

F F 二重殻タンクの破損要因に関する検討
報告書

平成29年3月

危険物保安技術協会

はじめに

強化プラスチック製二重殻タンクは、平成7年2月の危険物の規制に関する政令の改正において規定が新設され、運用されるようになった地下貯蔵タンクの一形態であり、強化プラスチック製で造った地下貯蔵タンクに強化プラスチックを間隙を有するように被覆し、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。

また、内殻や外殻の変形を防止するための強め輪（スティフナー）等の様々な補強材や危険物の漏れを検知する方法に検知液の増減により検知する方式の導入など、今日までに様々な構造の強化プラスチック製二重殻タンクが製造されている。

しかし、このたび強化プラスチック製二重殻タンクが25施設39本において、幸いにも危険物が流出した報告はされていないものの、内殻の破損が発見された。

そのため、本検討会では当該タンクの設計・製造時から供用開始後に至るまでの間に存在する様々な破損要因を抽出するために調査・分析を行い、破損原因を検討することにより、同事案再発防止と強化プラスチック製二重殻タンクの安全性向上に向けた取り組みを行った。

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であり、深く感謝を申し上げます次第である。

平成29年3月

FF二重殻タンクの破損要因に
関する検討委員会

委員長 影山 和郎

目 次

第1章 検討の目的等	1
1. 1 検討の目的.....	1
1. 2 検討の項目.....	1
1. 3 検討手順.....	1
1. 4 検討体制.....	2
1. 5 検討会の開催経過.....	2
第2章 破損タンクの概要	3
2. 1 破損タンクの概要.....	3
2. 2 漏えいまでの経過等.....	4
2. 3 漏えい経過から確認される特徴.....	1 3
第3章 調査・分析結果	1 4
3. 1 製造時及び埋設施工時の状況調査.....	1 4
3. 2 ボーリング調査.....	1 5
3. 3 採取した土壌に対する粒度分布調査.....	2 2
3. 4 F F 二重殻タンクの変形状況調査.....	2 7
3. 5 空隙状況調査.....	3 3
3. 6 破損タンク試験片の状況調査.....	3 5
3. 7 検知層に関する調査・分析.....	4 4
3. 8 材料試験による分析.....	5 1
3. 9 非破壊検査による分析.....	6 4
3. 10 電子顕微鏡による断面観察.....	7 7
3. 11 有限要素法による解析.....	8 1
3. 12 調査・分析結果のまとめ.....	1 0 7
第4章 破損要因の検討	1 0 9
4. 1 破損要因の検討.....	1 0 9
4. 2 破損原因の検討.....	1 1 1
第5章 破損要因の検討から確認された問題点	1 1 4
5. 1 砕石基礎による工法に関する問題.....	1 1 4
5. 2 応力集中に関する問題.....	1 1 4
5. 3 材料試験の結果から確認された問題.....	1 1 4

第6章	破損要因の検討を踏まえた提言	116
第7章	まとめ	119
参考資料1	ボーリング調査結果	121
参考資料2	粒度分布試験結果	157
参考資料3	FF二重殻タンクの変形状況調査結果	173
参考資料4	空隙状況調査結果	189
参考資料5	検知層厚さ測定結果	195
参考資料6	材料試験結果	201
参考資料7	X線CTによる試験片観察結果	211
参考資料8	SEMによるFF二重殻タンクの断面観察結果	235
参考資料9	強化プラスチック製二重殻タンクに係る規定の運用通達	245
参考資料10	地下貯蔵タンクの砕石基礎による施工方法関係通知	253

第1章 検討の目的等

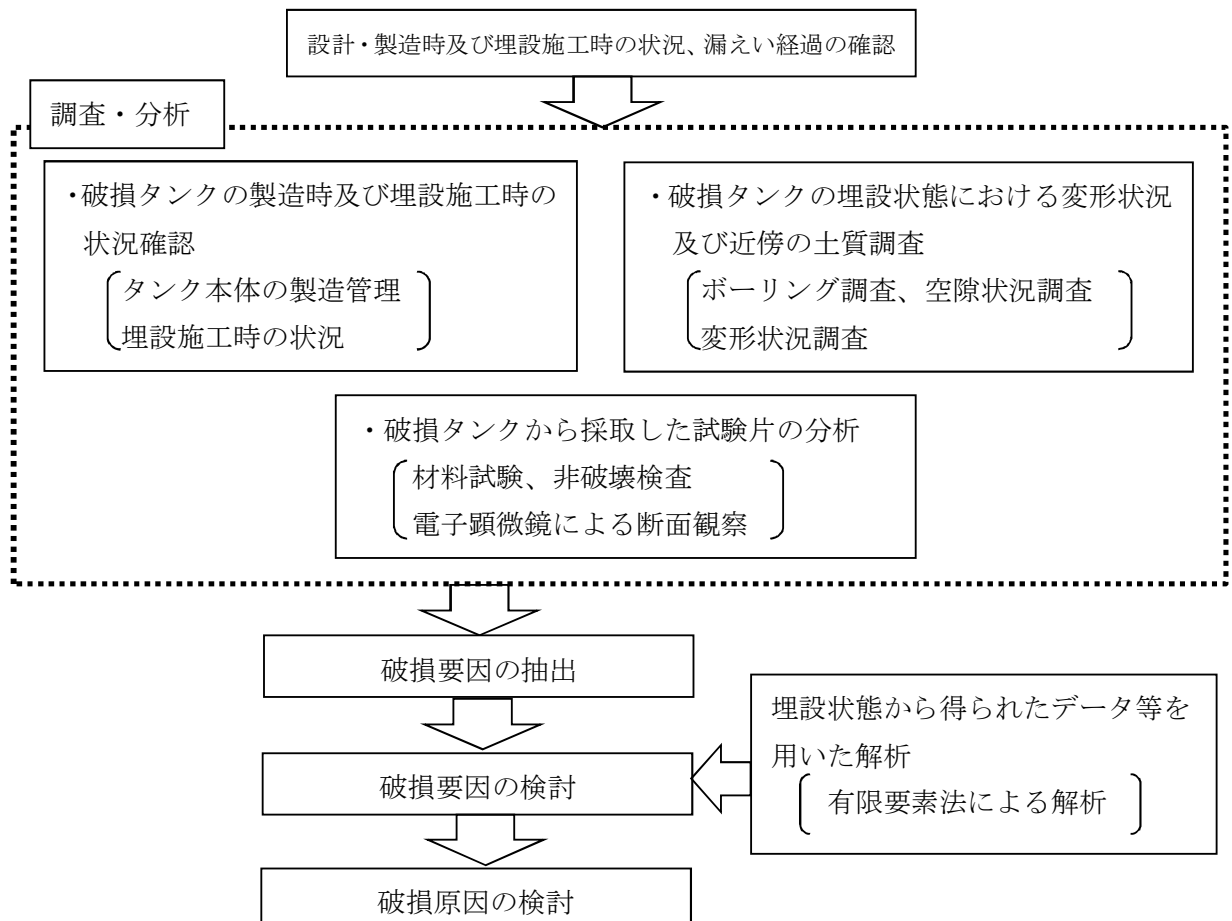
1.1 検討の目的

給油取扱所等に埋設する地下貯蔵タンクとして利用されている強化プラスチック製二重殻タンク（以下「FF二重殻タンク」という。）について、某タンクメーカーの調査により、平成17年以降に同メーカーが製造したFF二重殻タンク1700本余りのうち、25施設39本のFF二重殻タンクに、設置工事中または供用開始後の点検において、内殻の破損若しくはその兆候が発見された（平成26年3月時点）。当該FF二重殻タンクのうち、当委員会において調査対象としたタンク（以下「破損タンク」という。）について、設置者等の協力の下に埋設状況及びタンク本体の状況を調査・分析するとともに、有限要素法による解析を実施することにより、内殻の破損に至った要因について検討し、同事案再発防止に資することを目的としたものである。

1.2 検討の項目

- (1) 破損タンクの製造時及び埋設施工時の状況確認
- (2) 破損タンクの埋設状態における変形状況及び近傍の土質調査
- (3) 破損タンクから採取した試験片の分析
- (4) 埋設状態から得られたデータ等を用いた解析
- (5) 破損要因及び破損原因の検討

1.3 検討手順



1. 4 検討体制

本検討を進めるにあたり、協会内に検討委員会（名称：FF二重殻タンクの破損要因に関する検討委員会）を設置して、各種の検討を実施した。当該検討委員会の構成は以下のとおり（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	久保内昌敏	東京工業大学物質理工学院	応用化学系 教授
〃	山田 實	元横浜国立大学	リスク共生社会創造センター 客員教授 (危険物保安技術協会 事故防止調査研修センター 総括調査役)
〃	鈴木健志	消防庁 危険物保安室	課長補佐 (H27. 8. 1～)
	(鳥枝浩彰	消防庁 危険物保安室	課長補佐 (～H27. 7. 31))
〃	西 晴樹	消防庁 消防研究センター	火災災害調査部長 (～H28. 3. 31 火災災害調査部 原因調査室長)
〃	浅野 均	一般社団法人強化プラスチック協会	
〃	玉嶋克彦	一般財団法人エンジニアリング協会	
〃	和田正彦	危険物保安技術協会	企画部長
〃	杉山 章	危険物保安技術協会	業務部業務課長 併任 企画部企画課長 (～H28. 3. 31 業務部 業務課長)
〃	八木高志	危険物保安技術協会	土木審査部 土木審査部長
	(三根徳男	危険物保安技術協会	土木審査部 土木審査課長(～H28. 3. 31))
事務局	相澤 淳一	危険物保安技術協会	企画部 (H28. 4. 1～)
〃	千島清奈生	危険物保安技術協会	企画部
〃	大野山翔二	危険物保安技術協会	企画部 (H28. 4. 1～)
〃	工藤 守	危険物保安技術協会	業務部
〃	佐藤 純一	危険物保安技術協会	業務部
〃	石田清貴	危険物保安技術協会	業務部
(〃	平野修弘	危険物保安技術協会	企画部 (～H28. 3. 31))

1. 5 検討会の開催経過

前節の検討委員会の開催経過は、次のとおりである。

第1回	平成27年	7月10日
第2回	平成27年	11月20日
第3回	平成28年	3月22日
第4回	平成28年	8月9日
第5回	平成28年	10月31日
第6回	平成29年	1月12日
第7回	平成29年	3月3日

第2章 破損タンクの概要

2.1 破損タンクの概要

(1) 諸元について

破損タンクについて、諸元を表2.1.1及び表2.1.2に示す。当該タンクは鏡部及び胴部を内殻、検知層及び外殻が一体となった構造（以下「一体構造」という。）により構成されている（図2.1.1）。また、胴部の補強を目的として内殻に強め輪（スティフナー）を設置しており、そのスティフナーにはタンク鉛直方向最下部の位置（以下「底部」という。）に液だまりを防ぐ目的として連通孔（または水抜き連通部と呼称）を設けている。（写真2.1.1参照）

表2.1.1 タンク諸元（タンク容量別）

		タンク容量40 kL	タンク容量48 kL
寸法	胴長	8,970 mm	10,770 mm
	内径	2,400 mm	2,400 mm
	鏡出	465 mm	465 mm

表2.1.2 タンク諸元（共通）

構成材質	ガラス繊維強化プラスチック（JIS K 6919） ガラスチョップドストランドマット（JIS R 3411） ガラスロービング（JIS R 3412） ガラスロービングクロス（JIS R 3417）
設計板厚等	内殻：5.5 mm（胴、鏡） 外殻：5.5 mm（胴、鏡） 検知層：3.5 mm
漏えい検知設備種別	検知液による漏えい検知

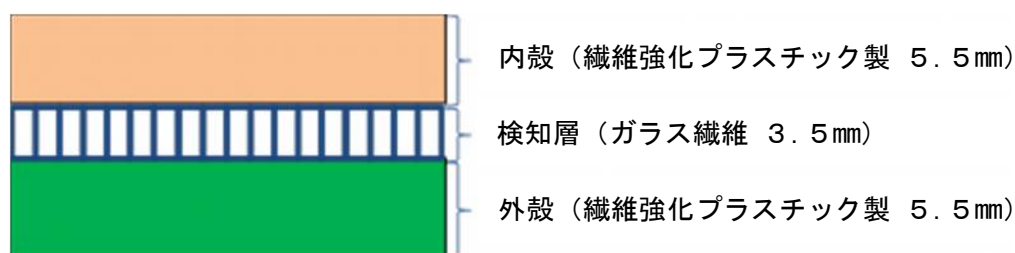


図2.1.1 胴部及び鏡部の一体構造断面図

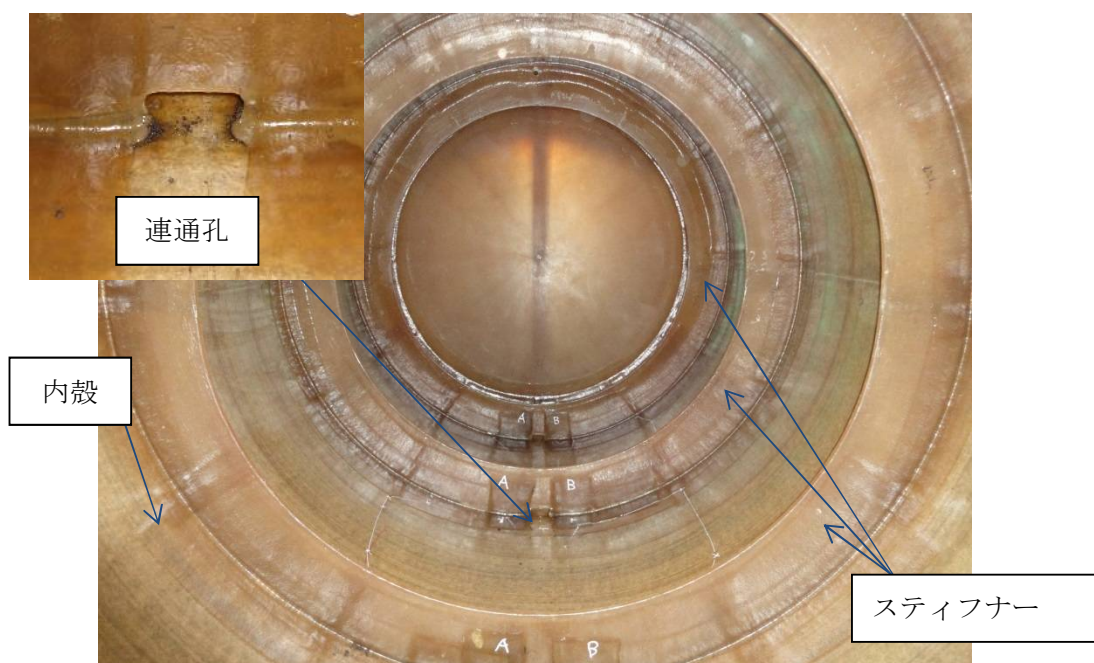


写真 2. 1. 1 スティフナー及び連通孔設置状況

(2) 調査対象について

破損タンクの設置場所等について、一覧を表 2. 1. 3 に示す。

表 2. 1. 3 破損タンク一覧

No.	設置場所	KHK 番号※	容量	種別	製造年月
1	静岡県	1363	40 k L	20 : 20	平成 23 年 2 月
2	静岡県	1366	40 k L	20 : 20	平成 23 年 3 月
3	静岡県	1367	40 k L	20 : 20	平成 23 年 2 月
4	神奈川県	658	40 k L	ストレート	平成 18 年 6 月
5	神奈川県	659	48 k L	32:16	平成 18 年 5 月
6	神奈川県	660	40 k L	25 : 15	平成 18 年 6 月
7	新潟県	1857	48 k L	ストレート	平成 24 年 8 月

※「強化プラスチック製二重殻タンクの試験確認済証による証明の撤回（取り消し）について」（平成 26 年 3 月 24 日）により試験確認済証は既に取り消されているが、タンクを識別するため使用している。

2. 2 漏えいまでの経過等

破損タンクのうち調査対象としたタンクの漏えいを確認するまでの経過を表 2. 2. 1 から表 2. 2. 7、漏えい箇所を図 2. 2. 1 から図 2. 2. 7 及び写真 2. 2. 1 から写真 2. 2. 10 に示す。

表 2. 2. 1 KHK1363漏えい経過

経過年月	経過内容
平成23年4月	タンク搬入、据付後に水張り（浮き上がり防止）を実施
平成24年3月	供用開始前において、水（浮き上がり防止の）抜き後に鉛直方向の内径を測定したところ、最大30mmの変形を確認 スティフナーの補強及び支柱を設置する補修を実施
平成27年2月	漏えい検知設備の警報作動 タンク内に検知液の漏えいを確認

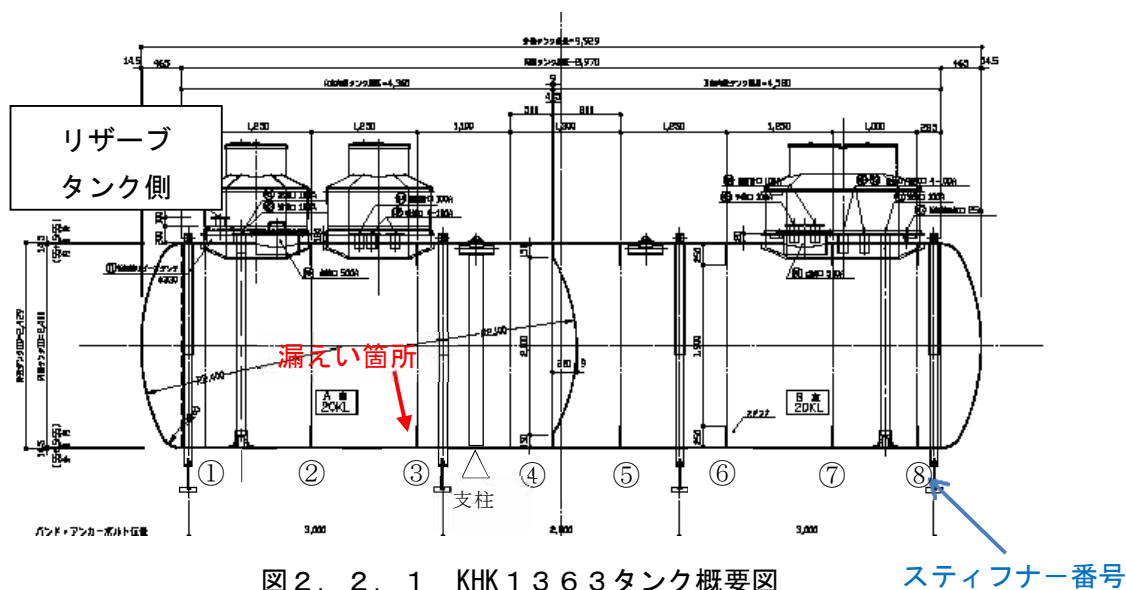


表 2. 2. 2 KHK1366漏えい経過

経過年月	経過内容
平成23年4月	タンク搬入、据付後に水張り（浮き上がり防止）を実施
平成24年3月	供用開始前において、水（浮き上がり防止の）抜き後に鉛直方向の内径を測定したところ、最大38mmの変形を確認 スティフナーの補強及び支柱を設置する補修を実施
平成25年7月	漏えい検知設備の警報作動 タンク内に検知液の漏えいを確認

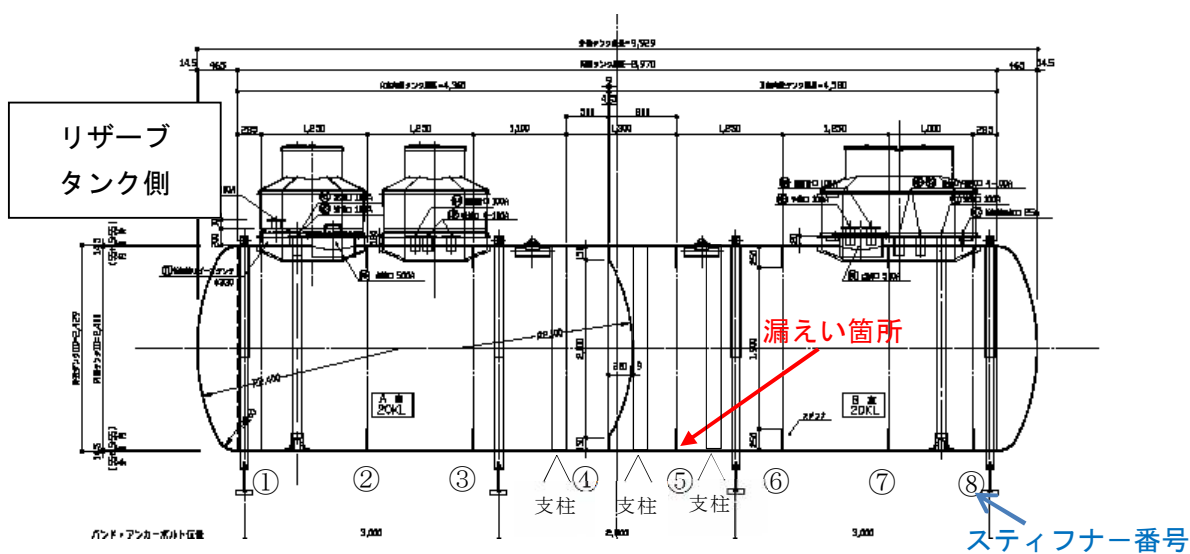


図 2. 2. 2 KHK1366タンク概要図



写真 2. 2. 2 KHK1366漏えい箇所

表 2. 2. 3 KHK1367漏えい経過

経過年月	経過内容
平成23年4月	タンク搬入、据付後に水張り（浮き上がり防止）を実施
平成24年3月	供用開始前において、水（浮き上がり防止の）抜き後に鉛直方向の内径を測定したところ、最大23mmの変形を確認
平成24年8月	漏えい検知設備の警報作動
	タンク内に検知液の漏えいを確認

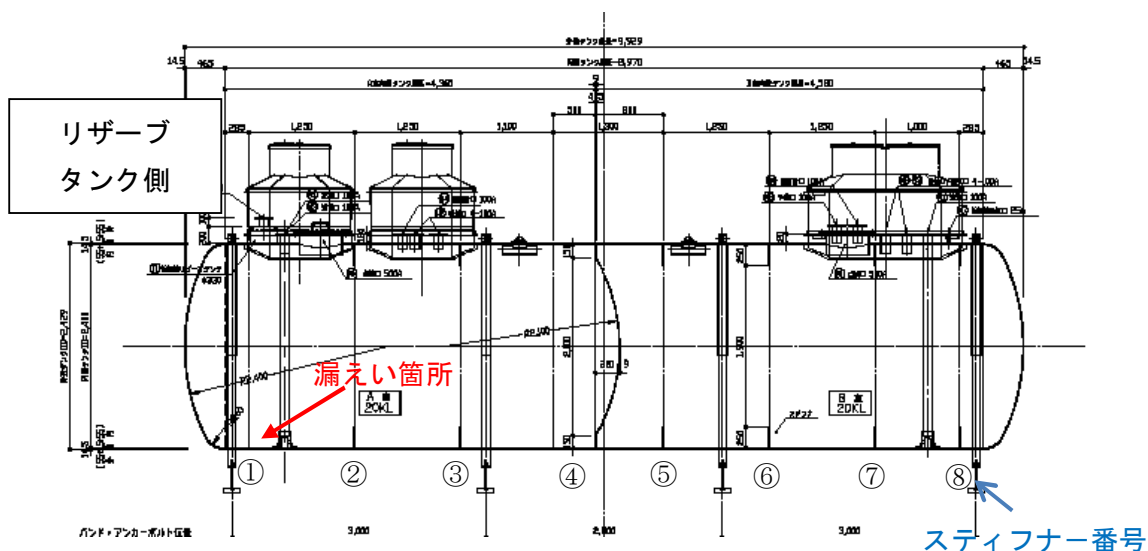


図 2. 2. 3 KHK1367タンク概要図

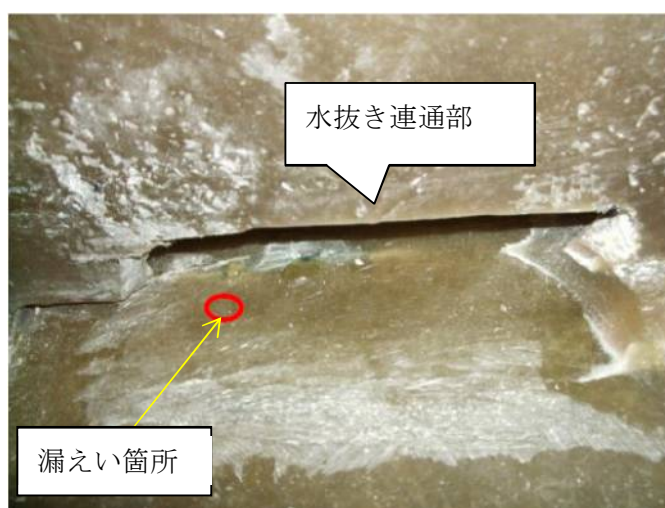


写真 2. 2. 3 KHK1367漏えい箇所

表 2. 2. 4 KHK658漏えい経過

経過年月	経過内容
平成18年6月	タンク搬入、据付、水張り（浮き上がり防止）実施
平成24年1月	漏えい検知設備の警報作動 検知層に対して気密検査を実施するも異常なし
平成24年3月	タンク内に検知液の漏えいを確認
平成24年6月	スティフナーの補強を実施

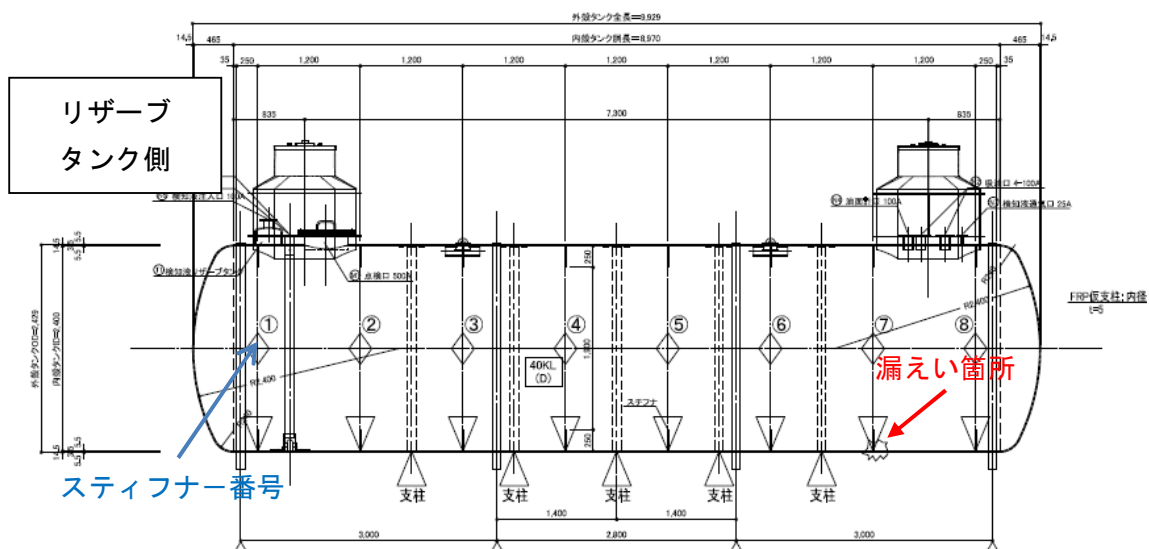


図 2. 2. 4 KHK658タンク概要図

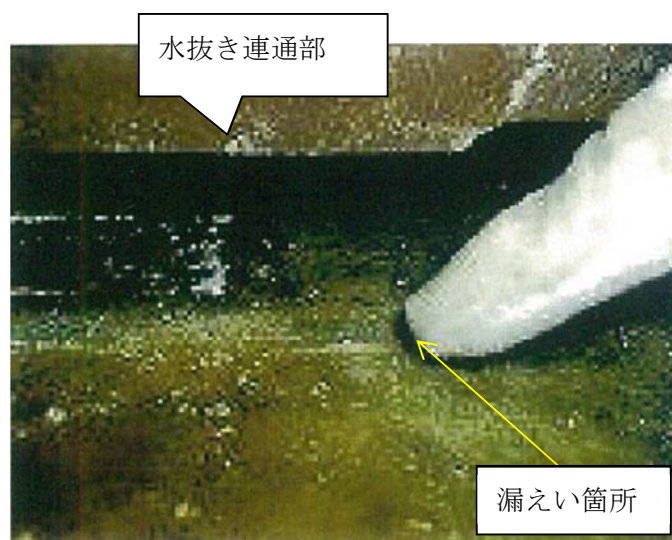


写真 2. 2. 4 KHK658漏えい箇所

表 2. 2. 5 KHK659漏えい経過

経過年月	経過内容
平成18年6月	タンク搬入、据付、水張り（浮き上がり防止）実施
平成23年9月	漏えい検知設備の警報作動 タンク内に検知液の漏えいを確認
平成23年11月	スティフナーの補強及び支柱を設置する補修を実施

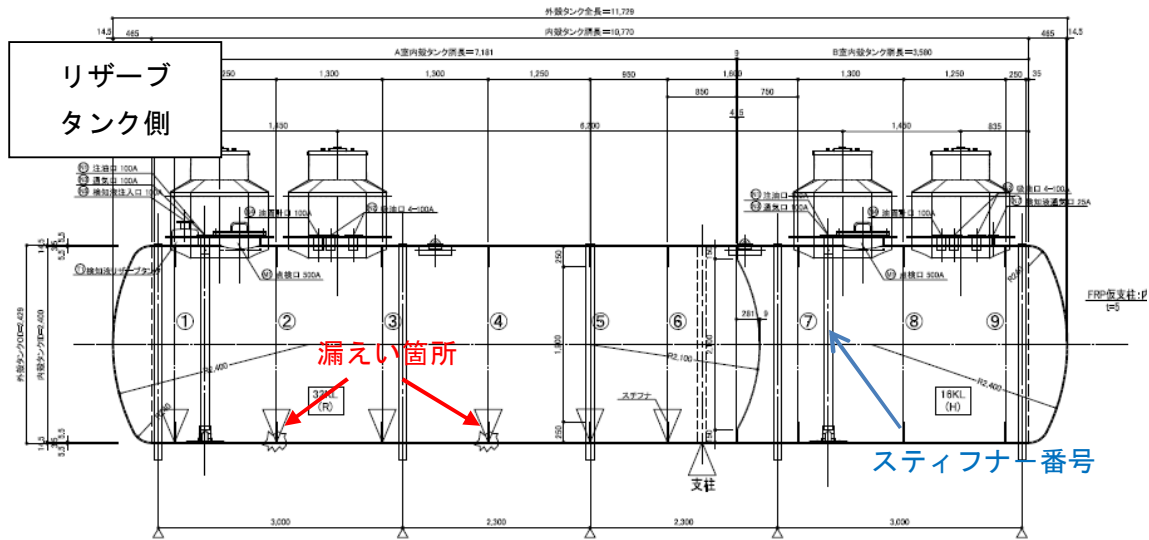


図 2. 2. 5 KHK659タンク概要図

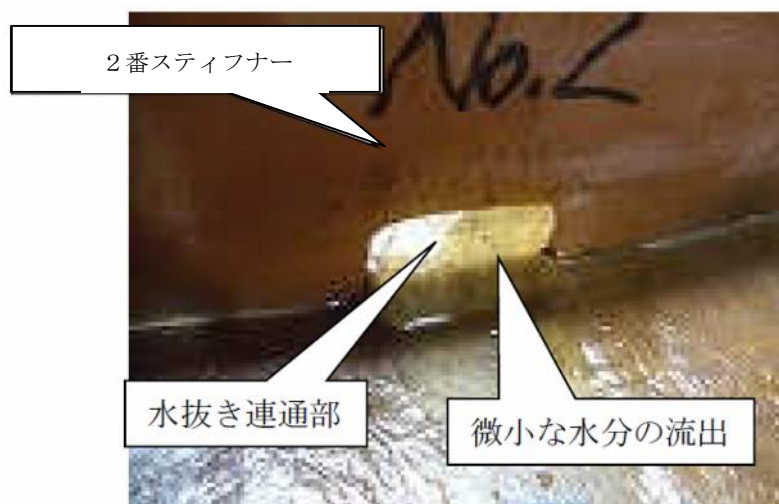


写真 2. 2. 5 KHK659漏えい箇所（スティフナーNo. 2）

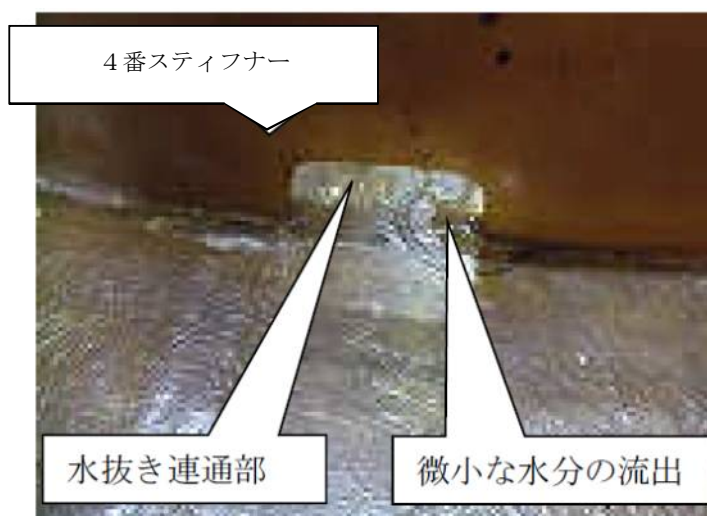


写真2. 2. 6 KHK659漏えい箇所（スティフナーNo. 4）

表2. 2. 6 KHK660漏えい経過

経過年月	経過内容
平成18年6月	タンク搬入、据付、水張り（浮き上がり防止）実施
平成22年9月	漏えい検知設備の警報作動
平成22年10月	タンク内に検知液の漏えいを確認
平成22年11月	スティフナーの補強を実施（スティフナーNo.1及びNo.5）
平成23年11月	経過を観察（平成22年11月以降）していたところ、検知液の減少を確認
平成24年6月	スティフナーの補強（スティフナーNo.6）及び支柱を設置する補修を実施

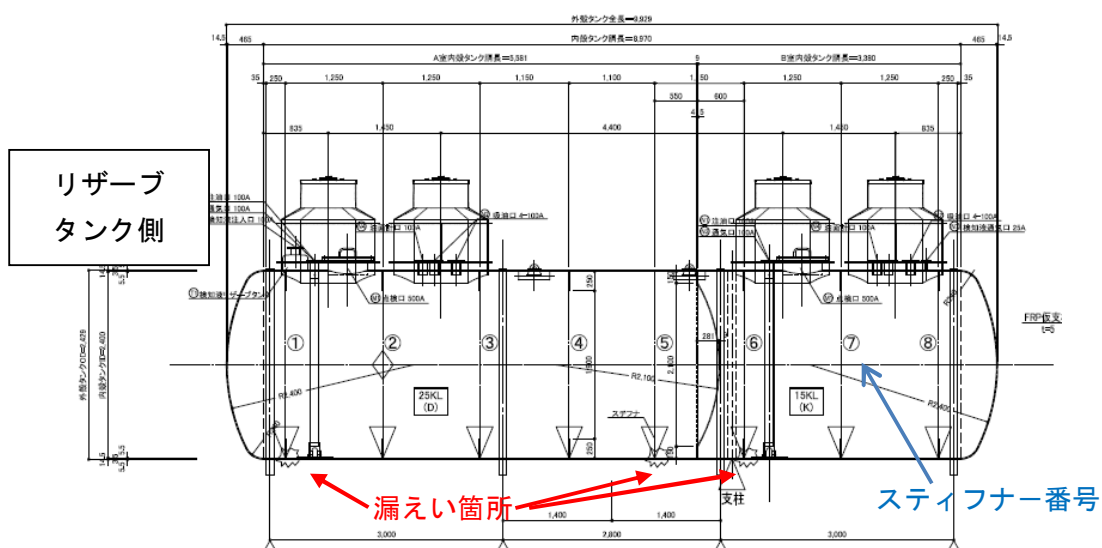


図2. 2. 6 KHK660タンク概要図



写真2. 2. 7 KHK660漏えい箇所（スティフナーNo. 1）



写真2. 2. 8 KHK660漏えい箇所（スティフナーNo. 5）



写真2. 2. 9 KHK660漏えい箇所（スティフナーNo. 6）

表 2. 2. 7 KHK1857漏えい経過

経過年月	経過内容
平成24年8月	タンク搬入、据付
平成24年10月	供用開始前において、水（浮き上がり防止の）抜き後に鉛直方向の内径を測定したところ、最大38mmの変形を確認
	スティフナーの補強及び支柱を設置する補修を実施
平成25年10月	漏えい検知設備の警報作動 タンク内に検知液の漏えいを確認

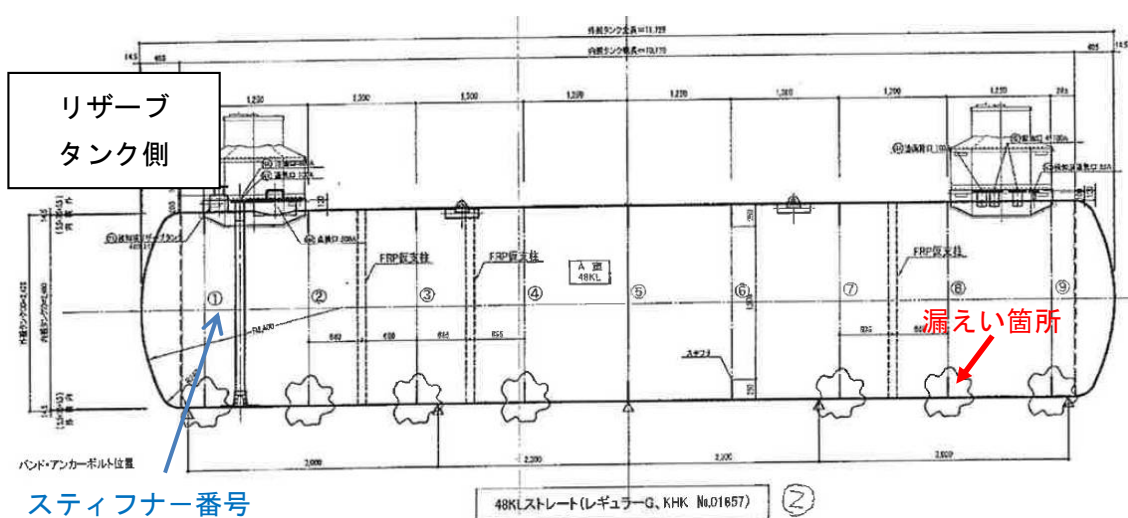


図 2. 2. 7 KHK1857タンク概要図

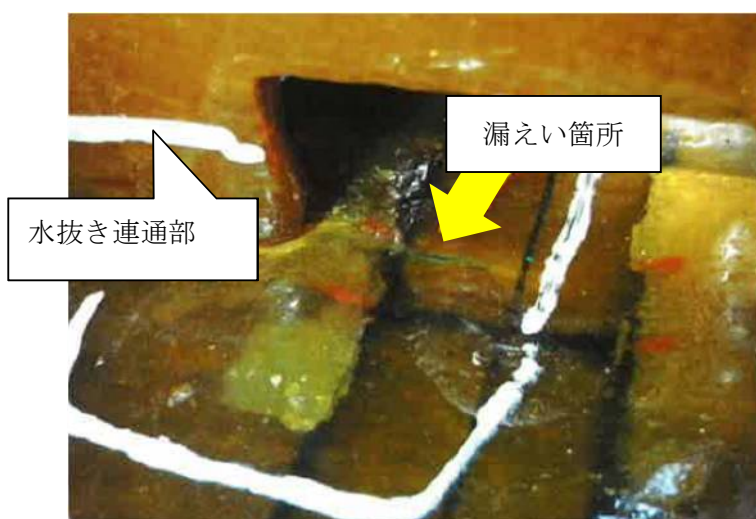


写真 2. 2. 10 KHK1857漏えい箇所

2. 3 漏えい経過から確認される特徴

前節で示した漏えい経過から確認された特徴を以下のとおりに示す。

(1) 漏えい箇所について

漏えい検知設備の検知液は、いずれも内殻（タンク内液）側で漏えいしており、漏えい箇所はスティフナーに設けられた連通孔付近から確認されている。

(2) 内殻の変形について

漏えい経過に示したF F二重殻タンク7基のうち、4基は供用開始前における内径の測定で、30 mm（鉛直方向）程度の変形を確認している。

(3) 漏えいの確認について

漏えい経過に示したF F二重殻タンクは、いずれも供用開始後における検知液の漏えいを確認している。

第3章 調査・分析結果

第1章の検討手順に基づいて得られた調査・分析結果を3.1から3.11に示す。

3.1 製造時及び埋設施工時の状況調査

(1) 製造時の状況について

製造時の状況を調査するため、破損タンクの板厚及び水圧検査の結果を表3.1.1に示す。

破損タンクの板厚は設計値以上で製造されており、水圧試験においても異常は認められない。

表3.1.1 破損タンクの板厚及び水圧試験結果

KHK 番号	板厚※ (胴部) 単位 : mm		板厚※ (鏡部) 単位 : mm		水圧試験結果
	内殻	外殻	内殻	外殻	
1363	5.9	5.8	6.9	6.0	異常なし
1366	6.0	6.3	6.1	5.8	異常なし
1367	6.4	6.1	5.7	5.7	異常なし
658	6.4	5.8	5.6	5.6	異常なし
659	6.7	6.1	5.6	5.7	異常なし
660	6.3	6.2	6.0	5.6	異常なし
1857	5.9	6.1	6.4	7.0	異常なし

※板厚は測定結果のうち、最小値を記載

(2) 埋設施工時の状況について

埋設施工時の状況を調査したが、埋設施工に関する資料は確認できなかった。

3. 2 ボーリング調査

破損タンク近傍の埋め戻し土の性状を得ることを目的にボーリング調査を実施した。ボーリング実施箇所はF F二重殻タンクの変形量が大きい箇所近傍及び現場施工上の制約を鑑み決定したものである。

(1) 調査概要

ア 静岡県の営業用給油取扱所

(ア) 調査概要

- ① 調査実施期間 平成27年9月1日～9月3日
- ② 調査実施者 株式会社タツノ 東京支店
- ③ 使用機器 油圧式ボーリングマシン ((株)東亜利根ボーリング社製 エコプローブEP-26型)

(イ) 調査内容

- ① 土壌資料採取 (無水式オールコアサンプリング)
 - ・ 5箇所 (営業用給油取扱所① 2箇所、営業用給油取扱所② 3箇所)
 - ・ コア径φ66mm
 - ・ ケーシング径φ86mm
- ② 標準貫入試験
 - ・ 5箇所 (営業用給油取扱所① 2箇所、営業用給油取扱所② 3箇所)

(ウ) ボーリング実施箇所

① 静岡県の営業用給油取扱所①

ボーリング実施箇所平面図①を図3. 2. 1に示す。

- ・ 孔番No.1 ボーリング深度 GL-4240mm
- ・ 孔番No.2 ボーリング深度 GL-4180mm

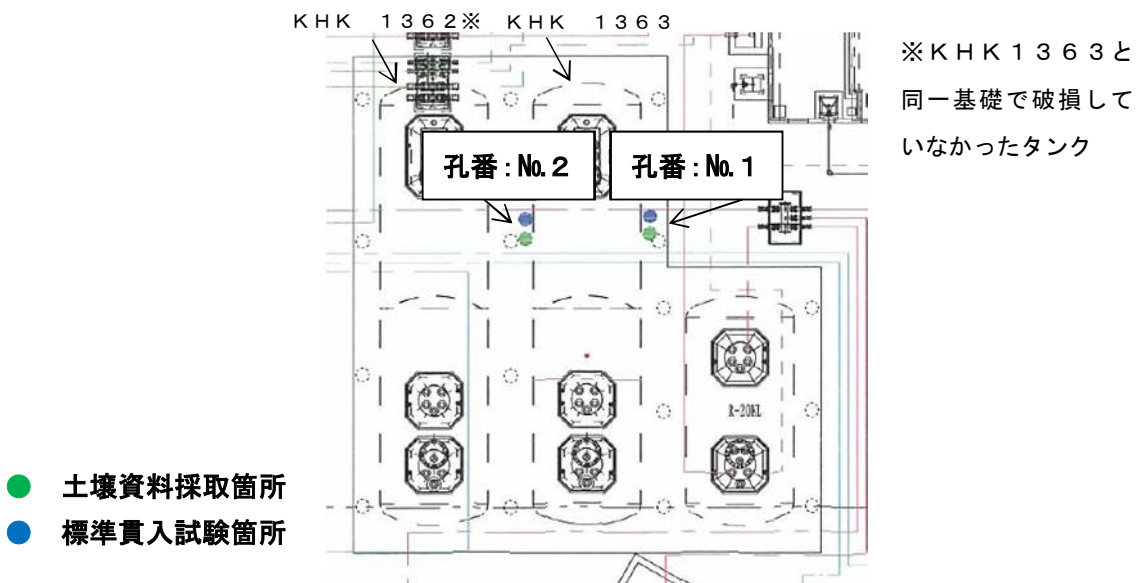


図3. 2. 1 ボーリング実施箇所平面図①

② 静岡県の営業用給油取扱所②

ボーリング実施箇所平面図②を図3. 2. 2に示す。

- ・孔番No.3 ボーリング深度 GL-4100mm
- ・孔番No.4 ボーリング深度 GL-4140mm
- ・孔番No.5 ボーリング深度 GL-4120mm

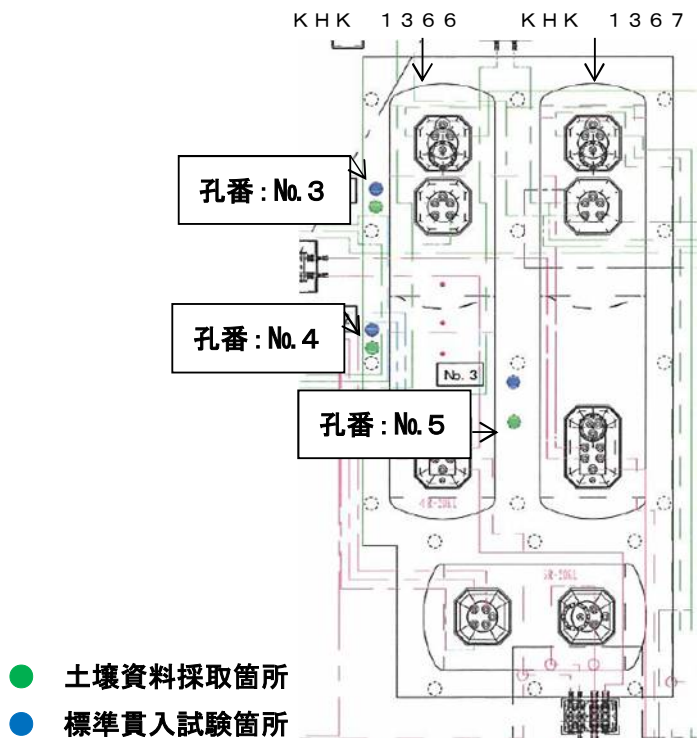


図3. 2. 2 ボーリング実施箇所平面図②

イ 神奈川県 of 営業用給油取扱所

(ア) 調査概要

- ① 調査実施期間 平成27年9月15日
- ② 調査実施者 株式会社タツノ 東京支店
- ③ 使用機器 油圧式ボーリングマシン ((株)ワイビーエム社製 ECO-3V型)

(イ) 調査内容

- ① 土壤資料採取 (無水式オールコアサンプリング)
 - ・ 2箇所
 - ・ コア径φ66mm
 - ・ ケーシング径φ86mm
- ② 標準貫入試験
 - ・ 2箇所

(ウ) ボーリング実施箇所

ボーリング実施箇所平面図を図3. 2. 3に示す。

- ・ 孔番No. 6 ボーリング深度 GL-4180mm
- ・ 孔番No. 7 ボーリング深度 GL-4200mm

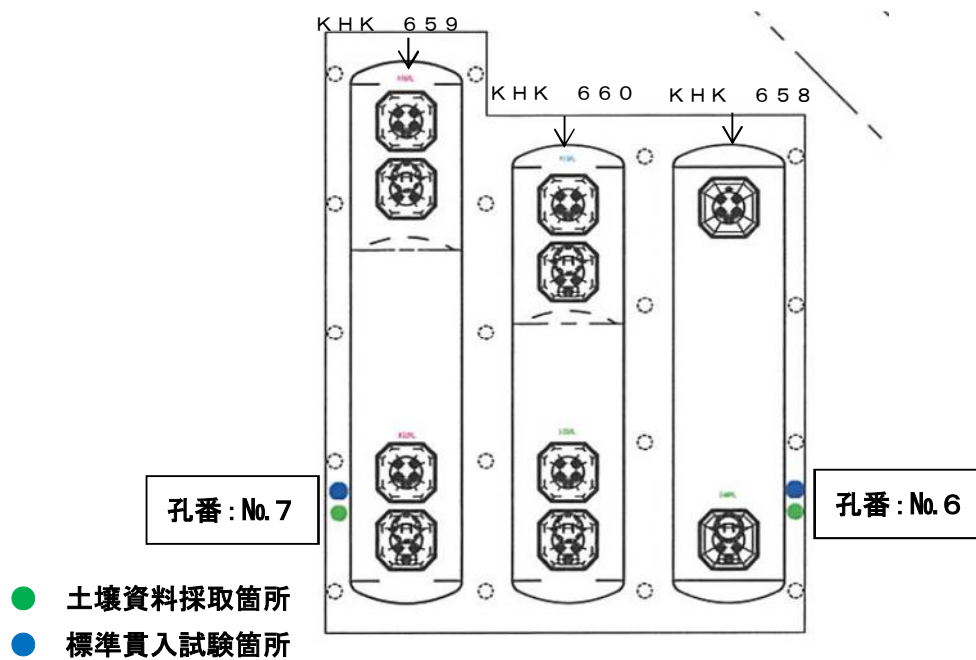


図3. 2. 3 ボーリング実施箇所平面図

(2) 調査結果

ア 土壌構成

観察によるFF二重殻タンク近傍を構成する土壌構成一覧を表3. 2. 1に示す。

表 3. 2. 1 土壌構成一覧表

場所		静岡県					神奈川県					
		給油取扱所①		給油取扱所②			No. 6	No. 7				
分布深度 (GL-m)	孔番	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5						
	土 質 区 分	0～ 1.00	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	掘削除去	掘削除去			
1.00～ 1.20		砂 (埋土)						砂 (埋土)				
1.20～ 1.30		礫混じり 砂質シル ト (埋土)										
1.30～ 1.50		砂礫 (埋土)						砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	礫混じり 砂質シル ト (埋土)
1.50～ 2.20												
2.20～ 3.60												砂礫 (埋土)
3.60～ 3.85		砂礫 (埋土)						砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	砂礫 (埋土)	礫 (埋土)
3.85～ 4.24												礫 (埋土)
								～4.18	～4.10	～4.14	～4.12	～4.18

孔番No.1～No.5では、下部スラブ付近まで砂礫となっている。孔番No.6では、GL-1.2m以下で礫混じりの砂質シルトとなっており、孔番No.7では、GL-1.5m以下で礫混じりの砂質シルトとなっている。

なお、孔番No.6及びNo.7は、深度0mから1.0mまでは埋設配管を避けるため土壌を掘削除去したものである。

粒径による土粒子の分類について表3.2.2に示す。

表 3. 2. 2 粒径による土粒子の分類

呼び名	礫		砂		シルト	粘土
	礫	細礫	粗砂	細砂		
粒径 (mm)	75~4.76	4.76~2.0	2.0~0.42	0.42~0.074	0.074~ 0.005	0.005以下

(出典：ボーリング図を読む 理工図書株式会社 1986年)

イ 標準貫入試験 (N値)

孔番No.1~No.7にて実施した標準貫入試験結果より、深度区分ごとのN値を取りまとめたものを図3.2.4に示す。

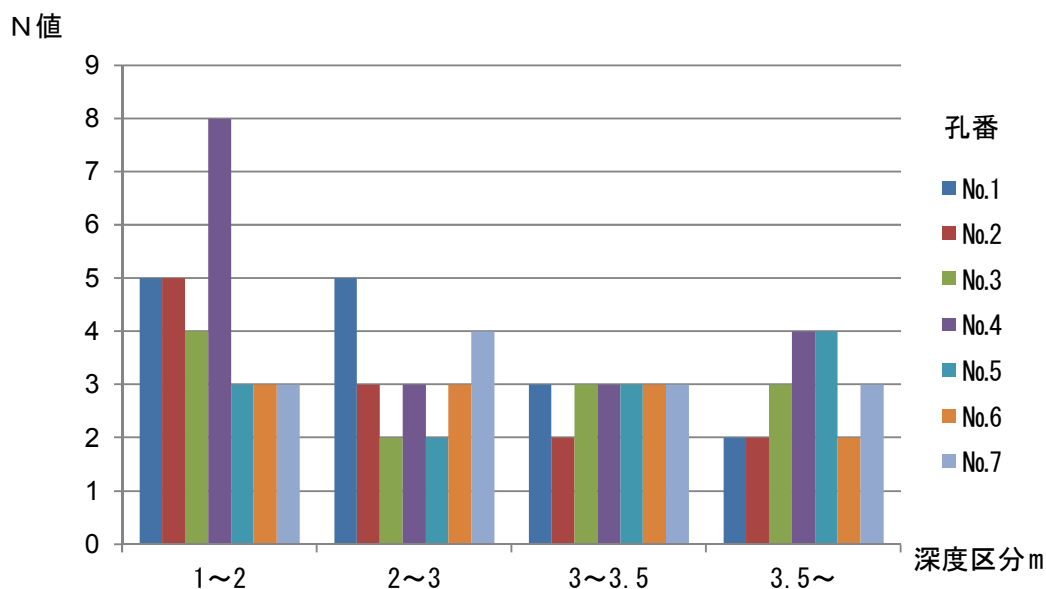


図 3. 2. 4 深度区分ごとのN値

最も高いN値は8、最も小さいN値は2であった。深度区分1m~2mのN値が他の深度区分のN値と比べ高くなっている傾向にある。

ウ 神奈川県の実業用給油取扱所における砕石基礎の状況

タンク (KHK 6 5 9) 撤去後の砕石基礎の状況を写真3.2.1に示す。

手で容易に崩すことができる充填碎石部分

石塊

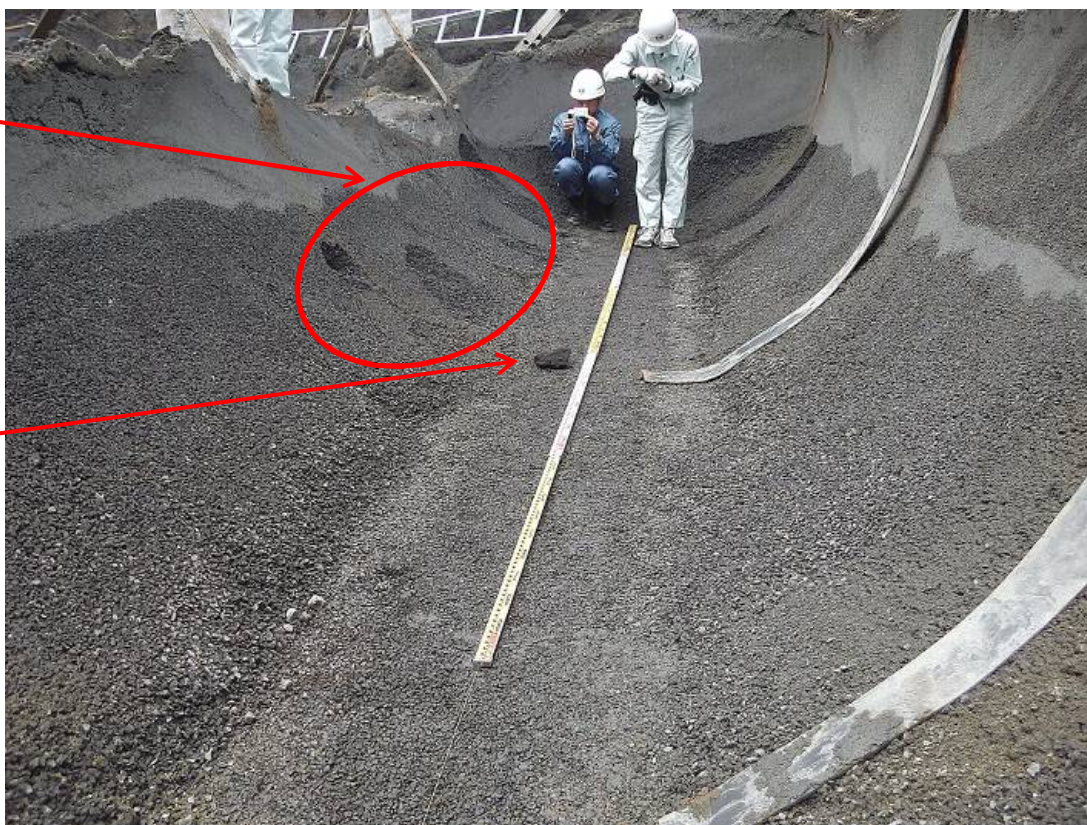


写真3. 2. 1 タンク撤去後の碎石基礎の状況（KHK659）

写真3. 2. 1に示すように充填碎石部分は、手で容易に崩すことができる程度の締め固め状況であり、さらに拳大の石塊が混入していたことが確認された。

(3) 平成27年度に実施した新潟県の営業用給油取扱所

添付資料1に示すとおり、4孔の各試験深度におけるN値は0～2であり、締まりが非常に緩いことが確認された。

埋土の粒度組成は、24～28%の礫分と65～68%の砂分、5～10%の細粒分で構成されていたことも確認され、指針に示された材料が使用されておらず、締め固めが不十分であり、タンクが変形しやすい埋設状況であったと考えられた。

タンク撤去後の碎石基礎の状況を写真3. 2. 2に示す。充填碎石に相当する部分はタンクを持ち上げた後に崩れてくる状況が確認された。



写真3. 2. 2 タンク撤去後の碎石基礎の状況（新潟県の営業用給油取扱所）

3. 3 採取した土壌に対する粒度分布調査

静岡県及び神奈川県において実施したボーリング調査により採取した土壌について、粒度分布試験を行った。

(1) 調査概要

ア 試験実施機関

株式会社アースプライム

イ 試験実施日

平成28年6月30日

ウ 試験方法

土の粒度試験方法（日本工業規格 J I S A 1 2 0 4）

(2) 試験結果

ボーリング調査により採取された土壌を写真3. 3. 1から写真3. 3. 7、粒度分布試験結果を表3. 3. 1に示す。



写真3. 3. 1 孔番No.1から採取した土壌



写真3. 3. 2 孔番No.2から採取した土壌



写真3. 3. 3 孔番No.3から採取した土壌



写真3. 3. 4 孔番No.4から採取した土壌



写真3. 3. 5 孔番No.5から採取した土壌



写真3. 3. 6 孔番No.6から採取した土壌



写真3. 3. 7 孔番No.7から採取した土壌

表 3. 3. 1 粒度分布試験結果

粒度区分 \ 孔番	粒度分布						
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
粗礫分 (%) 粒径：19～75mm	2.30	0.50	4.60	2.10	0.50	-	4.40
中礫分 (%) 粒径：4.75～19mm	15.1	9.90	9.10	22.3	25.2	18.9	28.3
細礫分 (%) 粒径：2～4.75mm	69.9	73.2	53.4	17.2	48.2	21.3	18.2
粗砂分 (%) 粒径：0.85～2mm	6.80	7.80	16.0	30.8	15.1	12.9	12.0
中砂分 (%) 粒径：0.25～0.85mm	2.10	3.40	6.60	10.4	4.90	16.6	11.7
細砂分 (%) 粒径：0.075～0.25mm	1.20	1.80	3.50	5.40	2.10	11.9	8.80
シルト分 (%) 粒径：0.005～0.075mm	1.50	2.10	4.40	7.60	1.80	11.2	10.5
粘土分 (%) 粒径：～0.005mm	1.10	1.30	2.40	4.20	2.20	7.20	6.10

静岡県から採取した土壌のうち、孔番No. 1 から孔番No. 3 及び孔番 No. 5 の土壌は細礫分 (粒径 2 mm から 4. 7 5 mm) が多く、孔番 No. 4 の土壌は粗砂分が多く分布している。神奈川県で採取した土壌 (孔番No. 6 から孔番No. 7) は広い粒径範囲で分布している。

3. 4 F F二重殻タンクの変形状況調査

破損タンク及び当協会の職員が埋設施工時に立ち会い、概ね指針どおりの施工がされたと考えられるタンク（以下「立ち会いタンク」という。）について、埋設施工後の変形量の比較を行った。

(1) 定点測定

定点測定は、製造工場でのタンク完成時及び水圧試験後にF F二重殻タンク内の定点において鉛直方向内径及び水平方向内径（以下「縦横径」という。）を測定するものである。

次のア及びイに示す営業用給油取扱所では、破損タンク及びKHK 1 3 6 2についてはタンク埋設時に水を張り、大雨などの増水時における浮き上がり防止対策を行っており、測定値は上部スラブ完成後に水を抜き、タンク内の縦横径を定点で計測したものである。

ア 静岡県の営業用給油取扱所①

(7) 破損タンク 1 基の縦方向変形量

確認番号	タンク容量	測定点	測定時期	変形量 (mm)	平均値 (mm)
KHK1363	40kL 中仕切 (20 : 20)	14 箇所	水抜き後	-6 ~ -30	18

注：平均値は変形量の絶対値で算定したものである。

イ 静岡県の営業用給油取扱所②

(7) 破損タンク 2 基の縦方向変形量

確認番号	タンク容量	測定点	測定時期	変形量 (mm)	平均値 (mm)
KHK1366	40kL 中仕切 (20 : 20)	11 箇所	水抜き後	2 ~ -38	21
KHK1367	40kL 中仕切 (20 : 20)	14 箇所	水抜き後	-9 ~ -23	15

注：平均値は変形量の絶対値で算定したものである。

(4) 立ち会いタンク 3 基の縦方向変形量

確認番号	タンク容量	測定点	測定時期	変形量 (mm)	平均値 (mm)
KHK3342	40kL 中仕切 (20 : 20)	14 箇所	埋設完了後	0 ~ -8	4
KHK3349	20kL ストレート	7 箇所	埋設完了後	-1 ~ -6	3
KHK3359	20kL 中仕切 (10 : 10)	6 箇所	埋設完了後	0 ~ -5	3

注：平均値は変形量の絶対値で算定したものである。

【参考】 破損タンクと同一基礎に存しており、同様の土木施工が施されたものと推定されるが破損していなかったタンク

確認番号	タンク容量	測定点	測定時期	変形量 (mm)	平均値 (mm)
KHK1362	40kL中仕切 (20 : 20)	14箇所	水抜き後	-7 ~ -22	16

・ 下表に示すように製造後の板厚測定結果から破損しなかったKHK1362は破損したKHK1363と比較して外殻平均板厚では1.1mm、内殻平均板厚では0.8mm、それぞれ厚いことが確認されている。

板厚測定結果の比較

(単位 : mm)

確認番号	外殻板厚(設計5.5)	内殻板厚(設計5.5)	スチフナー板厚(設計14.0)
KHK1362	7.0~10.9 (平均8.3)	5.9~14.3 (平均7.6)	14.4~18.2 (平均 16.2)
KHK1363	5.8~9.8 (平均7.2)	5.9~14.3 (平均6.8)	14.8~18.2 (平均 16.4)

(ウ) 立ち会いタンクと同様の施工が行われたと考えられるタンク (以下「立ち会い同等タンク」という。) 2基の縦方向変形量

確認番号	タンク容量	測定点	測定時期	変形量 (mm)	平均値 (mm)
KHK3344	40kL 中仕切 (30 : 10)	14 箇所	埋設完了後	2 ~ -4	2
KHK3352	40kL 中仕切 (30 : 10)	14 箇所	埋設完了後	0 ~ -9	3

注 : 平均値は変形量の絶対値で算定したものである。

ウ 神奈川県の実業用給油取扱所

破損タンク 3基は水抜き後の縦横径の測定が行われなかったことから、定点測定の比較検討はできなかった。

エ 測定結果について

ア及びイについて定点測定を実施した結果、破損タンク及び破損タンクと同一基礎にて埋設されていたが破損していなかったKHK1362 (以下「破損タンク等」という。) は浮き上がり防止対策としてタンク内に水を張る対策を施しているが、立ち会いタンク及び立ち会い同等タンク (以下「立ち会いタンク等」という。) は浮き上がり防止対策を施していないため、同一の条件での比較ではないが、破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量を比較すると、立ち会いタンク等では変形量の平均値が約1/5になっており、最大値も9mm以下であることから、指針どおりに施工を行えば変形量が少なくなることが推定される。

(2) 3Dレーザー測長による測定

3Dレーザー測長による測定で取得した点群データを活用し、立ち会いタンク等の変形量と破損タンク等の変形量の比較を行った。

ア 調査実施者等

(ア) 調査実施者：大浦工測株式会社

(イ) 使用機器：Leica 社製 HDS 7000

イ 測定条件

タンクの変形状況を測定するに当たり、図3.4.1に示すように、タンク両端より500mm部分の断面形状（円）中心を結ぶ線をY軸とし、Y軸上リザーブタンク側端部を座標原点に、水平方向にX軸、鉛直方向をZ軸に設定した。なお、X軸、Z軸の水平、鉛直は測定機器の絶対軸方向を正とした。

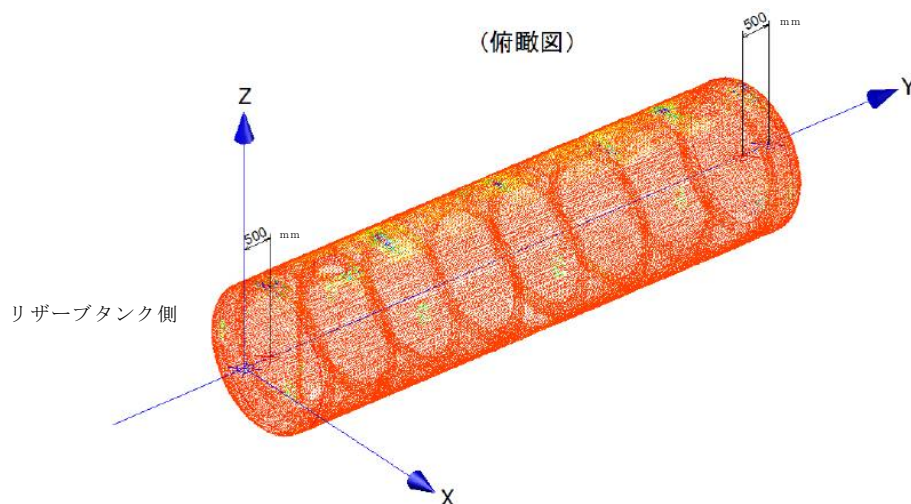


図3.4.1 タンク中心軸設定

タンクの半径方向の変位について、図3.4.2のとおり、リザーブタンク側のタンク端部から見た方向を正面として、反時計回りに回転角を取り半径を測定した。

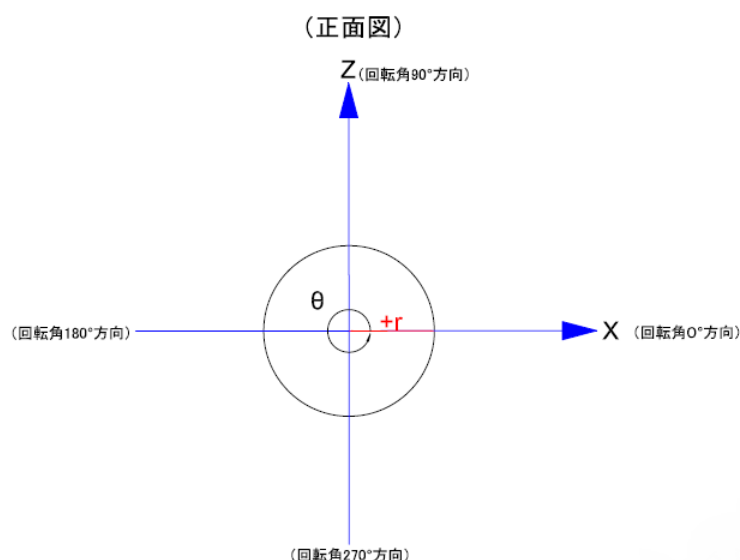


図3. 4. 2 内径測定箇所

Y軸直交断面（原点からの距離 $D = N \text{ mm}$ ）

r = タンク中心軸からの半径、 θ = X軸からの回転角（5度ピッチ）

ウ 測定対象

(ア) 神奈川県の実業用給油取扱所

- | | | | |
|---|-------------|--------------------------|---------|
| ① | KHK 3 3 9 3 | 4 0 k L ストレート | 立ち会いタンク |
| ② | KHK 6 5 8 | 4 0 k L ストレート | 破損タンク |
| ③ | KHK 6 5 9 | 4 8 k L 中仕切り (3 2 : 1 6) | 破損タンク |
| ④ | KHK 6 6 0 | 4 0 k L 中仕切り (2 5 : 1 5) | 破損タンク |

(イ) 静岡県の実業用給油取扱所①

- | | | | |
|---|-------------|--------------------------|--------------|
| ① | KHK 1 3 6 3 | 4 0 k L 中仕切り (2 0 : 2 0) | 破損タンク |
| ② | KHK 1 3 6 2 | 4 0 k L 中仕切り (2 0 : 2 0) | 破損していなかったタンク |

(ロ) 静岡県の実業用給油取扱所②

- | | | | |
|---|-------------|--------------------------|-------|
| ① | KHK 1 3 6 6 | 4 0 k L 中仕切り (2 0 : 2 0) | 破損タンク |
| ② | KHK 1 3 6 7 | 4 0 k L 中仕切り (2 0 : 2 0) | 破損タンク |

エ 測定結果

立ち会いタンクの変形量に関するグラフを参考資料3、図1に、破損タンク等の変形量に関するグラフを図3. 4. 3及び参考資料3、図2から図14に示す。

また、グラフ中の角度の表示と砕石基礎の断面図との関係を図3. 4. 4に示す。

なお、参考資料3及び図3. 4. 3は基準円に対する変位を示すグラフであり、実際に変形している形状を示すものではない。

KHK1367 距離D=6200mm

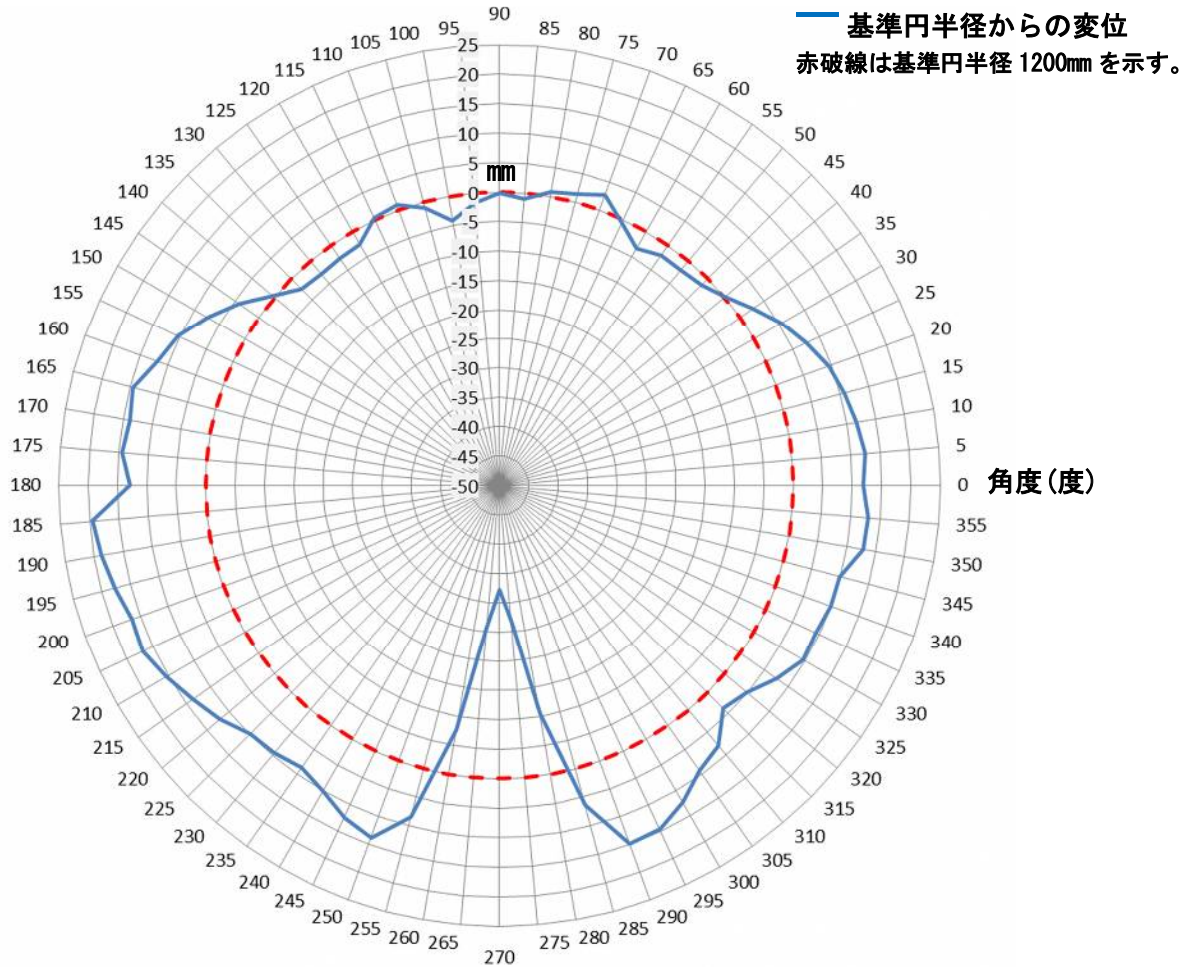


図 3. 4. 3 破損タンク等の変形量に関するグラフ

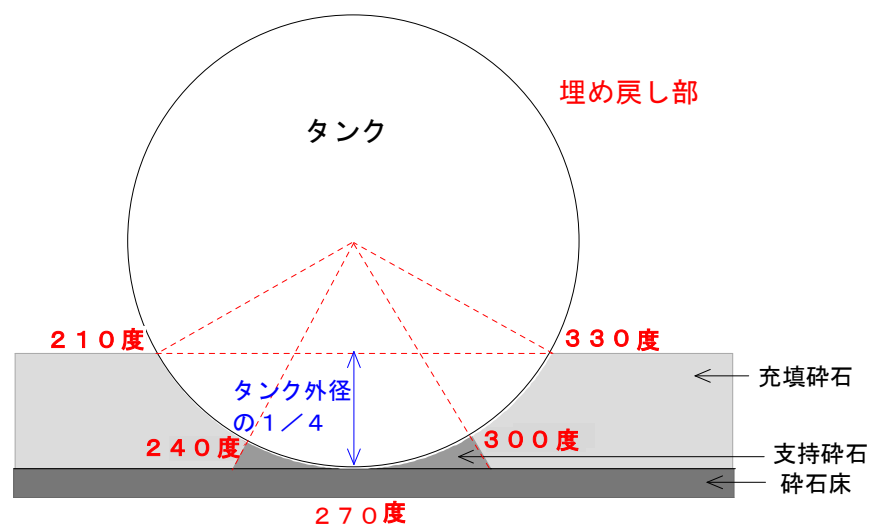


図 3. 4. 4 グラフ中の角度の表示と碎石基礎の断面図との関係

一部の破損タンク等は浮き上がり防止対策を施してあり、立ち会いタンク等は浮き上がり防止対策を施していないため、同一条件での比較とはならないが、破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量に関するグラフを比較すると、支持砕石及び充填砕石の部分（210度～330度）において、立ち会いタンクの変形量は少なく基準円半径（タンク径の設計値）から大きく逸脱することがない。

一方、破損タンク等は270度において著しく半径が減少して、250度付近及び290度付近で半径が増加し、さらに、0度付近及び180度付近で半径が著しく増加する傾向にあり、基準円半径から大きく逸脱していることが確認された。

これらのことから、指針どおりの施工を行えば基準円半径から大きく逸脱する変形が少なくなることが推定される。

3. 5 空隙状況調査

F F 二重殻タンク内部から打診棒でタンク内面を叩き、音の響く箇所を線で囲み、当該箇所についてのマッピングを作成した。

(1) 調査方法

タンク内から打診棒による反響音の有無の範囲を調査した。

(2) 調査対象

破損タンク等及び立ち会いタンク

(3) 調査結果

反響音のある箇所は埋設されたタンクと砕石基礎の間に空隙の存在が推定される箇所（以下「空隙」という。）として、その状況を表したものを添付資料4、図1～図8に示す。なお、その一部として、破損タンクのKHK 6 6 0について図3. 5. 1に、立ち会いタンクのKHK 3 3 9 3について図3. 5. 2に示す。

なお、縦軸にタンク胴長、横軸に図3. 4. 1及び図3. 4. 2において設定した角度を示している。

破損タンク等については、支持砕石の部分に断続的に空隙が確認され、一部の充填砕石の部分にも空隙が確認された。

一方、立ち会いタンク等については、埋設施工に際して浮力防止対策の水張りを行っていないことから、浮き上がり防止対策が施され、一定期間供用されていた破損タンク等の空隙状況と同じように比較することはできないが、支持砕石の部分において270度のラインを含めて連続的に空隙が存在していることが確認された。

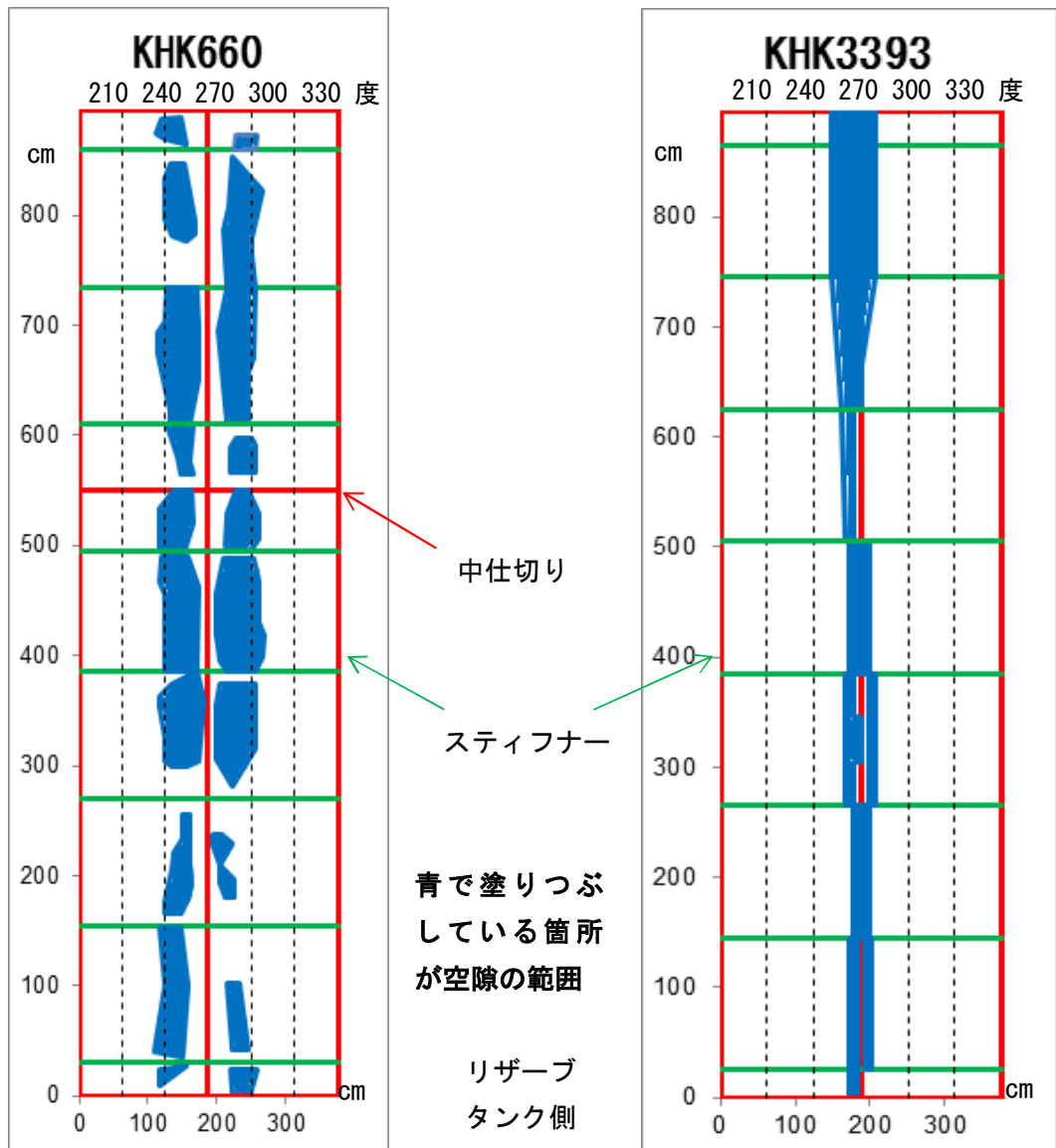


図3. 5. 1 破損タンクの空隙状況

図3. 5. 2 立ち会いタンク等の空隙状況

破損タンク等では、270度から±30度の範囲のスティフナー間において、空隙が確認された。また、立ち会いタンク等では、270度近傍においてタンク端部から端部へ一様に空隙が確認された。

3. 6 破損タンク試験片の状況調査

破損タンクのうち、神奈川県の実業用給油取扱所において破損したタンク（以下、「神奈川県破損タンク」という。）について、調査・分析用に一部を試験片として採取した。

これらの試験片の外観から確認された状況の一部を以下に示す。

(1) 採取箇所と調査・分析対象について

神奈川県破損タンクの外観を写真3. 6. 1に試験片の採取位置等を図3. 6. 1から図3. 6. 5に示す。

後節の3. 7から3. 10において調査・分析を行う試験片の対象を表3. 6. 1に示す。

また、一部の調査・分析項目として現行品（平成28年10月製造）のFF二重殻タンクから採取した試験片（スティフナーなし）を比較対象として用いる。



写真3. 6. 1 神奈川県破損タンク外観

KHK 6 5 8

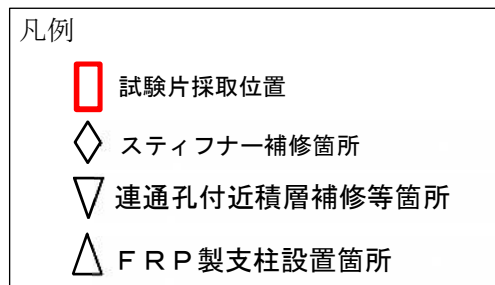
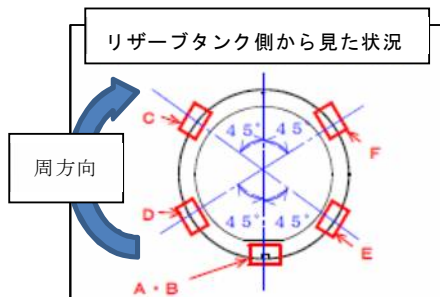
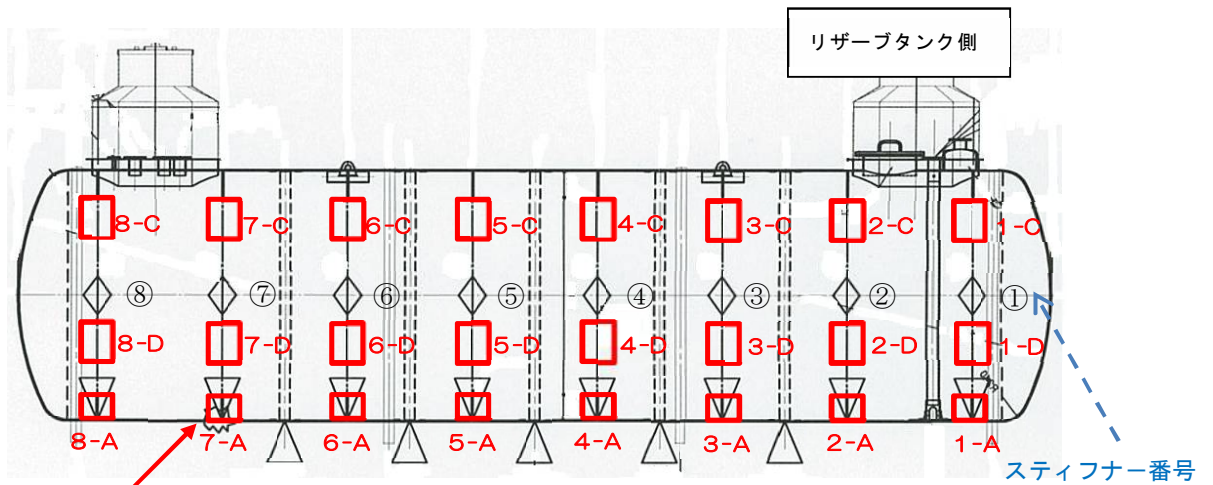
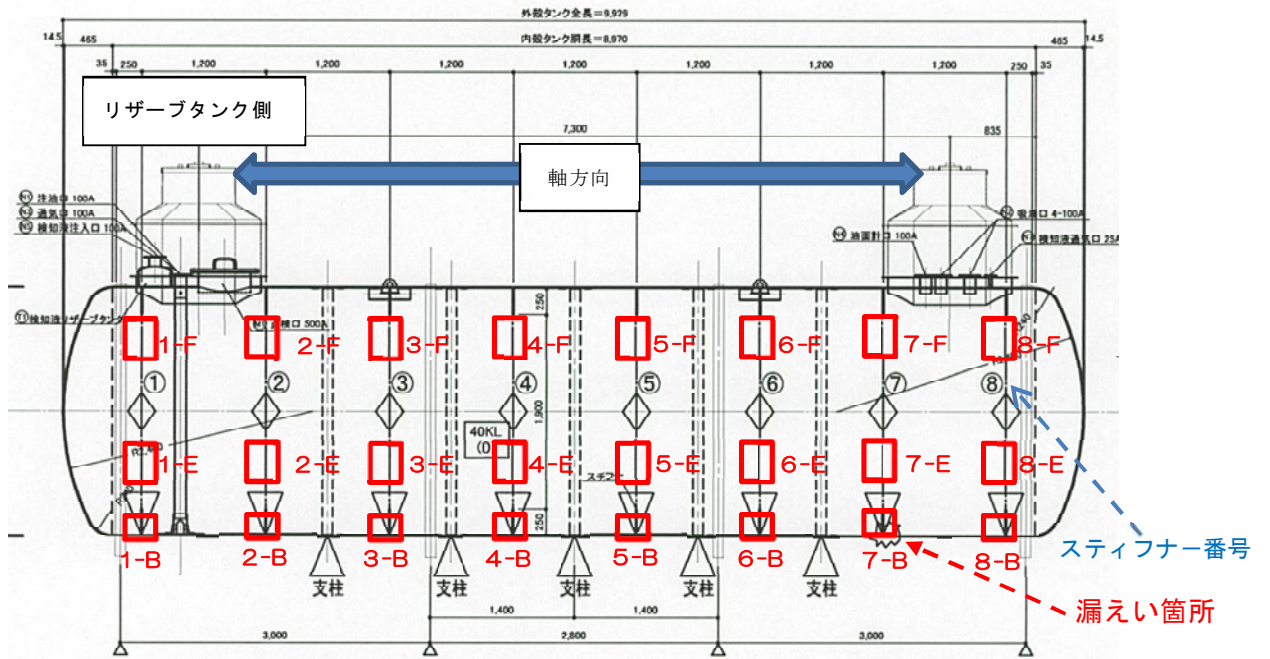
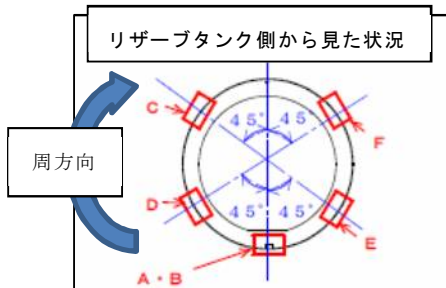
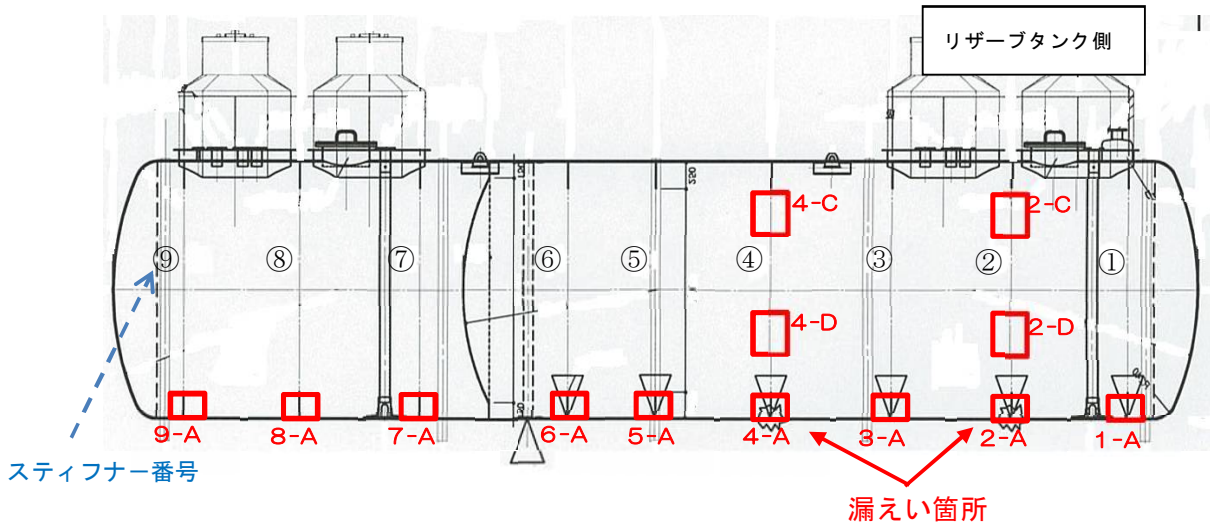
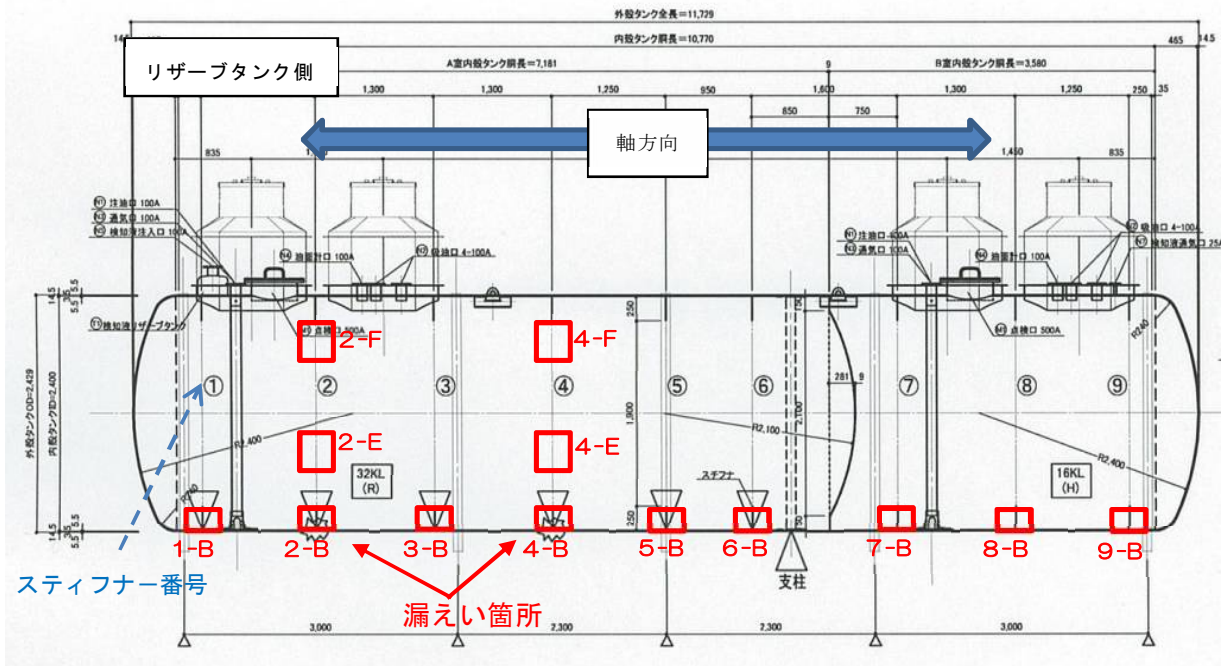


図3. 6. 1 KHK 6 5 8 試験片 (スティフナー付) 採取位置

KHK 6 5 9



凡例	
	試験片採取位置
	スティフナー補修箇所
	連通孔付近積層補修等箇所
	FRP製支柱設置箇所

図3. 6. 2 KHK 6 5 9 試験片 (スティフナー付) 採取位置

KHK 6 6 0

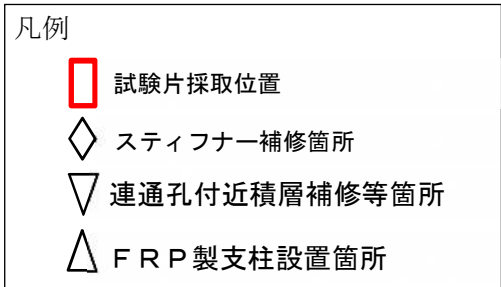
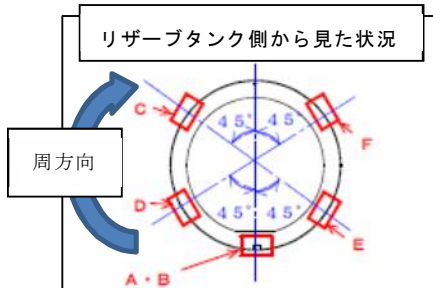
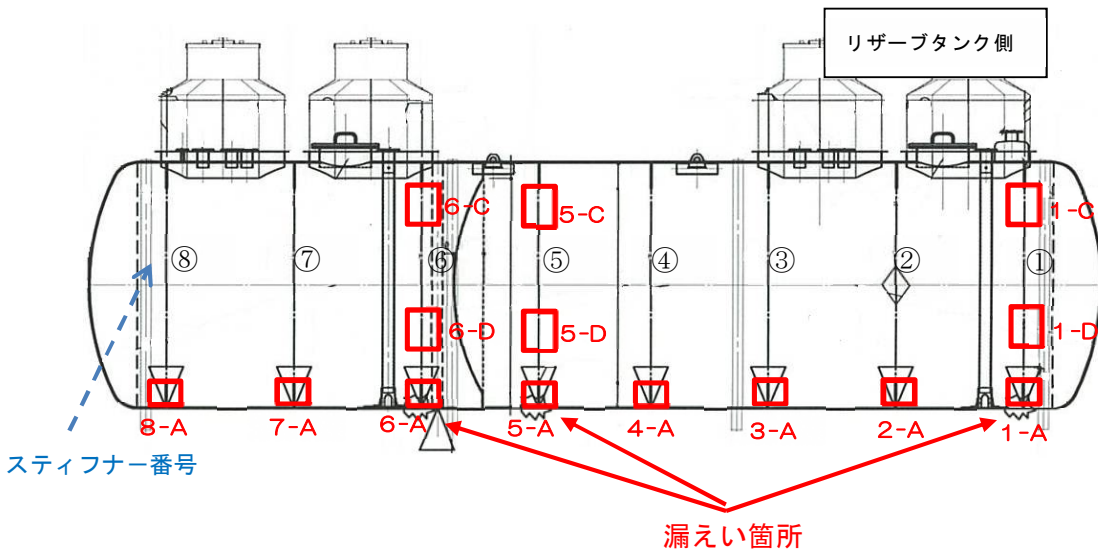
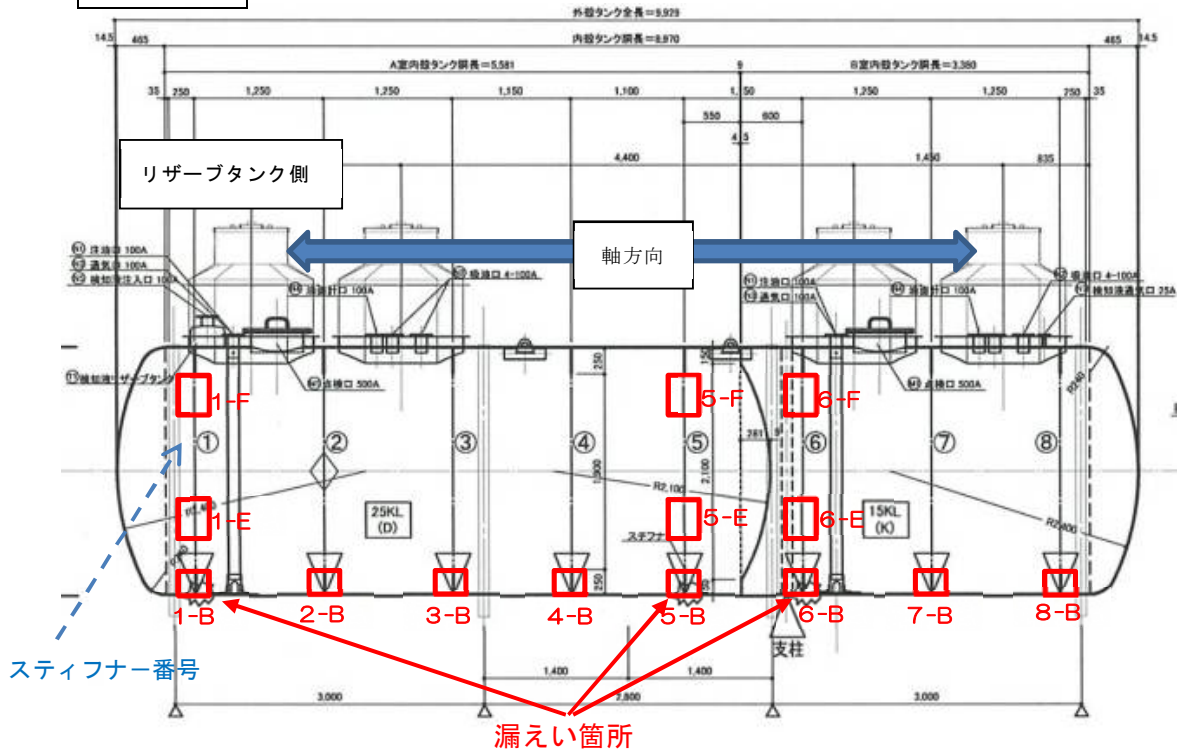


図3. 6. 3 KHK 6 6 0 試験片 (スティフナー付) 採取位置

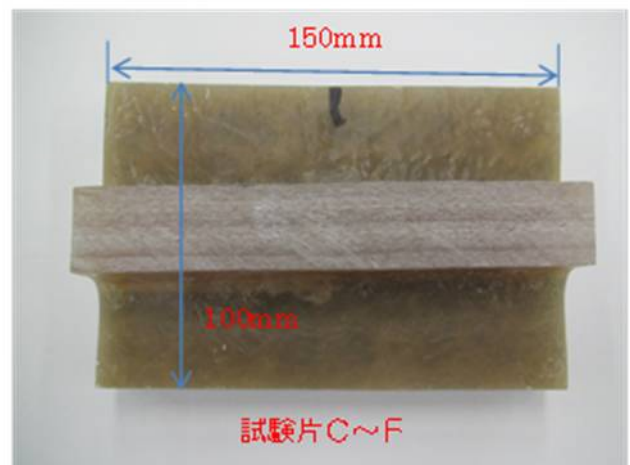
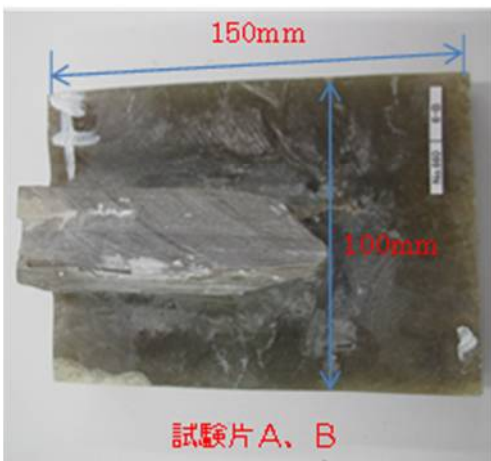
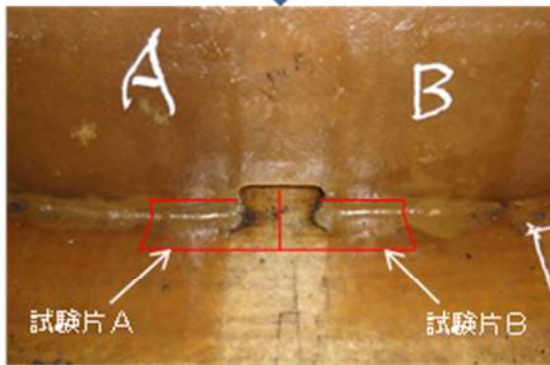
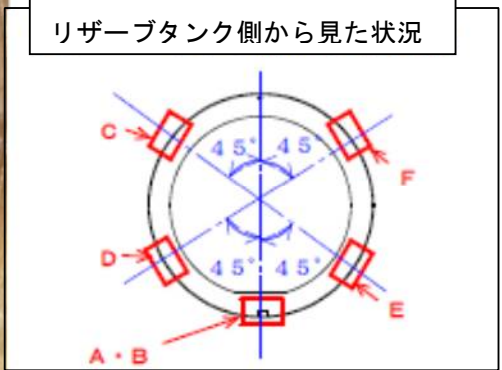
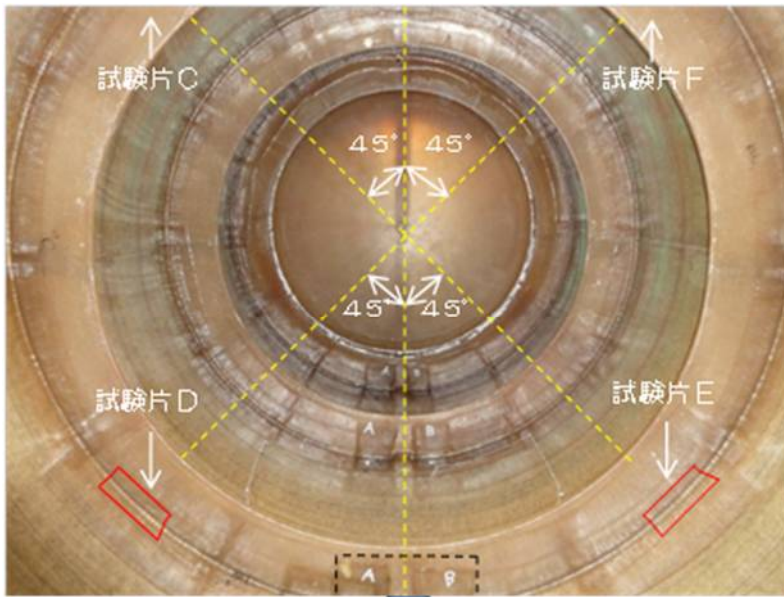
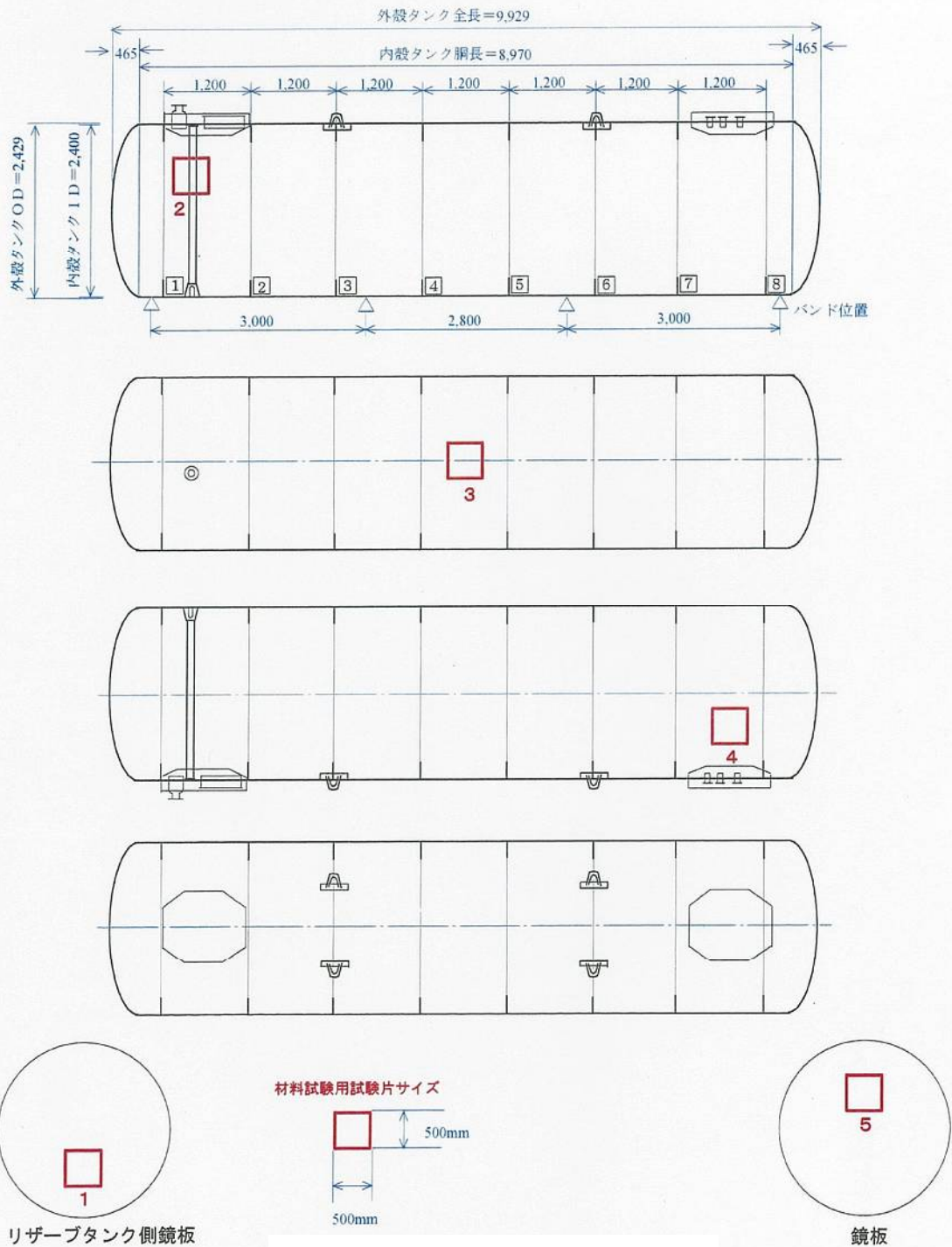


図 3. 6. 4 試験片 (スティフナー付) サイズ



例：40k Lストレート（単位：mm）

図3. 6. 5 試験片（スティフナーなし）採取状況の一例

表 3. 6. 1 試験片分析・調査対象位置

調査・分析項目	対象タンク	スティフナー有無	対象位置 (図 3. 6. 1～図 3. 6. 5)	各節における表記
検知層の厚さ測定 (3. 7 (1))	KHK 6 5 8 KHK 6 5 9 KHK 6 6 0	有	すべて	対象位置No.
検知層の破損状況に関する 分析 (3. 7 (2))	KHK 6 6 0	有	7-B	「7-B」
	KHK 6 6 0	無	4	「左側」
材料試験 (曲げ試験) (3. 8 (1))	KHK 6 5 8	無	2	「右側」
	KHK 6 5 8	無	3	「底部」
	KHK 6 5 9	無	2	「右側」
	KHK 6 5 9	無	3	「底部」
	KHK 6 6 0	無	2	「右側」
	KHK 6 6 0	無	3	「底部」
材料試験 (バーコル硬さ) 材料試験 (ガラス含有率) (3. 8 (2))	KHK 6 5 8	無	3	「底部」
	KHK 6 5 9	無	3	「底部」
	KHK 6 6 0	無	3	「底部」
検知層の破損状況に関する 分析 (3. 7 (2))	KHK 6 6 0	無	4	「左側」
材料試験 (検知層) (3. 8 (3))	現行品	無	製造品の胴部	「現行品」
非破壊検査による分析 (3. 9)	KHK 6 5 8	有	2-A、3-A、3-B 3-F、4-B、4-D 5-A、5-B、6-C 7-A、7-B、7-F 8-E	各対象位置No.
	KHK 6 5 9	有	1-A、2-A、2-B 3-A、4-A、4-B	各対象位置No.
	KHK 6 6 0	有	1-A、1-B、2-A 3-A、5-A、5-D 5-E、6-A、6-B 6-D、7-B、8-A 8-B	各対象位置No.
電子顕微鏡による断面観察 (3. 10)	KHK 6 5 9	有	2-A	「2-A」

(2) 外観からの破損状況について

採取した試験片について、外観から確認された状況の一部を以下に示す。

ア 検知層の柱状構造破損

検知層の柱状構造が破損して内殻と外殻が剥離しているものが確認された。検知層の状況について写真3.6.1及び写真3.6.2に示す。

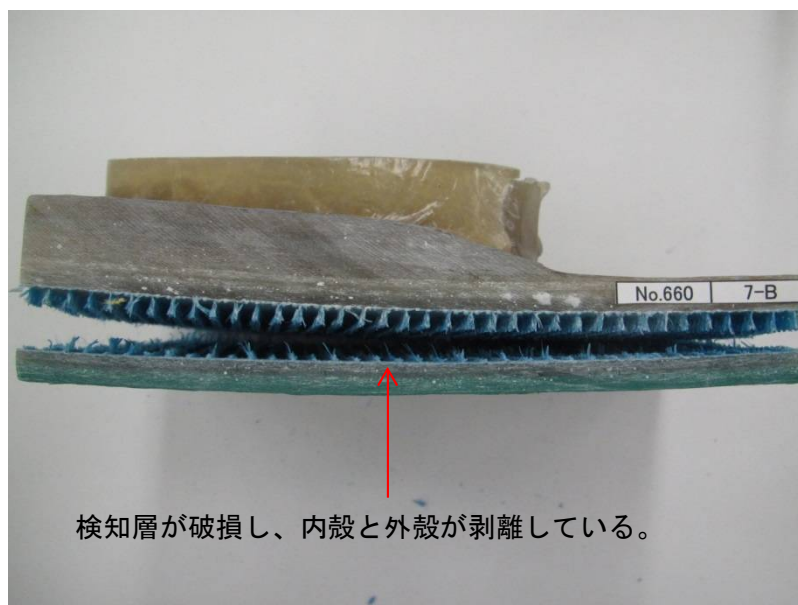


写真3.6.1 検知層の状況 (KHK660 7-B)

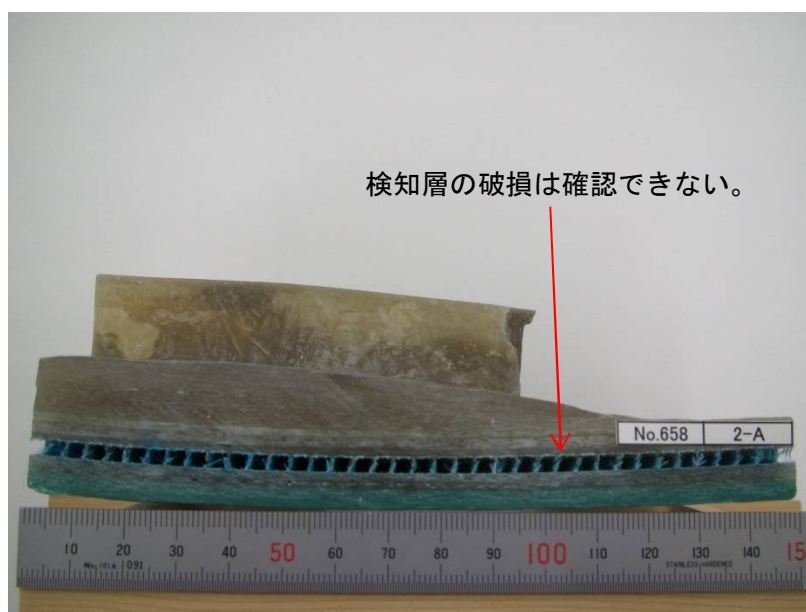


写真3.6.2 検知層の状況 (KHK658 2-A)

イ 検知層の潰れ

検知層が潰れている状況が確認された。検知層の状況について写真3.6.3に示す。



写真3.6.3 検知層の潰れ状況 (KHK659 3-A)

ウ 連通孔付近の変色

連通孔付近において、内殻面に変色が確認された。状況について写真3.6.4に示す。



写真3.6.4 連通孔付近の状況 (KHK660 8-B)

3. 7 検知層に関する調査・分析

前節において外観からの状況を確認したところ、検知層の破損が認められたことから以下の調査・分析を実施した。

(1) 検知層の厚さ測定について

ア 実施内容

神奈川県破損タンクから採取したスティフナーを含む試験片に対して外観からの検知層厚さを測定した。

イ 実施方法

試験片のリザーブタンク側に面する切断面をデジタルカメラで撮影し、画像上において検知層の厚さを1つの試験片に対して10mm間隔で15箇所測定した。(図3.7.1参照)。

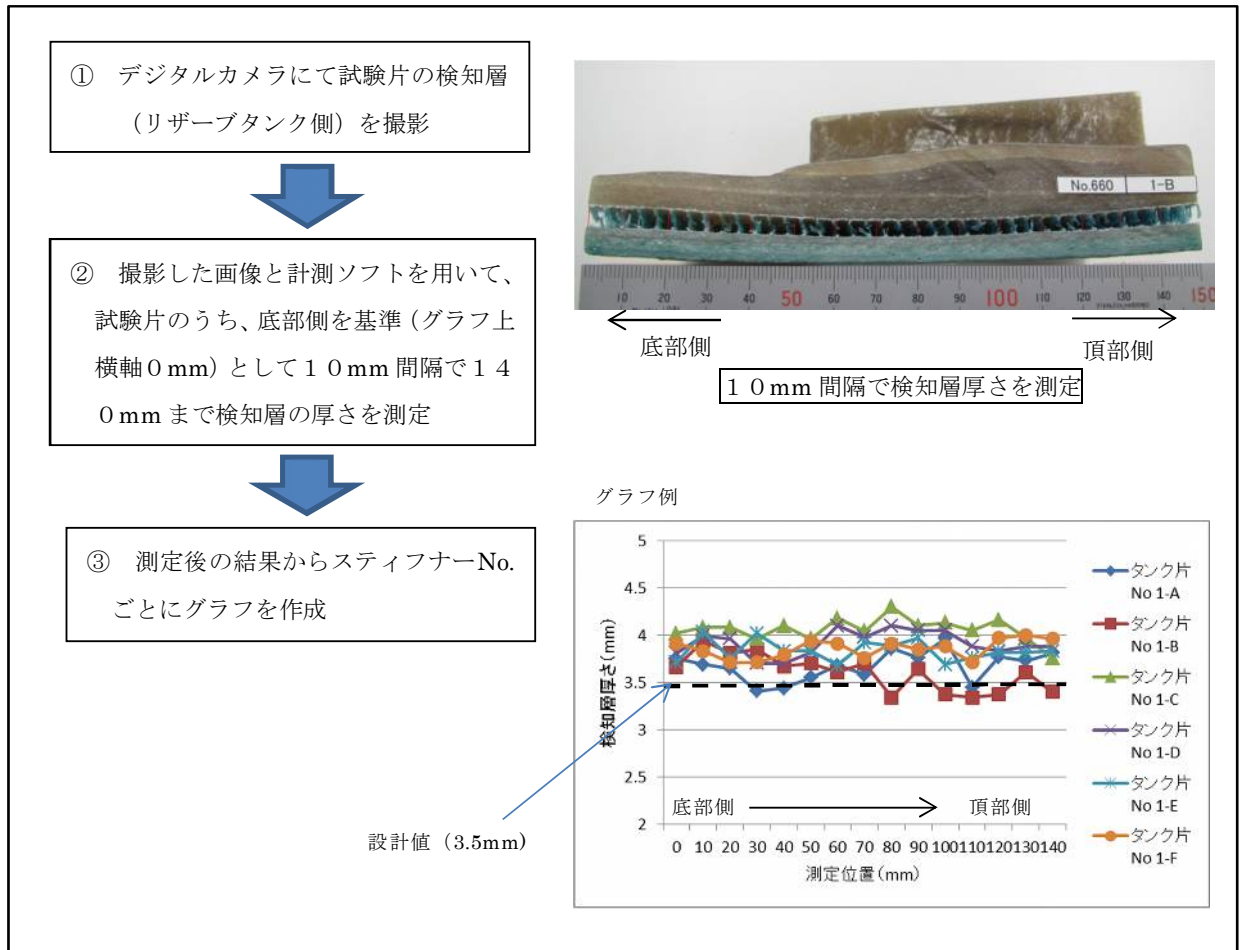


図3.7.1 検知層厚さ測定方法

ウ 測定結果

各破損タンクの測定結果を参考資料5に示す。

(ア) KHK658について

- ① 漏えい箇所であるスティフナーNo.7についてはA、Bの位置における検知層よりも頂部から45度に位置する部分(7-F)がもっとも検知層の厚さが薄い結果であった。(図3.7.2参照)
- ② スティフナーNo.7以外のスティフナー部分においてはA、Bの位置における検知層の厚さが薄い傾向であった。
- ③ 最も検知層が薄い部分はスティフナーNo.3のAの位置で2.6mmであった。(図3.7.3参照)

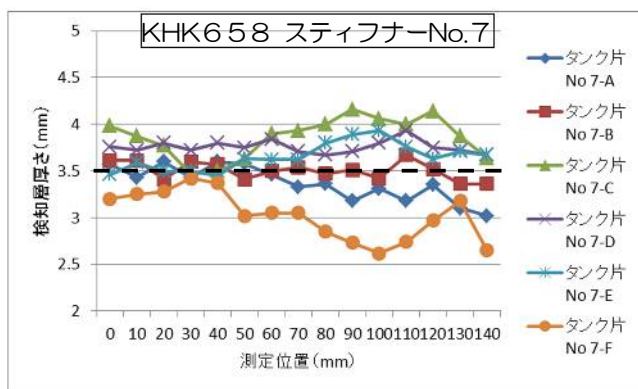


図3.7.2 スティフナーNo.7 検知層厚さ

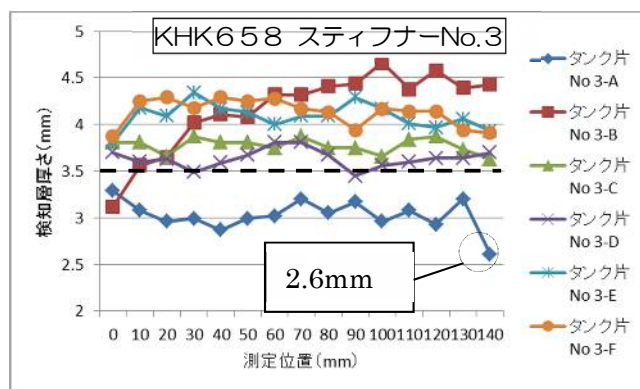


図3.7.3 スティフナーNo.3 検知層厚さ

(イ) KHK659について

- ① 漏えい箇所であるスティフナーNo.2及びNo.4については、検知層の厚さが概ねの位置で3.5mm程度であった。(図3.7.4及び図3.7.5参照)
- ② スティフナーNo.3についてはA、Bの位置における検知層厚さが薄い傾向であり、最も薄い部分は1.9mmであった。(図3.7.6参照)

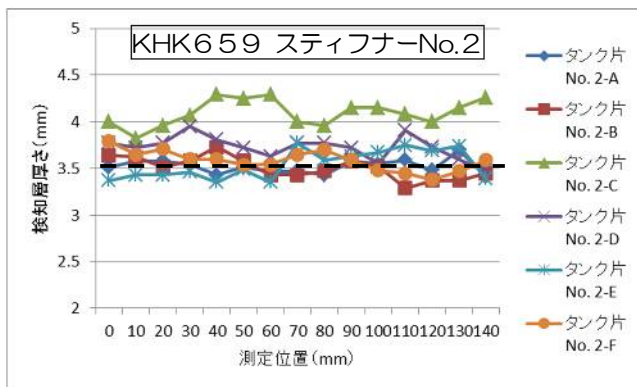


図3.7.4 スティフナーNo.2 検知層厚さ

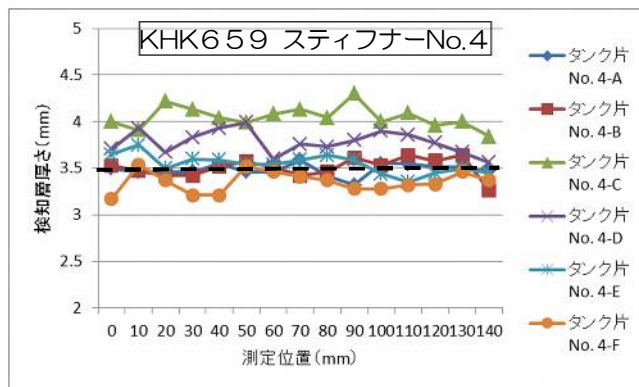


図3.7.5 スティフナーNo.4 検知層厚さ

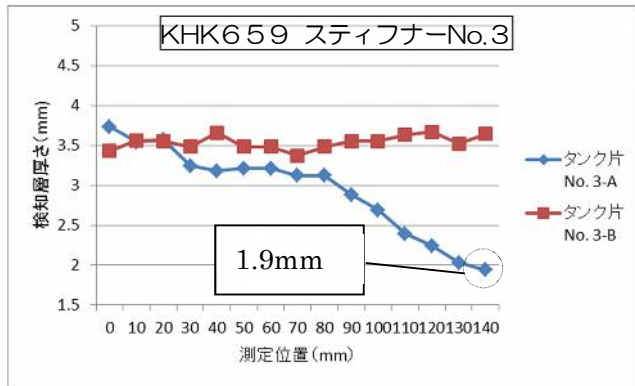


図3. 7. 6 スティフナーNo.3 検知層厚さ

(ウ) KHK660について

- ① 漏えい箇所であるスティフナーNo.1について、A及びBの位置における検知層の破損が影響して測定はできなかったが、その他の位置については殆どが3.5 mm 以上であった。(図3. 7. 7 参照)
- ② 漏えい箇所であるスティフナーNo.5及びNo.6について、A、Bの位置におけるの検知層は3.5 mm 未満であるが、その他の位置については殆どが3.5 mm 以上の厚さである。(図3. 7. 8 及び図3. 7. 9 参照)
- ③ 漏えい箇所ではないスティフナーNo.8の底部は、検知層厚さを測定した中で最も薄い、1.8 mm であった。(図3. 7. 10 及び図3. 7. 11 参照)

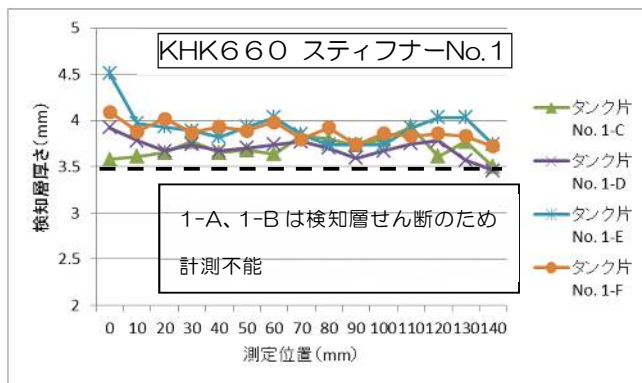


図3. 7. 7 スティフナーNo.1 検知層厚さ

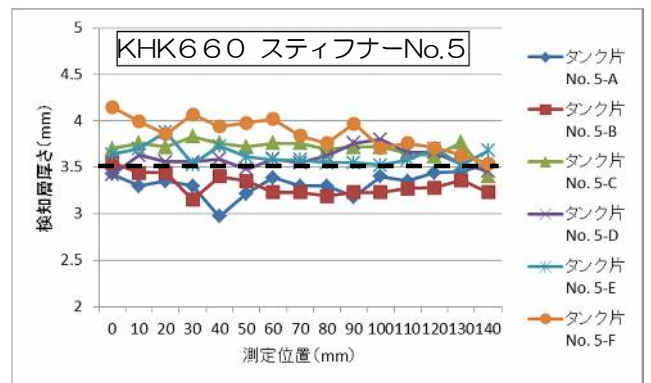


図3. 7. 8 スティフナーNo.5 検知層厚さ

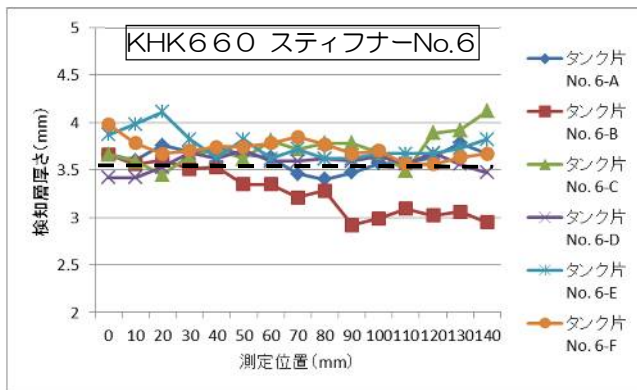


図3. 7. 9 スティフナーNo. 6 検知層厚さ

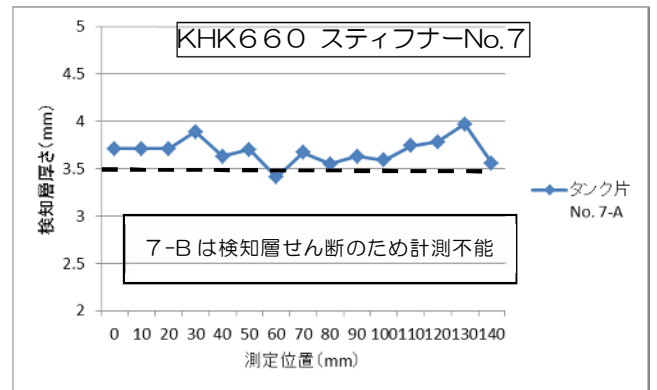


図3. 7. 10 スティフナーNo. 7 検知層厚さ

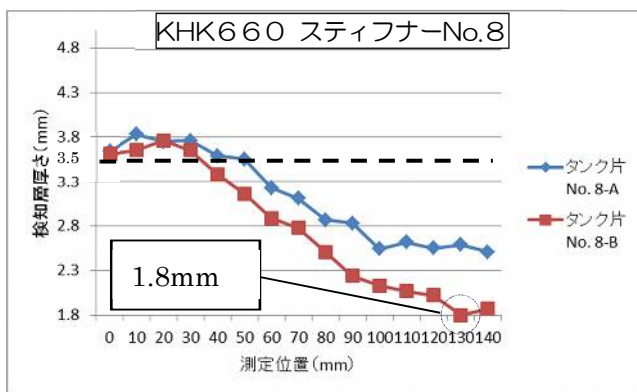


図3. 7. 11 スティフナーNo. 8 検知層厚さ

エ 各測定結果について

神奈川破損タンクの検知層厚さを測定したところ、連通孔の位置であるAまたはBの位置で採取した試験片の厚さが3.5mm未満である傾向であった。

(2) 検知層の破損状況に関する分析

ア 実施内容

検知層の破損が認められなかった試験片 (KHK 6 6 0 左側) を一定サイズに切断加工したものに、それぞれ圧縮、せん断及び引張方向に力をかけて破壊させた試料 (図3. 7. 12 参照) を作成し、検知層が破損して、内殻と外殻が剥離した試験片 (KHK 6 6 0 7-B) との比較を行った。

イ 実施結果

KHK 6 6 0 7-Bの「き裂」(後節の非破壊検査において確認される「き裂」) 周辺における検知層の状況を確認すると、圧縮方向に力をかけて壊した試料が最も近い状況と考えられる。

なお、き裂から離れた検知層の破損状況はせん断方向に破壊した試料が最も近い状況と考えられる。(図3. 7. 13から図3. 7. 16 参照)

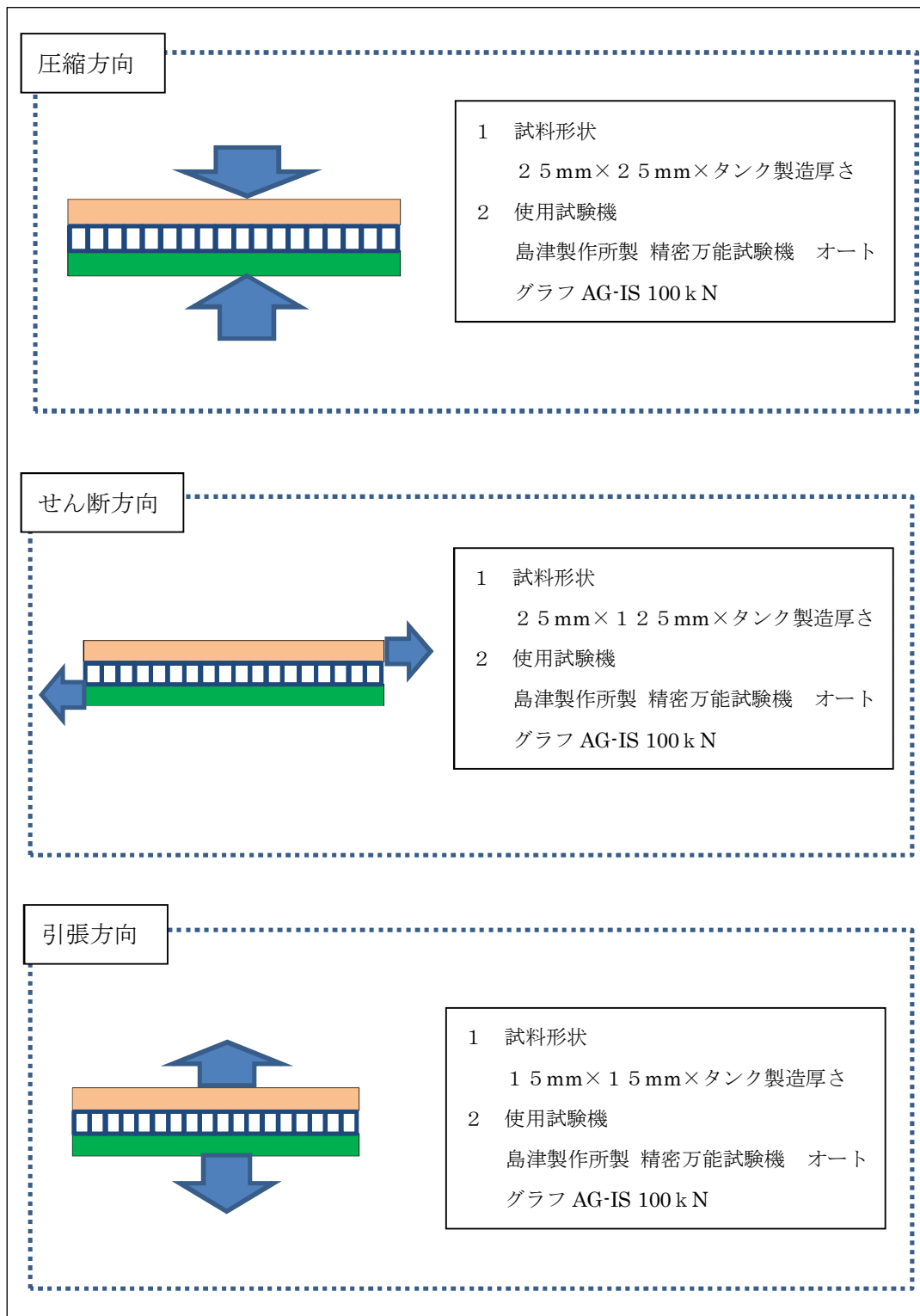


図 3. 7. 1 2 検知層の破壊方向概要図

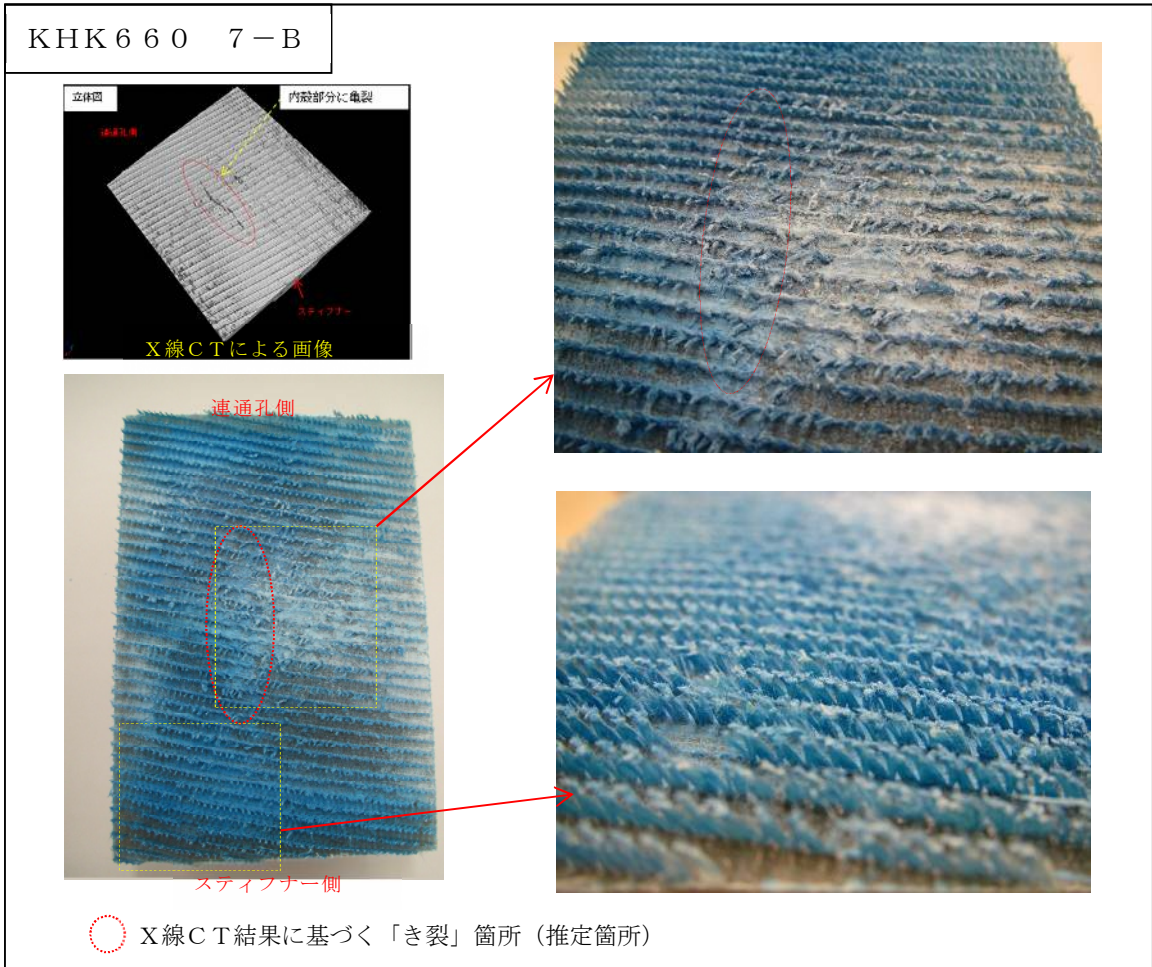


図3. 7. 13 KHK660 7-B試験片 検知層破損状況

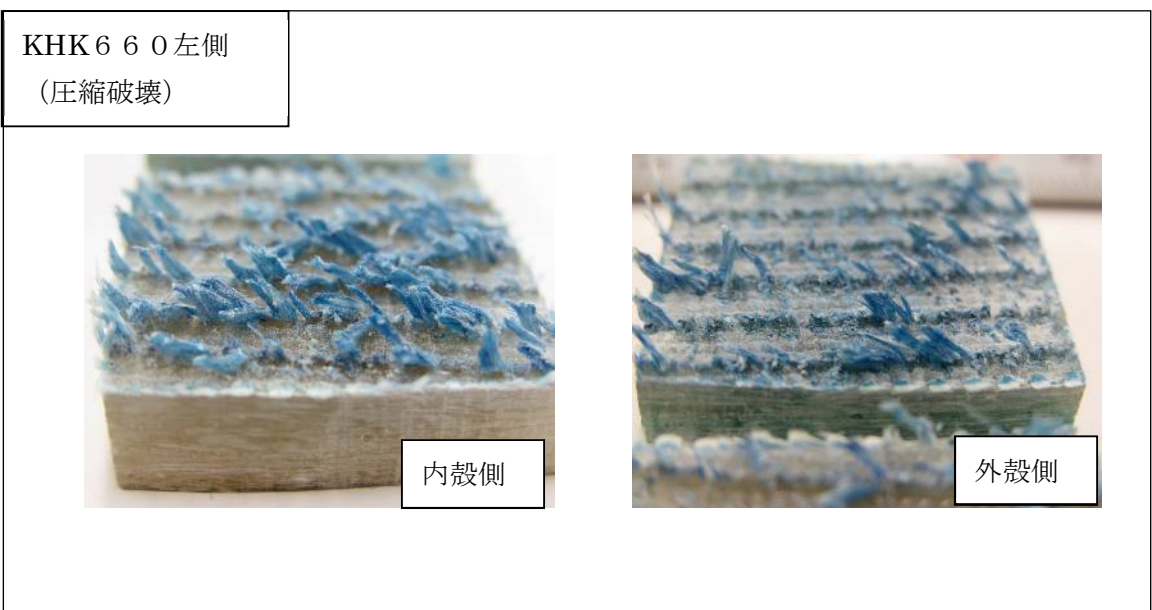


図3. 7. 14 圧縮試験後試料（KHK660左側）状況

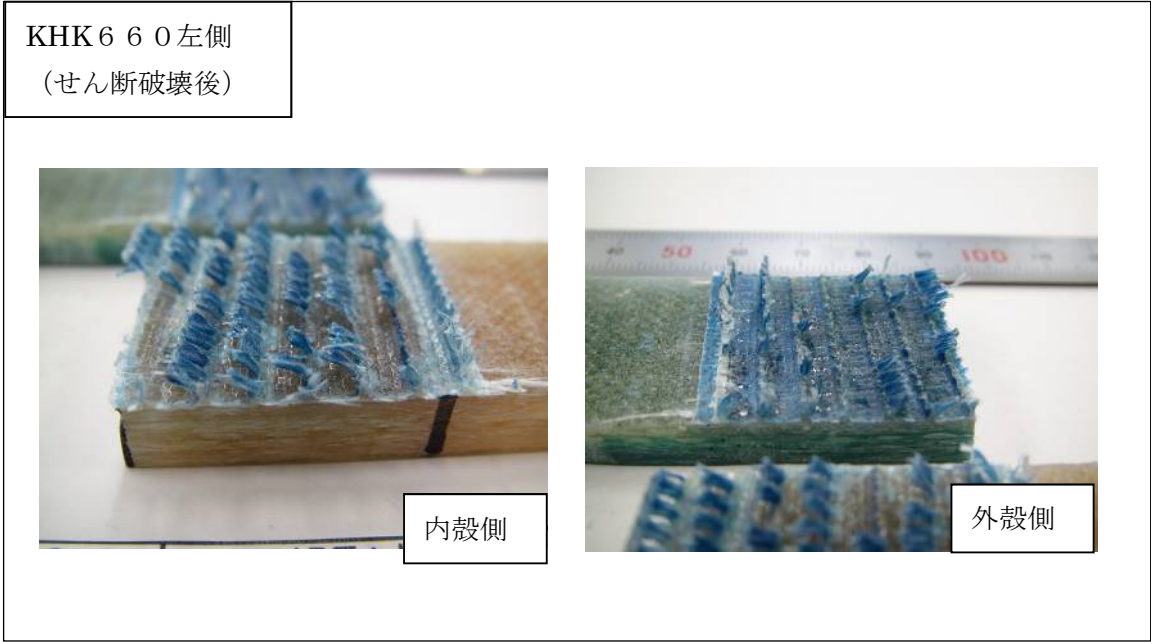


図3.7.15 せん断試験後試料 (KHK660左側) 状況



図3.7.16 引張破壊後試料 (KHK660左側) 状況

3. 8 材料試験による分析

タンク材料の強さ等を確認することを目的として以下の材料試験を実施した。

(1) 曲げ試験について

ア 実施内容

試験片を長辺が軸方向及び周方向に切り出し、タンクメーカーが J I S K 7 0 1 7（繊維強化プラスチック曲げ特性の求め方）を参考に実施している曲げ試験を実施した。試験条件を表 3. 8. 1 に示す。

なお、試験片の曲げ強さ及び曲げ弾性率の算定は荷重－変位曲線上における荷重最大値を用いている。

表 3. 8. 1 曲げ試験に関する条件

項 目	条 件
試験片切出方向	周方向、軸方向
試験片形状	幅 20mm、長さ 200mm、厚さ約 17mm
試験片前処理	検知層に両端から 60mm の位置までエポキシ樹脂を充填し硬化
使用試験機	(株)島津製作所製 精密万能試験機オートグラフ AG-IS 100kN
試験器容量	ロードセル式 10kN
試験速度	5mm/min
支点間距離	140mm

イ 実施結果（参考資料 6 参照）

測定結果（平均値）と型式申請時の設計値を表 3. 8. 2 及び表 3. 8. 3 に示す。

測定値から求めた曲げ強さ及び曲げ弾性率を型式申請時の設計値と比較すると、型式申請時の設計値を上回る部分は曲げ強さでは KHK 6 5 8 右側周方向と KHK 6 5 9 右側周方向の 2 部位、曲げ弾性率では KHK 6 5 9 底部軸方向のみで、その他の部位においては測定値から求めた値は設計値を下回っていた。

測定値から求めた平均値の最も低い値は「曲げ強さ」のうち、周方向で 8 0.6 MPa（6 9.7～9 2.8 MPa）、軸方向で 5 9.0 MPa（5 2.2～7 0.7 MPa）であり、「曲げ弾性率」の周方向で 2.9 6 GPa（2.5 5～3.4 5 GPa）、軸方向で 4.6 6 GPa（4.3 8～5.2 0 GPa）であった。

測定値から求めた値（平均値）は設計値に対し、「曲げ強さ」は周方向で 6 8.3 %、軸方向で 8 3.1 % であり、「曲げ弾性率」においては、周方向で 3 2.9 %、軸方向で 7 7.7 % であった。

表 3. 8. 2 曲げ試験結果

測定対象	試験片 切出方向	曲げ強さ※ (単位 MPa)	曲げ弾性率※ (単位 GPa)	荷重-変位線図
KHK 6 5 8 底部	周方向	1 0 2	4.1 3	
	軸方向	5 9.0	5.6 1	図 3. 8. 1
KHK 6 5 8 右側	周方向	1 3 2	6.2 5	図 3. 8. 4
	軸方向	6 8.8	5.5 5	
KHK 6 5 9 底部	周方向	8 0.6	2.9 6	図 3. 8. 3
	軸方向	6 3.1	6.3 0	図 3. 8. 6
KHK 6 5 9 右側	周方向	1 2 5	6.0 5	
	軸方向	6 5.0	5.7 8	
KHK 6 6 0 底部	周方向	1 0 0	4.0 9	
	軸方向	6 9.9	5.2 9	図 3. 8. 2
KHK 6 6 0 右側	周方向	9 3.5	5.1 0	
	軸方向	6 6.3	4.6 6	図 3. 8. 5

※ 値については 10 回試験を行った結果の平均値

 : 周方向、軸方向における曲げ強さ、曲げ弾性率の最小値を示す。

 : 周方向、軸方向における曲げ強さ、曲げ弾性率の最大値を示す。

表 3. 8. 3 設計値との比較

項目	試験片 切出方向	設計値	表 3. 8. 2 の 最小値	保持率 ※
曲げ強さ	周方向	1 1 8 MPa	8 0.6 MPa	6 8.3 %
	軸方向	7 1.0 MPa	5 9.0 MPa	8 3.1 %
曲げ弾性率	周方向	9.0 0 GPa	2.9 6 GPa	3 2.9 %
	軸方向	6.0 0 GPa	4.6 6 GPa	7 7.7 %

※ 表 3. 8. 2 の最小値を設計値で除したものの。

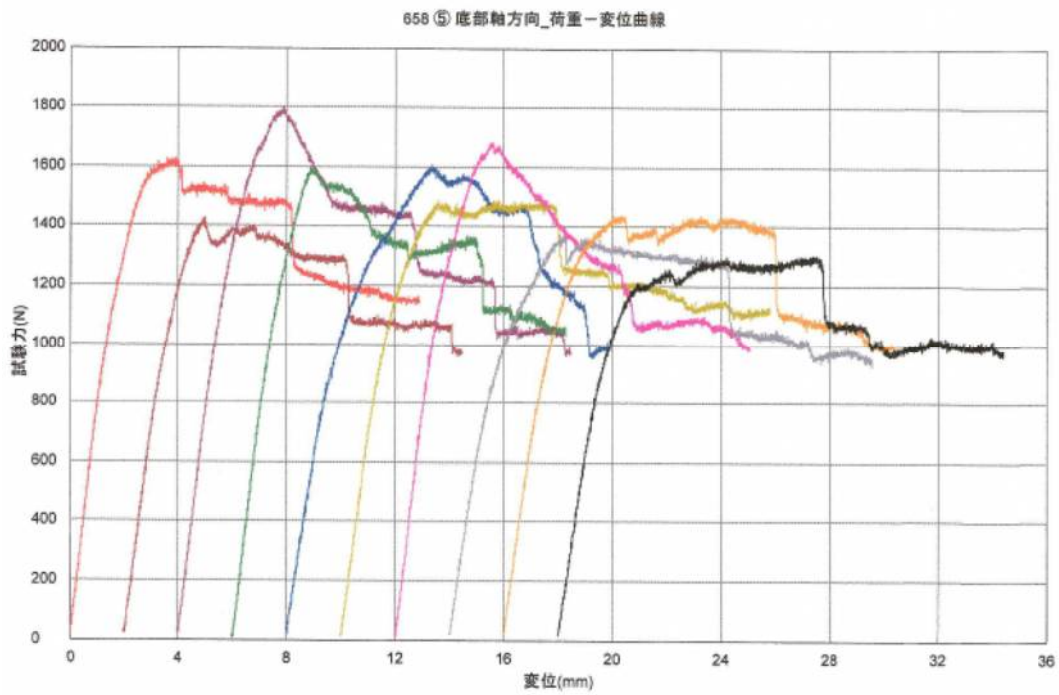


図 3. 8. 1 KHK 6 5 8 底部・軸方向 荷重－変位線図

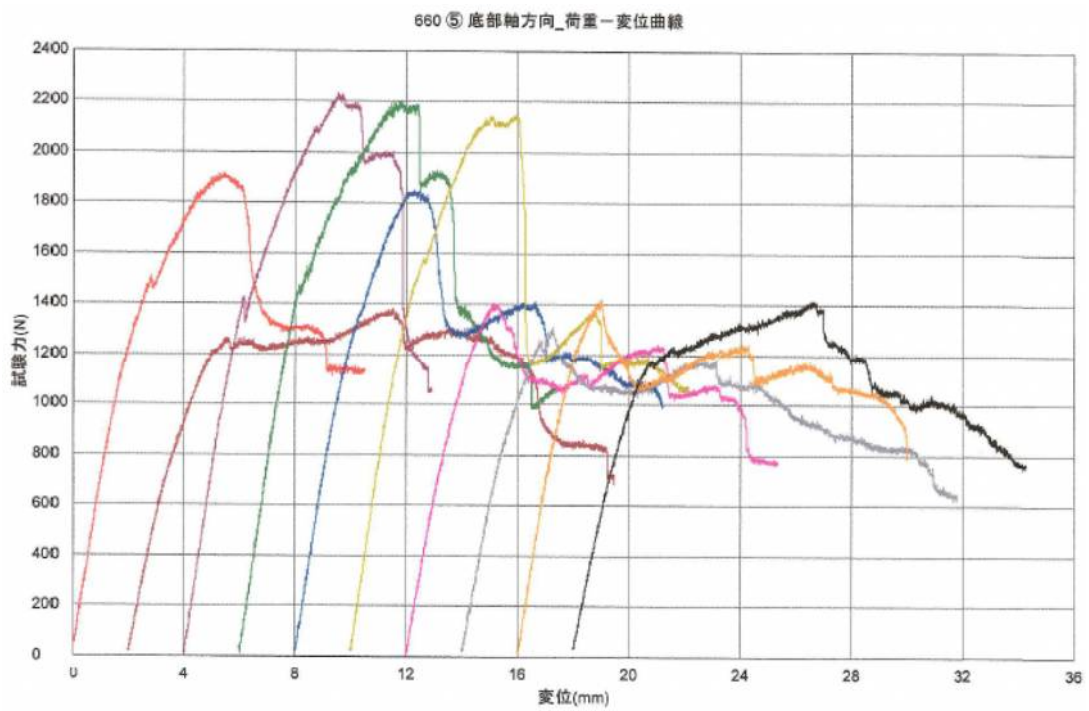


図 3. 8. 2 KHK 6 6 0 底部・軸方向 荷重－変位線図

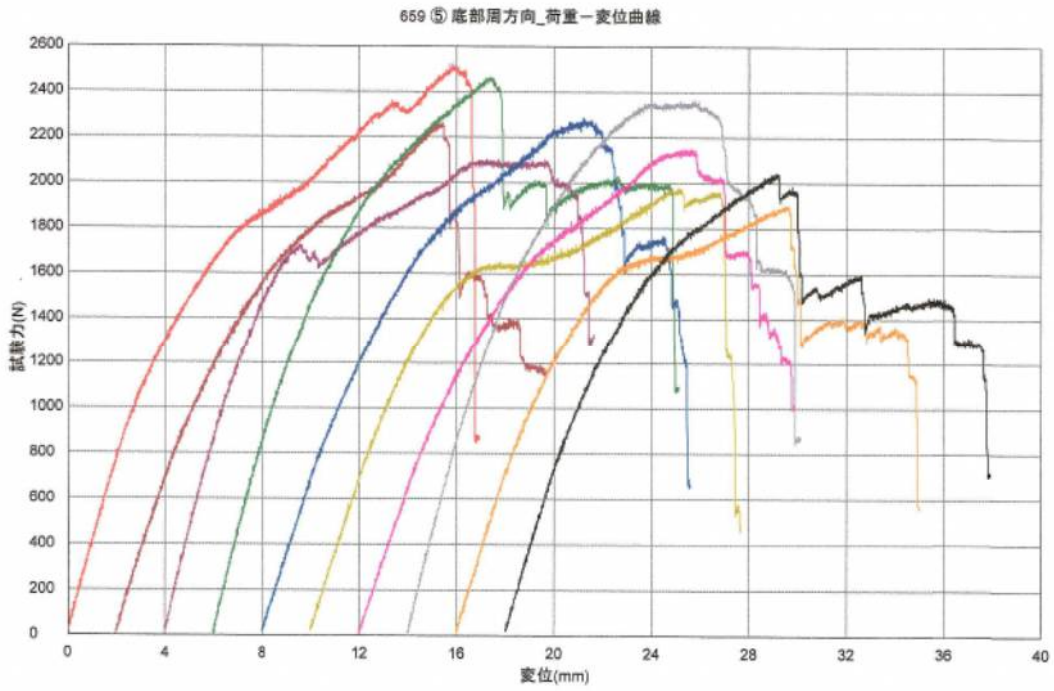


図3. 8. 3 KHK 6 5 9底部・周方向 荷重-変位線図

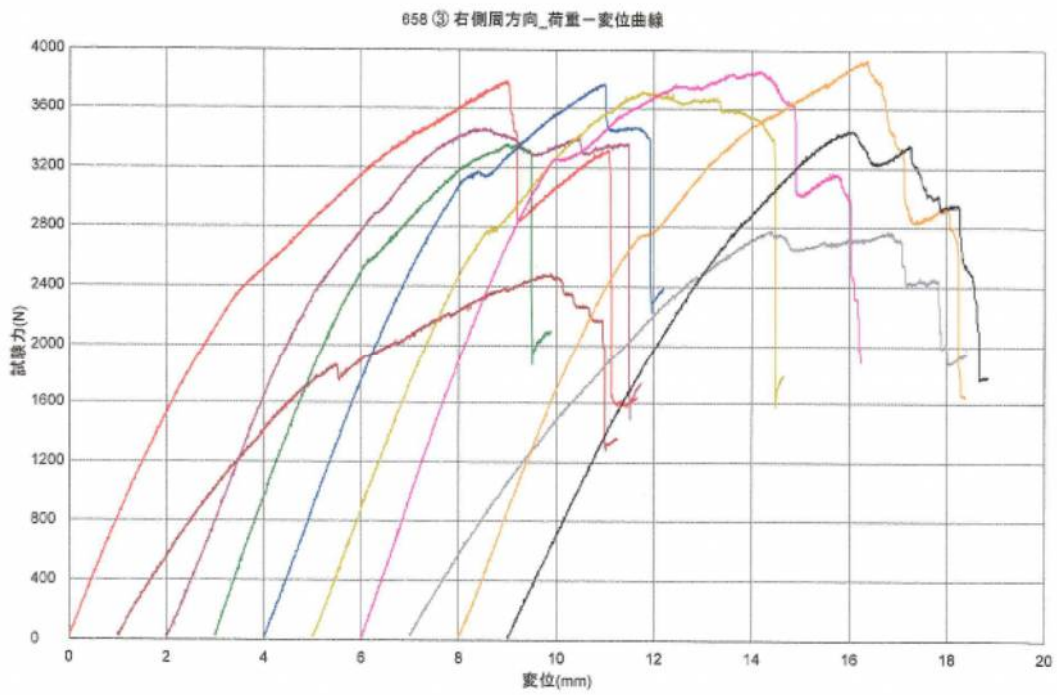


図3. 8. 4 KHK 6 5 8右側・周方向 荷重-変位線図

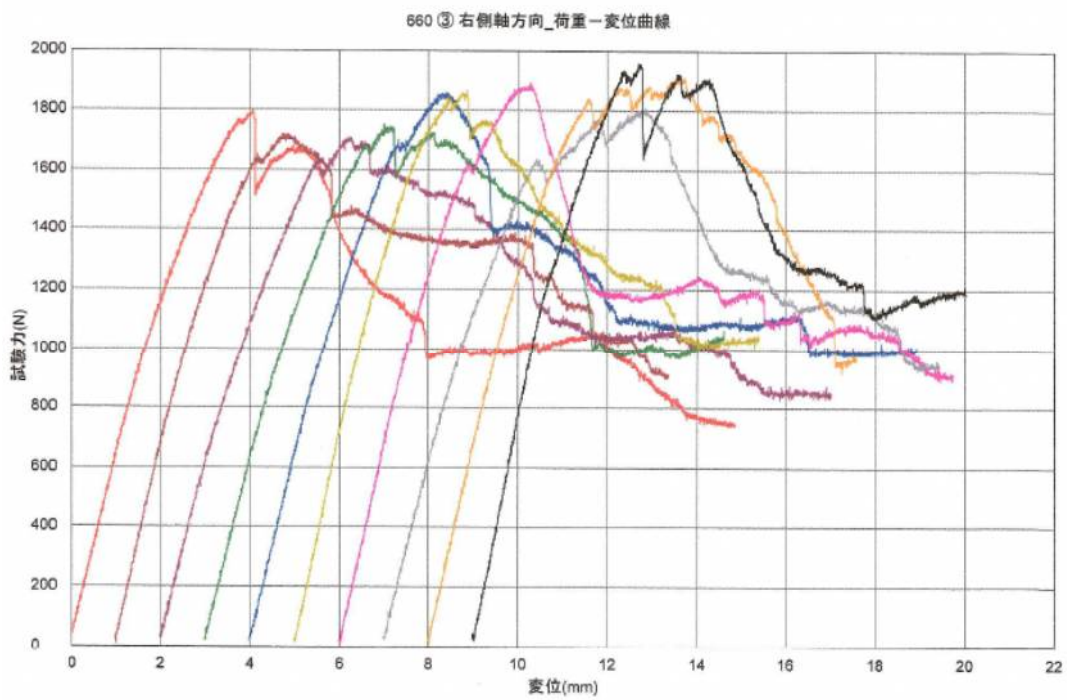


図 3. 8. 5 KHK 6 6 0 右側・軸方向 荷重-変位線図

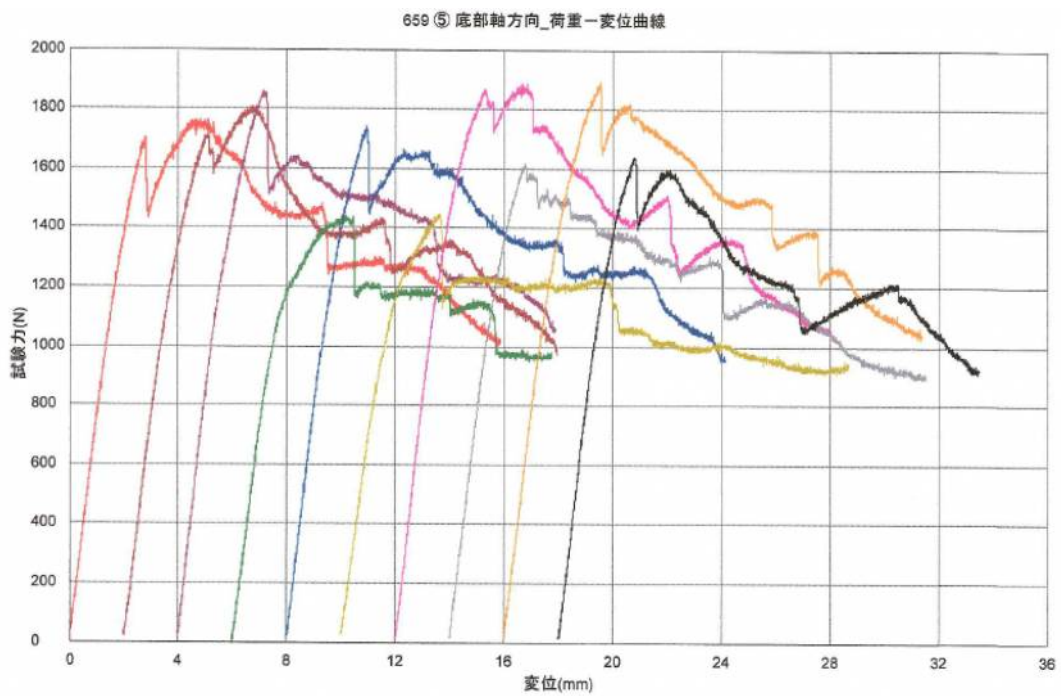


図 3. 8. 6 KHK 6 5 9 底部・軸方向 荷重-変位線図

ウ 荷重－変位線図において確認された状況について

曲げ試験によって得られた荷重－変位線図を詳細に確認すると、以下に示す状況が確認された。

(ア) 荷重の落ち込み

荷重－変位線図の荷重変位曲線が荷重最大値に達する前において、荷重の落ち込みが確認された。(図3. 8. 7参照)

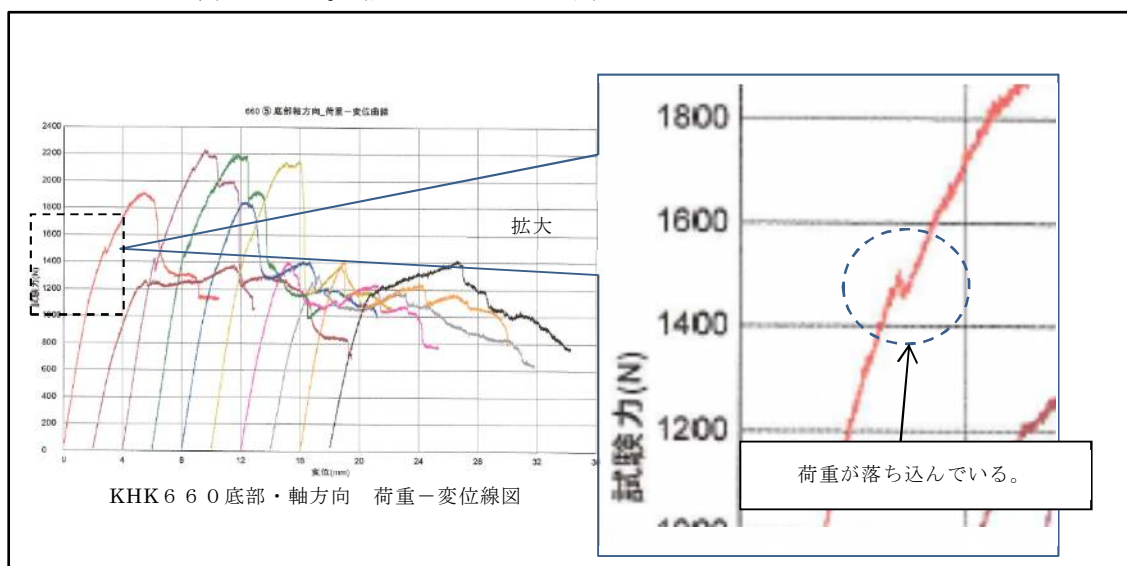


図3. 8. 7 荷重の落ち込み状況

(イ) 傾きの変化

荷重－変位線図の荷重変位曲線が荷重最大値に達する前において、傾きが変化する状況が確認された。(図3. 8. 8参照)

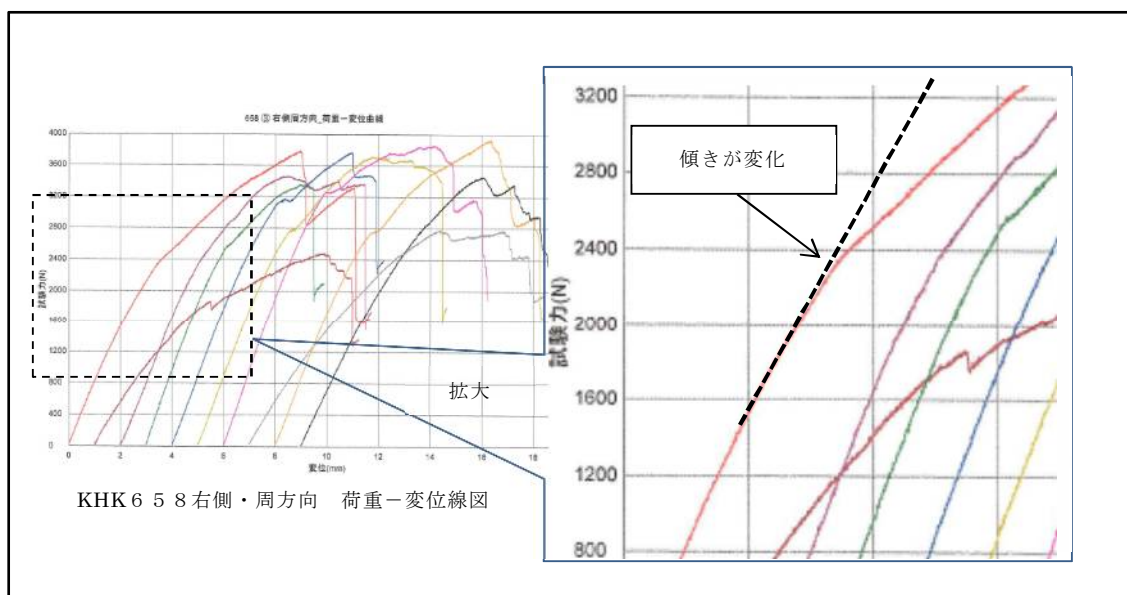


図3. 8. 8 傾き変化状況

(ウ) ばらつき

各部位において複数回の曲げ試験を実施しているが、荷重最大値や荷重変位曲線の傾きにばらつきがあることが確認された。(図3. 8. 9参照)

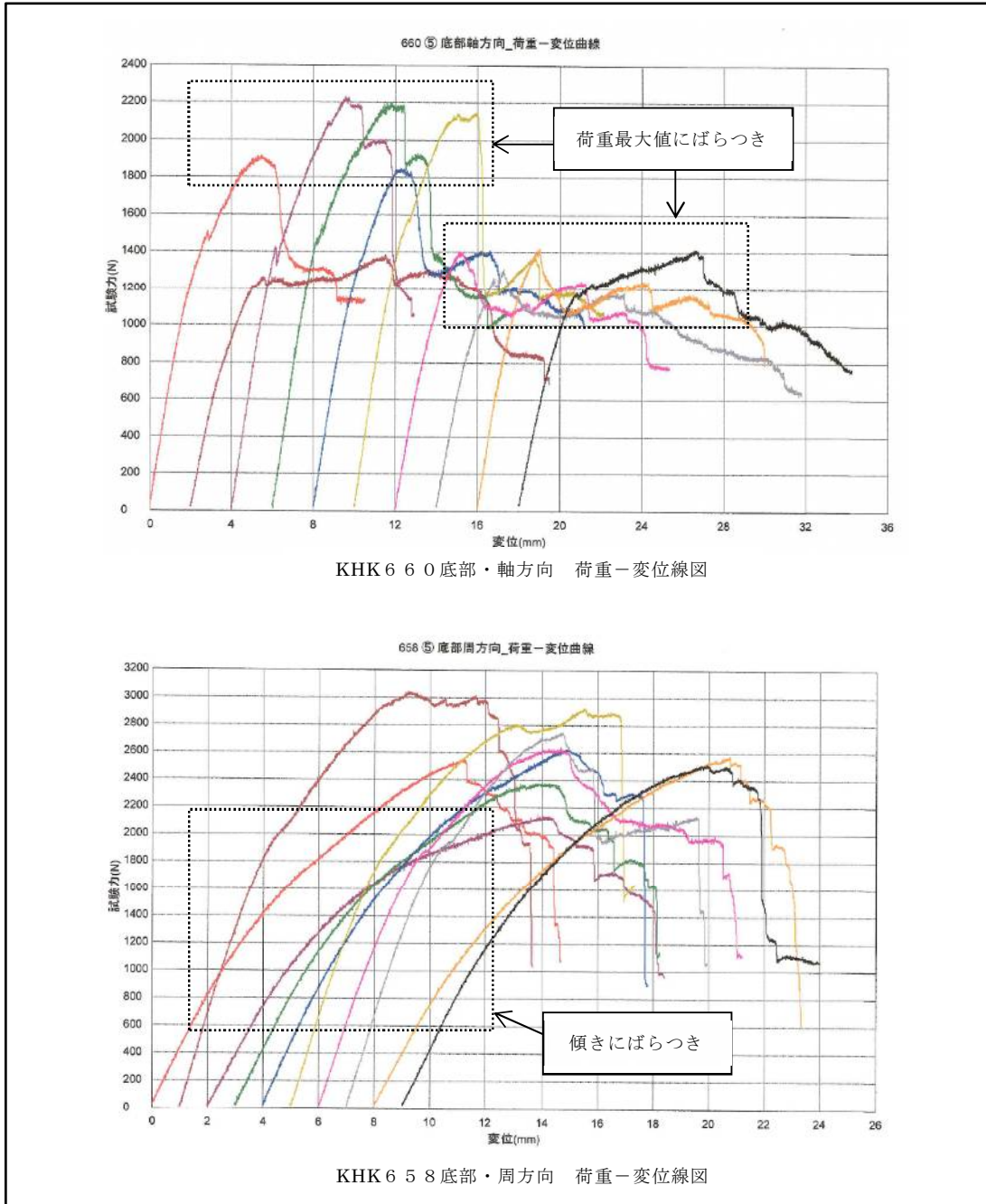


図3. 8. 9 ばらつき状況

(2) バーコル硬さ及びガラス含有率について

ア 実施内容

バーコル硬さを J I S K 7 0 6 0 (ガラス繊維強化プラスチックのバーコル硬さ試験方法)、ガラス含有率を J I S K 7 0 5 2 (ガラス長繊維強化プラスチック—プリプレグ、成型材料及び成型品—ガラス長繊維及び無機充てん剤含有率の求め方—焼成法) に基づき、試験を実施した。

イ 実施結果

バーコル硬さの測定結果を表 3. 8. 4、ガラス含有率の測定結果を表 3. 8. 5 に示す。

バーコル硬さ及びガラス含有率の結果は型式申請時の値をすべて下回っていた。

表 3. 8. 4 バーコル硬さの測定結果

測定対象	バーコル硬さ (HBI-A) ※
KHK 6 5 8	5 4.0
KHK 6 5 9	5 2.0
KHK 6 6 0	5 3.0
型式申請時	5 4.4

※ 値については 1 0 回試験を行った結果の平均値

表 3. 8. 5 ガラス含有率の測定結果

測定対象	ガラス含有率 (重量%) ※
KHK 6 5 8	4 6.8 0
KHK 6 5 9	4 7.8 0
KHK 6 6 0	4 8.7 0
型式申請時	5 2.2 4

※ 値については 5 回試験を行った結果の平均値

(3) 検知層の強度について

ア 実施内容

神奈川県破損タンクから採取された試験片(スティフナーなし KHK660左側)及び現行品の試験片について、圧縮及び引張せん断に対する強度の確認を行った。

(図3.8.10参照)

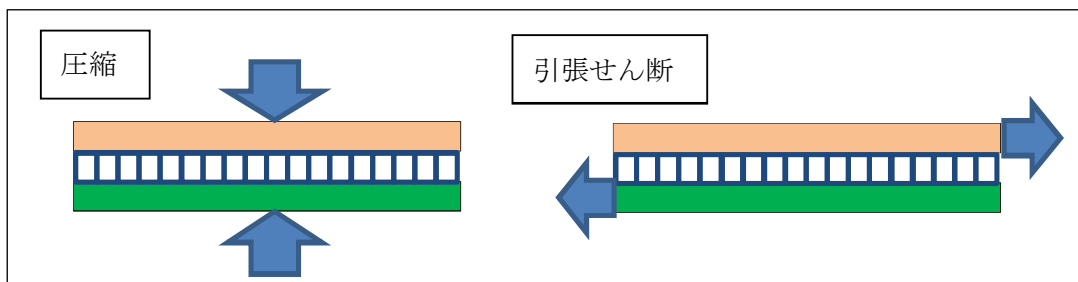


図3.8.10 圧縮試験及び引張せん断試験のイメージ図

イ 試験条件等

(ア) 圧縮試験

圧縮試験の条件等を表3.8.6、試験状況を写真3.8.1に示す。

表3.8.6 圧縮試験の条件等

試験規格	JIS K 7181:2011「プラスチック-圧縮特性の求め方」に準じる。
試験片形状	25mm×25mm×タンク片製造厚さ (15.29~17.23mm)
試験速度	1mm/min
使用試験機	(株)島津製作所製 精密万能試験機 オートグラフ AG-IS 100 k N
試験機容量	ロードセル式 10 k N

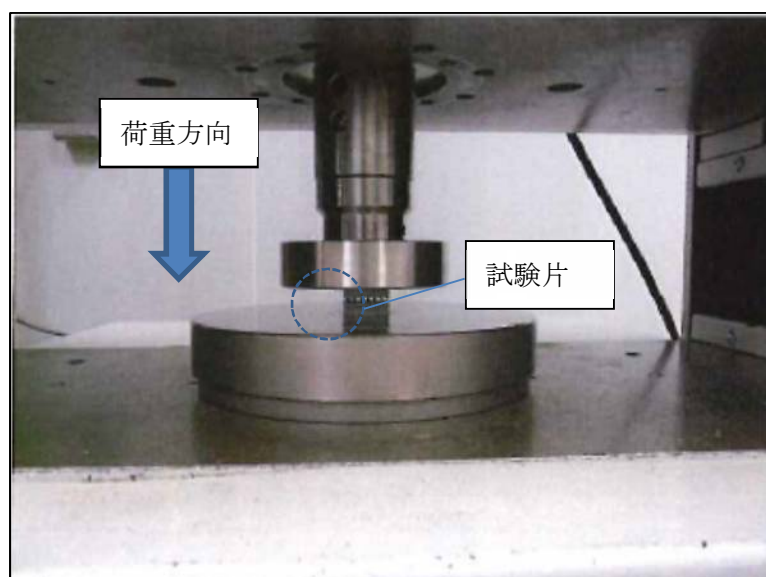


写真3.8.1 圧縮試験状況

(イ) 引張せん断試験

引張せん断試験の条件等を表3.8.7、試験状況を写真3.8.2に示す。

表3.8.7 引張せん断試験の条件等

試験規格	JIS K 6850:1999「接着剤-剛性被着剤の引張せん断接着剤強さ試験方法」に準じる。
試験片形状	25mm×125mm×タンク片製造厚さ（約17mm） （検知層面積は25mm×25mm、長辺は周方向に切り出し）
試験速度	1mm/min
使用試験機	(株)島津製作所製 精密万能試験機 オートグラフ AG-IS 100 k N
試験機容量	ロードセル式 10 k N

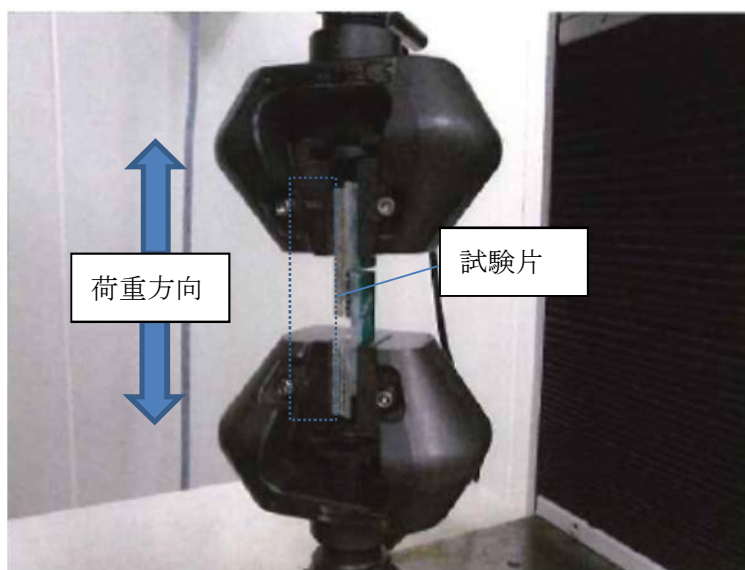


写真3.8.2 引張せん断試験状況

ウ 各試験結果

(7) 圧縮試験

圧縮試験の結果を表3.8.8、荷重-変位線図を図3.8.11及び図3.8.12に示す。

KHK 660については荷重最大値にばらつきが確認された。

表 3. 8. 8 圧縮試験結果

タンク片種別	試験結果 (単位: MPa)		平均値 (単位: MPa)
KHK 6 6 0 左側	n 1	2. 3 0	3. 6 3
	n 2	2. 8 8	
	n 3	4. 3 0	
	n 4	4. 1 3	
	n 5	4. 5 4	
現行品	n 1	5. 0 1	4. 9 3
	n 2	4. 9 1	
	n 3	4. 8 8	
	n 4	4. 6 4	
	n 5	5. 2 3	

※ 試験結果の応力値は検知層破損点を採用

(参考) FRP層の材料試験 (型式申請データ・曲げ試験) は周方向 1 1 8 MPa、
軸方向 7 1 MPa

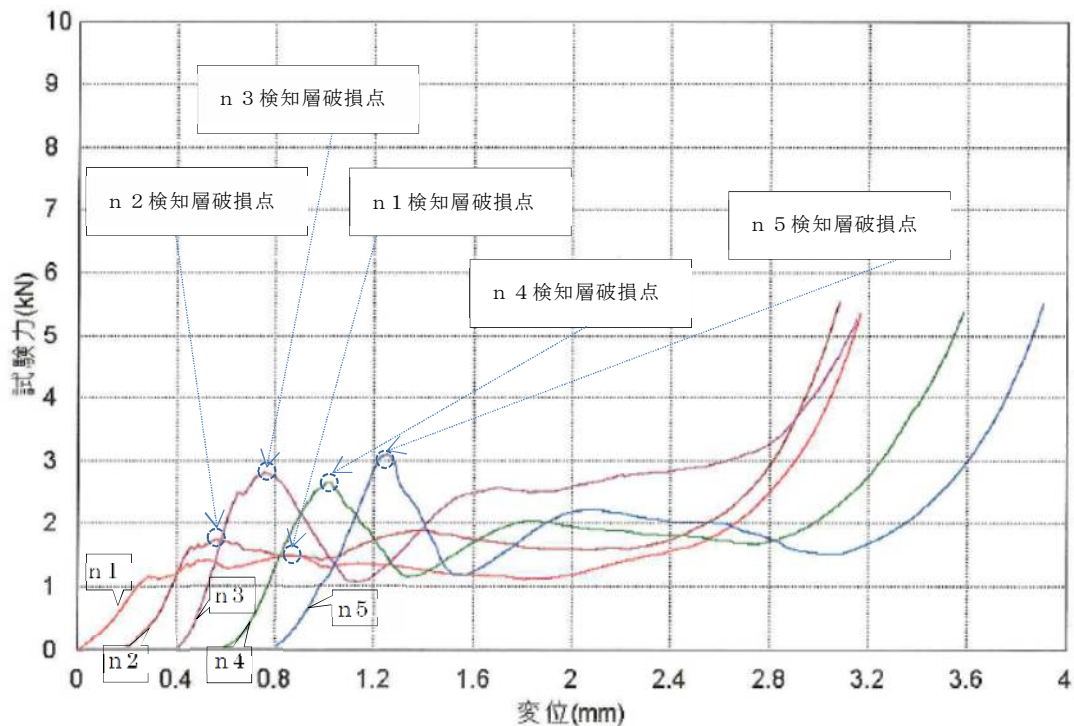


図 3. 8. 1 1 圧縮試験荷重－変位線図 (KHK 6 6 0 左側)

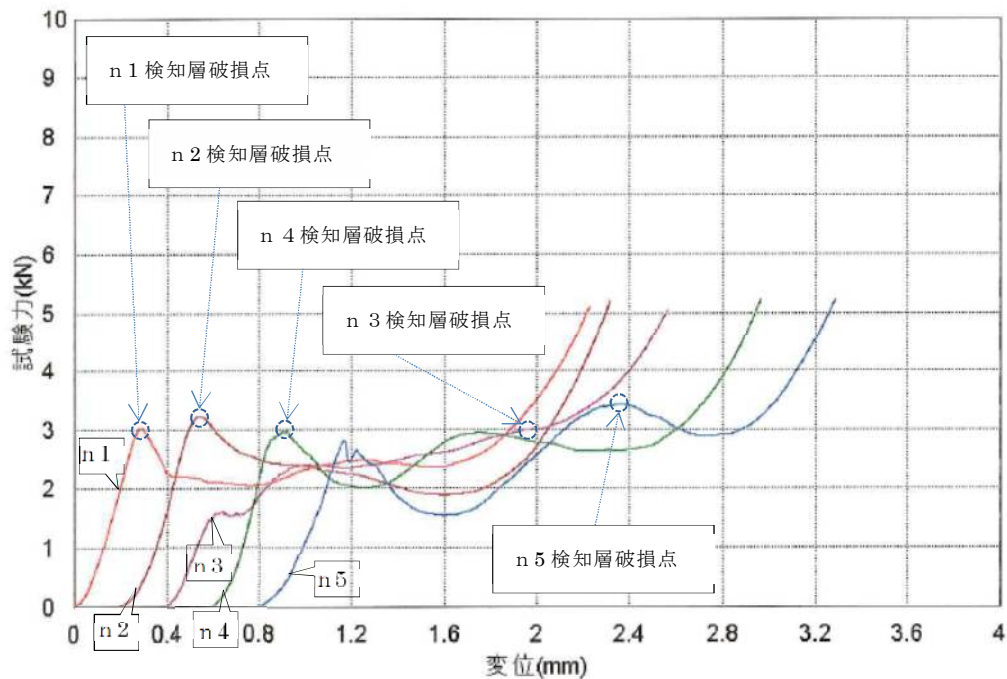


図 3. 8. 12 圧縮試験荷重－変位線図（現行品）

(イ) 引張せん断試験

引張せん断試験の結果を表 3. 8. 9、試験結果に関連する荷重－変位線図を図 3. 8. 13 及び図 3. 8. 14 に示す。

KHK 6 6 0 及び現行品の最大荷重値にばらつきが確認された。

表 3. 8. 9 引張せん断試験

試験片種別	試験結果 (単位: MPa)		平均値 (単位: MPa)
KHK 6 6 0 左側	n 1	0.93	1.02
	n 2	1.20	
	n 3	0.96	
	n 4	1.15	
	n 5	0.87	
現行品	n 1	1.10	1.18
	n 2	1.06	
	n 3	0.98	
	n 4	1.42	
	n 5	1.37	

※ 試験結果の応力値は検知層破損点の値から算出

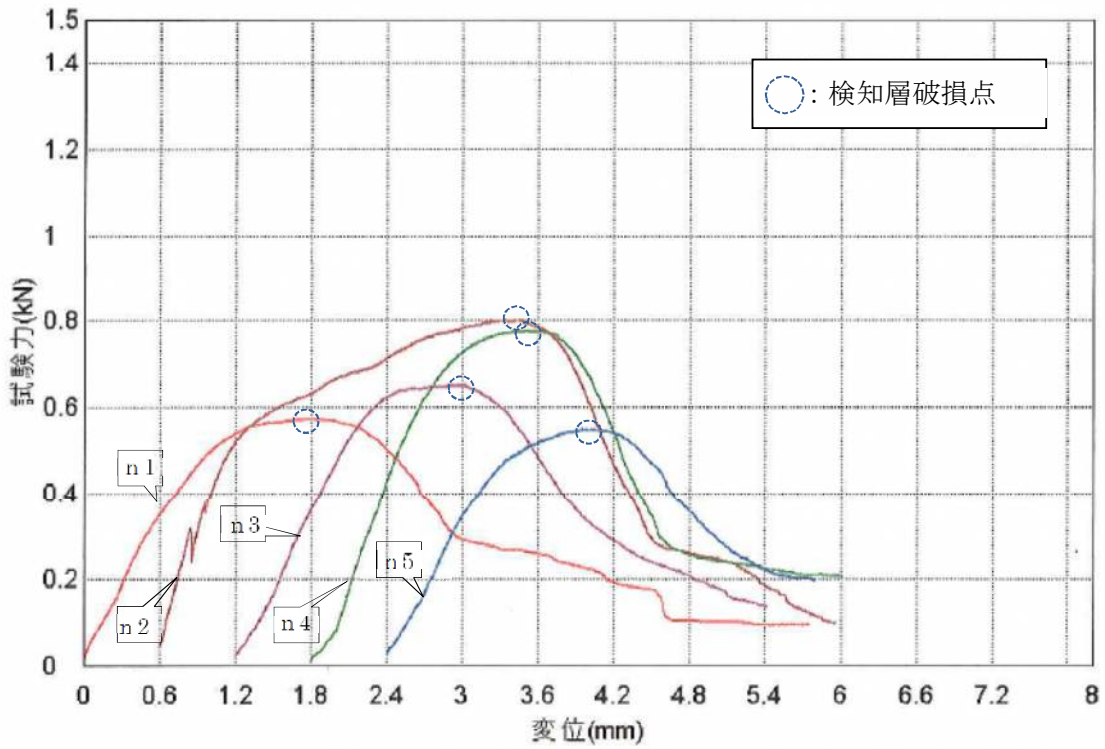


図3. 8. 13 引張せん断試験荷重－変位線図（KHK660左側）

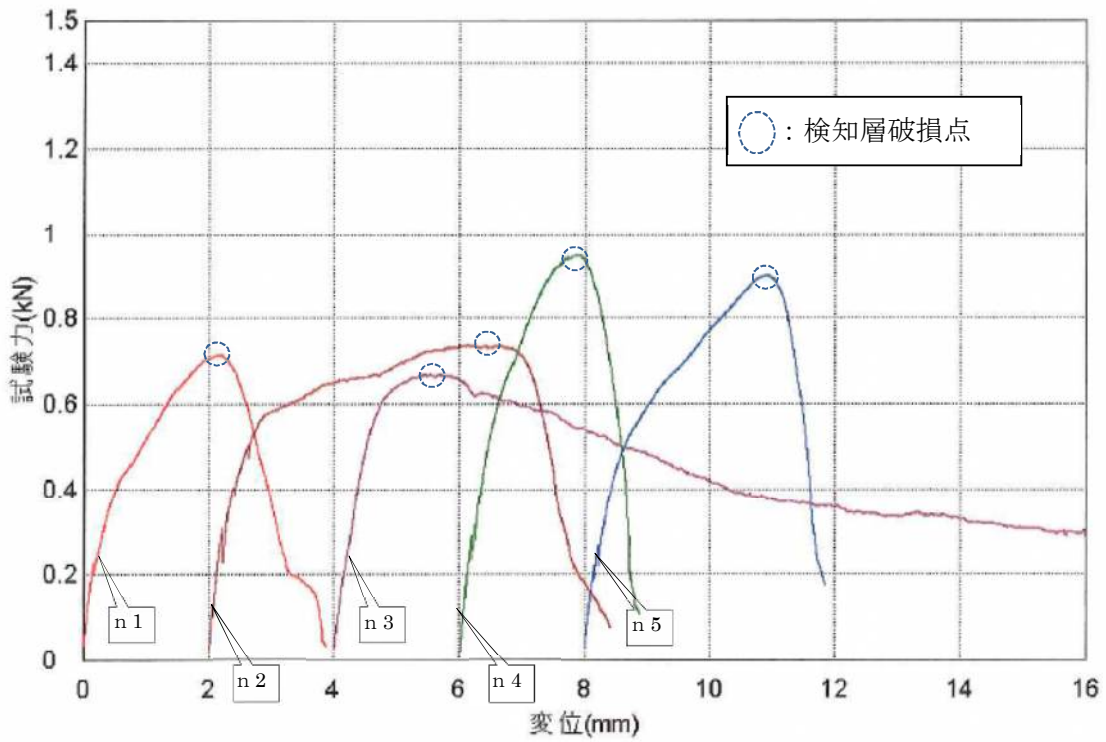


図3. 8. 14 引張せん断試験荷重－変位線図（現行品）

3. 9 非破壊検査による分析

神奈川県破損タンクから採取された試験片を非破壊検査（X線CT）により、破損状況を確認した。

(1) 実施内容

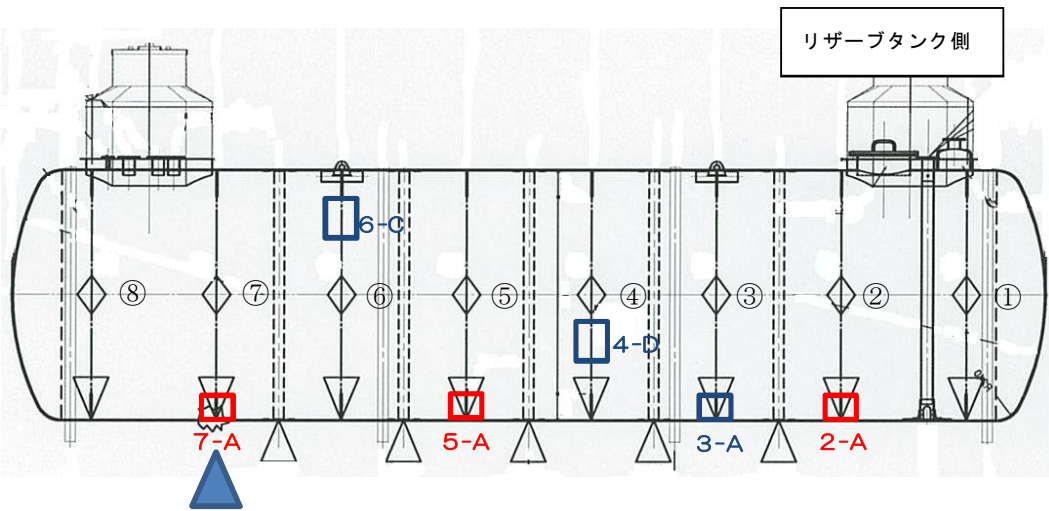
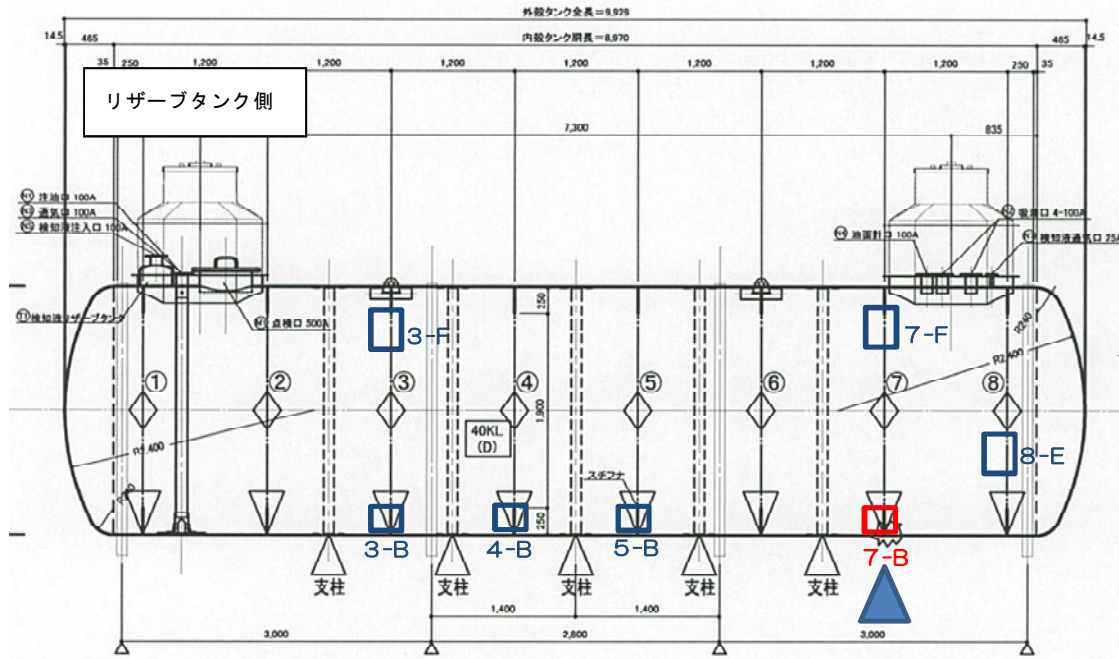
神奈川県破損タンクから採取したスティフナー付きの試験片について、X線CTにより破損状況を確認する。また、参考として新潟県で破損したFF二重殻タンクから採取した試験片のX線CT結果と比較する。

(2) 実施対象及び確認結果概要




X線CTの対象として、漏えいが確認された連通孔付近の試験片を中心に、検知層の破損等が認められたもの及び外観からの異常が認められないものについても各タンクから1片を対象とした。

対象試験片数及び対象とした試験片のうち、き裂が確認されたスティフナー位置を図3. 9. 1から図3. 9. 3に示す。

KHK658



凡例

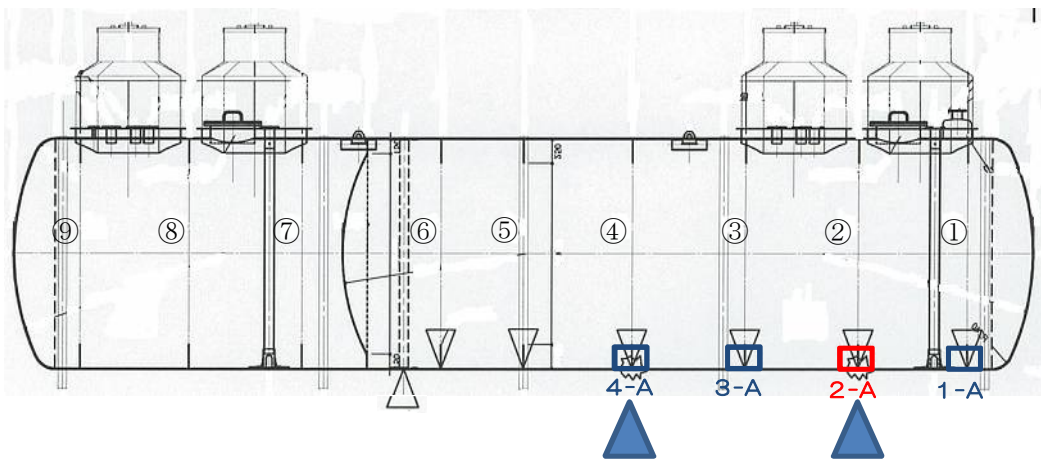
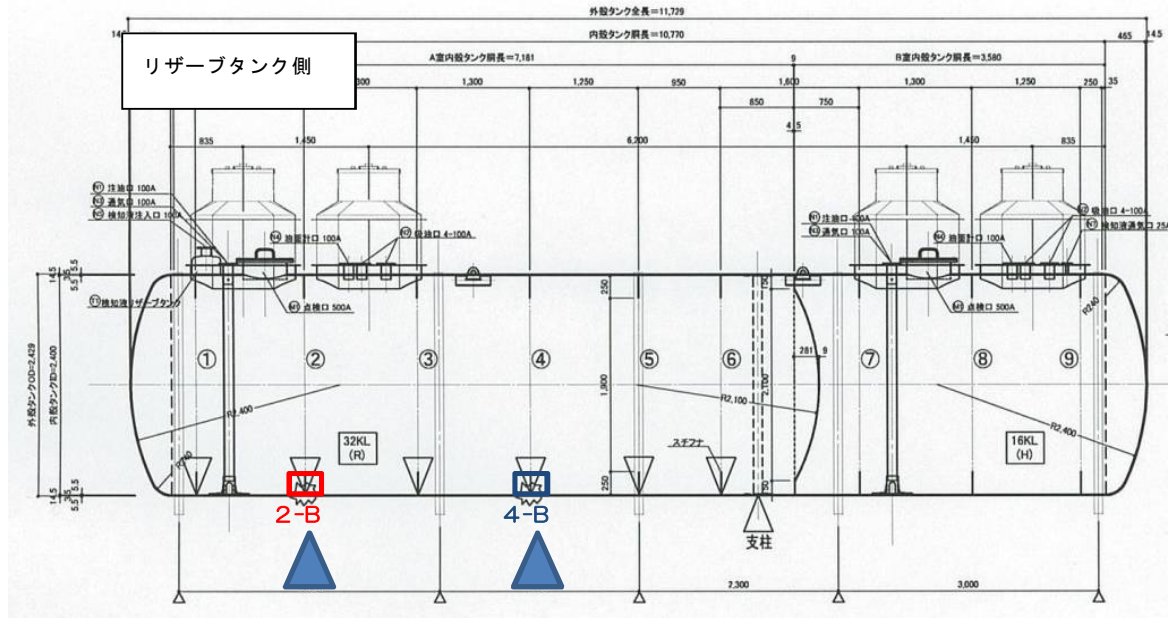
-  漏えいが確認された連通孔位置
-  き裂が確認された試験片
-  き裂が確認されない試験片

結果概要

対象試験片数	13
き裂が確認された試験片	4

図 3. 9. 1 KHK658 X線CT結果概要

KHK659



凡例

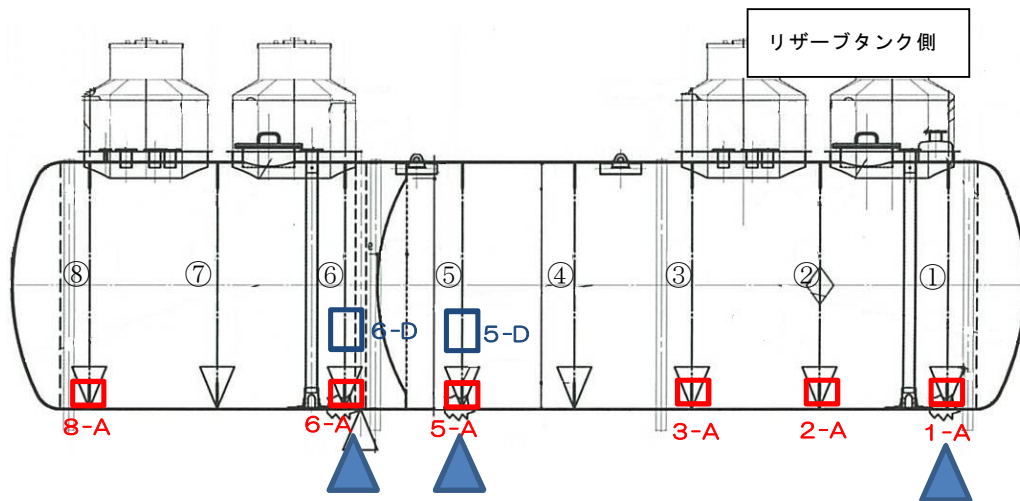
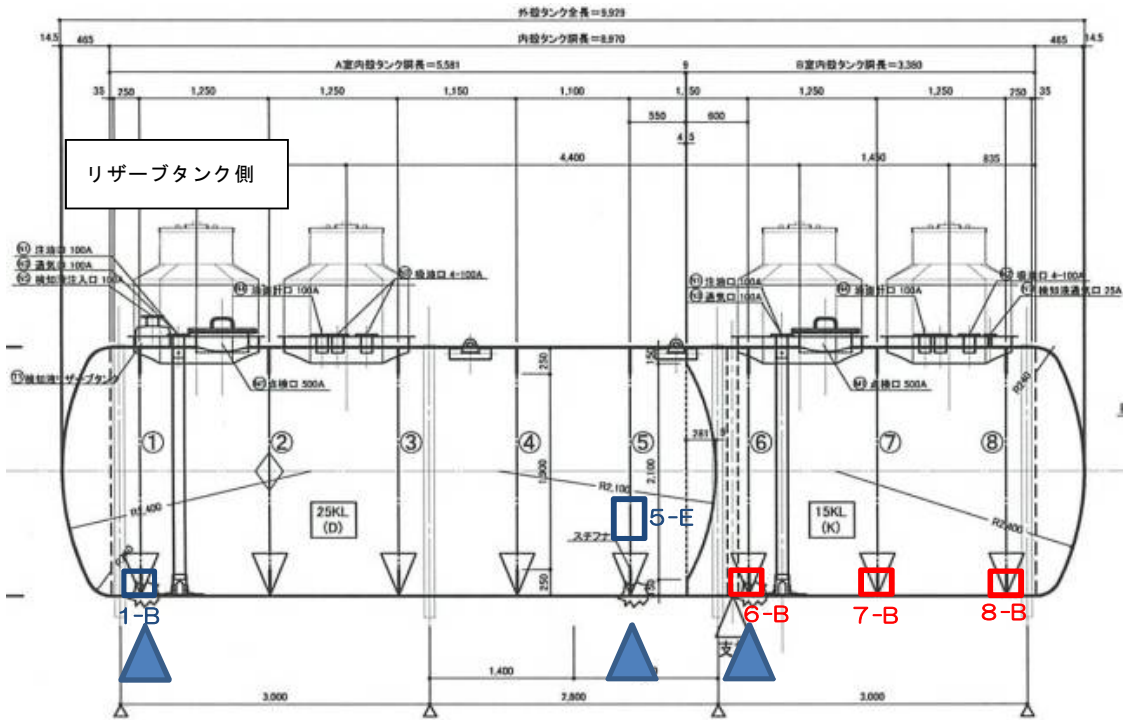
	漏えい確認された連通孔位置
	き裂が確認された試験片
	き裂が確認されない試験片

結果概要




対象試験片数	6
き裂が確認された箇所 ※	2

図 3. 9. 2 KHK659 X線CT結果概要

KHK660



凡例

-  漏えいが確認された連通孔位置
-  き裂が確認された試験片
-  き裂が確認されない試験片

結果概要

対象試験片数	13
き裂が確認された箇所 ※	9

図 3. 9. 3 KHK660 X線CT結果概要

(3) 使用機器等

使用機器及び測定条件について、表 3. 9. 1 に示す。

表 3. 9. 1 X 線 CT 測定機器及び条件等

項目	条件等
使用機器	マイクロフォーカス X 線 CT システム (島津製作所製 inspeXio SMX-2 2 5 CT FPD)
X 線管出力	2 1 0 kV - 1 6 0 μ A
検出器	8 インチ FPD
スライス厚	0.2 3 7 mm
スライスピッチ	0.2 3 7 mm

(4) 実施結果

確認された破損状況は以下のとおり。

ア 内殻の「き裂」について (図 3. 9. 4 から図 3. 9. 6 参照)

(ア) き裂が確認された試験片は、いずれも連通孔付近 (A または B の位置) から採取したものであった。また、漏えいが確認された連通孔付近以外から採取した試験片においても、き裂が認められた。

(イ) き裂の位置を詳細に確認すると、いずれも連通孔近傍におけるスティフナー下部の位置で内殻検知層側に発生していた。

(ウ) き裂の方向を確認すると周方向に発生していた。

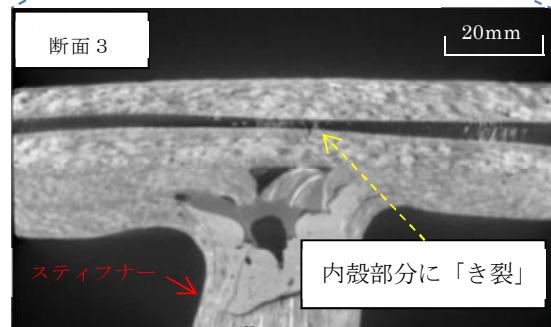
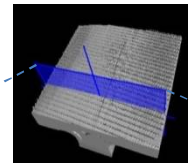
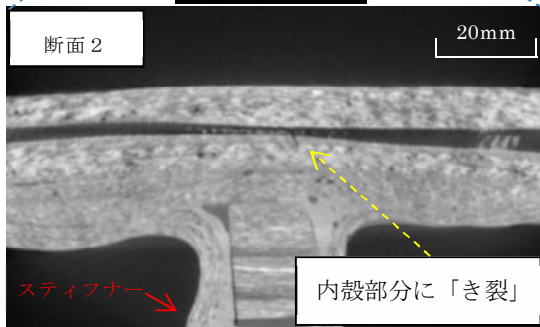
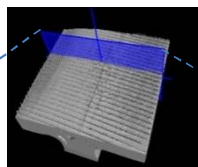
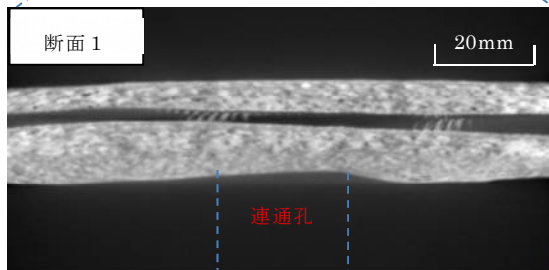
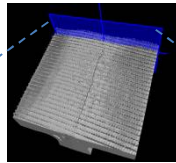
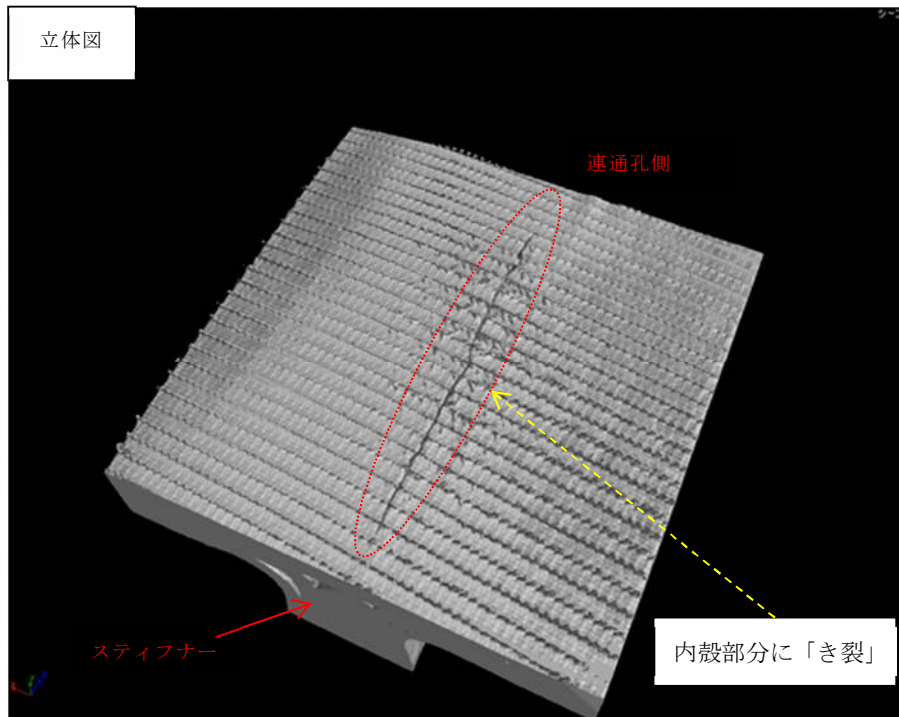


図 3. 9. 4 KHK 6 5 8 5-A 内殻き裂状況

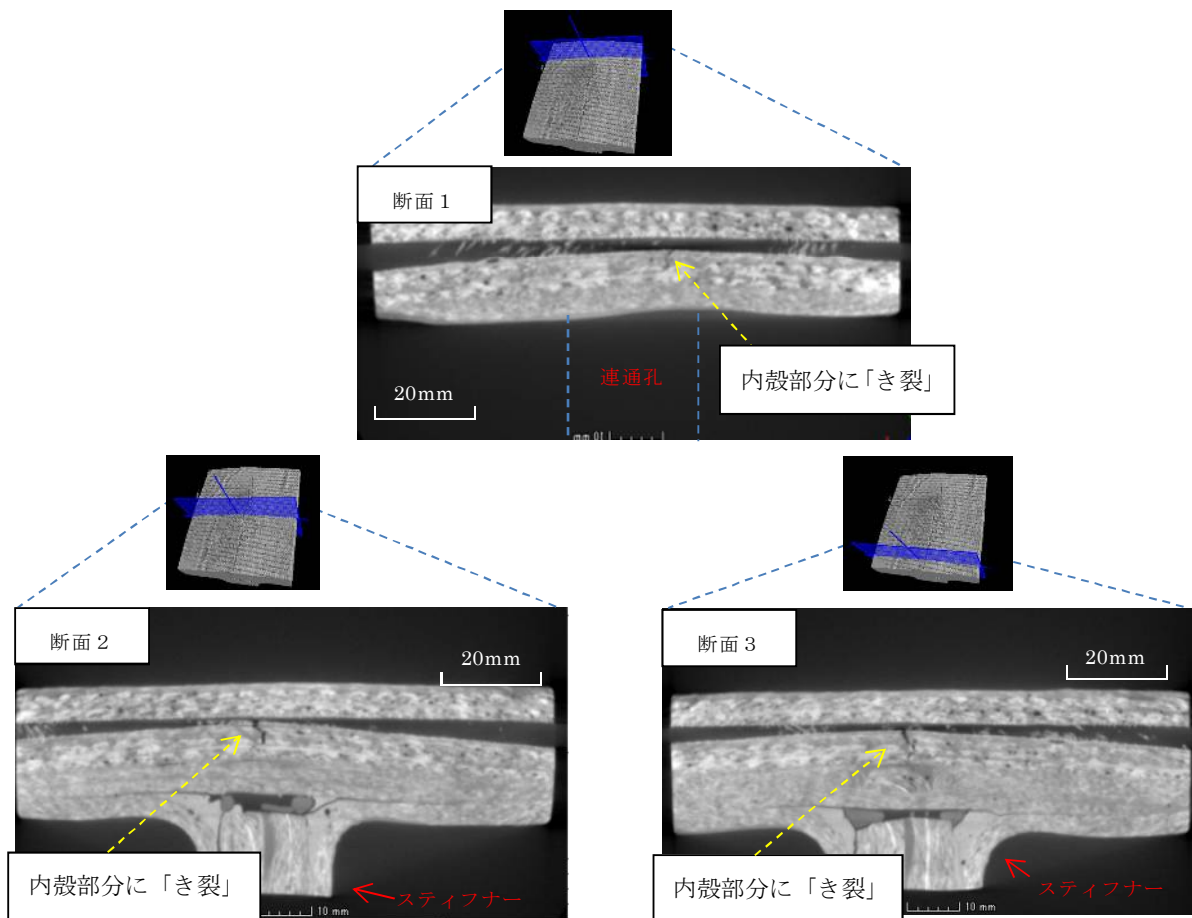
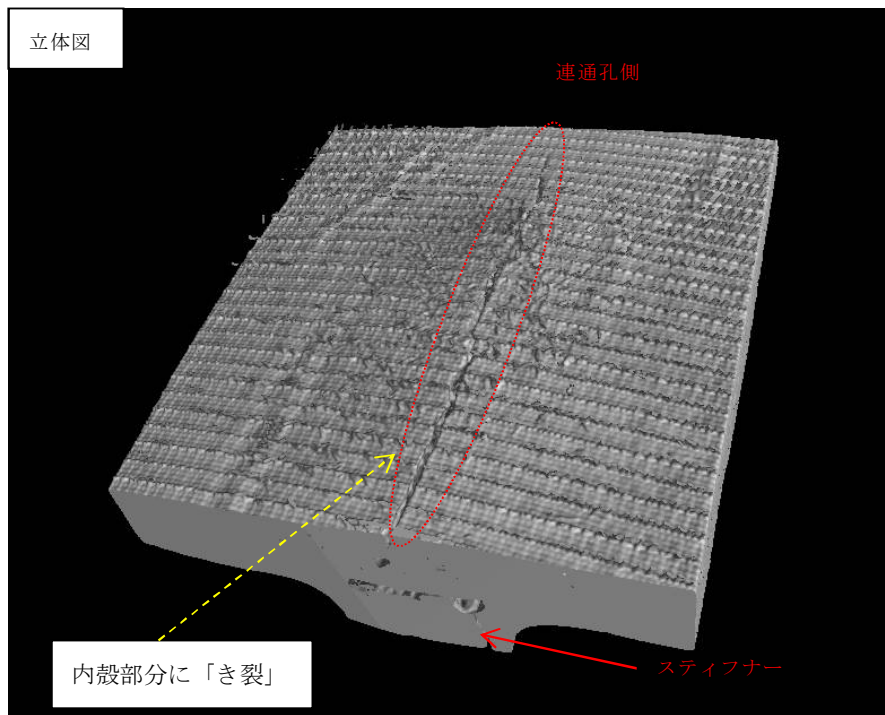


図3. 9. 5 KHK660 1-A 内殻き裂状況

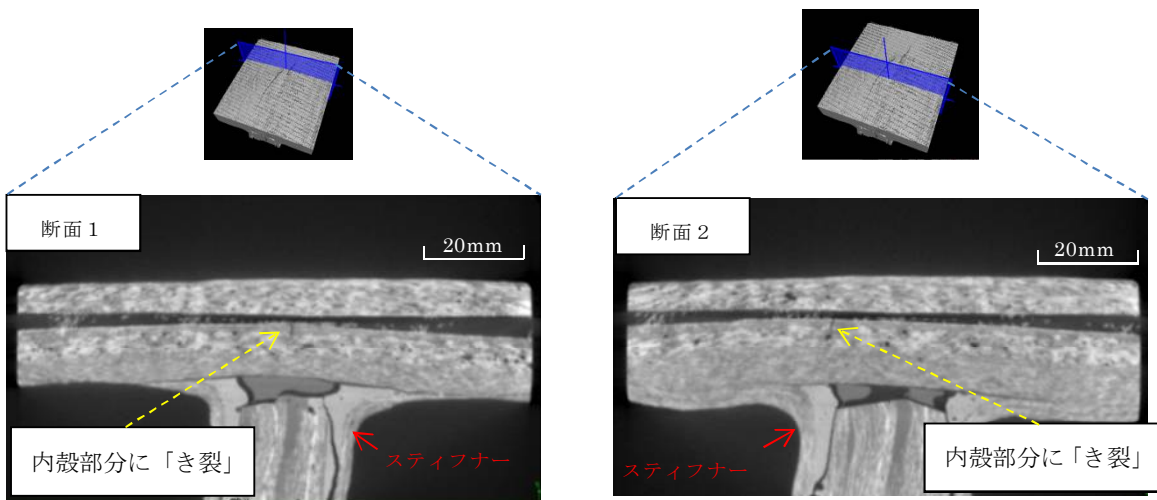
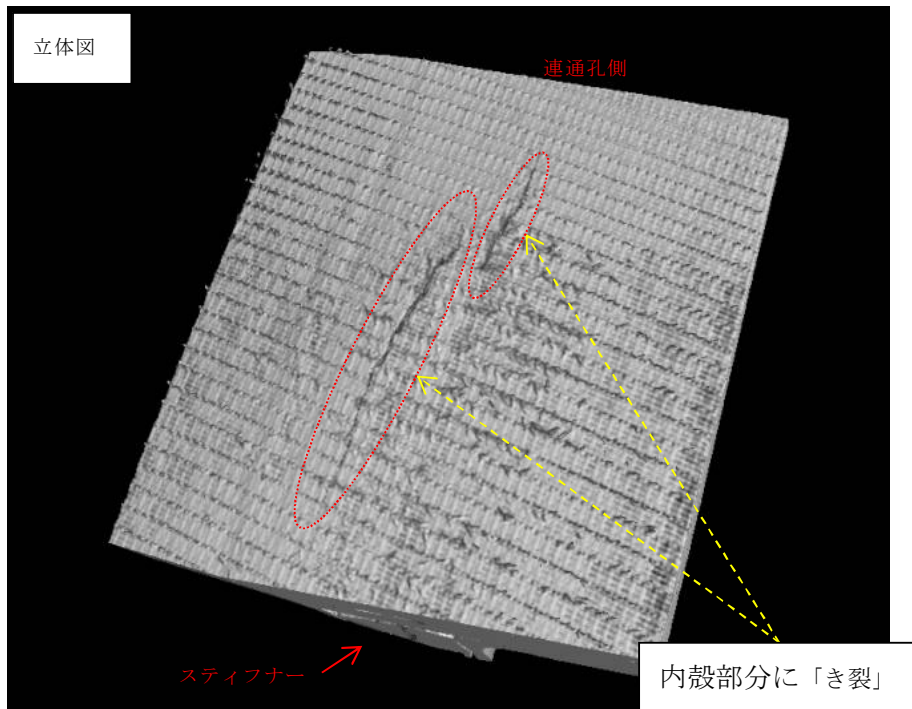


図3. 9. 6 KHK660 8-A 内殻き裂状況

イ スティフナー下部の空間 (図3.9.7から図3.9.10参照)

試験片を周方向断面から確認すると、スティフナー下部に空間が確認された。当該状況は内殻における、き裂の有無に関わらず発生していた。

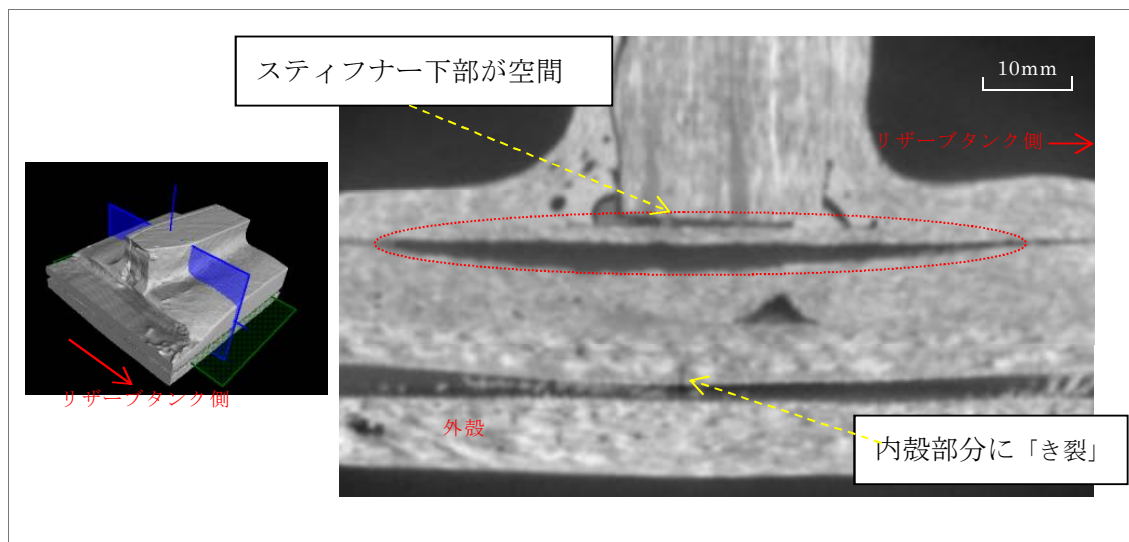


図3.9.7 KHK659 2-B断面図

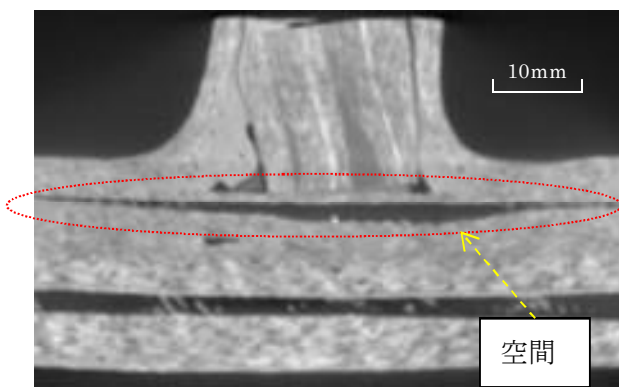


図3.9.8 KHK659 4-A断面図

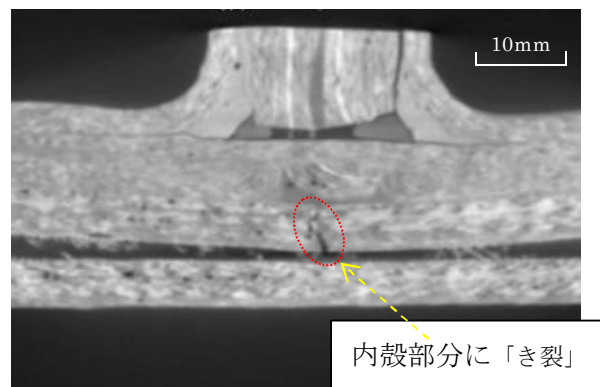


図3.9.9 KHK660 1-A断面図

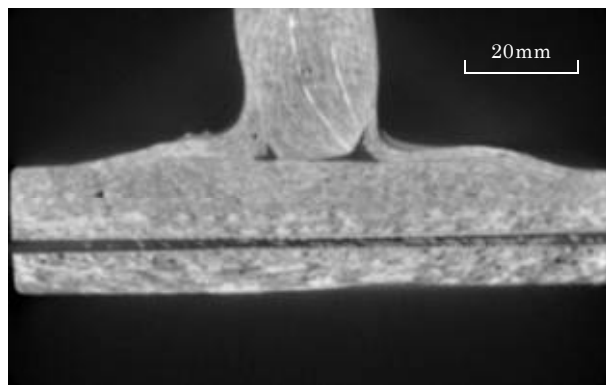


図3.9.10 KHK1857 3-A断面図

ウ 検知層破損・未形成 (図3.9.11から図3.9.12参照)

き裂が確認された試験片において、き裂周辺では3D検知層のガラス繊維が不規則に配列していた。また、き裂がない試験片の一部についても同様の状況が認められた。

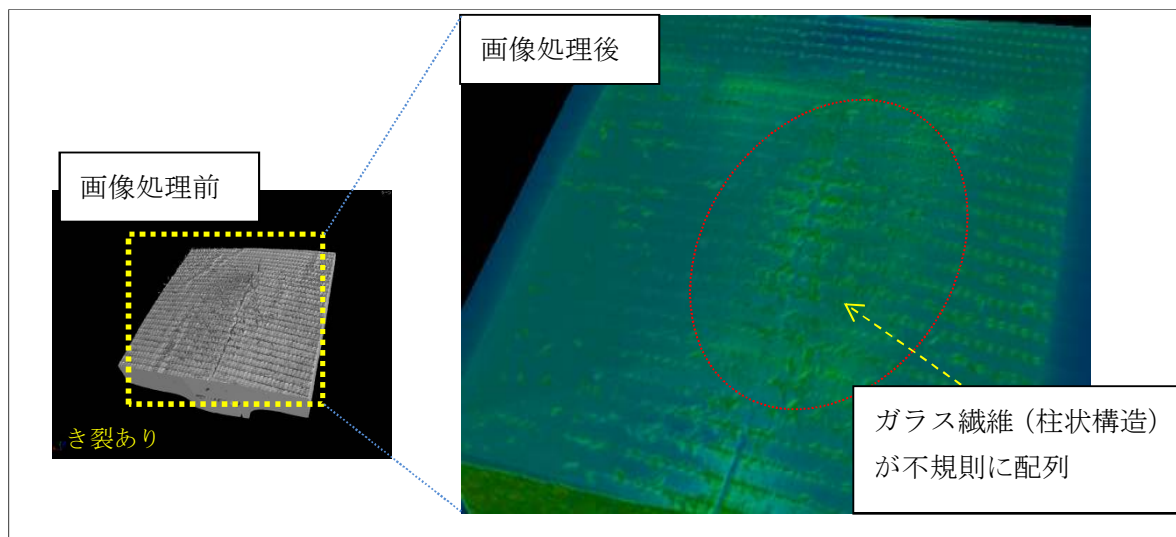


図3.9.11 KHK6601-A (画像処理後)

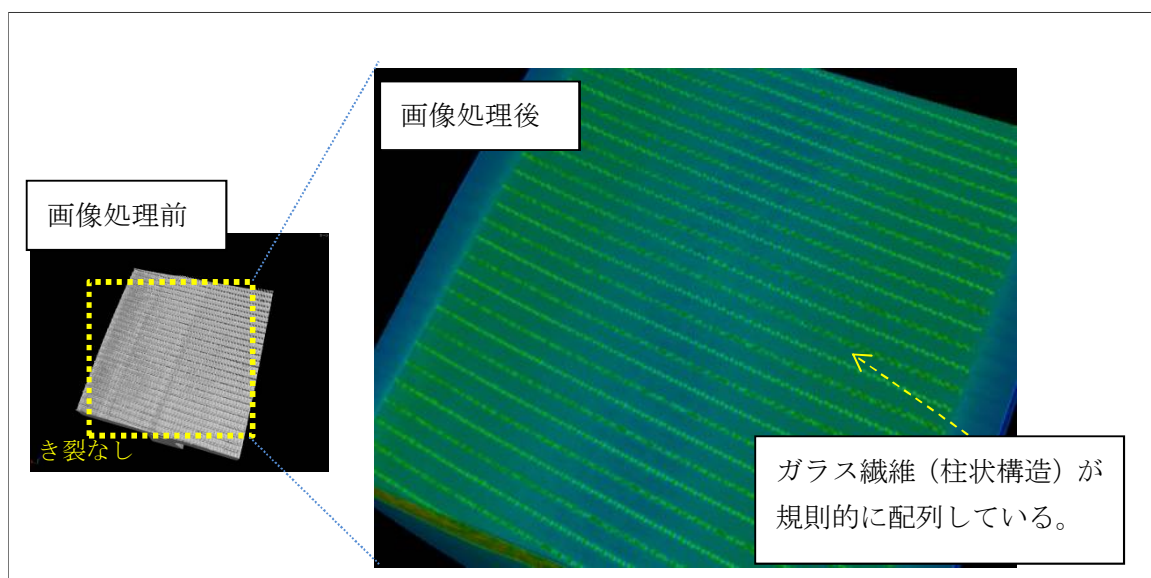


図3.9.12 KHK6605-D (画像処理後)

エ 内殻と外殻の形状について

き裂が確認された試験片に対して周方向断面を確認したところ、内殻が外殻と比較して湾曲していることが認められた。

また、軸方向断面から内殻と外殻の間隔を確認したところ、スティフナー下部の方が連通路下部よりも狭いことが認められた。(図3.9.13及び図3.9.14参照)

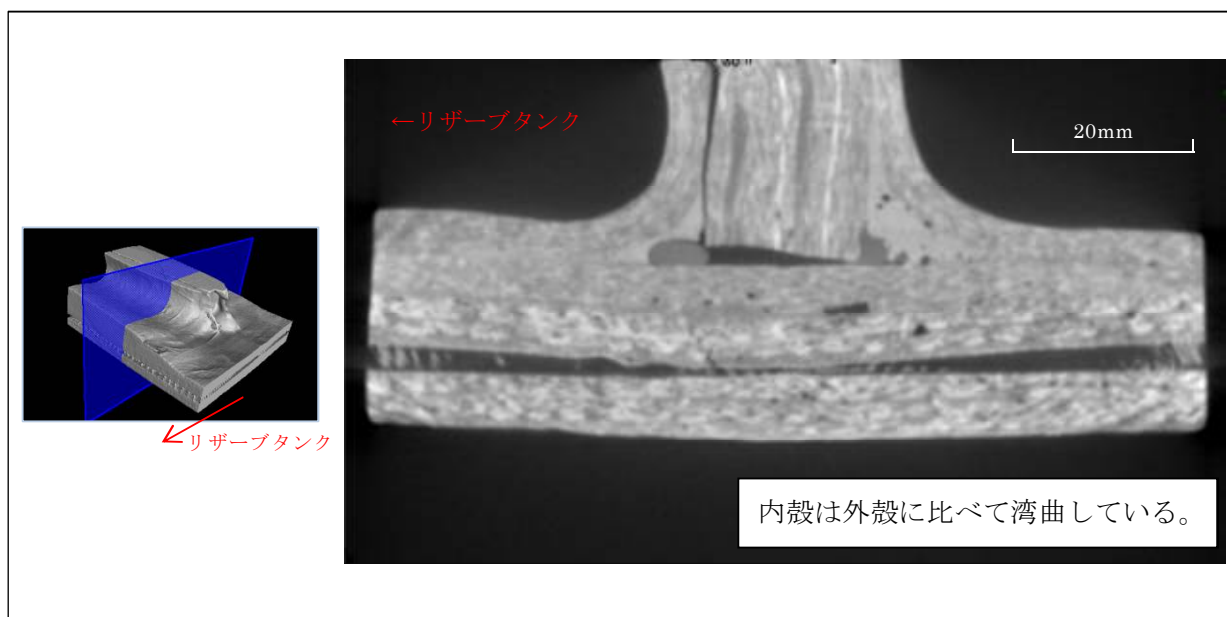


図3.9.13 KHK660 2-A 試験片断面図

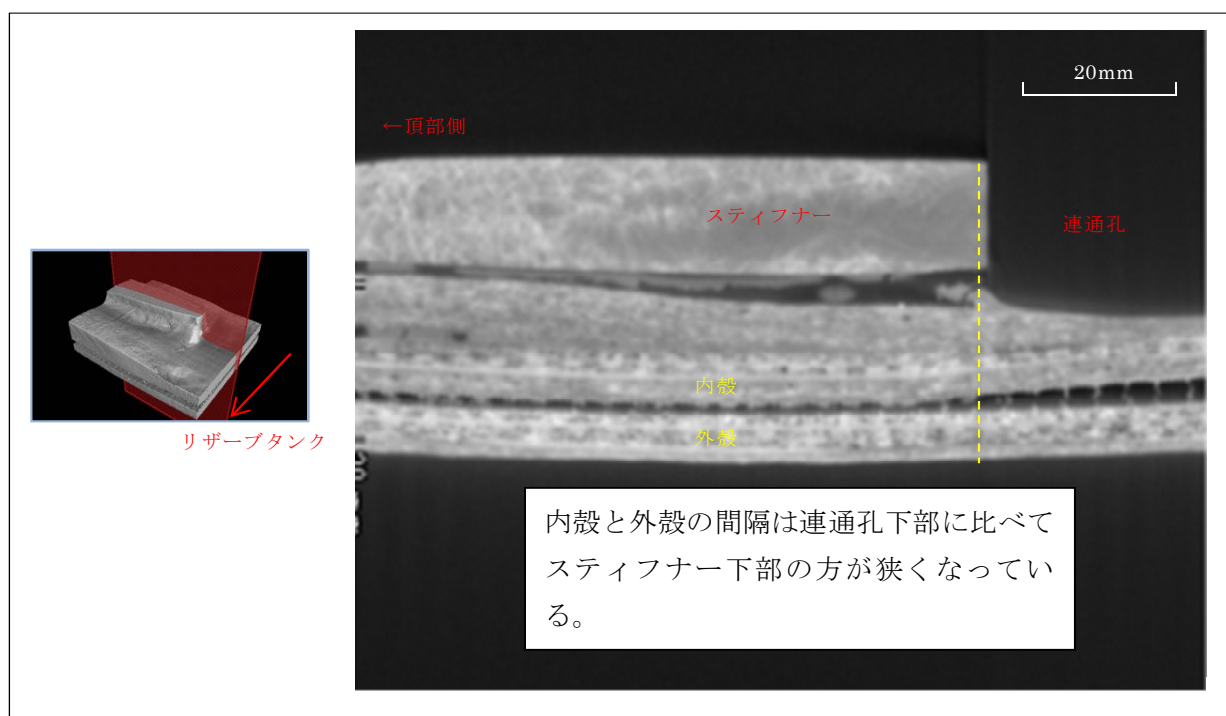


図3.9.14 KHK660 1-A 試験片断面図

オ 内殻と外殻の間隔について

漏えい箇所及び、き裂が確認された箇所（以下、漏えい箇所等という。）並びに破損等が認められない試験片について内殻と外殻の間隔に差異があるかを確認するため、X線CT画像上において、一つの試験片について5箇所で測定した。（図3.9.15参照）なお、検知層が破損している試験片があるため、検知層の厚さではなく、内殻と外殻の間隔を測定した。

(ア) き裂箇所における間隔について

漏えい箇所等の試験片はA点における間隔に着目すると、設計上の検知層厚さである3.5mmを下回っていた。これに対して破損等が認められない試験片は1857-3Aを除いたすべての試験片が3.5mmに近い値を保持していた。（表3.9.2参照）

(イ) 各測定箇所における間隔の差について

漏えい箇所等の殆どの試験片はA点における間隔が最も小さいため、A点を基準として他の測定点との比較を行った。

破損等が認められない試験片は、A点における間隔とその他の測定点における間隔の差が1mm未満であるのに対して、漏えい箇所等の試験片については、連通路側（B点）及び軸方向の両側（D点及びE点）において1mm以上であった。また、周方向の頂部側（C点）においてはA点の間隔との差が連通路側（B点）と比較して小さい値になる傾向があった。（表3.9.3参照）

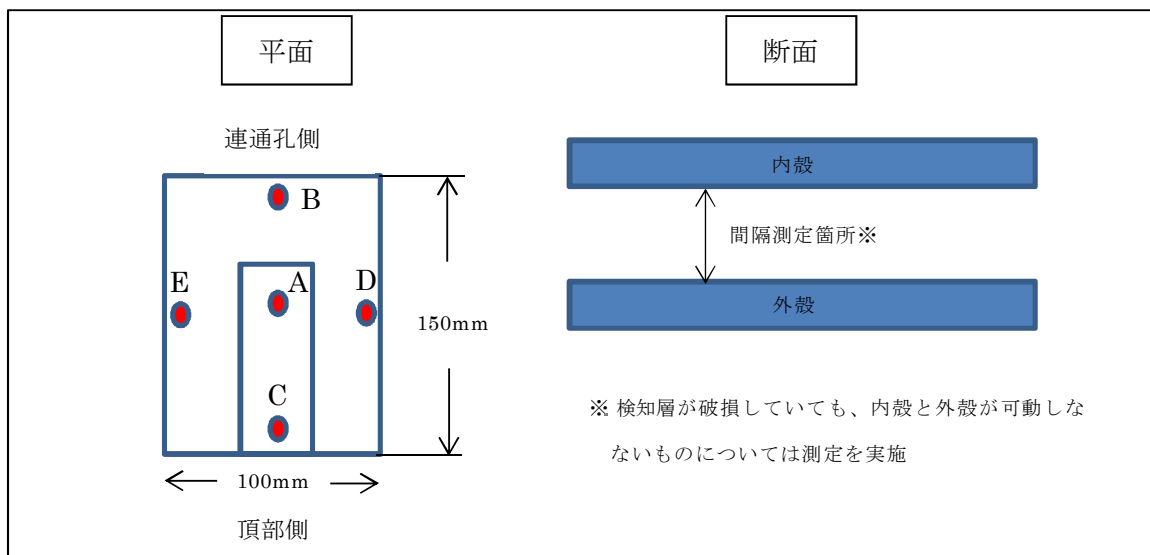


図3.9.15 試験片測定箇所（間隔測定）

表 3. 9. 2 試験片間隔測定結果

部位区分	タンクNo.	スティフナーNo.	測定箇所(単位:mm)				
			A	B	C	D	E
漏えい箇所等	658	7-A	1.81	3.27	2.50	3.31	5.20
	658	7-B	2.40	2.75	3.11	3.41	4.95
	659	2-A	1.80	3.04	2.63	2.98	3.83
	659	2-B	1.70	2.96	2.59	2.92	4.09
	659	4-A	2.01	3.26	2.68	3.54	3.98
	659	4-B	2.77	3.09	3.56	3.71	3.76
	660	1-A	1.11	3.36	0.93	4.44	3.22
	660	1-B	2.06	3.57	2.89	4.20	3.18
	660	5-A	2.12	3.08	3.09	3.08	3.58
	660	6-A	1.80	3.27	2.81	3.78	3.58
破損等なし	660	6-B	2.16	3.08	2.30	3.59	4.61
	658	3-F	3.79	3.65	3.63	3.50	3.87
	659	1-A	3.56	3.92	3.69	3.72	4.17
	660	6-D	3.52	3.34	3.09	3.66	3.73
	660	5-D	3.60	3.83	3.45	3.43	3.55
	1857	3-A	1.96	2.11	2.20	2.32	2.50

表 3. 9. 3 測定箇所 A との間隔差測定結果

部位区分	タンクNo.	スティフナーNo.	測定箇所Aとの間隔差(単位:mm)			
			A-B	A-C	A-D	A-E
漏えい箇所等	658	7-A	1.46	0.69	1.50	3.39
	658	7-B	0.35	0.71	1.01	2.55
	659	2-A	1.24	0.83	1.18	2.03
	659	2-B	1.26	0.89	1.22	2.39
	659	4-A	1.25	0.67	1.53	1.97
	659	4-B	0.32	0.79	0.94	0.99
	660	1-A	2.25	-0.18	3.33	2.11
	660	1-B	1.51	0.83	2.14	1.12
	660	5-A	0.96	0.97	0.96	1.46
	660	6-A	1.47	1.01	1.98	1.78
破損等なし	660	6-B	0.92	0.14	1.43	2.45
	658	3-F	-0.14	-0.16	-0.29	0.08
	659	1-A	0.36	0.13	0.16	0.61
	660	6-D	-0.18	-0.43	0.14	0.21
	660	5-D	0.23	-0.15	-0.17	-0.05
	1857	3-A	0.15	0.24	0.36	0.54

3. 10 電子顕微鏡による断面観察

神奈川県破損タンク片から採取した試験片の内殻について走査型電子顕微鏡を用いて断面観察によるガラス繊維の状況を確認する。参考として神奈川県破損タンク片から採取した試験片の積層された強化プラスチック繊維層及び現行品の内殻についても確認する（図3.10.1参照）。

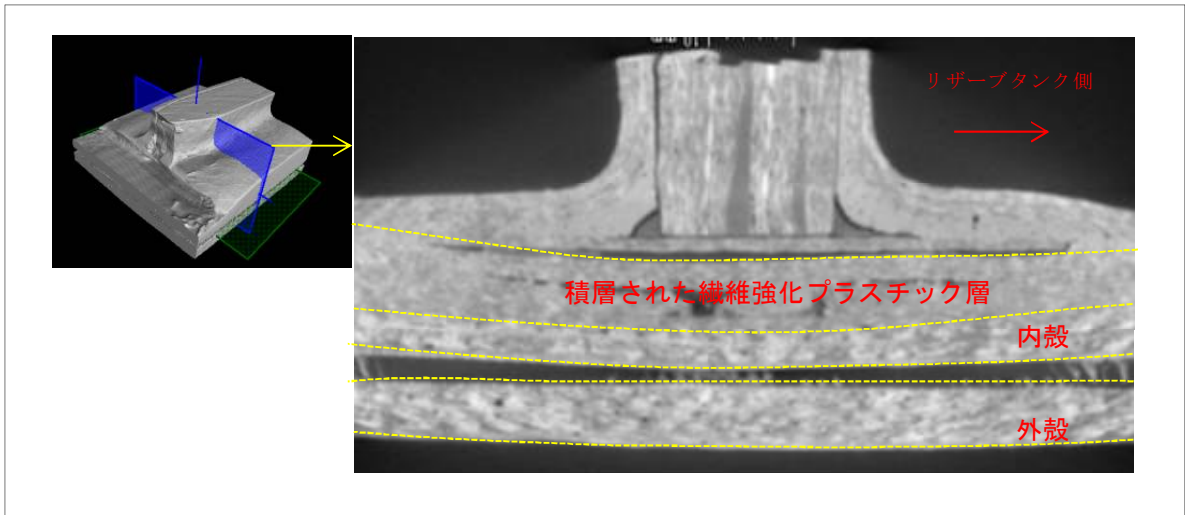


図3.10.1 KHK659 2-A試験片 X線CT断面図

(1) 実施対象

断面観察の対象としたタンクとその部位を表3.10.1に示す。

なお、積層されたFRP部分にはガラスマット7層を用いている。

表3.10.1 断面観察対象タンクと部位

対象No.	対象タンク	対象部位	部位詳細
1	KHK659	2-A 内殻	図3.10.2
2	KHK659	2-A 積層されたFRP層	図3.10.2
3	現行品	内殻	図3.10.3

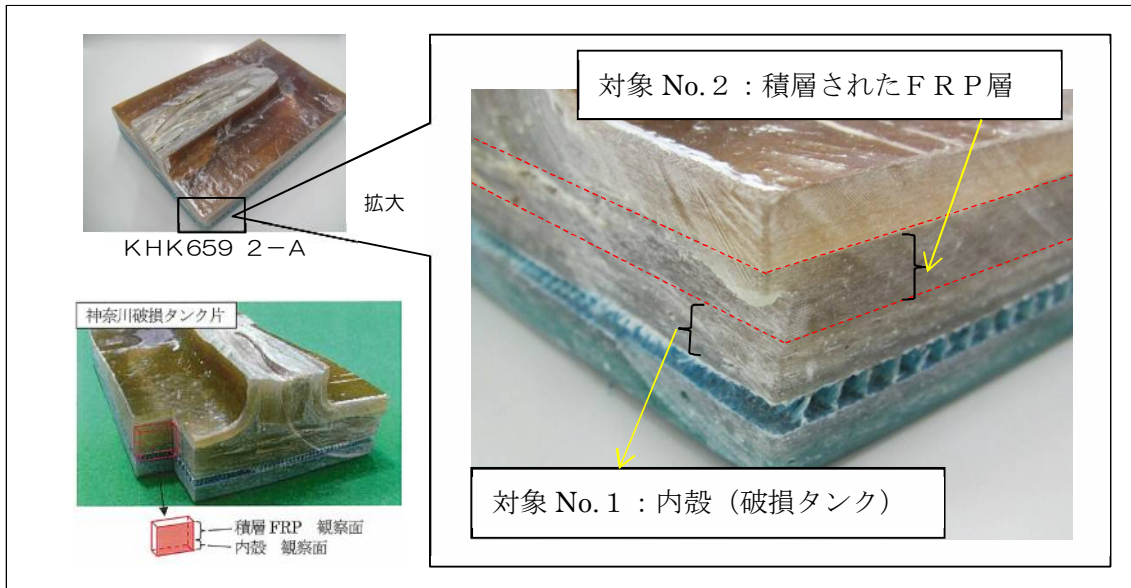


図 3. 1 0. 2 破損タンク対象部分

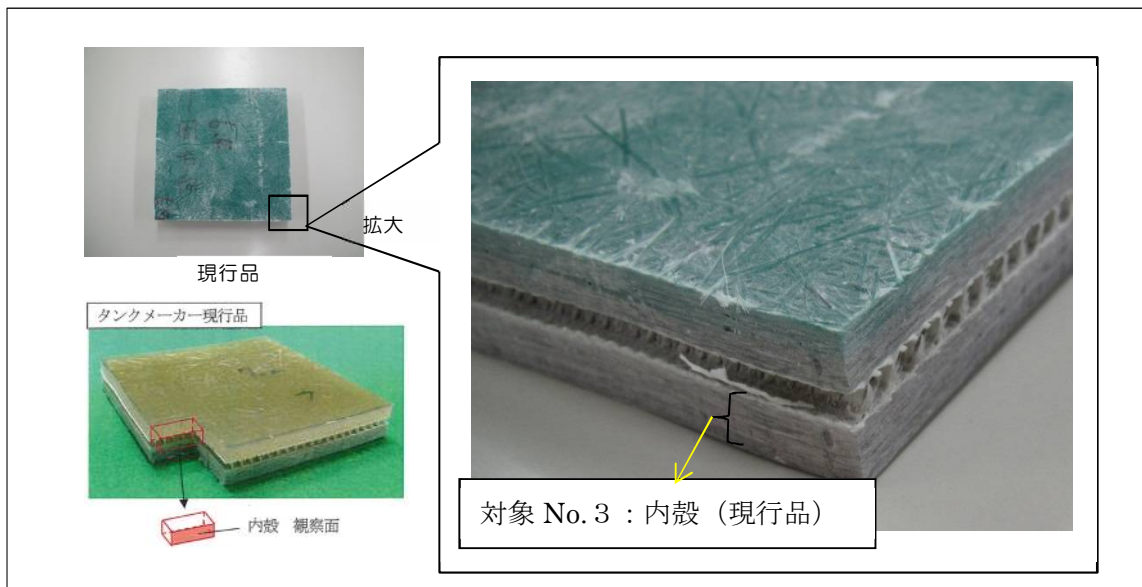


図 3. 1 0. 3 現行品対象部分

(2) 観察条件等

走査型電子顕微鏡の観察条件について表 3. 1 0. 2 に示す。

表 3. 1 0. 2 走査型電子顕微鏡観察条件等

項目	条件等
観察機器	日本電子製 J S M-5 6 1 0 L V
観察倍率	5 0 倍
加速電圧	1 0 k V

(3) 実施結果

実施結果について写真3. 10. 1から写真3. 10. 3に示す。得られた結果の撮像内、白色部分がガラス繊維、灰色部分が樹脂であると考えられる。

撮像内におけるガラス繊維について、著しい偏り等の異常は認められない。

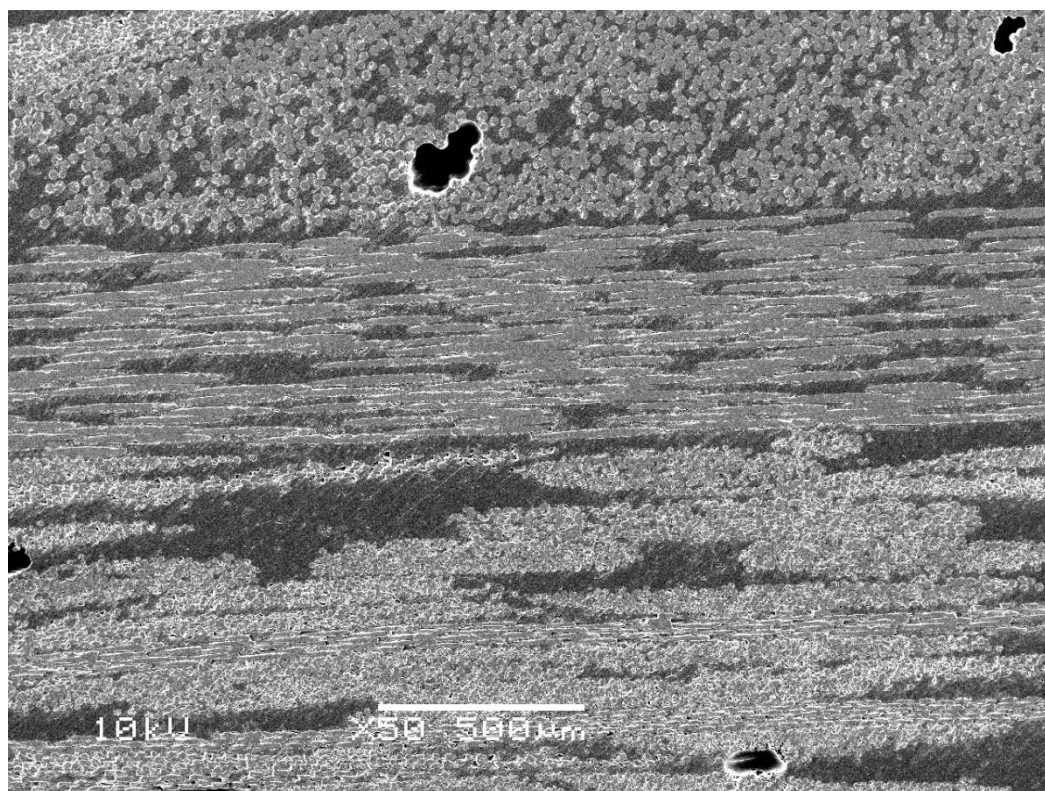


写真3. 10. 1 内殻（破損タンク）撮像

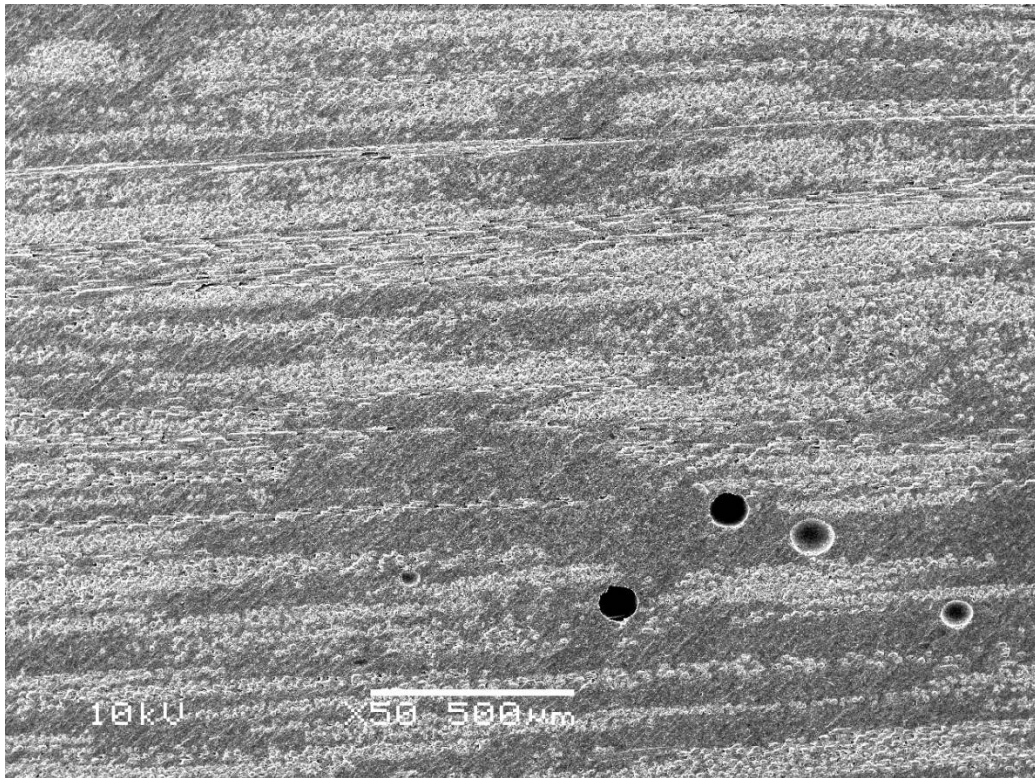


写真3. 10. 2 積層された繊維強化プラスチック層（破損タンク）撮像

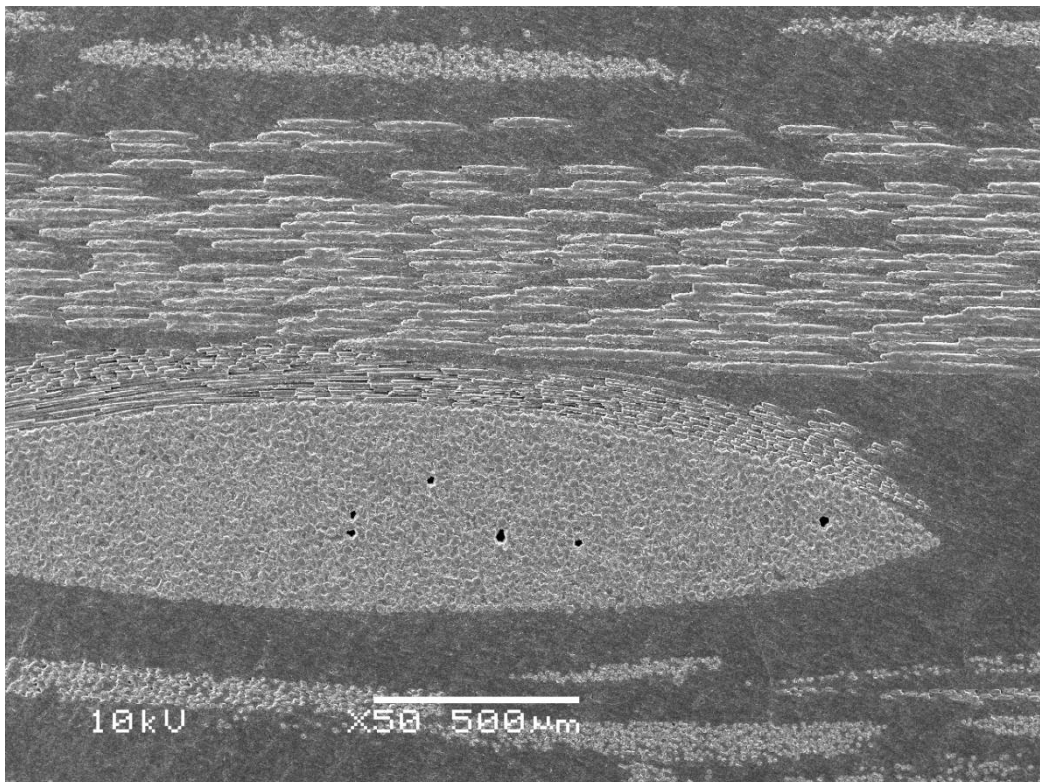


写真3. 10. 3 内殻（現行品）撮像

3. 1 1 有限要素法による解析

(1) 目的

破損要因について検討するため、埋設状態のFF二重殻タンクについて有限要素法による3次元応力解析を実施し、上載荷重、周辺埋戻土等による地盤土圧が及ぼす影響について検討する。

本解析では、どのような状態の時に変形量が大きくなり応力が集中するような部位が生じるかを検討するため、周辺地盤を含む領域による解析を実施する。タンク本体については不明確な物性等も存在しているため、付属する構造物やタンク内殻と外殻間の中間層のモデル化は行わないものとする。

解析は以下の手順で実施する。(図3. 1 1. 1 参照)

- ① 通常の埋設状態での解析を実施
- ② 車両等の上載荷重を考慮した状態での解析を実施
蓋や支柱が存在する場合は、上載荷重によるタンクへの影響が小さくなるため、上載荷重を載荷する場合は蓋、支柱については埋戻土・砕石の物性に変更する。
- ③ ②について埋戻土を変えた状態による解析を実施

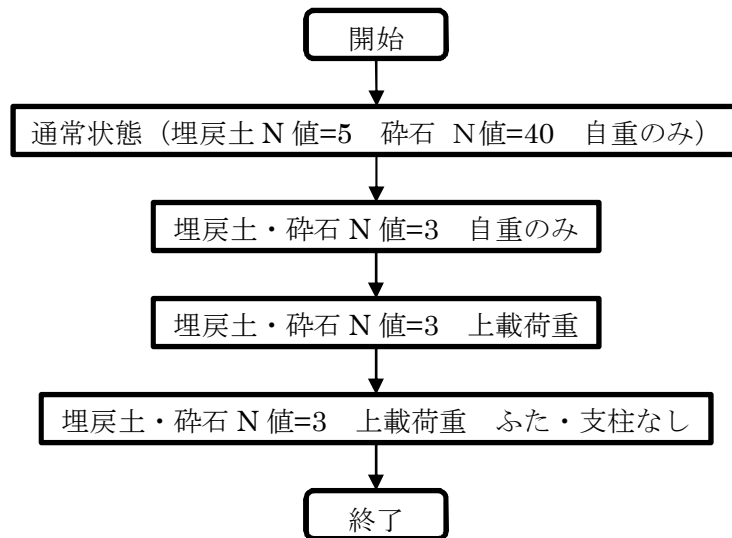


図3. 1 1. 1 解析手順

(2) 解析条件

ア 対象

FF二重殻タンク

イ 解析手法

静的FEM解析（線形解析）

ウ 解析ケース

解析ケースは、通常の埋設状態の自重解析のrun1、埋戻土・砕石の物性を変更した自重解析のrun2、run2に対して上載荷重を考慮したrun3、ふた・支柱の物性を埋戻土物性に変更したモデルで上載荷重を考慮したrun4の4ケースを実施した。(表3.11.1、図3.11.2参照)

表3.11.1 解析ケース

ケース	ふた・ふた支柱	埋戻土・砕石物性	荷重
run1	あり	通常：N値=5（埋戻土） N値=40（砕石）	自重
run2	あり	N値=3	自重
run3	あり	N値=3	上載荷重
run4	なし（埋戻土）	N値=3	上載荷重

※run3、4は上載荷重のみによる影響を計算する。自重による応力・変形量等も考慮する場合は重ね合わせて評価する。

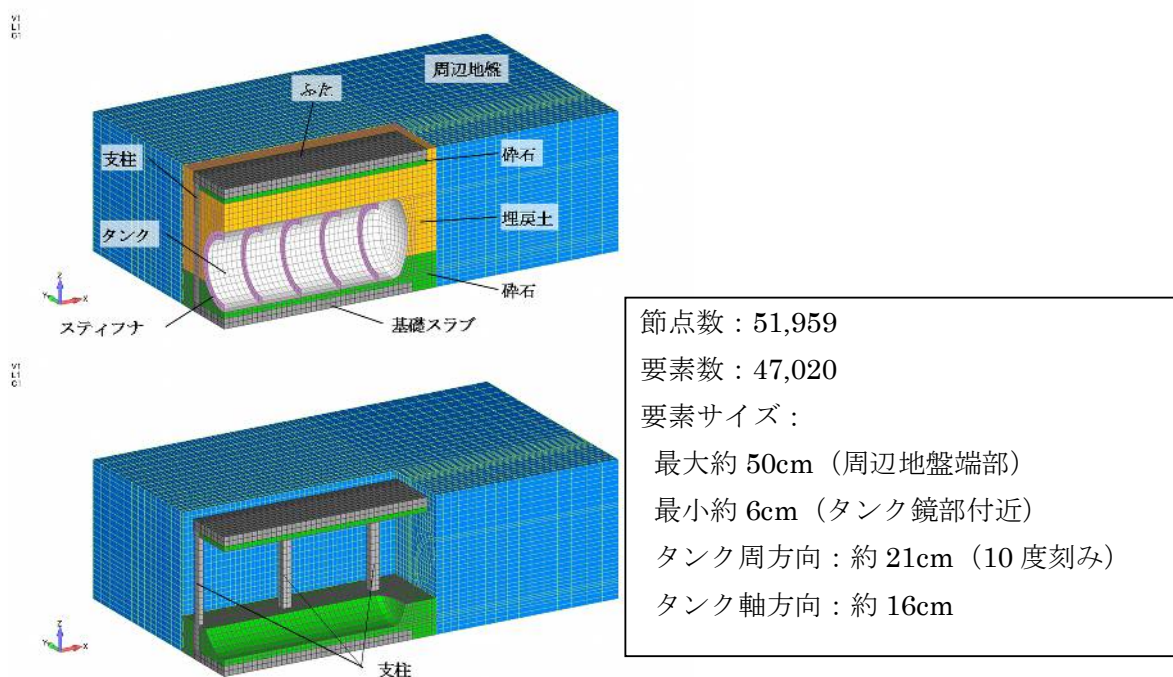


図3.11.2 1/4モデル図（鳥瞰 上：全表示 下：埋土・タンク非表示）

エ 解析モデルの条件

標準的なFF二重殻タンクの埋設条件を元に解析モデルを作成する。対称性を考慮し1/4モデルとする。(表3. 1 1. 2参照)

表3. 1 1. 2 モデル寸法

対象	サイズ[mm]・その他	材質	要素	
タンク	円筒部	長さ：11,170 外殻外径：2,429 内殻内径：2,400 板厚：14.5 (外殻：中空部：内殻=5.5：3.5：5.5)	FRP 積層 胴部	平面要素
	ステイフナー	高さ：250 厚さ：14	FRP 積層 ステイフナー	平面要素
	鏡部	タンク全長：12,129 外殻外径：2,414.5 内殻内径：2,400 板厚：14.5 (円筒部と同じ中空部有り)	FRP 積層 鏡部	平面要素
	マンホール等の構造物、中仕切り、連通孔、バンドについては省略する			

平面要素は面外、せん断、曲げ剛性を持つ

対象	サイズ[mm]・その他	材質	要素
周辺地盤	軸方向：13,000 (タンク長と同一程度) 幅方向：7,500 (タンク半径の5倍程度) 深さ：4,729 (ふた上部～基礎下)	周辺地盤	ソリッド
埋戻土	タンク上面～ふた下部：1500	埋戻土	ソリッド
タンク下部 砕石	タンク下部～基礎スラブ：200 タンク下部～砕石上面：610 (タンク直径の1/4)	砕石	ソリッド
	支持砕石、充填砕石、砕石床は区別しない		
基礎スラブ	厚さ：300	Fc21 ^{注1}	ソリッド
支柱	直径：100	Fc21	ソリッド
	支柱と埋戻土間は2重節点とする		
ふた	厚さ：300	Fc21	ソリッド
	ふた下面と埋戻土間は2重節点とする		
ふた下部砕石	厚さ：100	砕石	ソリッド

注1：Fc とは、コンクリートの設計基準強度 (Fc) を表し、コンクリートの圧縮強度をいい (単位は[N/mm²]、建築工事標準仕様書 JASS5 に設計基準強度の標準が規定されている。

オ 物性値

(ア) 埋戻土に関して地盤や砕石等の物性について調査し、物性値の変動幅について検討する。基本的な値としてはFF二重殻タンク検討時の表3.11.3の値とする。なお、周辺地盤は自重による沈下は考慮せず、タンク設置による沈下・応力の発生のみを検討するため、周辺地盤の重量については0とする。

(イ) run2以降については、静岡県と神奈川県のパーリング調査結果を参考に、N値=3とした変形係数(8,400[kN/m²])を、埋戻土、砕石に対して設定した。(表3.11.4から表3.11.5参照)

表3.11.3 地盤物性(通常の設定値:run1)

地盤	地盤種	N値	地下水面以下単位体積重量 ρ_d 注3 [kN/m ³]	地下水面上単位体積重量 ρ_u 注3 [kN/m ³]	変形係数 E 注2 [kN/m ²]	ポアソン比	
						地下水面以下	地下水面上
埋戻土	砂	5	19.5	17.5	14,000	0.35	0.35
周辺地盤	砂	15	—	—	42,000	0.35	0.35
砕石	砕石	40	21.0	19.0	112,000	0.35	0.35

注2:変形係数算定式 $E_0=2800 \times N$ 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)

注3:出典:道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説平成14年,p.357

表3.11.4 地盤物性(変更値:run2以降)

地盤	地盤種	N値	地下水面以下単位体積重量 ρ_d 注3 [kN/m ³]	地下水面上単位体積重量 ρ_u 注3 [kN/m ³]	変形係数 E_0 [kN/m ²]	ポアソン比	
						地下水面以下	地下水面上
埋戻土	砂	3	19.5	17.5	8,400	0.35	0.35
砕石	砕石	3	21.0	19.0	8,400	0.35	0.35

表3.11.5 基礎、ふた、支柱物性

	単位体積重量[kN/m ³]	ヤング率 E_c [kN/m ²]	ポアソン比
Fc21	24.0	21,682,000	0.2

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。

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times (\gamma/24)^2 \times (F_c/60)^{\frac{1}{3}}$$

ここに、 $F_c=21[\text{N/mm}^2]$ 、 $\gamma=23[\text{kN/m}^3]$

(ウ) 地下水面

タンク上部を地下水面とする

(エ) タンクの材料特性

タンク胴部・鏡部は、FRPによる外殻と内殻、外殻と内殻間の中空層の3層構造となっている。中空層は、せん断剛性を持っているものと考えられるが、明確ではない。本解析では安全側に考え、中空層のせん断剛性は考慮しないこととする。曲げ剛性（断面2次モーメント）については、中空層の厚みを考慮して設定する。解析に使用したタンク物性値を表3.11.6に、もとにした物性値を表3.11.7から表3.11.10に示す。

表3.11.6 タンク物性 (FRP単層)

	ヤング率 $E_{\text{FRP}}[\text{kN/m}^2]$	ポアソン比
胴部周方向	9,000,000	0.27
胴部軸方向	6,000,000	0.23
鏡部	7,000,000	0.31
ステイフナー	7,000,000	0.29

※表3.11.7から表3.11.9にはFF二重殻タンクの弾性率として、引張弾性率と曲げ弾性率が示されているが、土圧による曲げ変形が支配的と考えられるため、曲げ弾性率の値を用いる。

タンク胴部・鏡部は1層の平面要素でモデル化するため、ヤング率、断面2次モーメントを以下のように設定する。(図3.11.3)

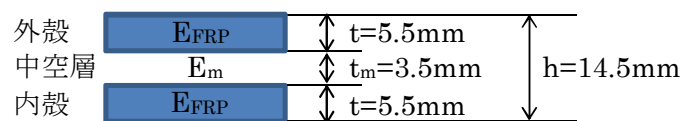


図3.11.3 タンク胴部

- ・ ヤング率 E
ヤング率はFRP単層と等しい値を用いる。
- ・ 断面2次モーメント I
中空層のヤング率 E_m を0として、以下の断面2次モーメント I を用いる。

$$I = \frac{1}{12} \{h^3 - (h - 2t)^3\}$$

表 3. 11. 7 タンク胴部・鏡部シェル要素に対する設定値

	ヤング率 E[kN/m ²]	ポアソン比	I[mm ⁴]
胴部周方向	9,000,000	0.27	250.48
胴部軸方向	6,000,000	0.23	
鏡部	7,000,000	0.23	

なお、タンク重量については土圧等に比べて小さいため 0 とする。

表 3. 11. 8 円筒内殻胴、円筒外殻胴材料特性

部位	項目	単位	値
周方向	引張強さ	σ_{ot} (MPa)	1 8 0
	引張弾性率	E_t (GPa)	2 0
	周方向許容応力※	σ_d (MPa)	4 5
	ポアソン比	ν	0. 2 7
	曲げ強さ	σ_{ob} (MPa)	1 1 8
	曲げ弾性率	E_b (GPa)	9
軸方向	引張強さ	σ_{ot1} (MPa)	7 7
	引張弾性率	E_{t1} (GPa)	8
	軸方向許容応力※	σ_d (MPa)	1 9
	ポアソン比	ν	0. 2 3
	曲げ強さ	σ_{ob1} (MPa)	7 1
	曲げ弾性率	E_{b1} (GPa)	6

※許容応力=引張強さ×1/4

表 3. 11. 9 鏡部材料特性

項目	単位	値
引張強さ	σ_{ot2} (MPa)	9 4
引張弾性率	E_{t2} (GPa)	9
軸方向許容応力※	σ_d (MPa)	2 3. 5
ポアソン比	ν	0. 3 1
曲げ強さ	σ_{ob2} (MPa)	8 7
曲げ弾性率	E_{b2} (GPa)	7

※許容応力=引張強さ×1/4

表 3. 11. 10 スティフナー材料特性

項目	単位	値
引張強さ	σ_{ot2} (MPa)	1 1 0
引張弾性率	E_{t2} (GPa)	1 2
軸方向許容応力※	σ_d (MPa)	2 7. 5
ポアソン比	ν	0. 2 9
曲げ強さ	σ_{ob2} (MPa)	1 7 0
曲げ弾性率	E_{b2} (GPa)	7

※許容応力=引張強さ×1/4

カ 荷重・拘束条件

(ア) 上載荷重

上載荷重は、ふたの該当部分に設定した。

荷重は道路橋示方書より設計自動車荷重 245kN（車両総重量 25tf の大型車）の重量をもとにした T 荷重を設定した。（図 3. 1 1. 4 参照）

上載荷重：100kN

設定範囲：200×500mm

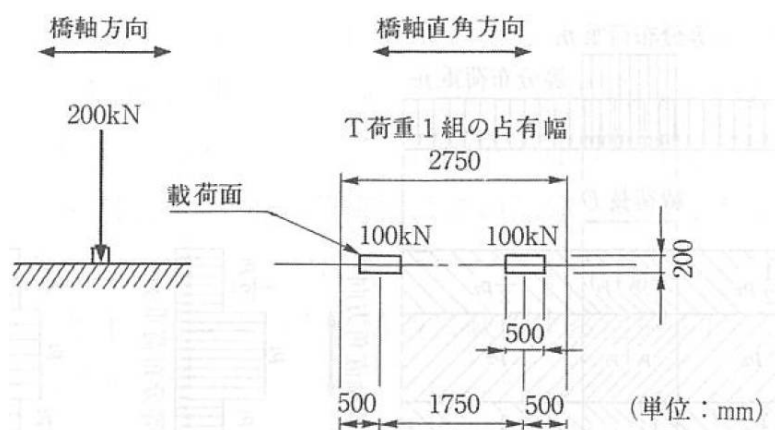


図 3. 1 1. 4 T 荷重（上載荷重 道路橋示方書・同解説平成 24 年 3 月）

(イ) タンク内圧

タンク内液については考慮しない（内圧が無い方が安全側と考えられるため）。

(ウ) 拘束条件

解析領域底面：面外変形拘束

解析領域側面：面外変形拘束

キ 評価項目

以下の項目を評価する

(ア) 鉛直方向の変形量

(イ) 破損タンクの鉛直方向の変形量が発生する上載荷重

(ウ) 応力集中部の応力

(エ) タンク全体の応力が強度を超えるかどうかを評価する

ク 解析コード

NX Nastran V7.1

ケ 自重解析時のモデルについて（支柱、ふた下部の二重節点化）

自重解析時には、ふたの下面の節点と支柱側面の節点については二重節点とする。ふたは支柱で支えられているため殆ど沈下しないが、埋戻土、砕石には沈下が発生する。ふたの下部の節点と支柱側面の節点が埋戻土、砕石と共有されている場合に

は、ふたの下部と支柱によって埋戻土、砕石が支えられてしまうため、埋戻土、砕石の沈下を正しく評価出来ない。そのため、自重解析時には埋戻土、砕石と、ふた下部、支柱側面を切り離すため二重節点とする。なお、自重解析では無く上載荷重を設定するケースでは二重節点とはしない。(図3. 11. 5参照)

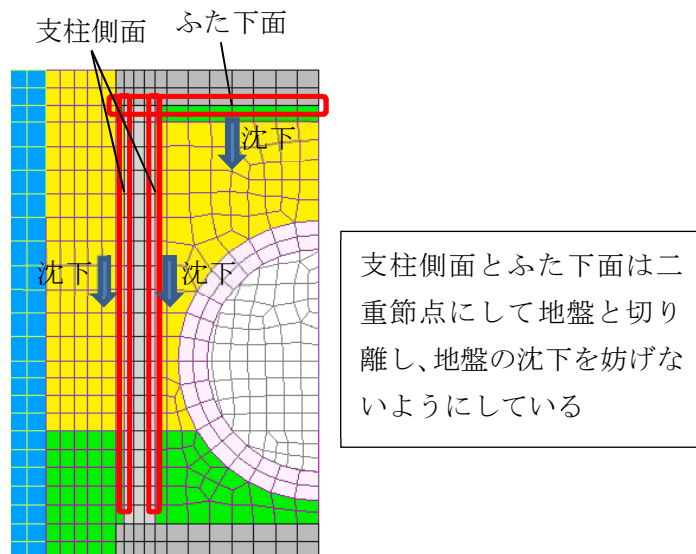


図3. 11. 5 二重節点の設定

コ 上載荷重設定

道路橋示方書で定義されている25t車の輪荷重(100kN)を、最も大きな影響が予想される中央に近いスティフナー間に設定した。(図3. 11. 6参照)

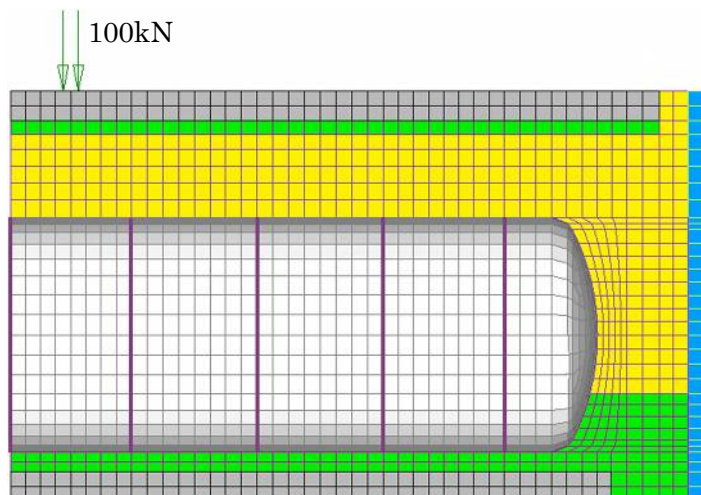


図3. 11. 6 荷重設定位置

(3) 解析結果

解析結果として、自重解析結果 (run1、run2) と上載荷重を載荷した結果 (run3、run4) の変形図、タンク周方向・軸方向の曲げモーメント、周方向の応力を示す。run3、run4 については、道路橋示方書で定義されている 25t 車の輪荷重 (100kN) を、最も大きな影響が予想される中央に近いスティブナー間に設定した。自重解析結果 (run2) と重ね合わせた曲げモーメントと応力図を示す。(表 3. 1 1. 1 1 参照)

表 3. 1 1. 1 1 解析ケース

ケース	ふた・ふた支柱	埋戻土・砕石物性	荷重
run1	あり	通常 : N 値=5 (埋戻土) N 値=40 (砕石)	自重
run2	あり	N 値=3	自重
run3	あり	N 値=3	上載荷重
run4	なし (埋戻土)	N 値=3	上載荷重

※run3、4 は上載荷重のみによる影響を計算しているが、自重による応力・変形量を重ね合わせて評価する。

ア 自重解析結果

自重解析結果 (run1、run2) を図3. 11. 7から図3. 11. 11に示す。

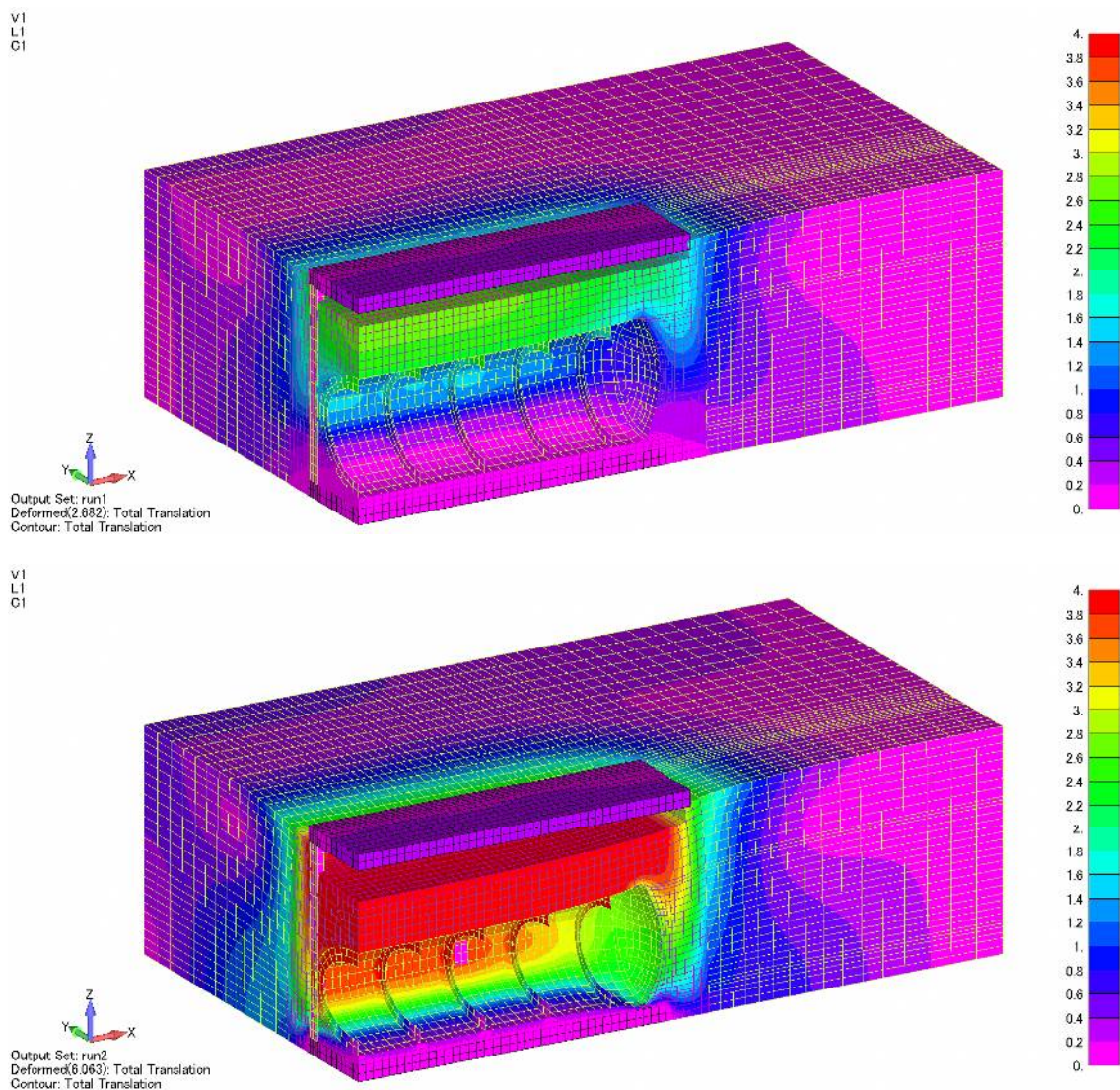


図3. 11. 7 変形図 (上 : run1 下 : run2 変形倍率 100 倍 [mm])

埋戻土、碎石の変形係数を小さくした run2 のほうが、変形量が大きくなっている事がわかる。ふたと切り離されていることで、埋戻土・碎石の沈下が生じやすく、中央断面に向かって緩やかに沈下量が大きくなっている。

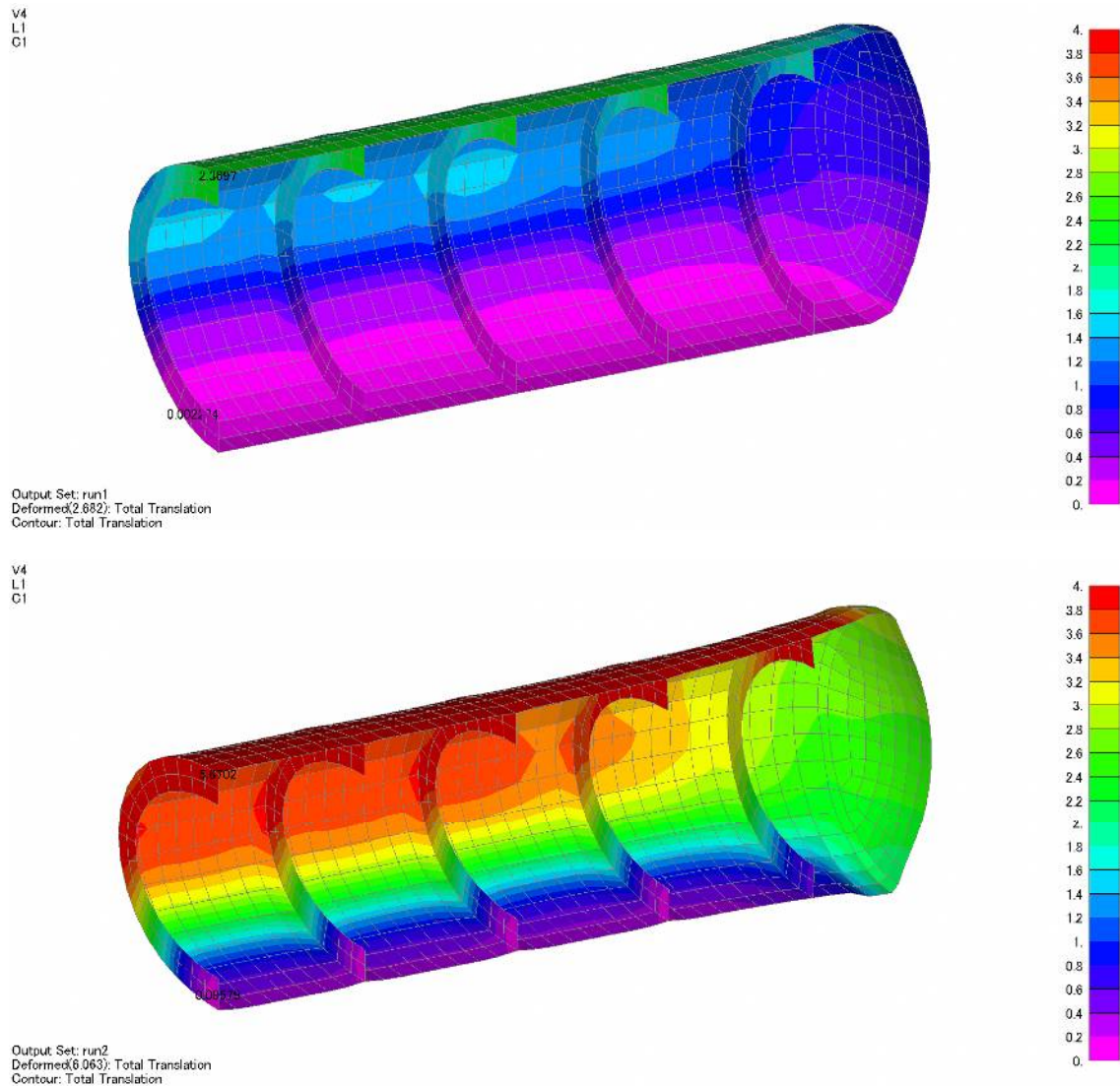


図 3. 1 1. 8 タンク変形図 (上 : run1 下 : run2 変形倍率 100 倍 [mm])

埋戻土、碎石の変形係数を小さくした run2 のほうが、変形量が大きくなっている事がわかる。スティフナー下部で浮き上がるような変形が発生している。

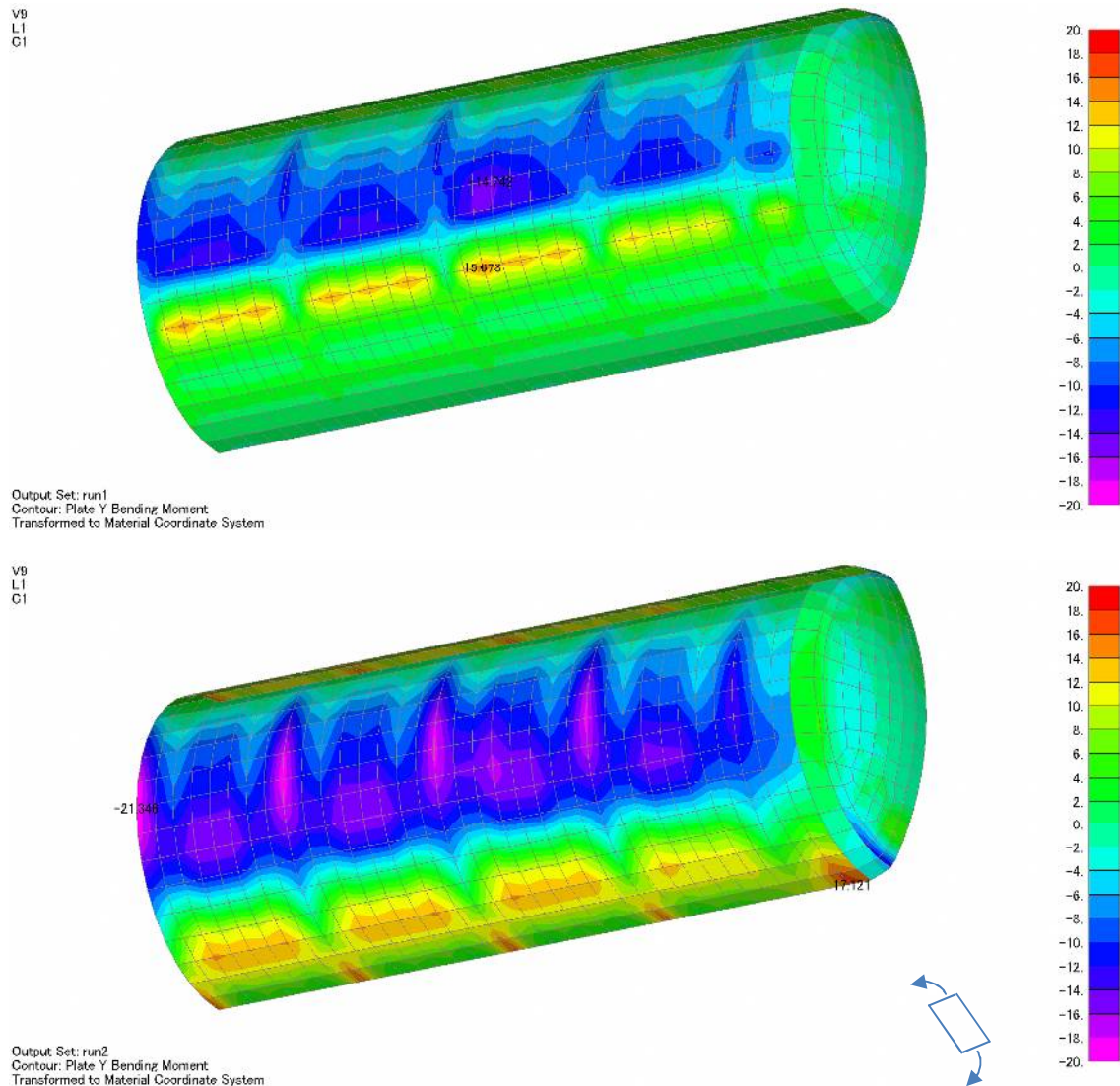


図3. 1 1. 9 タンク内周方向曲げモーメント (上 : run1 下 : run2 [N·mm])

埋戻土、碎石の変形係数を小さくした run2 では、底面中央から少し離れたところで外側に開く曲げモーメントが発生しているのに対し、run1 では碎石と埋戻土の境界で外側に開く曲げモーメントが発生している。また run2 ではスティフナーの影響と思われるが底面付近でも外側に開く曲げモーメントが発生している。

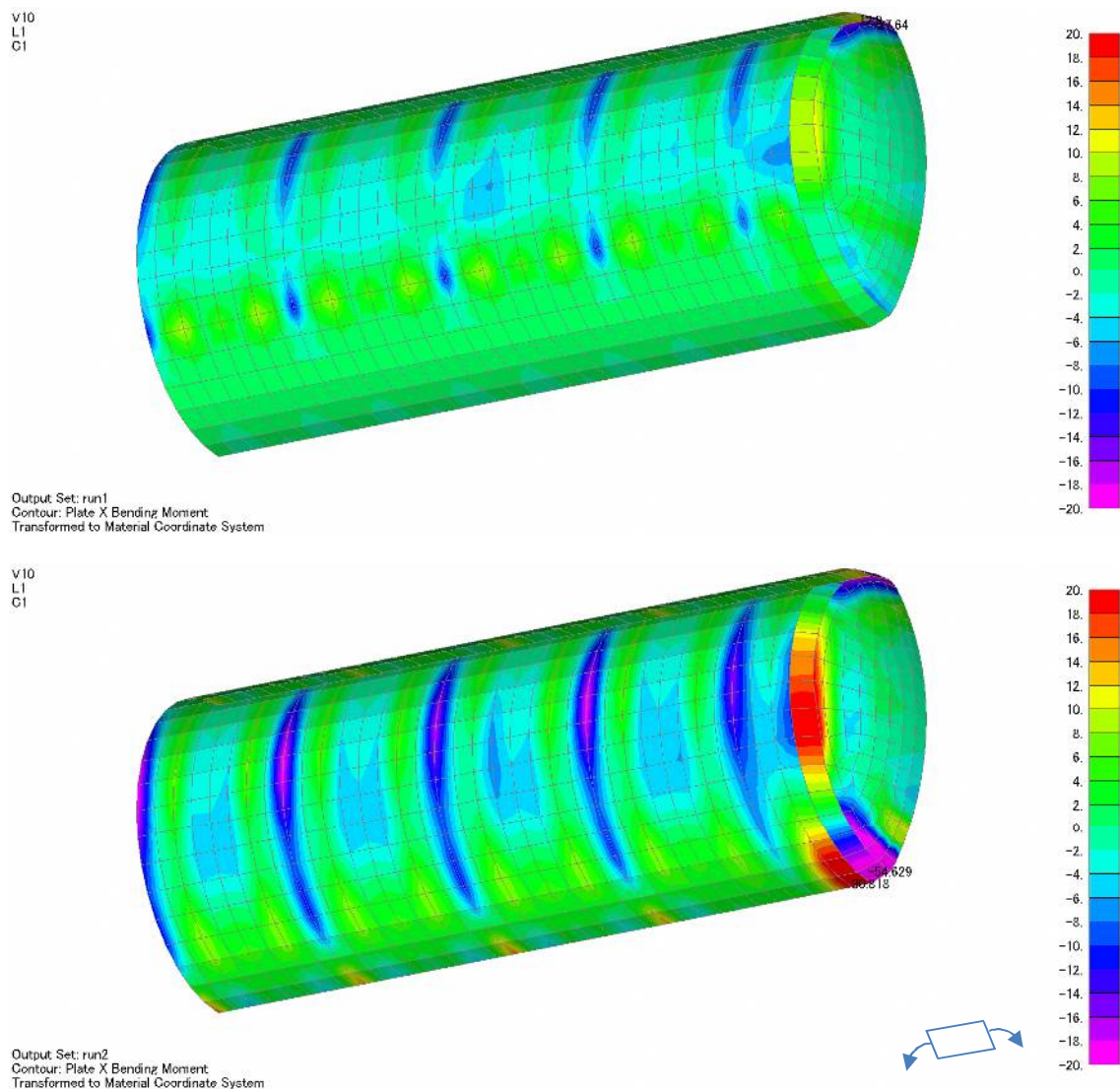


図3. 11. 10 タンク内軸方向曲げモーメント (上: run1 下: run2 [N・mm])

埋戻土、碎石の変形係数を小さくした run2 の方が大きな曲げモーメントが発生している事がわかる。

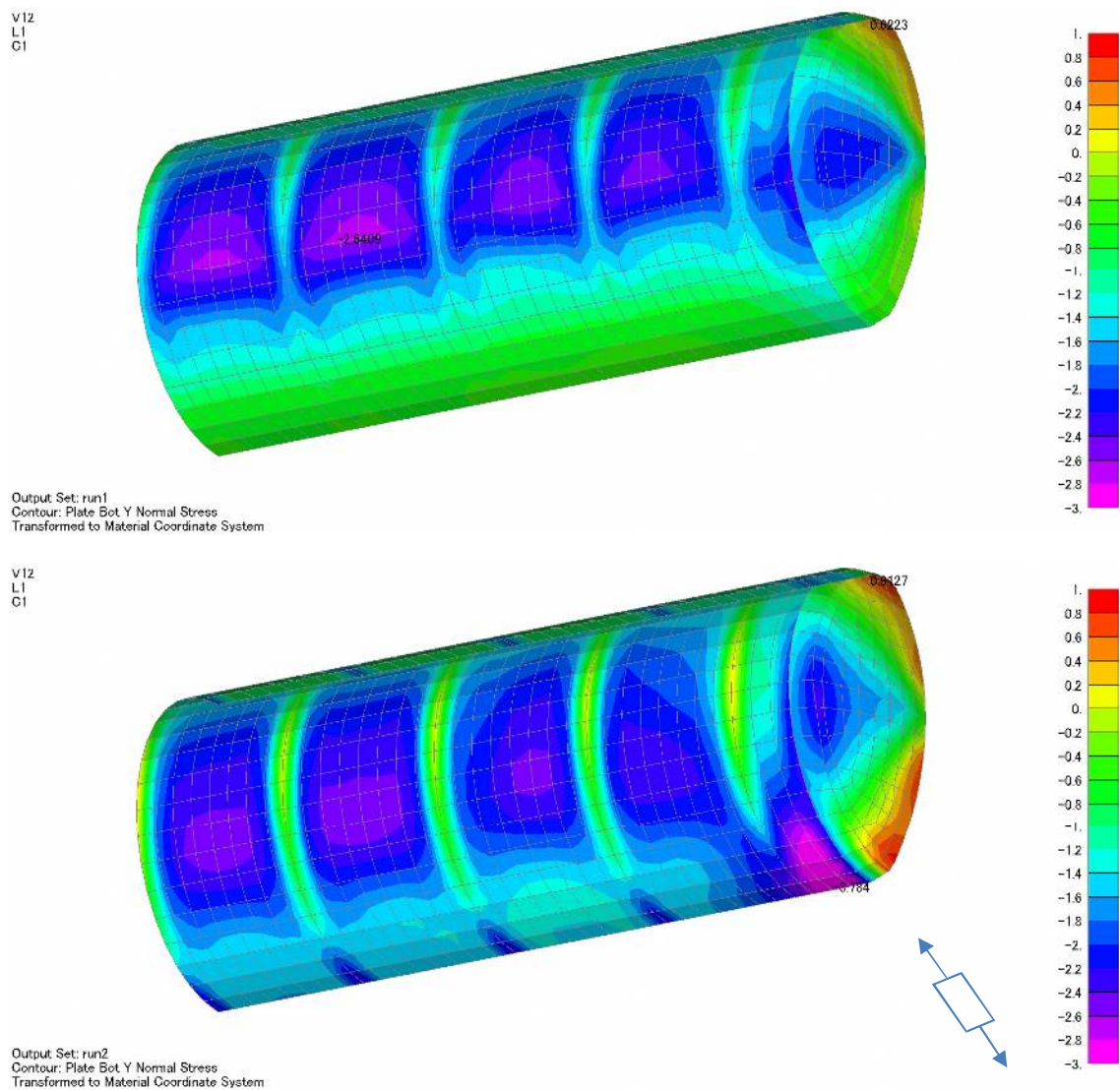


図3. 11. 11 タンク内周方向応力（上：run1 下：run2 [MPa]）

底面付近ではスティフナーにより周方向に圧縮される方向の応力が発生している。

イ 上載荷重設定結果

上載荷重のみによる変形図を図3.11.12から図3.11.13に示す。run4は荷重載荷部の変形が大きいため、変形倍率を10倍に設定している。

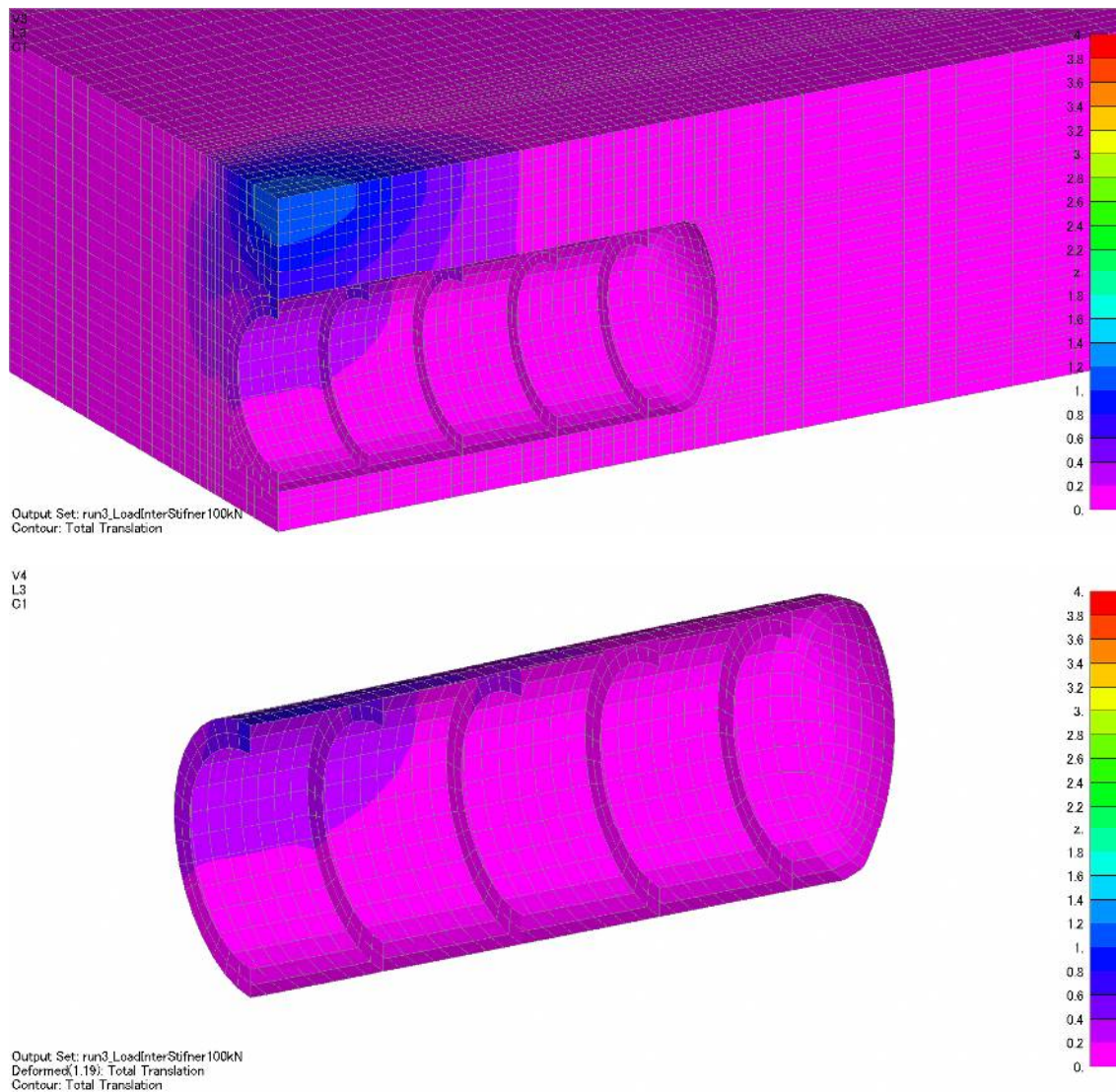


図3.11.12 変形図 (run3 変形倍率 100倍 [mm])

ふたがある run3 では変形は少なく、タンクの変形量は 1mm 未満である。

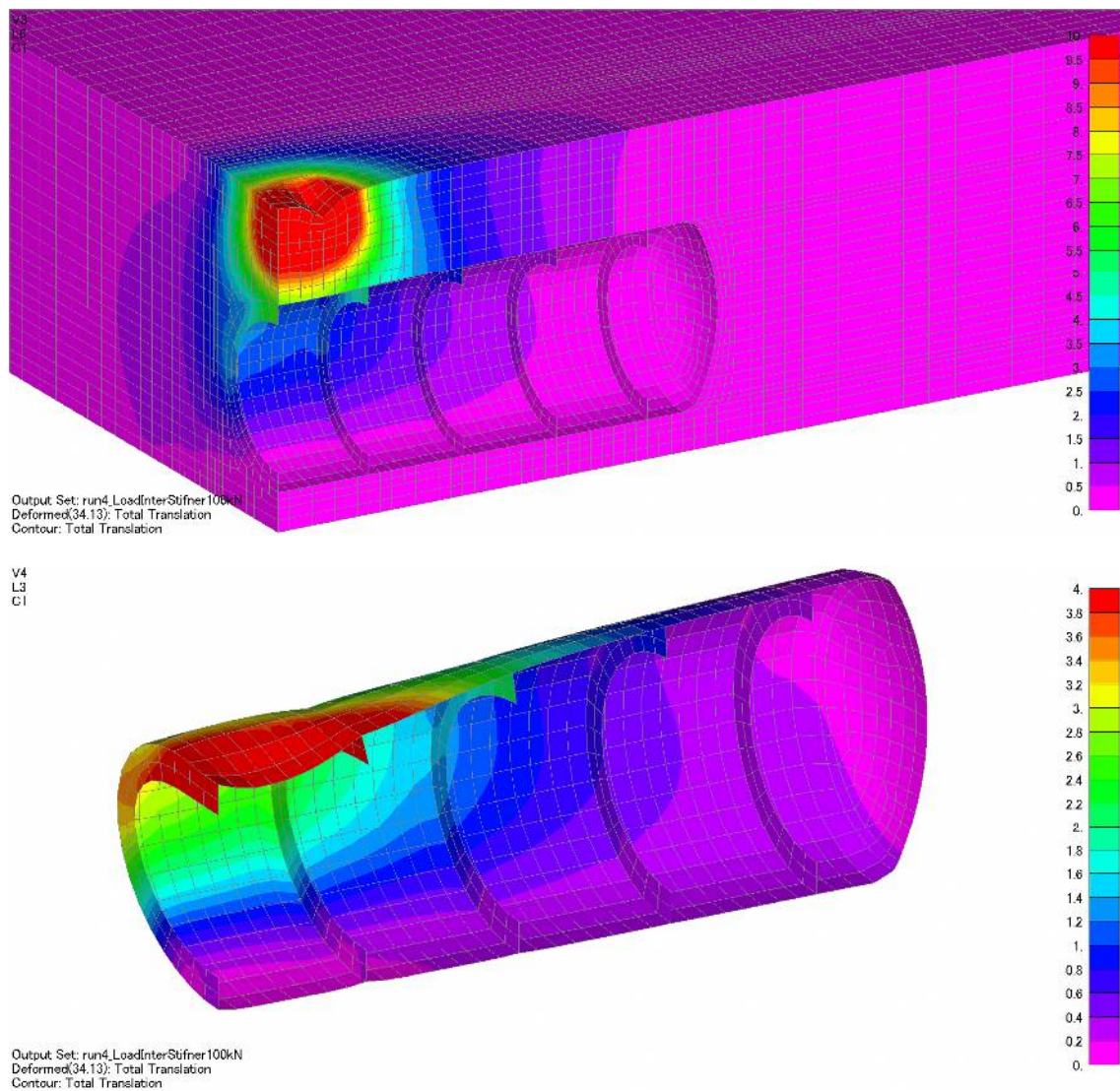


図3. 1 1. 1 3 変形図 (run4 上: 変形倍率 10 倍 下: 変形倍率 100 倍 [mm])

ふたがない run4 では上載荷重の載荷部分を中心に变形しており、タンクの変形量は最大で約 7mm となっている。

ウ タンクの変形量

タンクの変形量を図3. 11. 14及び表3. 11. 12から表3. 11. 14に示す。

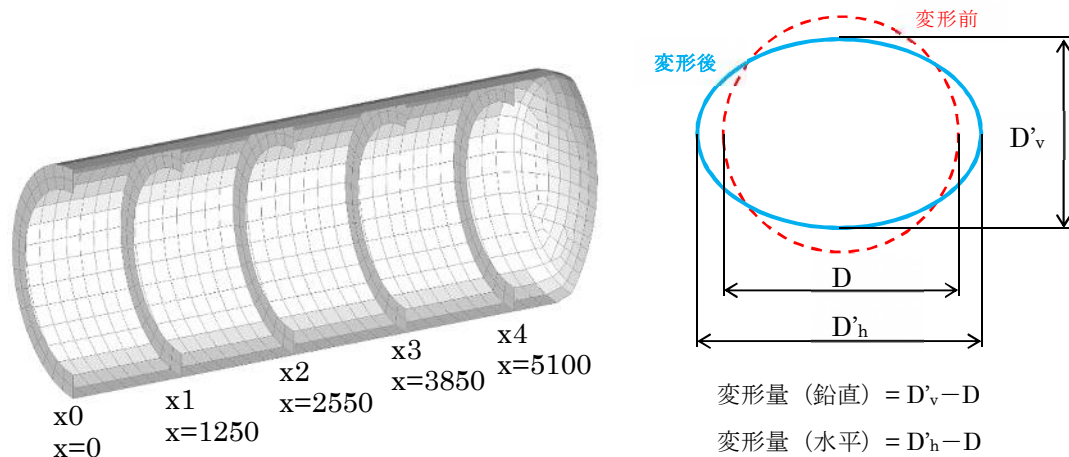


図3. 11. 14 変形量の定義

表3. 11. 12 自重解析タンク変形量[mm]

	方向	x0 x=0	x1 x=1250	x2 x=2550	x3 x=3850	x4 x=5100	最大値
run1	鉛直	-2.38	-2.36	-2.35	-2.23	-1.78	-2.38(x=x0)
	水平	2.40	2.27	2.30	2.15	1.62	2.43(x=2875)
run2	鉛直	-5.57	-5.51	-5.50	-5.15	-3.69	-5.57(x=x0)
	水平	5.37	5.20	5.23	4.86	3.25	5.37 (x=x0)

表3. 11. 13 上載荷重設定時のタンク変形量（自重解析による変形量は含まない）[mm]

	方向	x0 x=0	x1 x=1250	x2 x=2550	x3 x=3850	x4 x=5100	最大値
run3	鉛直	-0.65	-0.53	-0.31	-0.12	-0.03	-0.65(x=312.5)
	水平	0.57	0.48	0.28	0.11	0.03	0.57 (x=x0)
run4	鉛直	-6.56	-4.84	-2.16	-0.87	-0.27	-7.06(x=312.5)
	水平	5.52	4.23	2.05	0.84	0.26	5.52 (x=x0)

run2の変形量はrun1の倍以上となっており、周辺埋戻土、砕石の変形係数の影響が大きい事がわかる。鉛直方向は圧縮（負値）、水平方向は膨張（正値）となっており、扁平に変形している。x0～x4の軸方向の位置では、中央（x0）に近づくほど変形量が大きくなっている。

run3は最大で1mm未満、run4では最大で約7mm（鉛直方向の圧縮）となっており、ふた・支柱がある場合には上載荷重の影響は僅かであることがわかる。

run3、run4 と自重解析結果の run2 を重ね合わせた場合の変形量を以下に示す。

表 3. 11. 14 上載荷重設定時のタンク変形量（自重解析による変形量を含む）[mm]

	方向	x0 x=0	x1 x=1250	x2 x=2550	x3 x=3850	x4 x=5100	最大値
run3	鉛直	-6.22	-6.05	-5.81	-5.27	-3.72	-6.22(x=x0)
	水平	5.94	5.68	5.51	4.97	3.27	5.94 (x=x0)
run4	鉛直	-12.13	-10.35	-7.66	-6.03	-3.96	-12.13(x=x0)
	水平	10.89	9.44	7.29	5.70	3.51	10.89(x=x0)

自重と上載荷重の両方の影響を考慮すると、ふた・支柱がある場合は最大で 6mm 強、ふた・支柱が無い場合は最大で 12mm 強の鉛直方向の圧縮変形が発生している。

エ 自重+上載荷重解析結果

上載荷重を設定した run3、run4 と自重解析結果 (run2) と重ね合わせた結果図 3. 11. 15 から図 3. 11. 18 を示す。

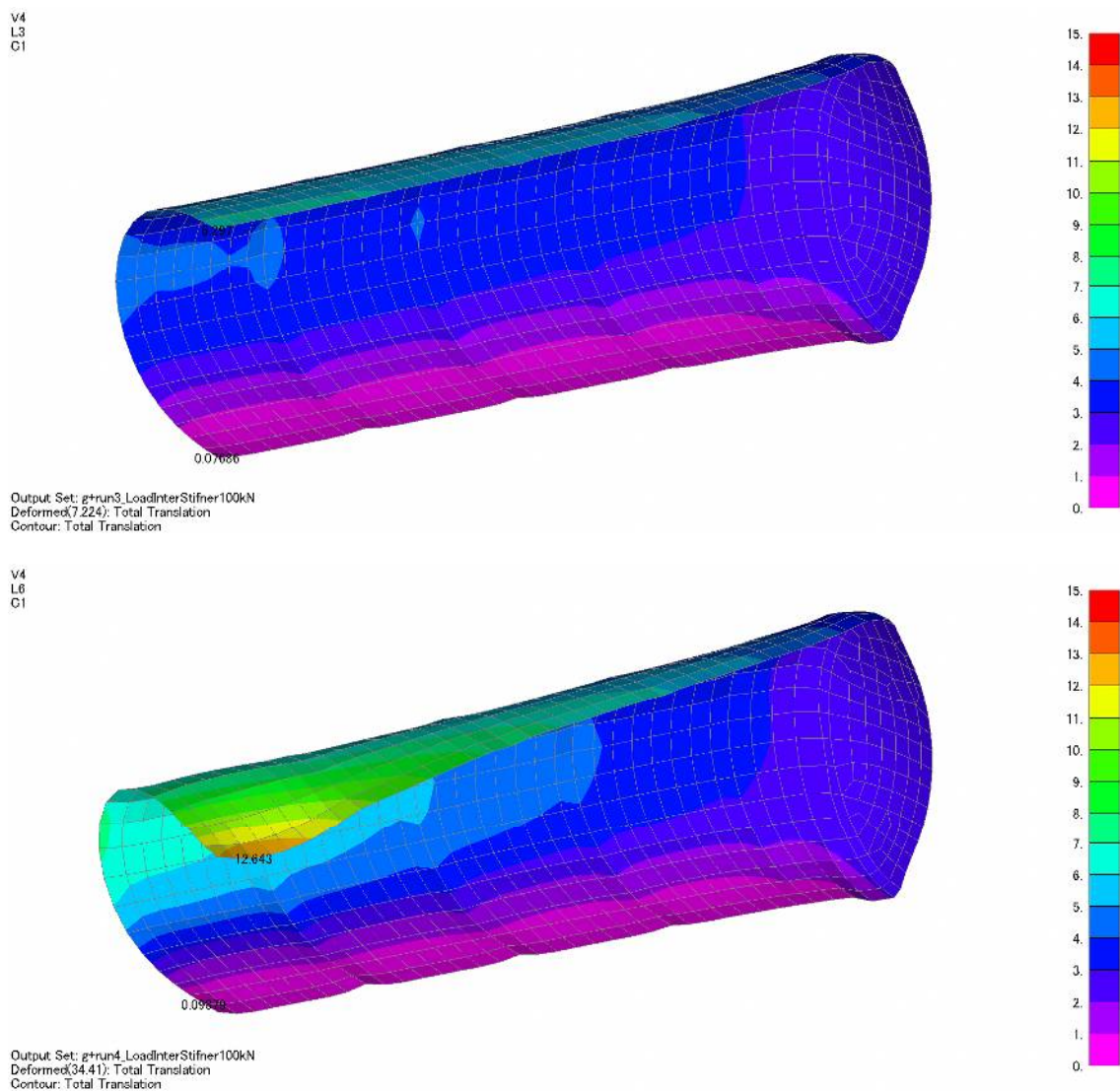


図 3. 11. 15 タンク変形図 (上: run3 下: run4 変形倍率 100 倍 [mm])

ふた・支柱の物性を埋戻土の変形係数と同じにした run4 では、大きめの変形が発生しており、载荷部の下側のタンクの変形が大きい。スティフナー下部で浮き上がるような変形が発生している。

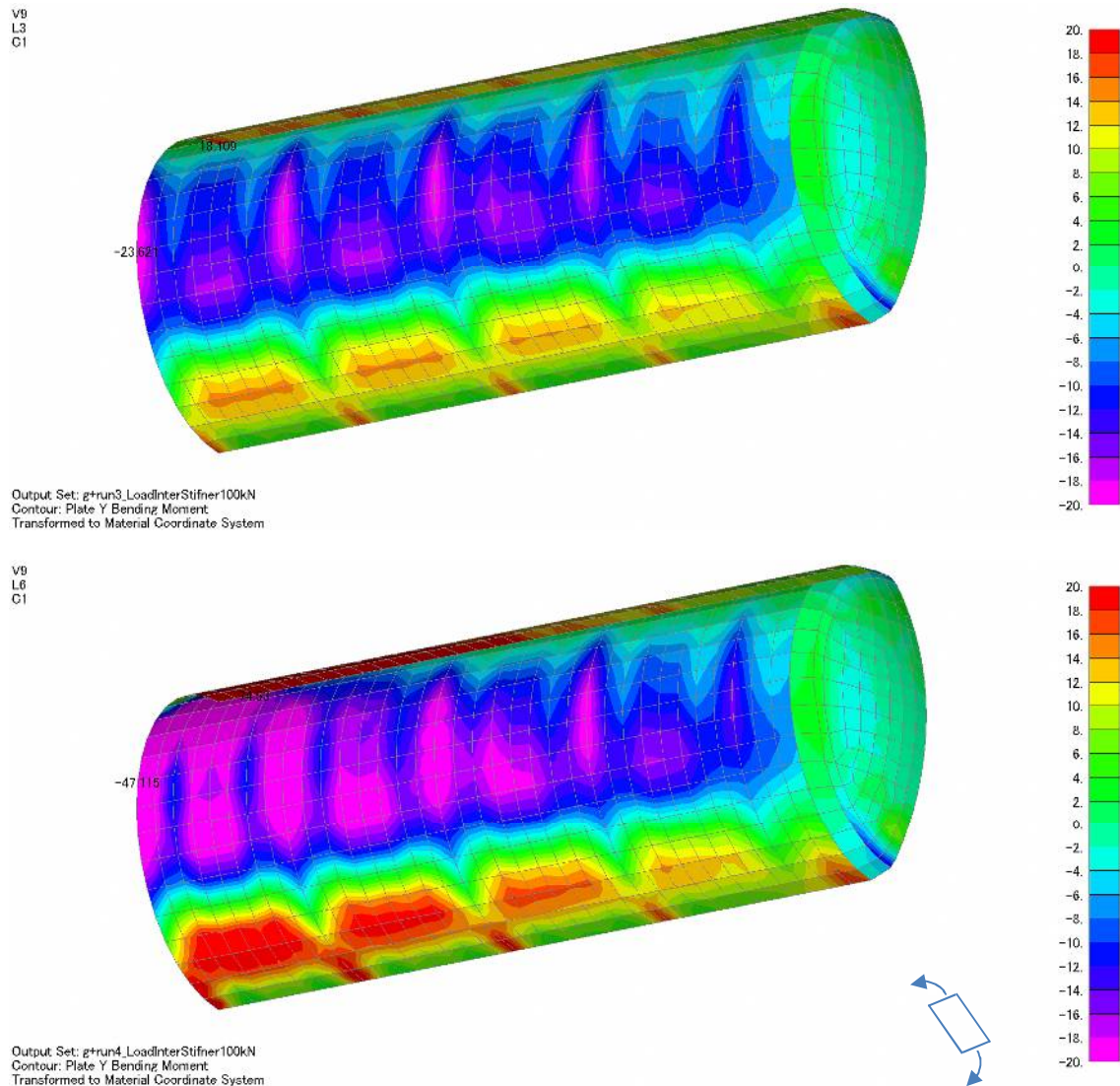


図3. 11. 16 タンク内周方向曲げモーメント (上: run3 下: run4 [N・mm])

ふた・支柱の物性を埋戻土の変形係数と同じにした run4 では、基本的な傾向は荷重載荷部の下側を除いて run3 と同様であるが、run3 に比べて大きな曲げモーメントが発生している。

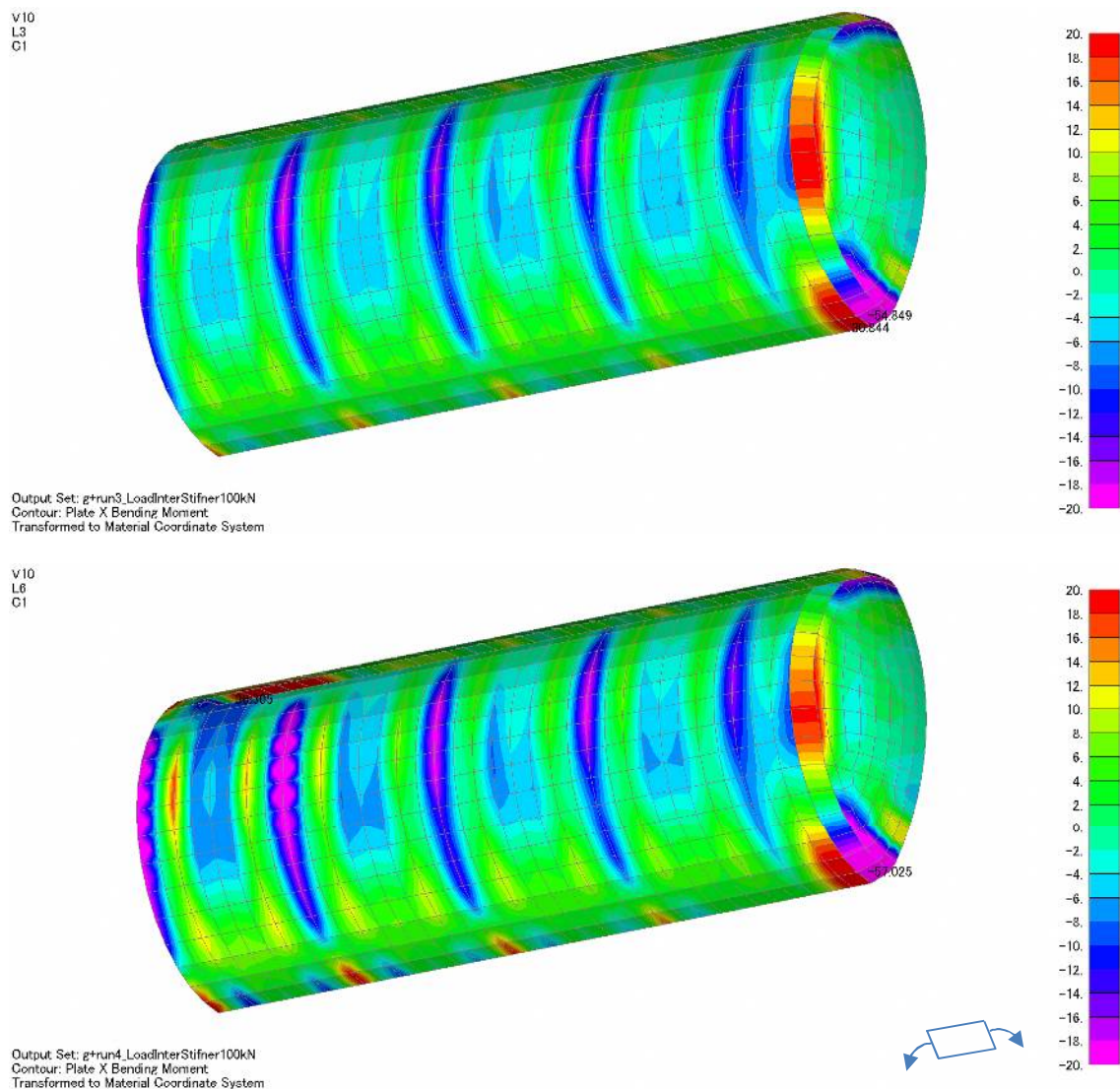


図3. 11. 17 タンク内軸方向曲げモーメント（上：run3 下：run4 [N・mm]）

ふた・支柱の物性を埋戻土の変形係数と同じにした run4 では、基本的な傾向は荷重載荷部の下側を除いて run3 と同様であるが、run3 に比べて大きな曲げモーメントが発生している。

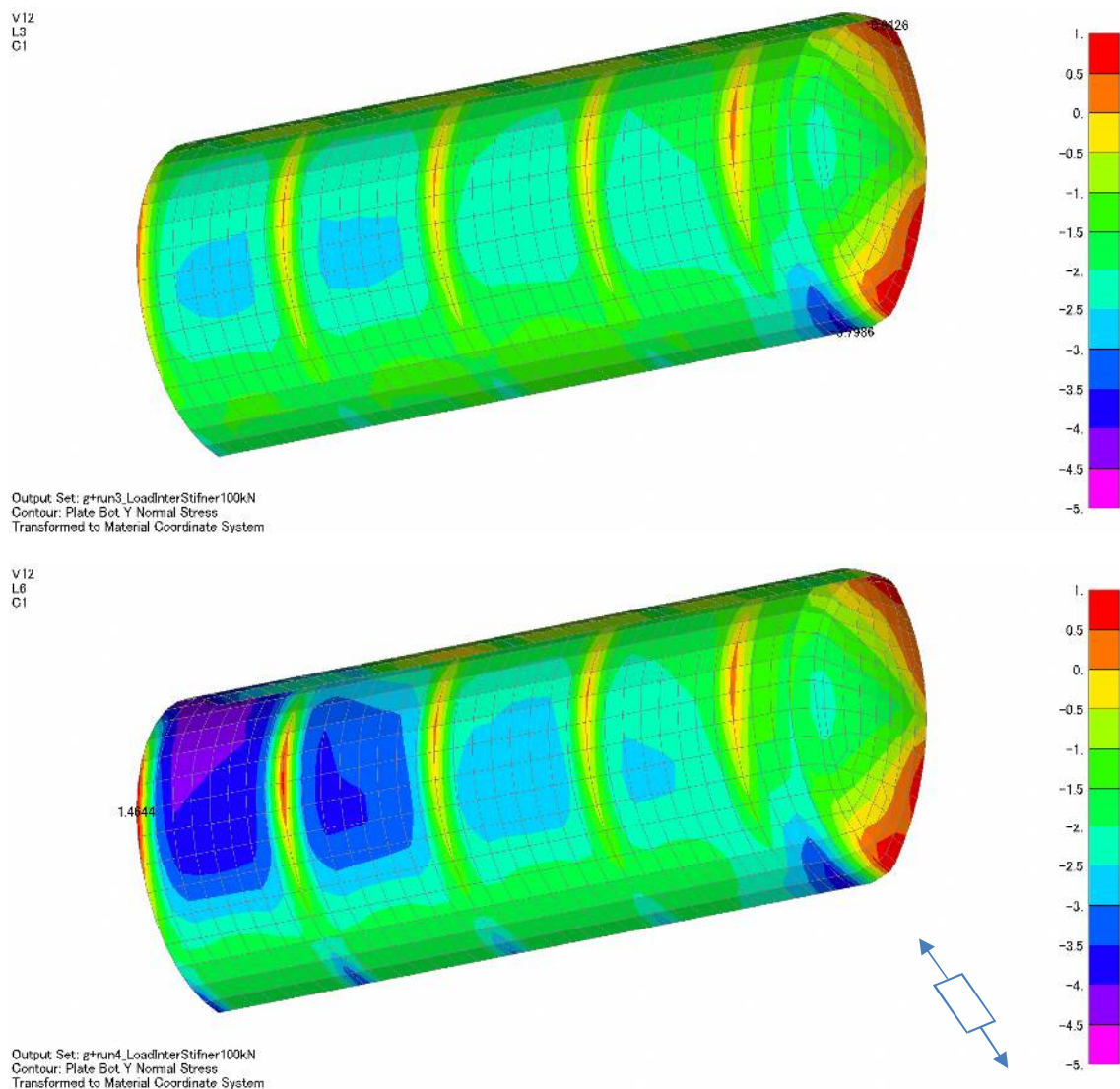


図3. 11. 18 タンク内周方向応力（上：run3 下：run4 [MPa]）

ふた・支柱の物性を埋戻土の変形係数と同じにしたrun4では、底面下部のステイフナー付近で圧縮方向の周方向応力が発生している。

(4) まとめ

ア 埋戻土・砕石の変形係数について

埋戻土・砕石の変形係数が、表 3. 1 1. 1 5 のような設定値 (run1) の場合は、タンク底面付近での曲げモーメントや応力値はあまり大きくないが、埋戻土、砕石の変形係数を N 値=3 に相当する 8,400[kN/m²]にすると (run2) (表 3. 1 1. 1 6)、タンク底面付近でスティフナーの影響により大きな曲げモーメントや応力値が発生する事がわかった。

表 3. 1 1. 1 5 地盤物性 (通常の設定値 : run1)

地盤	地盤種	N 値	地下水面 以下単位 体積重量 [kN/m ³]	地下水面上 単位体積 重量 ρ [kN/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
埋戻土	砂	5	19.5	17.5	14,000	0.35	0.35
砕石	砕石	40	21.0	19.0	112,000	0.35	0.35

表 3. 1 1. 1 6 地盤物性 (実測値 : run2 以降)

地盤	地盤種	N 値	地下水面 以下単位 体積重量 [kN/m ³]	地下水面上 単位体積 重量 ρ [kN/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
埋戻土	砂	3	19.5	17.5	8,400	0.35	0.35
砕石	砕石	3	21.0	19.0	8,400	0.35	0.35

イ 車両総重量 25tf の大型車の輪荷重相当の上載荷重を与えた場合でも、ふた・支柱が存在している場合 (run3)、タンクの変形は自重による変形を除くと 1mm 未満に抑えられ、自重による変形を加えると最大で 6mm ほど鉛直方向に圧縮されると予想された。ふた・支柱が無い場合 (run4) には、変形量が増加し、最大で 12mm ほど鉛直方向に圧縮される結果となった。

ウ 破損と同程度の変形が生じる上載荷重

3. 4 F F 二重殻タンクの変形状況調査においてタンク内レーザー測長結果によると、破損したタンクの変形量は表 3. 1 1. 1 7 のとおりであった。

表 3. 1 1. 1 7 タンク内レーザー測長結果

タンク	位置	計測結果[mm]		変形量[mm]	
		縦	横	縦	横
KHK658	周断面 1	2369	2429	-31	+29
	周断面 2	2373	2433	-27	+33
KHK659	周断面 1	2368	2432	-32	+32
	周断面 2	2374	2426	-26	+26
KHK660	周断面 1	2375	2431	-25	+31
	周断面 2	2382	2422	-18	+22
KHK1363	周断面 1	2379	2423	-21	+23
	周断面 2	2378	2424	-22	+24
KHK1366	周断面 1	2383	2397	-17	-3
	周断面 2	2368	2421	-32	+21
KHK1367	周断面 1	2381	2394	-19	-6
	周断面 2	2381	2423	-19	+23

解析結果では、ふた・支柱が正常の場合には最大で鉛直方向に 6mm 程度の圧縮、ふた・支柱が無い場合には、最大で鉛直方向に 12mm 程度の圧縮となる。本解析で用いた上載荷重では、破損したタンクの変形量を再現しておらず、2 倍程度の上載荷重が必要で有ることがわかった。

エ 最大変形量・曲げモーメント・応力値

run3、run4 の最大変形量・曲げモーメント・応力値を以下にまとめる。本モデルでは変形量が実測値に比べて少なめに評価されており、また応力値についても引張強さ（周方向 180MPa、軸方向 77MPa）に比べて小さい値となっている。（表 3. 1 1. 1 8 参照）

表 3. 1 1. 1 8 最大変形量・曲げモーメント・応力値（上段：最大 下段：最小）

run	変形量[mm]		曲げモーメントによる 応力[MPa]*		応力[MPa]		
	鉛直方向	水平方向	周方向	軸方向	周方向	軸方向	せん断
run3	-6.22	5.94	0.52	0.89	0.91	1.14	1.51
			-0.68	-1.59	-3.80	-3.22	-1.03
run4	-12.13	10.89	2.16	1.05	1.46	1.57	2.14
			-1.36	-1.65	-4.52	-3.37	-2.94

*曲げモーメントを断面係数により応力に換算

3. 1 2 調査・分析結果のまとめ

3章で調査・分析した結果について、まとめを以下のとおり示す。

(1) 製造時及び埋設施工時の状況確認 (3. 1)

破損タンクの板厚は設計値以上で製造されており、水圧試験においても異常は確認されなかった。また、埋設施工に関する資料は確認できなかった。

(2) ボーリング調査 (3. 2)

ア 静岡県と神奈川県のボーリング調査において、土壌構成は砂質で標準貫入試験を実施したところ、N値は2から3程度であった。

イ 神奈川県の現場確認において、充填碎石部分が手で容易に崩すことができる状況であった。

ウ 新潟県の現場確認において、N値は0から2であり、埋土は指針に示された材料が使用されておらず、締め固めが不十分であり、タンクが変形しやすい埋設状況であったと考えられた。

エ 新潟県の現場確認において、充填碎石に相当する部分はタンクを持ち上げた後に崩れていく状況であった。

(3) 採取した土壌に対する粒度分布分析 (3. 3)

ア 静岡県から採取した土壌のうち、孔番No. 1から孔番No. 3及び孔番No. 5の土壌は細礫分(粒径2～4.75mm)が多く、孔番No. 4の土壌は粗砂分(粒径0.85～2mm)が多く分布していた。

イ 神奈川県で採取した土壌は広い粒径範囲で分布していた。

(4) FF二重殻タンクの変形状況調査 (3. 4)

ア 破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量を比較した結果、埋設施工を指針どおりに行えば、変形量が少なくなることが推定された。

イ 破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量を比較すると、概ね指針どおりの碎石基礎による施工がされたと考えられる立ち会いタンクは支持碎石及び充填碎石の部分において基準円半径を大きく逸脱していない。一方で、破損タンク等は基準円半径から大きく逸脱し、特に支持碎石の範囲で基準円から減少(扁平)していた。

(5) 空隙状況調査 (3. 5)

破損タンク等については、支持碎石の部分に断続的に空隙が確認され、一部の充填碎石の部分にも空隙が確認された。一方、立ち会いタンク等については、支持碎石の部分において270度のラインを含めて連続的に空隙が存在していることが確認された。

(6) 破損タンク試験片の状況調査 (3. 6)

破損タンク試験片の外観からは検知層の柱状構造が破損、検知層の潰れ、連通孔付近の変色が確認された。

(7) 検知層に関する調査・分析 (3. 7)

破損タンクの試験片において、き裂周辺における検知層の状況を確認すると、圧縮方向に力をかけて壊した試料が最も近い状況と考えられた。

(8) 材料試験による分析 (3. 8)

ア 実施した曲げ試験の結果(平均値)のうち、最も低い値と型式試験時の設計値を比較すると、曲げ弾性率の保持率が32.9%、曲げ強さの保持率が68.3%であった。

イ 荷重-変位線図の荷重変位曲線が荷重最大値に達する前において、荷重の落ち込みや荷重変位曲線の傾きが変化する状況が確認された。

ウ 荷重最大値や荷重変位曲線の傾きにばらつきがあることが確認された。

(9) 非破壊検査による分析 (3. 9)

ア き裂が確認された試験片は、いずれも連通孔付近(AまたはBの位置)から採取したものであった。また、漏えいが確認された連通孔付近以外から採取した試験片においても、き裂が認められた。

イ き裂の位置を詳細に確認すると、いずれも連通孔近傍におけるスティフナー下部の位置で内殻検知層側に発生しており、き裂の方向を確認すると周方向に発生していた。

ウ 底部に位置する試験片(A、Bの位置)において、き裂が確認された試験片は検知層のガラス繊維が不規則に配列していた。

エ き裂が確認された試験片に対して軸方向断面を確認したところ、内殻が外殻と比較して湾曲していることが確認された。また、周方向断面から内殻と外殻の間隔を確認したところ、スティフナー下部の方が連通孔下部よりも狭くなっていることが確認された。

(10) 電子顕微鏡による断面観察 (3. 10)

ガラス繊維について、著しい偏り等の異常は確認されなかった。

(11) 有限要素法による解析 (3. 11)

ア 埋戻土、碎石のN値を小さく設定すると、スティフナーが設置されている部分のタンク底部において、大きな曲げモーメントや応力値が発生することが確認された。

イ 車両総重量25tfの大型車の輪荷重相当の上載荷重を与えた場合、ふた・支柱が正常の場合には最大で鉛直方向に6mm程度の圧縮、ふた・支柱が無い場合には、最大で鉛直方向に12mm程度の圧縮となる。本解析で用いた上載荷重では、破損したタンクの変形量(30mm程度)を再現しておらず、2倍程度の上載荷重が必要であることが確認された。

第4章 破損要因の検討

前章の調査・分析から得られた結果から破損要因及び破損原因を検討する。

4.1 破損要因の検討

(1) 埋設及び変形状況に関する要因

埋設及び変形状況に関する調査結果から、破損要因と考えられる項目を以下に示す。

ア ボーリング調査（第3章3.2）

(ア) 静岡県と神奈川県におけるボーリング調査において、標準貫入試験を実施しところ土壌構成は砂質であり、N値は2から3程度であった。

標準貫入試験結果による砂の相対密度を表4.1.1、N値と粘土コンシステンシー及び一軸圧縮強さの関係を表4.1.2に示す。

表4.1.1 標準貫入試験結果による砂の相対密度

N値	相対密度
0～4	極めて緩い
4～10	緩い
10～30	中位
30～50	密に締まっている
50以上	極めて密である

(出典：N値の話 理工図書株式会社 1998年)

表4.1.2 N値と粘土コンシステンシー及び一軸圧縮強さの関係

コンシステンシー	極めて軟らかい	軟らかい	中位	硬い	極めて硬い	極度に硬い
N	< 2	2～4	4～8	8～15	15～30	30<
q _u (N/mm ²)	< 0.025	0.025 ～0.05	0.05～ 0.10	0.10～ 0.20	0.20～ 0.40	0.40<

(出典：N値の話 理工図書株式会社 1998年)

(イ) 神奈川県での現場確認において、充填砕石部分が手で容易に崩すことができる状況であった。

(ロ) 新潟県の現場確認において、充填砕石に相当する部分はタンクを持ち上げた後に崩れていく状況であった。

イ FF二重殻タンクの変形状況調査（第3章3.4）

破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量を比較すると、概ね指針どおりの砕石基礎による施工がされたと考えられる立ち会いタンクは支持砕石及び充填砕石の

部分において基準円半径を大きく逸脱していない。一方で、破損タンクは基準円半径から大きく逸脱し、特に支持砕石の範囲で基準円から減少（扁平）していた。

ウ 空隙状況調査（第3章3.5）

破損タンク等については、支持砕石の部分に断続的に空隙が確認され、一部の充填砕石の部分にも空隙が確認された。一方、立ち会いタンク等については、支持砕石の部分において270度のラインを含めて連続的に空隙が存在していることが確認された。

アに示すボーリング調査結果から、破損タンク等については砕石基礎がいずれも平成8年10月18日付け消防危第127号「地下貯蔵タンクの砕石基礎による施工方法について」（平成12年全面改正、平成17年一部改正）に示されている内容のうち、施工に関する指針どおりに締め固めされた状況ではなかったと考えられる。この様な状況においては、イに示す変形状況調査結果のようにタンクが支持砕石範囲で変形することが考えられ、ウに示す空隙状況調査結果のようにタンクと砕石基礎の間における空隙が広がってしまう可能性が考えられる。

以上のことから、地下貯蔵タンクの砕石基礎による施工方法のうち、施工に関する指針に示されている締め固め状況がタンクの変形に影響することが推測される。

(2) 材料試験結果から考えられる要因（第3章3.8）

実施した曲げ試験の結果（平均値）のうち、最も低い値と型式試験時の設計値を比較すると、曲げ弾性率の保持率が32.9%、曲げ強さの保持率が68.3%である。タンク材料の弾性率不足はタンクの変形に、強さ不足は破損に影響すると考えられる。

(3) 連通孔近傍の状況から考えられる要因

以下に示すアからウの調査・分析結果から、スティフナーが設置されている部分、特に連通孔近傍における内殻において応力集中が発生したことが考えられる。

ア 検知層に関する調査・分析（第3章3.7）

き裂周辺における検知層の状況を確認すると、圧縮方向に力をかけて壊した試料が最も近い状況と考えられた。

イ 非破壊検査による分析（第3章3.9）

(ア) き裂の状況について

漏えいのあった試験片について分析すると、き裂は連通孔近傍におけるスティフナー下部の位置で内殻検知層側に確認された。

(イ) 検知層の状況

底部に位置する試験片（A、Bの位置）において、き裂が確認された試験片は検知層のガラス繊維が不規則に並んでいた。

(ウ) 内殻と外殻の形状について

き裂が確認された試験片に対して軸方向断面を確認したところ、内殻が外殻と比較して湾曲していることが確認された。また、周方向断面から内殻と外殻の間

隔を確認したところ、スティフナー下部の方が連通孔下部よりも狭くなっていることが確認された。

ウ 有限要素法による解析（第3章3. 1 1）

埋戻土、砕石のN値を小さく設定すると、スティフナーが設置されている部分のタンク底部において、大きな曲げモーメントや応力値が発生することが確認された。

4. 2 破損原因の検討

前節において抽出された要因から、考えられる破損までのシナリオを以下に示す。(図4. 2. 1 参照)

シナリオ① -タンクの変形-

砕石基礎による施工が指針どおりの締め固め状況ではないこと（図4. 2. 1 考察①）に加え、タンク材料の弾性率不足の要因（図4. 2. 1 考察②）が複合的に作用したことにより、タンク本体に負荷される荷重等によってタンクが大きく変形した（図4. 2. 1 考察③）。



シナリオ② -タンク底部の偏平-

タンク底部のうち、支持砕石及び充填砕石部分は偏平するが、スティフナーが設置されている部分は正円（スティフナーの形状）を保とうとする（図4. 2. 1 考察④）。



シナリオ③ -構造不連続部分における応力集中の発生-

連通孔近傍では、内殻の変形をスティフナーが拘束することにより、内殻とスティフナー連通孔における構造不連続部分で応力が集中する（図4. 2. 1 考察⑤）。



シナリオ④ -内殻に対する応力集中-

応力集中によって、連通孔近傍において内殻に局所的な応力が発生する（図4. 1. 1 考察⑥）。



シナリオ⑤ -破損-

局所的な応力及びタンク材料強さが不足している影響（図4. 2. 1 考察⑦）から、内殻のスティフナー下部に発生した局所的な応力が設計値よりも低い材料強度を上回ることによりに内殻が破損し、検知液が内液側に漏えいしたものと考えられる。

今回の破損事案は砕石基礎による工法とF F二重殻タンク材料強さ等の影響によってタンクが大きく変形したことにより、内殻とスティフナー連通孔の構造不連続部分に応力が集中し、局所的な応力が内殻に発生したことにより破損に至ったものと考えられる。

なお、当該タンクは構造設計時において、構造不連続部分の応力集中については考慮されていない。

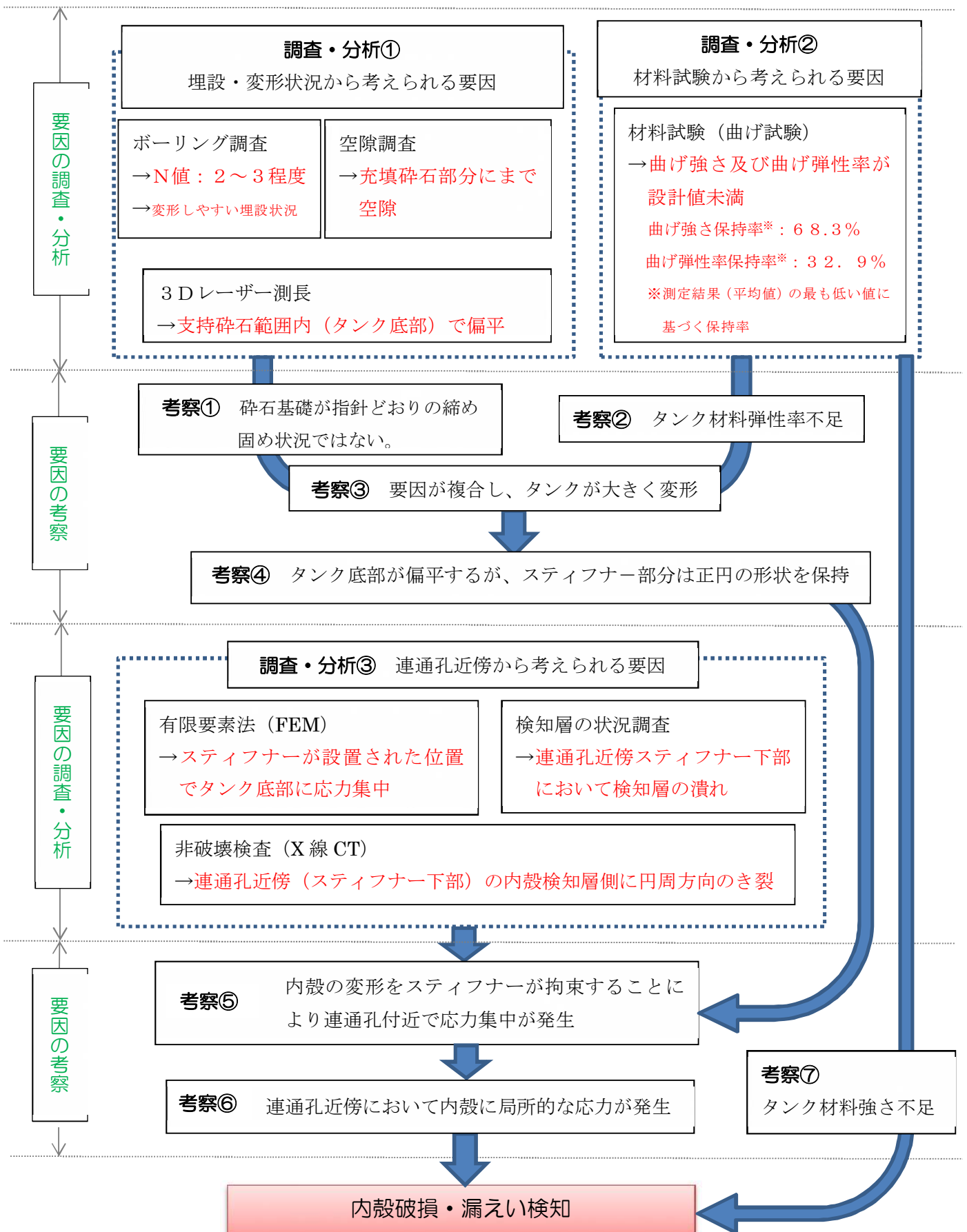


図4. 2. 1 破損原因の検討（概略図）

第5章 破損要因の検討から確認された問題点

調査・分析結果及び破損要因の検討において、確認された問題点を以下のとおり示す。

5. 1 砕石基礎による工法に関する問題

破損タンク等のボーリング調査結果（標準貫入試験、埋設状況、砕石材料）、破損タンク等と立ち会いタンク等の変形量の比較結果（タンク底部の変形）及び破損タンク等と立ち会いタンク等における支持砕石・充填砕石との空隙状況（底部から充填砕石範囲までの空隙）の比較結果から、砕石基礎が平成8年10月18日付け消防危第127号「地下貯蔵タンクの砕石基礎による施工方法について」（平成12年全面改正、平成17年一部改正）に示された指針どおりに施工されていないことが、破損タンク等が変形した要因の一つと考えられる。

また、有限要素法の解析において、変形状況調査結果の破損タンク変形量（30mm程度）を再現するには過酷条件（ふた・ふた支柱なし、上載荷重、N値=3）における上載荷重が2倍程度必要となることから、据付時のタンクに対して過大な荷重が負荷された可能性がある。

FF二重殻タンクを埋設する際に、砕石基礎による工法が指針どおりに施工されていない場合や据付時のタンクに対する安全管理が行われていない場合には、破損の要因となるようなタンクの変形を発生させる可能性がある。

5. 2 応力集中に関する問題

破損要因の検討において、タンクが大きく変形、特に底部が偏平したことから、内殻とスティフナー連通孔の構造不連続部分で応力が集中し、局所的な応力が内殻に発生したことにより破損に至ったものと考えられた。破損タンクは構造設計時において、構造不連続部分の応力集中については考慮されていない。タンクの変形する大きさや形状によっては、構造不連続部分において応力集中により破損する可能性がある。

5. 3 材料試験の結果から確認された問題

神奈川県破損タンクから採取した一体構造の試験片に対して材料試験を実施したところ、曲げ試験の荷重－変位線図において、荷重最大値に達する前に小さな荷重の落ち込みや荷重変位曲線の傾きが変化しているものが確認された。また、試験結果から荷重最大値や荷重変位曲線の傾きにばらつきや一部の材料強度が設計値未満であることが確認された。

材料試験では、荷重－変位線図上の荷重最大値を採用し、タンク材料強度に関する値を平均値を用いて算出しているが、荷重最大値に達する前の小さな荷重の落ち込み、荷重変位曲線の傾きの変化及びばらつきのある結果は想定しておらず、このようなことを想定していない現行の材料試験について見直す必要がある。

また、現行の材料試験の見直し結果を踏まえ、品質を確認する観点から品質管理のチェックの方法を見直す必要がある。なお、現行のチェックの方法は、製造タンクに対してF F二重殻タンクを構成する繊維強化プラスチック成形品の品質のばらつきを考慮し、タンクメーカーの協力により、全数検査を実施しているところである。

第6章 破損要因の検討を踏まえた提言

前章では、破損要因の検討から確認された問題点を示したが、本章ではその問題点に対する「破損要因の検討を踏まえた提言」を以下のとおり示す。(図6.1.1参照)

提言1 早急に対応すべき事項

FF二重殻タンクを埋設する際に砕石基礎が指針どおりに施工されていない場合は、破損の要因となるようなタンクの変形を発生させる可能性があるため、指針どおりに砕石基礎を施工することが必要である。また、地下埋設構造物であるFF二重殻タンクは埋設完了後に砕石の施工状況やタンクの状況を確認できないため、適切な施工管理を行うとともに、施工管理記録を確実に作成・保存することが必要である。

このことから、指針どおりの砕石基礎の施工方法及び適切な施工管理の徹底に向けた取り組みを実施するべきである。

このことを具現化するためには、FF二重殻タンクの埋設施工について、現場施工担当者等の施工管理記録を作成する立場にある者及び工事発注者等の施工管理記録を確認する立場にある者に対してFF二重殻タンクの構造、砕石基礎の施工方法、施工管理記録の作成方法等の解説を行う研修会を受講させることで、指針どおりの砕石基礎による施工方法及び適切な施工管理について周知することが望ましい。

また、FF二重殻タンクが埋設施工される危険物施設の許可権者である市町村長等(消防機関)に対して、砕石基礎による施工方法の重要性や完成検査時等の施工管理記録の活用方法について情報提供することも重要である。

提言2 今後の検討事項

危険物保安技術協会を中心に、引き続き検討していく必要がある項目を以下に示す。

(1) 構造設計上における応力集中に関する検討(検討事項1)

破損タンクは構造設計時において、構造不連続部分の応力集中については考慮されていない。タンクの変形する大きさや形状によっては、構造不連続部分において応力集中により破損する可能性がある。また、指針どおりに砕石基礎による施工を行ったとしても、タンクの変形が無くなるわけではない。

このことから、指針どおりの砕石基礎に埋設したタンクが変形する範囲において、安全性を確認するために、構造不連続部分の応力集中に関する検討の必要がある。

(2) 一体構造の試験片を用いた材料試験に関する検討(検討事項2)

一体構造の試験片を用いた材料試験の結果からは、荷重-変位線図における荷重変位曲線の変化(荷重の落ち込み、傾きの変化)、ばらつき及び材料強度の設計値未満が確認された。

このことから、荷重-変位線図の荷重最大値前における荷重変位曲線の変化(荷重の落ち込み、傾きの変化)があった箇所について着目し、破損状況(内殻または外殻に「き裂」等)を考慮した試験及び適正な荷重値の採用方法について検討する

必要がある。ばらつきのある結果については、一体構造の試験片を用いた材料試験に関する検討を実施するとともに、試験結果の値に対して精査する必要がある。

また、現行の材料試験の見直し結果を踏まえ、品質を確認する観点から品質管理のチェックの方法を見直す必要がある。

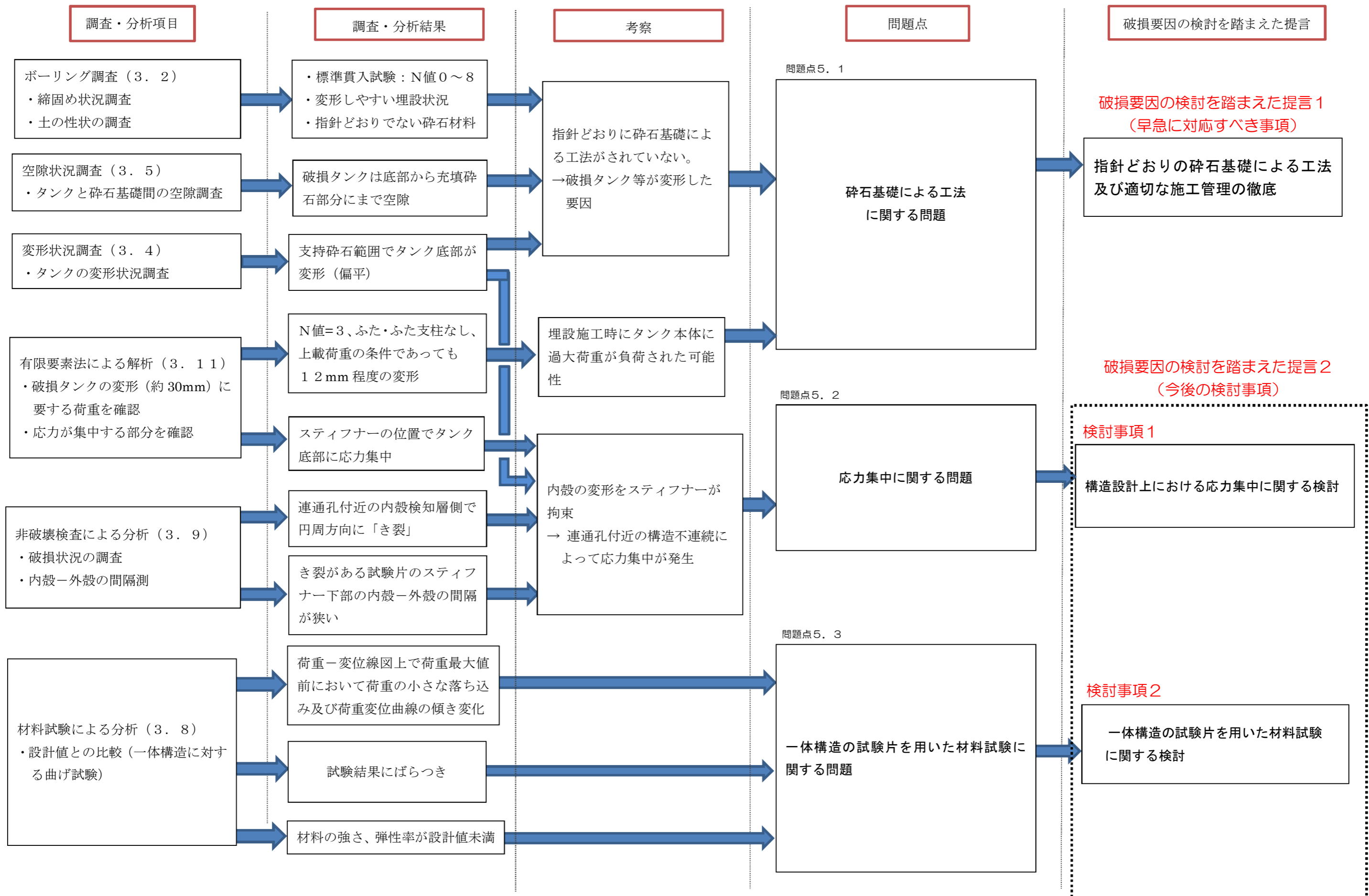


図6. 1. 1 問題点の整理と破損要因の検討を踏まえた提言について

第7章 まとめ

本検討ではF F 二重殻タンクの破損要因を様々な観点から調査・分析を行い、現状の問題点を抽出・整理を重ねてきたところである。

第2章では、調査対象としたF F 二重殻タンクの概要と漏えいに至るまでの経過を示した。

第3章では、破損タンクの製造時及び埋設施工時における状況調査を行った。埋設状況の調査として、ボーリング調査、変形状況調査、粒度分布調査及び空隙状況調査を行った。破損タンク本体については採取した試験片の状況調査を行うとともに、材料試験、非破壊検査及び電子顕微鏡による断面観察等の分析を行った。また、埋設状態から得られたデータ等を用いて、有限要素法による解析を行った。

第4章では、第3章で行った調査・分析結果から破損に関連する要因を抽出・整理し、破損原因の検討を行った。

第5章では、第3章で行った調査・分析結果及び第4章で検討された破損原因から確認された問題点の整理を行った。

第6章では、第5章で整理された問題点に対して、「破損要因の検討を踏まえた提言」の整理を行った。

本報告書において取りまとめた破損要因に関する検討が、今後の危険物保安技術協会におけるF F 二重殻タンクの評価に活用され、安全性の向上が図られることを期待する。