

S F 二重殻タンクにかかる土圧等の影響に
関する調査検討報告書

平成25年3月

危険物保安技術協会

はじめに

S F 二重殻タンクは、平成 5 年 7 月の法令改正において設置することができるようになった地下貯蔵タンクの一形態であり、鋼製の地下貯蔵タンクの外面に間隙を有するようにFRPを被覆するとともに、危険物の漏れを検知することができる措置が講じられている。

平成 1 7 年 4 月から、外面保護を施された鋼製の地下貯蔵タンクは地盤面下に直接埋設することはできなくなったが、S F 二重殻タンクは、地盤面下に直接埋設することから、地下貯蔵タンクの設置基数が減少していく状況下においてもその設置数は年々増加している。

しかしながら近年、S F 二重殻タンクの増加に伴い、外殻FRPが破損する事例が数々報告されるようになった。

外殻FRP鏡部に生じた破損事例については、平成 2 2 年度から調査してきたが、タンク基礎への据付け方法により割れの状況に特徴が出ているようである。

そこで今年度は、有限要素法による応力解析を用いてタンクが実際に埋められている状態の土圧を評価し、その土圧の値を入力荷重としてタンクへ反映させることにより、外殻FRP鏡部に生じた特異的な割れの原因を究明するとともに、割れの発生への抑止対策についても検討し、報告書として取りまとめた。

本報告書のとりまとめにあたっては、ご多忙中にもかかわらず、調査研究に積極的に参画され、貴重な意見をいただいた委員各位の熱意が大きく、深く感謝を申し上げる次第である。

平成 2 5 年 3 月

S F 二重殻タンクにかかる土圧等の
影響に関する調査検討会

委員長 影山 和郎

目 次

第1章	調査検討の概要	1
1.1	調査検討の目的	1
1.2	調査検討事項及び調査検討フロー	1
1.3	調査検討体制	2
1.4	調査検討経過	2
第2章	S F 二重殻タンクの外殻の安全性向上対策に係る調査検討	3
2.1	S F 二重殻タンクの外殻破損事例調査	3
2.2	破損したS F 二重殻タンクの現地掘上調査	5
2.3	掘上調査を行ったタンクに対する実証実験の実施	6
2.4	有限要素法を用いた応力解析及び実証実験に対する検証実験の実施	7
第3章	有限要素法を用いた応力解析	8
3.1	周辺土壌の応力解析	8
3.2	周辺土壌の土圧を考慮したタンクに係る応力解析	19
第4章	まとめ	32
4.1	特異的な割れの原因究明	32
4.2	割れの発生への抑止対策	32
参考資料1	タンク破損概要一覧表	35
参考資料2	S F 二重殻タンクの解析(有限要素法を用いた応力解析)	41

第1章 調査検討の概要

1. 1 調査検討の目的

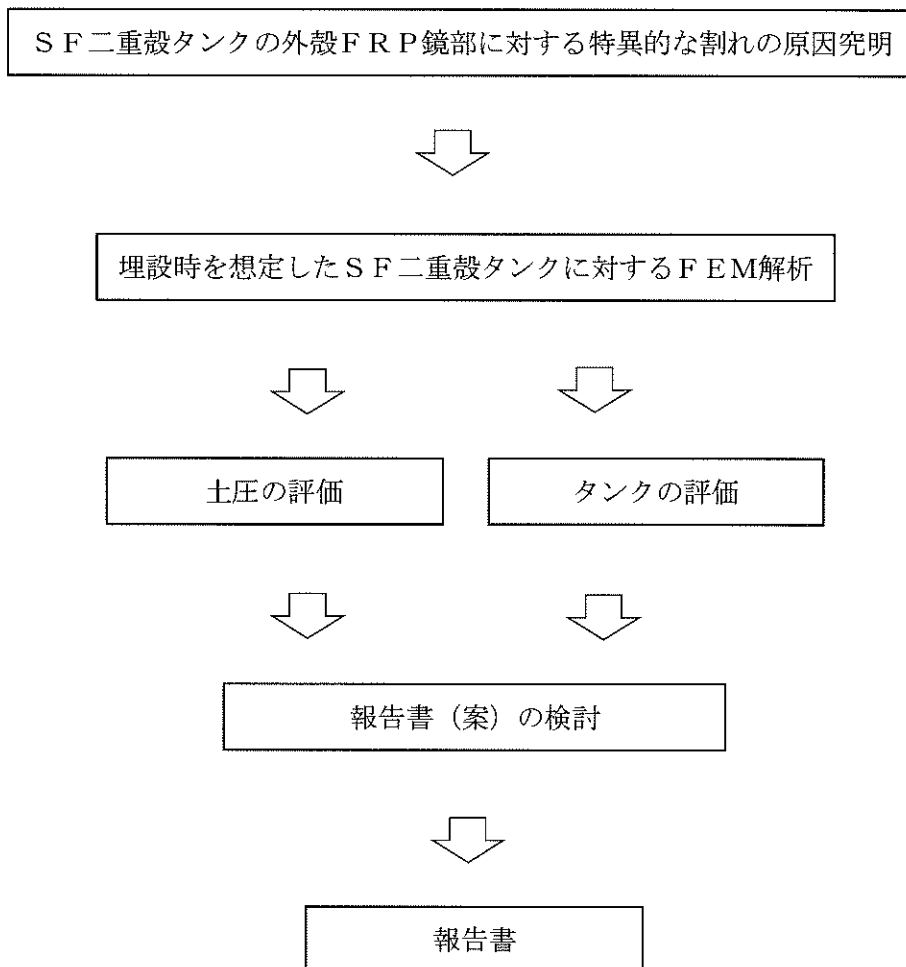
検討会は、鋼製強化プラスチック製二重殻タンク（以下「SF二重殻タンク」という。）が実際に埋められた状態で、土圧が外殻FRPに及ぼす影響について有限要素法による応力解析（以下「FEM解析」という。）を用いて分析するとともに、SF二重殻タンク鏡部に生じた特異的な割れの原因を究明することを目的とする。

1. 2 調査検討事項及び調査検討フロー

(1) 調査検討事項

- ア SF二重殻タンク設置時と同じ条件での土圧等を想定したFEM解析
- イ SF二重殻タンク鏡部に生じた特異的な割れの原因の究明

(2) 調査検討フロー



1. 3 調査検討体制

本検討会の構成は以下のとおりである。(順不同、敬称略)

委員長	影山 和郎	東京大学大学院工学系研究科教授
委員	宮入 裕夫	元東京電機大学工学部機械工学科教授
委員	久保内昌敏	東京工業大学大学院理工学研究科教授
委員	三浦 宏	消防庁危険物保安室課長補佐
委員	西 晴樹	消防庁消防研究センター火災災害調査部原因調査室長
委員	越谷 成一	川崎市消防局予防部危険物課長
委員	山本 平	財団法人エンジニアリング協会
委員	金城喜美彦	日本SF二重殻タンク協会事務局長
委員	澤田 良穂	日本SF二重殻タンク協会
委員	今中 剛	石油連盟
委員	木元 和夫	全国石油商業組合連合会環境・安全対策グループ長
委員	古河 大直	財団法人全国危険物安全協会業務部長
委員	川田 等	危険物保安技術協会企画部長
委員	和田 正彦	危険物保安技術協会業務部上席調査役
委員	八木 高志	危険物保安技術協会土木審査部上席調査役
事務局	松浦 晃弘	危険物保安技術協会企画部企画課長
事務局	村上 明伸	危険物保安技術協会企画部調査役
事務局	田崎 幹夫	危険物保安技術協会企画部企画課課長代理
事務局	大塚 健二	危険物保安技術協会土木審査部土木審査課主任検査員
事務局	山本 真靖	危険物保安技術協会企画部企画課検査員

1. 4 調査検討経過

本検討会の開催経過は、次のとおりである。

[検討会]

第1回	平成24年7月18日
第2回	平成25年1月28日
第3回	平成25年2月28日

第2章 SF二重殻タンクの外殻の安全性向上対策に係る調査検討

今年度の検討会は、有限要素法による応力解析（以下「FEM解析」という。）を用いて実際にタンクが埋められた状態の土圧を評価し、その結果をタンクへ反映させることにより、外殻FRP鏡部に生じた特異的な割れの原因を究明することを目的として進めてきたが、SF二重殻タンクの破損事例についての検討は、平成22年度から実施してきた。

平成22年度から昨年度まで実施してきたSF二重殻タンクの外殻の安全性向上対策に係る調査検討結果については、平成24年3月、「SF二重殻タンクの外殻の安全性向上対策に係る調査検討報告書」でまとめたが、平成22年度からの検討は今年度の検討会の検討事項についての関連性があることから、その調査検討内容について簡単に説明する。

2.1 SF二重殻タンクの外殻破損事例調査

近年、SF二重殻タンクの増加に伴い、外殻FRPの破損事故が数々報告されてきたことから、危険物保安技術協会では、平成22年度に全国802の消防機関の協力を得て、破損事例調査を実施した。その結果、62件の破損事例が報告された（参考資料1参照）。

平成22年度の検討会では62事例のうち、外殻FRP鏡部に破損が生じた9事例に着目し、その破損原因を調査する方向で進めてきた。

その結果、割れについてはタンク基礎への据付け方法により以下の特徴があることが判明した。

(1) タンク基礎への据付け方法別による外殻FRP鏡部の割れの特徴

ア コンクリート枕工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴

9事例のうちタンク基礎への据付け方法において、コンクリート枕工法による外殻FRP鏡部の破損は5事例発生した。

割れの特徴は、1～3本の亀裂が横方向やY字又はL字型に発生していたことである。（図2.1参照）

イ 鋼製枕及びゴムマット工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴

一方、鋼製枕及びゴムマット工法（以下、「直置き工法」という。）による外殻FRP鏡部の破損は4事例発生していた。

割れの特徴は、約30cm～約50cmの1本の亀裂が、タンク下部のゴムマットに接している箇所から、タンク上方に向かって発生していたことである。

（図2.2参照）

(2) その他

タンク基礎への据付け方法により生じた特異的な割れの原因究明については、平成23年度の検討会での検討課題となっていた。

No.	内径 (mm)	全長 (mm)	全容量 (kt)	室数 各容量 (kt)	基礎への 据付方法	板厚 (mm)		L (mm)	埋設土砂	地下水	傷の発生状況			タンク設置から異常確認までの期間	破損原因
						鏡板	胴板				傷の発生位置	亀裂進行方向	傷の状況		
8	2,100	10,016	30	ストレート	コンクリート枕	9	8	1,192	川砂	低	中央胴接合部付近	2方向	胴部と鏡部接合部から鏡部中央方向へ長さ75cmの亀裂(高さ位置中央)	15年	・設置状況下の外的圧力 ・定期点検時の過加圧 他
19	2,100	10,016	30	2室 10.20	コンクリート枕	9	8	992	山砂	低	上部中央	3方向	鏡板上部に長さ約18cmのY字型亀裂(高さ位置中央より上部)	9年	・亀裂箇所付近の石 他
22	2,100	6,968	20	2室 6.14	コンクリート枕	9	8	1,544	不明	高変動大	下部胴接合部付近	横方向	鏡板の胴との境付近に3箇所亀裂(高さ位置下部)	6年	・地下水の繰り返し変動 ・加圧試験 他
23	2,100	10,016	30	ストレート	コンクリート枕	9	8	1,192	山砂	高	下部胴接合部付近	横方向	鏡板の胴境界付近から中央部にわたり長さ30cmの亀裂(高さ位置中央より下部)	14年	不明
35	2,100	10,016	30	ストレート	コンクリート枕	9	8	992	山砂	高変動大	下部	3方向	鏡下部にI字型の亀裂(横約20cm、縦約30cm)	6年	・亀裂箇所付近の石 他

注記) L: 破損鏡板側の胴端部から固定バンドまでの距離

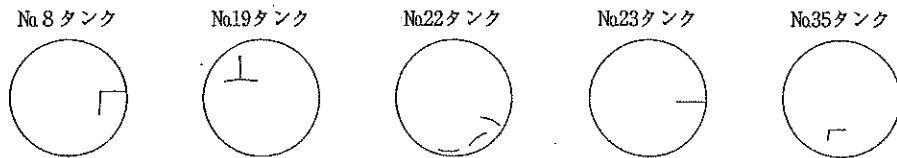


図 2. 1 コンクリート枕工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴

No.	内径 (mm)	全長 (mm)	全容量 (kt)	室数 各容量 (kt)	基礎への 据付方法	板厚 (mm)		L (mm)	埋設土砂	地下水	傷の発生状況			タンク設置から異常確認までの期間	破損原因
						鏡板	胴板				傷の発生位置	亀裂進行方向	傷の状況		
9	2,100	10,016	30	2室 20.10	鋼製枕	9	8	1,192	碎石	低	下部胴接合部付近	縦方向	胴部と鏡部接合部付近から鏡部中央方向へ長さ30cmの亀裂(高さ位置下部)	9年	・亀裂箇所付近の石 ・鋼製枕の使用 他
10	2,100	10,016	30	ストレート	鋼製枕	9	8	1,192	不明	低	下部胴接合部付近	縦方向	胴部と鏡部接合部の下部付近から鏡部中央方向へ長さ30cmの亀裂(高さ位置下部)	2年	・石の混入 他
30	2,400	7,600	30	ストレート	ゴムマット工法	9	8	649	山砂	低	下部胴接合部付近	縦方向	タンク下部の胴と鏡の境界部に、胴から鏡にかけて長さ約100mmの亀裂	6年	不明
62	2,100	10,016	30	ストレート	鋼製枕	9	8	1,225	山砂	低	下部胴接合部付近	縦方向	鏡下部に縦方向に長さ約50cmの亀裂	3年	・鋼製枕の使用 他

注記) L: 破損鏡板側の胴端部から固定バンドまでの距離

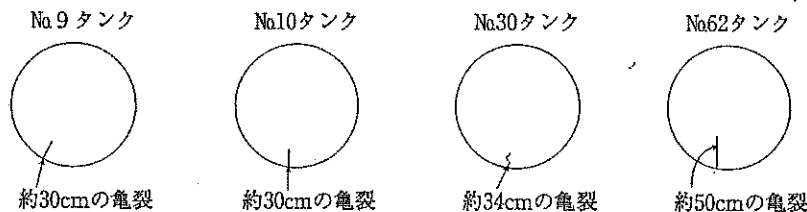


図 2. 2 直置き工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴

2. 2 破損したSF二重殻タンクの現地掘上調査

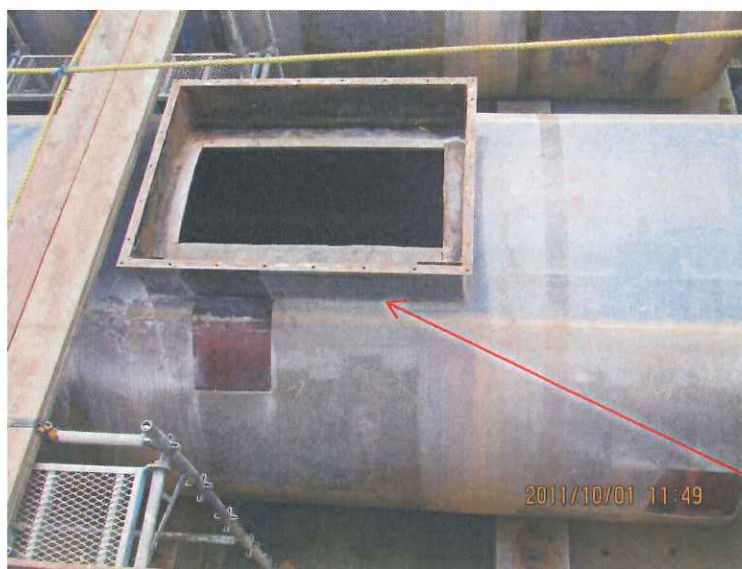
前節で述べたとおり、平成23年度の検討会は、タンク基礎への据付け方法により生じた特異的な割れの原因の究明について検討する予定であったが、平成23年3月、福岡県の九州自動車道広川SAのガソリンスタンドの4基すべてのSF二重殻タンクの外殻FRP鏡部が何らかの原因で破損したとの報告があった。このタンクは廃止する予定で、掘り上げての調査が可能であったことから、このタンクの破損事故の原因を究明することは、本検討会にとって非常に有意義なものになるとの判断から、広川SAの調査を最優先して実施することとなった。

破損したSF二重殻タンクの現地掘上調査の結果、4基とも破損部位は外殻FRP鏡部ではなく、密着層の幅が約50mmと極端に狭かったことにより、密着層とタンク本体との密着性が不足していたこと等によるタンクプロテクタ部上部の剥離と判明した。

(写真2. 1及び2. 2参照)



写真2. 1 プロテクタ部上部からの漏れ



タンクプロテクタまでの
密着層の幅は約50mm

写真2. 2 タンクプロテクタの密着層

2. 3 掘上調査を行ったタンクに対する実証実験の実施

前節のとおり、調査の結果、検討会が予想した鏡部の破損ではなかったことから、視点を変え、FRPの強度についての実証実験を実施した。これは、調査した4基うちの1基を使用して、鏡部の外殻FRPと内殻がどのくらいの間隙及び外圧で破壊に至るかを調査したものである。

(1) 実験の概要

図2. 3の実験装置を作り、外殻FRPが破壊に至るまで、外殻FRPと内殻の間隙及び窒素ガスによる外圧を徐々に上げていく実証実験である。

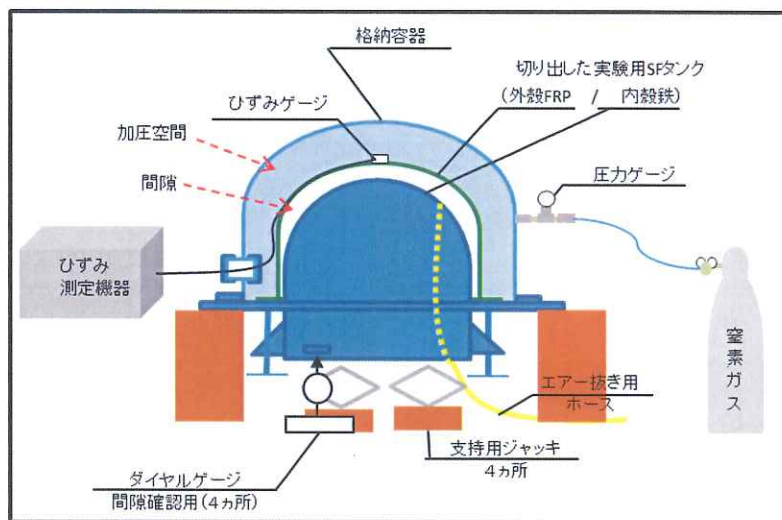


図2. 3 実験装置の概要

(2) 実験の結果

外殻FRPと内殻の間隙を50mm、外圧を70KPaとした時点で外殻FRPは破壊に至った。(写真2. 3参照)

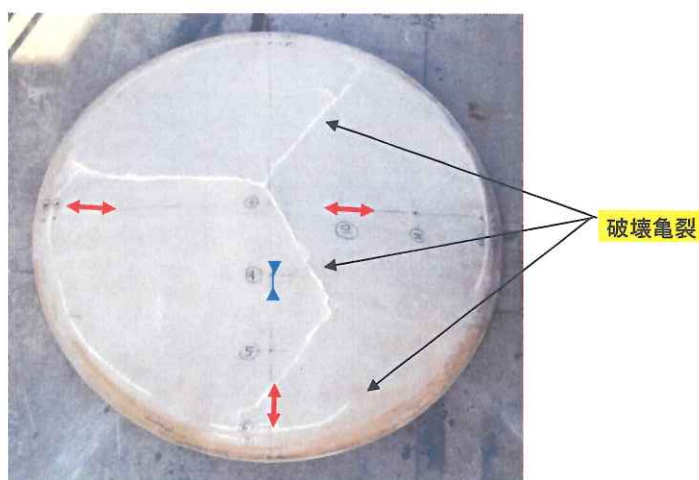


写真2. 3 外殻FRPの破壊状況

写真2. 3は、実験時に設置したひずみゲージ(計13個設置)のうち、特に大きなひずみ(6000 $\mu\epsilon$ 以上)を継続して検出したひずみゲージの位置を示したものの

である。図中の矢印は引張応力を赤、圧縮応力を青としている。大きなひずみは、鏡部の中心部より放射線状に検出されており、これらゲージのうち、いずれかのゲージの近傍から、脆性破壊が起こり亀裂に至ったものと推定される。

2. 4 有限要素法を用いた応力解析及び実証実験に対する検証実験の実施

前節での実証実験の妥当性を検証するため、FEM解析を実施した。

上述の実験で得られたパラメーター等の値を用いて、同様の条件によりFEM解析を行った最終結果を図2. 4に示す。

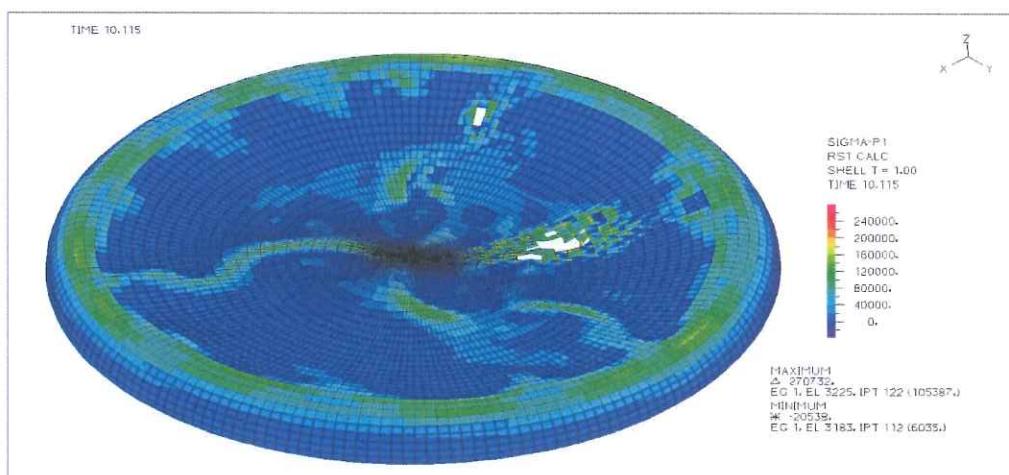


図2. 4 計算が収束した外面（鏡部）FRPにかかる応力*の最終結果

※ 図上部のコンター図において、白色のセルについてはひずみが大きく、図中に表示できなかった部分を示す。

これらのことから、外殻FRPが外側から受ける応力としては、鏡部外縁部（いわゆる「ふち」の部分）が最も大きく、それが中心部へと伝わり亀裂に至ったものと推定され、その結果は、写真2. 3に示した実際のSF二重殻タンクの鏡部での実験結果とも整合している。

しかしながら、実験条件として、どちらの場合も鏡部全面に一律な圧力を付加していることや、土中に埋設した際の土圧の影響及びタンクを据え付ける枕の影響等を考慮していないことなどから、平成24年度では、検討項目として実際の埋設状況を想定したFEM解析を実施し、タンク基礎への据付け方法で生じる外殻FRP鏡部の特異的な割れの原因究明を目的とした検討を行うこととした。

第3章 有限要素法を用いた応力解析

第2章で述べてきたとおり、昨年度では一様な外的応力に対する地下貯蔵タンクの構造的特性や埋設時における一般的な応答特性について解析を行ったが、周辺土壌の土圧は考慮していない。

したがって今年度の検討会では、タンクの周辺土壌の応力解析及び周辺土壌の土圧を考慮したタンクにかかる応力解析を実施することにより、平成22年度から調査してきた、タンク基礎への据付け方法により生じる外殻FRP鏡部の特異的な割れの原因の究明を検討課題とした。

なお、特異的な割れの原因究明を行うため、①コンクリート枕使用時、②直置きの場合について解析を行うこととする。

なお、解析の流れは、土圧評価で算定したタンク周辺の土圧（タンク表面法線方向応力）を算定し、次に求めた土圧を入力荷重としてタンクのみを対象とした詳細な解析の荷重として用いる。（図3.1参照）

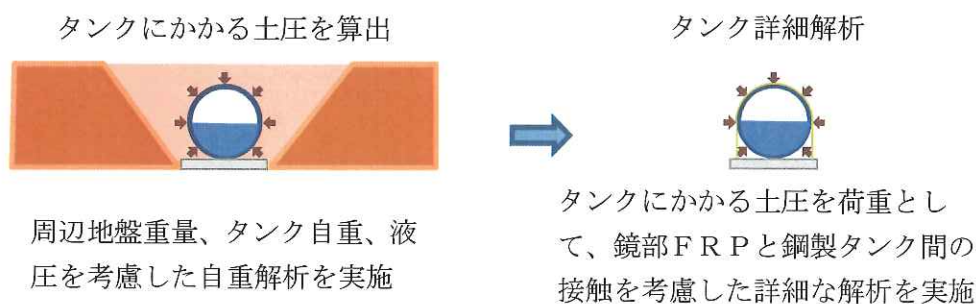


図3.1 解析の流れ

3.1 周辺土壌の応力解析

地下タンク本体が周辺土壌からどのような応力を受けるかを解析し、応力の入力値を設定する必要があることから、SF二重殻タンクの外殻を除いた状態で周辺土壌から受ける応力を求めることにより、周辺土壌からの応力の値を確定させる。

(1) 周辺土壌の応力解析に係る諸条件の設定

ア 土圧解析の対象範囲

土圧解析の対象範囲を図3.2に示す。解析モデルはタンクが対称であるため、図3.2に示すような1/4モデルとした。水平方向の範囲は、応力・ひずみの変動が境界に影響しないようにするために広く取り、埋め戻し範囲から3倍程度の距離の範囲とした。鉛直方向の範囲はタンクより下側の地盤の沈降の影響を避けるためタンク下の基礎スラブまでとする。

解析対象 (1/4 モデル)

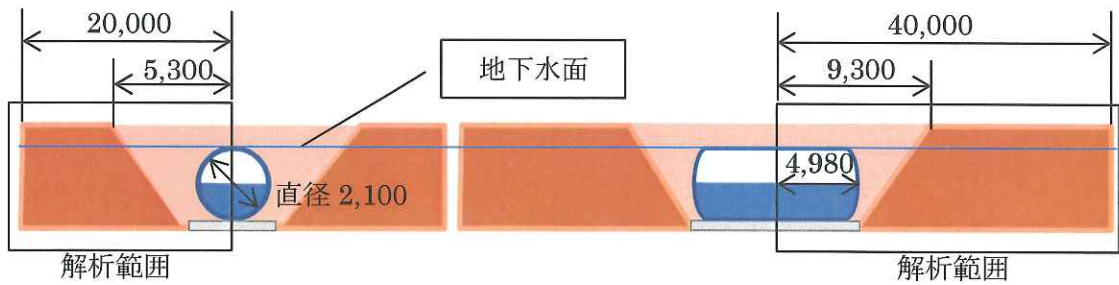


図 3. 2 解析対象 (1/4 モデル 単位[mm])

下部スラブまでをモデル対象とし、周辺地盤の自重による沈下は無視し、埋め戻し前の状態を初期状態として解析を行う。したがって、タンクの自重及び埋め戻し土による沈下の影響だけを考慮する。(図 3. 3 参照)

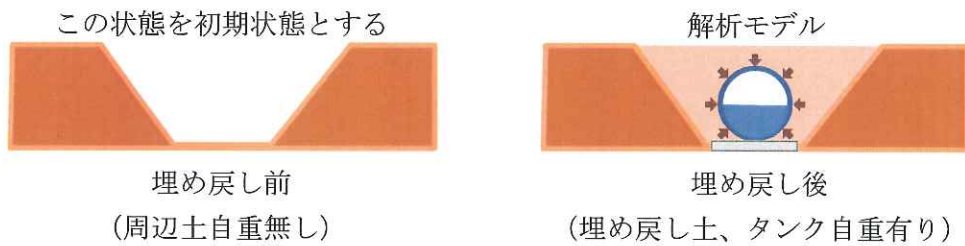


図 3. 3 初期状態と解析モデル

- その他、設定した条件について次に示す (詳細については参考資料 2 に示す)。
- 地盤の変形をしやすいようにするため、上部スラブ及び支柱と地盤を切り離して解析を行う。ただし、支柱表面の節点の変形は、鉛直方向だけとする。
 - 解析モデルでは、静的な土圧を算出することからタンク本体にかかる浮力の影響を排除し、本モデルでは地下水面以下の地盤について、ポアソン比を通常の地盤と同様の 0.35 とし、湿潤重量を用いる事とする。
 - 物性値については、地盤の物性を表 3. 1 に、外殻を除いた鋼製タンク及びスラブ等の物性を表 3. 2 にそれぞれ示す。

表 3. 1 地盤物性

地盤	地盤種	N 値	地下水面以下単位体積重量 [tf/m ³]	地下水面上単位体積重量 ρ [tf/m ³]	変形係数 [kN/m ²]	ポアソン比	
						地下水面以下	地下水面上
埋設土	砂	5	1.95	1.75	14,000	0.35	0.35
周辺地盤	砂	15	—	—	42,000	0.35	0.35
埋設土	砕石	40	2.10	1.90	112,000	0.35	0.35

*変形係数算定式 E=2800×N 値 [kN/m²]

表 3. 2 タンク物性

		厚さ [mm]	単位体積重量 [tf/m ³]	変形係数 E [kN/m ²]	ポアソン比
鋼製タンク (シェル)	鏡部	9	7.85	205,000,000	0.3
	胴部	8	7.85	205,000,000	0.3
基礎 (スラブ) コンクリート製枕			2.447	21,682,000	0.2
ゴムシート			1	28,100	0.499

ウ 解析条件

タンク、周辺土、埋設土 (砂)、埋設土 (採石)、基礎スラブ、支柱、枕を考慮した自重による応力を線形解析により求める。タンク形状を変えた以下の2ケースを実施する。

1. コンクリート枕工法ケース (タンクをコンクリート製枕で支えるケース)
2. 直置き工法ケース (タンクを直置きで支えるケース*)

*直置き工法は鋼製支柱のモデル化は行っておらず、タンク下部ゴムシートのみモデル化している。

解析モデルを図 3. 4～図 3. 8 に示す。解析は 1/4 モデルにより実施した。

タンクからモデル境界まではタンク長さの 3 倍以上の長さを設け、タンク周辺での変位等の影響が境界に及ばないようにしている。なお、タンクとタンク周辺については詳細に要素分割し、タンクから離れるに従って粗い要素分割とした。

(ア) 境界条件

側面：対称条件 (面外変形拘束)

底面：完全拘束

(イ) 荷重条件

タンク内容液による液圧：単位体積重量 0. 7 5 [tf/m³] 高さタンク中央まで

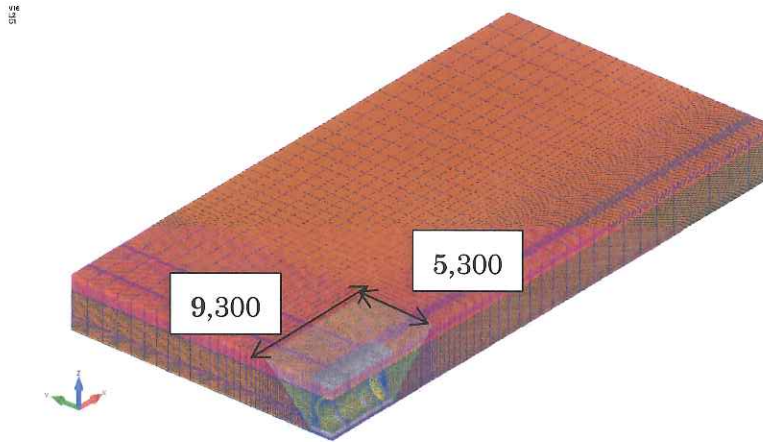


図 3. 4 解析モデル全体図 (単位[mm])

図 3. 4 の解析モデル全体図を、コンクリート枕工法及び直置き工法別に、また埋設土を非表示とした図を示す。(図 3. 5～図 3. 8)

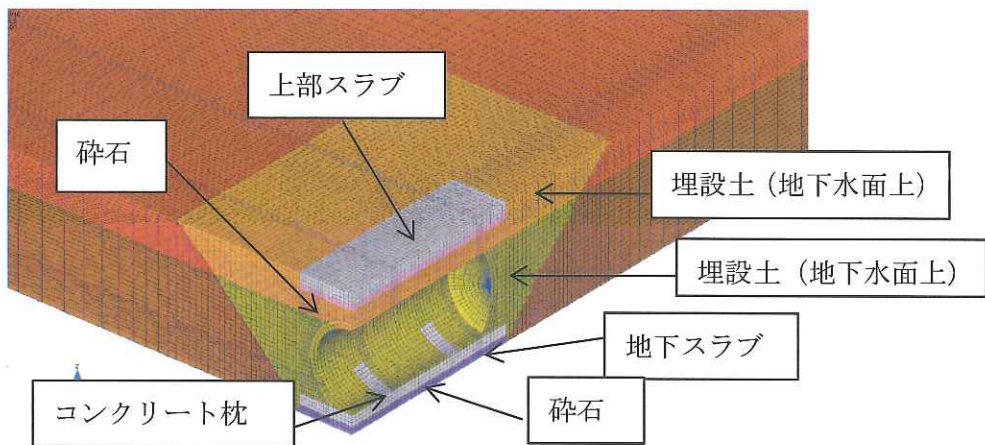


図 3. 5 モデルタンク周辺図 (コンクリート枕工法)

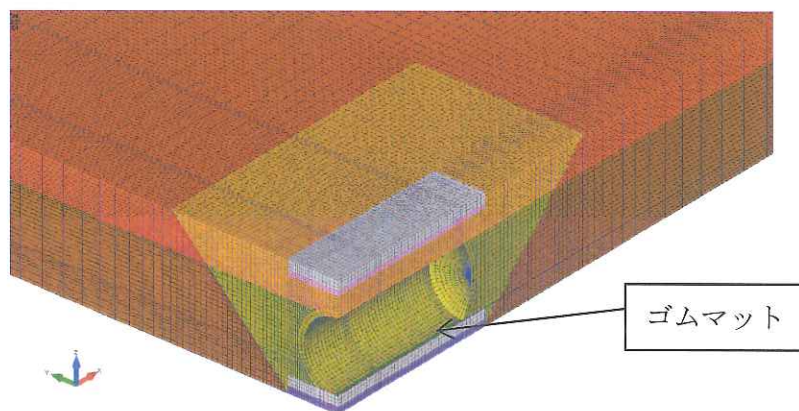


図 3. 6 モデルタンク周辺図 (直置き工法)

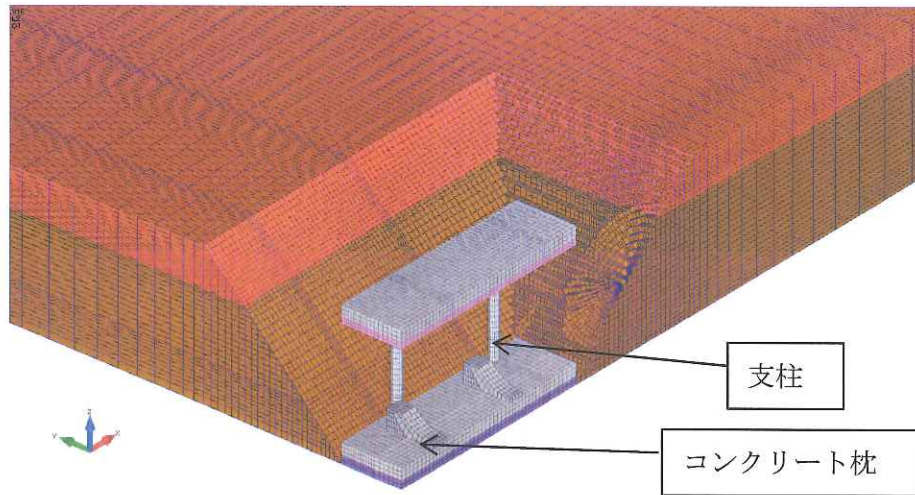


図3. 7 モデルタンク周辺図（コンクリート枕工法、埋設土非表示）

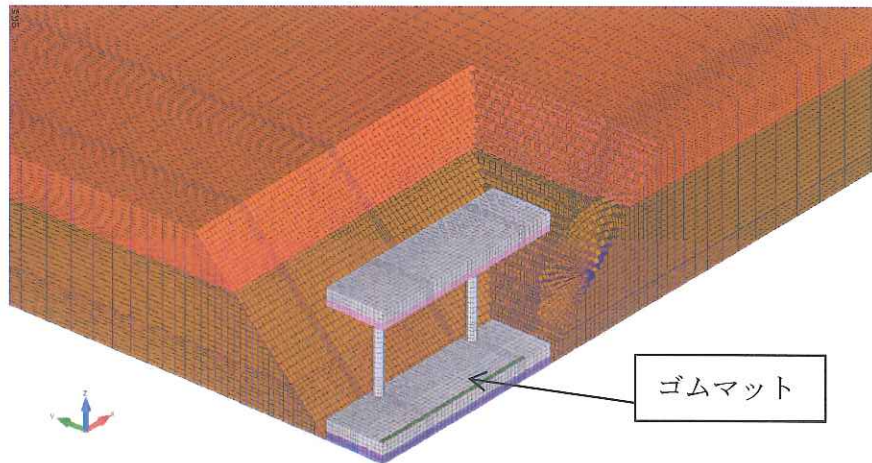


図3. 8 モデルタンク周辺図（直置き工法、埋設土非表示）

(2) 解析結果

解析結果を以下に示す。図3. 9にタンク表面法線方向の応力値グラフの表示位置を示す。

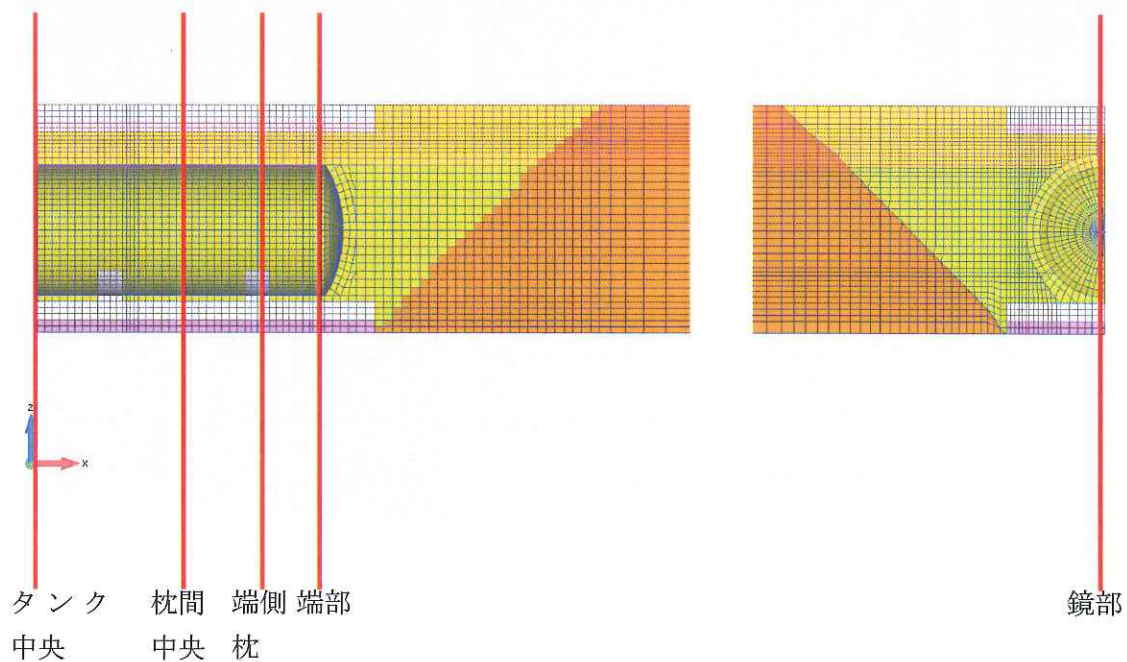


図3. 9 タンク表面方向応力表示位置

ア ひずみ分布

全体からひずみ分布を見てみると、コンクリート枕モデルではコンクリート枕で大きなひずみが発生している。

一方、直置きモデルではタンク底面に幅広くひずみが発生している。
(図3. 10及び3. 11参照)

(*なお、ひずみ分布において、タンク胴部正面及びタンク鏡部正面を見た図は、参考資料2参照)

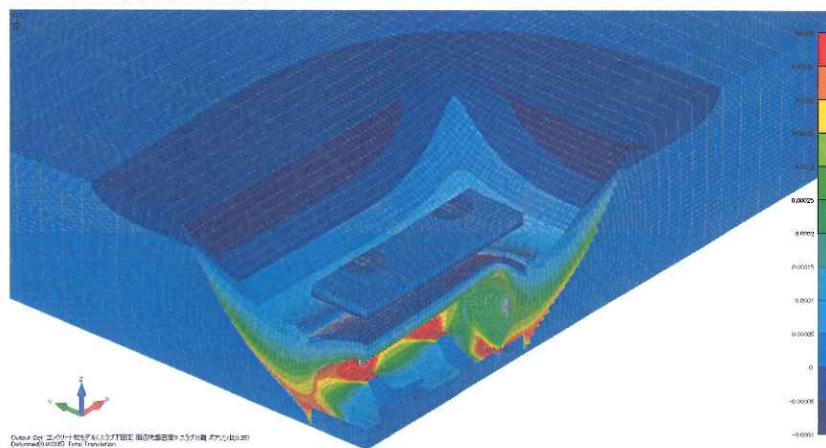


図3. 10 ひずみ分布図 (鳥瞰 コンクリート枕モデル 単位[-])

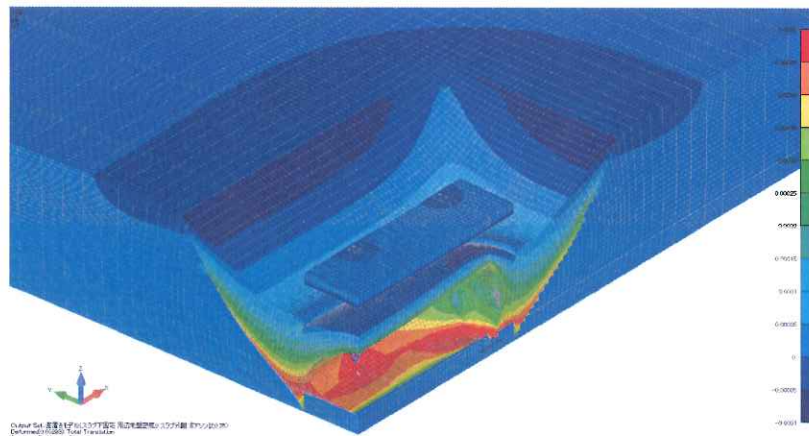


図3. 1 1 ひずみ分布図（鳥瞰 直置きモデル）

イ 垂直応力分布

（ア）x方向垂直応力 σ_x 分布

全体からx方向垂直応力 σ_x 分布を見てみると、コンクリート枕モデルでは上部スラブに大きな応力が発生している。これは、支柱によって支えられているため、その周辺の軸方向に応力が発生したものと考えられる。また、タンクがコンクリート枕によって支えられていることから、コンクリート枕及びその周辺の地盤に大きな応力が発生している。

一方、直置きモデルでは上部スラブの応力はコンクリートモデルとほぼ同様な応力のかかり方であるが、鏡部下部に大きな応力が発生している。

（図3. 1 2 及び図3. 1 3 参照）

（*なお、x,y,z方向垂直応力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分布において、タンク胴部正面及びタンク鏡部正面を見た図は、参考資料2参照）

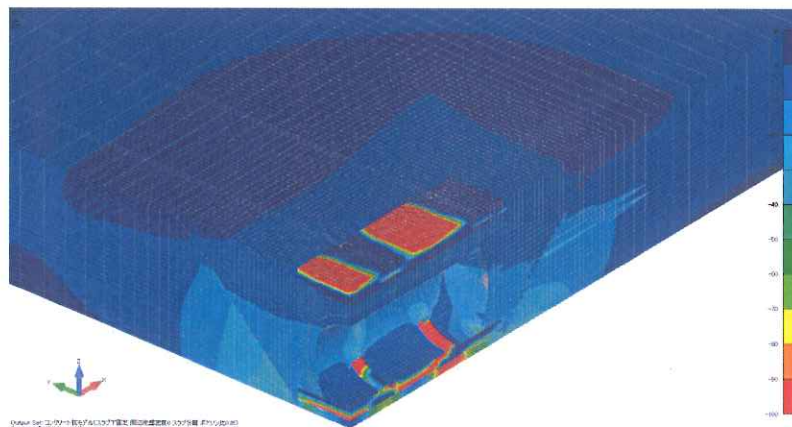


図3. 1 2 σ_x 分布図（鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

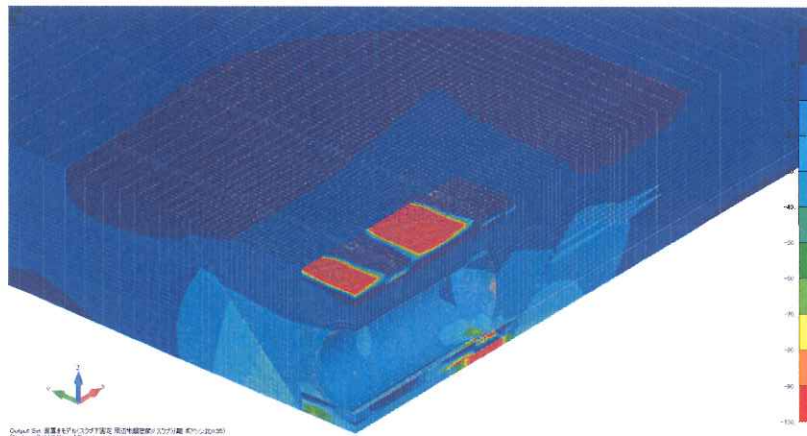


図3. 13 σ_x 分布図（鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²]

(イ) y方向垂直応力 σ_y 分布

全体からy方向垂直応力 σ_y 分布を見てみると、コンクリート枕モデルでは、上部スラブのほぼ全面及び2本のコンクリート枕に大きな応力が発生している。

一方、直置きモデルでは上部スラブのほぼ全面と鏡部下部に大きな応力が発生している。(図3. 14及び図3. 15参照)

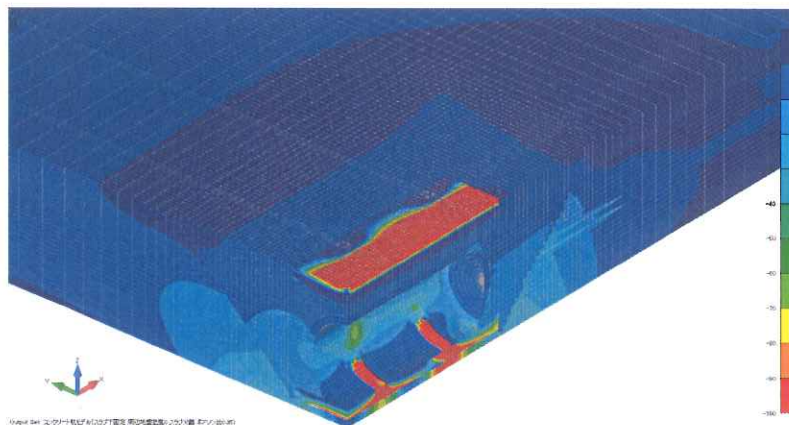


図3. 14 σ_y 分布図（鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²]

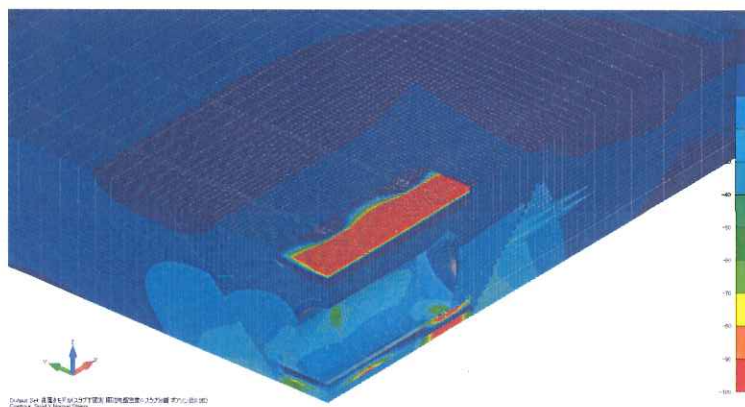


図3. 15 σ_y 分布図（鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²]

(ウ) z方向垂直応力 σ_z 分布

全体からz方向垂直応力 σ_z 分布を見てみると、2箇所のコンクリート枕で大きな応力が発生している。

一方、直置きモデルでは、鏡部下部に大きな応力が発生している。

(図3.16及び3.17参照)

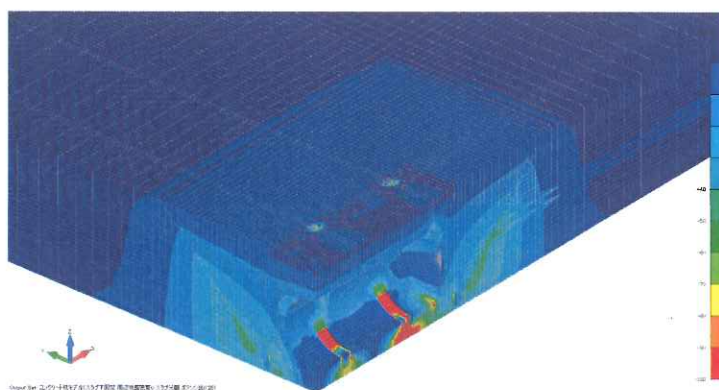


図3.16 σ_z 分布図(鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

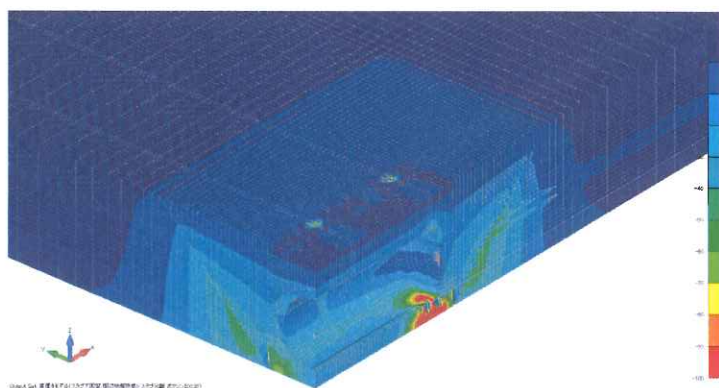


図3.17 σ_z 分布図(鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²])

(エ) 解析結果からの考察

図3.12から図3.17までの、x方向、y方向、z方向への垂直応力分布を見てみると、コンクリート枕工法では、枕の部分に応力がかかり、直置き工法では、鏡部下部に応力がかかる傾向にあることがわかった。

(オ) 法線方向にかかる応力値

3次元FEM解析で得られた結果から、タンク周辺のメッシュの応力度(σ_x 、 σ_y 、 σ_z)から、タンク外面の代表的な部分にかかる法線方向の応力値(圧縮が正の値)の結果を図3.18及び図3.19に示す。

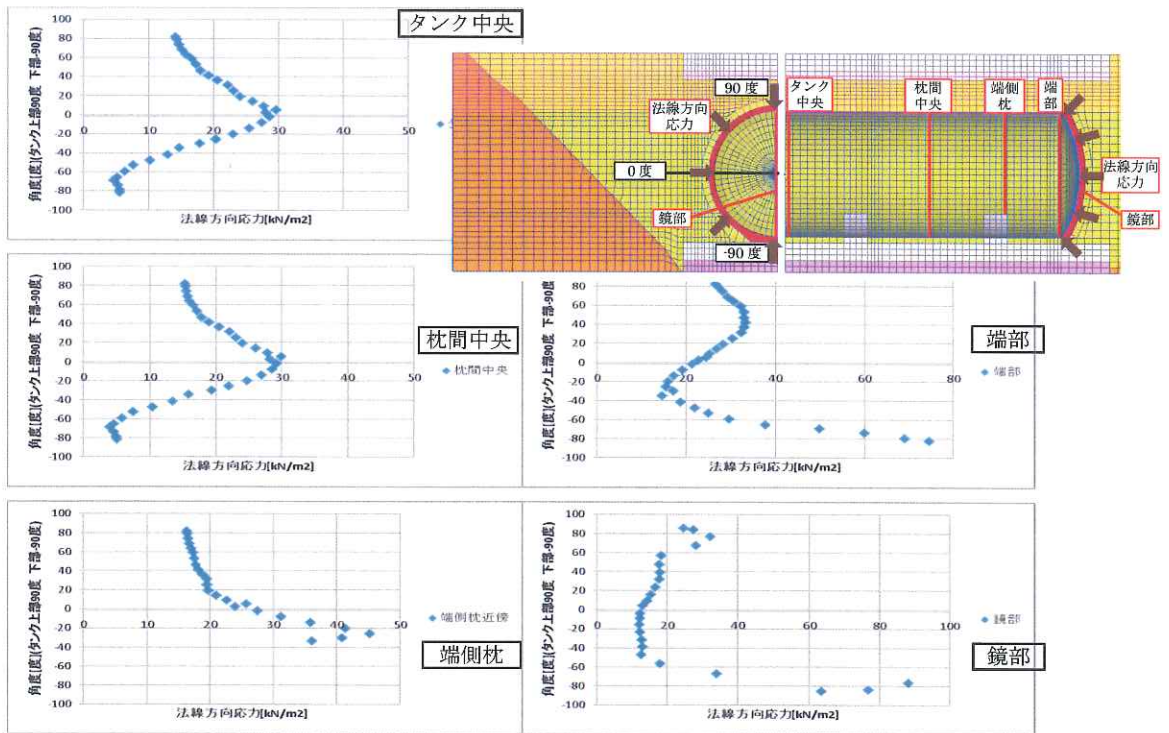


図 3. 18 法線方向にかかる応力値 (コンクリート枕工法)

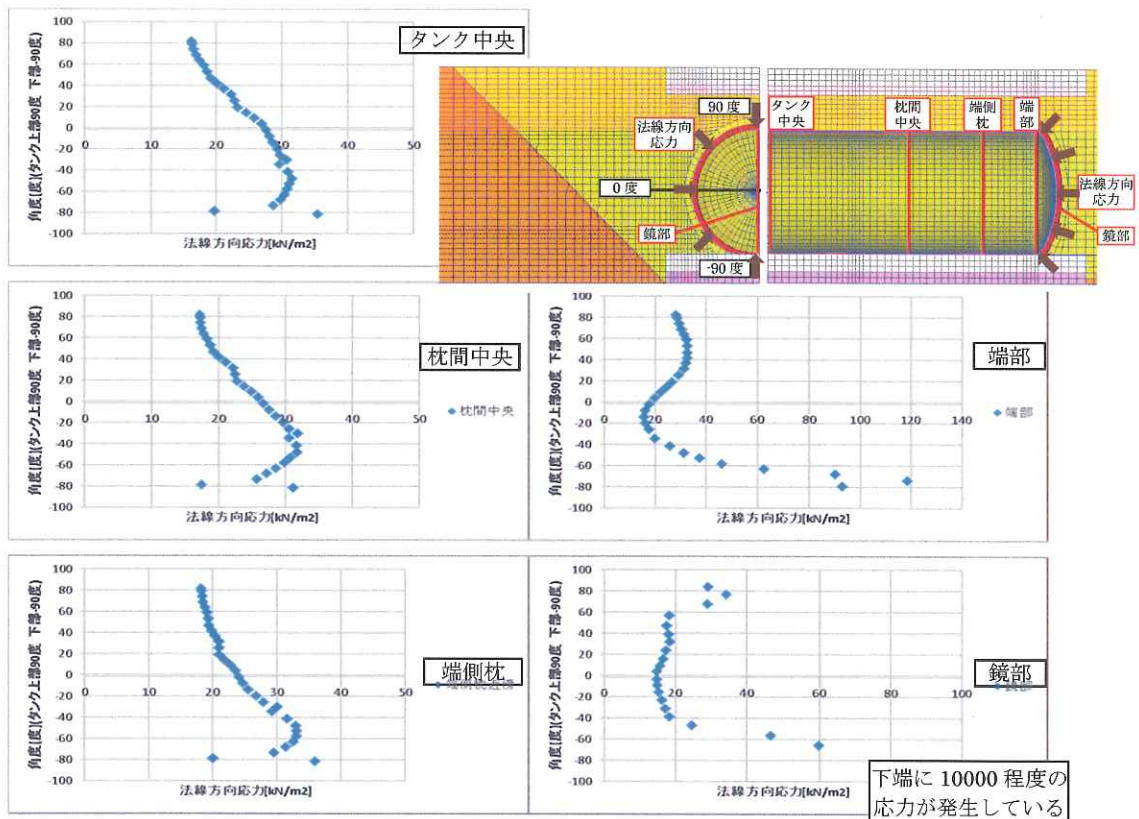


図 3. 19 法線方向にかかる応力値 (直置き工法)

(3) 考察

解析結果から、以下のことが考えられる。

ア タンク周辺の土圧は、タンク工法（コンクリート枕工法、直置き工法）によって変化している。外殻FRPの損傷部位がモデルによって異なる可能性がある。

イ タンク下側のひずみ・土圧に工法による違いが表れている。コンクリート枕工法では、タンクが枕により支えられているため、下面のひずみ・土圧は小さいが、枕周辺で局所的に大きくなっている。直置き工法では、タンク下面全体で支えているため、胴部下面側のひずみ・土圧が大きい、なだらかな分布となっている。

ウ 鏡部の下端のひずみ・土圧が大きい。これは鏡部の剛性が高いため胴部に比べて変形しにくく、鏡部で支えているような構造になっていることが理由と考えられる。直置き工法ではコンクリート枕工法に比べて大きい、これはコンクリート枕のような支えがないため、大きくなっていると考えられる。

エ x方向応力やy方向応力は、上部のスラブ、コンクリート枕、鏡部下部に大きな応力が発生している。上部のスラブについては、支柱が支えている事で変形が生じているからと考えられる。またコンクリート枕については、タンクを支えているためにx方向やy方向の変形が発生していると考えられる。

オ z方向応力は、コンクリート枕や鏡部下部に大きな応力が発生している。タンクを支えている部分に生じている。

カ タンク表面方向の応力値について

(ア) コンクリート枕工法

- ・タンク中央～枕付近では、タンク中心高さで最も大きく、中心より下側になると小さくなっている。これはコンクリート枕で支えているため、下側で地盤に応力が発生しないためと考えられる。
- ・鏡部との境界にある端部では胴側と分布が異なり、ピークはタンク上面側に移動し下面付近でも大きくなっている。これは鏡部で土圧を支えているため鏡部下端で応力が大きくなり、その影響で周辺応力が大きくなっているからと考えられる。
- ・鏡部では上端と下端で応力が大きく、中間位置では全体的に小さくなっている。中間で応力が小さいのは、鏡部の剛性が高く地盤の変形が少ないためと考えられる。

(イ) 直置き工法

- ・タンク中央～枕では、タンク下側で最も大きくなっている。これは胴部下側で支えているためと考えられる。
- ・鏡部との境界にある端部では、コンクリート枕工法と同様な分布となっている。下側での応力値はコンクリート枕工法より大きくなっている。
- ・鏡部では、上端と下端で応力が大きく、中間位置では全体的に小さくなっている。コンクリート枕工法と同様に中間で応力が小さいのは、鏡部の剛

性が高く地盤の変形が少ないためと考えられる。

- ・鏡部下部の下端には、 $10,000$ [kN/m²] 程度の非常に大きな応力値が発生している。これは、下端1点で荷重を支えているモデル化となっているために、その節点直下の要素に応力が集中したためと思われる。本検討では地盤を線形要素として取り扱っているために応力値が大きくなっているが、実際には地盤が塑性状態に至っていると考えられるため、応力値は大きくならないと考えられる。

3. 2 周辺土壌の土圧を考慮したタンクに係る応力解析

次に、土圧の解析結果から得られた土圧の値を外部からの応力値として用い、次にSF二重殻タンク本体の外部応力に対する影響の評価を実施する。

(1) SF二重殻タンクの応力解析に係る諸条件の設定

土圧評価で算定した土圧をタンク表面に対する荷重として設定し、コンクリート枕工法と直置き工法を対象に解析を行う。

図3. 20及び、図3. 21にそれぞれの工法の概略を示す。

解析では、タンクと基礎マットをFEMモデルとする。基礎マット下は固定とする。タンク周りにはFB9×50のバンド4本があり、初期に10kgの初期張力を与え、基礎マットに固定されている。直置き工法は、タンク下にゴムマットが敷かれているので、硬度60相当のヤング率を持つ厚さ10mmの等方弾性体としてモデル化する。ゴム上の面と、タンクの周囲は接触を設け、解析初期には線で接しているが荷重が加わると面で接する。また鏡部のFRPと鋼製タンクも接触面を設けFRPが鋼製タンクに当たることを考慮している。タンク内には高さの半分まで、内容物が入っていると仮定し内圧を荷重として与える。タンク周囲にはN値5相当の地盤バネを設ける。この地盤バネは圧縮にのみ有効な剛性を持つ。タンク下側では、タンクが完全に地盤に支持される状態は考えにくいので、地盤バネは設けない。

(解析モデル 諸条件の詳細については参考資料2参照)

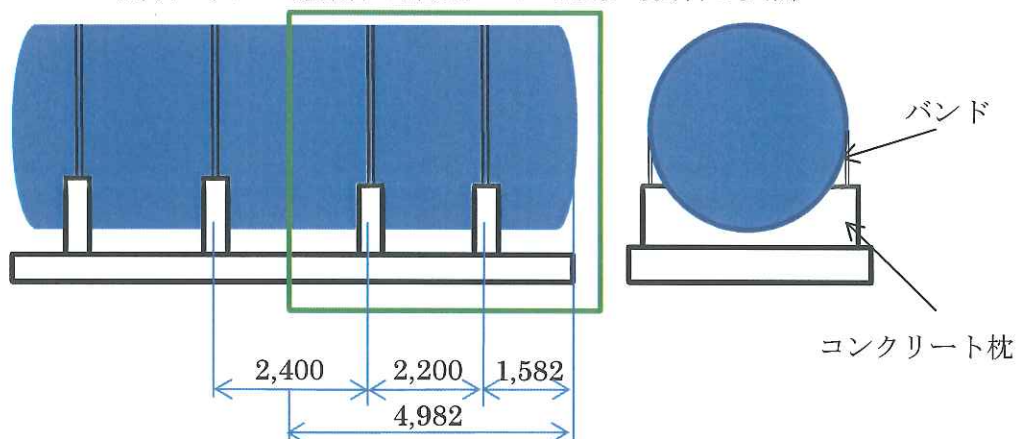


図3. 20 コンクリート枕工法 (単位[mm])

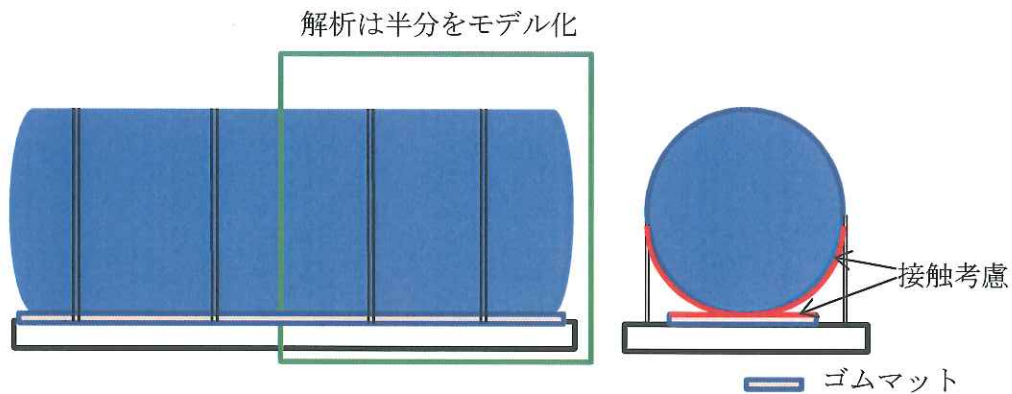


図 3. 2 1 直置き工法

図 3. 2 2 に鏡部の詳細な寸法を示す。鏡部におけるFRP 殻と鋼製殻の間隙は 3 mm でモデル化するが、胴部は内外殻間隙なしと考え、FRP 殻はモデル化しない。鏡部では鋼製殻外面と、FRP 殻内面が接触することとしている。鏡部FRP 板厚は 2. 5 mm である。鏡部の高さは 4 0 7 mm である。なお、鏡と胴の境界 2 5 0 mm 間の板厚は 5 mm である。鏡部の隅は 1/10R (鏡部直径 2 1 0 0 mm の 1/10 のアール) を持つこととしている。

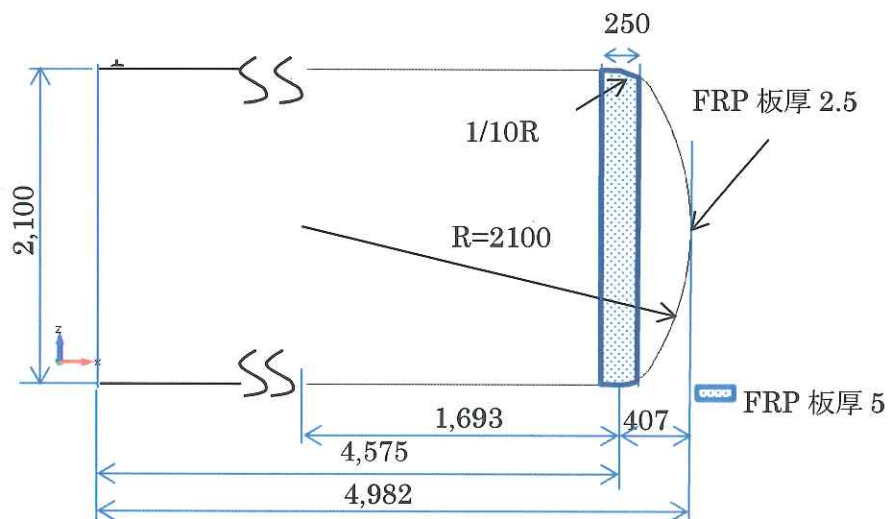


図 3. 2 2 タンク鏡部詳細 (単位[mm])

各材料物性を表 3. 3に示す。

表 3. 3 材料物性

材料	E[kN/m ²]	ポアソン比
鋼製	205,000,000	0.3
コンクリート	21,682,000	0.2
ゴムシート	28,100	0.499
FRP	6,450,000	0.3

解析モデルについて、図 3. 23及び図 3. 24に示す。

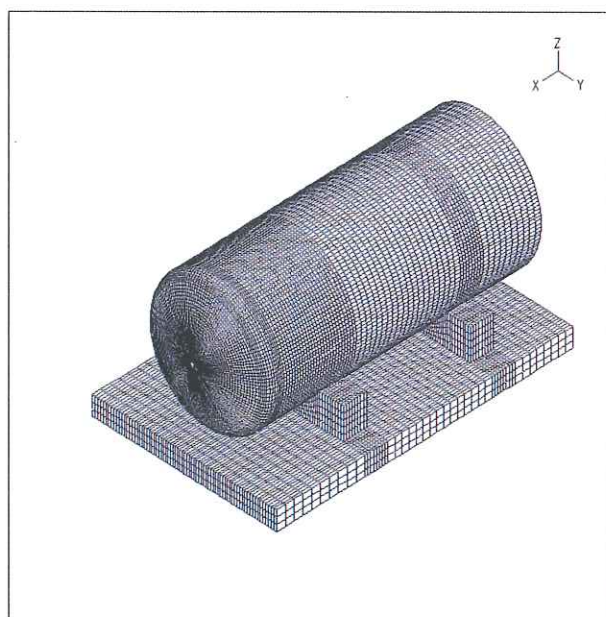


図 3. 23 コンクリート枕モデル図

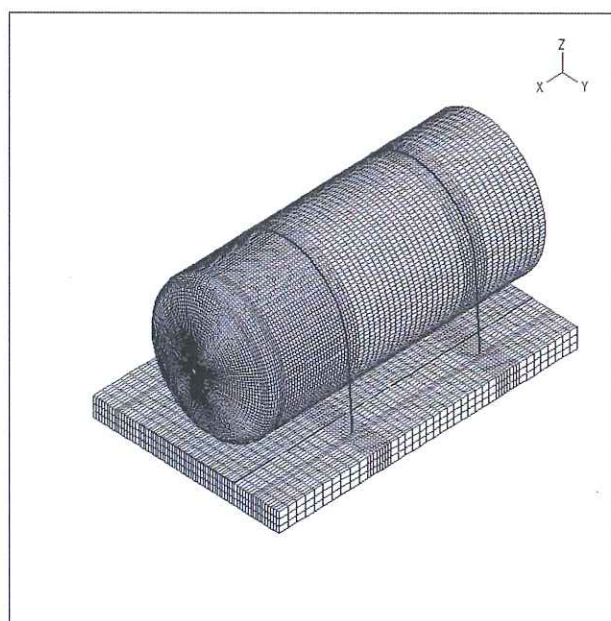


図 3. 24 直置きモデル図

(2) 荷重条件

荷重は地盤FEM解析で求めた土圧および内容物の内圧荷重であり、以下の荷重図で土圧と水圧が同時に作用する要素はその合計の圧力図になっている。土圧解析は線形解析としているため、極端に大きな応力の発生する場合がみられる。実際には、土は非線形性をもつことを考え極端に大きな応力は採用しない。

図3. 25鏡部は水圧、図3. 26は土圧を表示している。

ア コンクリート枕工法

土圧解析の結果を採用している。鏡部下部の土圧の最大値は83.69 kN/m²である。

図3. 26を見ると、FRP下部に荷重がかかっていることがわかる。

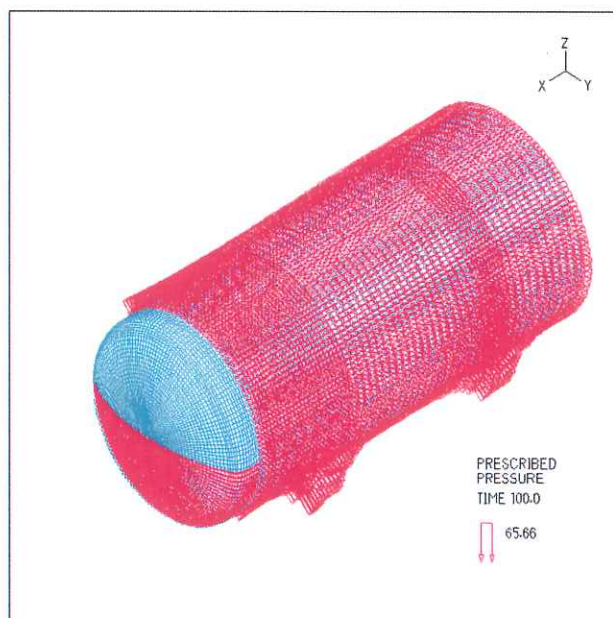


図3. 25 鋼製タンク圧力荷重

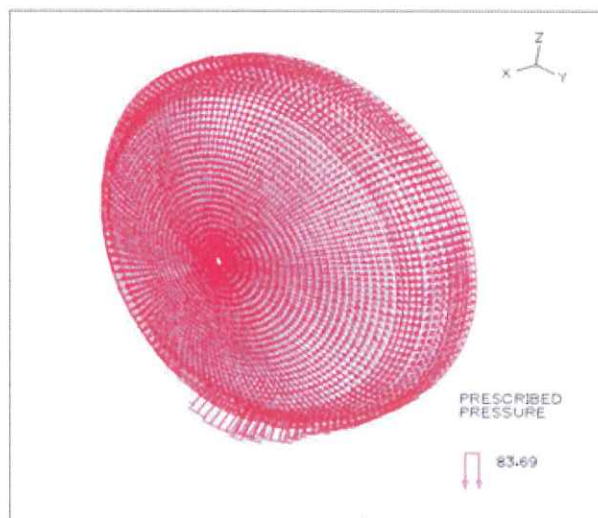


図3. 26 FRP圧力荷重

イ 直置き工法（鋼製支持）

土圧解析結果で、 $800 \sim 10000$ [kN/m²]程度の圧力が出ている要素が24個あった。地盤解析は弾性で行っているので、このような結果となっているが、実際の地盤（埋設土）では耐力を超え塑性域に入ると考えられる。そこで、これらの部分の土圧は、隣接する要素の値に置き換えた。

図3. 28を見ると、直置きの場合、コンクリート枕に比べ、FRP下部に、より大きな荷重がかかっていることがわかる。

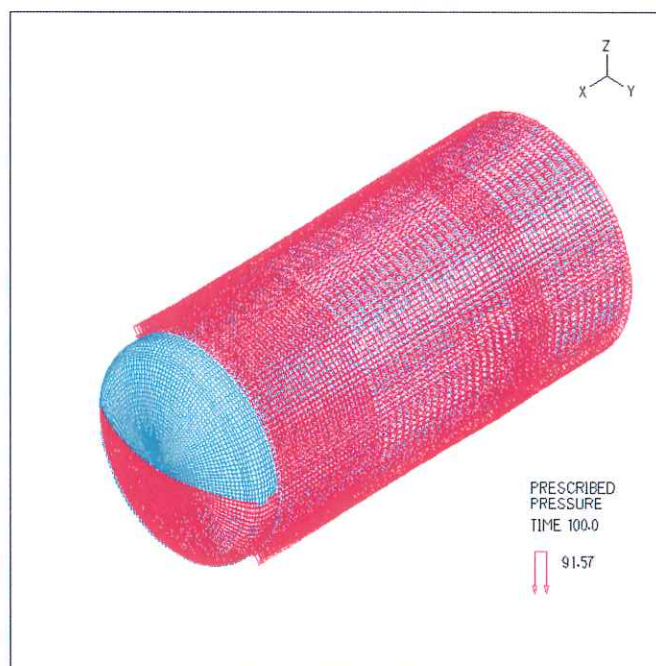


図3. 27 鋼製タンク圧力荷重

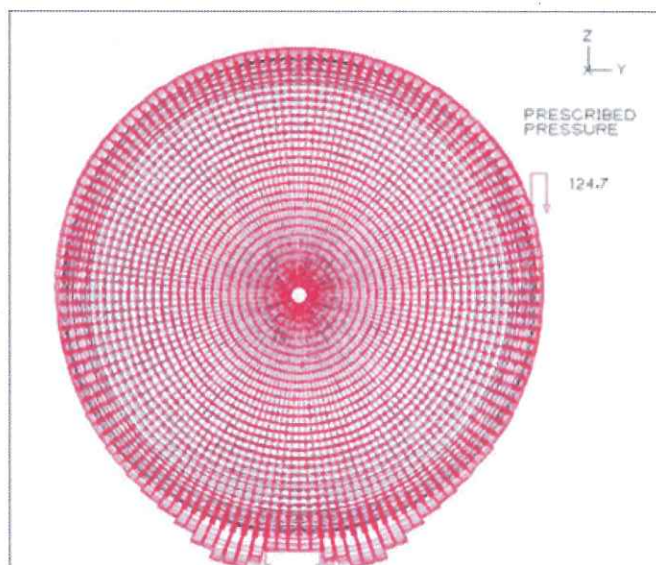


図3. 28 FRP圧力荷重

(3) 結果

ア コンクリート枕工法

(ア) タンク変形について

図3. 29及び図3. 30を見ると、タンク胴部上部にたわみが発生していることがわかる。

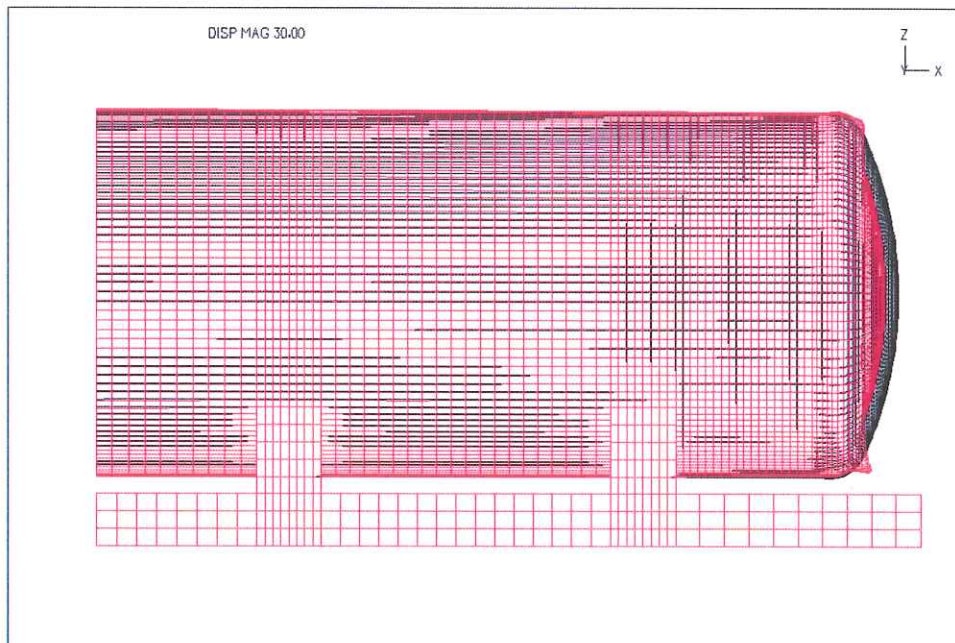


図3. 29 タンク変形 30倍 (変形後：赤線)

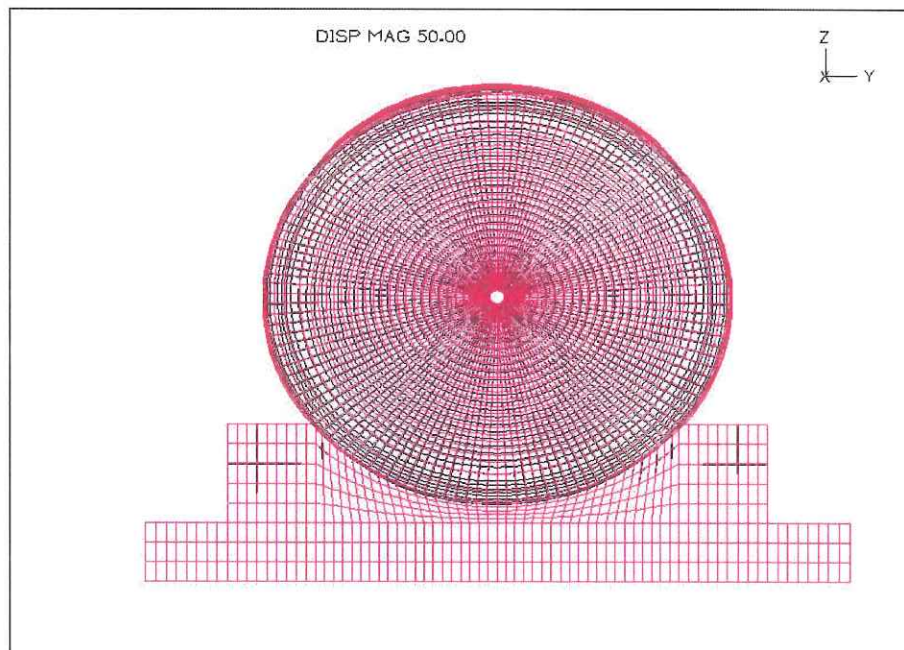


図3. 30 タンク変形 50倍 (変形後：赤線)

(イ) 有効応力について

図3.31をしてみると、FRP下部に幅を持った応力が発生している。

図3.32をしてみると、内側の枕の箇所が土圧で押されているのがわかる。

この場合、応力値のmaxを考慮しても、FRP及び鋼製タンクの降伏点には達していない。

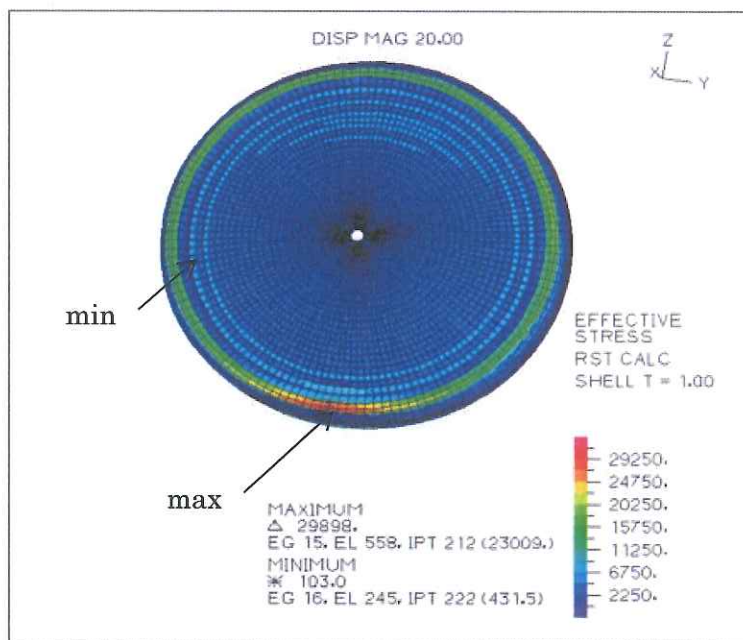


図3.31 FRP有効応力(単位[kN/m²])

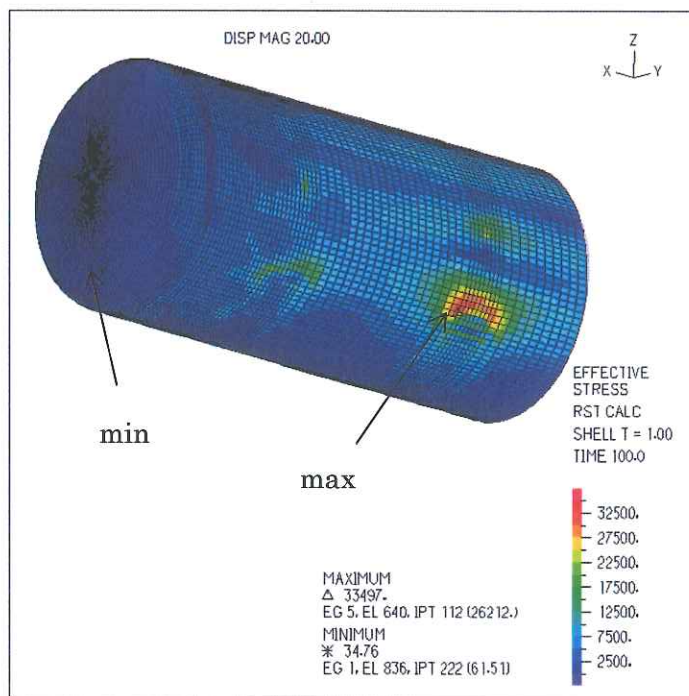


図3.32 鋼製タンク有効応力(単位[kN/m²])

(ウ) 曲げモーメントについて

図3.33及び図3.34を見てみると、曲げモーメントはmax及びminともタンク180度（タンク下部）でその絶対値が最大値を示している。グラフはなだらかな波を描いている。また、maxとminがほぼ同一の箇所で生じている。したがって、この箇所で波をうつような複雑な曲げモーメントが発生しているものと思われる。

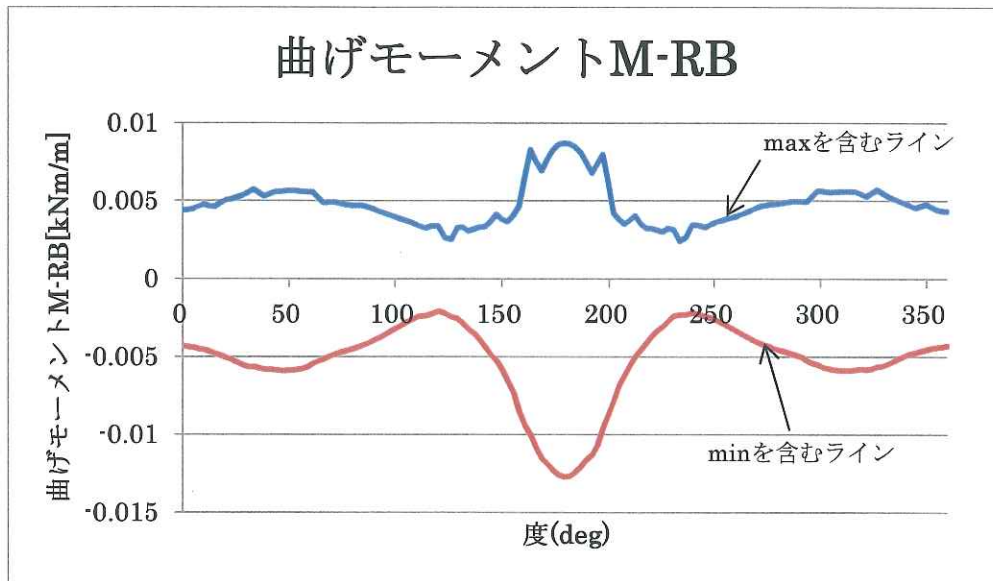


図3.33 FRPの円周に沿った曲げモーメントM-RB（円周直交軸周り）

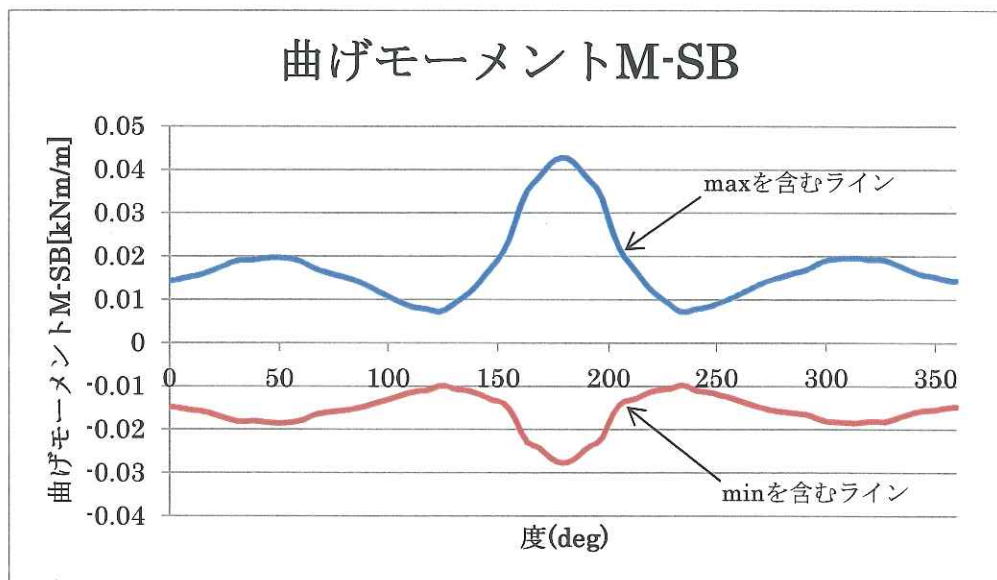


図3.34 FRPの円周に沿った曲げモーメントM-RB（円周軸周り）

イ 直置き工法

(ア) タンク変形について

図3. 35及び図3. 36を見ると、タンク胴部全般がたわみ、コンクリート枕工法に比べ、胴部下面の変形の度合いが大きいことがわかる。

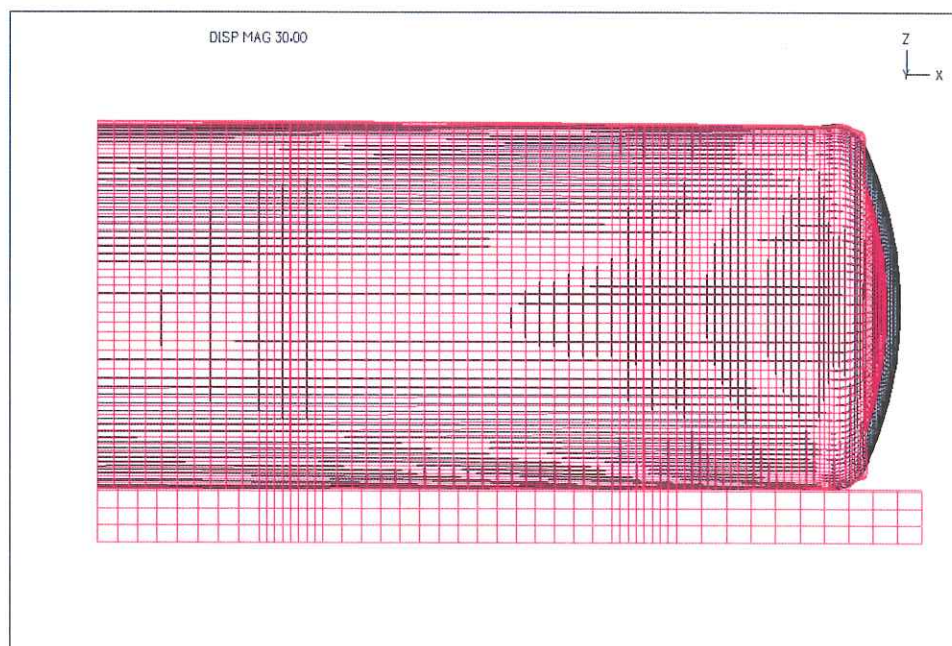


図3. 35 タンク変形30倍（変形後：赤線）

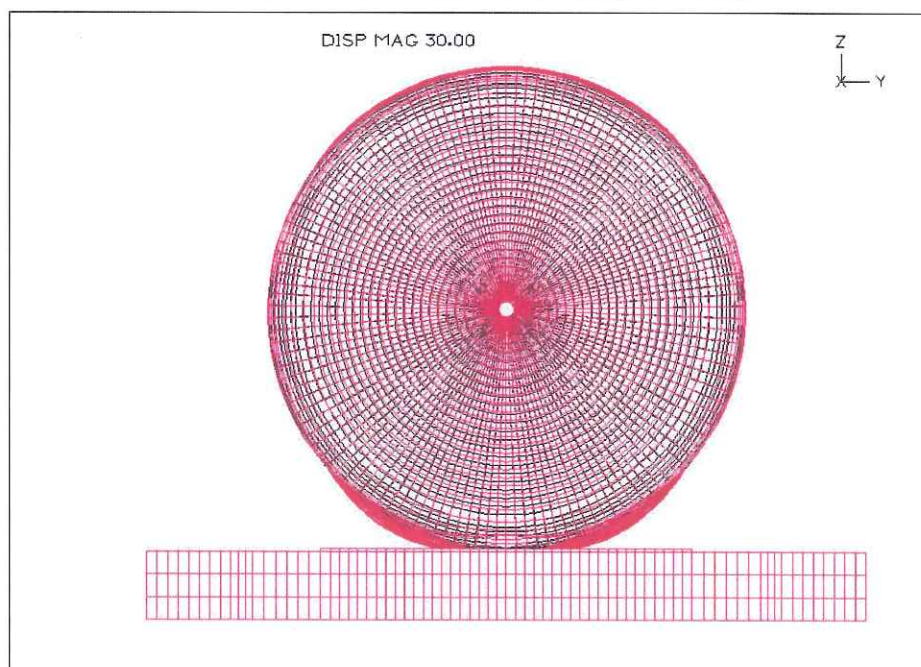


図3. 36 タンク変形30倍（変形後：赤線）

(イ) 有効応力について

図3.37をしてみると、FRP下部に最大50060 [kN/m²]の応力が発生している。

図3.38をしてみると、ゴムマットに接しているところで応力が発生している。

応力値のmaxを考慮しても、FRP及び鋼製タンクの降伏点には達していない。

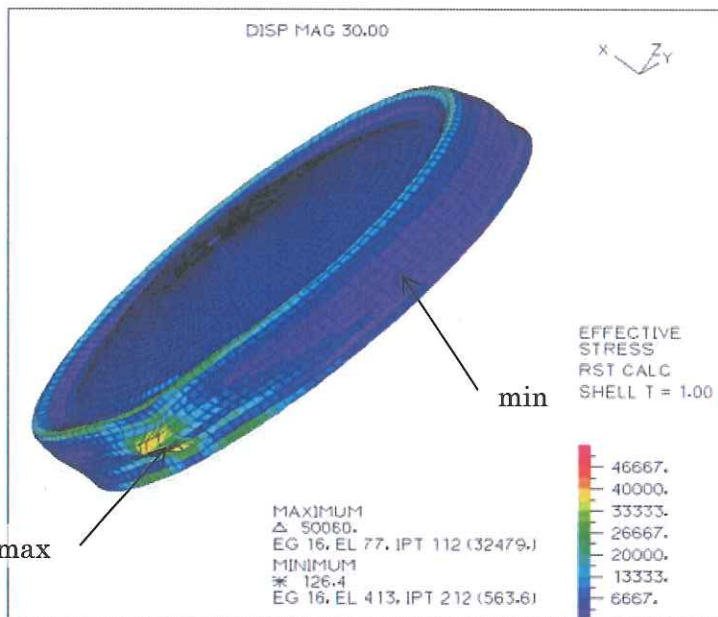


図3.37 FRP 有効応力 (単位[kN/m²]) 限界値は80,300[kN/m²]

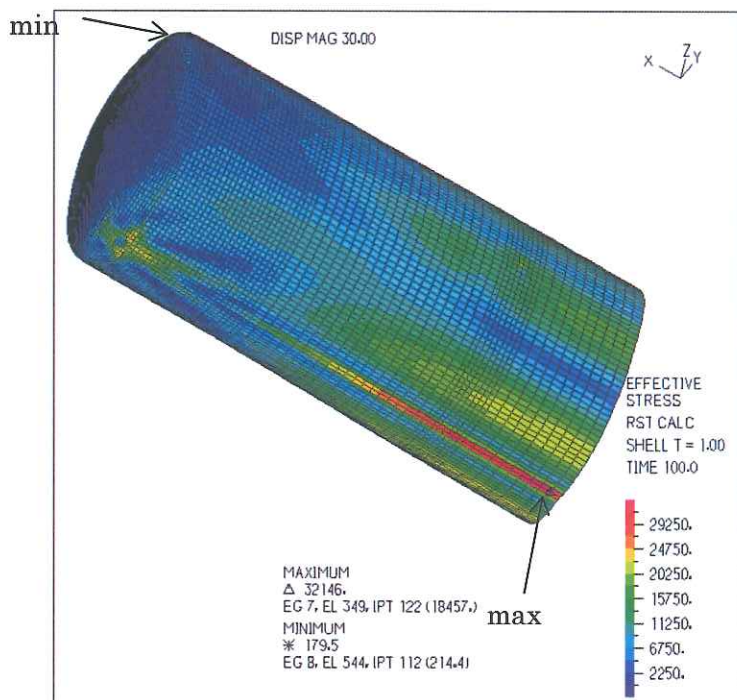


図3.38 鋼製タンク 有効応力 (単位[kN/m²])

(ウ) 曲げモーメントについて

図3.39及び図3.40を見てみると、曲げモーメントはmax及びminともモーメント値はほぼ0で推移しているが、タンク180度(タンク下部)付近になると急激に変化し、その絶対値が最大値を示すようになる。また、maxとminがほぼ同一の箇所で生じている。したがって、この箇所で激しく波をうつような複雑な曲げモーメントが発生しているものと思われる。

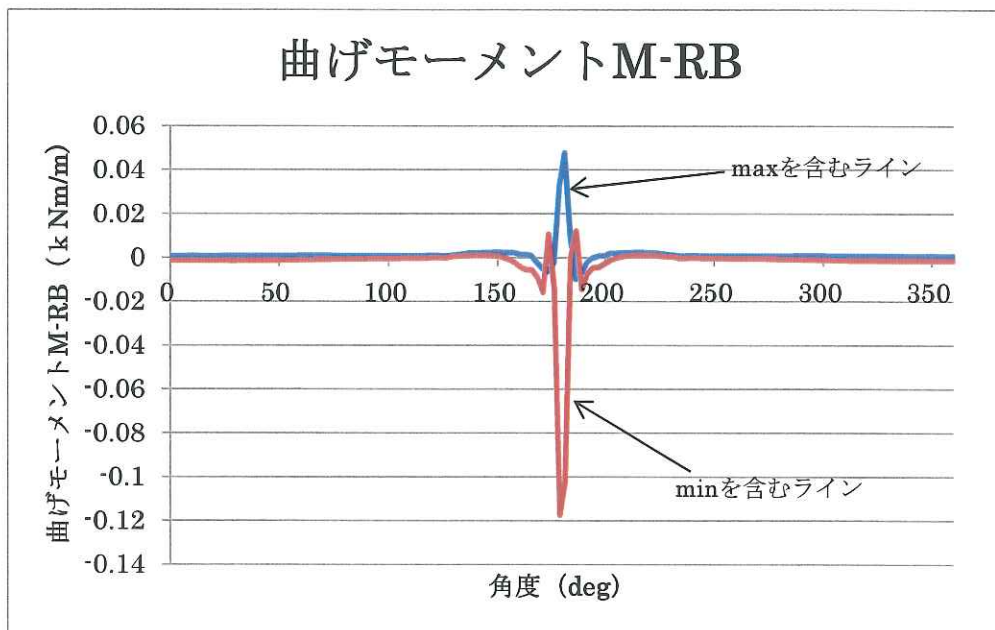


図3.39 FRPの円周に沿った曲げモーメントM-SB(円周直交軸周り)

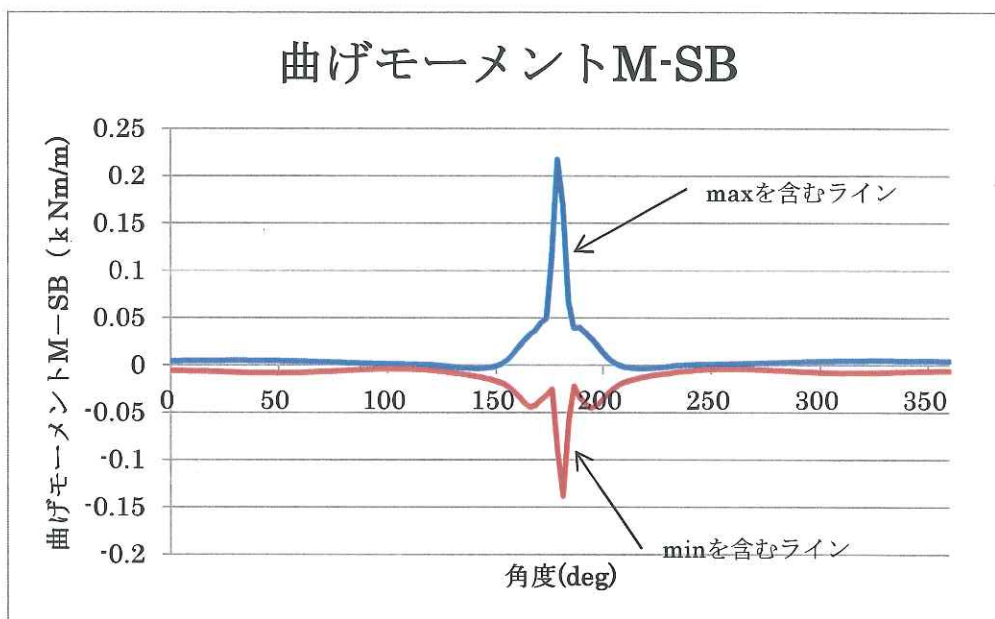


図3.40 FRPの円周に沿った曲げモーメントM-SB(円周軸周り)

(3) まとめ

コンクリート枕工法及び直置き工法について検討した結果は、以下のとおりである。

ア 直置きの場合は、鏡下部の基礎マットに接するFRP部に応力集中が起こり、最も大きな応力が発生している。図3.37でわかるように、その値は50,060[kN/m²]程度で、FRPの降伏値80,300[kN/m²]は超えていない。一方、コンクリート枕は鏡部FRPの中心が土圧で押し込まれ、その縁部分が曲げで応力が大きくなる。図3.31でわかるように、その値は30,000[kN/m²]程度である。

これらから、コンクリート枕の鏡部FRP応力は直置きよりは小さく、比較的広く分布しているが、直置きのタンク下端は、小さい領域で基礎に接触して荷重を伝達するため、応力が集中し、最も強度的に弱い部分となっている。

実際に掘り出された二重殻タンクの傷の調査報告にあっても、直置き工法では、タンク下に亀裂が報告されている。解析はそれを裏付ける状況となっている。

イ 鋼製タンクの応力度は直置きでは、図3.38でわかるようにタンク下端のゴムマットを介して基礎につながる部分が大きく最大32,000[kN/m²]程度である。一方コンクリート枕工法では、図3.32でわかるように枕付近で応力が集中し、33,500[kN/m²]程度である。両工法とも、鉄の降伏値には至らない。

ウ 円周に沿ったFRPの曲げモーメント、図3.33及び図3.34、図3.39及び図3.40でわかるとおり、下端は基礎や地盤からの反力を受けるので、曲げモーメントが大きくなっている。特に直置き工法では小さい接触領域で支えられるので、曲げモーメントが大きくなる。

FRP鏡部と胴の境界では板厚は5mmであるので、曲げモーメント限界値(単位幅当たり)は

$$Z = \frac{(5 \times 10^{-3})^2}{6} = 4.17 \times 10^{-6} [\text{m}^3]$$

$$My = Z \times Fy = 4.17 \times 10^{-6} \times 80,300 = 0.33 [\text{kNm/m}]$$

従って、解析ではいずれのケースでも限界曲げモーメントには至っていない。直置きケースのM・S Bが0.23[kNm/m]と限界値にもっとも近い値になっており、一番厳しい箇所となっている。

(4) 考察

タンク周辺の常時土圧を求め、土圧を荷重条件とする詳細なタンク評価を行った結果、以下の事がわかった。

ア タンク鏡部の下端の土圧が大きくなっている。鏡部の剛性が高いため胴部に比べて変形しにいためと考えられる。特に直置き工法ではコンクリート枕のような支えがないため、コンクリート枕工法より大きくなっている。

イ 直置き工法のタンク下端は、小さい領域で基礎に接触して荷重を伝達するため、応力が集中し、最も強度的に弱い部分となっている。実際に掘り出された二重殻タンクの傷の調査報告にあっても、直置き工法では、タンク下に亀裂が報告されている。解析はそれを裏付ける状況となっている。

ウ 鋼製タンクの応力度は、コンクリート枕工法、直置き工法とも鉄の降伏値には至らない。

エ 鏡部の円周に沿ったFRPの曲げモーメントは下端で大きくなるが、コンクリート枕工法、直置き工法とも限界曲げモーメントには至らない。

第4章 まとめ

第2章で述べたとおり、SF二重殻タンクの割れに関する検討は、平成22年度から実施してきたところである。

平成22年度では、全国のSF二重殻タンクの破損事例の調査を実施し、コンクリート枕工法と直置き工法の外殻FRP鏡部に発生する特異的な割れの状況の確認を行った。

平成23年度では、九州自動車道広川SAでのSF二重殻タンクの現地掘上調査を実施し、FRPが破壊に至るまでの実証実験、そしてその実証実験に対するFEM解析による検証実験をそれぞれ実施してきた。

そして平成24年度では、FEM解析による応力解析を用いてタンクが実際に埋められている状態を評価し、FRP鏡部にかかる荷重の解析を行った。その解析結果（第3章参照）から、特異的な割れの原因、割れの発生への抑止対策について次に考察する。

4.1 特異的な割れの原因究明

第2章で述べたとおり、タンク基礎への据付け方法において、コンクリート枕工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴は、1～3本の亀裂が横方向やY字又はL字型に発生しており、直置き工法による外殻FRP鏡部の割れの特徴は約30cm～約50cmの1本の亀裂が、鏡部下部のゴムマットに接している箇所から、タンク上方に向かって発生していた。

この特異的な割れの原因について考察する。

(1) コンクリート枕工法

コンクリート枕工法では、解析結果から外殻FRP鏡部の下部にたわみや応力がかかることがわかったが、応力は分散している。

この結果、外殻FRP鏡部には、いろいろな箇所様々形状の割れが発生することが考えられる。

(2) 直置き工法

直置き工法では、解析結果からタンク胴部下面については、ゴムマットに接する面積で広く応力を分散しているが、鏡部を考えた場合、外殻FRP鏡部下部1点に応力が集中している。

この結果、外殻FRP鏡部下部に応力が1点に集中しているので、割れはこの箇所から発生すると考えられる。

4.2 割れの発生への抑止対策

前節の考察から、コンクリート枕工法と直置き工法のそれぞれ施工上の問題点と割れの発生への抑止対策について考察する。

(1) コンクリート枕工法における施工上の問題点と割れの発生への抑止対策

ア 施工上の問題点

コンクリート枕工法では、解析結果からタンクを支えている枕に集中的に応力がかかる。一般に出回っている30klのタンクの場合、タンクを支えている枕は4箇所が一般的である。

この4箇所の枕が同一のレベル、かつ同一の曲率半径で施工されれば、タンクの荷重が4箇所に分散され、かつ解析結果から鏡部下部へかかる応力は分散され

ているので、鏡部にとっては有利な条件となるが、4箇所の枕のレベル及びアールにおいて少しでもズレが生じた場合、結果として2箇所の枕でタンクの荷重を支えることとなってしまう事態も考えられる。この場合はタンク胴部にとって非常に不利な条件となってしまう。

イ 割れの発生への抑止対策

したがって、割れの発生への抑止対策としては、30kℓタンクを例とした場合、4箇所の枕を施工する際はコンクリートの性質等を考慮し、できる限り精度を上げて施工することを前提とし、施工の過程で4箇所の枕のレベル及びアールで多少のズレが生じた場合でも枕にかかる応力が緩和されるよう、枕のアールの上面部に緩衝材となるべき適切な厚さのゴムマットを敷き、その上にタンクを載せるといった施工方法が有効であると考えられる。

また、砕石基礎等によりタンクにかかる応力を埋設土部分で吸収させることにより、応力集中を緩和させる等の施工方法も有効であると考えられる。

(2) 直置き工法における施工上の問題点と割れの発生への抑止対策

ア 施工上の問題点

直置き工法では、タンク胴部はタンク下面で応力が分散され、タンク胴部にとっては有利な条件であるが、解析結果から鏡部下部では応力が1点に集中する。

(この応力が集中する1点の箇所とは、胴部と鏡部との溶接線付近で約250mm幅のFRP同士による重ね部と考えられる。)

イ 割れの発生への抑止対策

したがって、割れの発生への抑止対策としては、FRPの重ね部が下部のスラブに直接接しない方策を取ること、つまりFRPの重ね部を避けてゴムマットを敷く施工方法が有効と考えられる。

また、ゴムマットの厚さは10mm～16mmが一般的である。ゴムの弾性等については、まだ解明されていないところもあるが、ゴムマットの厚みを増すことにより、FRPの重ね部が下面のスラブに直接接しないようにする施工方法も有効であると考えられる。

以上のように今回の検討では、コンクリート枕工法と直置き工法における外殻の割れの原因推定を行い、施工上の留意事項について整理した。

その結果においては、いずれの工法においてもタンクの鏡部に応力集中の生じないための施工方法の重要性が再確認されたところである。

今後、この検討結果を生かすため、SF二重殻タンクの埋設方法については、具体的なマニュアルの整備、見直し等が必要と考えられ、必要に応じ、施工者等に対する講習会等の実施等を行うことによって十分な施工の徹底を図っていくことが望まれる。

[参 考 資 料 1]

S F 二重殻タンクの外殻破損事例
調査結果一覧

平成22年度に調査したタンク全62基について、破損概要を下表に示す。

タンク破損概要一覧表

No.	タンク				破 損	
	設置年月	発見年月	容量(ℓ)	槽数	発生箇所	原因(推定含む)
1	H.9年10月	H.18年12月	30,000	1	胴検知層上部から胴上部密着部にかけてほぼ胴長の長さに亀裂	④ 定期検査時の過剰圧又はタンク周囲からの外因によるものと推定
2	H.12年5月	H.20年2月	20,000	1	胴密着部が検知層からプロテクタまで剥離	⑨ 不明
3	H.6年10月	H.18年6月	20,000	1	胴密着部が検知層からプロテクタまで剥離	⑨ 不明
4	H.13年7月	H.20年11月	30,000	2	胴側部にピンホール1箇所(直径1cmのくぼみがあるも割れ、ひび等はなし)	⑨ 不明
5	H.10年11月	H.19年1月	30,000	1	不明	⑨ 不明
6	H.18年4月	H.20年1月	48,000	3	胴下部中央に最大長さ2mのT字形亀裂	⑨ 不明
7	H.10年3月	H.20年11月	20,000	1	胴上部プロテクタ付け根部に長さ約20cmの剥離(2プロテクタ)	② 地震によるもの
8	H.6年8月	H.21年8月	30,000	1	胴部と鏡部接合部から鏡部中央方向へ長さ75cmの亀裂	⑧ 設置時の外因又は定期検査時の過剰圧
9	H.9年2月	H.18年3月	30,000	2	胴部と鏡部接合部付近から鏡部中央方向へ長さ30cmの亀裂	⑥ 埋め戻し土砂に石が混入
10	H.18年6月	H.20年7月	30,000	1	胴部と鏡部接合部の下部付近から鏡部中央方向へ長さ30cmの亀裂	⑥ 埋め戻し土砂に石等が混入したものと推定
11	H.11年7月	H.21年9月	30,000	2	プロテクタ周囲の剥離	⑦ 下記(1)(2)(3)の複合要因により密着部の剥がれが生じて錆が発生し、その錆が進行して気層部に達し、FRP部分の外殻漏洩が発生したもの (1) FRPの密着幅不足 FRPの密着幅80mmと狭いため十分なFRPの密着強度が不足 (2) 鉄部ケレン不足 鉄部ケレンが十分でないため十分なFRPの密着強度が不足 (3) タンクプロテクタ溶接時FRP熱変性 タンクプロテクタを現場にて嵩上げ溶接時、溶接熱がFRPの密着に変性を与え、密着強度が不足
12	H.9年9月	H.21年9月	30,000	1	プロテクタ周囲の剥離	
13	H.11年8月	H.21年9月	30,000	2	プロテクタ周囲の一边が剥離(3プロテクタ)	
14	H.11年8月	H.21年9月	30,000	1	プロテクタ周囲の一边が剥離(3プロテクタ)	
15	H.8年5月	H.20年5月	30,000	3	プロテクタ周囲の一边が剥離	
16	H.6年8月	H.18年11月	30,000	1	胴密着部が検知層からプロテクタまで剥離(2プロテクタ)	⑨ 不明
17	H.9年9月	H.18年2月	30,000	2	胴密着部が検知層からプロテクタまで剥離(2プロテクタ)	① 長年の振動によるものと推定

No.	タンク				破 損	
	設置年月	発見年月	容量(ℓ)	槽数	発生箇所	原因(推定含む)
18	H.10年10月	H.22年6月	10,000	1	胴密着部が検知層からプロテクタまで剥離	③ 定期検査時の過剰圧によるものと推定
19	H.12年8月	H.21年5月	30,000	2	鏡板上部に長さ約18cmのY字形亀裂	⑥ 埋め戻し土砂に山石が混入したものと推定
20	H.6年6月	H.20年7月	30,000	2	タンク上部密着層の剥離により吊り上げフック及び立ち上がり配管部からエアリー漏れ	⑦ 施工不良と推定
21	H.7年2月	H.21年2月	30,000	1	密着層に約3cmの穴3箇所及び密着層と検知層の境界部に長さ約200cmの剥離2箇所	⑧ 設置不良及び経年劣化によるものと推定
22	H.8年7月	H.18年6月	20,000	2	鏡板の胴との境付近に3箇所の亀裂	④ 地下水圧と加圧試験が原因と推定される。(H.18年6月8日KHK立会)
23	H.7年11月	H.21年12月	30,000	1	鏡板の胴境界付近から中央部にわたり長さ約30cmの亀裂	⑨ 不明
24	H.7年12月	H.17年9月	31,000	1	胴側面検知層に長手方向約3cmの楕円形の傷	⑦ タンク据付時又は焼砂充填時に何らかの原因により発生させたもの
25	H.10年11月	H.19年8月	30,000	2	不明	⑧ 劣化によるピンホールの発生
26	H.10年11月	H.19年5月	20,000	1	プロテクタ立ち上がり上部に剥離	⑧ タンク製造時の施工不良、経年劣化、地下タンク周囲の地盤沈下のいずれかと推定
27	H.9年5月	H.21年7月	2,000	1	鏡と胴の境界部に約1/3周にわたり剥離	⑨ 不明
28	H.9年9月	H.21年4月	30,000	3	鏡に約10mmの丸い傷	⑧ 給油時のタンク膨張により、タンク周囲の固い土と接触したため傷がついたものと推定
29	H.13年10月	H.20年5月	30,000	2	プロテクタ及び吊金具各2箇所付け根部に13箇所の剥離	① プロテクタ及び吊金具付け根部に上部からの圧力がかかり密着層に剥離が生じたもの
30	H.12年7月	H.19年8月	30,000	1	タンク下部の胴と鏡の境界部に、胴から鏡にかけて長さ約100mmの亀裂	⑨ 不明
31	H.7年7月	H.19年10月	30,000	1	プロテクタ上部FRP施工端2箇所剥離	⑨ 不明
32	H.10年8月	H.22年5月	30,000	1	プロテクタ上部FRP施工端2箇所剥離	⑨ 不明
33	H.7年7月	H.19年10月	20,000	2	プロテクタ上部FRP施工端3箇所剥離	⑨ 不明
34	H.8年10月	H.22年3月	30,000	2	プロテクタ上部FRP施工端2箇所剥離	⑨ 不明
35	H.13年11月	H.19年10月	30,000	1	鏡下部にL字型の亀裂 横約20cm、縦約30cm	⑥ 破損部付近より直径約30cmの石が発見されたが、破損の直接的な原因は不明
36	H.7年7月	H.21年10月	20,000	1	プロテクタ周囲FRPの剥離(2箇所)	⑤ 密着層の密着が弱かったため、マンホールプロテクタとタンク接合部よりFRPが剥離し検知層までに至ったものと推定
37	H.7年7月	H.21年10月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(3箇所)	
38	H.7年7月	H.21年10月	20,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(3箇所)	
39	H.7年8月	H.21年10月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(3箇所)	

No.	タンク				破 損	
	設置年月	発見年月	容量(t)	槽数	発生箇所	原因(推定含む)
40	H.8年8月	H.17年12月	30,000	2	タンクプロテクタとFRP 取合い面の剥離	② 地震時の強震により、タンク内部(油の揺れ)及びタンク本体とタンク上部土間の振動差により生ずる振れによるものと推定
41	H.8年8月	H.17年12月	30,000	2		
42	H.8年8月	H.17年12月	20,000	1		
43	H.9年11月	H.22年6月	20,000	1	タンク吊り金具取付部	⑨ 不明
44	H.9年11月	H.18年11月	20,000	1	プロテクタ周囲FRPの剥離	⑨ 不明
45	H.10年10月	H.21年12月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(4箇所)	① タンク上部スラブに負荷がかかったものと推定
46	H.17年2月	H.18年6月	40,000	2	タンク上部密着層に楕円形(11×18mm)の破損	⑦ タンク埋設作業中に何らかの衝撃を受けたもの
47	工事中	H.16年5月	20,000	1	不明	⑥ タンク埋設作業中に砕石が当たったものと推定
48	H.8年10月	H.19年10月	30,000	2	マンホール及びプロテクタ周囲FRPの剥離(4箇所)	② 地震によるものと推定
49	H.12年9月	H.20年4月	30,000	1	吊り金具及びプロテクタ周囲FRPの剥離(6箇所)	⑨ 不明
50	H.12年9月	H.21年10月	30,000	3	プロテクタ周囲FRPの剥離(5箇所)	⑨ 不明
51	H.8年4月	H.21年5月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(5箇所)	② 地震によるものと推定
52	H.8年4月	H.21年5月	30,000	1	プロテクタ周囲FRPの剥離(3箇所)	② 地震によるものと推定
53	H.9年8月	H.17年7月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(2箇所)	② 地震によるものと推定
54	H.7年7月	H.17年7月	30,000	2	プロテクタ周囲FRPの剥離(2箇所)	② 地震によるものと推定
55	H.7年7月	H.18年7月	30,000	1	プロテクタ周囲FRPの剥離(1箇所)	② 地震によるものと推定
56	H.7年7月	H.18年7月	30,000	1	プロテクタ周囲FRPの剥離(1箇所)	② 地震によるものと推定
57	H.15年12月	H.22年4月	30,000	2	不明	⑨ 不明
58	H.15年12月	H.22年8月	30,000	1	不明	⑨ 不明
59	H.15年12月	H.22年4月	30,000	1	不明	⑨ 不明
60	H.15年12月	H.22年4月	30,000	1	不明	⑨ 不明
61	H.6年9月	H.21年5月			タンク吊り上げ金具付近のFRPの剥離(1箇所)	⑧ 製造工程あるいはタンク据え付け時の損傷等が考えられるが特定できず
62	H.18年4月	H.21年	30,000	1	・上層部がほぼ胴長にわたり、密着層から検知層にかけて剥離 ・胴部2箇所、鏡部1箇所にピンホール ・鏡下部に縦方向に長さ約50cmの亀裂	⑨ 不明

[参 考 資 料 2]

S F 二 重 殻 タ ン ク の 解 析
有 限 要 素 法 を 用 いた 応 力 解 析

目 次

1. S F 二重殻タンクの解析（土圧評価）	4 5
1.1. 目的	4 5
1.2. 概要	4 5
1.2.1. 土圧解析の対象範囲	4 6
1.2.2. 物性値	4 7
1.3. 解析条件	4 9
1.3.1. 境界条件	4 9
1.3.2. 荷重条件	4 9
1.4. 解析結果	5 2
1.4.1. ひずみ分布	5 3
1.4.2. x 方向垂直応力 σ_x 分布	5 6
1.4.3. y 方向垂直応力 σ_y 分布	5 9
1.4.4. z 方向垂直応力 σ_z 分布	6 2
1.4.5. タンク表面法線方向の応力値	6 5
1.5. 土圧評価まとめ	6 7
2. S F 二重殻タンクの解析（タンク評価）	6 9
2.1. 解析条件	6 9
2.1.1. モデル化	6 9
2.1.2. 解析条件	7 1
2.1.3. 解析モデル	7 4
2.2. 荷重	7 6
2.2.1. コンクリート荷重	7 6
2.2.2. 直置き工法	7 7
2.3. 結果	7 8
2.3.1. コンクリート枕工法	7 8
2.3.2. 直置き工法	8 3
2.4. タンク評価まとめ	8 8
3. 考察	8 9

1. SF 二重殻タンクの解析（土圧評価）

1.1. 目的

地中内に設置されているガソリン等の貯蔵用の FRP 製タンクは、常時土圧等の外力によって FRP 殻と Steel 殻間に隙間が発生し、FRP 殻の損傷につながっている。本検討は常時土圧等の外力を適切に評価し、それらが FRP 殻にどのような影響を与えるかを定性的に把握する事を目的とする。タンクの設置方法により影響が異なっていると考えられるため、設置方法としてコンクリート枕工法と直置き工法の 2 種類を想定する。

1.2. 概要

タンク周辺の常時土圧は、タンクやスラブ、埋め土などの影響により、深度に比例する水圧のような分布とは異なっていると考えられる。本検討では、まず周辺地盤を含む広い範囲を対象とした土圧解析によりタンク周辺の土圧（タンク表面法線方向応力）を算定し、次に求めた土圧を入力荷重としてタンクのみを対象とした詳細な解析を実施する。

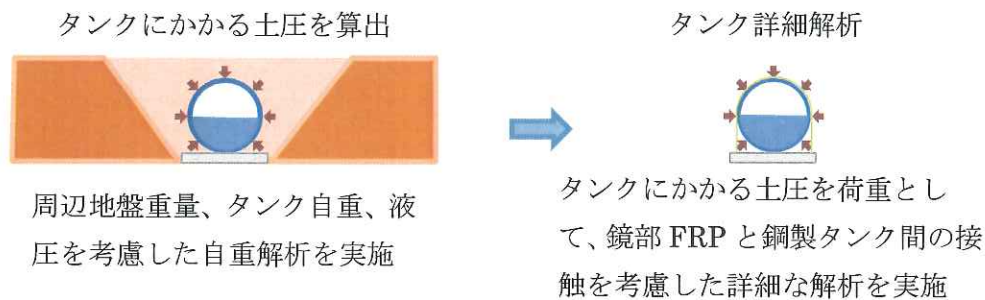


図 1-1 解析の流れ

1.2.1. 土圧解析の対象範囲

土圧解析の対象範囲を図 1-2 に示す。解析モデルはタンクが対称であるため、図 1-2 に示すような 1/4 モデルとした。水平方向の範囲は、応力・ひずみの変動が境界に影響しないようにするために広く取り、埋め戻し範囲から 3 倍程度の距離の範囲とした。鉛直方向の範囲はタンクより下側の地盤の沈降の影響を避けるためタンク下の基礎スラブまでとした。タンク評価に用いる詳細タンク形状は 2 章に示す。

解析対象 (1/4 モデル)

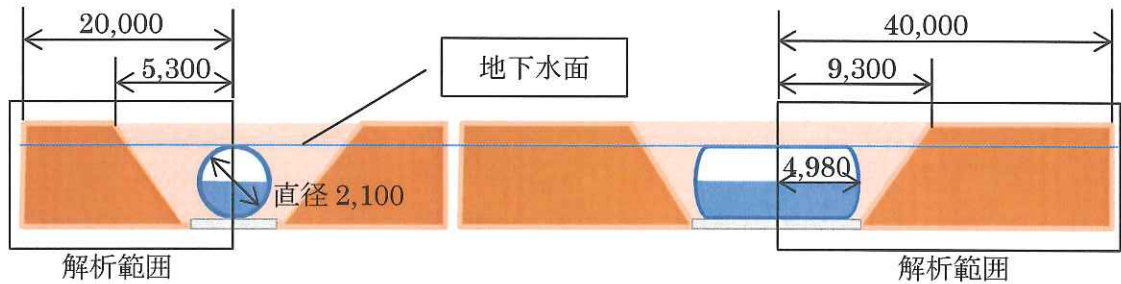


図 1-2 解析対象 (1/4 モデル 単位[mm])

なお、タンクの設置・埋め土による沈下の影響だけを考慮するために、周辺地盤の自重を 0 として埋め戻し前の状態からの解析とした (図 1-3)。また、上部スラブ・支柱と地盤を切り離し (2 重節点とする)、スラブにより地盤が支えられないようにした。

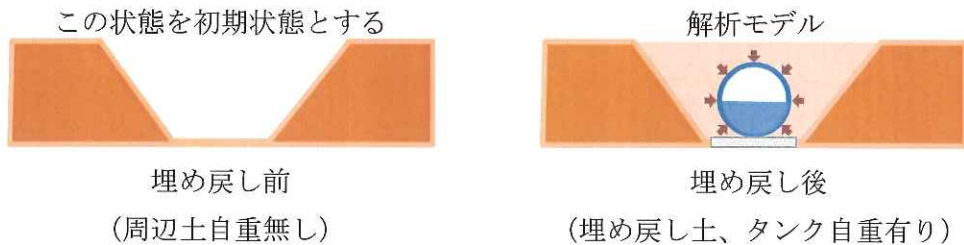


図 1-3 初期状態と解析モデル

1.2.2. 物性値

用いた物性値を以下に示す。タンク評価に用いる物性については2章に示す。なお、地下水面はタンク上部に位置している。

表 1-1 地盤物性

地盤	地盤種	N値	地下水面以下単位体積重量 [tf/m ³]	地下水面上単位体積重量 ρ [tf/m ³]	変形係数 [kN/m ²]	ポアソン比	
						地下水面以下	地下水面上
埋設土	砂	5	1.95	1.75	14,000	0.35	0.35
周辺地盤	砂	15	—	—	42,000	0.35	0.35
埋設土	砕石	40	2.10	1.90	112,000	0.35	0.35

*変形係数算定式 E=2800×N 値 [kN/m²]

出典 道路橋示方書・同解説 I 共通編・IV下部構造編_平成24年3月_日本道路協会,p285
重量 出典道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説

表 1-2 タンク物性

		厚さ [mm]	単位体積重量 [tf/m ³]	変形係数 E [kN/m ²]	ポアソン比
鋼製タンク (シェル)	鏡部	9	7.85	205,000,000	0.3
	胴部	8	7.85	205,000,000	0.3
基礎 (スラブ) コンクリート製枕*1			2.447	21,682,000	0.2
ゴムマット*2			1	28,100	0.499

*1 コンクリートは Fc21 とし、ヤング率は建築学会「鉄筋コンクリート計算規準・同解説」より以下の式から算出した。

$$3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}}$$

ここに、Fc=21、γ=23

*2 ゴムマットのヤング係数は以下の資料を参照した。硬度 60 度のヤング率を採用した。

●シリコーンゴムのヤング率

(注:以下に載せる値は目安であり、必ずしも保障されるものではありません)

T社汎用シリコーンゴム

硬度 上昇 ↓	硬度	20度	4	[MPa]	数值 上昇 ↓
	硬度	30度	5.4	[MPa]	
	硬度	40度	8.9	[MPa]	
	硬度	50度	14.2	[MPa]	
	硬度	60度	28.1	[MPa]	
	硬度	70度	40.3	[MPa]	

Mpa・・・メガパスカル(1×10の6乗パスカル)

共和ゴムホームページ (<http://www.kyowakg.com/tech/etc/young.html>) による

1.3. 解析条件

タンク、周辺土、埋設土（砂）、埋設土（採石）、基礎スラブ、支柱、枕を考慮した自重による応力を線形解析により求める。タンク形状を変えた以下の2ケースを実施する。

1. コンクリート枕工法ケース（タンクをコンクリート製枕で支えるケース）
2. 直置き工法ケース（タンクを直置きするケース*）

*直置き工法は鋼製支柱のモデル化は行っておらず、タンク下部ゴムマットのみモデル化している。

解析モデルを図 1-4～図 1-8 に示す。解析は 1/4 モデルにより実施した。

タンクからモデル境界まではタンク長さの 3 倍以上の長さを設け、タンク周辺での変位等の影響が境界に及ばないようにしている。なお、タンクとタンク周辺については詳細に要素分割し、タンクから離れるに従って粗い要素分割とした。

1.3.1. 境界条件

側面：対称条件（面外変形拘束）

底面：完全拘束

1.3.2. 荷重条件

タンク内容液による液圧：単位体積重量 $0.75[\text{tf}/\text{m}^3]$ 高さタンク中央まで

表 1-3 モデル節点・要素数

	節点数	要素数	全体サイズ
ケース共通	286,172	273,829	$(x \times y \times z) = (40\text{m} \times 20\text{m} \times 3.7\text{m})$

V16
2/5

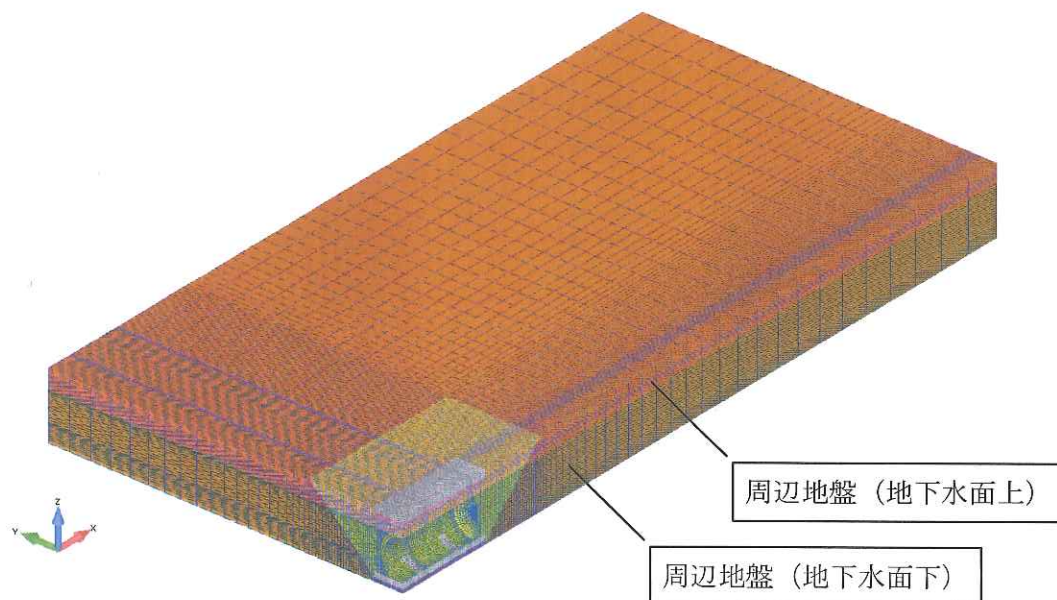


図 1-4 モデル全体図

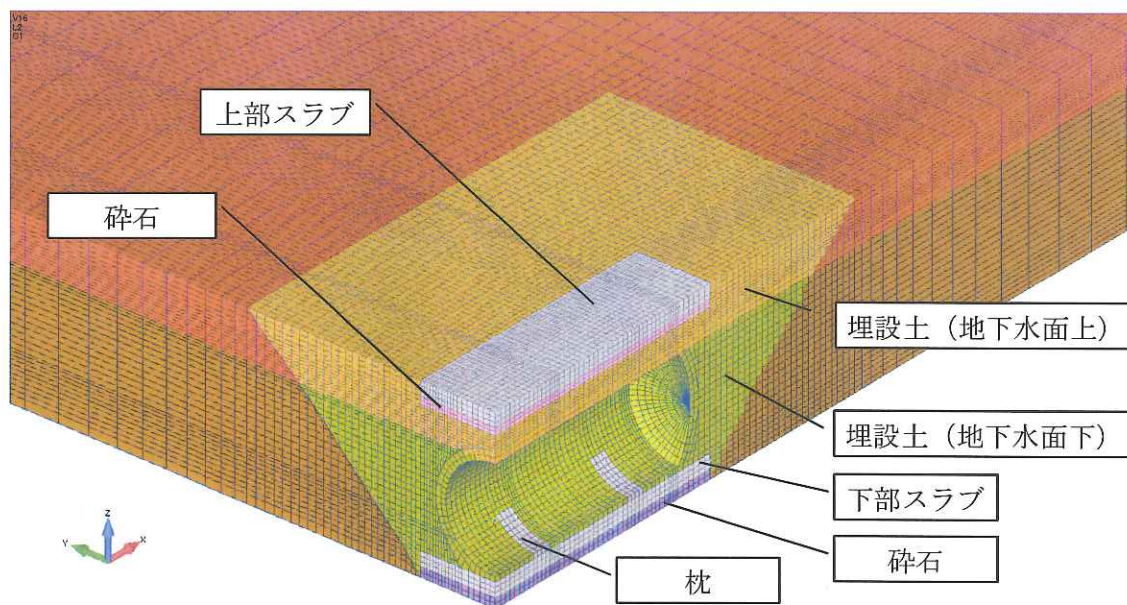


図 1-5 モデルタンク周辺図 (コンクリート枕工法)

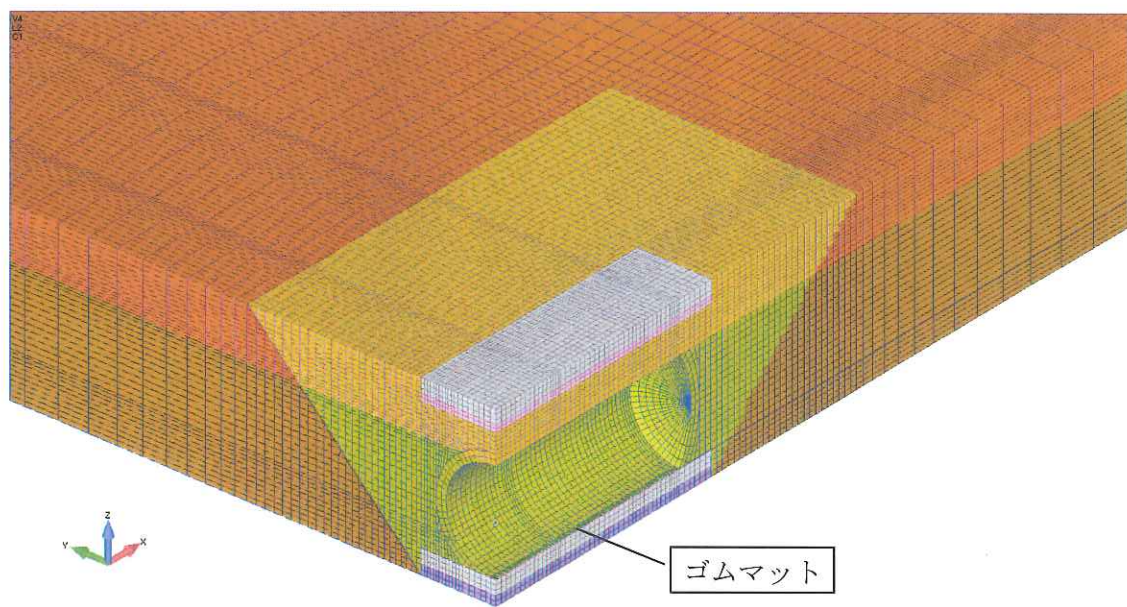


図 1-6 モデルタンク周辺拡大図 (直置き工法)

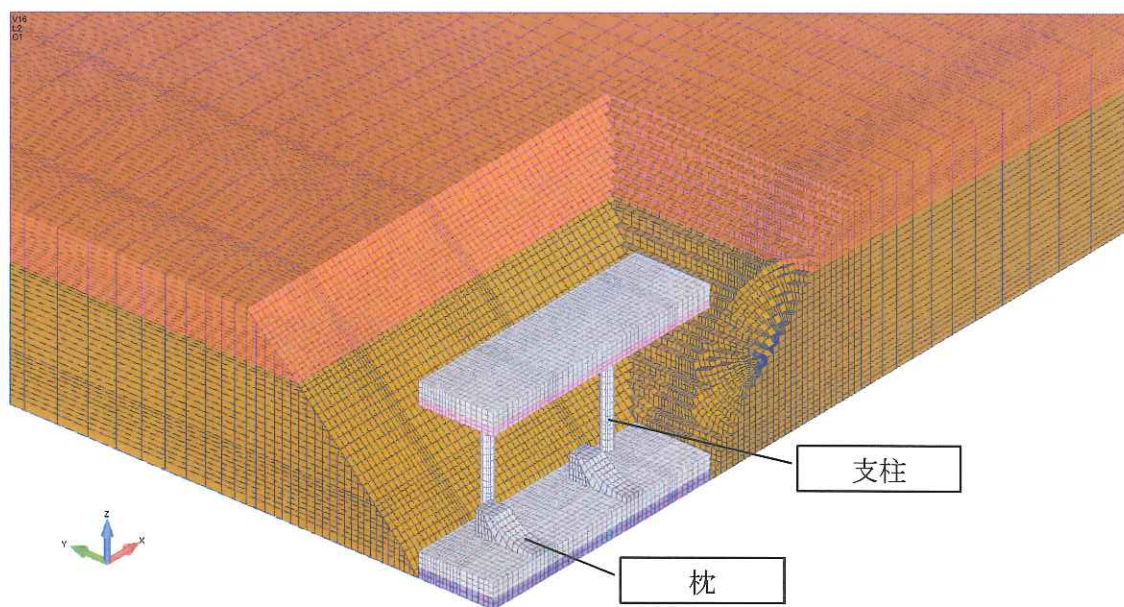


図 1-7 モデルタンク周辺図 (コンクリート枕工法 埋設土非表示)

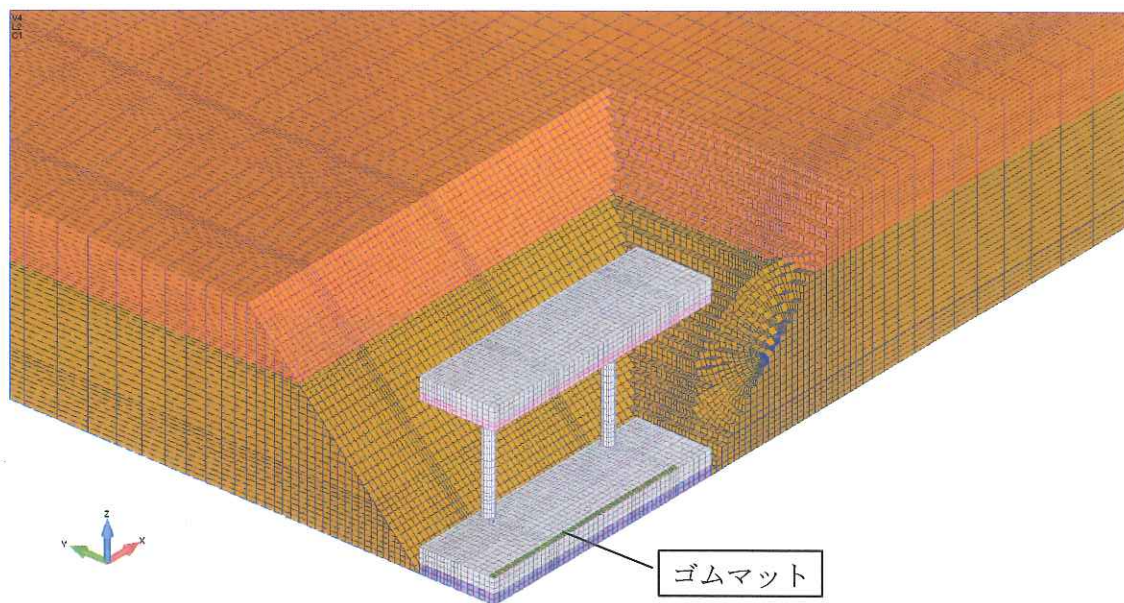


図 1-8 モデルタンク周辺図 (直置き工法 埋設土非表示)

1.4. 解析結果

解析結果を以下に示す。全体モデルとタンク周辺の地盤要素の、ひずみ分布と土圧分布 (σ_x 、 σ_y 、 σ_z)、タンク表面法線方向の応力値グラフを示す。図 1-9 にひずみ分布と土圧分布の表示方向、図 1-10 にタンク表面法線方向の応力値グラフの表示位置を示す。なお、ひずみ分布図では変形を拡大して表示している。また、ひずみ分布・土圧分布では、タンク自体のシェル要素は表示せず、コンクリート・土・ゴムマット要素のみを表示している。

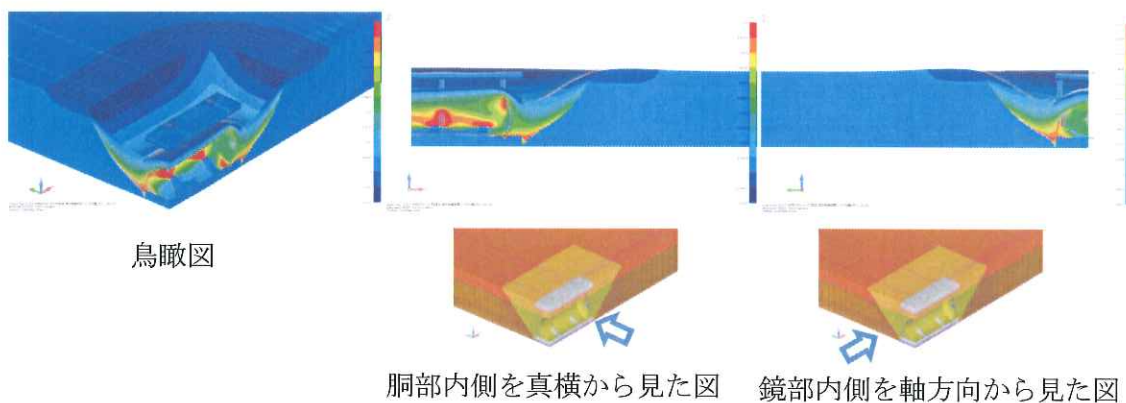


図 1-9 ひずみ・土圧分布表示方向

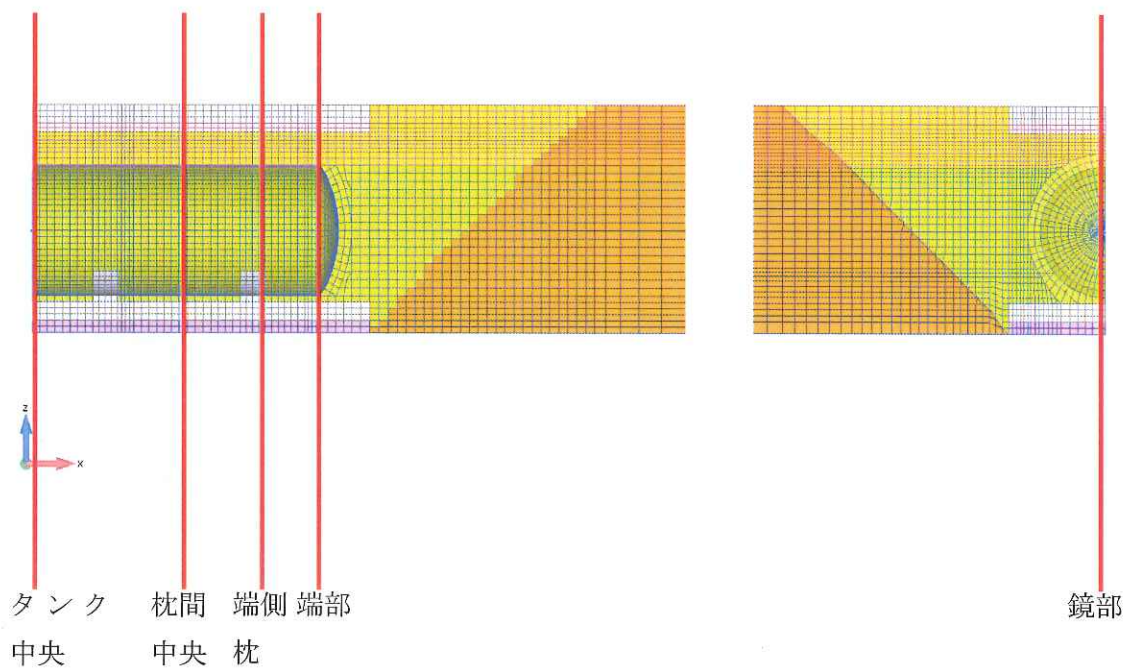


図 1-10 タンク表面方向応力表示位置

1.4.1. ひずみ分布

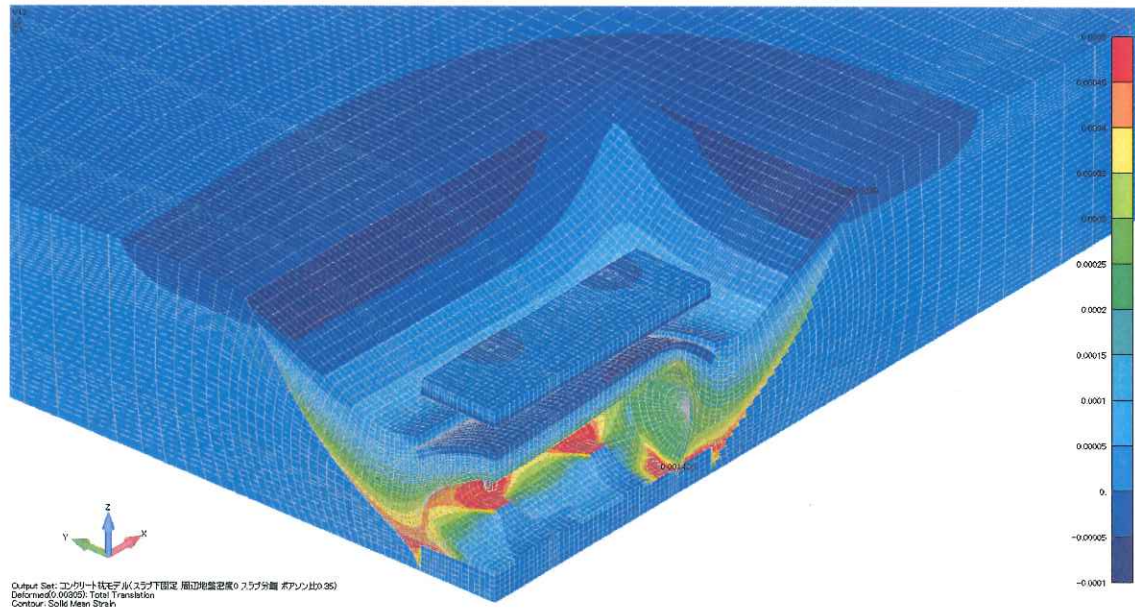


図 1-11 ひずみ分布図 (鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[-])

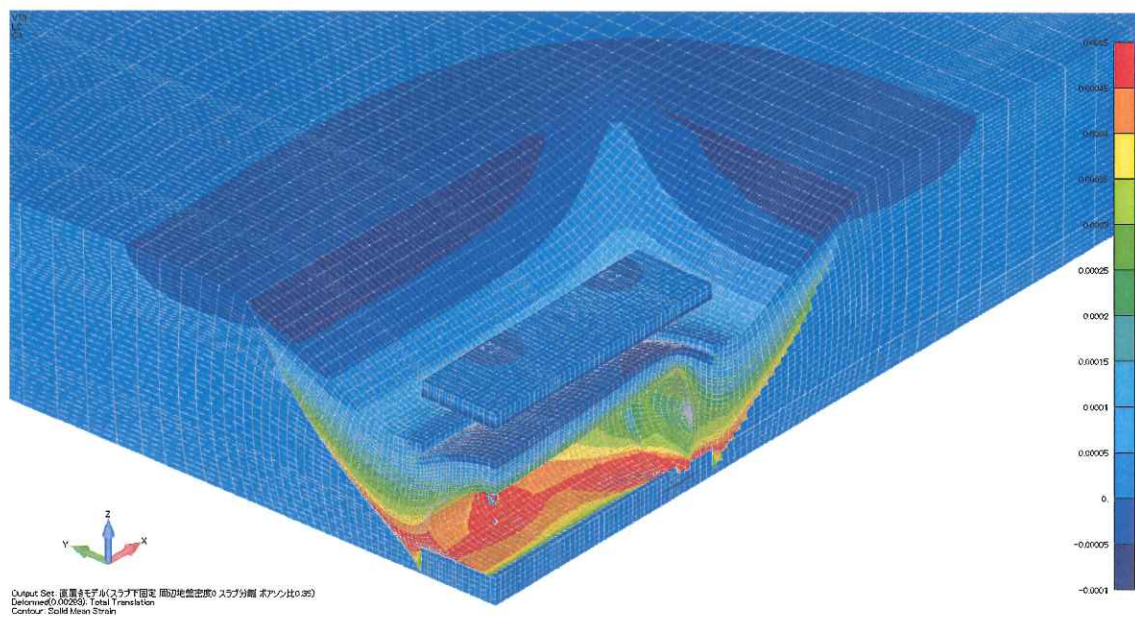


図 1-12 ひずみ分布図 (鳥瞰 直置き工法 単位[-])

V12
L2
C1

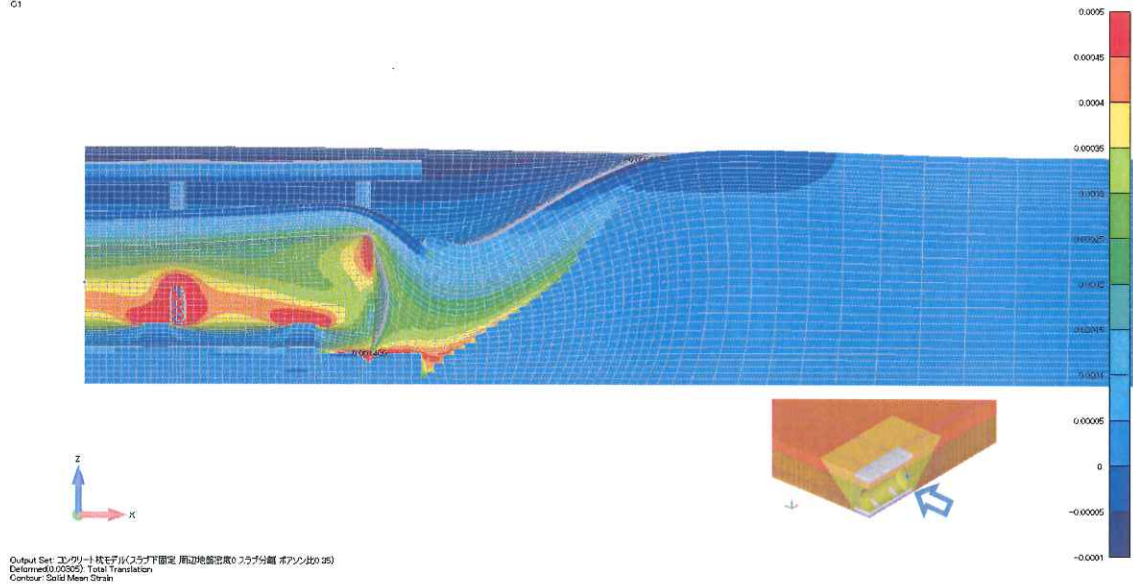


図 1-13 ひずみ分布図 (タンク胴部正面 コンクリート杭工法 単位[-])

V12
L2
C1

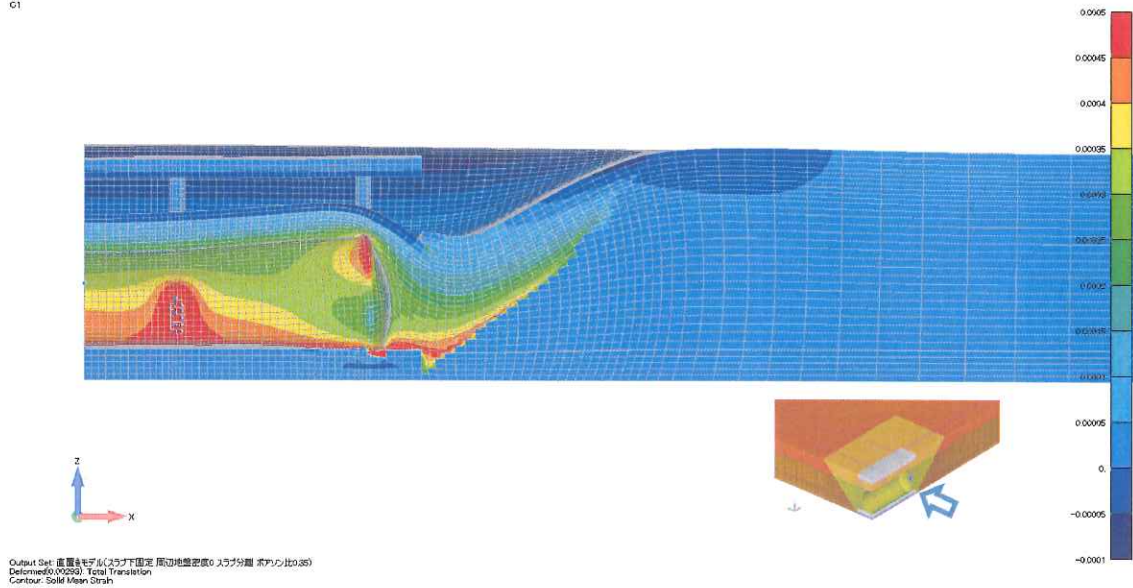


図 1-14 ひずみ分布図 (タンク胴部正面 直置き工法 単位[-])

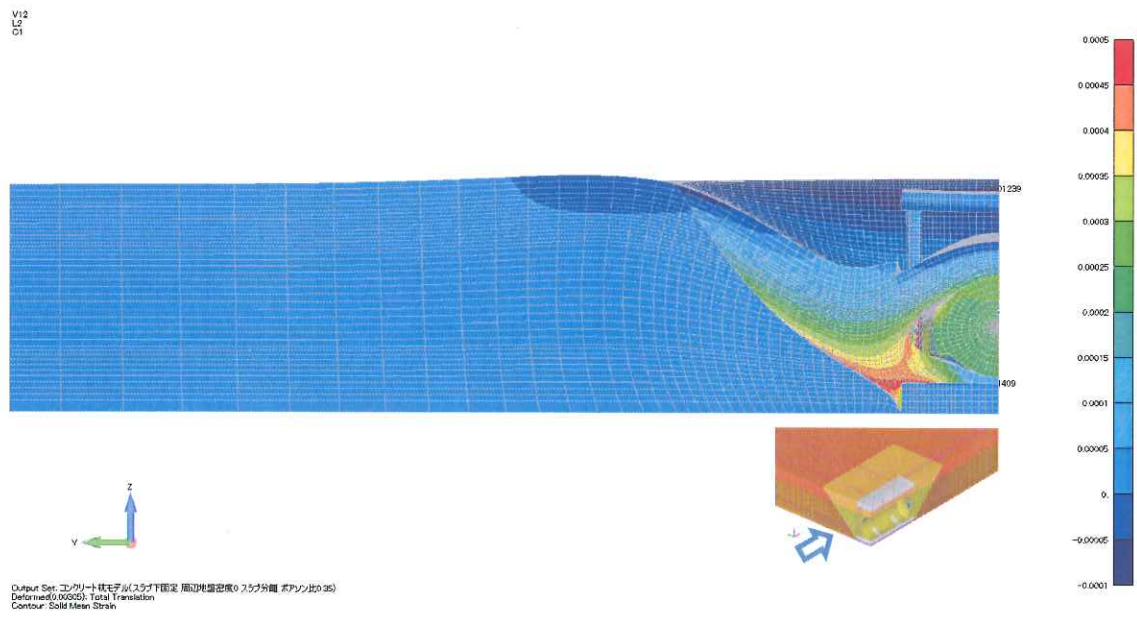


図 1-15 ひずみ分布図 (タンク鏡部正面 コンクリート枕工法 単位[-])

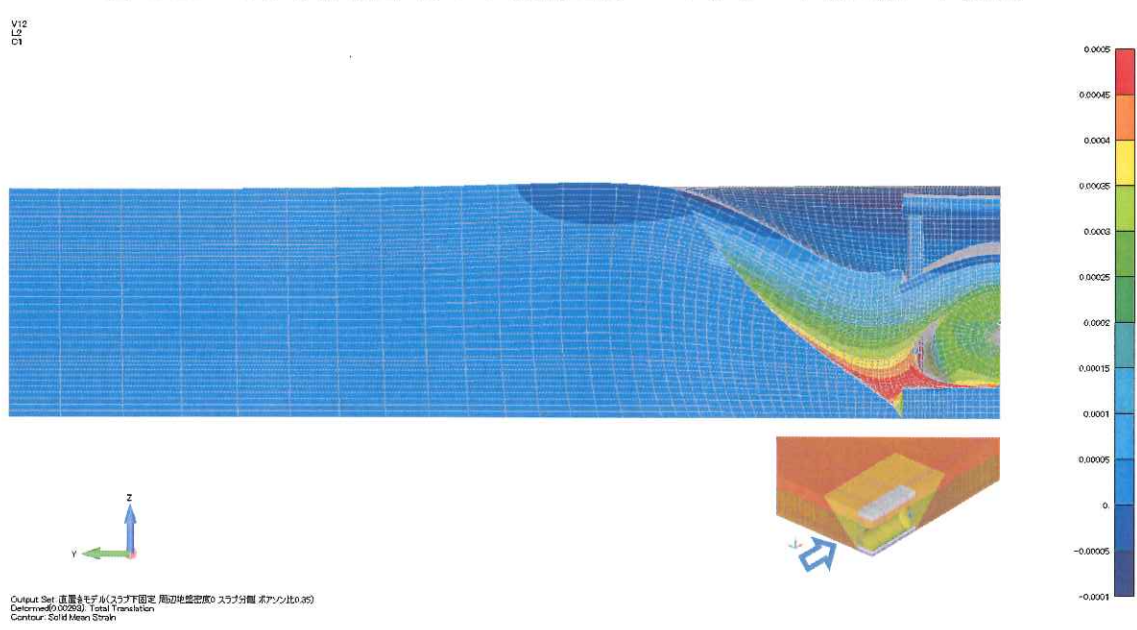


図 1-16 ひずみ分布図 (タンク鏡部正面 直置き工法 単位[-])

1.4.2. x方向垂直応力 σ_x 分布

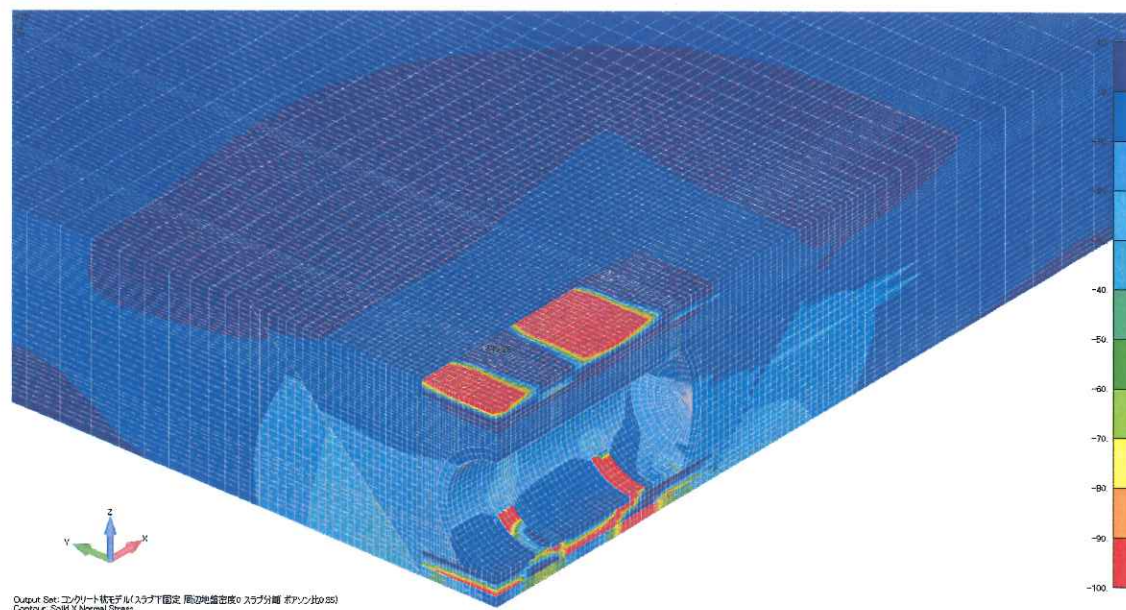


図 1-17 σ_x 分布図 (鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

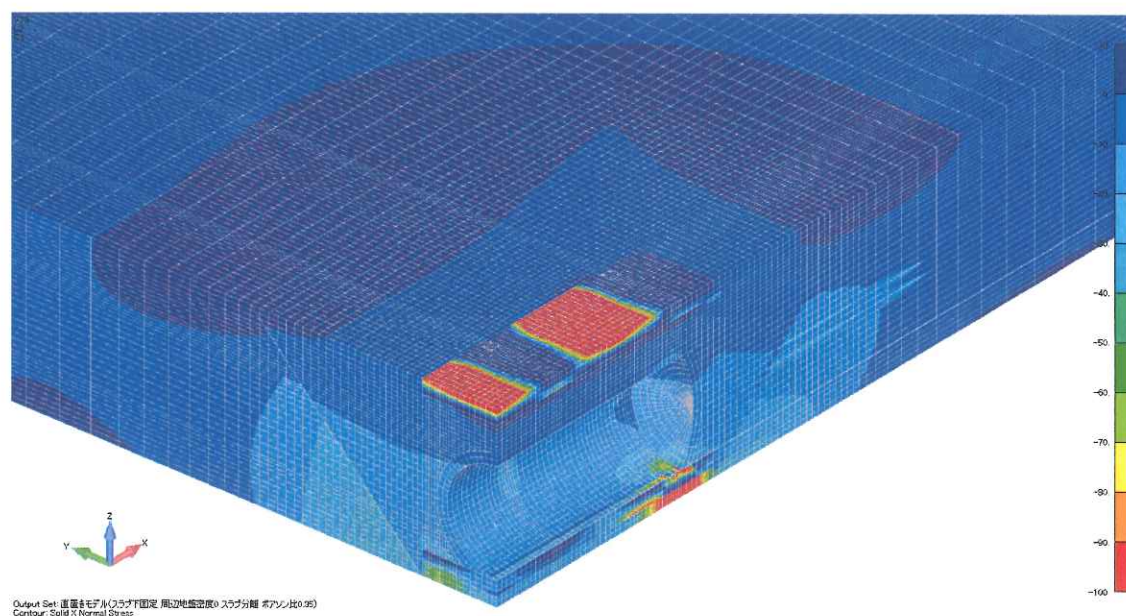


図 1-18 σ_x 分布図 (鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²])

V15
S1

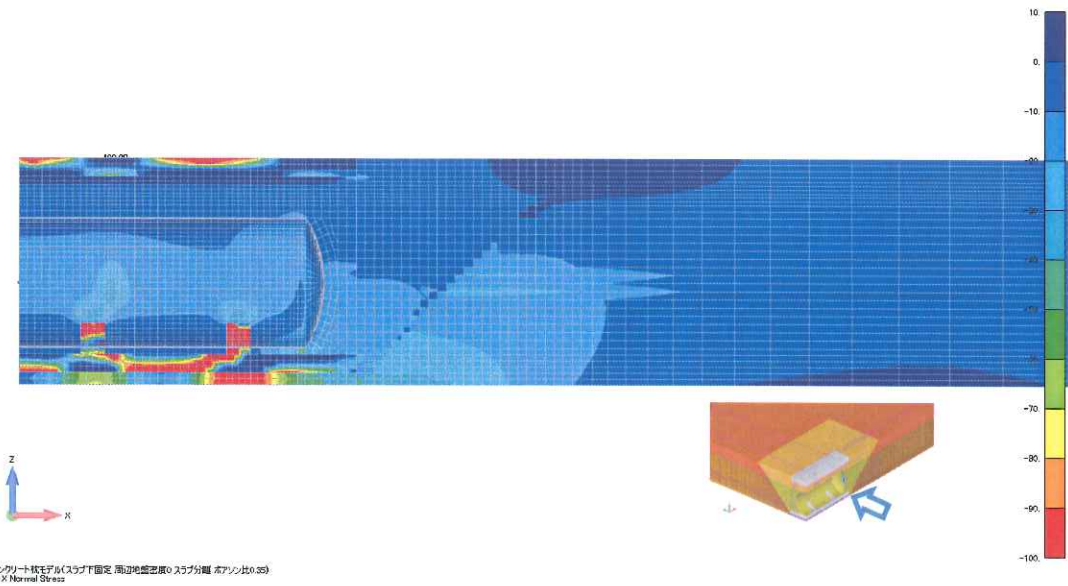


図 1-19 σ_x 分布図 (タンク胴部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V13
S1

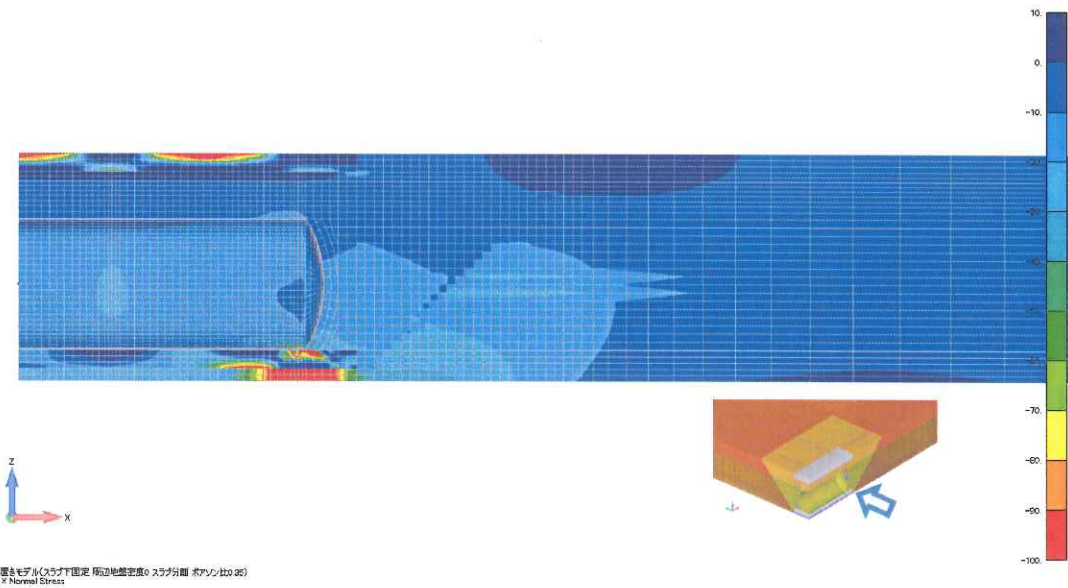


図 1-20 σ_x 分布図 (タンク胴部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

V15
D1

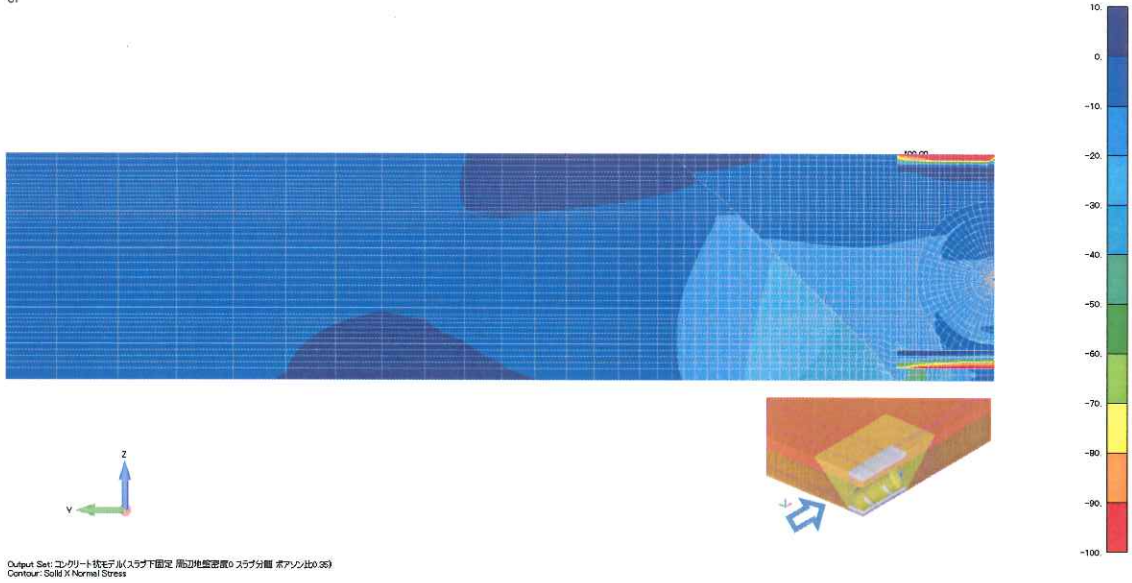


図 1-21 σ_x 分布図 (タンク鏡部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V19
D1

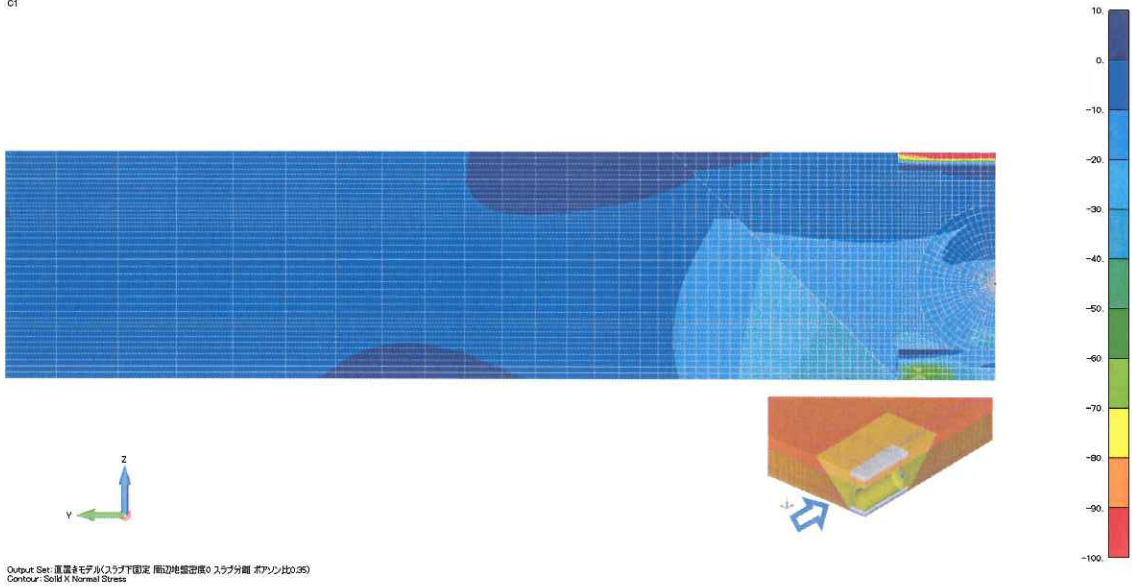


図 1-22 σ_x 分布図 (タンク鏡部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

1.4.3. y 方向垂直応力 σ_y 分布

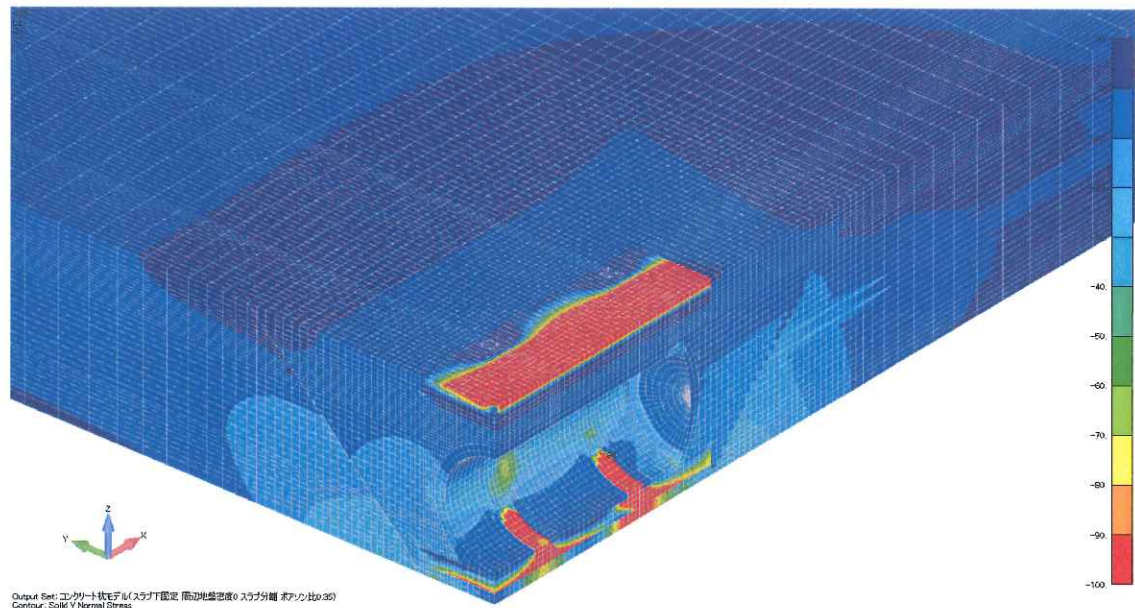


図 1-23 σ_y 分布図 (鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

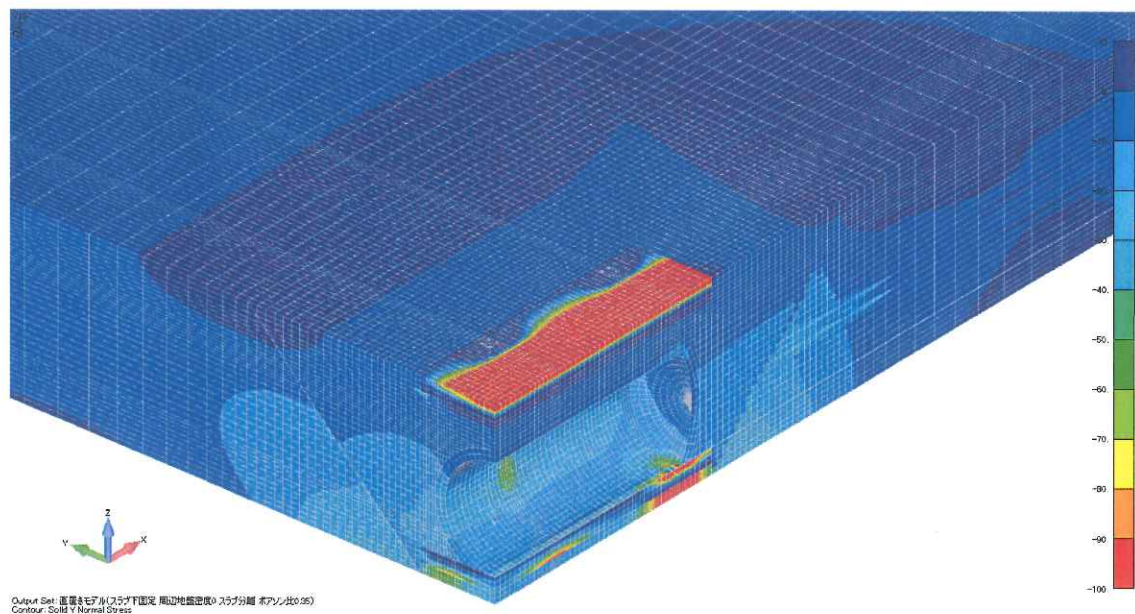


図 1-24 σ_y 分布図 (鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²])

V15
DT

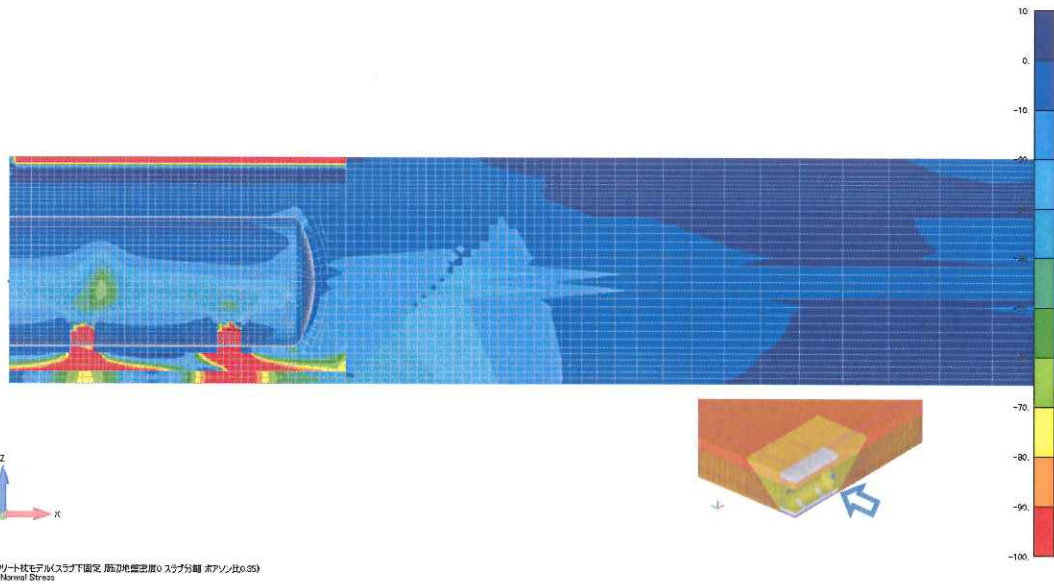


図 1-25 σ_y 分布図 (タンク胴部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V19
DT

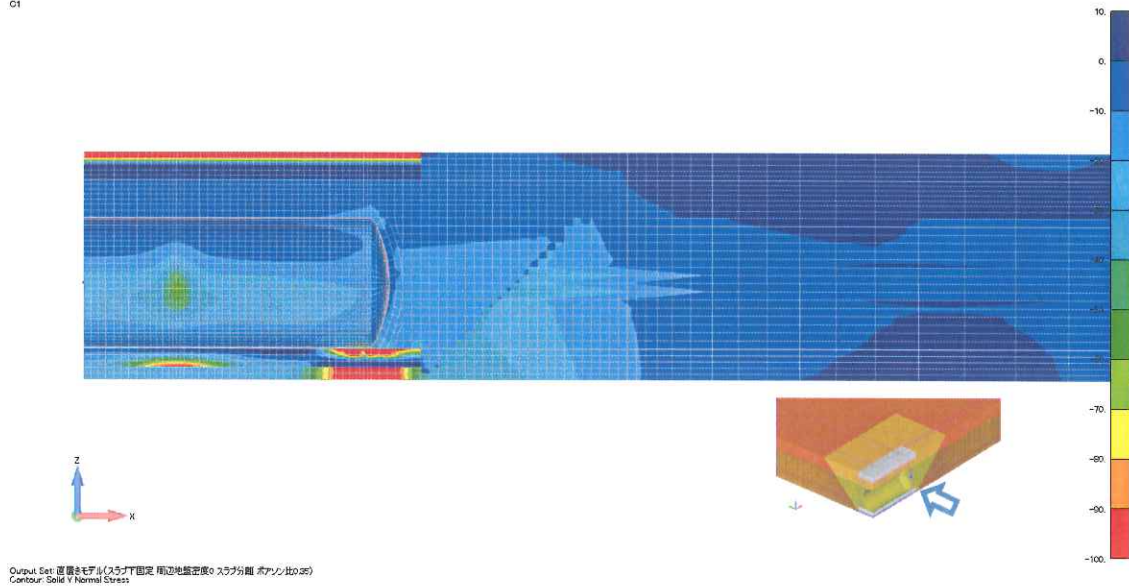
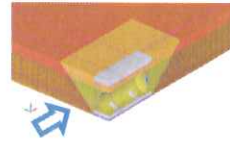
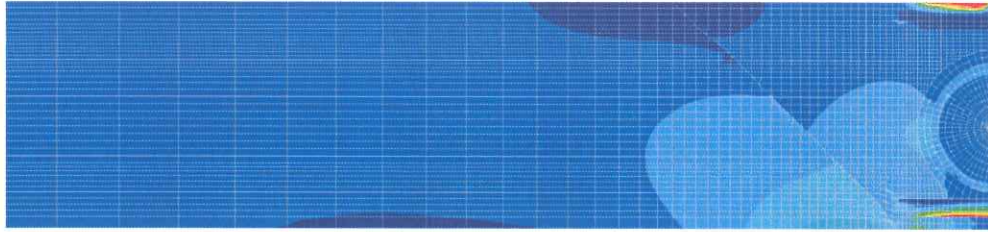


図 1-26 σ_y 分布図 (タンク胴部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

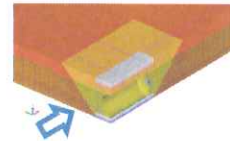
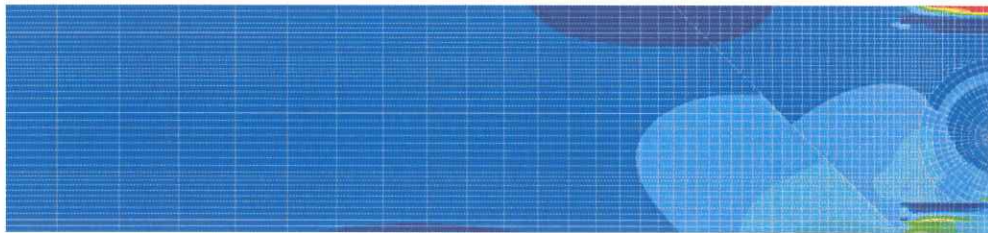
V15
G1



Output Set: コンクリート枕モデル(スラブ下固定 周辺地盤密度の スラブ分離 赤アンク0.05)
Contour: Solid Y Normal Stress

図 1-27 σ_y 分布図 (タンク鏡部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V13
G1



Output Set: 直置きモデル(スラブ下固定 周辺地盤密度の スラブ分離 赤アンク0.35)
Contour: Solid Y Normal Stress

図 1-28 σ_y 分布図 (タンク鏡部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

1.4.4. z 方向垂直応力 σ_z 分布

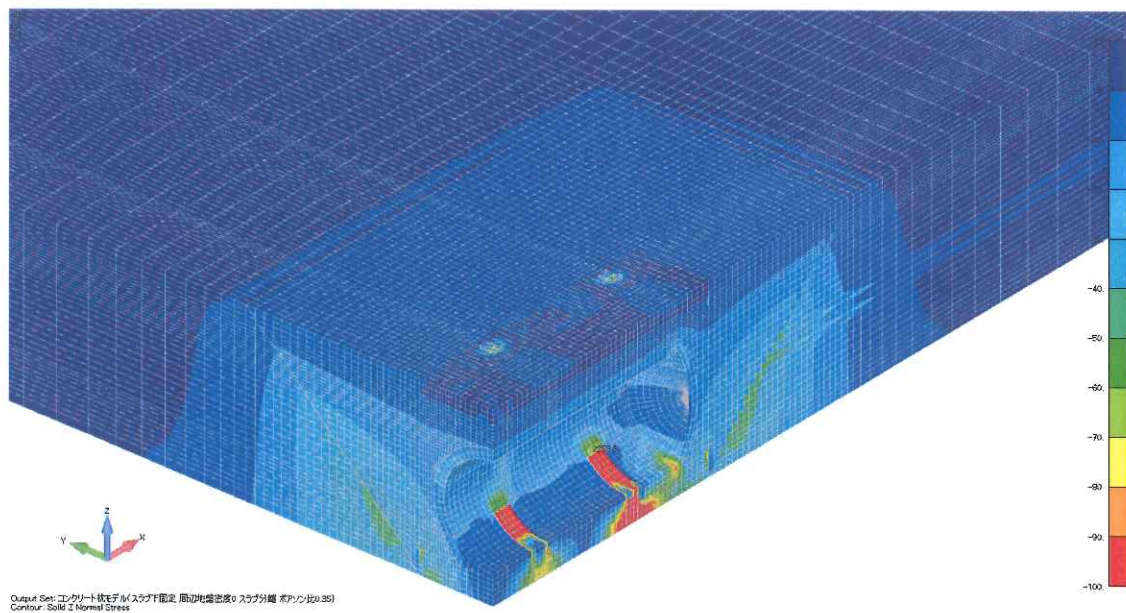


図 1-29 σ_z 分布図 (鳥瞰 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

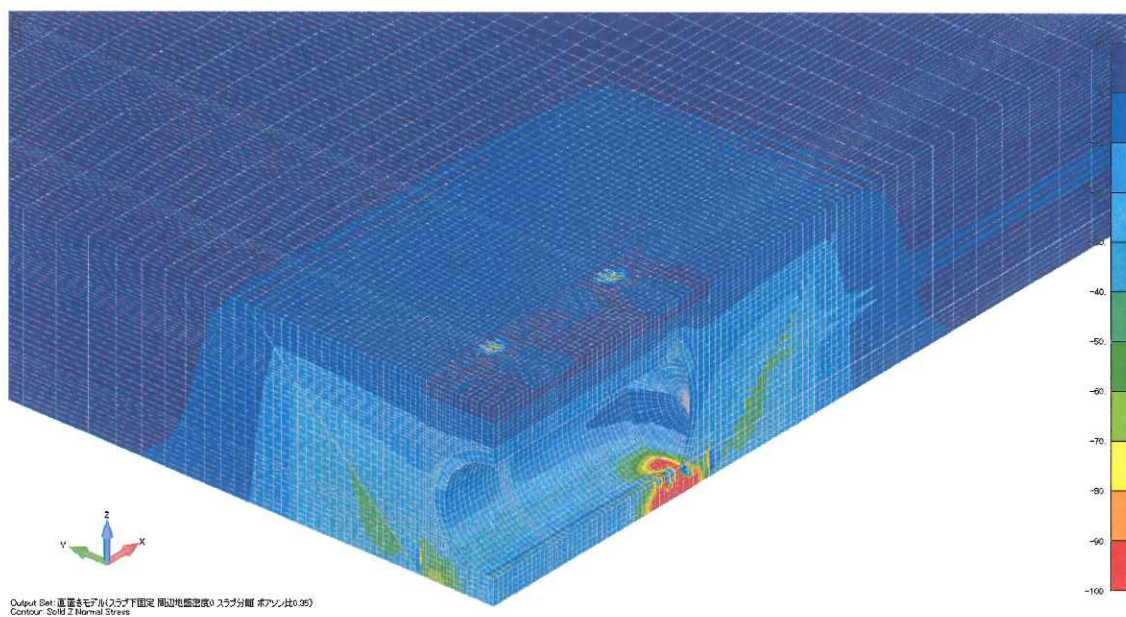


図 1-30 σ_z 分布図 (鳥瞰 直置き工法 単位[kN/m²])

V15
CL5

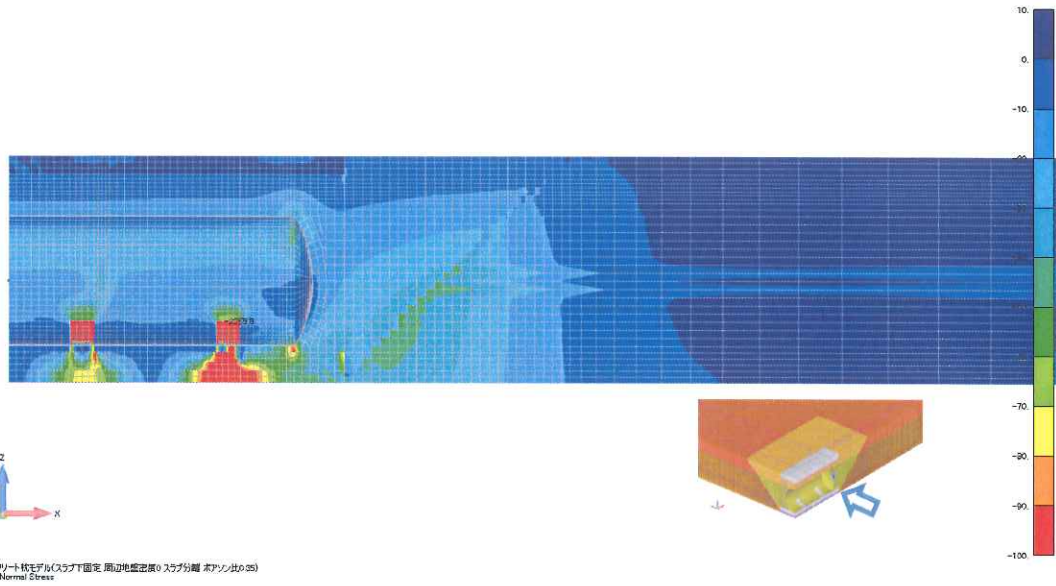


図 1-31 σ_z 分布図 (タンク胴部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V19
CL5

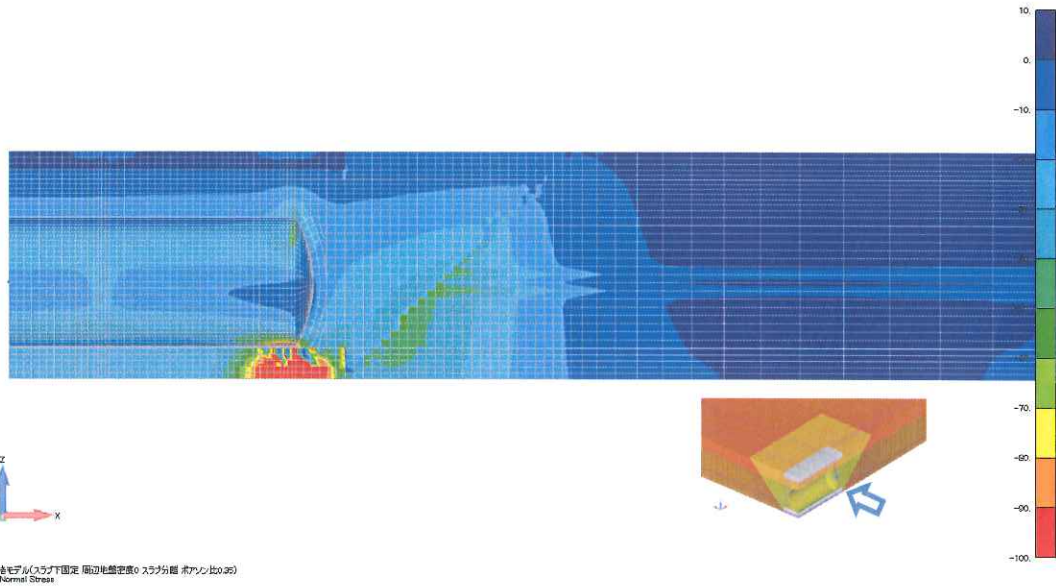


図 1-32 σ_z 分布図 (タンク胴部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

V15
D1

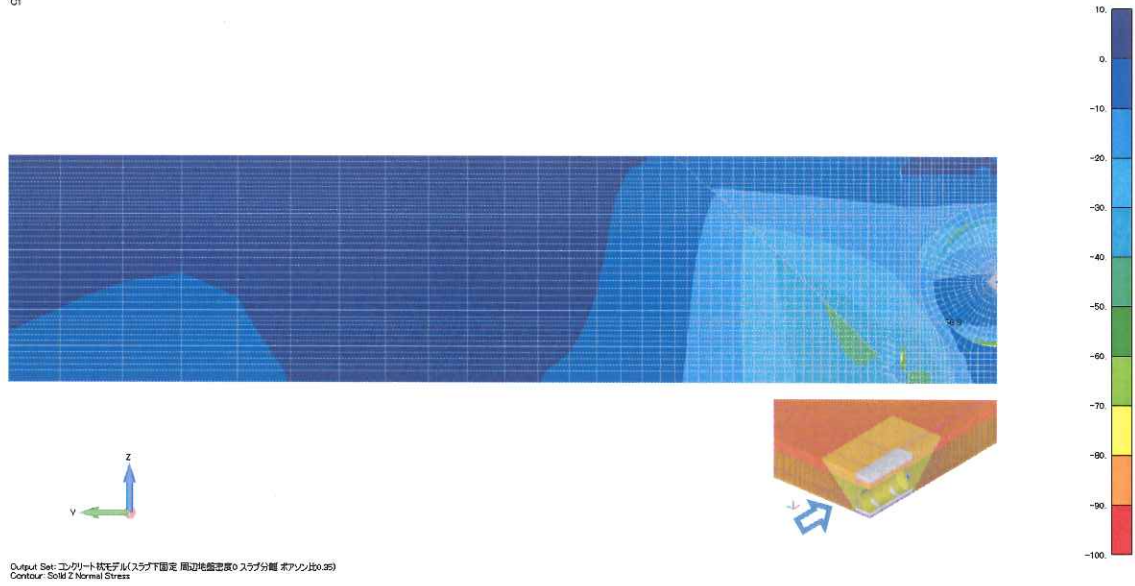


図 1-33 σ_z 分布図 (タンク鏡部正面 コンクリート枕工法 単位[kN/m²])

V13
D1

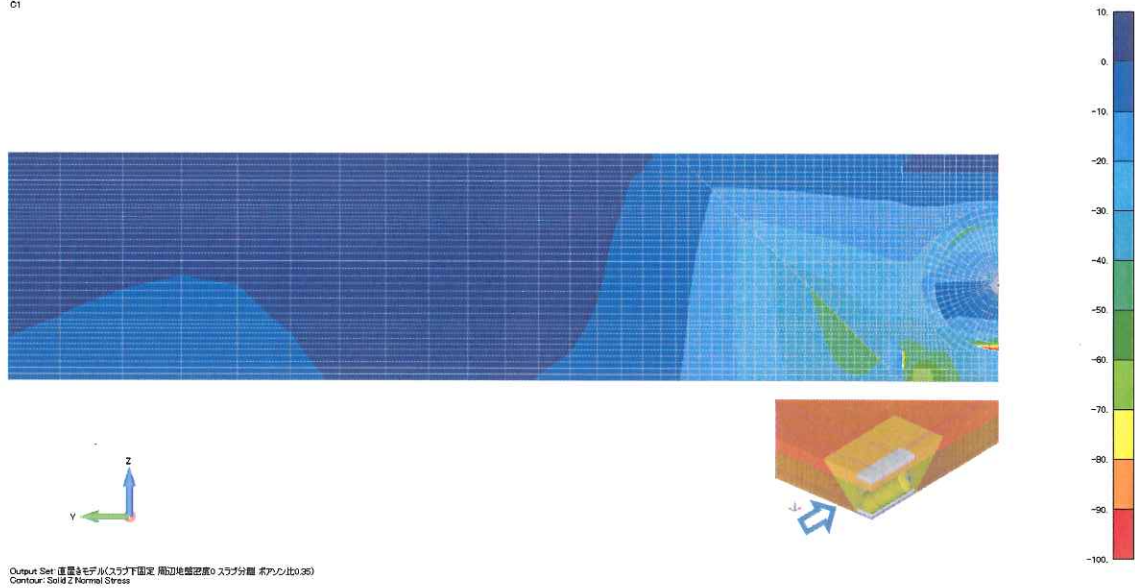
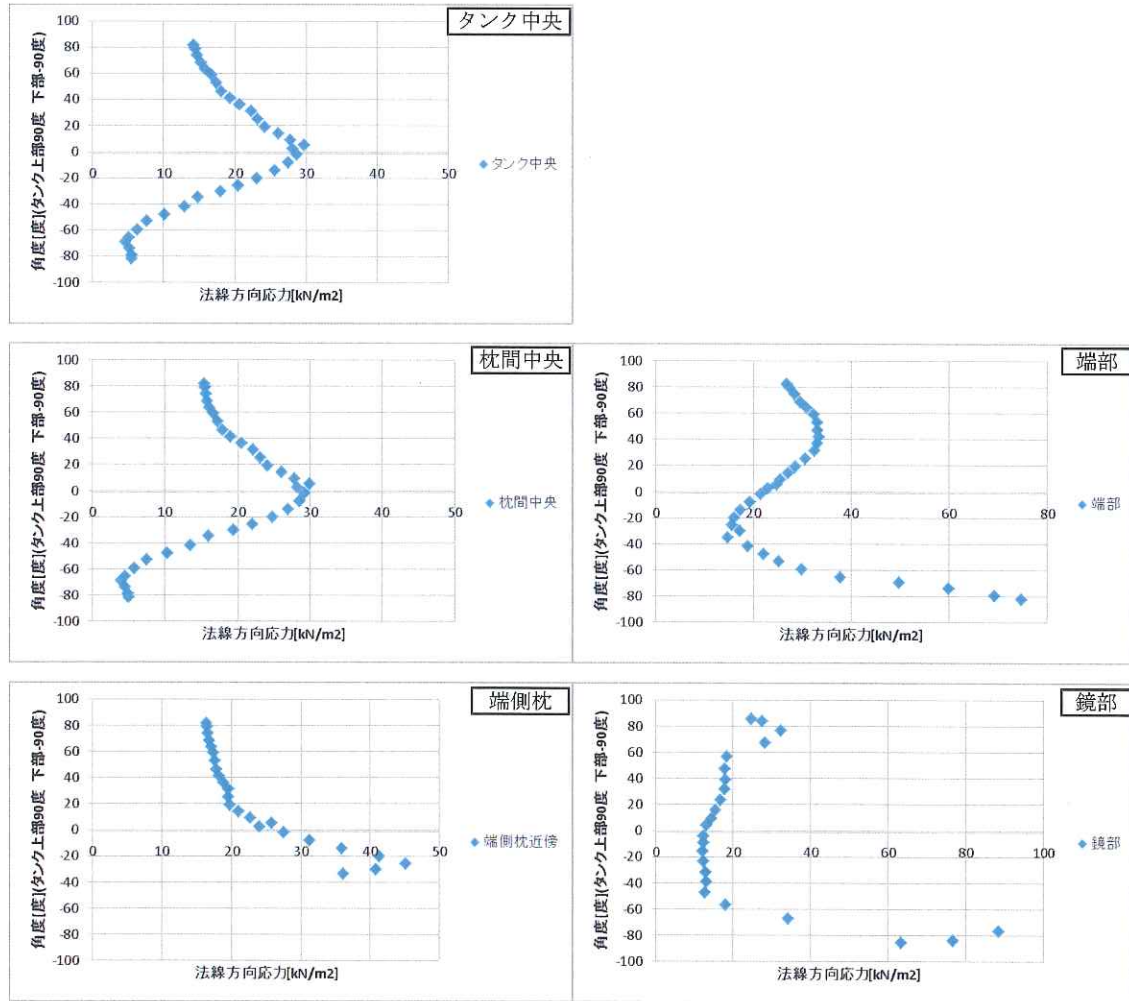


図 1-34 σ_z 分布図 (タンク鏡部正面 直置き工法 単位[kN/m²])

1.4.5. タンク表面法線方向の応力値



(タンク法線方向の応力 圧縮：正)

図 1-35 コンクリート枕工法 単位 $[\text{kN/m}^2]$

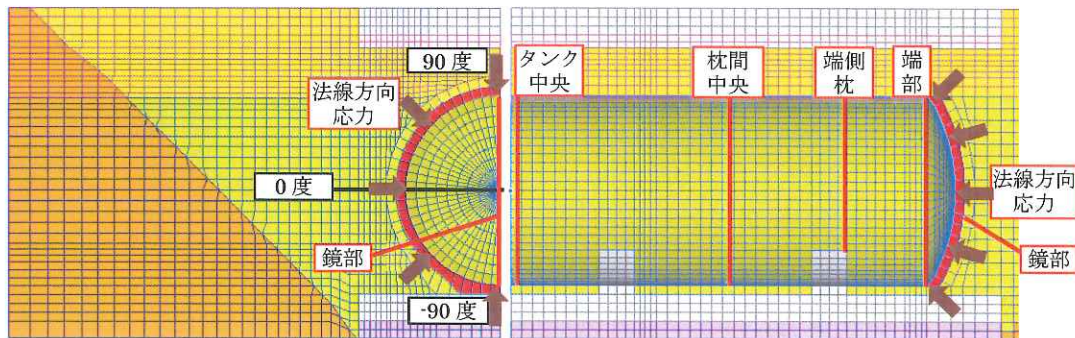
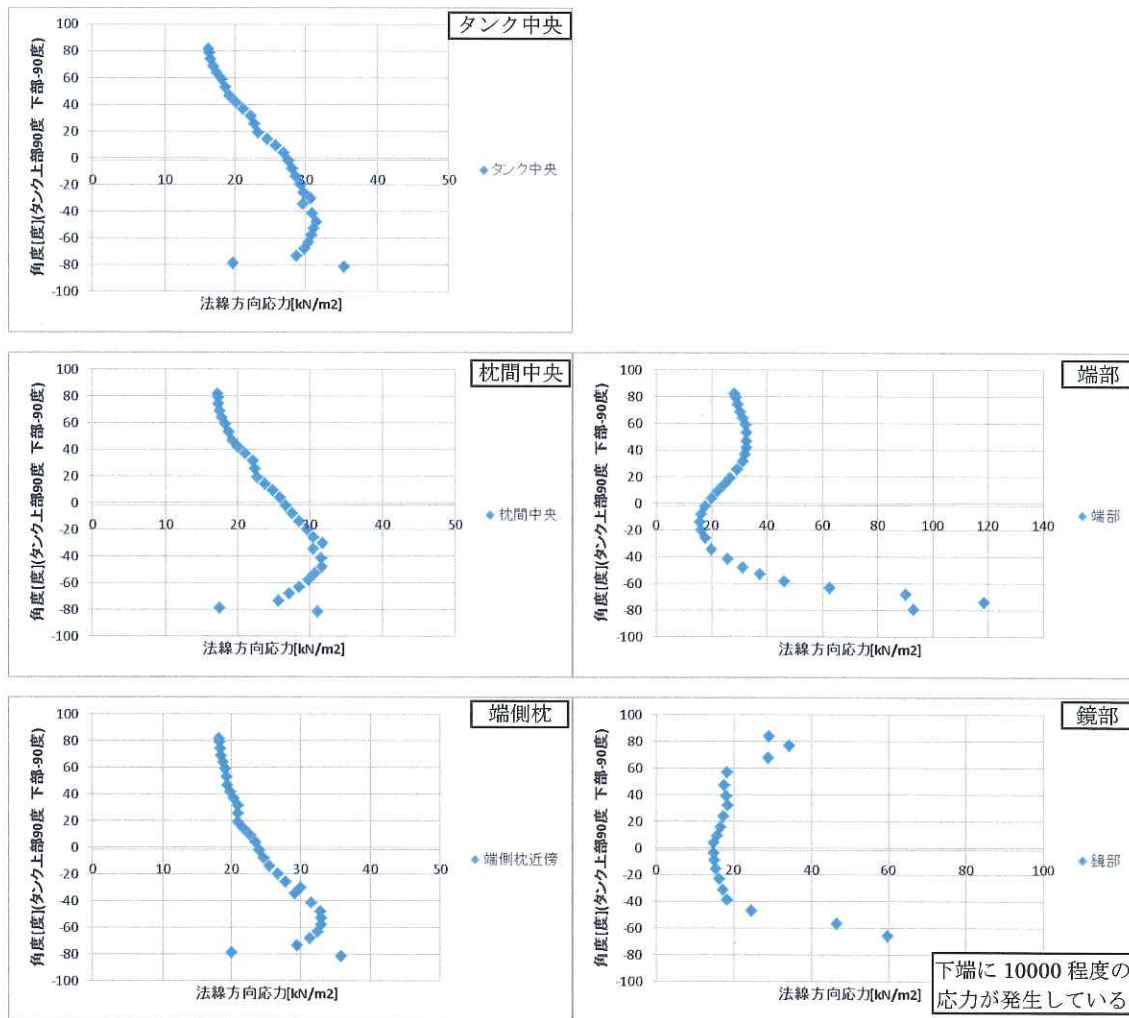


図 1-36 表示位置



(タンク法線方向の応力 圧縮：正)

図 1-37 直置き工法 単位[kN/m²]

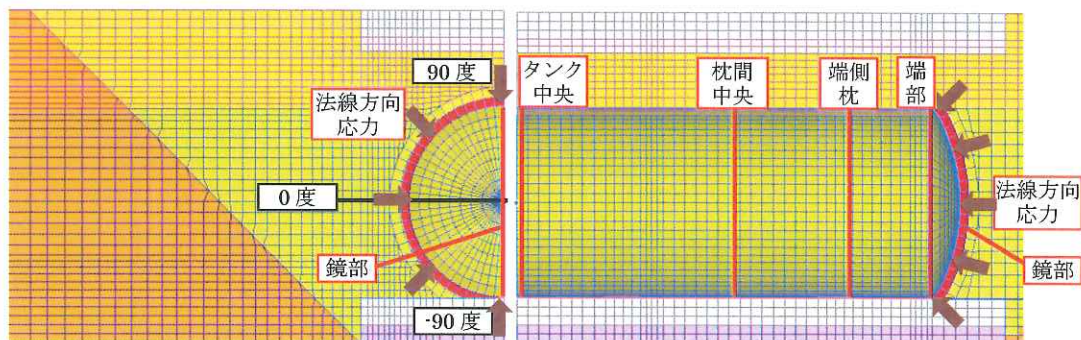


図 1-38 表示位置

1.5. 土圧評価まとめ

自重解析を行い、常時土圧を求めた結果、以下の事がわかった。

- ① タンク周辺の土圧は、タンク工法（コンクリート枕工法、直置き工法）によって変化している。FRP 殻の損傷部位がモデルによって異なる原因の可能性がある。なお、タンクから離れた位置では、工法による土圧の差は無くなり深くなると土圧も大きくなっている。
- ② タンク下側のひずみ・土圧に工法による違いが表れている。コンクリート枕工法では、タンクが枕により支えられているため、下面のひずみ・土圧は小さいが、枕周辺で局所的に大きくなっている。直置き工法では、タンク下面全体で支えているため、胴部下面側のひずみ・土圧が大きい、なだらかな分布となっている。
- ③ 鏡部の下端のひずみ・土圧が大きい。鏡部の剛性が高いため胴部に比べて変形しにくく、鏡部で支えているような構造になっているためである。直置き工法ではコンクリート枕工法に比べて大きい、これはコンクリート枕のような支えがないため、大きくなっていると考えられる。
- ④ x 方向応力や y 方向応力は、上部のスラブ、コンクリート枕、鏡部下部に大きな応力が発生している。上部のスラブについては、支柱が支えている事で変形が生じていると考えられる。またコンクリート枕については、タンクを支えているために x 方向や y 方向の変形が発生していると考えられる。
- ⑤ z 方向応力は、コンクリート枕や鏡部下部に大きな応力が発生している。タンクを支えている部分に生じている。
- ⑥ タンク表面法線方向の応力値について

(ア) コンクリート枕工法

- ① タンク中央～枕付近では、タンク中心高さで最も大きく、中心より下側になると小さくなっている。コンクリート枕で支えているため、タンク下側で地盤に応力が発生しないと考えられる。
- ② 鏡部との境界にある端部では胴側と分布が異なり、ピークはタンク上面側に移動し下面付近でも大きくなっている。鏡部で土圧を支えているため鏡部下端で応力が大きくなり、その影響で周辺応力が大きくなっていると考えられる。
- ③ 鏡部では上端と下端で応力が大きく、中間位置では全体的に小さくなっている。中間で応力が小さいのは、鏡部の剛性が高く地盤の変形が少ないためと考えられる。

(イ) 直置き工法

- ① タンク中央～枕では、タンク下側で最も大きくなっている。胴部下側で支えているためと考えられる。
- ② 鏡部との境界にある端部では、コンクリート枕工法と同様な分布となってい

る。下側での応力値はコンクリート枕工法より大きくなっている。

- ③ 鏡部では、上端と下端で応力が大きく、中間位置では全体的に小さくなっている。コンクリート枕工法と同様に中間で応力が小さいのは、鏡部の剛性が高く地盤の変形が少ないためと考えられる。
- ④ 鏡部下部の下端には、10000 [kN/m²] 程度の非常に大きな応力値が発生している。これは、下端 1 点で荷重を支えているモデル化となっているために、その節点直下の要素に応力が集中したためと思われる。本検討では地盤を線形要素として取り扱っているために応力値が大きくなっているが、実際には地盤が塑性状態に至っていると考えられるため、応力値は大きくならないと考えられる。

2. SF 二重殻タンクの解析（タンク評価）

2.1. 解析条件

2.1.1. モデル化

図 2-1、図 2-2 にそれぞれの工法の概略を示す。

解析では、タンクと基礎マットを FEM モデルとする。基礎マット下は固定とする。タンク周りには FB9×50 のバンド 4 本があり、初期に 10[kg] の初期張力を与え、基礎マットに固定されている。直置き工法は、タンク下にゴムマットが敷かれているので、硬度 60 相当のヤング率を持つ厚さ 10[mm] の等方弾性体としてモデル化する。ゴム上の面と、タンクの周囲は接触を設け、解析初期には線で接しているが荷重が加わると面で接する。また鏡部の FRP と鋼製タンクも接触面を設け FRP が鋼製タンクに当たることを考慮している。タンク内には高さの半分まで、内容物が入っていると仮定し内圧を荷重として与える。タンク周囲には N 値 5 相当の地盤バネを設ける。この地盤バネは圧縮にのみ有効な剛性を持つ。タンク下側では、タンクが完全に地盤に支持される状態は考えにくいので、地盤バネは設けない。

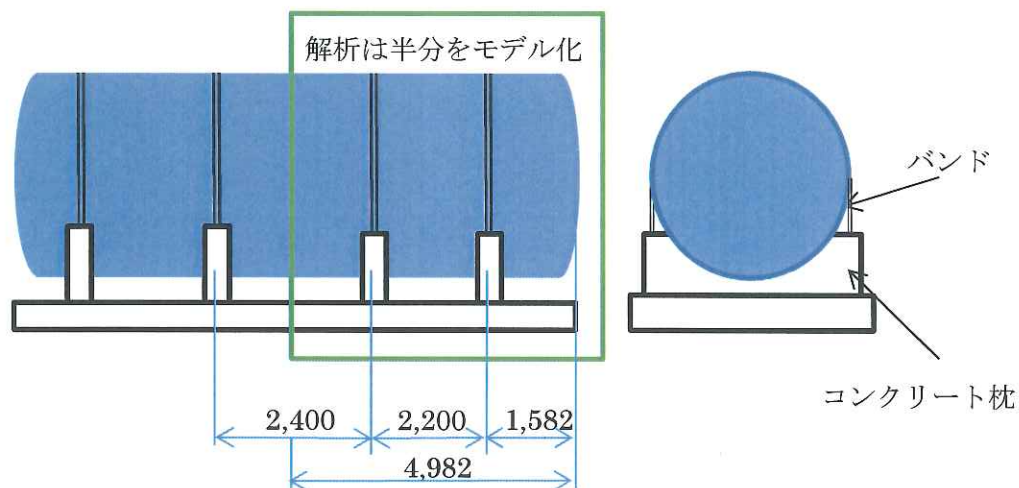


図 2-1 コンクリート枕工法（単位[mm]）

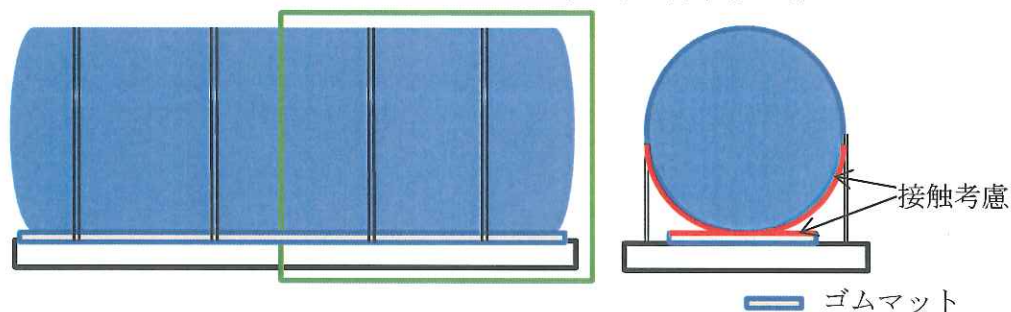


図 2-2 直置き工法

図 2-3 に鏡部の詳細な寸法を示す。鏡部における FRP 殻と鋼製殻の間隙は 3[mm]でモデル化するが、胴部は内外殻間隙なしと考え、FRP 殻はモデル化しない。鏡部では鋼製殻外面と、FRP 殻内面が接触することとしている。鏡部 FRP 板厚は 2.5[mm]である。鏡部の高さは 407[mm]である。なお、鏡と胴の境界 250[mm]間の板厚は 5[mm]である。鏡部の隅は 1/10R (鏡部直径 2100[mm]の 1/10 のアール) を持つこととしている。

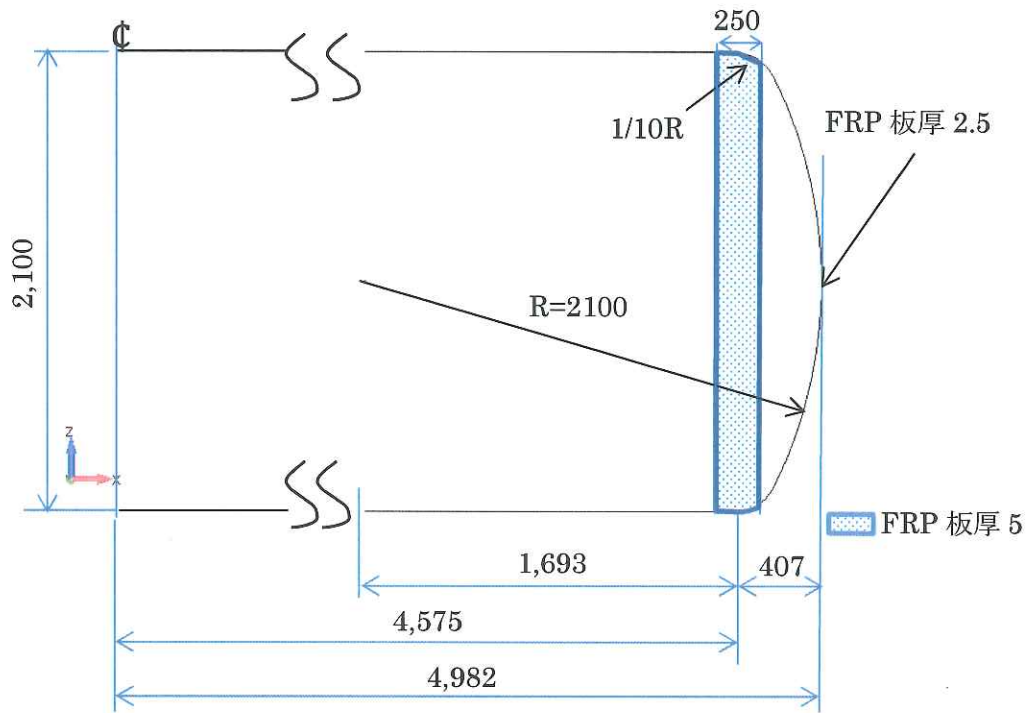


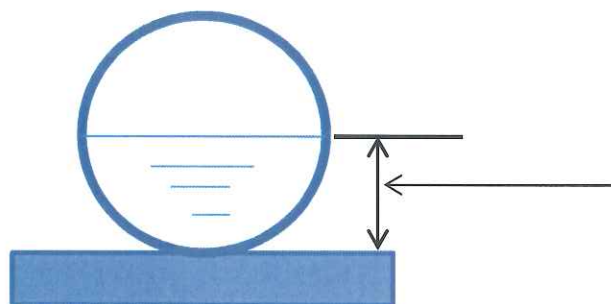
図 2-3 タンク鏡部詳細 (単位[mm])

2.1.2. 解析条件

解析条件を表 2-1 にまとめる。

表 2-1 解析モデル 諸条件

タンク形状	30KL ストレート(単位 mm)	
FRP 部	鏡部直径	2,100
	鏡部高さ	407
	円筒部長さ	9,150
	鏡隅アール	1/10R=210
	鏡部板厚	2.5
	胴部板厚	8
	鏡部 SF 間隙	3
	胴部 SF 間隙	0
	バンド位置(4 本)	4 本 2,200mm 間隔
	コンクリート枕高さ	500
	ゴムマット剛性	硬度 60 程度
	バンド引張力(節点力)	10kg
	ゴムマットの端部位置	中心より 5,125
その他	鏡部と胴部の接合位置 250 幅、板厚 5	
鋼製タンク	鏡部板厚	9
	胴部板厚	8
地盤	地表コンクリート土間厚さ	300
	基礎マット	300
	埋土物性 ヤング率、ポアソン比	N 値=5 程度
	周辺土物性 ヤング率、ポアソン比	N 値=15 程度
	水位	有り(タンク頂部まで)
	内容物単位体積重量	0.75、タンク 1/2 高さまで
	埋土深さ	700



その他の条件を以下に示す。

- 直置きはタンクとゴムの間は接触要素を用いている。
- 鏡部 FRP と鋼製タンクの間は接触要素を用いている。
- ベースマット下は固定としている。
- FRP の強度は 80,300[kN/m²] (平成 24 年 3 月 SF 二重殻タンクの外殻の安全性向上対策に係る調査検討報告書 p43 引張強さ等の試験結果 外殻 FRP7⑦鏡部)
- バンドの剛性
ヤング率 2.05×10⁸[kN/m²] FB-9×50 従って断面積は 0.00045[m²]
- コンクリートは Fc21 とし、ヤング率は建築学会「鉄筋コンクリート計算規準・同解説」より以下の式から算出した。

$$3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}}$$

ここに、Fc=21、γ=23

- ゴムマットのヤング係数は以下の資料を参照した。硬度 60 度のヤング率を採用した。

●シリコンゴムのヤング率
(注:以下に載せる値は目安であり、必ずしも保障されるものではありません)

T社汎用シリコンゴム

↓ 硬度 上昇	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>硬度</td><td>20度</td><td>4</td><td>[MPa]</td></tr> <tr><td>硬度</td><td>30度</td><td>5.4</td><td>[MPa]</td></tr> <tr><td>硬度</td><td>40度</td><td>8.9</td><td>[MPa]</td></tr> <tr><td>硬度</td><td>50度</td><td>14.2</td><td>[MPa]</td></tr> <tr><td>硬度</td><td>60度</td><td>28.1</td><td>[MPa]</td></tr> <tr><td>硬度</td><td>70度</td><td>40.3</td><td>[MPa]</td></tr> </table>	硬度	20度	4	[MPa]	硬度	30度	5.4	[MPa]	硬度	40度	8.9	[MPa]	硬度	50度	14.2	[MPa]	硬度	60度	28.1	[MPa]	硬度	70度	40.3	[MPa]	↓ 数値 上昇
硬度	20度	4	[MPa]																							
硬度	30度	5.4	[MPa]																							
硬度	40度	8.9	[MPa]																							
硬度	50度	14.2	[MPa]																							
硬度	60度	28.1	[MPa]																							
硬度	70度	40.3	[MPa]																							

Mpa・・・メガパスカル(1×10⁶の6乗パスカル)

共和ゴムホームページ (<http://www.kyowakg.com/tech/etc/young.html>) による

- 各材料物性を表 2-2 に示す。

表 2-2 材料物性

材料	E[kN/m ²]	ポアソン比
鋼製	205,000,000	0.3
コンクリート	21,682,000	0.2
ゴムマット	28,100	0.499
FRP	6,450,000	0.3

- タンク周りの法線方向には地盤バネを設ける。ただし地盤バネは、圧縮にのみ有効に働く。地盤バネ物性は道路橋示方書・同解析 下部構造編 (平成 24 年 3 月) p285 より、以下の式で決定する。

N : 地盤の N 値

E_0 : 地盤の変形係数[kN/m²]

α : 換算係数

K_v : 鉛直地盤反力係数[kN/m³]

B_v : 基礎の幅 ここではタンクの径とする。

タンク周り地盤 N 値=5

$E_0=2800N$ [kN/m²]

$\alpha=1$ (常時)

$k_{v0} = (1/0.3) \times \alpha \times E_0$

$K_v = k_{v0} \times (B_v/0.3)^{-3/4}$

$B_v=2.1$ [m]

$K_v=10843.84$ [kN/m³]

2.1.3. 解析モデル

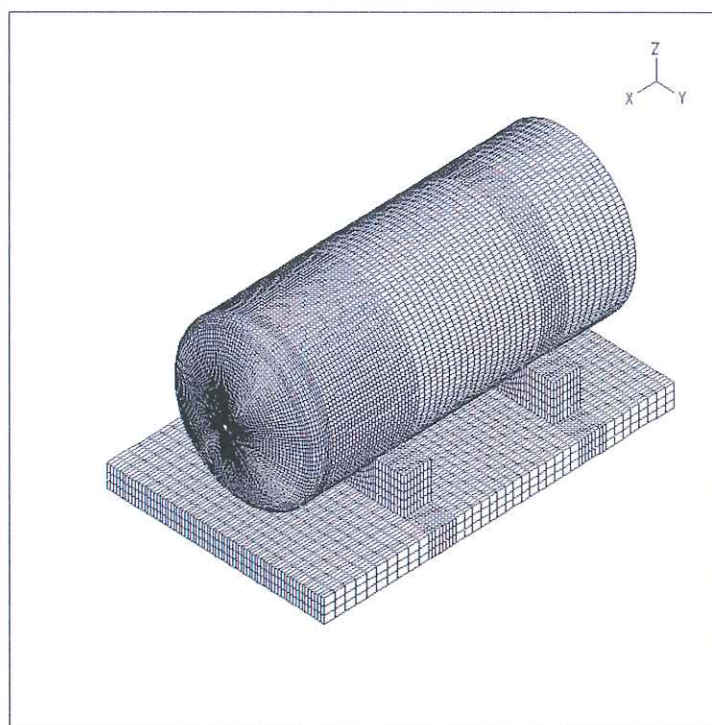


図 2-4 コンクリート枕 モデル図

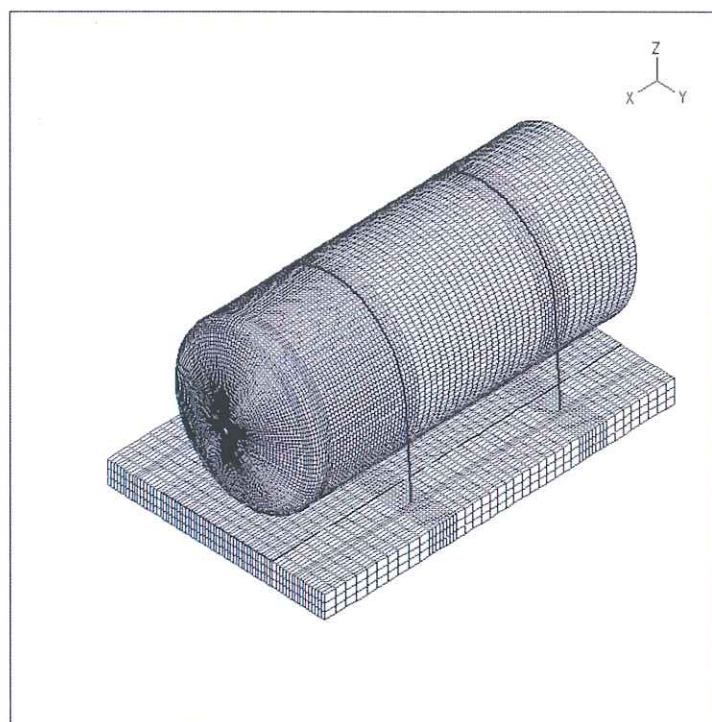


図 2-5 直置き モデル図

タンク周囲に地盤バネを設けているが、タンク下部は基礎版に荷重がかかる場合を解析の対象にする意図から、地盤バネはタンク下部には設けていない。

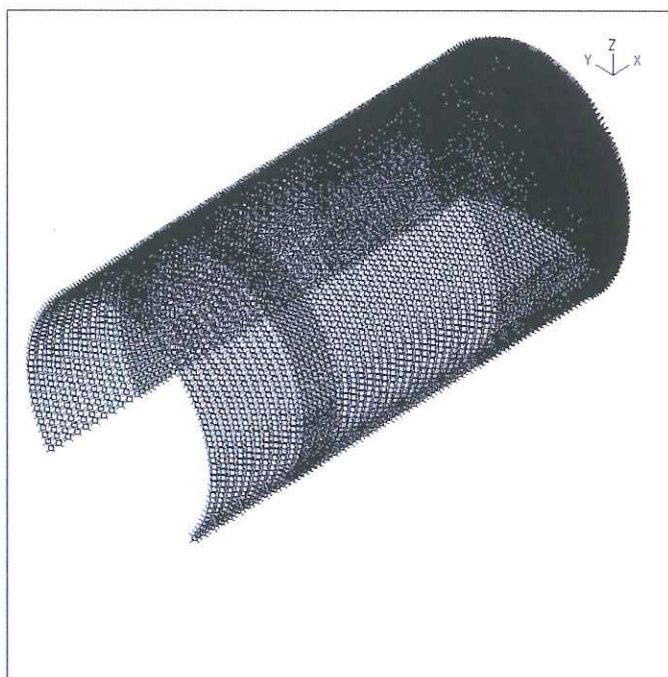


図 2-6 地盤バネ

2.2. 荷重

荷重は地盤 FEM 解析で求めた土圧および内容物の内圧荷重であり、以下の荷重図で土圧と水圧が同時に作用する要素はその合計の圧力図になっている。土圧解析は線形解析としているため、極端に大きな応力の発生する場合がみられる。実際には、土は非線形性をもつことを考え極端に大きな応力は採用しない。

図 2-7 鏡部は水圧、図 2-8 は土圧を表示している。

2.2.1. コンクリート枕工法

土圧解析の結果を採用している。鏡部下部の土圧の最大値は $83.69[\text{kN/m}^2]$ である。



図 2-7 鋼製タンク圧力荷重

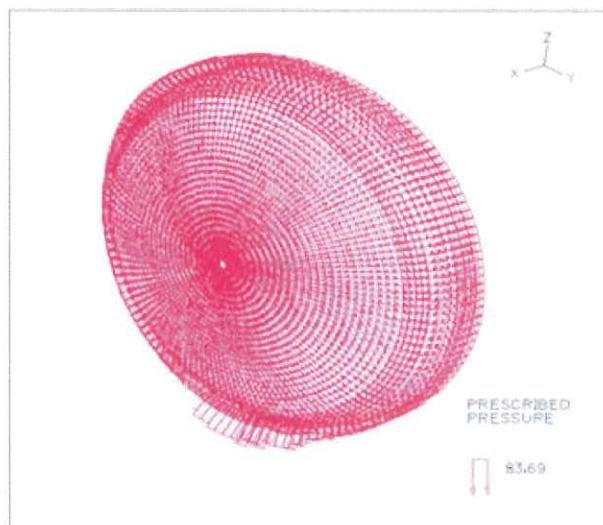


図 2-8 FRP 圧力荷重

2.2.2. 直置き工法

土圧解析結果で、800~10000 [kN/m²]程度の圧力が出ている要素が 24 個あった。地盤解析は弾性で行っているので、このような結果となっているが、実際の地盤（埋設土）では耐力を超え塑性域に入ると考えられる。そこで、これらの部分の土圧は、隣接する要素の値に置き換えた。

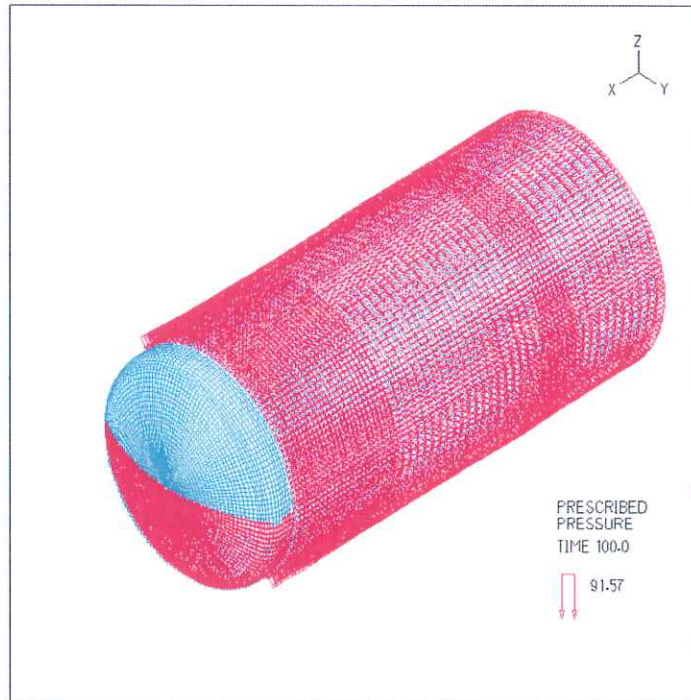


図 2-9 鋼製タンク圧力荷重

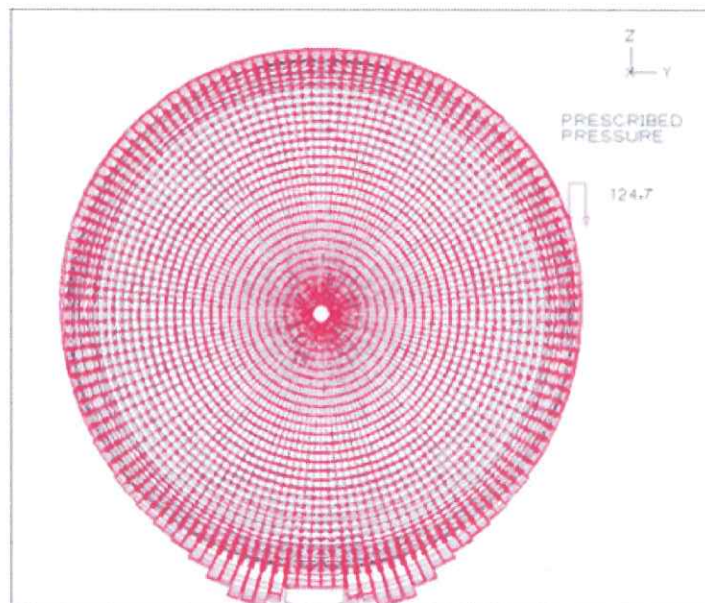


図 2-10 FRP 圧力荷重

2.2.2.1.1.1.1.結果

2.2.3. コンクリート枕工法

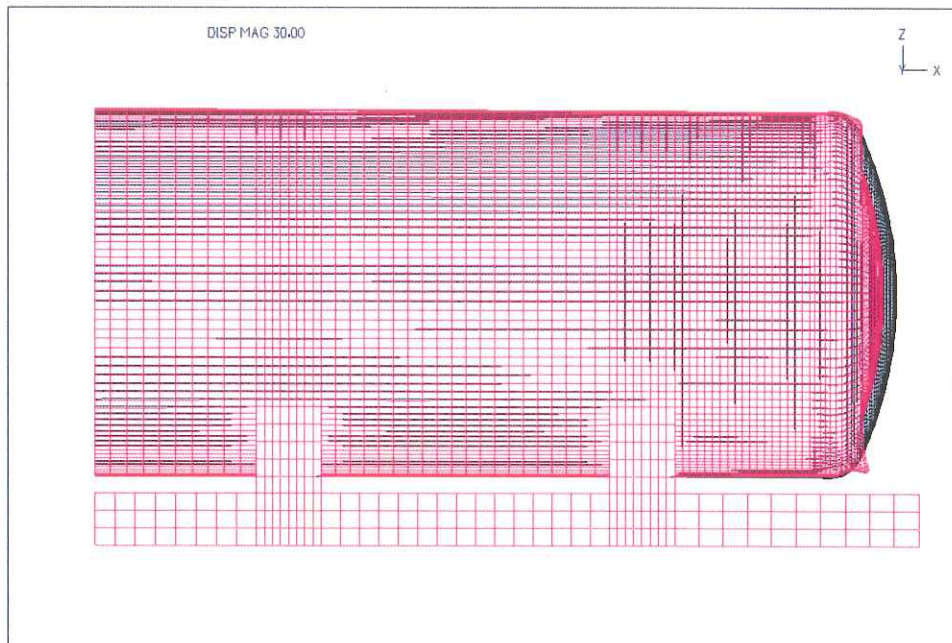


図 2-11 タンク変形 30 倍 (変形後 : 赤線)

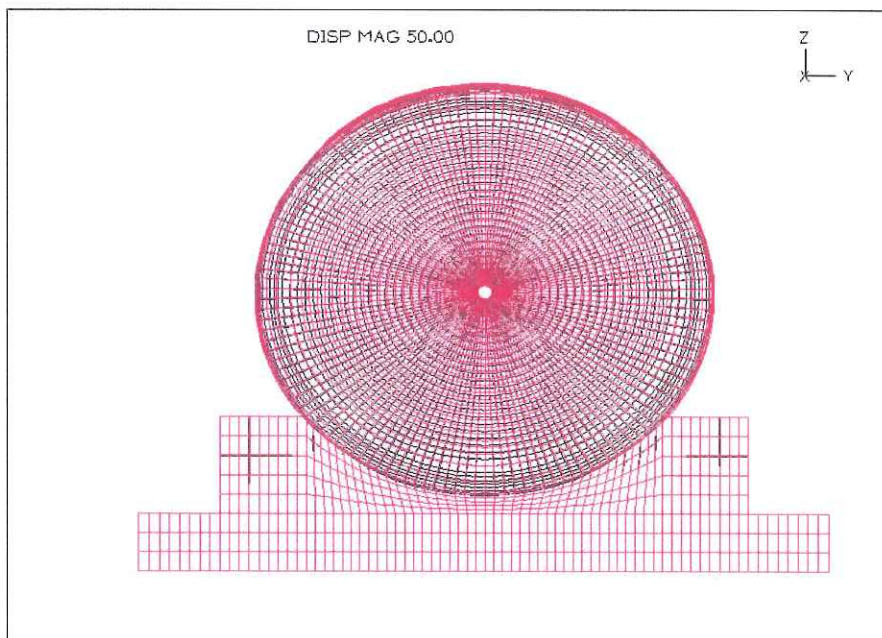


図 2-12 タンク変形 50 倍 (変形後 : 赤線)

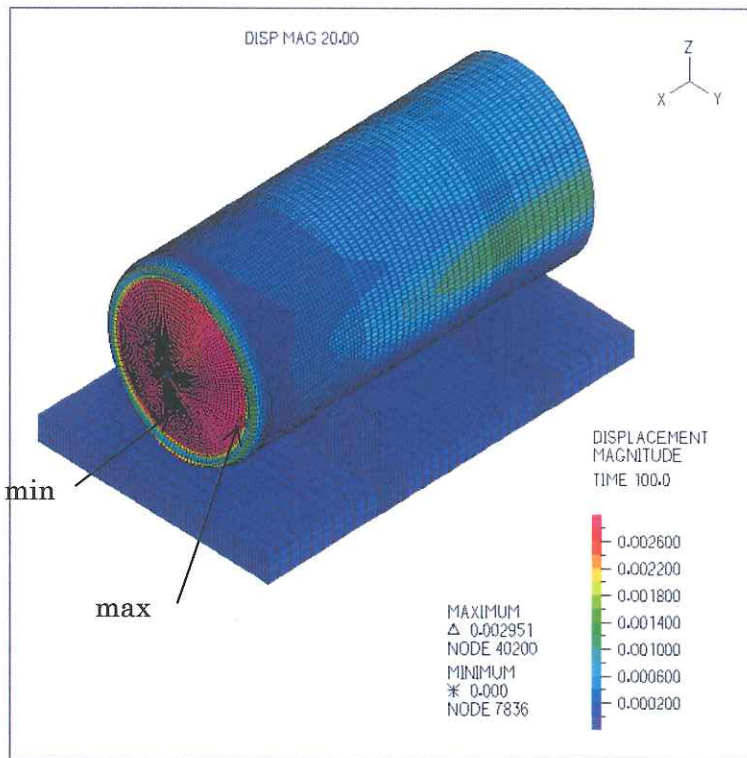


図 2-13 タンク変形 コンター図 (単位[m])

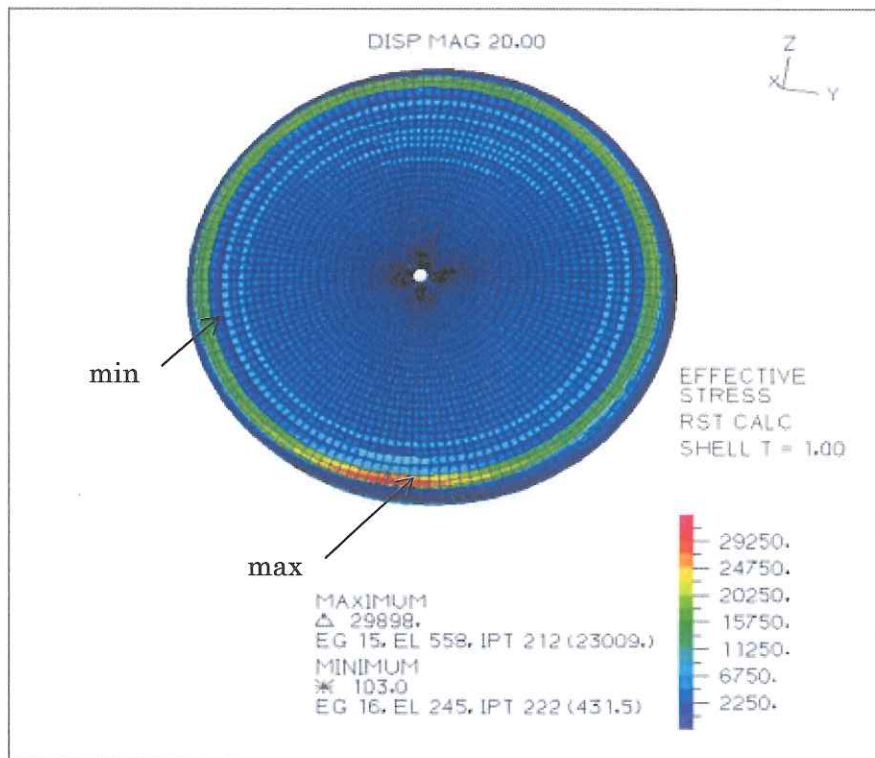


図 2-14 FRP 有効応力(単位[kN/m²])

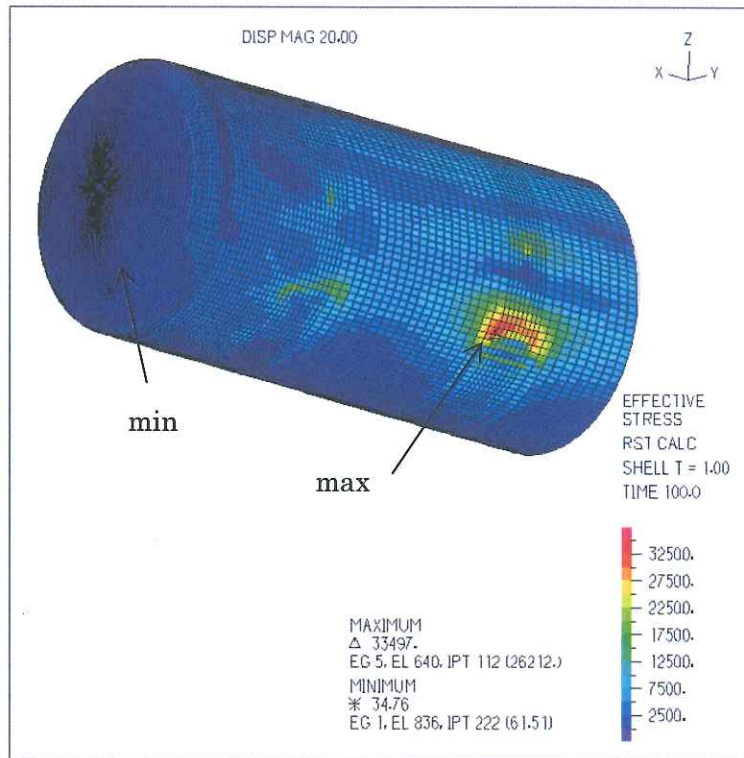


図 2-15 鋼製タンク 有効応力(単位[kN/m²])

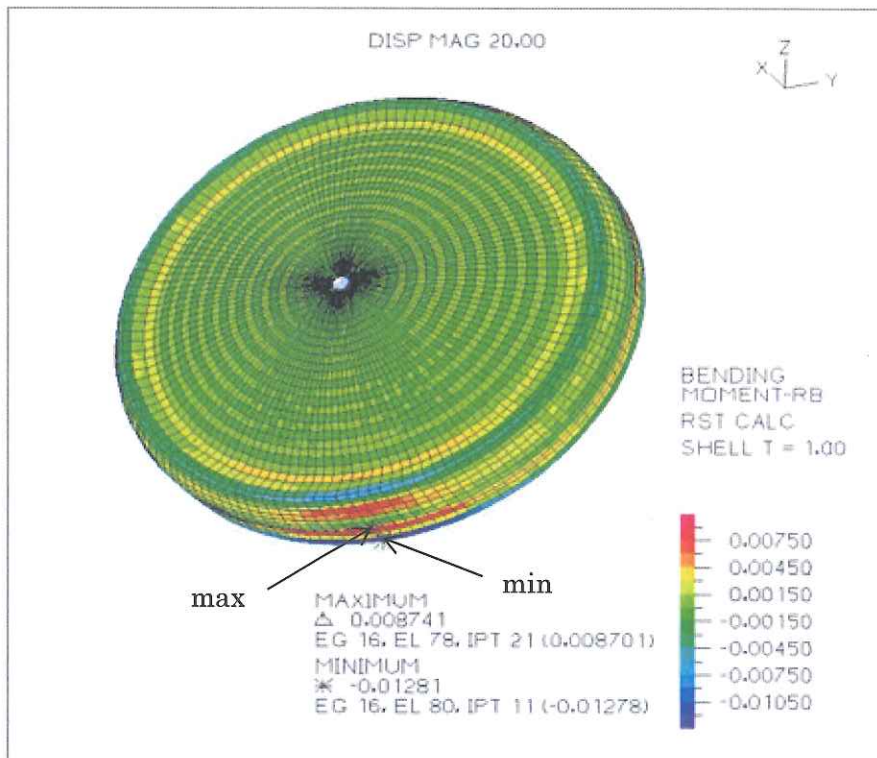


図 2-16 鋼製タンク 曲げモーメント M-RB (単位[kNm/m]) S 軸 (円周直交軸) 周り

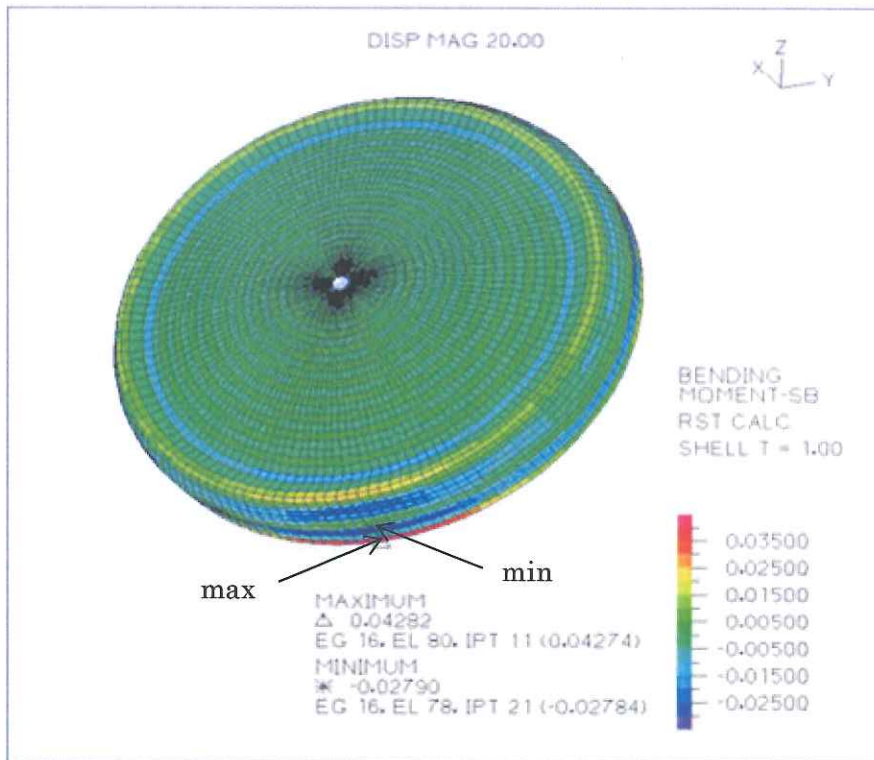


図 2-17 鋼製タンク 曲げモーメント M-SB (単位[kNm/m]) R 軸 (円周軸) 周り

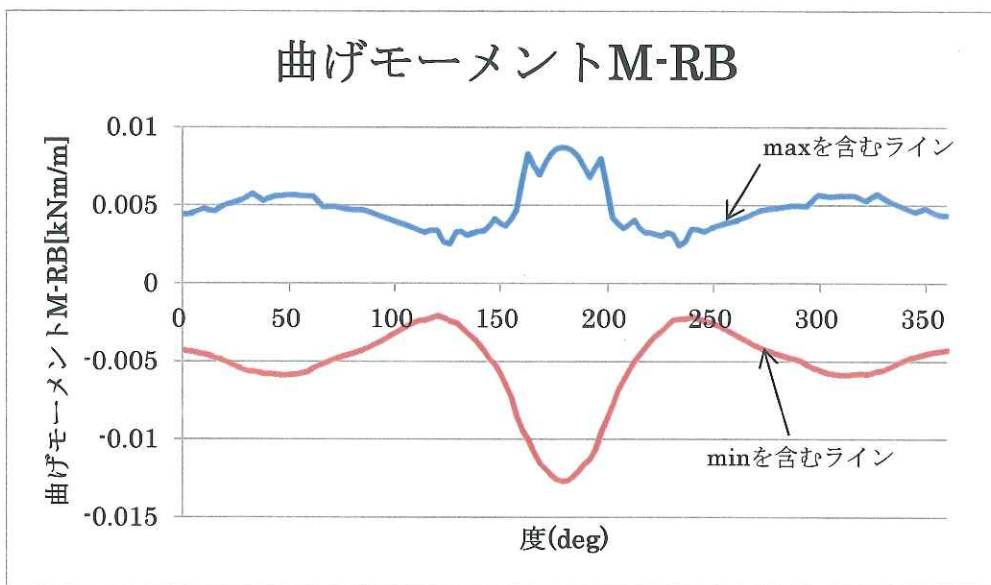


図 2-18 FRP の円周に沿った曲げモーメント M-RB(円周直交軸周り)
(図 2-16 の max、min の要素を含む円周)

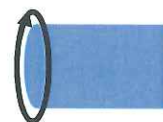
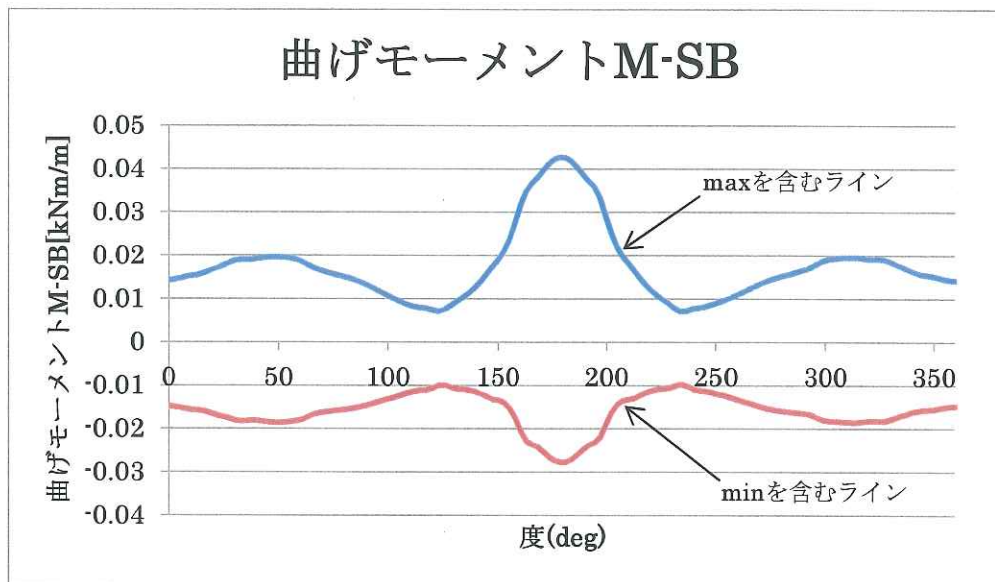


図 2-19 FRP の円周に沿った曲げモーメント M-SB(円周軸周り)
 (図 2-17 の max、min の要素を含む円周)

2.2.4. 直置き工法

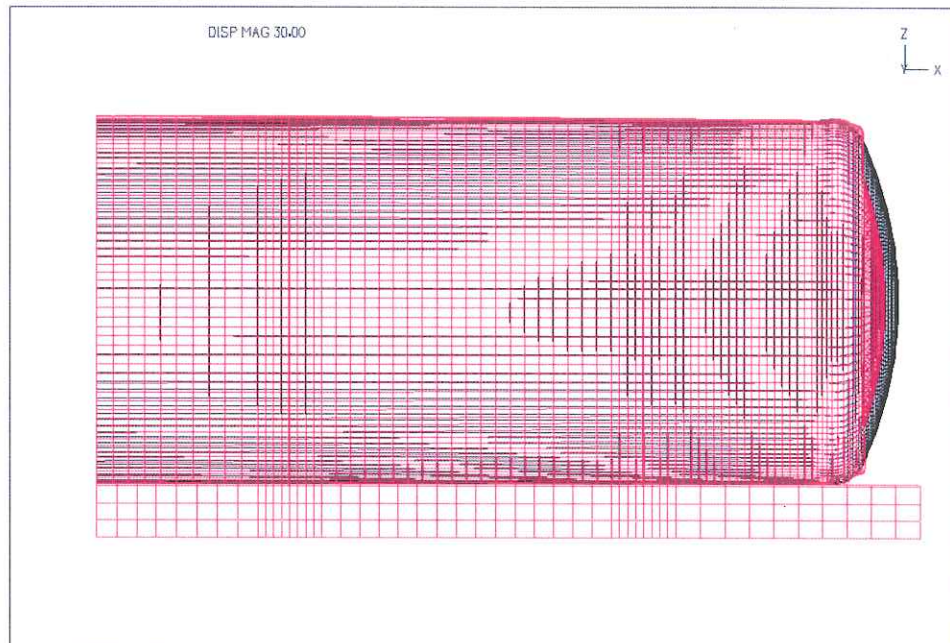


図 2-20 タンク変形 30倍 (変形後：赤線)

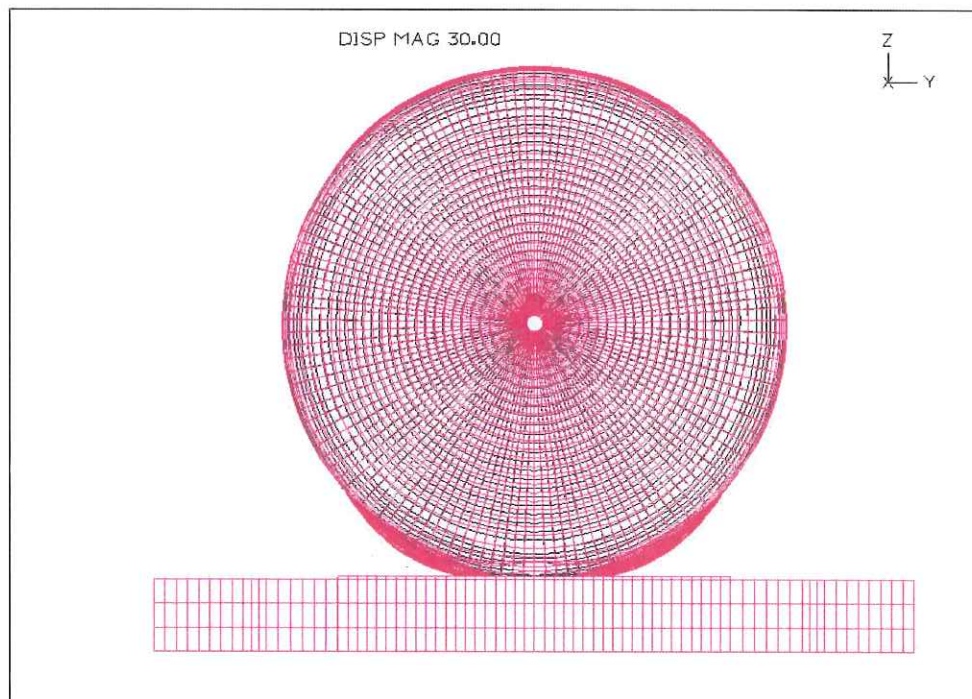


図 2-21 タンク変形 30倍 (変形後：赤線)

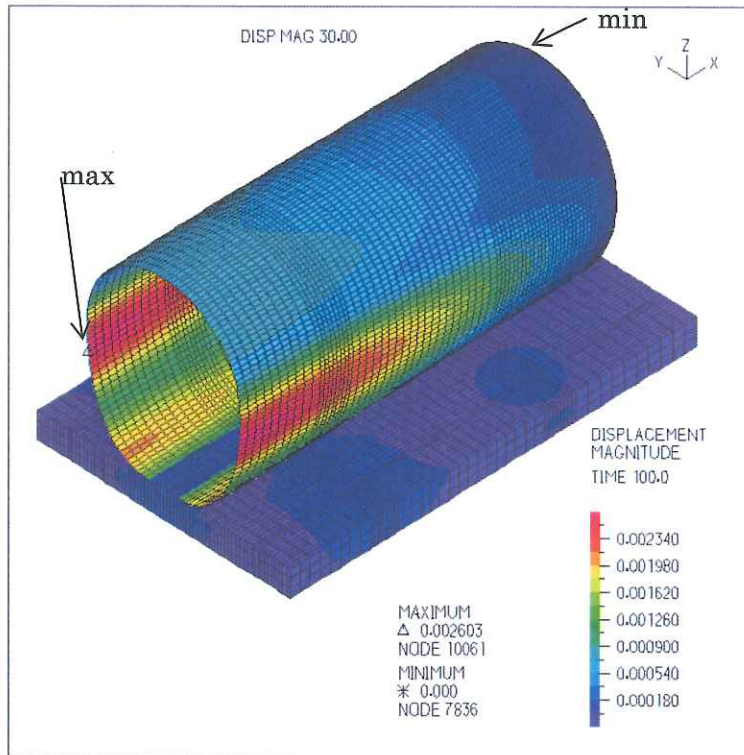


図 2-22 タンク変形 変形量コンター 倍率 30 倍 (単位[m])

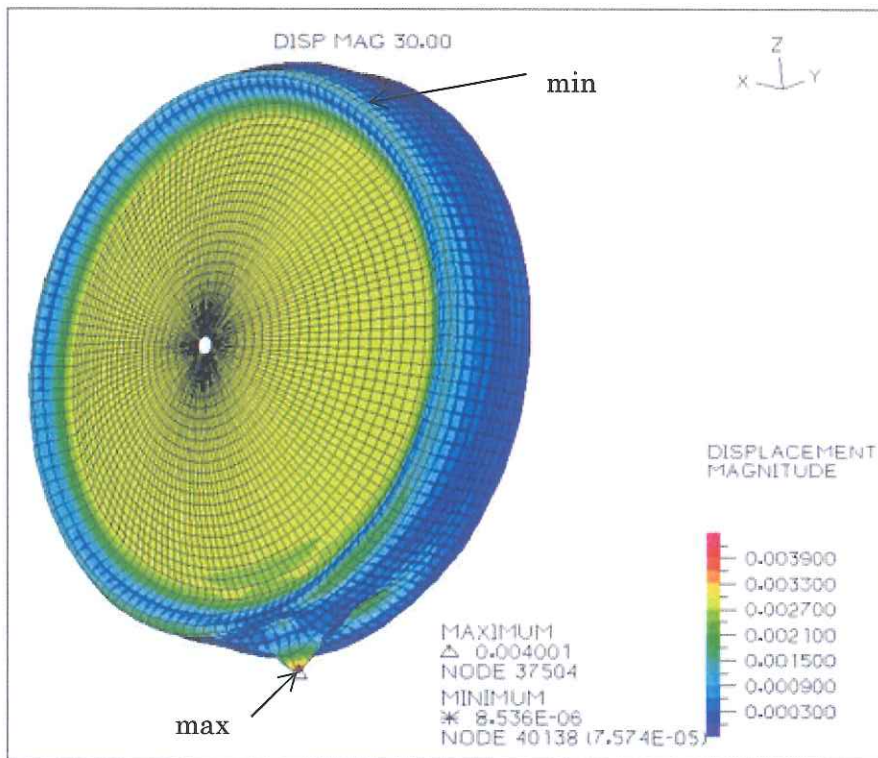
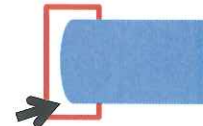


図 2-23 FRP の変形 変形 30 倍 (単位[m])



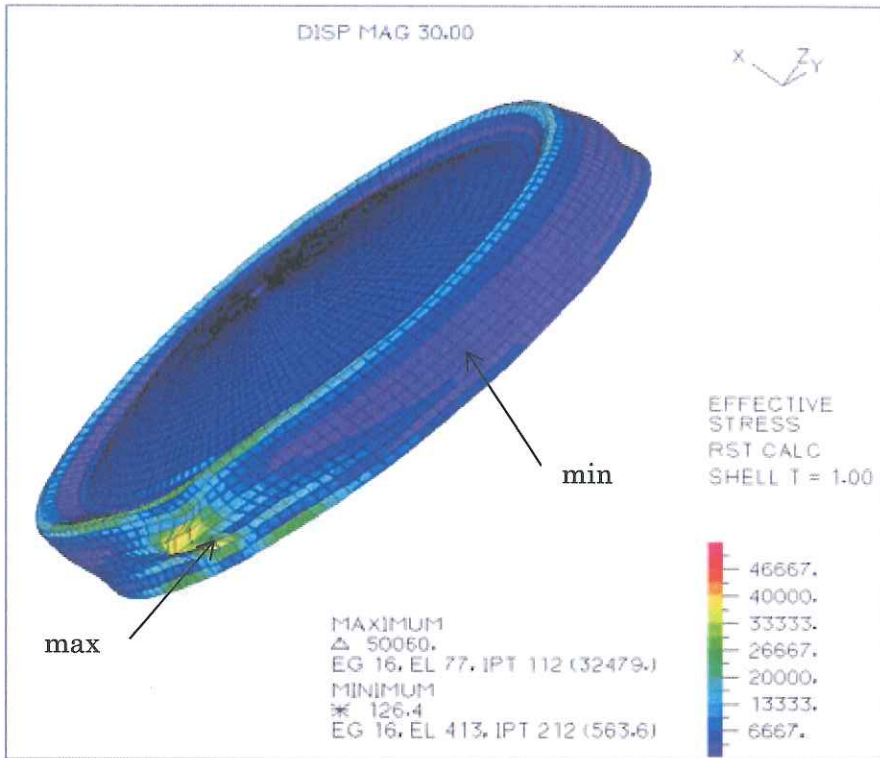


図 2-24 FRP 有効応力 (単位[kN/m²]) 限界値は 80,300[kN/m²]

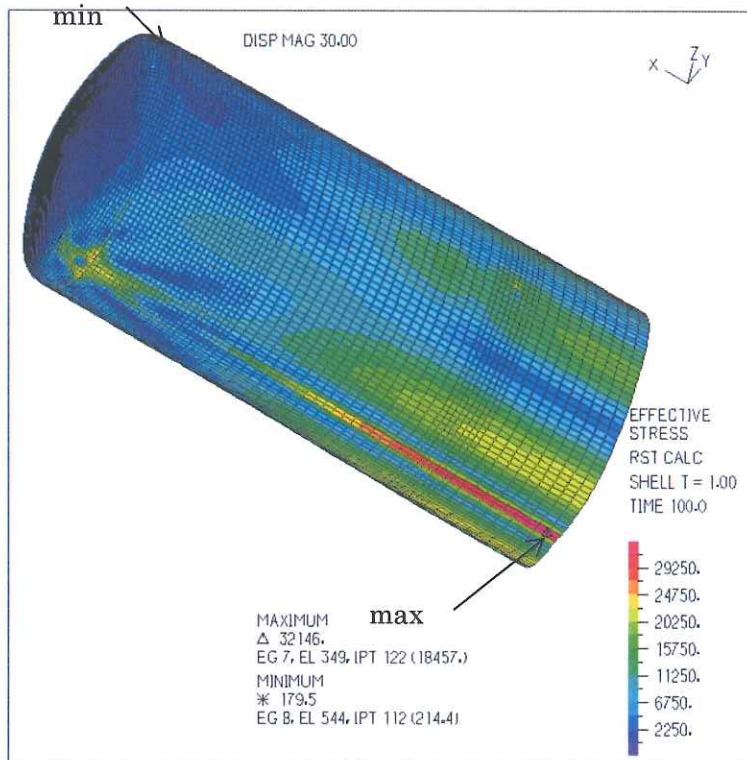


図 2-25 鋼製タンク 有効応力 (単位[kN/m²])

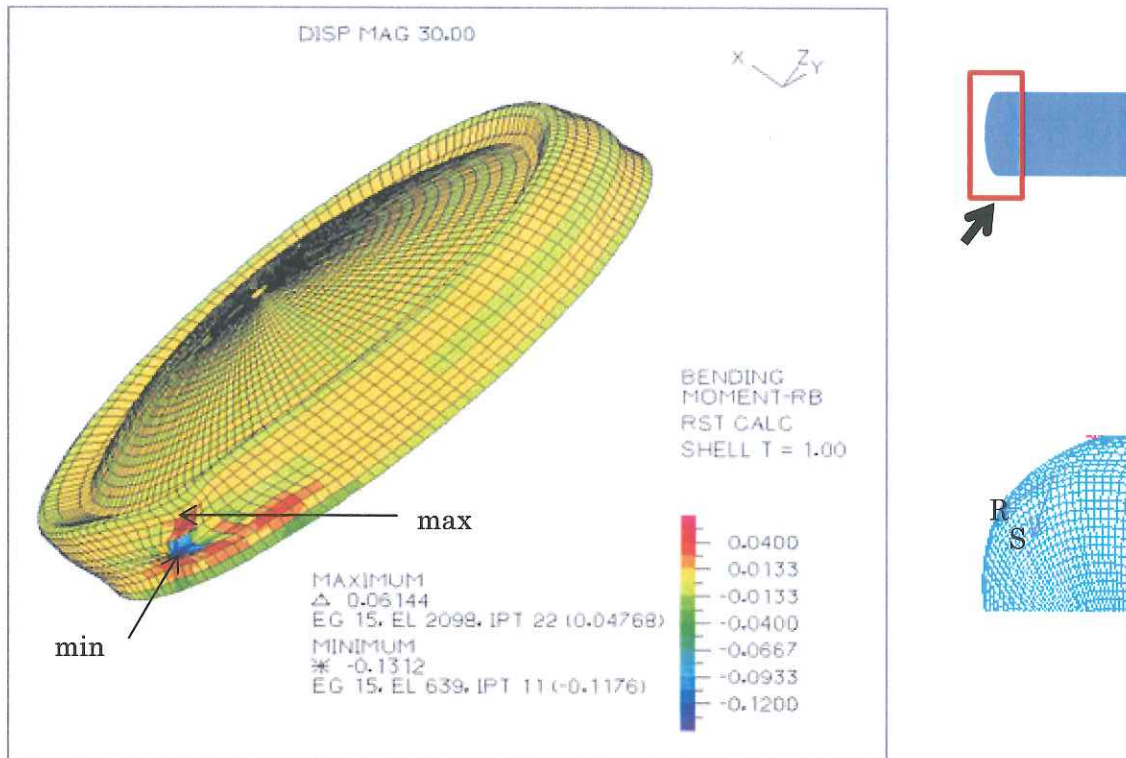


図 2-26 鋼製タンク 曲げモーメント M-RB (単位[kNm/m]) S 軸 (円周直交軸) 周り

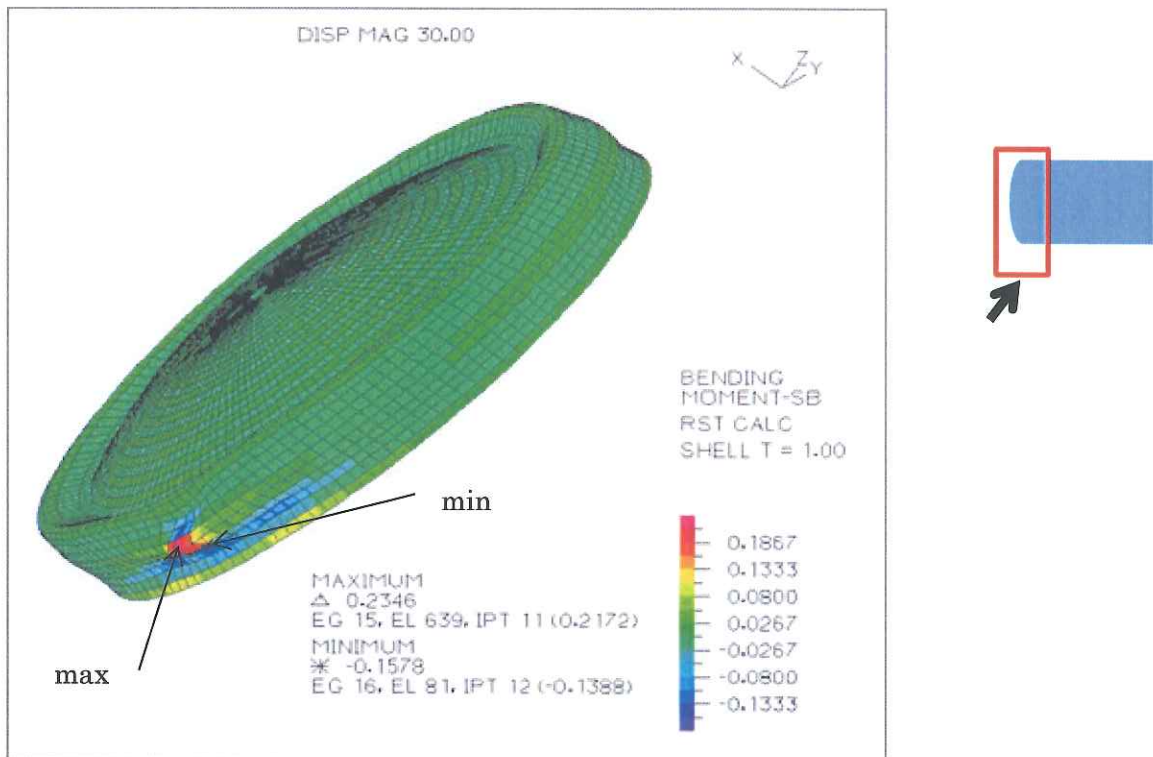


図 2-27 鋼製タンク 曲げモーメント M-SB (単位[kNm/m]) R 軸 (円周軸) 周り

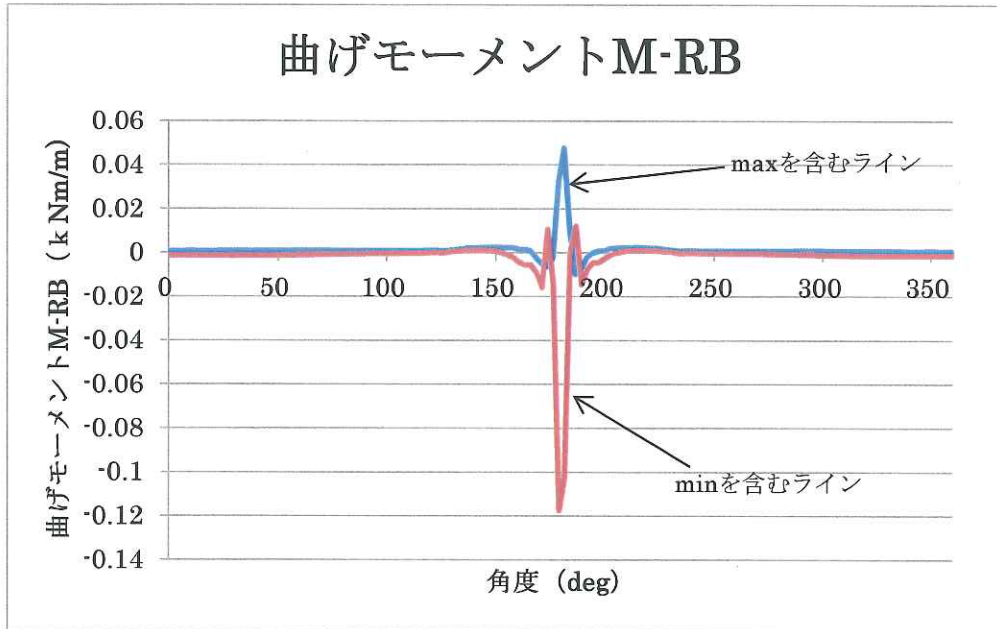


図 2-28 FRP の円周に沿った曲げモーメント M-RB (円周直交軸周り)
(図 2-26 の max、min の要素を含み円周)

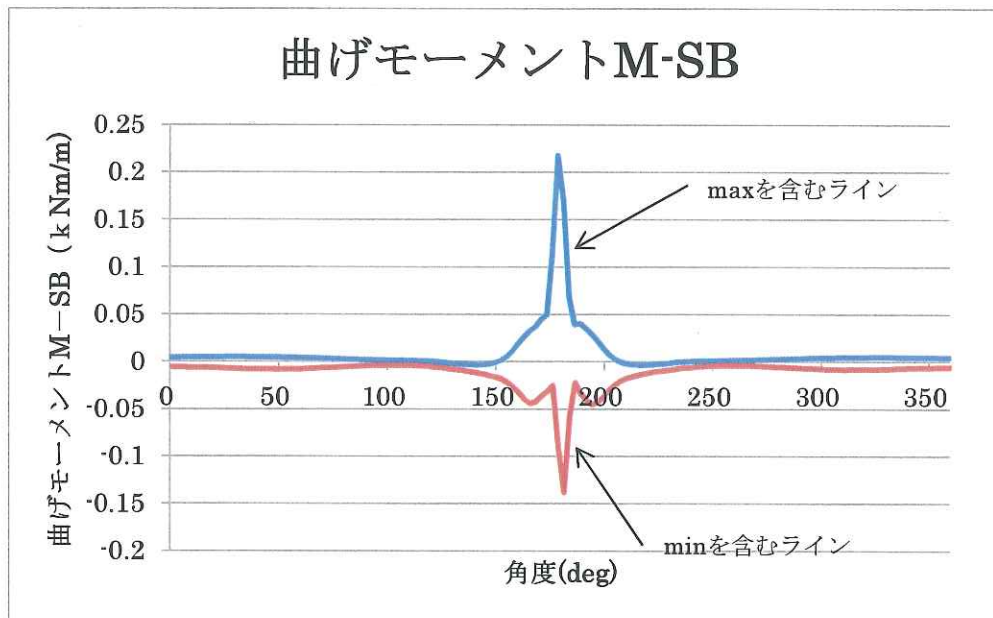


図 2-29 FRP の円周に沿った曲げモーメント M-SB(円周軸周り)
(図 2-27 の max、min の要素を含み円周)

2.3. タンク評価まとめ

- ① 直置きの場合は、鏡下部の基礎マットに接する FRP 部に応力集中が起こり、もっとも大きな応力が発生している。図 2-24 でわかるように、その値は $50,060[\text{kN/m}^2]$ 程度で、降伏値 $80,300[\text{kN/m}^2]$ 以内である。一方、コンクリート枕は鏡部 FRP の中心が土圧で押し込まれ、その縁部分が曲げで応力が大きくなる。図 2-14 でわかるように、その値は $30,000[\text{kN/m}^2]$ 程度である。

これらから、コンクリート枕の鏡部 FRP 応力は直置きよりは小さく、比較的広く分布しているが、直置きのタンク下端は、小さい領域で基礎に接触して荷重を伝達するため、応力が集中し、最も強度的に弱い部分となっている。実際に掘り出された二重殻タンクの傷の調査報告にあっても、直置き工法では、タンク下に亀裂が報告されている。解析はそれを裏付ける状況となっている。

- ② 鋼製タンクの応力度は直置きでは、図 2-25 でわかるようにタンク下端のゴムマットを介して基礎につながる部分が大きく最大 $32,000[\text{kN/m}^2]$ くらいである。一方コンクリート枕工法では、図 2-15 でわかるように枕取り付け付近で応力が集中し、 $33,500[\text{kN/m}^2]$ 程度である。両工法とも、鉄の降伏値には至らない。

- ③ 円周に沿った FRP の曲げモーメントを図 2-18、図 2-19 および図 2-28、図 2-29 に示す。下端は基礎や地盤からの反力を受けるので、曲げモーメントが大きくなっている。特に直置き工法では小さい接触領域で支えられるので、曲げモーメントが大きくなる。

FRP 鏡部と胴の境界では板厚は $5[\text{mm}]$ であるので、曲げモーメント限界値(単位幅当たり)は

$$Z = \frac{(5 \times 10^{-3})^2}{6} = 4.17 \times 10^{-6} [\text{m}^3]$$

$$M_y = Z \times F_y = 4.17 \times 10^{-6} \times 80,300 = 0.33 [\text{kNm}]$$

従って、解析ではいずれのケースでも限界曲げモーメントには至っていない。直置きケースの M-SB が $0.23[\text{kNm}]$ と限界値にもっとも近い値になっている。

3. 考察

タンク周辺の常時土圧を求め、土圧を荷重条件とする詳細なタンク評価を行った結果、以下の事がわかった。

- ① タンク鏡部の下端の土圧が大きくなっている。鏡部の剛性が高いため胴部に比べて変形しにいためと考えられる。特に直置き工法ではコンクリート枕のような支えがないため、コンクリート枕工法より大きくなっている。
- ② 直置き工法のタンク下端は、小さい領域で基礎に接触して荷重を伝達するため、応力が集中し、最も強度的に弱い部分となっている。実際に掘り出された二重殻タンクの傷の調査報告にあっても、直置き工法では、タンク下に亀裂が報告されている。解析はそれを裏付ける状況となっている。
- ③ 鋼製タンクの応力度は、コンクリート枕工法、直置き工法とも鉄の降伏値には至らない。
- ④ 鏡部の円周に沿った FRP の曲げモーメントは下端で大きくなるが、コンクリート枕工法、直置き工法とも限界曲げモーメントには至らない。