

本資料のうち、枠囲みの内容は
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-340-8 改 39
提出年月日	平成 30 年 8 月 21 日

工事計画に係る補足説明資料
耐震性に関する説明書のうち
補足-340-8

【屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について】

【収録内容】

3. 屋外二重管の耐震安全性評価(屋外二重管本体の耐震安全性評価)

平成 30 年 8 月
日本原子力発電株式会社

改定履歴

改定	改定日 (提出年月日)	改定内容
改0	H30.2.5	補足-348 改0として提出 ・1.1章, 1.4.1章, 1.4.4~1.4.7章を提出
改1	H30.2.15	補足-348 改1として提出 ・1.5章を新規作成し, 改0に追加
改2	H30.2.19	補足-348 改2として提出 ・改1のうち, 1.1章, 1.4.4~1.4.7章を修正
改0	H30.3.7	資料番号を修正 補足-340-8 改0 ・「1.4. 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方」のうち, 1.4.3章, 1.4.8~1.4.10章, 1.4.12章を新規作成し, 追加
改1	H30.3.26	・P.3~5に補足説明資料と添付書類との関連を記載 ・1.4.1章, 1.4.4章~1.4.7章を修正 ・4章を新規作成し, 追加
改2	H30.4.6	・1.4.2章, 1.4.11章, 1.4.17章を新規作成し, 追加 ・4章を修正 ・12章を新規作成し, 追加
改3	H30.4.9	・1.3章, 2章を新規作成し, 追加 ・4.4章を修正
改4	H30.4.9	・1.2章, 8章, 11章を新規作成し, 追加
改5	H30.4.12	・10章を新規作成し, 追加
改6	H30.4.13	・1.4.13章, 1.4.14章, 1.4.15章, 1.4.16章, 1.4.18章を新規作成し, 追加 ・1.5章, 1.6章を新規作成し, 追加 ・5章, 6章, 7章, 9章, 14章, 16章, 17章を新規作成し, 追加
改7	H30.4.23	・10章, 11章, 17章を修正 ・3章, 13章, 15章, 18章を新規作成し, 追加
改8	H30.4.27	・既提出分を一式取り纏めて, 再提出
改9	H30.5.2	・改6のうち, 1.6章及び5章を改定 ・改3のうち, 4章を改訂
改10	H30.5.14	・1.7章, 1.8章を新規作成し, 追加
改11	H30.5.23	・改0のうち, 1.4.10章を改定 ・改7のうち, 10章を改定 ・改9のうち, 1.6章を改定
改12	H30.5.28	・改3のうち, 1.4.2章を改定 ・改3のうち, 2章を改定
改13	H30.5.31	・改0のうち, 1.4.3章を改定
改14	H30.6.6	・1.9章を新規作成し, 追加 ・1.10章を新規作成し, 追加 ・改7のうち, 3章を改定
改15	H30.6.7	・改7のうち, 17章, 18章を改定 ・改14のうち, 3章を改定
改16	H30.6.12	・改14のうち, 1.10章を改定
改17	H30.6.18	・改13のうち, 1.4.3章を改定 ・改3のうち, 1.4.11章を改定

改定	改定日 (提出年月日)	改定内容
改 18	H30. 6. 20	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 1. 4. 13 章及び 1. 4. 15 章を改定 ・改 7 のうち, 13 章及び 14 章を改定
改 19	H30. 6. 25	<ul style="list-style-type: none"> ・改 7 のうち, 11 章を改定 ・改 15 のうち, 3 章を改定
改 20	H30. 6. 28	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 1. 5 章を改定 ・改 14 のうち, 1. 9 章を改定 ・改 19 のうち, 11 章を改定
改 21	H30. 7. 5	<ul style="list-style-type: none"> ・改 9 のうち, 4 章及び 5 章を改定
改 22	H30. 7. 5	<ul style="list-style-type: none"> ・改 12 のうち, 2 章を改定 ・改 20 のうち, 1. 9 章を改定
改 23	H30. 7. 6	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 7 章を改定
改 24	H30. 7. 9	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 14 章及び 16 章を改定 ・改 11 のうち, 10 章を改定 ・改 15 のうち, 17 章及び 18 章を改定 ・改 18 のうち, 13 章及び 15 章を改定 ・改 19 のうち, 3 章を改定 ・改 20 のうち, 11 章を改定
改 25	H30. 7. 9	<ul style="list-style-type: none"> ・改 4 のうち, 8 章を改定
改 26	H30. 7. 26	<ul style="list-style-type: none"> ・改 10 のうち, 1. 7 章を改定 ・改 11 のうち, 1. 6 章を改定
改 27	H30. 8. 1	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 9 章を改定
改 28	H30. 8. 2	<ul style="list-style-type: none"> ・改 11 のうち, 1. 4. 10 章を改定 ・改 22 のうち, 1. 9 章を改定
改 29	H30. 8. 6	<ul style="list-style-type: none"> ・改 21 のうち, 4 章及び 5 章を改定 ・改 23 のうち, 7 章を改定
改 30	H30. 8. 6	<ul style="list-style-type: none"> ・改 24 のうち, 16 章を改定
改 31	H30. 8. 13	<ul style="list-style-type: none"> ・「1. 11 屋外重要土木構造物の耐震評価における追加検討ケースの選定について」新規作成し, 追加 ・改 24 のうち, 10 章及び 14 章を改定
改 32	H30. 8. 13	<ul style="list-style-type: none"> ・改 6 のうち, 6 章を改定
改 33	H30. 8. 14	<ul style="list-style-type: none"> ・改 18 のうち, 15 章を改定 ・改 24 のうち, 13 章を改定
改 34	H30. 8. 16	<ul style="list-style-type: none"> ・改 24 のうち, 18 章を改定 ・改 25 のうち, 8 章を改定
改 35	H30. 8. 17	<ul style="list-style-type: none"> ・改 3 のうち, 12 章を改定 ・改 22 のうち, 2 章を改定
改 36	H30. 8. 20	<ul style="list-style-type: none"> ・改 24 のうち, 17 章を改定
改 37	H30. 8. 21	<ul style="list-style-type: none"> ・改 24 のうち, 3 章を改定 ・改 30 のうち, 16 章を改定

改定	改定日 (提出年月日)	改定内容
改 38	H30.8.21	<ul style="list-style-type: none">・改 24 のうち, 11 章を改定・改 27 のうち, 9 章を改定
改 39	H30.8.21	<ul style="list-style-type: none">・3 章のうち, 「屋外二重管本体の耐震安全性評価」を新規作成し, 追加

目次

[]内は、当該箇所を提出（最新）したときの改訂を示す。

1. 共通事項
 - 1.1 対象設備[改 7 H30. 4. 23]
 - 1.2 屋外重要土木構造物の要求性能と要求性能に対する耐震評価内容[改 4 H30. 4. 9]
 - 1.3 安全係数[改 3 H30. 4. 9]
 - 1.4 屋外重要土木構造部の耐震評価における断面選定の考え方
 - 1.4.1 方針[改 3 H30. 4. 9]
 - 1.4.2 取水構造物の断面選定の考え方[改 12 H30. 5. 28]
 - 1.4.3 屋外二重管の断面選定の考え方[改 17 H30. 6. 18]
 - 1.4.4 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の断面選定の考え方[改 1 H30. 3. 26]
 - 1.4.5 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の断面選定の考え方[改 1 H30. 3. 26]
 - 1.4.6 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の断面選定の考え方[改 1 H30. 3. 26]
 - 1.4.7 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の断面選定の考え方[改 1 H30. 3. 26]
 - 1.4.8 代替淡水貯槽の断面選定の考え方[改 0 H30. 3. 8]
 - 1.4.9 常設低圧代替注水系ポンプ室の断面選定の考え方[改 0 H30. 3. 8]
 - 1.4.10 常設低圧代替注水系配管カルバートの断面選定の考え方[改 28 H30. 8. 2]
 - 1.4.11 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの断面選定の考え方[改 17 H30. 6. 18]
 - 1.4.12 緊急用海水ポンプピットの断面選定の考え方[改 0 H30. 3. 8]
 - 1.4.13 緊急用海水取水管の断面選定の考え方[改 18 H30. 6. 20]
 - 1.4.14 S A用海水ピットの断面選定の考え方[改 6 H30. 4. 16]
 - 1.4.15 海水引込み管の断面選定の考え方[改 18 H30. 6. 20]
 - 1.4.16 S A用海水ピット取水塔の断面選定の考え方[改 6 H30. 4. 16]
 - 1.4.17 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の断面選定の考え方[改 3 H30. 4. 9]
 - 1.4.18 可搬型設備用軽油タンク基礎の断面選定の考え方[改 6 H30. 4. 16]
 - 1.5 地盤物性のばらつきの考慮方法[改 20 H30. 6. 28]
 - 1.6 許容応力度法における許容限界について[改 26 H30. 7. 26]
 - 1.7 ジョイント要素のばね設定について[改 26 H30. 7. 26]
 - 1.8 有効応力解析モデルへの入力地震動の算定方法について[改 10 H30. 5. 14]
 - 1.9 地震応答解析における構造物の減衰定数について[改 28 H30. 8. 2]
 - 1.10 屋外重要土木構造物の地震応答解析結果及び耐震評価結果の記載方針について[改 16 H30. 6. 15]
 - 1.11 屋外重要土木構造物の耐震評価における追加検討ケースの選定について[改 31 H30. 8. 13]
2. 取水構造物の耐震安全性評価[改 35 H30. 8. 17]
3. 屋外二重管の耐震安全性評価 [改 37 H30. 8. 21(屋外二重管基礎)]
[改 39 H30. 8. 21(屋外二重管本体)]
4. 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震安全性評価[改 29 H30. 8. 6]
5. 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震安全性評価[改 29 H30. 8. 6]

6. 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震安全性評価[改 32 H30. 8. 13]
7. 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震安全性評価[改 29 H30. 8. 6]
8. 代替淡水貯槽の耐震安全性評価[改 34 H30. 8. 16]
9. 常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震安全性評価[改 38 H30. 8. 21]
10. 常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震安全性評価[改 31 H30. 8. 13]
11. 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震安全性評価[改 38 H30. 8. 21]
12. 緊急用海水ポンプピットの耐震安全性評価[改 35 H30. 8. 17]
13. 緊急用海水取水管の耐震安全性評価[改 33 H30. 8. 14]
14. S A用海水ピットの耐震安全性評価[改 31 H30. 8. 13]
15. 海水引込み管の耐震安全性評価[改 33 H30. 8. 14]
16. S A用海水ピット取水塔の耐震安全性評価[改 37 H30. 8. 21]
17. 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震安全性評価[改 36 H30. 8. 20]
18. 可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震安全性評価[改 34 H30. 8. 16]

本補足説明資料は、耐震性に関する説明書のうち屋外重要土木構造物の耐震安全性評価についての内容を補足するものである。本補足説明資料と添付書類との関連を以下に示す。

補足説明資料と添付書類との関連

工事計画に係る補足説明資料 耐震性に関する説明書のうち 補足-340-8 【屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について】		該当添付書類	
1. 共通事項	1.1 対象設備	共通事項	
	1.2 屋外重要土木構造物の要求性能と要求性能に対する耐震評価内容	共通事項	
	1.3 安全係数	共通事項	
	1.4 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方	1.4.1 方針	共通事項
		1.4.2 取水構造物の断面選定の考え方	V-2-2-6 取水構造物の耐震性についての計算書
		1.4.3 屋外二重管	V-2-2-8 屋外二重管の耐震性についての計算書
		1.4.4 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備	V-2-2-23-1 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書
		1.4.5 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）	V-2-2-23-3 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書
		1.4.6 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）	V-2-2-23-4 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書
		1.4.7 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）	V-2-2-23-2 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書
		1.4.8 代替淡水貯槽	V-2-2-29 代替淡水貯槽の耐震性についての計算書
		1.4.9 常設低圧代替注水系ポンプ室	V-2-2-27 常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書
		1.4.10 常設低圧代替注水系配管カルバート	V-2-2-31 常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書
		1.4.11 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバート	V-2-2-21 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書
		1.4.12 緊急用海水ポンプピット	V-2-2-35 緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書
		1.4.13 緊急用海水取水管	V-2-10-4-5 緊急用海水取水管の耐震性についての計算書
1.4.14 SA用海水ピット		V-2-2-33 SA用海水ピットの耐震性についての計算書	
1.4.15 海水引込み管		V-2-10-4-3 海水引込み管の耐震性についての計算書	
1.4.16 SA用海水ピット取水塔	V-2-10-4-2 SA用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書		

	1.4.17 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎	V-2-2-13 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書
	1.4.18 可搬型設備用軽油タンク基礎	V-2-2-25 可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書
	1.5 地盤物性・材料物性のばらつきの考慮方法	共通事項
	1.6 許容応力度法における許容限界について	共通事項
	1.7 ジョイント要素のばね設定について	共通事項
	1.8 有効応力解析モデルへの入力地震動の算定方法について	共通事項
	1.9 地震応答解析における構造物の減衰定数について	共通事項
	1.10 屋外重要土木構造物の地震応答解析結果及び耐震評価結果の記載方針について	共通事項
	1.11 屋外重要土木構造物の耐震評価における追加検討ケースの選定について	共通事項
2.	取水構造物の耐震安全性評価	V-2-2-6 取水構造物の地震応答計算書 V-2-2-7 取水構造物の耐震性についての計算書
3.	屋外二重管の耐震安全性評価	V-2-2-8 屋外二重管の地震応答計算書 V-2-2-9 屋外二重管の耐震性についての計算書
4.	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震安全性評価	V-2-2-22-1 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書 V-2-2-23-1 常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書
5.	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震安全性評価	V-2-2-22-3 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書 V-2-2-23-3 常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書
6.	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震安全性評価	V-2-2-22-4 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書 V-2-2-23-4 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書
7.	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震安全性評価	V-2-2-22-2 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書 V-2-2-23-2 常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書

8. 代替淡水貯槽の耐震安全性評価	V-2-2-28 代替淡水貯槽の地震応答計算書 V-2-2-29 代替淡水貯槽の耐震性についての計算書
9. 常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震安全性評価	V-2-2-26 常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書 V-2-2-27 常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書
10. 常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震安全性評価	V-2-2-30 常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答計算書 V-2-2-31 常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書
11. 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震安全性評価	V-2-2-20 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書 V-2-2-21 格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書
12. 緊急用海水ポンプピットの耐震安全性評価	V-2-2-34 緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書 V-2-2-35 緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書
13. 緊急用海水取水管の耐震安全性評価	V-2-10-4-5 緊急用海水取水管の耐震性についての計算書
14. SA用海水ピットの耐震安全性評価	V-2-2-32 SA用海水ピットの地震応答計算書 V-2-2-33 SA用海水ピットの耐震性についての計算書
15. 海水引込み管の耐震安全性評価	V-2-10-4-3 海水引込み管の耐震性についての計算書
16. SA用海水ピット取水塔の耐震安全性評価	V-2-10-4-2 SA用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書
17. 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震安全性評価	V-2-2-12 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書 V-2-2-13 緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書
18. 可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震安全性評価	V-2-2-24 可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書 V-2-2-25 可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書

目次

3. 屋外二重管本体の耐震安全性評価	2
3.6 評価方針	1
3.7 評価条件	2
3.7.1 適用規準	2
3.7.2 耐震安全性評価フロー	8
3.7.3 評価対象断面の方向	9
3.7.4 評価対象断面	11
3.7.5 使用材料及び材料定数	14
3.7.6 評価構造物諸元	14
3.7.7 荷重伝達	14
3.7.8 地震応答解析手法	15
3.7.9 解析モデルの設定	16
3.7.10 減衰特性	16
3.7.11 荷重の組合せ	17
3.7.12 地震応答解析の検討ケース	18
3.8 評価内容	19
3.8.1 許容限界の設定	19
3.8.2 評価方法	19
3.9 評価結果	28
3.9.1 地盤ひずみ	28
3.9.2 入力地盤変位	32
3.9.3 地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値	34
3.9.4 管軸方向の応力解析結果	35
3.9.5 管周方向の応力解析結果	38
3.9.6 管軸方向及び管周方向の応力評価	41
3.10 まとめ	42
1. 可とう管の耐震性について	1

1.1 概要	1
1.2 評価方針	1
1.3 評価条件	1
1.3.1 評価対象	1
1.3.2 可とう管部の伸縮量及び偏心量	3
1.3.3 可とう管の許容値	3
1.4 評価結果	4
1.4.1 伸縮量	4
1.4.2 偏心量	5
1.4.3 原子炉建屋側端部	6
1.4.4 まとめ	7
2. 杭基礎構造部に適用する地盤条件の妥当性について	1
2.1 概要	1
2.2 評価方針	1
2.3 評価条件	1
2.4 評価結果	1
2.5 まとめ	6

屋外二重管本体の耐震安全性評価

3.6 評価方針

残留熱除去海水系（以下、「RHRS」という。）配管及びディーゼル発電機海水系（以下、「DGSW」という。）配管を海水ポンプ室から原子炉建屋まで配置するための支持構造物である、屋外海水配管二重管（以下、「屋外二重管本体」という。）について、基準地震動 S_s による耐震安全性評価を実施する。

屋外二重管本体の耐震安全性評価では、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析を行い、地震応答解析により得られる地盤変位や応答加速度を用いた応力解析を実施し、屋外二重管本体に生じる応力が許容限界を下回ることを確認することで、地震時 RHRS 配管及び DGSW 配管に対する支持機能を維持できることを確認する。

3.7 評価条件

3.7.1 適用規準

表 3.7-1 に一般的な埋設鋼製管路の耐震設計に関する規格，基準類における耐震評価の概要を示す。

管径が比較的小さい一般的な埋設鋼製管路は，断面の外周長と比較して，管軸方向長が長いことから，周辺の地盤の変位に伴う管軸方向の発生応力または発生ひずみを中心に耐震評価を行う設計となっている。

また，管周方向（管軸方向に対して直交方向）についても考慮する基準においては，地震時における管路上の土被り等による鉛直荷重による管周方向の発生応力を管軸方向の発生応力と組合せた合成応力で評価する設計となっている。

当該サイトにおける屋外二重管本体は，管径が 2.0 m と一般的な埋設管路と同等であり，液状化対策として屋外二重管本体周辺の地盤改良も実施されるが，可とう管の設置スパンが比較的長く，管軸方向に長大な構造であることを考慮し，管軸方向の発生応力について考慮する。

基本的な耐震評価の流れについては，管軸方向と管周方向の発生応力の組合せを考慮した設計体系の規格，基準類のうち，既往の工事計画認可申請において実績のある「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，2007）」を参考とする。

また，管周方向については，上記基準における鉛直方向の地震力及び土圧に加え，水平方向の地震力についても保守的に考慮することとする。

許容限界については，表 3.7-1 において，塑性領域の許容限界として管体ひずみを採用している規格，基準類もあることから，鋼製管路は，優れた変形特性を有する材料であり，弾性領域を超えて塑性域に達しても，地盤の変形への追従性を失うことなく，支持機能を確保できるものと判断される。

しかし，屋外二重管本体の耐震評価では，耐震 S クラス設備としての間接支持構造物の重要性を鑑み，鋼材の短期許容応力度を許容限界とすることとし，「鋼構造設計基準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005 年度 9 月制定）」を参考とする。

表 6.2-2 に参考とする主な基準を示す。

表 3.7-1 (1) 埋設管路の耐震設計に関する規格、基準類の概要 (1)

規格, 基準 ^{*1}	対象設備 (一般的な管径 ^{*2})	要求性能 ^{*3}	許容限界 ^{*4}	備考
①石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示 (昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号)	送油導管 (~650 mm)	導管等の構造は、輸送される石油の重量、導管等の内圧、導管等およびその附属設備の自重、土圧、水圧、列車荷重、自動車荷重、浮力等の主荷重ならびに風荷重、雪荷重、温度変化の影響、振動の影響、波浪および潮流の影響、設置時に生ずる荷重の影響、他工事による影響等の従荷重によって生ずる応力に対して安全なもので行われなければならない。 ^{*5} 作用による損傷等が軽微な修復により施設の機能の回復に影響を及ぼさない。(修復性)	規格最小降伏点応力度の90% ^{*5}	わが国で初めて埋設管路に對する応答変位法の考え方を設計法として総合的に体系化した「石油パイプライン技術基準案」と同様の設計手法。管路のひずみを算定するたための波動の重畳方法等は、その後の地中構造物の耐震設計指針等で踏襲されている。
②港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会, 平成19年)	送油導管 (特に無し)	作用による損傷等が軽微な修復により施設の機能の回復に影響を及ぼさない。(修復性)	導管の降伏点応力度を構造解析係数で除したものと	基本的に①の考え方を踏襲している。
③水道施設耐震工法指針・解説1997版 (日本水道協会, 1997)	水輸送用埋設鋼管路 (特に無し)	人命に重大な影響を与えないこと。個々の施設に軽微な被害が生じてても、その機能保持が可能であること。	管体歪み 46 t/D 以下 (Dは管外径, tは管厚)	基本的に①の考え方を踏襲している。
④水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP029-2006 (日本水道鋼管協会, 平成18年)	水輸送用埋設鋼管路 (~3,000 mm)	変形は生じてても、通水機能を保持すること。	許容ひずみ値 46 t/D (Dは管外径, tは管厚)	基本的に①の考え方を踏襲している。
⑤高圧ガス導管耐震設計指針 JCA 指-206-13 (日本ガス協会, 2013)	ゲージ圧力 1MPa 以上の圧力ガスを輸送する埋設鋼管路 (~650 mm)	導管に変形は生じるが、漏洩は生じないこと。	許容ひずみは3%とする。	当該指針における地盤変位は、管軸方向に伝播する進行波(レイリー波)を仮定しており、管軸方向の検討に限定している。したがって、①で考慮している波動伝播の重畳は考慮していない。

注記 *1: 記載の規格、基準のうち、下線で示すものは、工事計画認可申請において実績があるもの。

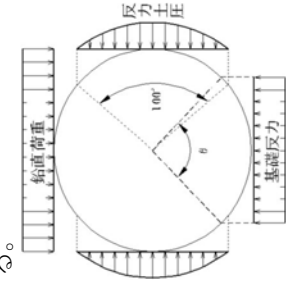
*2: 各規格、基準に於いて材料の規格として取り扱われている JIS 規格等の最大径を掲載したもので、適用範囲を限定するものではない。

*3: 要求性能は、施設の耐震レベル及び地震軸レベルが高いもの(レベル2地震動等)について記載。

*4: 許容限界については、鋼材の許容応力度(降伏点応力度)とするものと許容ひずみとするものがあるが、図 3.7-1 に示すとおり鋼材の許容応力度のひずみレベル(降伏ひずみ)は、鋼材の許容ひずみよりも小さい。したがって、許容限界を鋼材の許容応力度とした場合の方が保守的な評価を与える。なお、⑤の規格(降伏ひずみ)は、3%と、そのほかの規格・基準の許容ひずみよりもかなり大きい(約30倍)。

*5: 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令(昭和47年12月25日通商産業省・運輸省・建設省・自治省令第二号)を参照。

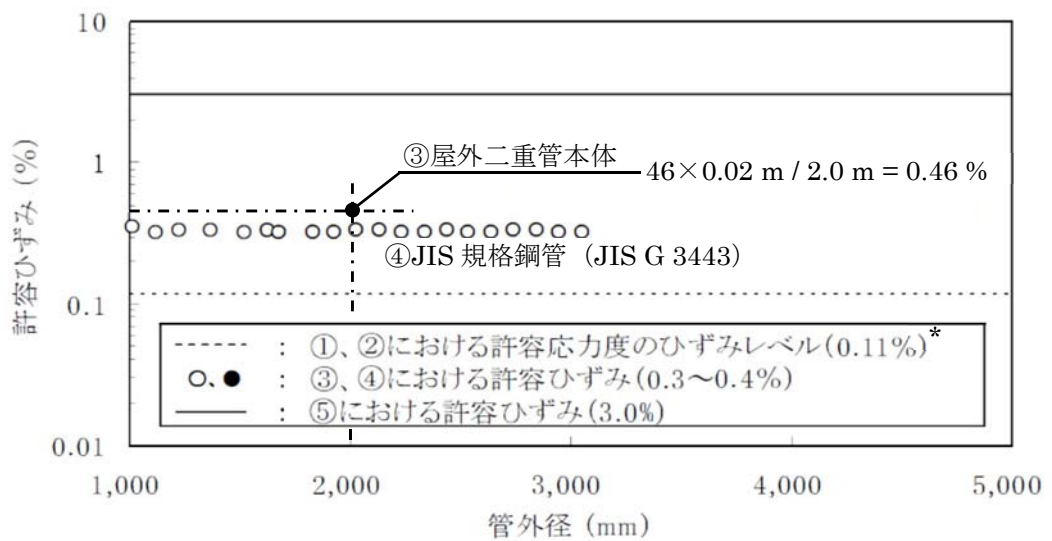
表 3.7-1 (2) 埋設管路の耐震設計に関する規格、基準類の概要 (2)

規格, 基準*1	耐震評価の概要			① と②の組合せ
	①管軸方向*2*3 軸方向応力 σ_L または 軸方向ひずみ ε_L	鉛直方向地震力	水平方向地震力	
①石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示 (昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号)	<ul style="list-style-type: none"> • 地盤変位を考慮した応答変位法 • 管路に生じる軸応力σ_Lと曲げ応力σ_Bを合成する。 $\sigma_L = \sqrt{3.12 \cdot \sigma_L^2 + \sigma_B^2}$	<ul style="list-style-type: none"> • 管路のたわみ性を考慮した土圧分布モデル (IOWA 公式) により求める。 	考慮しない	<ul style="list-style-type: none"> • ①管軸方向と②管周方向応力を組み合わせる。 $\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_c^2 + \sigma_L \times \sigma_c + 3 \times \tau_s^2}$ <p>ここで、 σ_c : 管周方向応力 τ_s : 管直方向のせん断応力</p>
②港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会, 平成19年)	<ul style="list-style-type: none"> • 地盤変位を考慮した応答変位法 • 管路に生じる軸応力σ_Lと曲げ応力σ_Bを合成する。 	考慮しない	考慮しない	
③水道施設耐震工法指針・解説 1997 版 (日本水道協会, 1997)	<ul style="list-style-type: none"> • 地盤変位を考慮した応答変位法 • 管路に生じる軸応力ε_Lと曲げひずみε_Bを合成する。 $\varepsilon_L = \sqrt{\alpha \cdot \varepsilon_L^2 + \varepsilon_B^2}$ <p>ただし, $\alpha = 1.00 \sim 3.12$</p>	考慮しない	考慮しない	
④水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP029-2006 (日本水道鋼管協会, 平成18年)	<ul style="list-style-type: none"> • 地盤変位を考慮した応答変位法 • 管路に生じる軸ひずみε_Lと曲げひずみε_Bを合成する。 $\varepsilon_L = \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_B^2}$	考慮しない	考慮しない	

注記 *1: 表 3.7-1 (1) で示した規格, 基準類のうち, 鋼管の許容ひずみが3%とかなり大きい⑤については, 除外した。

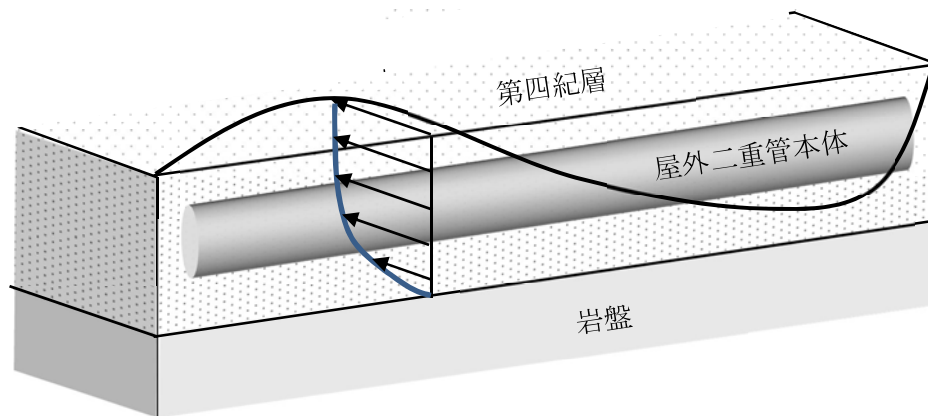
*2: 各規格・基準類では, 応答変位法に用いる地盤変位を定めるためのパラメータ (水平震度, 応答速度等) が地震動レベル毎に定められていることから, 地震応答解析や構造計算を伴わずに, 応力 (ひずみ) を算出可能。但し, 屋外二重管本体の耐震評価では, ①基準地震動 S_s を対象とすること②取
屋外二重管本体が屈曲していることを考慮して, 地震応答解析及び数値計算 (構造計算) を基に σ_L 及び σ_B を算出。

*3: 管軸方向及び管周方向の評価のイメージについては, 図 3.7-2 及び図 3.7-3 を参考。



注記* : ①, ②における許容応力度のひずみレベルは, 許容応力度 / ヤング係数で求めた

図 3.7-1 各規格, 基準類における許容ひずみの比較

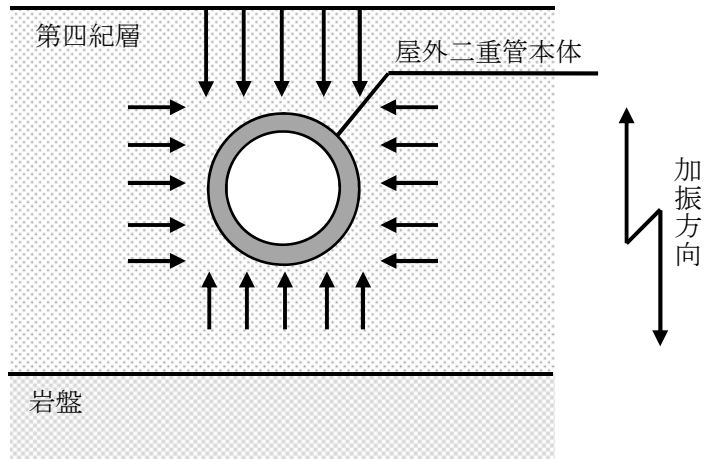


管軸方向については, 水平方向に見かけ上伝播する地震波 (進行方向に直交する方向に振動する進行波) による, 周辺地盤の変位を考慮する。

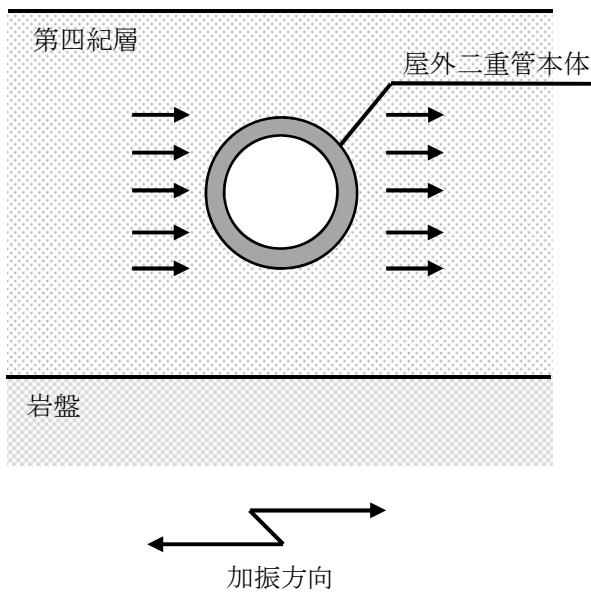
埋設された鋼製管路は, 地震時に周辺地盤の変形に追従することが, 多くの屋外, 室内模型実験や実構造物からの地震観測結果から確かめられている。したがって, 埋設された鋼製管路の耐震計算においては, 上図のような地震時の周辺地盤の変位に基づいた耐震設計として, 応答変位法が一般的に用いられる。

図 3.7-2 管軸方向の耐震評価イメージ

(鉛直方向地震力)



(水平方向地震力)



管周方向については埋設された鋼製管路上の土被り及び上載荷重により鋼製管路に作用する土圧を考慮する。

図 3.7-3 管周方向の耐震評価のイメージ

表 3.7-2 参考とする主な基準

項目	参考とする主な基準	備考
使用材料及び 材料定数	・鋼構造設計規準—許容応力 度設計法—（社）日本建築学 会，2005年9月制定）	—
荷重及び荷重の組合せ	・JEAG4601-1987 （（社）日本電気協会）	—
許容限界	・鋼構造設計規準—許容応力 度設計法—（社）日本建築学 会，2005年9月制定）	・鋼材の短期許容応力度とする
評価手法	・港湾の施設の技術上の基 準・同解説（日本港湾協会， 2007） ・WSP 029-2006 水道用埋設鋼 管路耐震設計基準（日本水道 鋼管協会，平成18年2月2日 改正）	・管軸方向と管周方向の発生応 力を組み合わせた耐震評価
地震応答解析	・JEAG4601-1987 （（社）日本電気協会）	・有限要素法による2次元モデ ルを用いた時刻歴非線形解析

3.7.2 耐震安全性評価フロー

図 3.7-4 に屋外二重管本体の地震応答計算及び耐震性能評価の評価フローを示す。

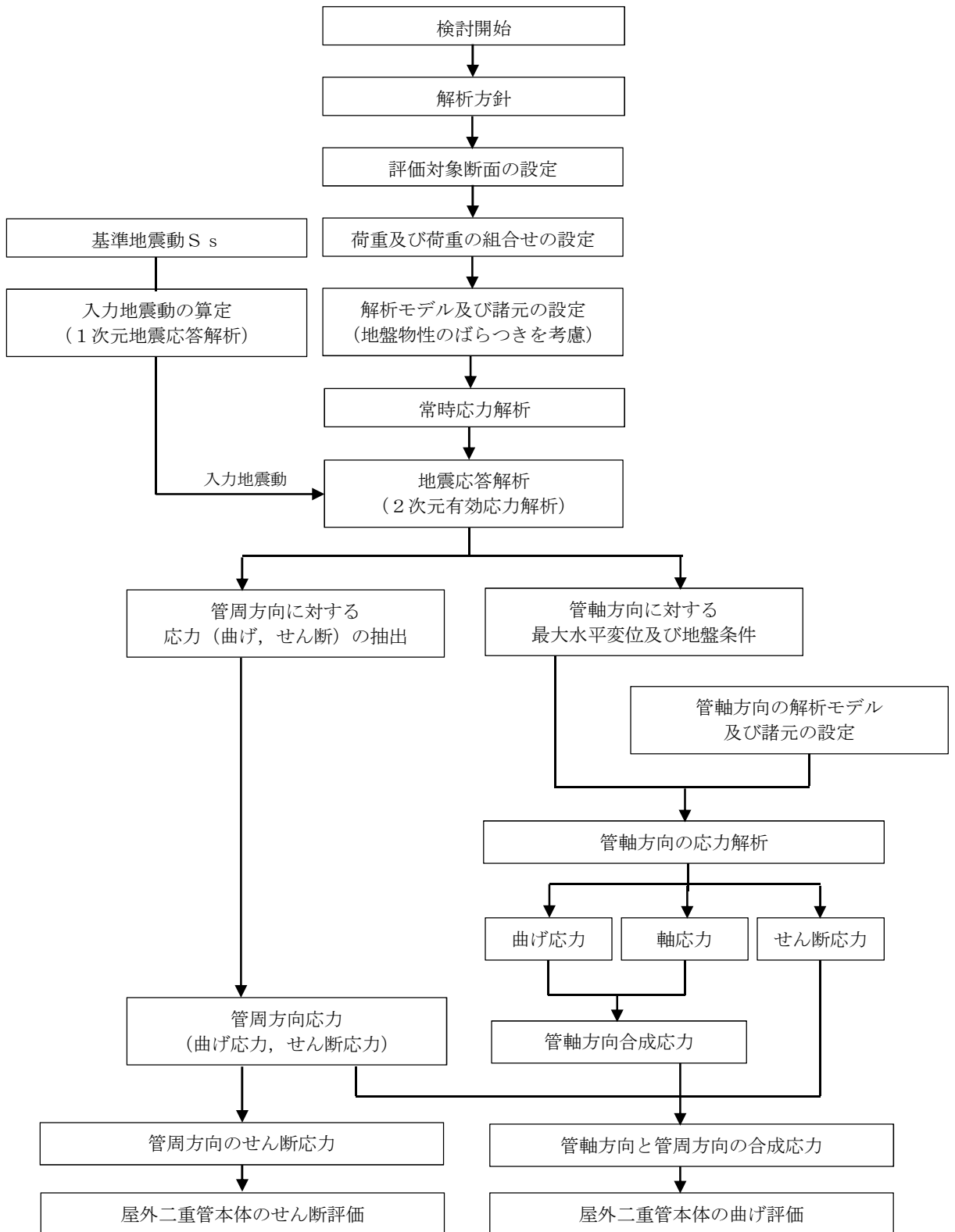


図 3.7-4 屋外二重管本体の地震応答計算及び耐震性能評価の評価フロー

3.7.3 評価対象断面の方向

屋外二重管本体の位置図を図 3.7-5 に示す。屋外二重管本体は内径 2.0 mφ, 1.8 mφ の 2 本の鋼製管であり、海水ポンプ室から原子炉建屋までを接続する延長約 215 m に渡り管中心距離約 3.5 m で平行に地中に直接埋設されている。それぞれの管の板厚は全体的には 20 mm あるが、東側道路下部及びペーラー室アクセス用道路下部の屋外二重管本体部分は上部の積載荷重を考慮し、板厚を 40 mm 及び 25 mm としている。屋外二重管本体は口径の異なる 2 本が配置されているが、ルートが同様であること、同一地盤変位的作用に対しては大口径管の方が応力的に厳しくなることより、評価は内径 2.0 mφ に着目して実施する。

屋外二重管本体は、排気筒付近に位置する可とう管から海水ポンプ室までの杭基礎構造部の区間と原子炉建屋から排気筒付近に位置する可とう管までの地盤改良体基礎構造部の区間に大別される。杭基礎構造部の区間は、水平方向の鋼製桁と鉛直方向の鋼管杭を結合したラーメン構造を介して、地盤改良体基礎構造部の区間は屋外二重管本体直下に造成した地盤改良体を介して、岩盤に支持される構造となっている。

屋外二重管本体の可とう管の設置スパンが比較的長く、管軸方向に長大な構造であること及び埋設される地盤の構造的連続性を考慮し、管軸方向の発生応力について考慮する。また、管軸方向の発生応力が耐震設計上有意であるが、保守性を考慮して管周方向の耐震評価を行うとともに、管軸方向の耐震評価においては管周方向に発生する応力と管軸方向に発生する応力を組み合わせた評価を行う。

屋外二重管本体が埋設される周辺地盤は鋼管杭の敷設及び地盤改良による液状化対策を実施するとともに、液状化の発生を想定して評価した結果の地盤変位を吸収するために、可とう管を設置する。なお、可とう管の耐震評価については、「参考 1 可とう管の耐震性について」に示す。

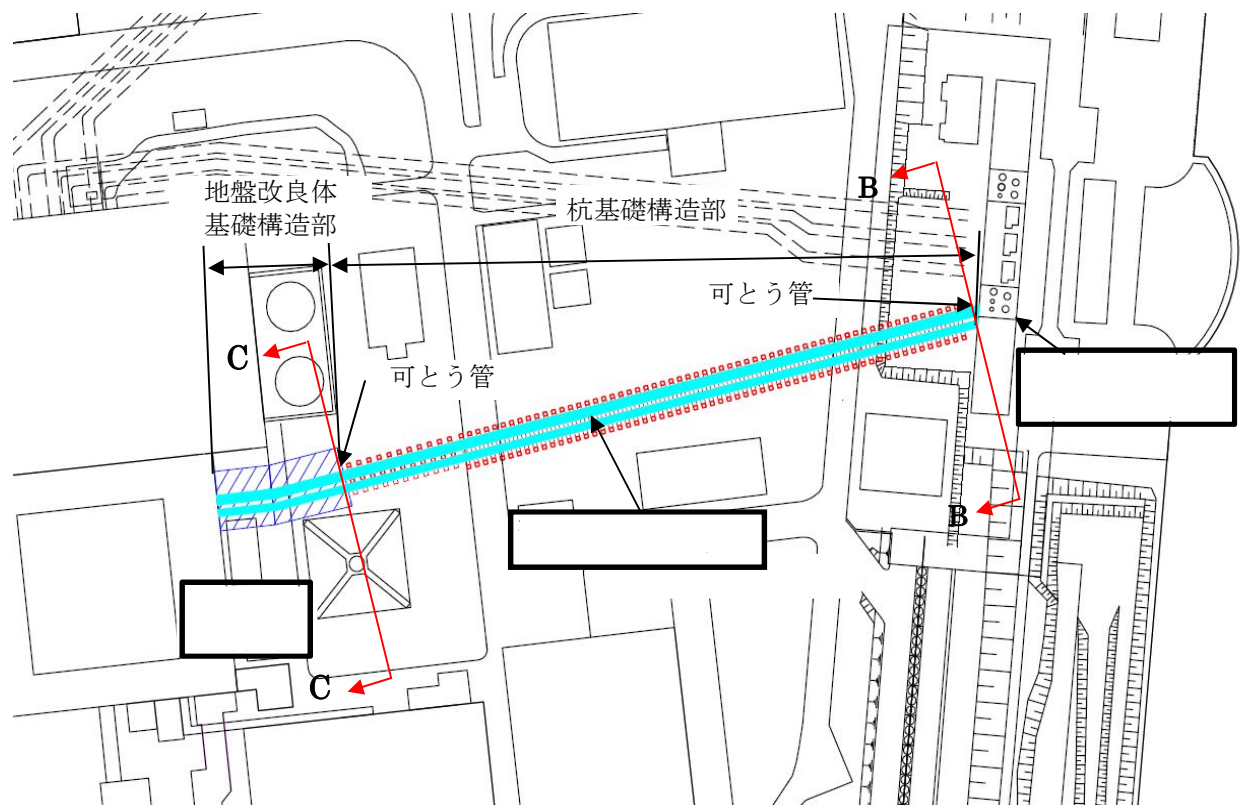


図 3.7-5 の位置図

3.7.4 評価対象断面

屋外二重管本体を支持する基礎構造部断面を図 3.7-6 に、基礎構造部縦断面図を図 3.7-7 に、評価対象断面図を図 3.7-8 に示す。

屋外二重管本体の耐震性評価に用いる評価対象断面は、「1.4.3 屋外二重管の断面選定の考え方」で記載したとおり、基礎構造部の構造的特徴や周辺の状況も考慮して、杭基礎構造部は図 3.7-8 に示す B-B 断面及び C-C 断面を、地盤改良体基礎構造部は C-C 断面を代表として基準地震動 S_s に対する耐震評価を実施する。

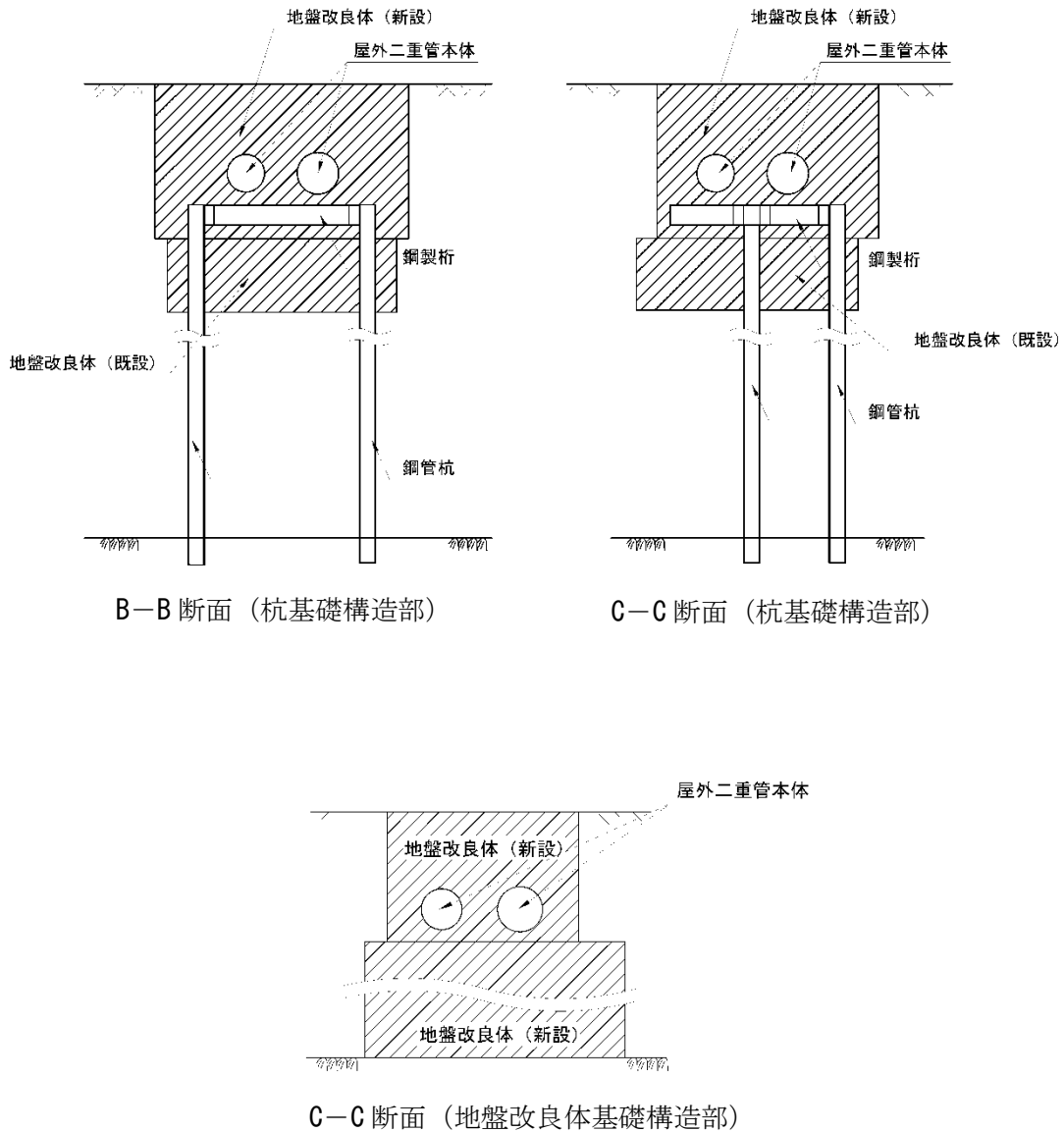


図 3.7-6 屋外二重管本体の基礎構造部断面図

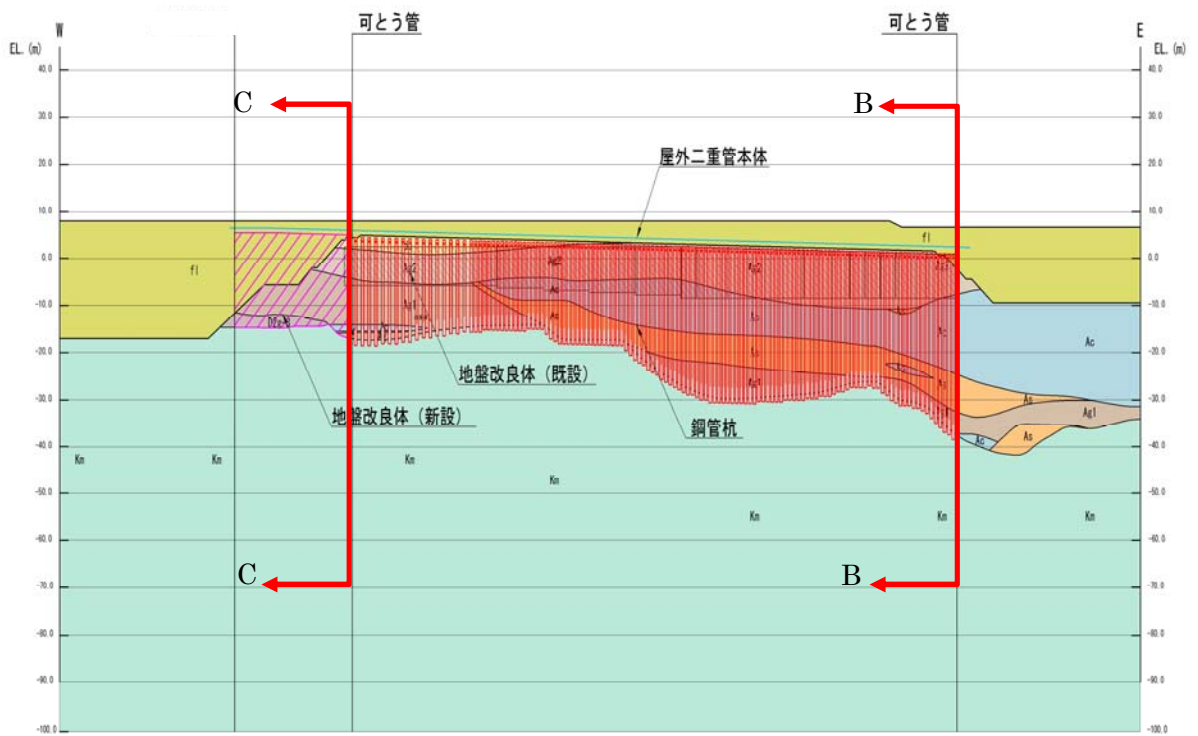


図 3.7-7 屋外二重管本体の基礎構造部縦断面図

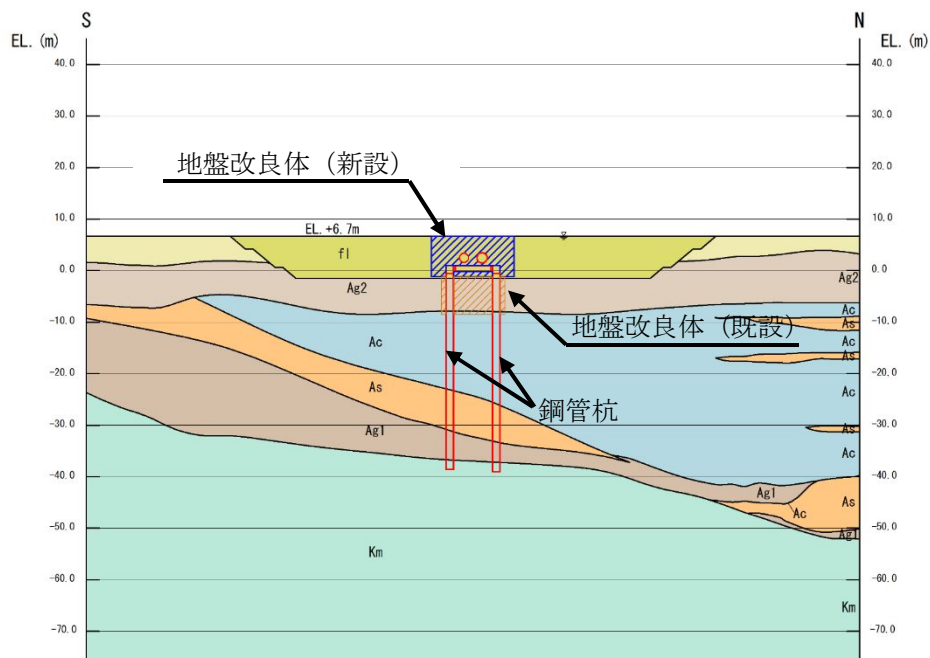


図 3.7-8 (1) 屋外二重管本体の評価対象断面図
(B-B 断面・杭基礎構造部)

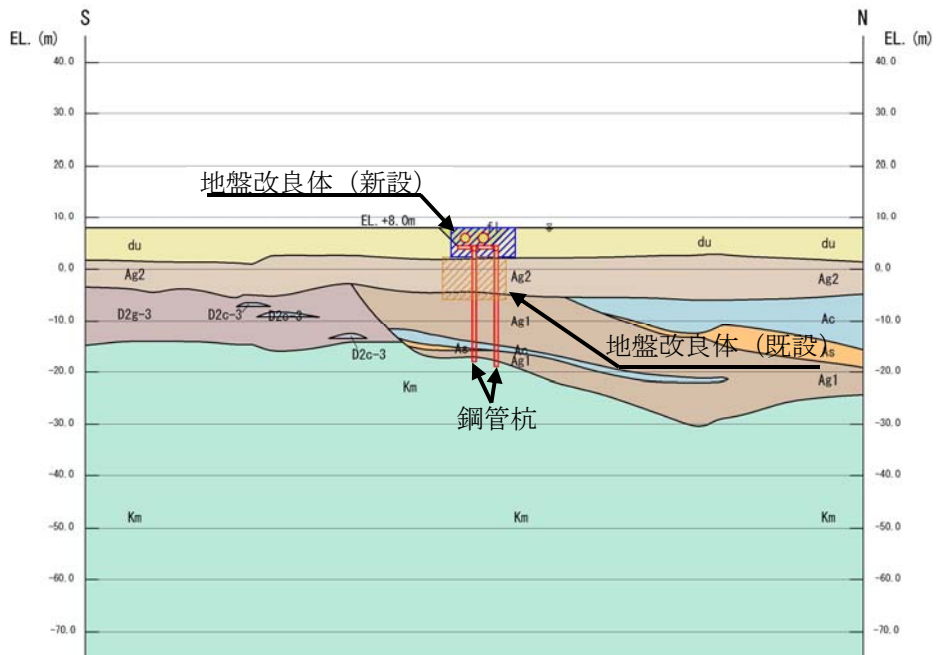


図 3.7-8 (2) 屋外二重管本体の評価対象断面図
(C-C 断面・杭基礎構造部)

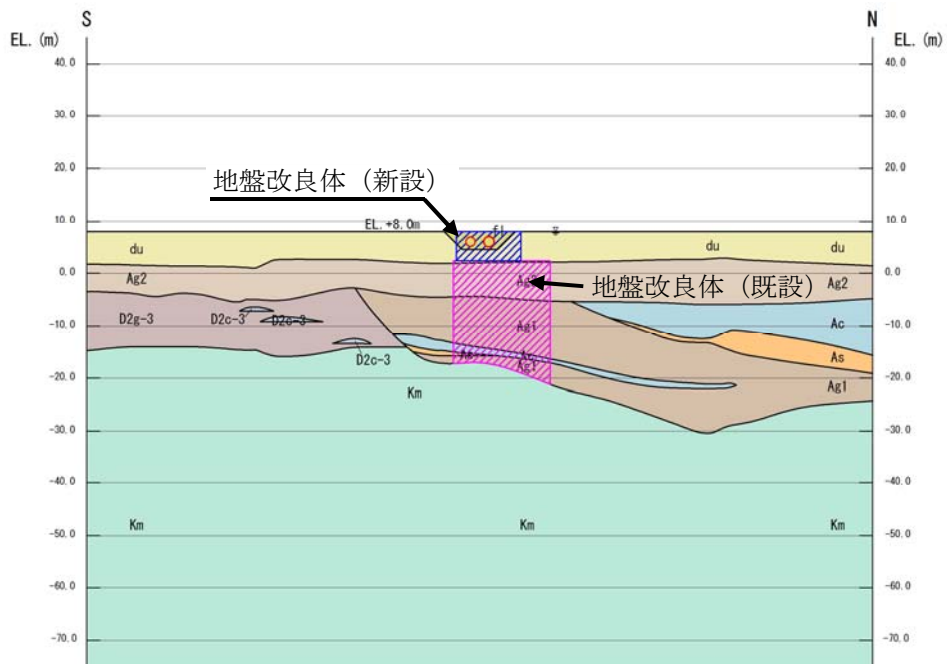


図 3.7-8 (3) 屋外二重管本体の評価対象断面図
(C-C 断面・地盤改良体基礎構造部)

3.7.5 使用材料及び材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005年9月制定）に基づき設定する。構造物の使用材料を表 3.7-3 に、材料物性値を表 3.7-4 に示す。

なお、地盤及び地盤改良体の諸元は、3.2.5「使用材料及び材料定数」と同様にV-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。

表 3.7-3 使用材料

使用箇所	材料	諸元
屋外二重管本体	鋼管	SM400 相当 (SM41B)

表 3.7-4 材料の物性値*

材 料	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼管	77.0	2.05×10 ⁵	0.3

注記 *：鋼構造設計規準

3.7.6 評価構造物諸元

許容応力度による照査を行う屋外二重管本体の諸元を表 3.7-5 示す。

表 3.7-5 評価構造物の諸元

部位	仕様		機能要求
	内径	厚さ	
屋外二重管本体	φ 2,000 mm	20 mm	RHRS 及 DGSW 配管の支持機能

3.7.7 荷重伝達

屋外二重管本体に対して作用する荷重は3.2.7「荷重伝達」と同様に考慮する。

3.7.8 地震応答解析手法

屋外二重管本体の地震応答解析のうち、周辺地盤については3.2.9「地震応答解析手法」と同様に行う。図 3.7-9 に屋外二重管本体に対する地震応答解析フローを示す。管軸方向の応力解析については、解析コード「MSC Nastran Version 2013」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、V-5-1「計算機プログラム（解析コード）の概要（MSC Nastran）」に示す。

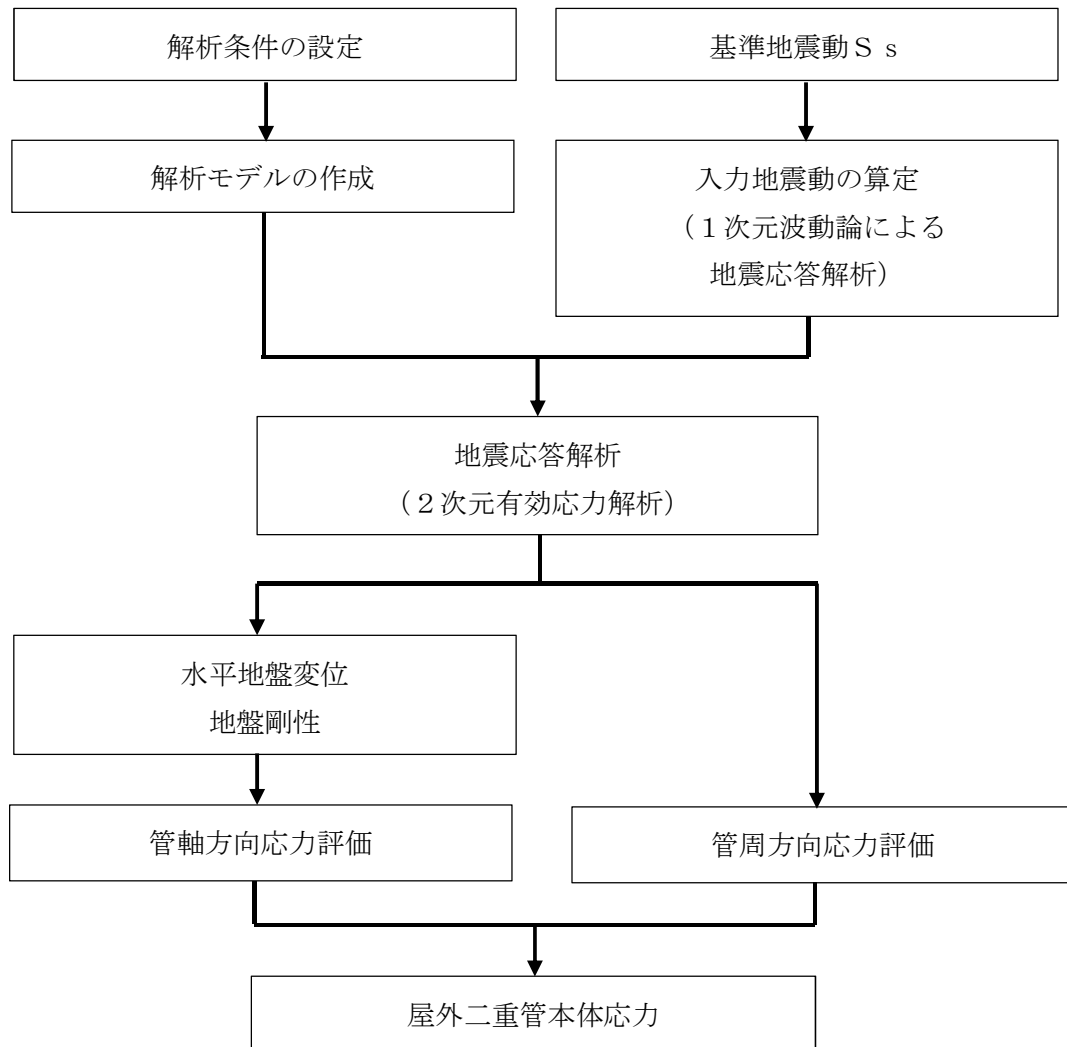


図 3.7-9 屋外二重管本体に対する地震応答解析フロー

3.7.9 解析モデルの設定

(1) 地震応答解析モデルの設定

屋外二重管本体の地震応答解析に用いる解析モデルは、3.2.10「解析モデルの設定」と同様にモデル化する。

(2) 屋外二重管本体管軸方向解析モデルの設定

屋外二重管本体管軸方向に作用する荷重の解析モデルは、図 3.7-10 に示すとおり、屋外二重管本体を線形はり要素、可とう管及び屋外二重管本体の周辺地盤をばね要素でモデル化する。地盤ばね要素は、管軸方向、軸直方向のばね要素ともに 1 m ピッチで与える。また、屋外二重管本体の両端の境界条件は、躯体との取り合い構造を考慮して、原子炉建屋側は自由端、海水ポンプ室側は固定端としてモデル化する。

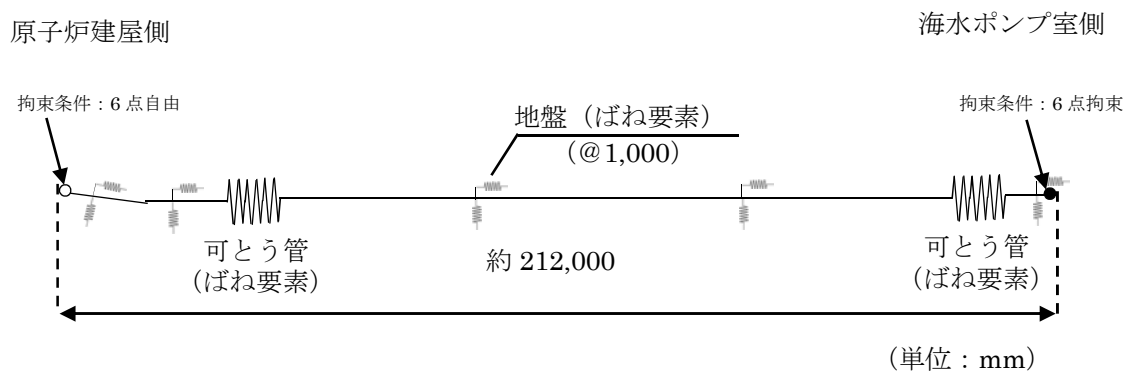


図 3.7-10 屋外二重管本体の解析モデル図

(3) 屋外二重管本体管周方向解析モデルの設定

屋外二重管本体管周方向に作用する荷重の解析モデルは、3.2.10「解析モデルの設定」に示すとおり、管体を線形はり要素でモデル化する。

3.7.10 減衰特性

屋外二重管本体を支持する地盤（杭基礎構造部及び地盤改良体基礎構造部）の地震応答解析において考慮する減衰特性は 3.2.11「減衰特性」と同様に行う。

3.7.11 荷重の組合せ

屋外二重管本体の管周方向の応力解析にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれ組合せて設定する。地震荷重は、地震応答解析から得られる地震時土圧及び躯体に作用する慣性力を考慮する。

変動荷重のうち、積雪荷重、風荷重、温度荷重等については、屋外二重管本体が地中構造物であることを考慮すると、構造物に与える影響は軽微であると判断し、地震力と組合せる荷重としては除外した。

なお、屋外二重管本体は、地中に埋設されている構造物であることから、運転時の異常な過渡変化時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態の影響を受けないと考えられるため、当該状態についての組合せは考慮しないものとする。また、重大事故等対処時においても、地中内で設計基準事故時の条件を上回るような事象は発生しないため、当該状態についての組合せは考慮しないものとする。

荷重の組合せを表 3.7-6 に示す。

表 3.7-6 荷重の組合せ

種別		荷重	考慮箇所		算定方法
			管軸	管周	
永久荷重	常時考慮荷重	躯体自重	-	○	・設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の単位体積重量を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	-	○	・機器・配管荷重の重量に基づいて設定する。
		永久上載荷重	-	-	・恒常的に配置された設備等はないことから、考慮しない。
	静止土圧		-	○	・常時応力解析により算定する。
	外水圧		-	○	・地下水位に応じた静水圧として設定する。 ・水の単位体積重量を考慮する。
	内水圧		-	-	・内水がないことから、考慮しない。
変動荷重		-	-	・地中構造物であるため、積雪荷重、風荷重及び温度荷重等は考慮しない。	
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	○	・基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振をする。	
	鉛直地震動	-	○	・躯体、機器・配管系の慣性力、動土圧を考慮する。 ・管軸方向は、応答変位法による応力解析にて地盤変位を考慮する。	
	動水圧	-	○	・水位条件、密度は、永久荷重と同様とする。	

3.7.12 地震応答解析の検討ケース

屋外二重管本体の耐震設計における屋外二重管本体基礎構造部の検討ケースを表 3.7-7 に示す。屋外二重管本体に作用する地震荷重は、地盤変位と地盤剛性に支配される。このため、すべての基準地震動 S_s に対して実施する検討ケース①（基本ケース）から地盤ひずみが最大となる基準地震動 S_s を選定し、地盤変位が保守的となる条件として、敷地には存在しない豊浦標準砂に基づく液状化強度特性の検討ケース④（地盤を強制的に液状化させることを仮定）を考慮した地盤条件を用いて屋外二重管本体の耐震評価を行う。

表 3.7-7 屋外二重管本体の耐震設計における検討ケース

	①	②	③	④	⑤	⑥
検討ケース	原地盤に基づく液状化強度特性を用いた解析ケース（基本ケース）	地盤物性のばらつきを考慮（ $+1\sigma$ ）した解析ケース	地盤物性のばらつきを考慮（ -1σ ）した解析ケース	地盤を強制的に液状化させることを仮定した解析ケース	原地盤において非液状化の条件を仮定した解析ケース	地盤物性のばらつきを考慮（ $+1\sigma$ ）して非液状化の条件を仮定した解析ケース
液状化強度特性の設定	原地盤に基づく液状化強度特性（標準偏差を考慮）	原地盤に基づく液状化強度特性（標準偏差を考慮）	原地盤に基づく液状化強度特性（標準偏差を考慮）	敷地に存在しない豊浦標準砂に基づく液状化強度特性	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用

3.8 評価内容

3.8.1 許容限界の設定

屋外二重管本体の曲げ及びせん断に対する許容限界は、鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会, 2005 年度 9 月制定）に基づき、表 3.8-1 に示す短期許容応力度とする。短期許容応力度は、耐震設計上考慮する荷重が地震荷重であることを考慮し、鋼材の許容応力度に対して 1.5 倍割増しを考慮する。

表 3.8-1 鋼製管の短期許容応力度

項 目	短期許容応力度 (N/mm ²)
許容引張応力度 許容曲げ応力度	235.0
許容せん断応力度	135.6

3.8.2 評価方法

屋外二重管本体の発生応力は、3.4.1「地震応答解析結果」から得られる屋外二重管本体の管周方向に作用する荷重と水平地盤変位を考慮して、管軸方向と管周方向それぞれの応力評価を行う。屋外二重管本体の応力評価フローを図 3.8-1 に示す。

管軸方向の応力評価は、管路に入射する地震動によって生じる周辺地盤の変位を考慮した応答変位法による構造解析結果と管周方向に発生する応力を合成して評価する。

(1) 管軸方向の応力評価

屋外二重管本体の管軸方向の応力評価フローを図 3.8-2 に、管軸方向の応力解析に用いる応答変位法を概念を図 3.8-3 に示す。管軸方向の応力解析においては、図 3.8-3 に示すとおり、地盤に生じる水平変位と地震動の波長の関係、つまり、地盤ひずみに支配される。地盤ひずみ $\varepsilon_G(x)$ は、地盤に生じる変位と波長より、次式で与えられる。

$$\varepsilon_G(x) = \frac{dU(x)}{dx} = 2\pi \frac{U_o}{L} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L}x + \varphi\right)$$

ここで、

U_o : 管軸位置の地盤の水平方向最大応答変位 (m)

(応答解析の結果より)

L : 地震動の波長 (m)

x : 地震動に沿った距離 (m)

φ : 地震動の位相 (°)

以上より、最大地盤ひずみは、次式で表される。

$$\varepsilon_{Gmax} = 2\pi \frac{U_o}{L}$$

応答変位法による変位は、2次元有効応力解析より得られる地盤変位と当該時刻における地盤物性より算定したばね要素（以下、「地盤ばね」という。）を介して入力する。地盤ばねは道路橋示方書・同解説IV下部構造編（平成29年11月）に準拠し、地盤反力係数の上限値を考慮したバイリニア型として、以下のように設定する。

$$K = K_0 \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{\frac{3}{4}}$$

ここで、

K : 屋外二重管本体に作用する地盤反力係数 (kN/m³)

K_0 : 直径 0.3 m 剛体円板による平板載荷試験の値に相当する地盤反力係数 (kN/m³) であり、「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編(平成29年11月)」に従う。

B_H : 換算載荷幅 (=2.04 m)

地盤反力係数 K_0 は以下の式より算定する。

$$K_0 = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

ここで、

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha = 1$)

E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

地盤変形係数 E_0 は2次元有効応力解析において屋外二重管本体の最大相対水平変位発生時刻 t_{max} の応答値に基づき、以下の式より算定する。

$$E_0 = 2(1 + \nu_d)G_s$$

$$G_s = \frac{\tau_s}{\gamma}$$

$$\tau_s = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{ma} \times \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right)^{0.5} + \left| \frac{\gamma}{C \times \cos \phi_{CD} + \sigma'_m \times \sin \phi_{CD}} \right|}}$$

ここで、

ν_d : 動ポアソン比

G_s : 割線せん断剛性 (kN/m²)

- τ_s : 骨格曲線上のせん断応力 (kN/m²)
- γ_{xy} : せん断ひずみ
- C_{CD} : 粘着力 (kN/m²)
- ϕ_{CD} : 内部摩擦角 (°)

また、地盤反力係数の上限値は以下の式より算定する。

$$\tau_f = C_{CD} \times \cos\phi_{CD} + \sigma'_m \times \sin\phi_{CD}$$

$$\sigma_f = C_{CD} \times \cos\phi_{CD} + \sigma'_m \times (1 + \sin\phi_{CD})$$

ここで、

- τ_f : 時刻 t_{\max} における各地盤深度の σ'_m に対応する管軸方向の地盤反力係数の上限値 (kN/m²)
- σ_f : 時刻 t_{\max} における各地盤深度の σ'_m に対応する管周方向の地盤反力係数の上限値 (kN/m²)

応力解析モデルに入力する地盤変位 U_h は、2次元有効応力解析結果から算定した地盤ひずみに基づき、地盤ひずみが最大となる基準地震動 S_s の屋外二重管本体の中心標高における最大水平変位量 U_o 、地震動の波長 L を考慮し、以下の式で与える。

$$U_h(x) = U_o \times \sin\left(\frac{2\pi}{L}x + \varphi\right)$$

ここで、

- U_h : 地盤変位 (m)
 - U_o : 地震応答解析における最大水平変位 (m)
 - L : 地震動の波長 (m)
 - x : 地震動に沿った距離 (m)
 - φ : 地震動の位相 (°)
- 15° ごとに変化させて入力する。

管軸方向の応力解析において屋外二重管本体に発生する応力は、地震動（地盤変位）の入射角 θ により発生値が変化する。図 3.8-4 に示すとおり、管軸方向応力は、入射角 0° で曲げ応力、入射角 45° で軸応力が最大となることから、地震動の入射角は 0° 及び 45° とする。このとき、入射角 0° の場合の応力と入射角 45° の場合の応力を以下の式にて合成したものとする。

$$\sigma_L = \sqrt{3.12 \times (\sigma_{A,45})^2 + (\sigma_{B,0})^2} \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、

σ_L : 管軸方向の応力

$\sigma_{A,45}$: 入射角 45° の場合の管軸方向応力（軸応力）の最大値

$\sigma_{B,0}$: 入射角 0° の場合の管軸方向応力（曲げ応力）の最大値

図 3.8-5 は、水平及び鉛直面内の波動が、管軸（y 軸）方向に対して入射角 θ で入射した場合のイメージ図である。

応力が最大となる入射角は、それぞれ軸応力： 45° 、曲げ応力： 0° であることから、各々が最大となる入射角を考慮した重ね合わせを行う。

軸応力が最大となる $\theta = 45^\circ$ の傾きを持つ波動（水平及び鉛直面内で y 軸で線対称の波動：4 波）及び曲げ応力が最大となる $\theta = 0^\circ$ の傾きを持つ水平面内波動の計 5 波が入射した場合の合成応力を σ_e を、二乗和平方根で均等化したものを、以下の式で表す。

$$\sigma_e = \sqrt{\gamma \cdot \sigma_L^2 + \sigma_B^2}$$

ここで、

γ : 波動成分による重畳係数 ($1.00 \leq \gamma \leq 3.12$)

σ_L : 軸応力

σ_B : 曲げ応力

上式における重畳係数は、波動成分によって 1.00～3.12 の値をとる。上述の 5 波を考慮した場合、鉛直面内で入射する波動による応力は、水平面内で入射する波動による応力の 75% として、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sqrt{2(1.0^2 + 0.75^2) \cdot \sigma_L^2 + \sigma_B^2} \\ &= \sqrt{3.12 \cdot \sigma_L^2 + \sigma_B^2} \end{aligned}$$

つまり、式(1)で求まる管軸方向応力には、周辺地盤の最大水平変位による影響に加え、最大水平変位の 75% の振幅を持つ鉛直地盤変位についても考慮されている。

(2) 管周方向の応力評価

屋外二重管本体の管周方向の応力は、地盤の有効応力解析に用いる地盤の 2 次元モデ

ルに，屋外二重管本体を線形はり要素で組み込み，水平方向及び，鉛直方向の同時入力の時刻歴応答解析で屋外二重管本体の地震応答解析結果より算定する。この荷重には地盤改良体及び周辺地盤の地震時の動的応答の効果が含まれる。管周方向に対する応力評価は，この地震応答解析から得られる最大断面力を用いるものとする。

(3) 管軸方向及び管周方向の応力評価

屋外二重管本体に発生する応力は，管軸方向及び管周方向応力を以下の式にて組み合わせる。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_C^2 + \sigma_L \times \sigma_C + 3 \times \tau_S^2}$$

ここで，

σ : 合成応力 (N/mm²)

σ_C : 管周方向曲げ応力 (N/mm²)

τ_S : 管軸方向せん断応力 (N/mm²)

また，屋外二重管本体のせん断評価に用いるせん断応力は，管周方向のせん断応力を用いる。

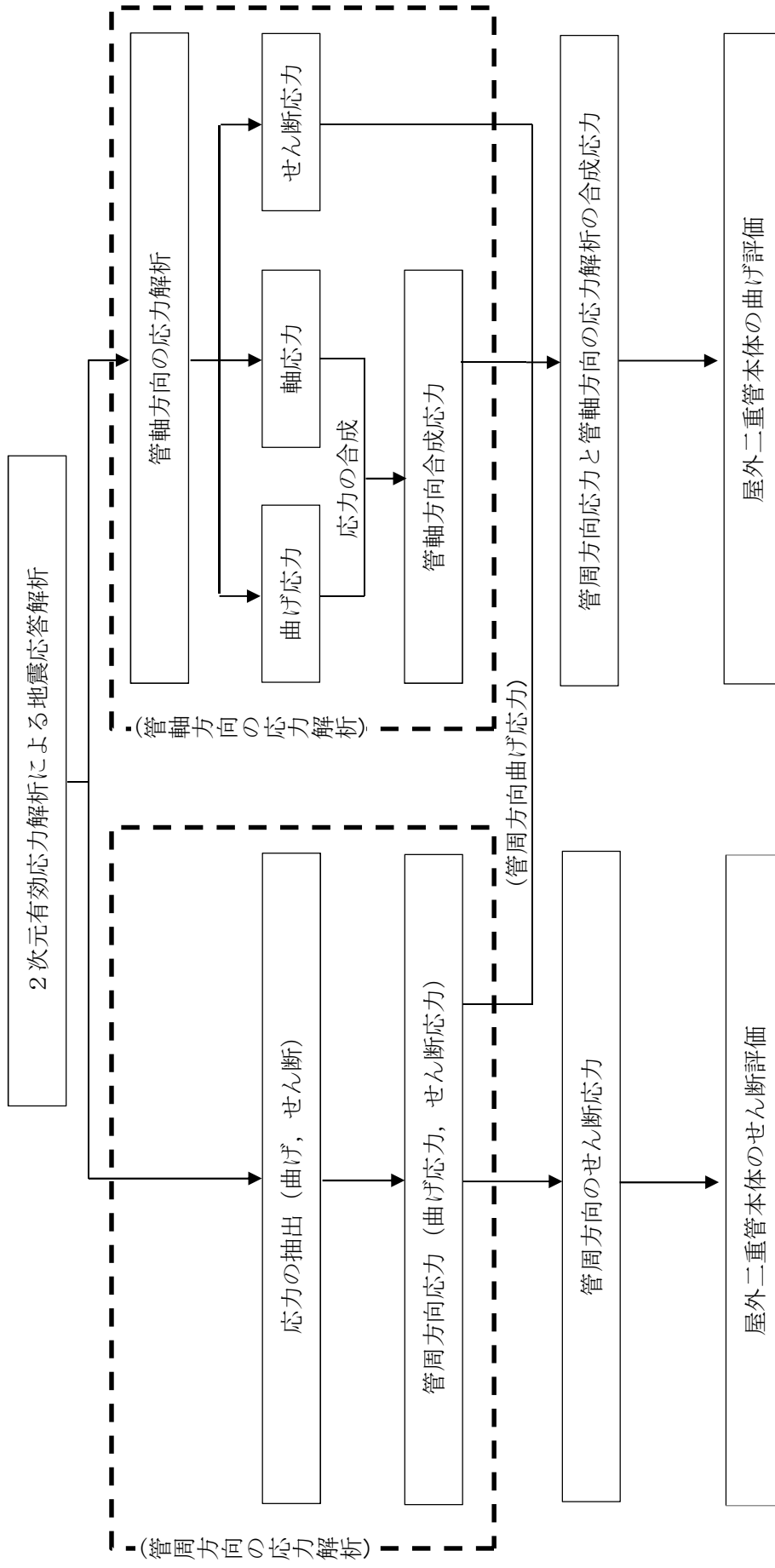


図 3.8-1 屋外二重管本体の応力評価フロー

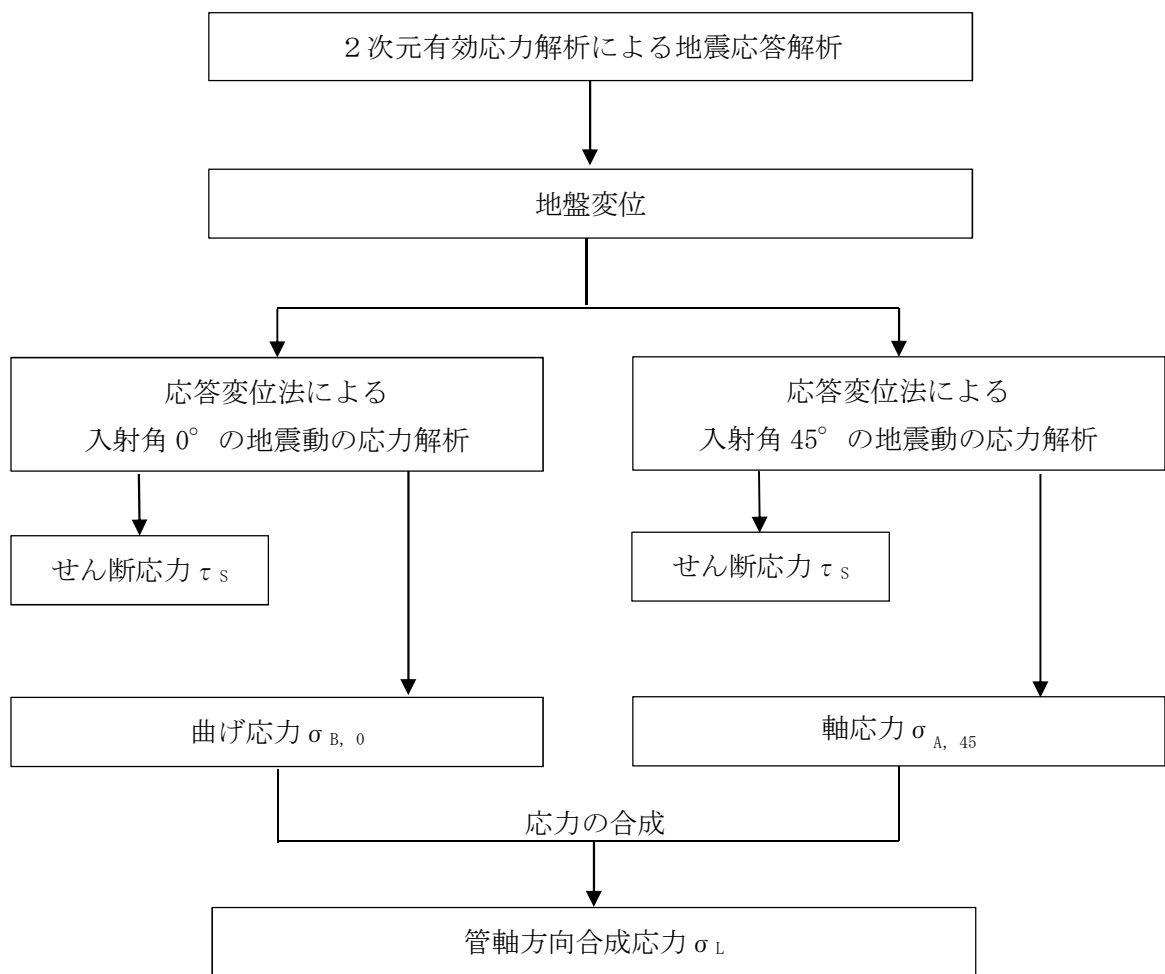
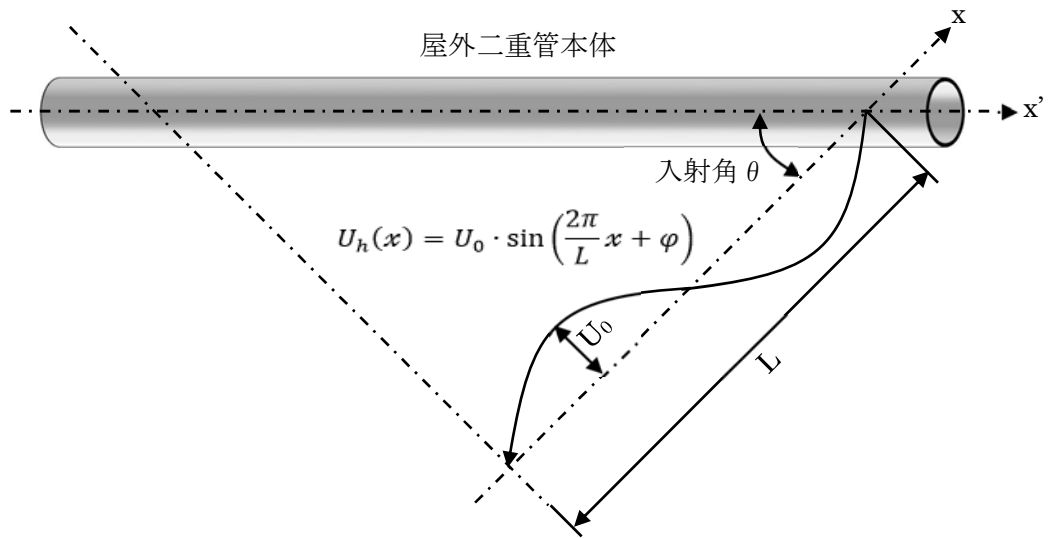


図 3.8-2 管軸方向の応力評価フロー



U_h : 水平変位 (m)

U_0 : 管軸位置の地盤の水平方向最大応答変位*1 (m)
(応答解析の結果より)

L : 地震動の波長*2 (m)

$$L = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

$$L_1 = V_{DS} \cdot T_G, \quad L_2 = V_{BS} \cdot T_G$$

ここで,

V_{DS} : 管路中心以浅の地盤の平均せん断弾性波速度 (m/s)

V_{BS} : 管路中心以深の平均せん断弾性波速度 (m/s)

T_G : 管路中心以浅の地盤の固有周期 (s)

x : 地震動に沿った距離 (m)

φ : 地震動の位相 (°)

注記 *1: 応力解析における地盤変位は、水道施設耐震工法指針・解説1997 版 (日本水道協会, 1997) に基づき、管軸位置の水平変位を用いる。

*2: 水道施設耐震工法指針・解説1997 版 (日本水道協会, 1997) に基づく。

図 3.8-3 管軸方向の応力解析の概念図

地震動の入射角 θ	応力発生イメージ	備考
0°		<p>地震動の入射角が 0° の場合、管路と直交方向の地盤変位が最大となるため、管路に発生する曲げ応力が最大となる。</p> <p>なお、軸方応力は発生しない。</p>
45°		<p>地震動の入射角が 45° の場合、管路と平行方向の地盤変位が最大となるため、管路に発生する軸応力が最大となる。</p> <p>なお、曲げ応力も発生するが、0° 入射の場合よりも小さい。</p>

図 3.8-4 管軸方向応力解析における地震動の入射角と発生応力の関係

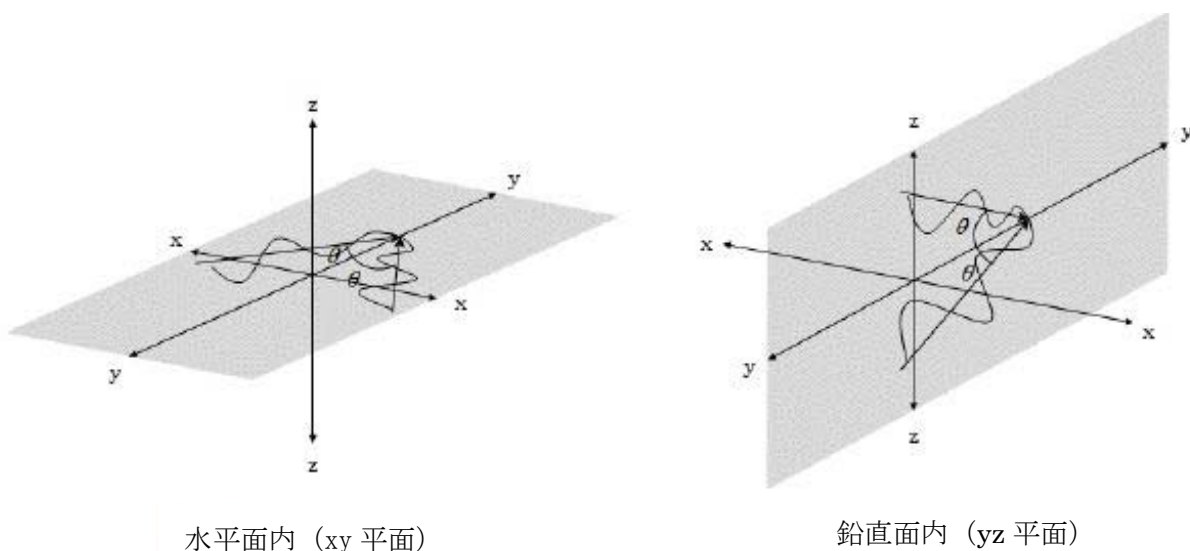


図 3.8-5 水平及び鉛直面内における入射角 θ のイメージ図

3.9 評価結果

3.9.1 地盤ひずみ

応答変位法における管軸方向の応力解析では、3.8.2(1)「管軸方向の応力評価」に示すとおり、地盤ひずみが支配的となる。表 3.9-1 に B-B 断面杭基礎構造部、C-C 断面杭基礎構造部及び C-C 断面地盤改良体基礎構造部における基準地震動 S_s ごとの地盤ひずみの評価結果を示す。同表より、B-B 断面杭基礎構造部は S_s-12 が、C-C 断面杭基礎構造部及び C-C 断面地盤改良体基礎構造部は S_s-D1 (--) が最大となる。ここで、B-B 断面杭基礎構造部と C-C 断面杭基礎構造部で地盤ひずみを比較すると、B-B 断面杭基礎構造部の地盤ひずみの方が大きいことから、杭基礎構造部については B-B 断面を代表として評価する。また、応力評価に当たっては、液状化を考慮した場合に地盤変位が最も厳しくなる豊浦標準砂の条件を適用する。

従って、屋外二重管本体評価に適用する基準地震動 S_s は、B-B 断面杭基礎構造部においては S_s-12 、C-C 断面地盤改良体基礎構造部においては S_s-D1 (--) とする。

なお、C-C 断面杭基礎構造部の地盤条件を B-B 断面杭基礎構造部で代表することの妥当性については、「参考 2 杭基礎構造部に適用する地盤条件の妥当性について」に示す。

表 3.9-1 (1) 地盤の最大ひずみ (B-B断面杭基礎構造部)

地震動	最大応答変位 $U_o^{(*)}$ (m)	波長 L (m)	最大地盤ひずみ (%)
Ss-D1 (++)	2.27×10^{-1}	289	0.5
Ss-D1 (+-)	2.28×10^{-1}	289	0.5
Ss-D1 (--)	1.98×10^{-1}	278	0.4
Ss-D1 (--)	1.99×10^{-1}	279	0.4
Ss-11	1.51×10^{-1}	268	0.4
<u>Ss-12</u>	<u>2.92×10^{-1}</u>	<u>274</u>	<u>0.7</u>
Ss-13	2.81×10^{-1}	280	0.6
Ss-14	1.78×10^{-1}	260	0.4
Ss-21	1.29×10^{-1}	260	0.3
Ss-22	1.30×10^{-1}	277	0.3
Ss-31 (++)	2.28×10^{-1}	273	0.5
Ss-31 (+-)	2.17×10^{-1}	268	0.5
<u>Ss-12</u> <u>(豊浦標準砂)</u>	<u>6.60×10^{-1}</u>	<u>303</u>	<u>1.4</u>

注記 *1: 屋外二重管本体中心標高位置 (E.L. +2.475 m) における変位

表 3.9-1 (2) 地盤の最大ひずみ (C-C断面杭基礎構造部)

地震動	最大応答変位 $U_o^{(*)2}$ (m)	波長 L (m)	最大地盤ひずみ (%)
Ss-D1 (++)	1.30×10^{-1}	155	0.5
Ss-D1 (+-)	1.28×10^{-1}	155	0.5
Ss-D1 (--)	1.35×10^{-1}	141	0.6
<u>Ss-D1 (--)</u>	<u>1.37×10^{-1}</u>	<u>140</u>	<u>0.6</u>
Ss-11	3.30×10^{-2}	116	0.2
Ss-12	9.20×10^{-2}	121	0.5
Ss-13	7.20×10^{-2}	130	0.3
Ss-14	5.30×10^{-2}	124	0.3
Ss-21	8.30×10^{-2}	130	0.4
Ss-22	8.30×10^{-2}	130	0.4
Ss-31 (++)	1.14×10^{-1}	136	0.5
Ss-31 (+-)	1.15×10^{-1}	139	0.5
<u>Ss-D1 (--)</u> <u>(豊浦標準砂)</u>	<u>3.08×10^{-1}</u>	<u>166</u>	<u>1.2</u>

注記 *2: 屋外二重管本体中心標高位置 (E.L. +6.032 m) における変位

表 3.9-1 (3) 地盤の最大ひずみ (C-C断面地盤改良体基礎構造部)

地震動	最大応答変位 $U_o^{(*)}$ (m)	波長 L (m)	最大地盤ひずみ (%)
Ss-D1 (++)	9.7×10^{-2}	91	0.7
Ss-D1 (+-)	9.7×10^{-2}	92	0.7
Ss-D1 (--)	1.08×10^{-1}	96	0.7
<u>Ss-D1 (--)</u>	<u>1.08×10^{-1}</u>	<u>98</u>	<u>0.7</u>
Ss-11	1.30×10^{-2}	96	0.1
Ss-12	3.90×10^{-2}	94	0.3
Ss-13	3.80×10^{-2}	94	0.3
Ss-14	3.70×10^{-2}	94	0.2
Ss-21	5.40×10^{-2}	92	0.4
Ss-22	5.90×10^{-2}	98	0.4
Ss-31 (++)	8.20×10^{-2}	88	0.6
Ss-31 (+-)	7.70×10^{-2}	93	0.5
<u>Ss-D1 (--)</u> <u>(豊浦標準砂)</u>	<u>1.66×10^{-1}</u>	<u>92</u>	<u>1.1</u>

注記 *3 : 屋外二重管本体中心標高位置 (E.L. +6.032 m) における変位

3.9.2 入力地盤変位

図 3.9-1 に 3.9.1 「地盤ひずみ」において選定した B-B 断面杭基礎構造部の基準地震動 S_s-12 と C-C 断面地盤改良体基礎構造部の基準地震動 S_s-D1 (--) について算定した入射角 0° の場合と入射角 45° の場合の入力地盤変位 (最大水平変位 U_h) を示す。

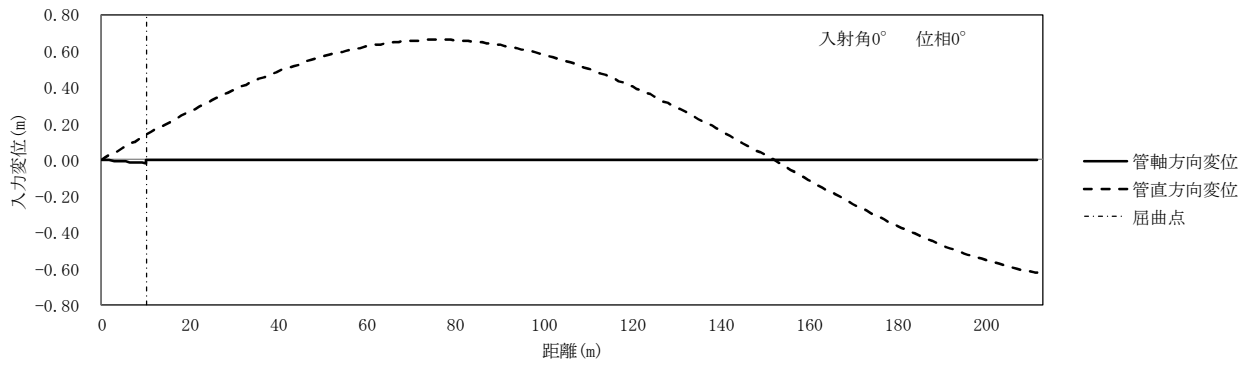


图 3.9-1 (1) 入力地盤変位 (B-B断面杭基礎構造部) (入射角 0°)

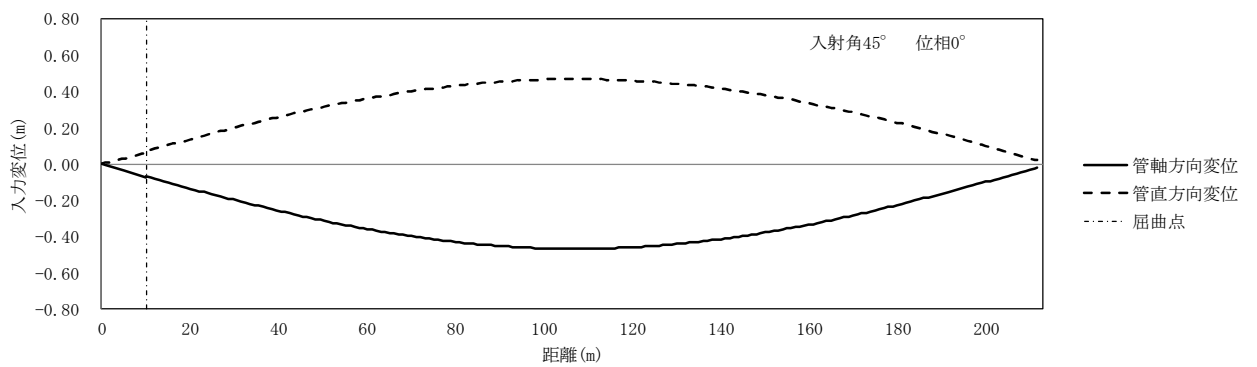


图 3.9-1 (2) 入力地盤変位 (B-B断面杭基礎構造部) (入射角 45°)

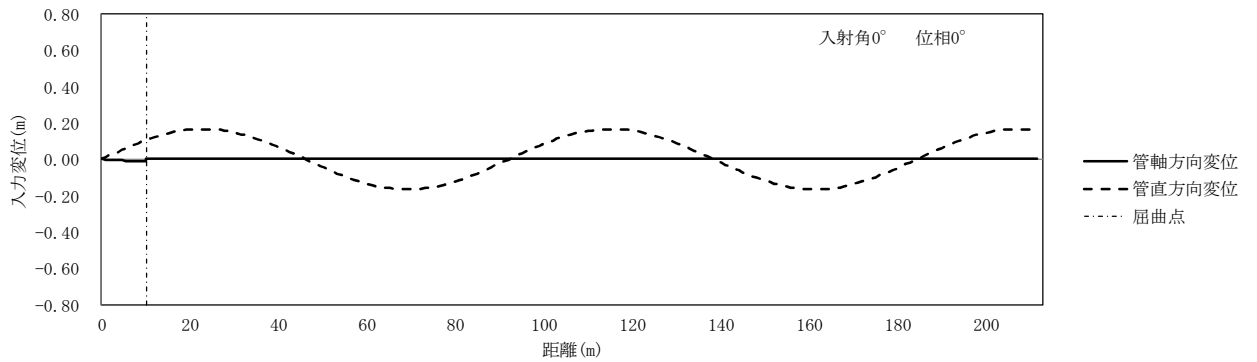


图 3.9-1 (3) 入力地盤変位 (C-C断面地盤改良体基礎構造部) (入射角 0°)

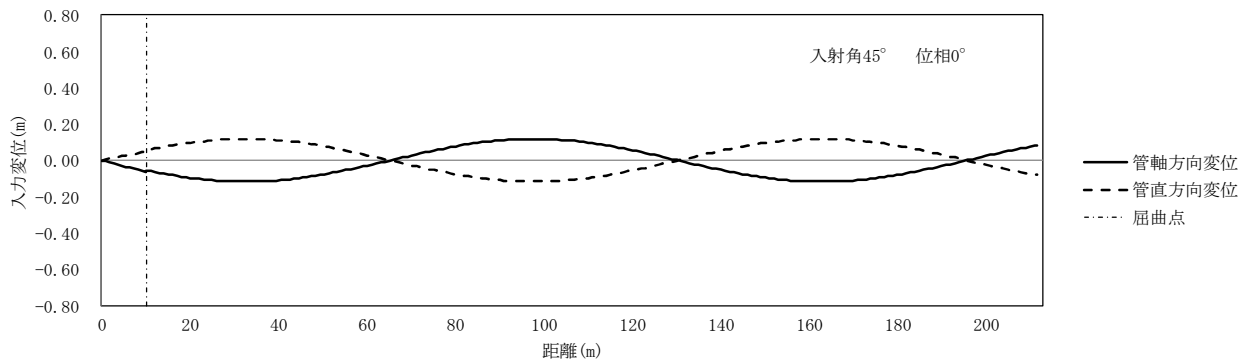


图 3.9-1 (4) 入力地盤変位 (C-C断面地盤改良体基礎構造部) (入射角 45°)

3.9.3 地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値

表 3.9-2 に 3.9.1 「地盤ひずみ」において選定した B-B 断面杭基礎構造部の基準地震動 S_{s-12} と C-C 断面地盤改良体基礎構造部の基準地震動 S_{s-D1} (--) について算定した地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値を示す。

表 3.9-2 (1) 管軸方向の応力解析に用いる地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値
(B-B 断面杭基礎構造部)

基準地震動	地盤反力係数 (kN/m ³)	地盤反力係数の上限値： τ_f (kN/m ²)
S _{s-12}	6.578×10^2	4.478

表 3.9-2 (2) 管軸方向の応力解析に用いる地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値
(C-C 断面地盤改良体基礎構造部)

基準地震動	地盤反力係数 (kN/m ³)	地盤反力係数の上限値： τ_f (kN/m ²)
S _{s-D1} (--)	1.337×10^2	2.807×10^{-1}

3.9.4 管軸方向の応力解析結果

図 3.9-2 に管軸方向の応力解析結果を示す。

本図は、地震動の位相を 15° ピッチで与えた結果のうち、各要素に生じた最大応力を示している。

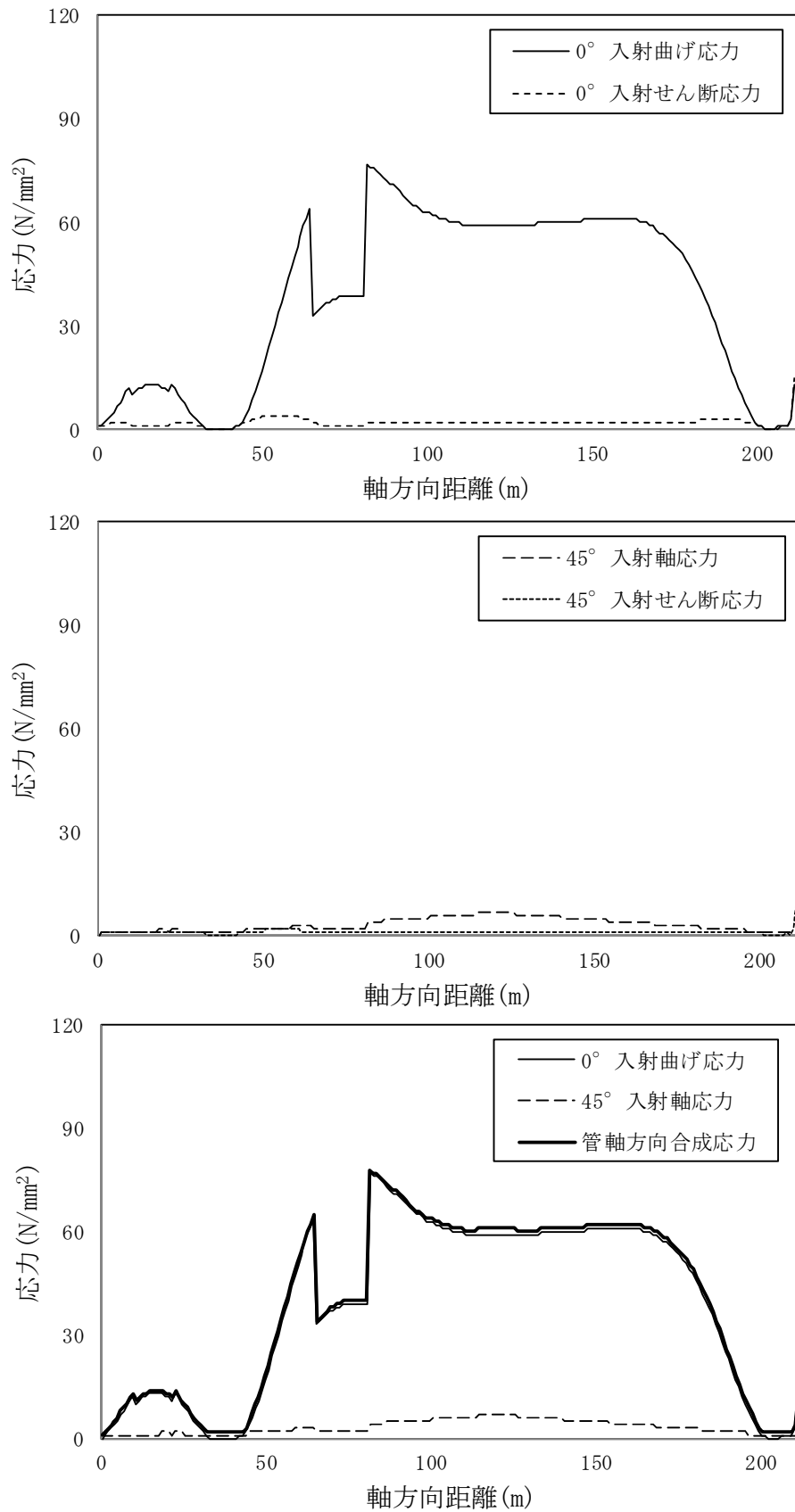


図 3.9-2 (1) 管軸方向の応力解析結果 (B-B断面杭基礎構造部)

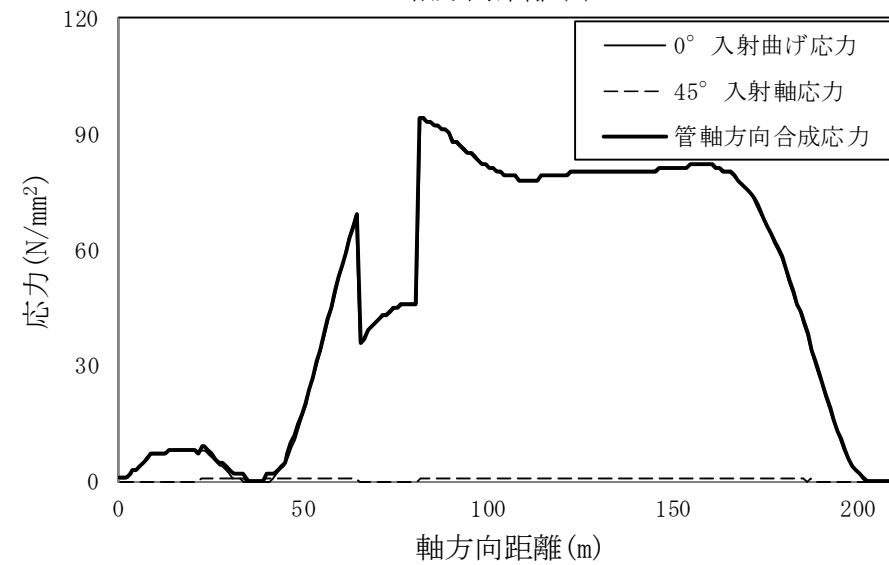
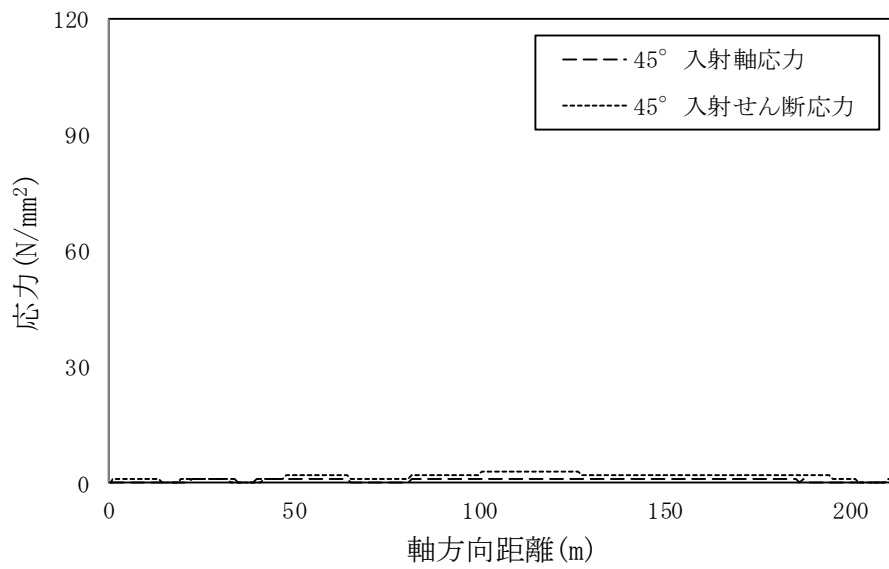
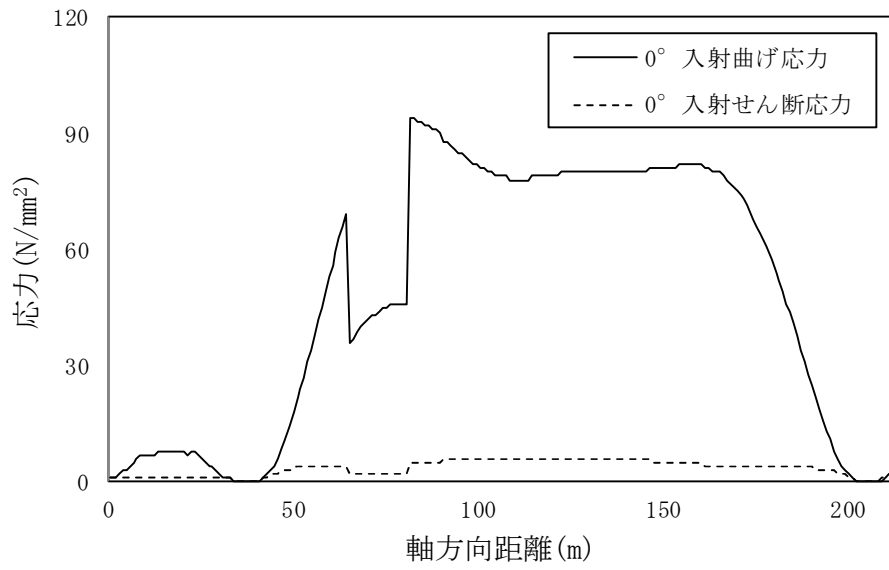


図 3.9-2 (2) 管軸方向の応力解析結果 (C-C断面地盤改良体基礎構造部)

3.9.5 管周方向の応力解析結果

図 3.9-3 に管周方向の応力解析結果を示す。

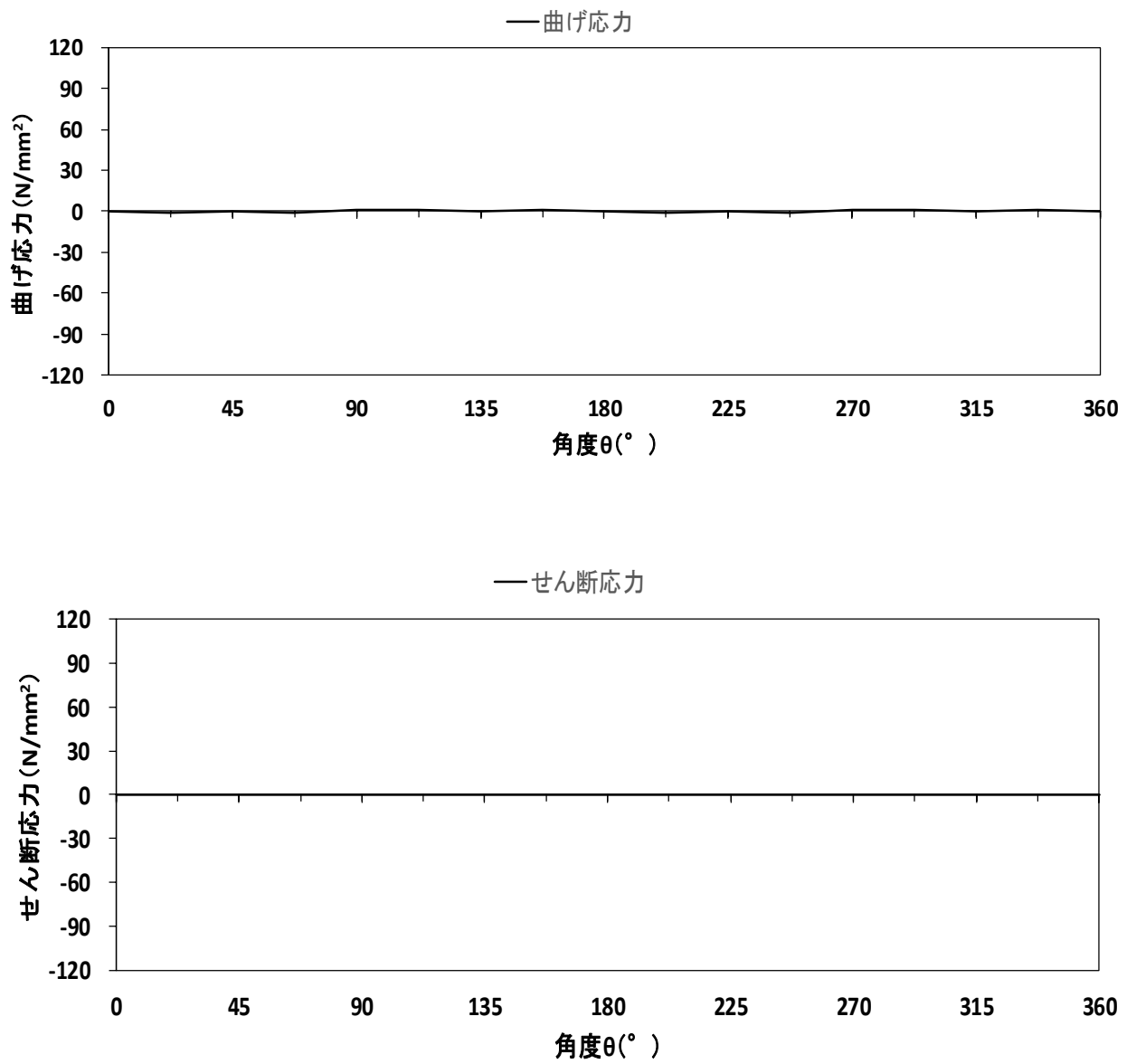


図 3.9-3 (1) 管周方向の応力解析結果 (B-B断面杭基礎構造部)

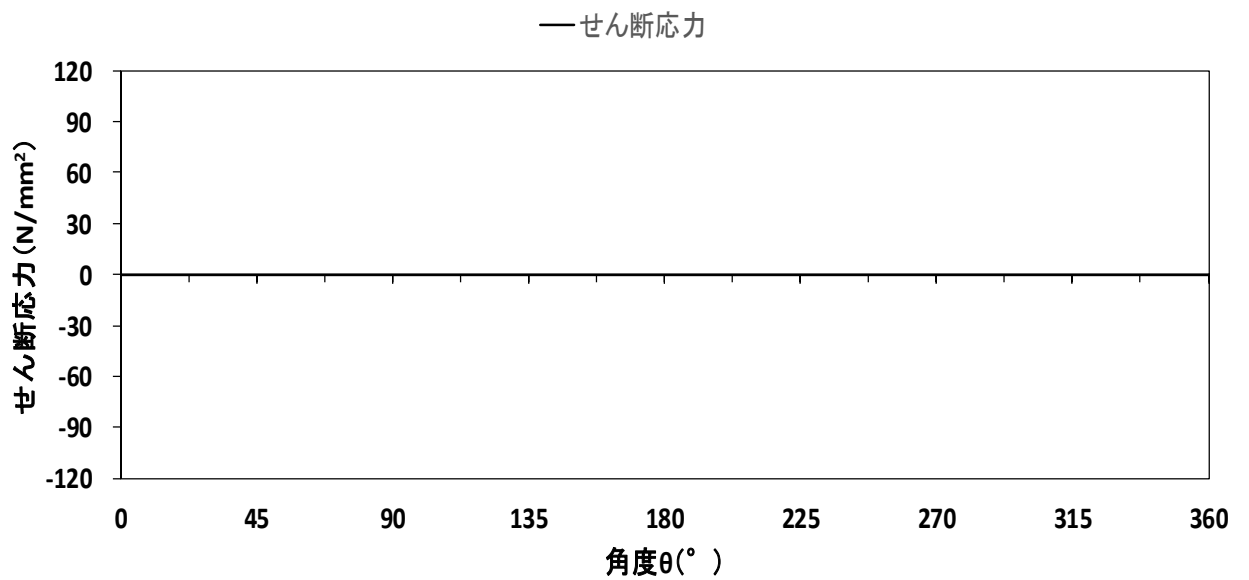
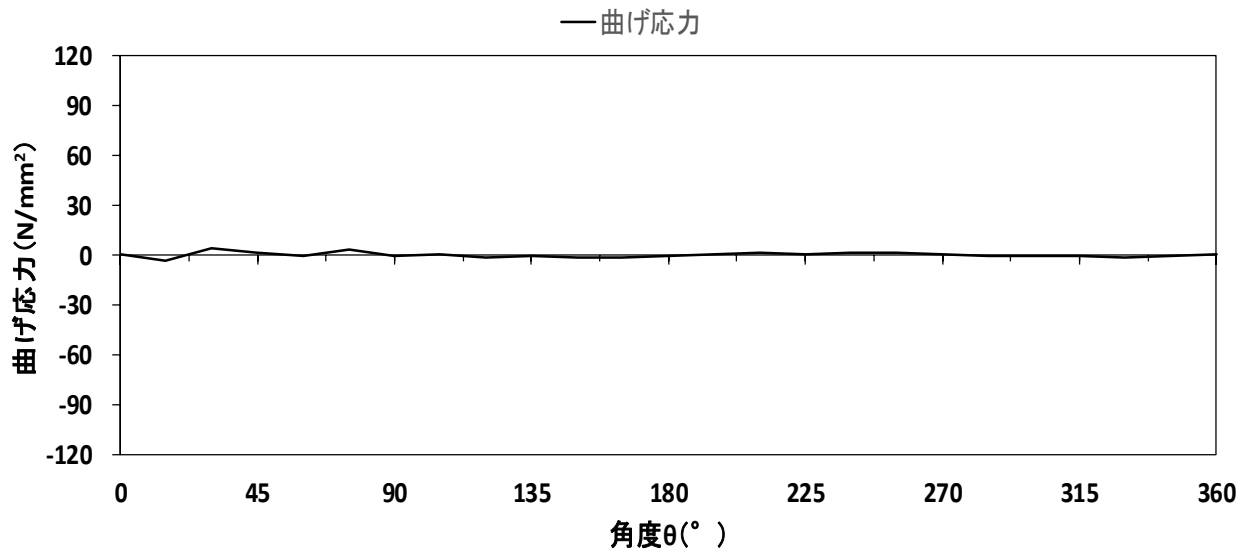


図 3.9-3 (2) 管周方向の応力解析結果 (C-C断面地盤改良体基礎構造部)

3.9.6 管軸方向及び管周方向の応力評価

表 3.9-3 に管軸方向の応力評価結果を示す。

表 3.9-3 (1) 管軸方向の応力評価結果
(B-B断面杭基礎構造部)

管周方向	管軸方向		合成応力 σ (N/mm ²)	許容限界 σ_a (N/mm ²)	σ / σ_a
曲げ応力 σ_c (N/mm ²)	曲げ応力 σ_L (N/mm ²)	せん断応力 τ_s (N/mm ²)			
2	78	2	84	235	0.36

表 3.9-3 (2) 管軸方向の応力評価結果
(C-C断面地盤改良体基礎構造部)

管周方向	管軸方向		合成応力 σ (N/mm ²)	許容限界 σ_a (N/mm ²)	σ / σ_a
曲げ応力 σ_c (N/mm ²)	曲げ応力 σ_L (N/mm ²)	せん断応力 τ_s (N/mm ²)			
4	94	6	97	235	0.42

3.10 まとめ

非常時に残留熱除去海水系（RHRS）配管及びディーゼル発電機海水系（DGSW）配管における間接支持機能を求められる土木構造物である，屋外二重管本体について基準地震動 S_s による地震力に対し，構造部材の曲げ応力及びせん断応力が許容限界を下回ることを確認した。

以上のことから，屋外二重管本体は，基準地震動 S_s による地震力に対して，間接支持機能を維持できる。

屋外二重管本体の耐震安全性評価に関する参考資料

目 次

	頁
1. 可とう管の耐震性について……………	(参考) 1-1
2. 杭基礎構造部に適用する地盤条件の妥当性について……………	(参考) 2-1

1. 可とう管の耐震性について

1.1 概要

屋外二重管本体における管軸方向の応力解析では、液状化によって生じる変位を吸収する可とう管をばね要素としてモデル化している。ここでは、屋外二重管本体に設置される可とう管が変位を十分に吸収可能か評価する。

1.2 評価方針

屋外二重管の管軸方向の応力解析にて、可とう管設置位置にて生じる伸縮量及び偏心量が、可とう管の許容値以下であることを確認する。また、可とう管の変位吸収能力の観点では、入力する地盤変位量（地盤ひずみ）が大きい方が厳しい結果となるため、B-B断面杭基礎構造部の地盤条件を対象とする。

1.3 評価条件

1.3.1 評価対象

評価対象とする可とう管は、耐震設計上、軸方向の地盤変位を考慮する屋外二重管本体に設置される。評価対象とする可とう管を図 1.3-1、可とう管の概略を図 1.3-2 に示す。

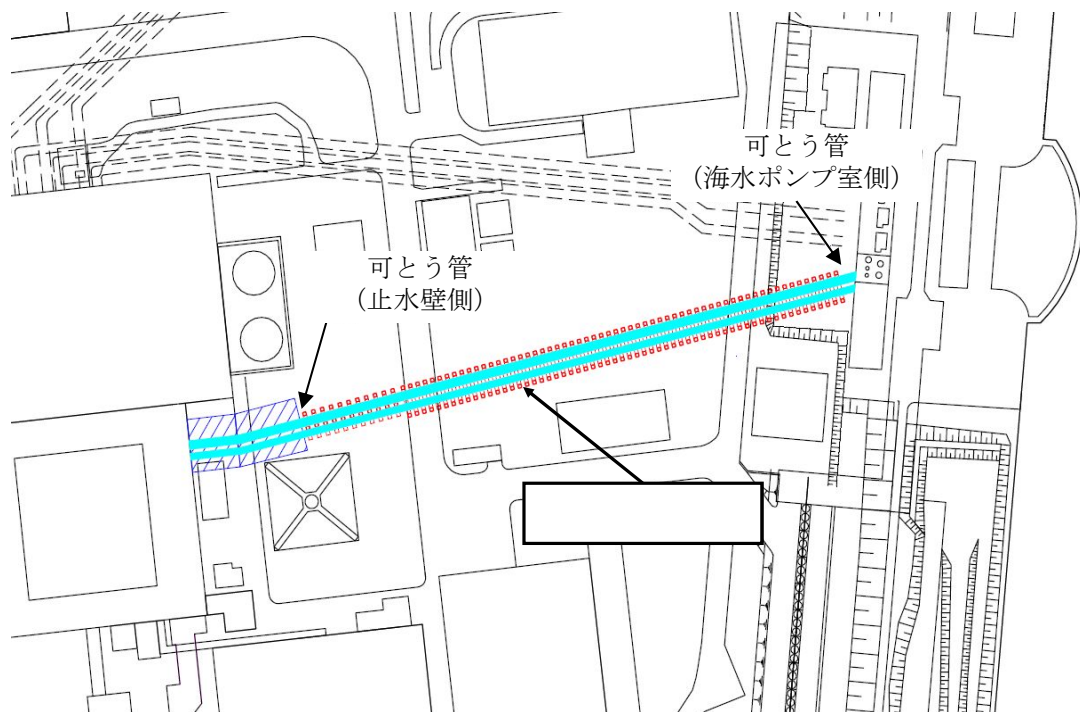


図 1.3-1 検討対象とする可とう管位置図

(参考)3-1-1

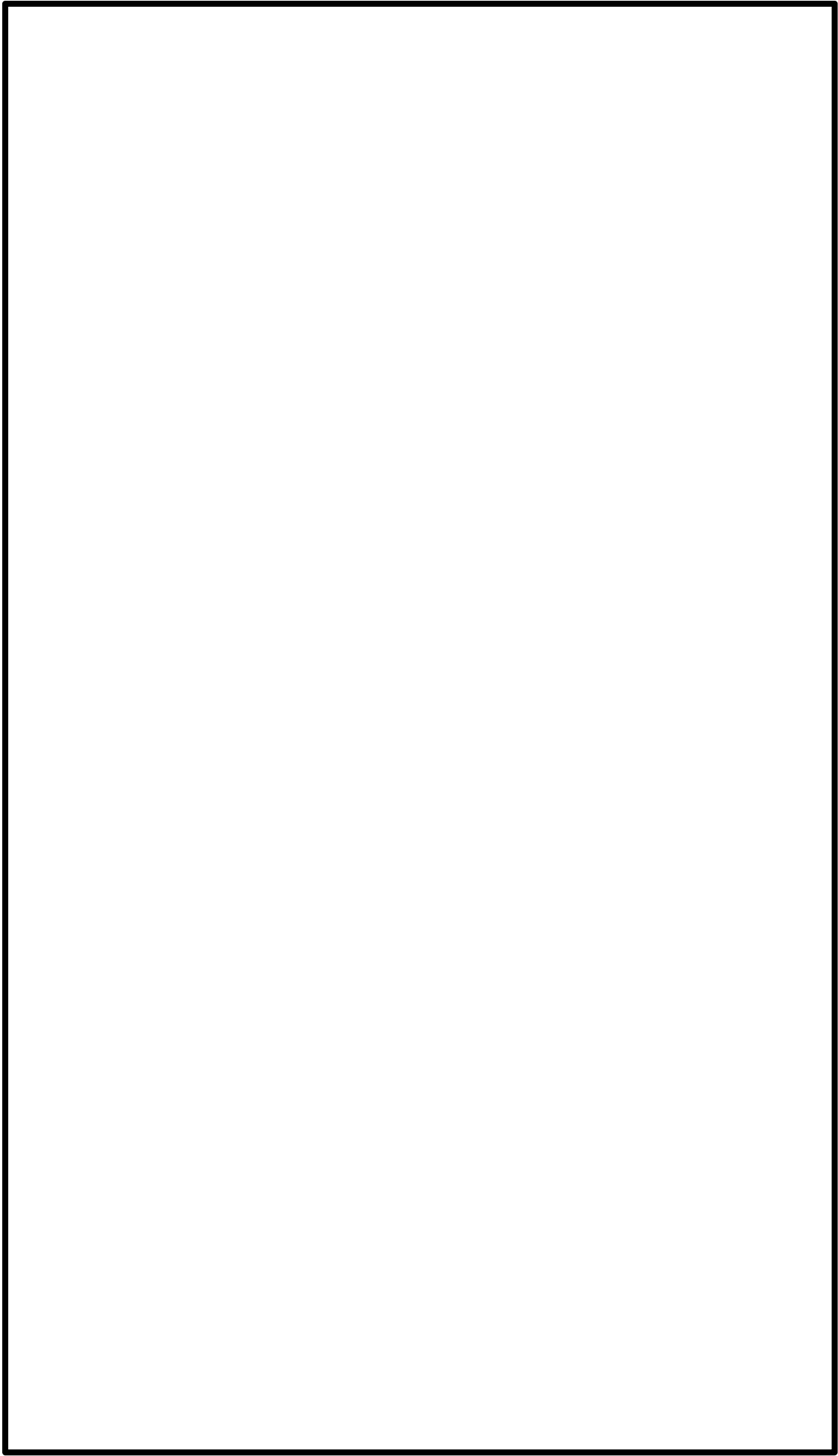


図 1.3-2 可とう管の概略図

(参考)3-1-2

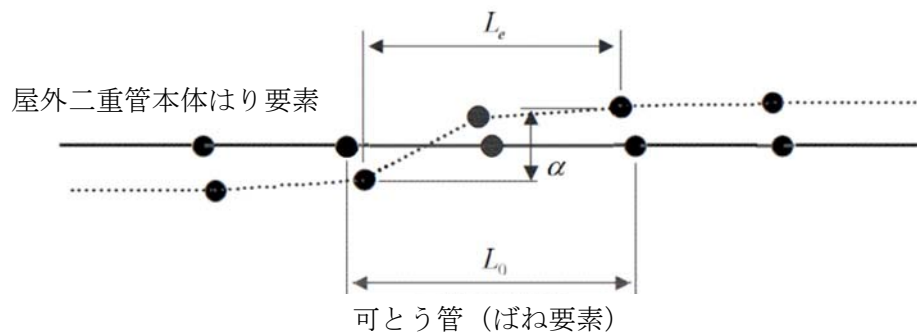
1.3.2 可とう管部の伸縮量及び偏心量

図 1.3-3 に応答変位法の結果を用いた可とう管の変位量の算定方法を示す。

伸縮量 $\delta = L_0 - L_e$

偏心量 $\varepsilon = \alpha$

- L_0 : 初期の可とう管面間寸法 (mm)
- L_e : 地震時の可とう管面間寸法 (mm)
- α : 地震時の偏心量 (mm)



実線 : 初期のはり要素

破線 : 地震時のはり要素

(屋外二重管本体の管軸方向の応力解析モデル)

図 1.3-3 管軸方向の応答変位法の結果を用いた変位量の算定方法

1.3.3 可とう管の許容値

可とう管の伸縮量及び偏心量の許容値を表 1.3-1 に示す。

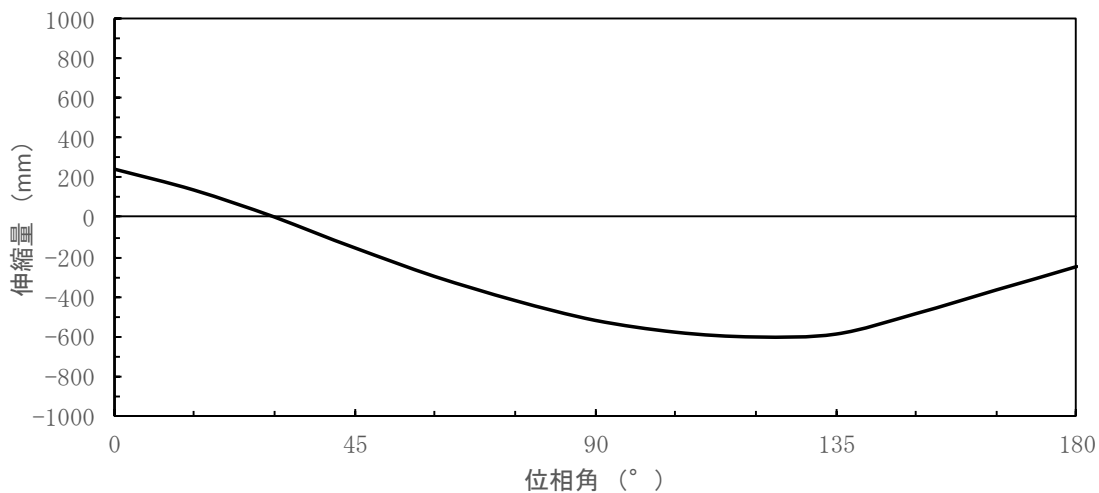
表 1.3-1 可とう管の伸縮量及び偏心量の許容値

	伸縮量	偏心量
許容値 (mm)	800	1000

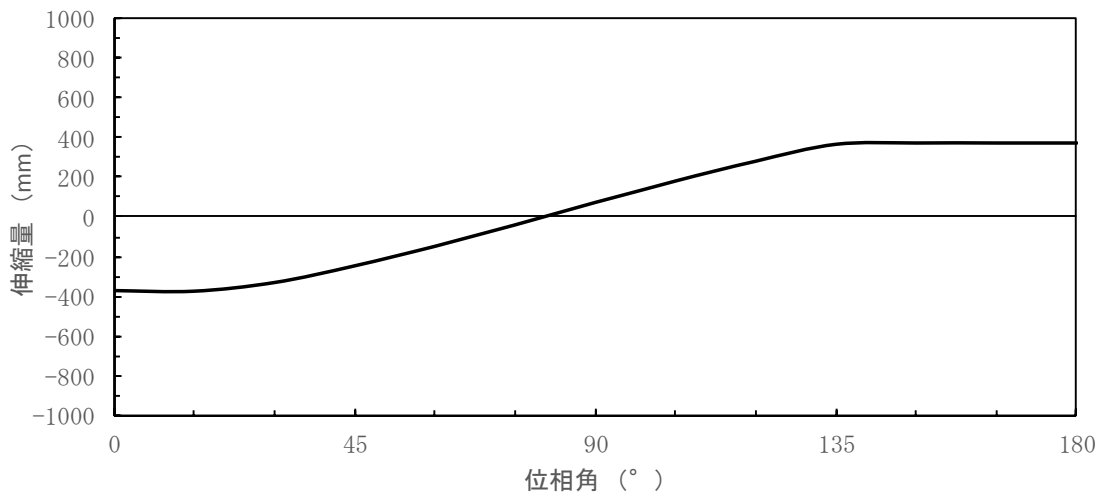
1.4 評価結果

1.4.1 伸縮量

図 1.4-1 に海水ポンプ室側及び止水壁側にて生じる伸縮量を示す。本図は、縦軸に伸縮量、横軸に入力変位の位相をとったものである。



止水壁側伸縮量



海水ポンプ室側伸縮量

図 1.4-1 可とう管の伸縮量

(参考)3-1-4

1.4.2 偏心率

図 1.4-2 に海水ポンプ室側及び止水壁側にて生じる偏心率を示す。本図は、縦軸に偏心率、横軸に入力変位の位相をとったものである。

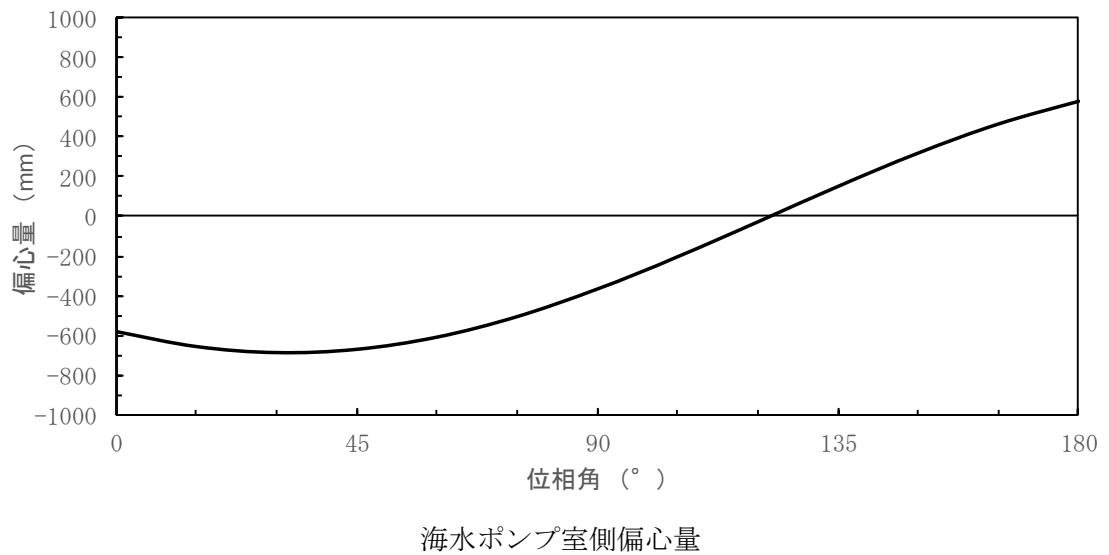
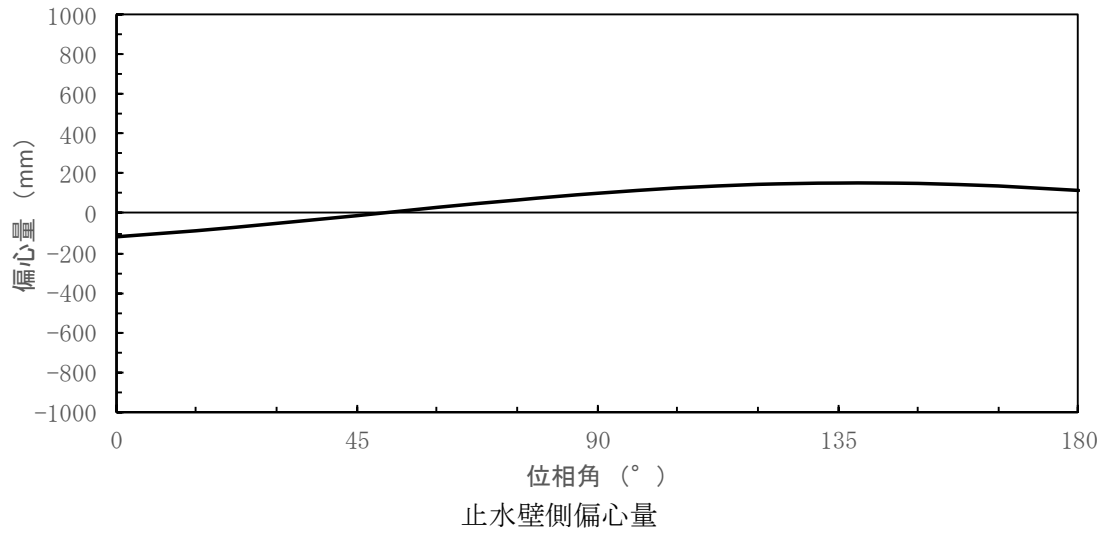
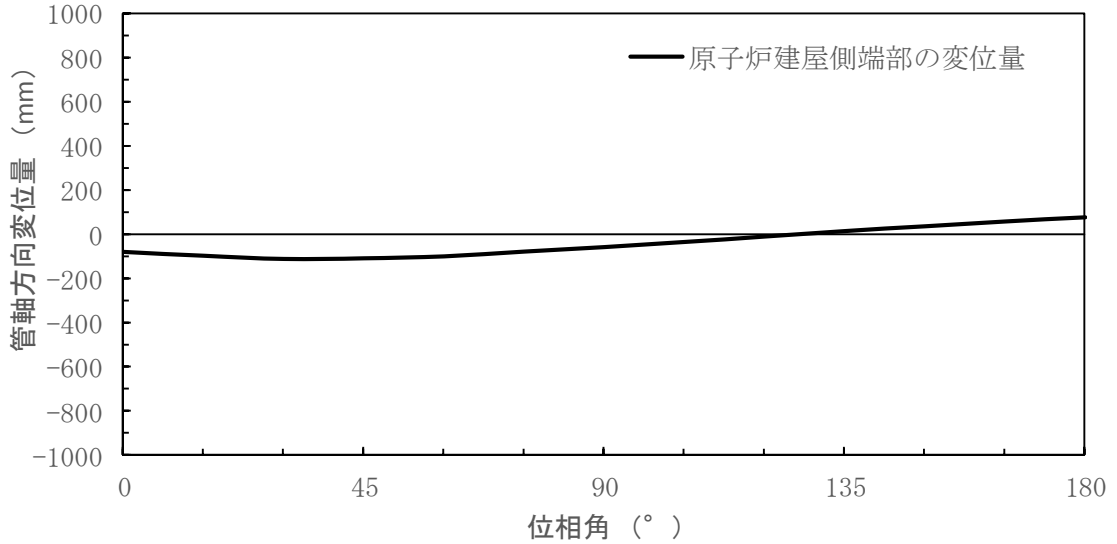


図 1.4-2 可とう管の偏心率

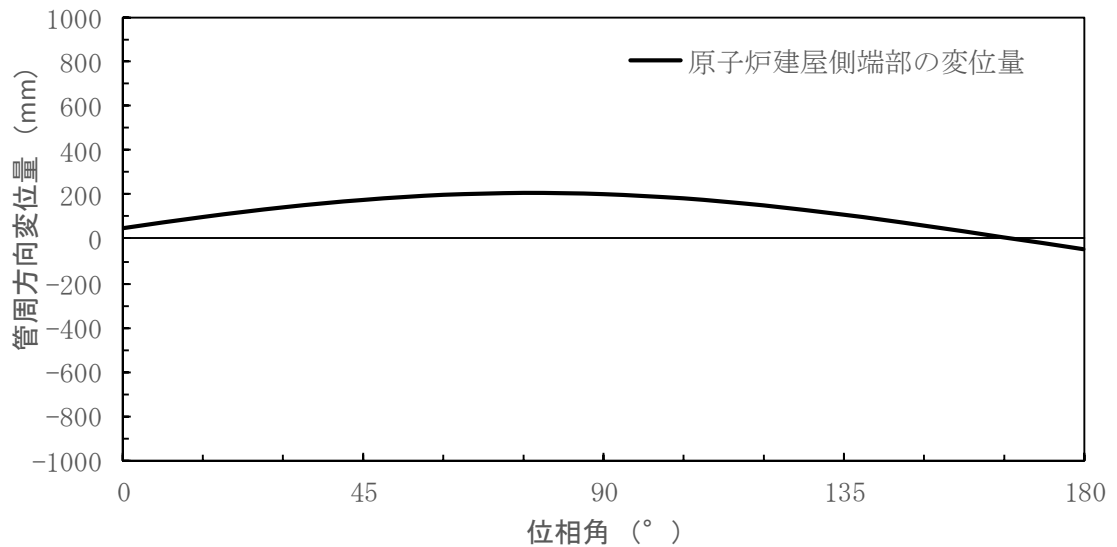
(参考)3-1-5

1.4.3 原子炉建屋側端部

図 1.4-3 に原子炉建屋側端部における伸縮量及び偏心量を示す。本図は、縦軸に伸縮量及び偏心量、横軸に入力変位の位相をとったものである。



原子炉建屋端部における管軸方向変位量



原子炉建屋端部における管周方向変位量

図 1.4-3 原子炉建屋側端部における伸縮量及び偏心量

(参考)3-1-6

1.4.4 まとめ

表 1.4-1 に、可とう管の伸縮量及び偏心量に対する評価結果を示す。同表より、屋外二重管本体に生じる伸縮量及び偏心量は、可とう管にて十分吸収できることを確認した。また、表 1.4-2 に原子炉建屋側端部における伸縮量及び偏心量の最大発生値を示す。

表 1.4-1 伸縮量及び偏心量に対する評価結果

	屋外二重管本体	①最大発生値 (mm)	②許容限界 (mm)	①/②
伸縮量	止水壁側	604	800	0.76
	海水ポンプ室側	377		0.48
偏心量	止水壁側	156	1000	0.16
	海水ポンプ室側	684		0.69

表 1.4-2 原子炉建屋側端部における変位量

	最大発生値 (mm)
管軸方向	113
管周方向	210

2. 杭基礎構造部に適用する地盤条件の妥当性について

2.1 概要

3.9.1「地盤ひずみ」において述べた杭基礎構造部すべてをB-B断面杭基礎構造部で代表させることの妥当性を検討した。

2.2 評価方針

杭基礎構造部について、B-B断面とC-C断面を比較すると、B-B断面の地盤ひずみの方が大きく、また、海水ポンプ室から止水壁近傍までの大部分はB-B断面であるため杭基礎構造部の地盤条件を代表とすることは妥当であると考えられる。

一方で、屋外二重管本体に加わる荷重の観点では、必ずしも地盤ひずみが大きい方が厳しい評価結果となるとは限らないことから、C-C断面杭基礎構造部の地盤条件を適用した場合においても屋外二重管本体に発生する応力が短期許容応力度以下となることを確認する。

2.3 評価条件

評価に用いるC-C断面杭基礎構造部の地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値を表 2.3-1 に示す。また、最大応答変位 U_0 と波長 L は表 3.9-1 (2)「地盤の最大ひずみ (C-C断面杭基礎構造物)」記載の「S s -D1 (--) (豊浦標準砂)」の値を用い、解析モデルは図 3.7-10「屋外二重管本体の解析モデル図」と同様とした。なお、入力地震動の位相ピッチは 45° とした。

表 2.3-1 C-C断面杭基礎構造部の応力解析に用いる
地盤反力係数及び地盤反力係数の上限値

基準地震動	地盤反力係数 (kN/m^3)	地盤反力係数の上限値： τ_f (kN/m^2)
S s -D1 (--)	1.004×10^2	1.501×10^{-1}

2.4 評価結果

C-C断面杭基礎構造部の地盤条件とした場合に屋外二重管本体に発生する応力を図 2.4-1 及び表 2.4-1 に、可とう管部の伸縮量と偏心量を図 2.4-2 及び表 2.4-2 に示す。

表 2.4-1 管軸方向の応力解析結果（C-C断面杭基礎構造部）

管周方向	管軸方向		合成応力 σ (N/mm ²)	許容限界 σ_a (N/mm ²)	σ / σ_a
曲げ応力 σ_c (N/mm ²)	曲げ応力 σ_L (N/mm ²)	せん断応力 τ_s (N/mm ²)			
5	81	3	84	235	0.36

表 2.4-2 伸縮量及び偏心量に対する評価結果（C-C断面杭基礎構造部）

	屋外二重管本体	①最大発生値 (mm)	②許容限界 (mm)	①/②
伸縮量	止水壁側	108	800	0.14
	海水ポンプ室側	39		0.05
偏心量	止水壁側	229	1000	0.23
	海水ポンプ室側	353		0.36

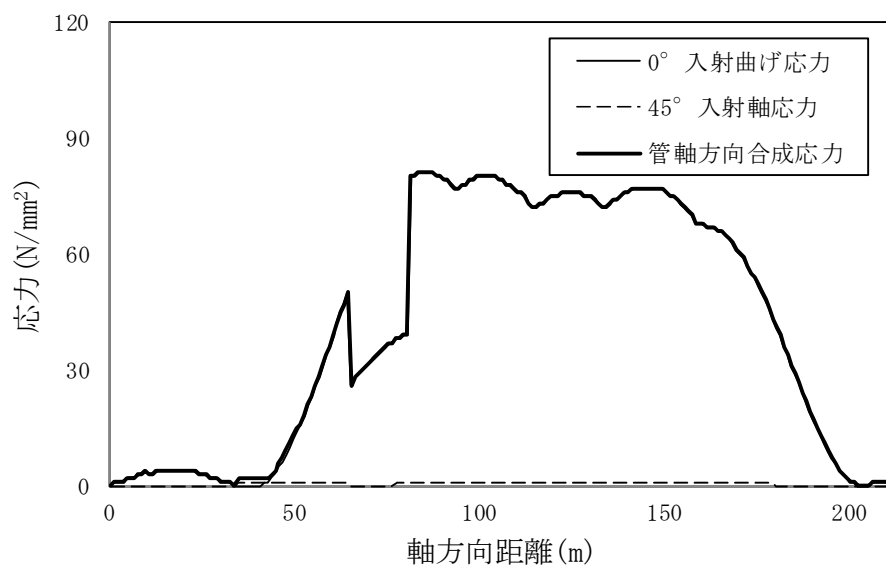
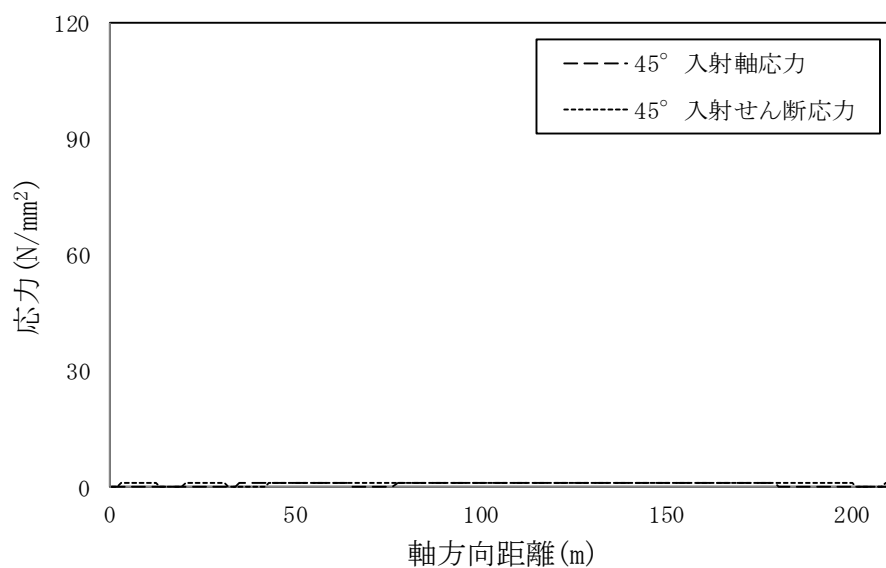
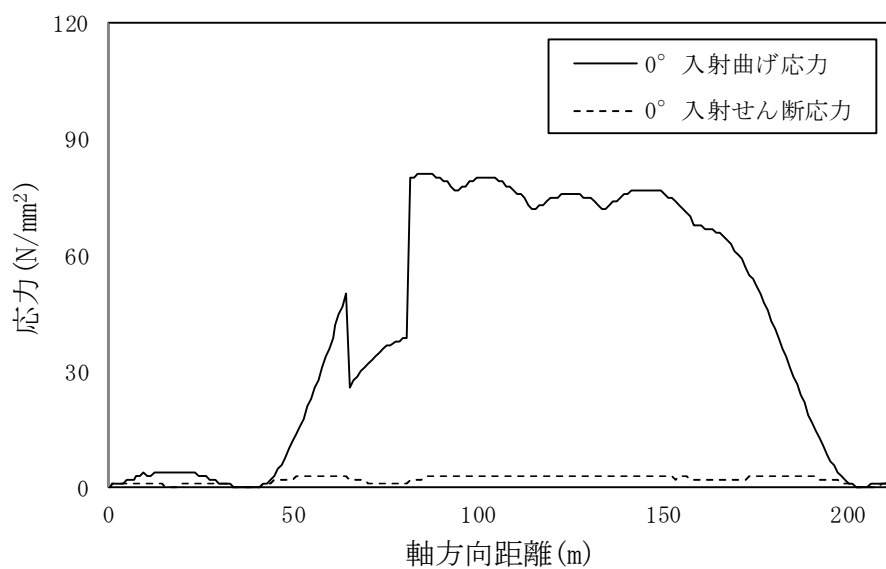


図 2.4-1 管軸方向の応力解析結果 (C-C断面杭基礎構造部)
(参考)3-2-3

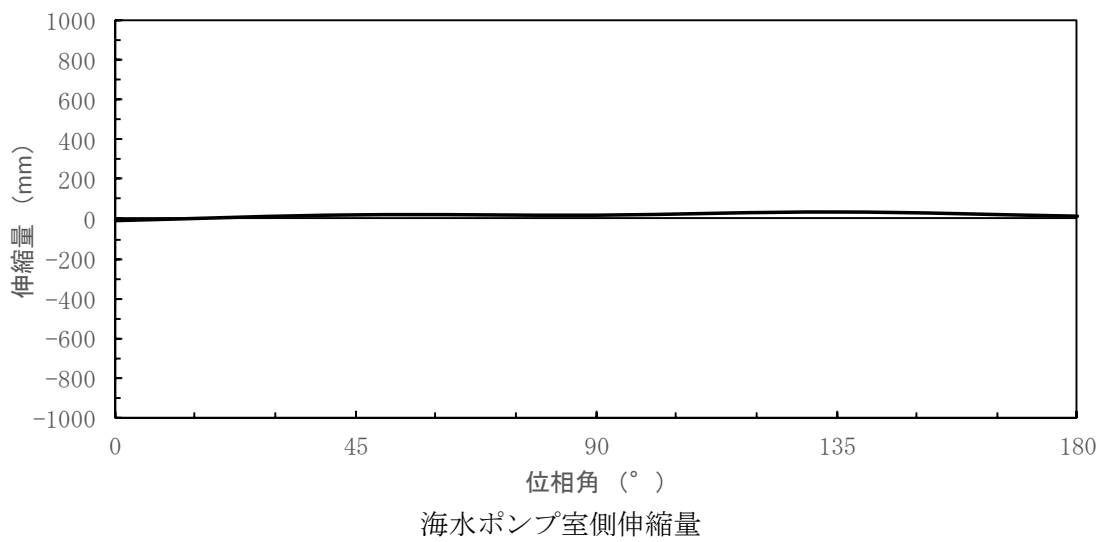
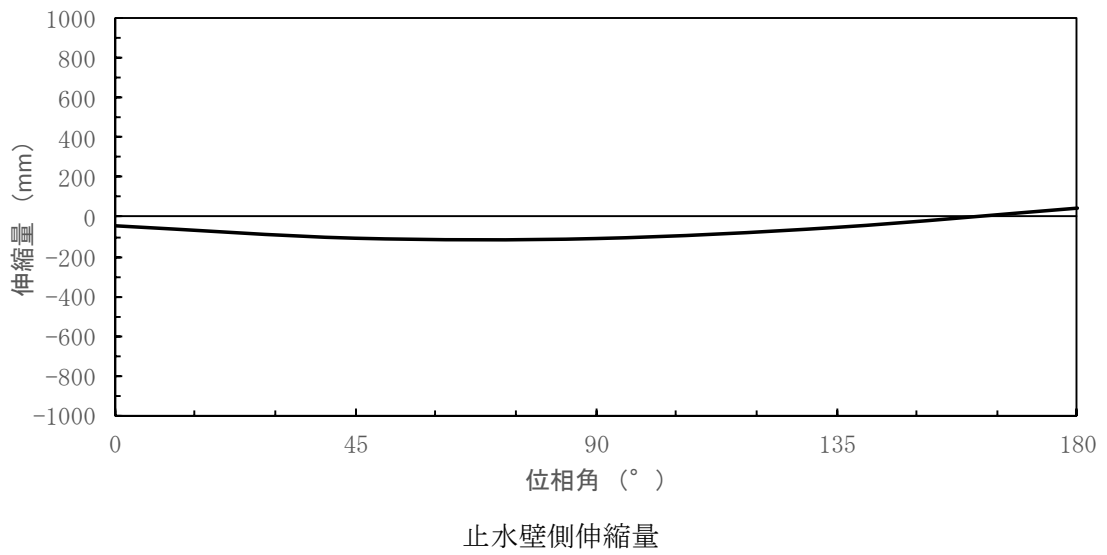
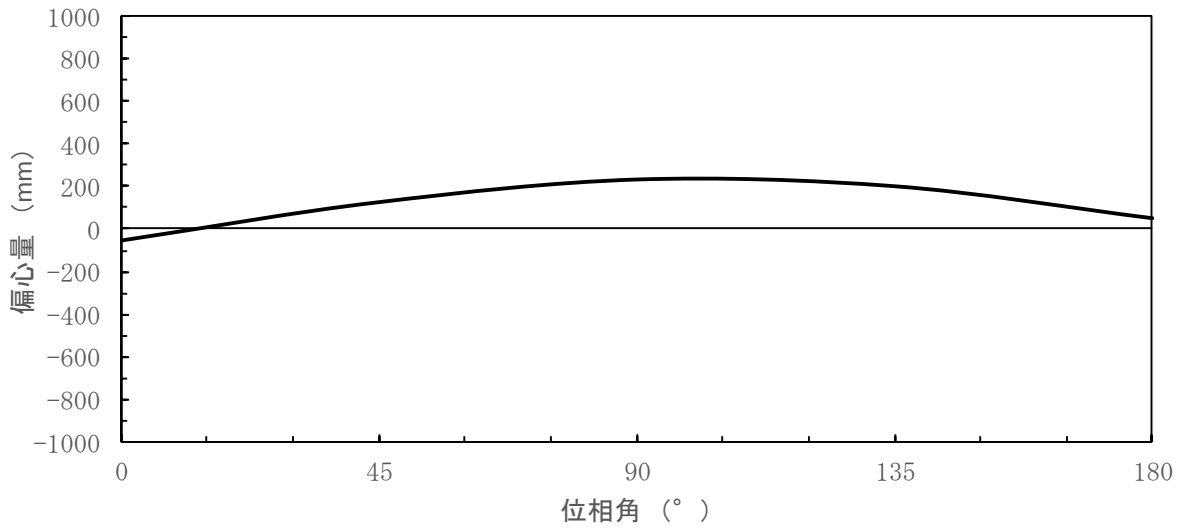
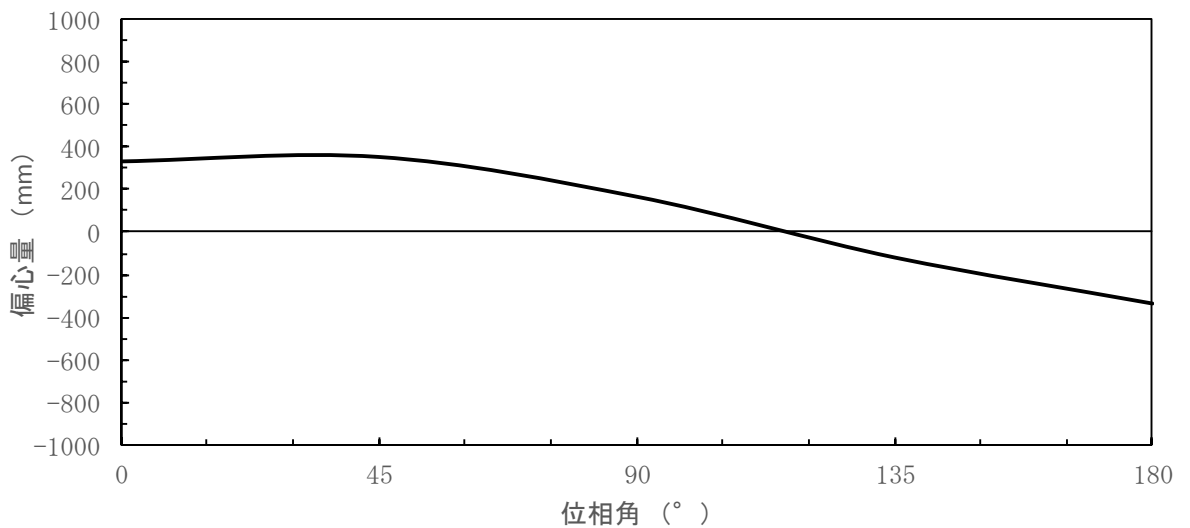


図 2.4-2 (1) 可とう管の伸縮量と偏心量

(参考)3-2-4



止水壁側偏心量



海水ポンプ室側偏心量

図 2.4-2 (2) 可とう管の伸縮量と偏心量

(参考)3-2-5

2.5 まとめ

表 2.4-1 に示すとおり，合成応力はC-C断面杭基礎構造部の方が僅かに大きい結果となるが，許容限界に対しては十分な裕度があることを確認した。また，表 2.4-2 に示すとおり，可とう管部の伸縮量及び偏心量についてはB-B断面杭基礎構造部の方がどちらも大きくなる。従って，海水ポンプ室から止水壁近傍までの地盤条件をB-B断面杭基礎構造部の地盤条件で代表することは妥当であると考ええる。