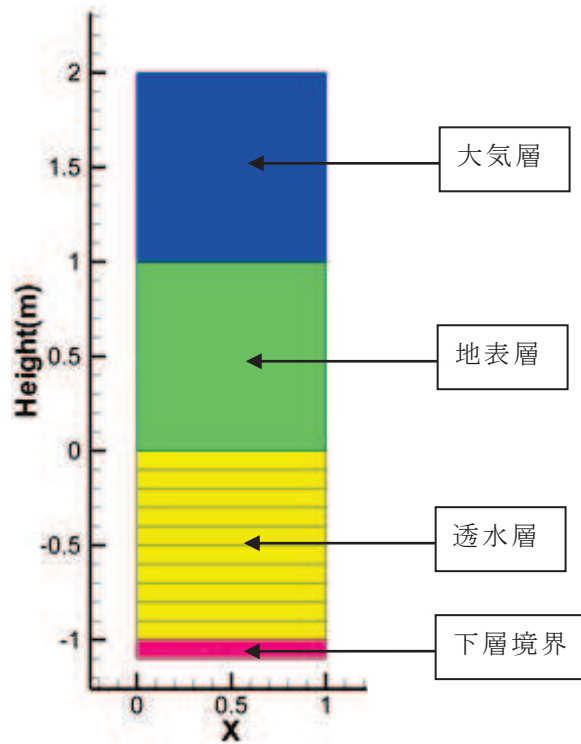


図 15-3 格子モデル図

表 15-1 格子モデルの諸元

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|---------|-------|---------------------|---------|
| 格子数 | NNBLK | [-] | 13 |
| X 方向分割数 | NX | [-] | 1 |
| Y 方向分割数 | NY | [-] | 1 |
| Z 方向分割数 | NZ | [-] | 13 |
| カラム長 | L | [m] | 1.05 |
| 試料断面積 | A | [m ²] | 1 |
| 管断面積 | a | [m ²] | 1 |
| 重力加速度 | g | [m/s ²] | 9.80665 |

(3) 解析条件

表 15-2 流体物性

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|--------|----------|----------------------|------------------------|
| 水相密度 | ρ_w | [kg/m ³] | 998.2 |
| 水相圧縮率 | C_f | [1/Pa] | 0 |
| 水相粘性係数 | μ | [Pa・s] | 1.002×10^{-3} |

表 15-3 地層物性

| | 記号 | 単位 | 大気層 | 地表層 | 透水層 | 下層境界 |
|-------|--------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 密度 | ρ | [kg/m ³] | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| 間隙率 | ϕ | [-] | 1.0×10^{30} | 1.0 | 0.3 | 1.0×10^{30} |
| 絶対浸透率 | K | [m ²] | 9.87×10^{34} | 9.87×10^{34} | 1.00×10^{-12} | 1.00×10^{-12} |
| 圧縮率 | C_r | [1/Pa] | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 15-4 ケース設定

| | 記号 | 単位 | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|-------|-------|-----|--------|--------|--------|
| 初期水頭差 | h_0 | [m] | 2.05 | 11.05 | 1.15 |

(4) 結果

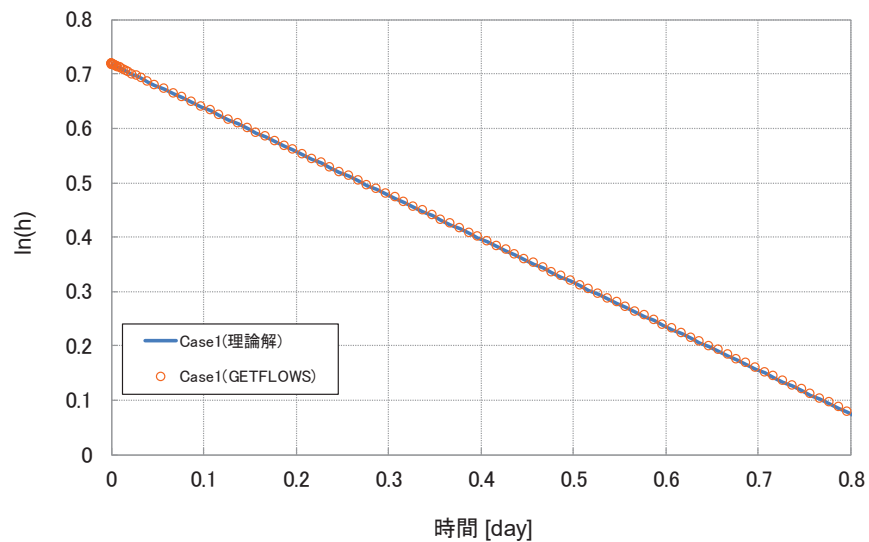


図 15-4 解析結果と理論解の比較 (Case 1)

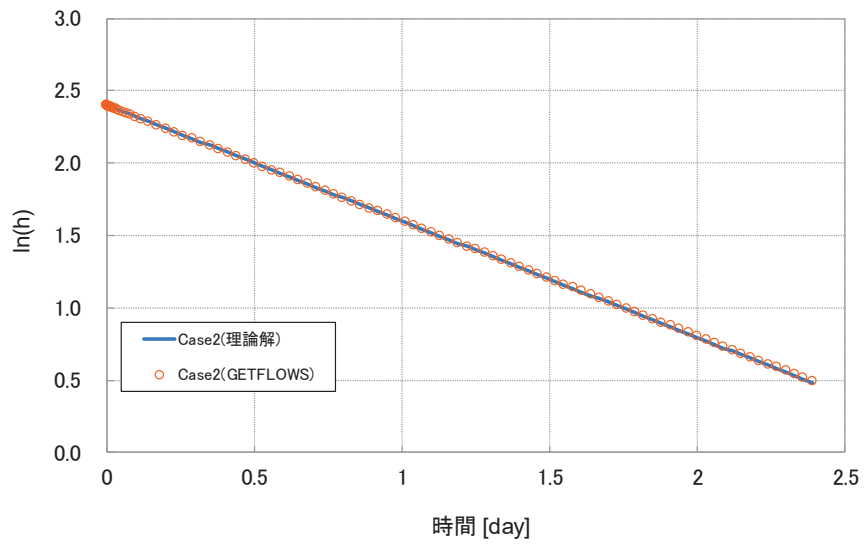


図 15-5 解析結果と理論解の比較 (Case 2)

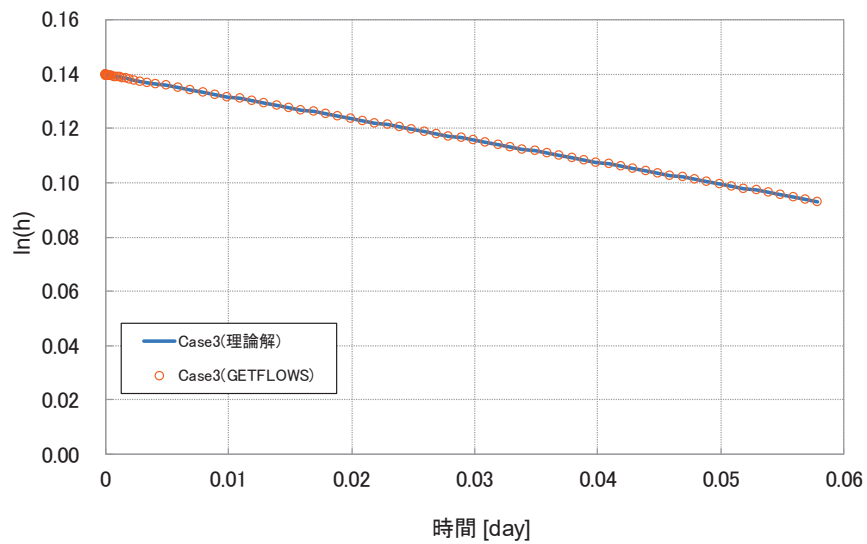


図 15-6 解析結果と理論解の比較 (Case 3)

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE (平均二乗平方根誤差) で行った。データ数を N , 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の数値解を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2}$$

表 15-5 各ケースにおける誤差

| | 初期水頭差 [m] | 比較点数 | 比較期間 [day] | 水位の RMSE [m] |
|--------|-----------|------|------------|------------------------|
| Case 1 | 2.05 | 100 | 0.8 | 8.690×10^{-4} |
| Case 2 | 11.05 | | 2.25 | 2.438×10^{-2} |
| Case 3 | 1.15 | | 0.058 | 1.691×10^{-5} |

3. 1. 2 揚水試験

(1) テストケース

飽和した厚さ H [m] の一様な被圧帯水層を想定し、一定流量 Q [m³/s] で揚水した際の定常及び非定常状態の圧力 P [Pa] を求め、数値解と比較する。定常状態での圧力場の理論解は水の圧縮性を考慮していないため、計算でも条件を合わせた。一方、非定常水位の理論解では流体圧縮性が考慮されているので、計算もそれに準じた。

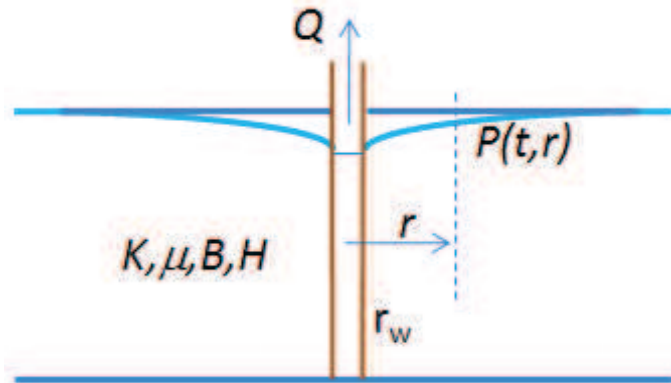


図 15-7 水平被圧帯水層からの揚水概念図

一定流量で揚水しているときの、定常状態での揚水井からの距離と圧力との関係は次式で与えられる。

$$P = P_0 - \frac{Q\mu}{2\pi KH} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r}\right)$$

ここで、 P_0 は影響半径 r_e [m] における圧力 [Pa]、 Q は揚水量 [m³/s]、 μ は粘性係数 [Pa・s]、 K は絶対浸透率 [m²]、 H は地層厚さ [m]、 r は坑井中心からの距離 [m] である。

一方、非定常状態における、任意の時間における任意の地点での圧力の理論解は次式で表される。

$$P_i - P(t, r) = \frac{QB\mu}{2\pi KH} \left(\frac{1}{2} \ln t + \frac{1}{2} \ln \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.40454 \right)$$

ここで、 P_i は初期圧力 [Pa]、 B は容積係数 [-]、 t は時間 [s]、 ϕ は間隙率 [-]、 C_t は合算圧縮率 [1/Pa]、 r_w は坑井半径 [m] である。

(2) 解析モデル

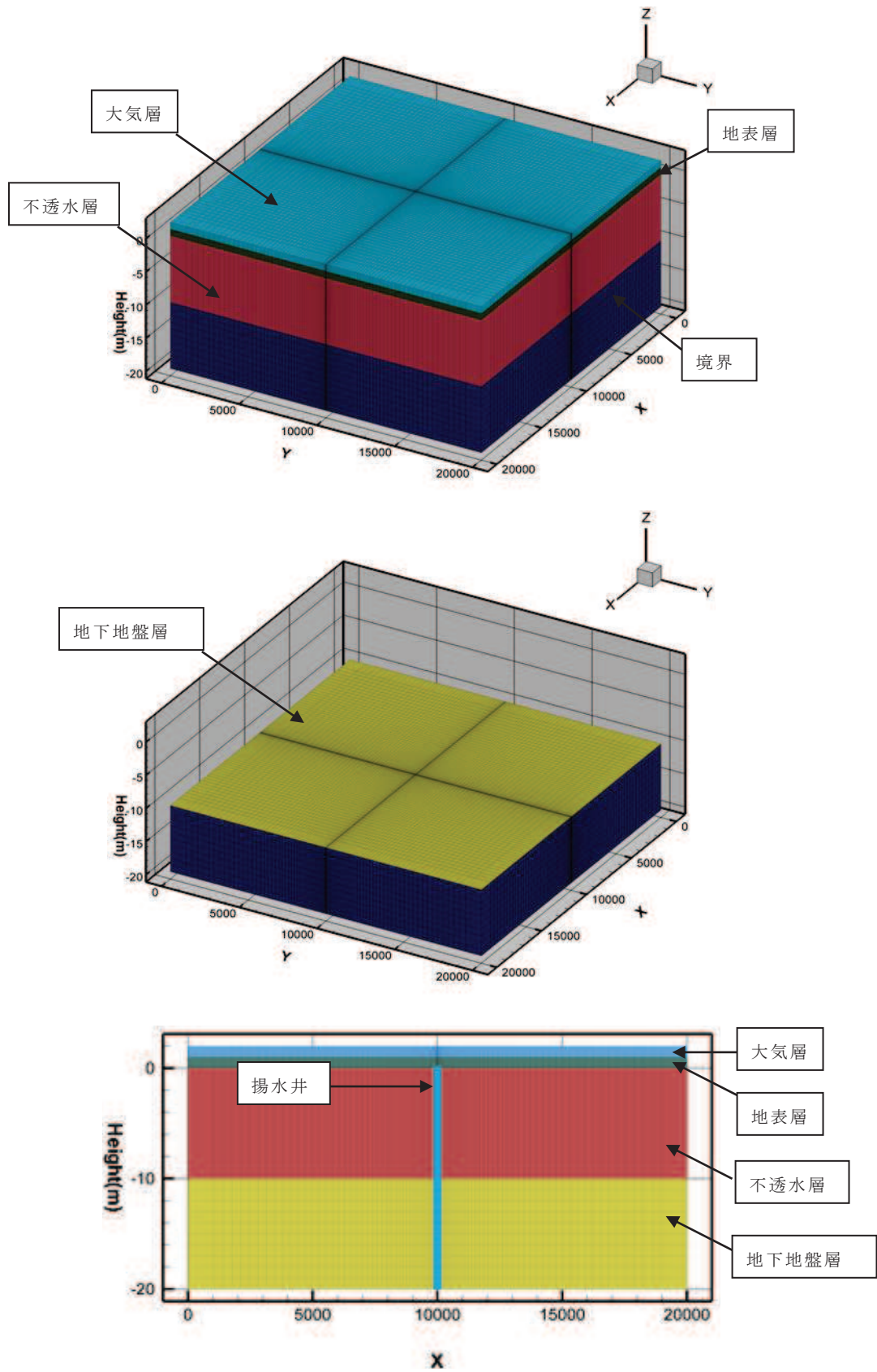


図 15-8 格子モデル図
(参考) 20-10

表 15-6 格子モデルの諸元

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|---------|-------|---------------------|------------------------|
| 格子数 | NNBLK | [-] | 132613 |
| X 方向分割数 | NX | [-] | 101 |
| Y 方向分割数 | NY | [-] | 101 |
| Z 方向分割数 | NZ | [-] | 13 |
| 重力加速度 | g | [m/s ²] | 9.80665 |
| 層の厚さ | H | [m] | 10 |
| 揚水量 | Q | [m ³ /s] | 1.736×10 ⁻⁴ |
| 坑井半径 | r_w | [m] | 0.01 |
| 影響半径 | r_c | [m] | 10000 |
| 初期圧力 | P_i | [MPa] | 0.106372 |
| 影響半径圧力 | P_0 | [MPa] | 0.106372 |

(3) 解析条件

表 15-7 流体物性

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|--------|----------|----------------------|------------------------|
| 水相密度 | ρ_w | [kg/m ³] | 998.2 |
| 水相圧縮率 | C_f | [1/Pa] | 4.59×10 ⁻¹⁰ |
| 水相粘性係数 | μ | [Pa · s] | 1.002×10 ⁻³ |

表 15-8 地層物性

| | 記号 | 単位 | 大気層 | 地表層 | 地下地盤層 | 不透水層 | 境界 |
|-----|-----------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 密度 | ρ | [kg/m ³] | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| 間隙率 | φ | [-] | 1.0×10 ³⁰ | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 1.0×10 ³⁰ |
| 浸透率 | K | [m ²] | 9.87×10 ⁻⁶ | 9.87×10 ⁻⁶ | 1.0×10 ⁻¹² | 0 | 1.0×10 ⁻¹² |
| 圧縮率 | Cr | [1/Pa] | 1.02×10 ⁻¹⁰ | 1.02×10 ⁻¹⁰ | 1.02×10 ⁻¹⁰ | 1.02×10 ⁻¹⁰ | 1.02×10 ⁻¹⁰ |

(4) 結果

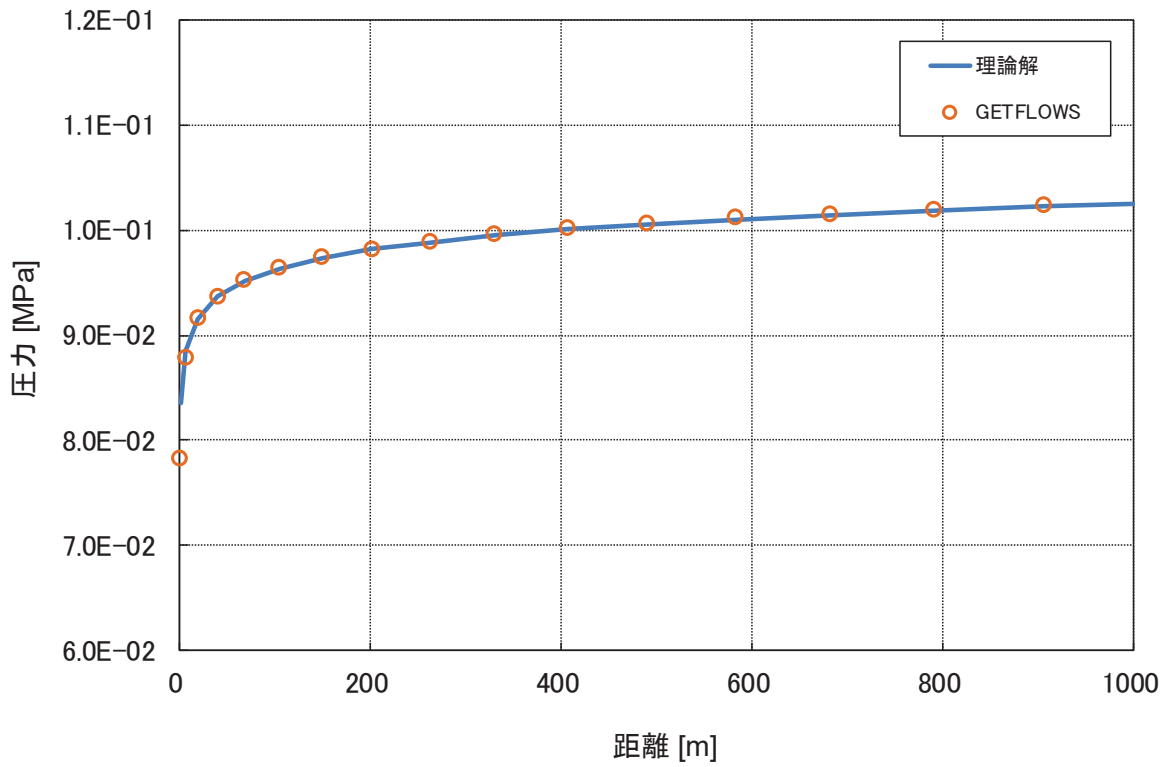


図 15-9 非定常解析における解析結果と理論解の比較
(20.5 日後の揚水井からの距離と圧力)

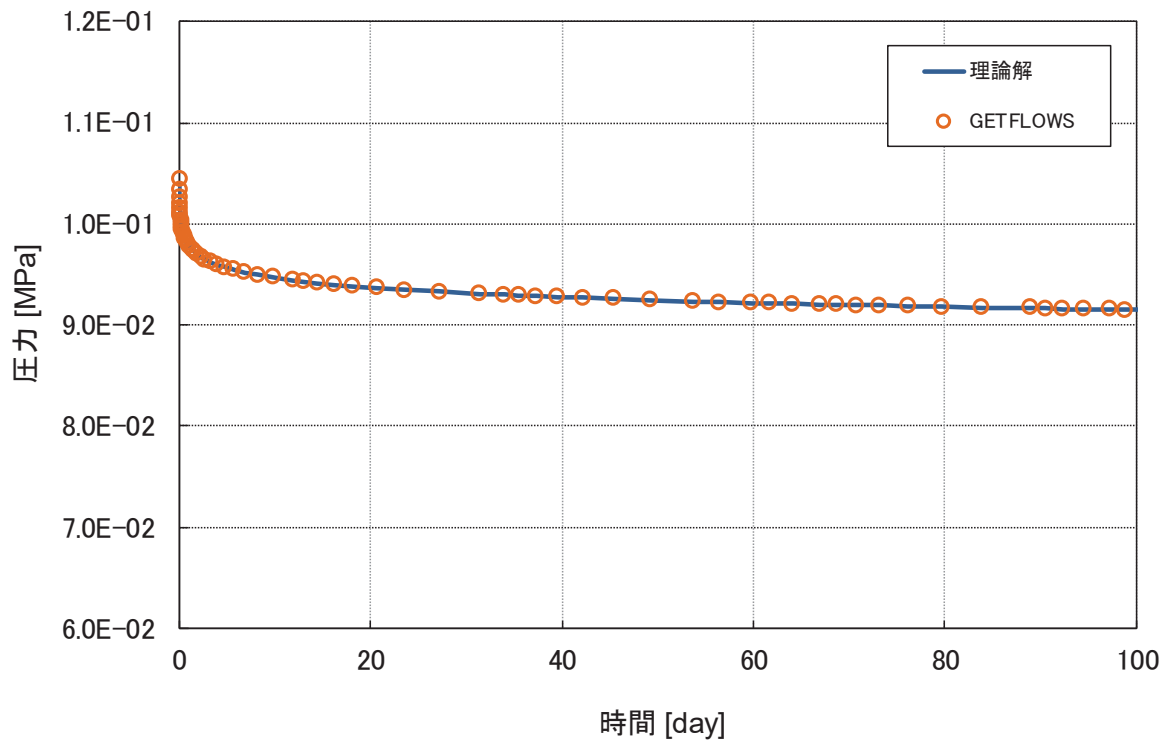


図 15-10 非定常解析における解析結果と理論解の比較
(39.6 m 地点での圧力経時変化)
(参考) 20-12

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE (平均二乗平方根誤差) で行った。データ数を N , 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の数値解を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2}$$

表 15-9 20.5 日後の揚水井からの距離と圧力での誤差

| 時間 [day] | 距離 [m] | 比較点数 | RMSE [MPa] |
|----------|--------|------|------------------------|
| 20.5 | 0~1000 | 16 | 3.121×10^{-4} |

表 15-10 39.6 m 地点での圧力経時変化での誤差

| 時間 [day] | 距離 [m] | 比較点数 | RMSE [MPa] |
|----------|--------|------|------------------------|
| 0~100 | 39.6 | 64 | 9.697×10^{-5} |

3. 1. 3 地下水面の応答問題

(1) テストケース

周期的に変動する水面（潮汐運動を行う海域など）に隣接する被圧帯水層の水位応答を求め、理論解と比較する。水面変動に対する被圧帯水層内の地下水面応答の理論解は以下の式で表される。

$$\zeta_i(t, x) = a \cdot \exp(-mx) \cos(\sigma t - mx) + h$$

$$\sigma = 2\pi/T$$

$$m = \sqrt{\sigma S / (2kb)}$$

$$S = \rho_w g \phi b (C_f + C_r)$$

ここで、 a は潮位振幅[m]、 x は海岸部からの距離[m]、 t は時間[s]、 T は周期[s]、 S は貯留係数[-]、 k は透水係数[m/s]、 b は被圧帯水層厚[m]、 ϕ は有効間隙率[-]、 h は平均海水位[m]、 ρ_w は液相密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 C_f は液相圧縮率[1/Pa]、 C_r は地層圧縮率 [1/Pa]である。

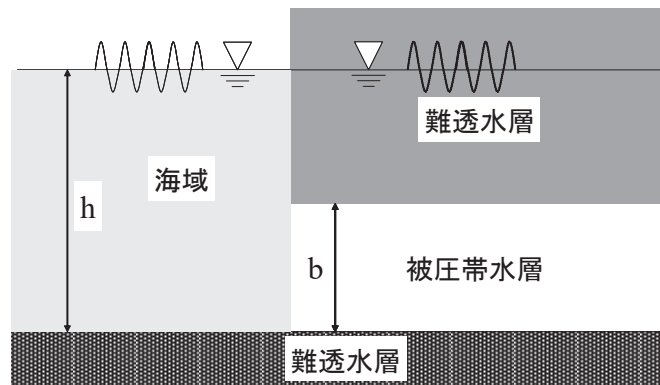


図 15-11 潮位変動に伴う地下水面応答の概念

(2) 解析モデル

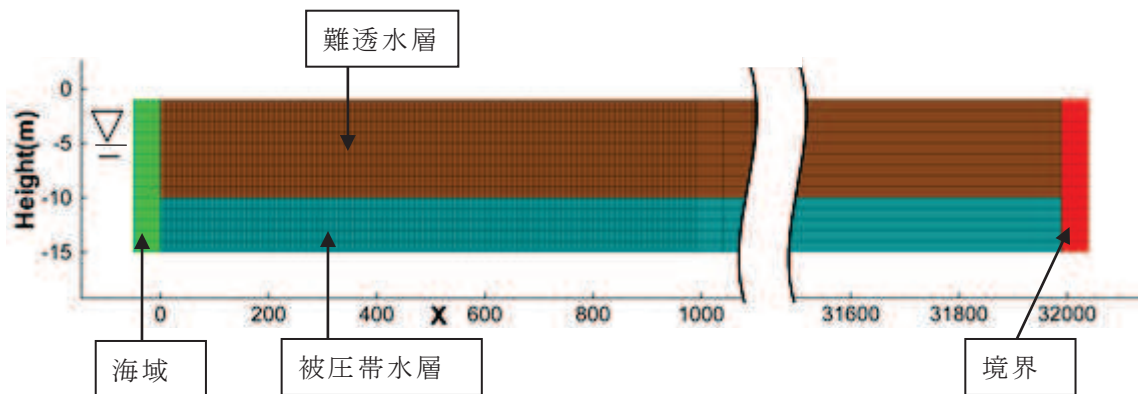


図 15-12 格子モデル図

表 15-11 格子モデルの諸元

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|---------|-------|-----|------|
| 格子数 | NNBLK | [-] | 3417 |
| X 方向分割数 | NX | [-] | 201 |
| Y 方向分割数 | NY | [-] | 1 |
| Z 方向分割数 | NZ | [-] | 17 |

(3) 解析条件

表 15-12 流体物性

| | 記号 | 単位 | 設定値 |
|--------|----------|----------------------|------------------------|
| 水相密度 | ρ_w | [kg/m ³] | 1000 |
| 水相圧縮率 | C_f | [1/Pa] | 4.59×10^{-10} |
| 水相粘性係数 | μ | [Pa·s] | 1.002×10^{-3} |

表 15-13 地層物性

| | 記号 | 単位 | 難透水層 | 被圧帯水層 | 境界 | 海域 |
|-----|--------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 密度 | ρ | [kg/m ³] | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| 間隙率 | ϕ | [-] | 0.2 | 0.2 | 1.0×10^{30} | 1.0×10^{30} |
| 浸透率 | K | [m ²] | 0 | 1.0×10^{-12} | 9.87×10^{34} | 9.87×10^{34} |
| 圧縮率 | C_r | [1/Pa] | 1.02×10^{-10} | 1.02×10^{-10} | 1.02×10^{-10} | 1.02×10^{-10} |

表 15-14 潮位變動条件

| | 記号 | 单位 | 設定値 |
|--------|-------|-----|-------|
| 初期水位 | h_0 | [m] | -5 |
| 潮位振幅 | a | [m] | 1 |
| 周期 | T | [s] | 86400 |
| 被压帯水層厚 | b | [m] | 5 |
| 平均海水位 | h | [m] | -5 |

(4) 結果

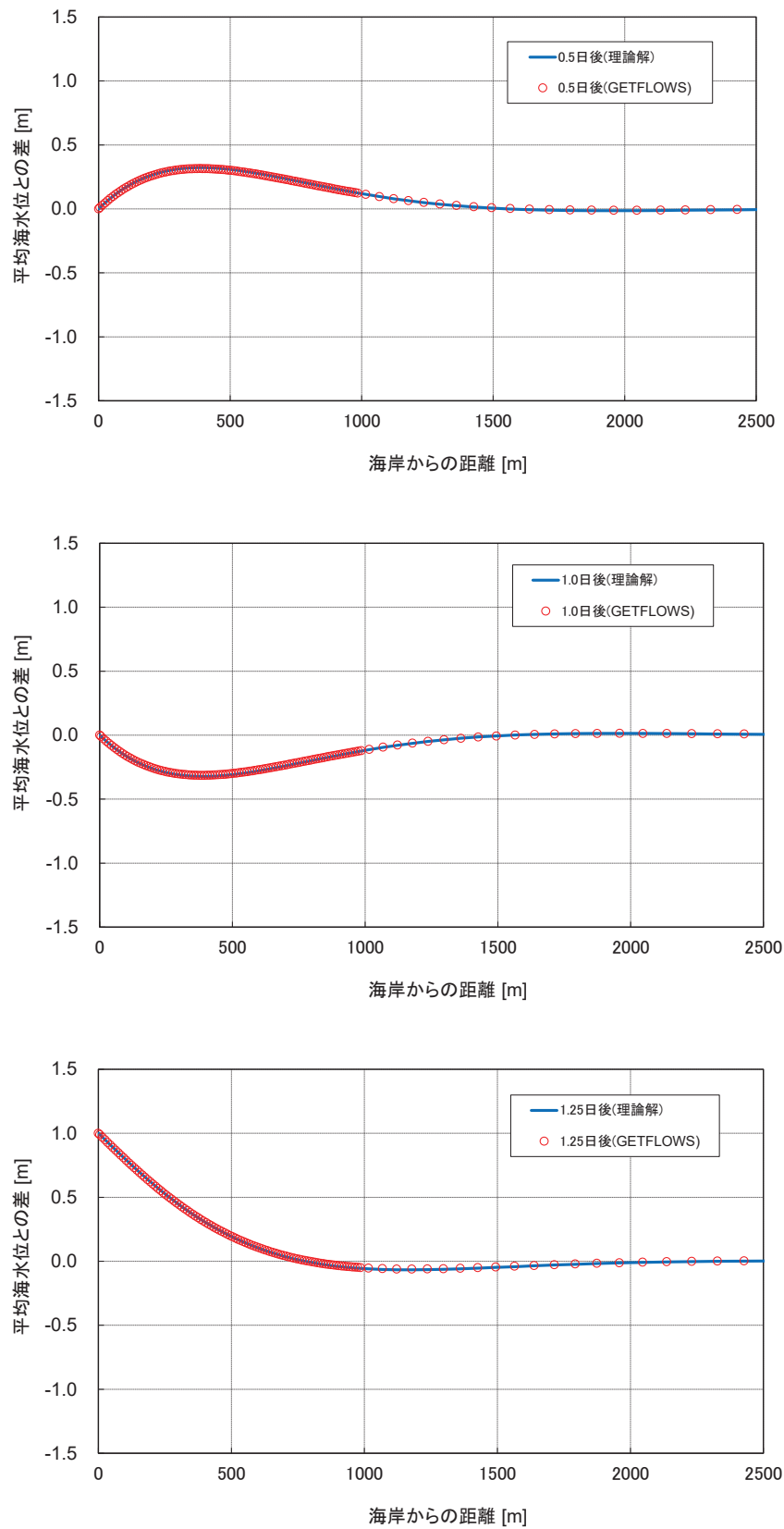


図 15-13 海岸からの距離と水位の関係による解析結果と理論解との比較

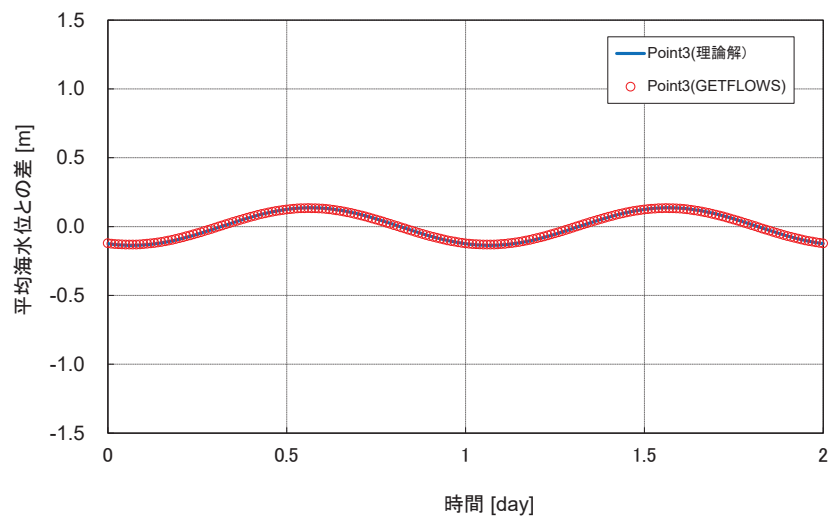
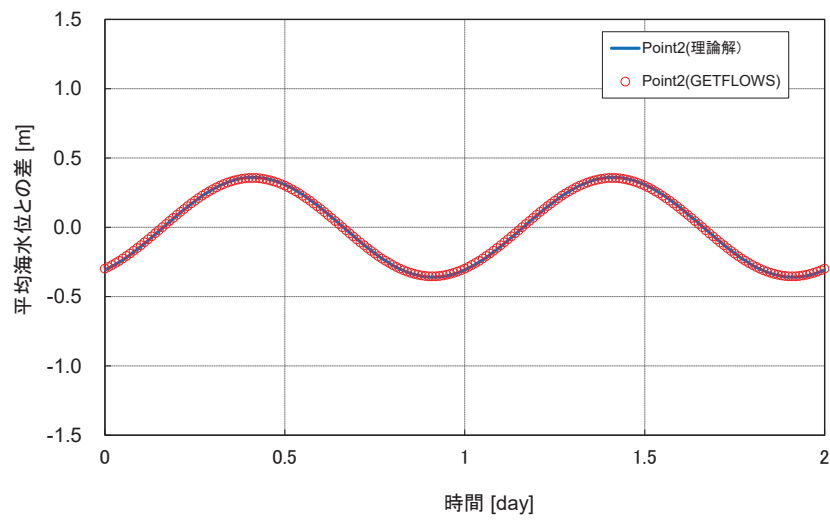
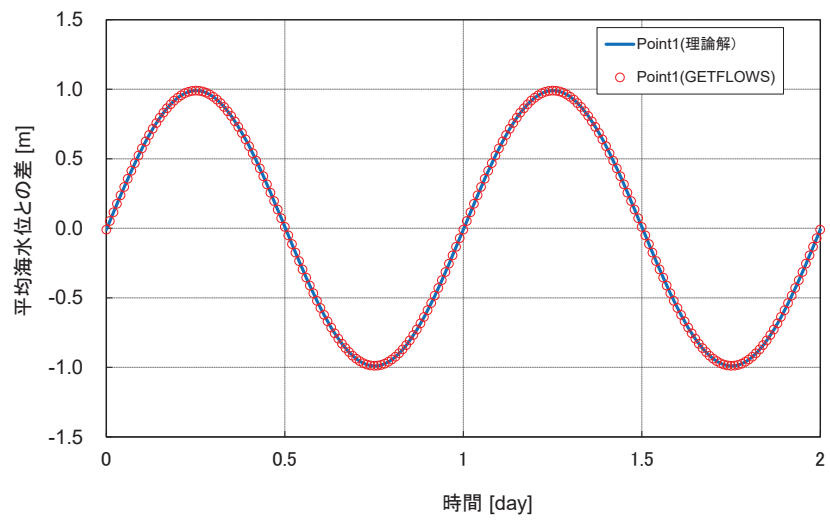


図 15-14 任意地点の水位応答による解析結果と理論解との比較

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE (平均二乗平方根誤差) で行った。データ数を N , 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の数値解を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2}$$

表 15-15 海岸からの距離と水位の関係による誤差

| 経過日数 [day] | 比較区間 [m] | 比較点数 | RMSE [m] |
|------------|----------|------|------------------------|
| 0.5 | 0~2500 | 120 | 4.582×10^{-4} |
| 1 | 0~2500 | | 5.162×10^{-4} |
| 1.25 | 0~2500 | | 3.516×10^{-4} |
| 1.75 | 0~2500 | | 2.547×10^{-4} |

表 15-16 任意地点の水位応答による誤差

| 地点 | 比較区間 [day] | 比較点数 | RMSE [m] |
|---------|------------|------|------------------------|
| Point 1 | 0~2 | 201 | 1.193×10^{-4} |
| Point 2 | 0~2 | | 5.709×10^{-3} |
| Point 3 | 0~2 | | 4.378×10^{-3} |

3. 2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

3. 3 評価結果

3. 1 及び 3. 2 より、本解析コードを用いることは妥当である。

4. 参考文献

登坂博行著, 2007, 地圏水循環の数理 (東京大学出版会, p.142 pp.218-226)

土木学会, 1999, 水理公式集 (pp.350-351.)

(参考資料 2 1) 液状化強度試験の解析上の再現について

1. 概要

有効応力解析の信頼性を確認するため、解析コード FLIP 上で液状化強度試験の結果を適切に表現できていることを確認する。ここでは、敷地全体に広く分布する盛土の液状化強度試験結果について繰返し軟化を再現できていることを確認する。