

# 鋼-コンクリートサンドイッチ構造を有する 地中タンクの地震時動的応答特性

奈良 敬\* , 村上茂之\*\* , 岡寄孝和\*\*\* , 岡田 豊\*\*\*\* , 大前伸友\*\*\*\*\*

\*工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

\*\*博士(工学) 岐阜大学講師 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)  
(現在, ベルギー王国リエージュ大学研究員)

\*\*\*工修 北川ヒューテック(株) (〒921-8027 金沢市神田1丁目13番1)

\*\*\*\*岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸1番1)

\*\*\*\*\*国土交通省中部地方整備局 (〒460-8514 名古屋市中区三の丸二丁目5番1号)

本研究では、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を側壁に採用した地中タンクの耐震性能の検討を行った。まず、タンク側壁に使用される実物大の鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材の板モジュールを製作し、地震時を考慮した繰返し曲げ載荷実験を実施して、タンク側壁部材の強度性能の検討を行った。一方、より信頼性の高い数値解析を行うため、実物大のタンクを製作し、このタンクに衝撃実験を実施して動的特性など諸条件のデータを収集するとともに、衝撃実験結果とそのシミュレーション結果を比較しながら解析モデルの検討を行った。次にその解析モデルを用いて地盤を考慮した地震時動的応答解析を行い、サンドイッチ構造を有する地中タンクの地震時安全性について検討した。

Key Words: composite tank, steel plate, test, seismic analysis

## 1. 緒言

地震時において、貯水タンクが漏水することなく、水密性を保持し続けることは、災害時の応急給水や、市民生活および都市機能を維持するという観点からも、貯水構造物にとって基本的課題である。

従来、他の構造と比較して低コストで建設できることなどから、貯水等を目的とする地中タンクの分野では、コンクリート製タンクが主流であるが、側壁に鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を採用することで、液密性、耐久性の優れた地中タンクの開発を進めている。このサンドイッチ構造部材は、外殻材である2枚の鋼板の間にコア材であるコンクリートを充填した合成構造部材であり、両者を鋼板に一定間隔で溶接されたスタッドボルトで一体化させて外力に対して抵抗する構造となっている。また、この構造は施工時において、スタッドボルトを機械化した作業で鋼板に溶接し、鋼板をそのままコンクリートの型枠として用いることができ、オープンケーソン工法を採用することで工期短縮が可能となる。タンクの内側にはステンレス鋼板 SUS304 を貼ることで、衛生的かつ耐食性に優れ、内容水が飲料水だけでなく工場排液などの汚水の貯留にも適したタンクである<sup>1)</sup>。

本研究では、このサンドイッチ構造部材を側壁に持つ

地中タンクの耐震性能の検討を行った。まず、タンク側壁に使用される実物大の鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材の板モジュールを製作し、地震時荷重を考慮した繰返し曲げ載荷実験を実施して、タンク側壁部材の強度性能の検討を行った<sup>2)</sup>。一方、より信頼性の高い数値解析を行うため、実物大のタンクを製作し、このタンクに衝撃実験を実施して動的特性など諸条件の基礎データを収集するとともに、衝撃実験結果とそのシミュレーション結果を比較しながら解析モデルの検討を行った。次に、その解析モデルを用いて地盤を考慮した地震時動的応答解析を行い、サンドイッチ構造を有する地中タンクの地震時安全性について検討した<sup>3)</sup>。これらについて考察した結果を報告する。

## 2. サンドイッチ合成板の繰返し曲げ載荷実験

### 2.1 実験方法および供試体

タンクの側壁に使用される実物大の鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材の板モジュールを製作し、地震時を考慮した繰返し曲げ載荷実験を行った。

4点載荷の載荷装置の概略図を図-1に、その実験装置の写真を図-2に示す。両端支点から丸鋼棒までの距離を2270mmとし、載荷はサーボ試験機を用いて荷重を載荷梁

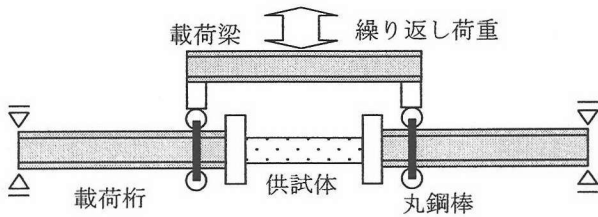


図-1 実験装置概略図

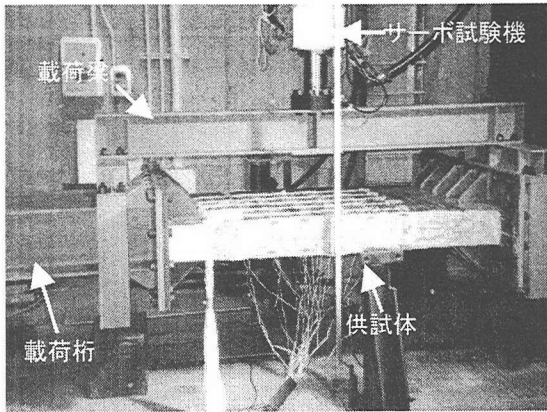


図-2 実験装置写真

表-1 供試体諸元

鋼板 (SS400)	寸法 (mm)	1524×900
	板厚 (mm)	9
コンクリート	降伏応力度 (MPa)	286
	厚さ (mm)	150
スタッド ボルト	基準強度 (MPa)	31.2
	配置間隔 (mm)	300
	長さ (mm)	130
	本数 (上)	15
	本数 (下)	8
	降伏応力度 (MPa)	411

から双方の丸鋼棒に均等に伝達することで供試体に一般的な繰返し曲げを与えた。

表-1 に 2 体の供試体「S30A-1」「S30A-2」の構造諸元を示す。スタッドボルト間隔については、鋼板の座屈防止、ならびにサンドイッチ合成構造としての合成効果確保の観点から、別途実施した鋼板の板厚とスタッドボルト間隔をパラメータとした弾塑性座屈解析、およびスタッドボルト配列もパラメータとした 42 体の供試体に対して実施した単調曲げ載荷実験の結果に基づいて決定した。繰返し荷重については、自重を考慮した荷重を一定振幅で漸増させながら載荷した。このとき漸増幅は 14.7kN、同一荷重の繰返し回数は 3 回、最大荷重は 147kN とした。

## 2.2 実験結果および考察

供試体中央に設置した変位計の計測結果では、図-3 に示すように荷重と変位の関係は常に線形関係を示した。図-3 の荷重変位関係において、一定荷重で変位の増減が

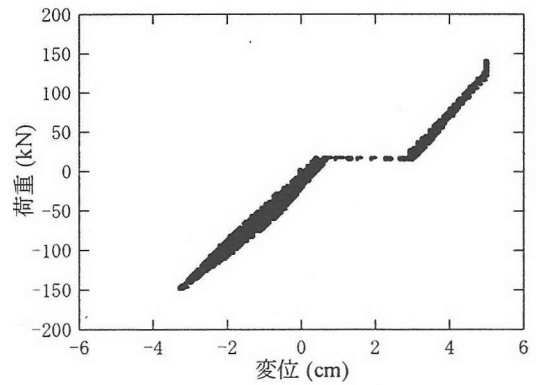


図-3 荷重-変位関係

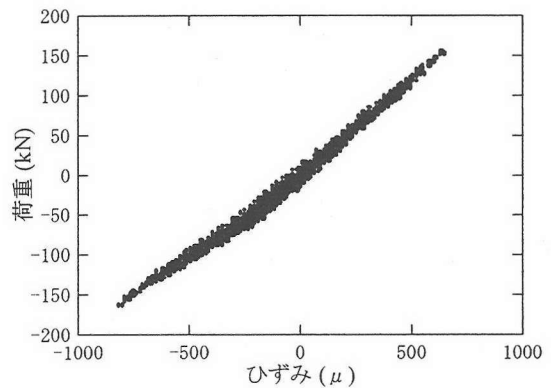


図-4 荷重-ひずみ関係の一例

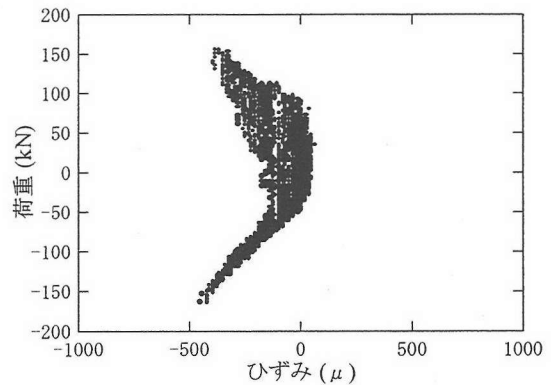


図-5 荷重-ひずみ関係  
(スタッドボルト直上)

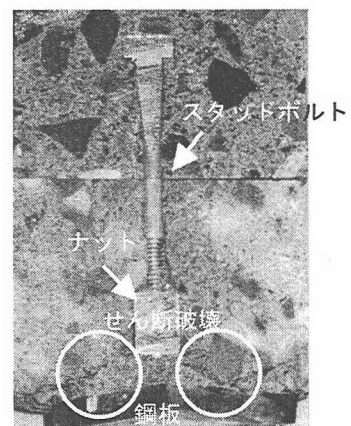


図-6 コアスタッド位置の供試体  
切断面 (せん断破壊)

見られるのは、荷重の正負が反転する際、供試体と載荷桁が上下の支点の間隔分だけ上下に移動するためである。載荷途中において、鋼板の局部座屈および供試体の破壊は認められず、鋼板の塑性化あるいは鋼板とコンクリートの剥離等に起因するサンドイッチ構造の明瞭な剛性低下も認められなかった。

一方、鋼板に貼付したひずみゲージの測定結果では、一般部では図-4 に示すような荷重-ひずみ関係であったが、支点に近い部分のスタッドボルト直上では、図-5 に示すような荷重-ひずみ関係となった。

実験終了後の供試体から直径 100mm の数本のコアを採取し、スタッドボルト近傍のコンクリートの状況を確認した。図-5 のような荷重-ひずみ挙動を示した箇所のうち 2 箇所図-6 に示すように、スタッドボルト途中のナットからせん断破壊を起こしていた。しかし、スタッドボルトと鋼板の接合は健全であり、図-3 から、合成板としては十分に機能していたといえる。なお、これら以外の箇所では図-6 に示す上述のような破壊は確認されなかった。

以上より、今回採用した鋼とコンクリートのサンドイッチ構造モジュールは、設計荷重作用下においては、強度に問題は無く、内部的な損傷が生じた後も構造体として剛性を維持しつづけることが期待できる。

### 3. 衝撃実験

鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を側壁に持つタンクの実物大のモジュールを製作し、このタンクに対して衝撃実験を実施した。この実験の目的は、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を側壁に持つタンク自体の動的特性を把握すること、および実験をシミュレーションすることで、信頼性の高い地震時動的応答解析に使用する解析モデルの検討を行うことである。

#### 3.1 実物大構造モジュール

鋼とコンクリートのサンドイッチ構造を側壁に持つタンクの実物大構造モジュールの概略図を図-7 に示す。寸法は内径 15m、深さ 5m、底板コンクリート厚 1m である。側壁のサンドイッチ構造部材は外殻材として板厚 9mm の鋼板、コア材として厚さ 150mm コンクリートを使用し、両者を鉛直、および円周方向に 300mm ピッチで鋼板に溶接した直径 10mm、長さ 130mm のスタッドボルトで結合させている。また、円周方向を等分するように 8 本の H 型鋼が高さ方向に配してある。

#### 3.2 衝撃実験方法

衝撃実験は、図-7 に示す実物大タンクにバックフォーにより衝撃を与え、図-8 に示すように、オープンケーソン工法の施工の過程において、潜函前 1 回と潜函後 2 回の合計 3 回実施した。衝撃荷重はタンク内側に設置した

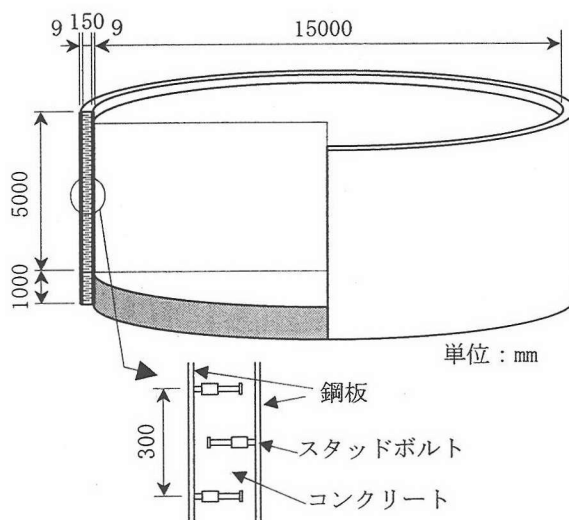


図-7 実物大構造モジュールの概略図

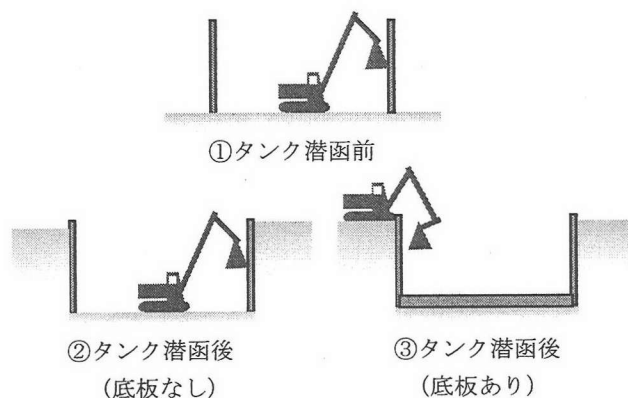


図-8 衝撃実験ケース

荷重計に衝撃を与えて計測し、加速度応答、変位応答、ひずみ応答を計測した。なお、変位応答については施工上、設置が不安定となり正しい計測ができなかった。ひずみ応答については、得られた応答値が微小であり、またノイズも重ね合わさっていることから正確なひずみ応答値を取り出すことができなかった。よって、変位応答およびひずみ応答については、検討する項目から除外した。

#### 3.3 衝撃実験結果およびタンクの動的特性

##### (1) タンク潜函前

図-9 にタンク潜函前の衝撃実験の結果から得られた衝撃荷重時刻歴とタンク側壁における円筒タンク中心方向の加速度応答時刻歴の一例を示す。これらの加速度応答時刻歴より直接積分によって図-10 のように変位応答時刻歴を求め、この結果から固有周期と減衰定数を求めた。固有周期については数個の波より平均をとって求めた。減衰定数については、次の対数減衰率の式より任意の周期  $m$  と  $(m+1)$  番目の振幅比から求めた<sup>4)</sup>。

$$h = \frac{1}{2m\pi} \ln \frac{x_n}{x_{n+m}} \quad (1)$$

その結果、固有周期は 0.035 秒、減衰定数は 0.031 と

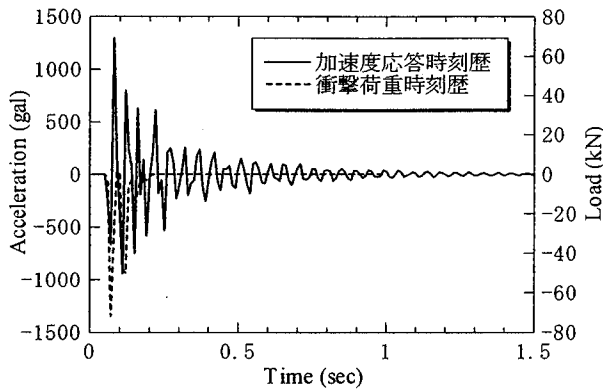


図-9 衝撃実験の結果

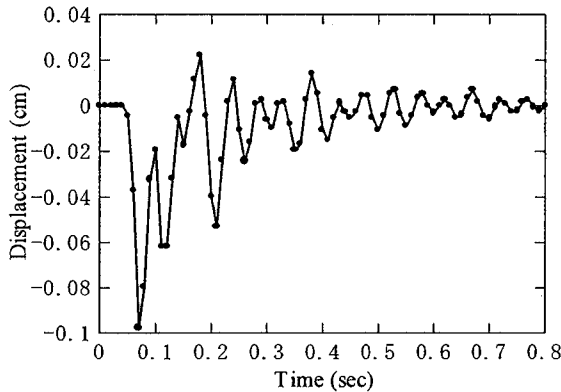


図-10 変位応答時刻歴

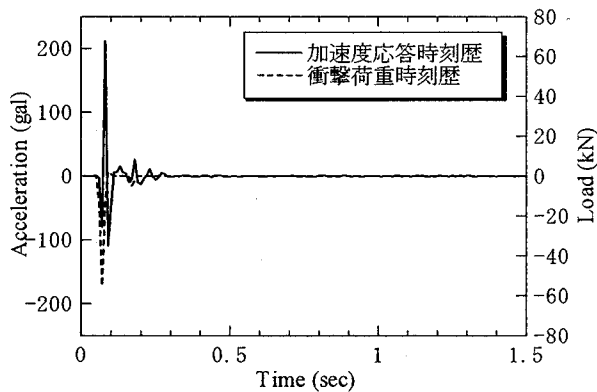


図-11 衝撃実験の結果 (潜函後)

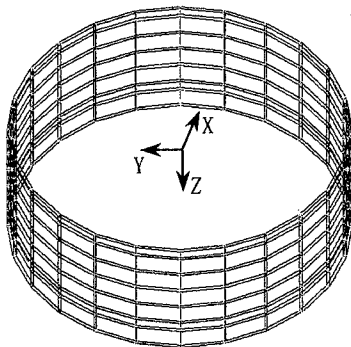


図-12 地上タンクの解析モデル

なった。また、水道施設耐震工法指針・解説<sup>5)</sup>では空虚時の地上円筒シェル水槽の固有周期は次式により求めている。

$$T = \frac{\pi \cdot l}{a} \cdot \sqrt{\frac{2q}{3gE} \left\{ 1 + 12 \left( \frac{a}{l} \right)^2 \right\}} \quad (2)$$

ここに、 $T$ :固有周期 (sec),  $a$ :水槽の半径 (m),  $l$ :水槽の高さ (m),  $g$ :重力加速度 ( $m/s^2$ ),  $E$ :ヤング率 ( $N/m^2$ ),  $q$ :壁体の単位容積重量 ( $N/m^3$ )

上式より求めた固有周期は0.015秒となり、測定結果と比較して約1/2であった。

## (2) タンク潜函後

図-11 にタンク潜函後 (底板なし) の衝撃実験から得られた衝撃荷重時刻歴とタンク側壁における円筒タンク中心方向の加速度応答時刻歴の一例を示す。衝撃力による加速度応答を示し、タンク潜函前に見られた衝撃後の自由振動は地盤に逸散し、自由振動部が現れていないことが分かる。タンク潜函後 (底板あり) の衝撃実験結果から得られた衝撃荷重時刻歴とタンク側壁における円筒タンク中心方向の加速度応答時刻歴も同様な結果となった。

## 4. 解析モデルの検討

本研究では、構造物・地盤・液体・連成地震応答解析システム DINAS<sup>6)</sup>を用いて、タンクの衝撃実験のシミュレーションおよび地震時動的応答解析を行った。解析モデルは衝撃実験結果と比較しながら、図-8 に示す衝撃実験ケースに沿って3段階に分けて作成した。

### 4.1 タンク潜函前

潜函前のタンク本体のみの解析モデルと構造諸元をそれぞれ図-12、表-2 に示す。解析仮定として、サンドイッチ構造の合成構造は常に保持されるものとした。これは、鋼とコンクリートの繰返し曲げ載荷実験を実施した結果に基づいている。タンク側壁のサンドイッチ構造は、鋼板-コンクリート-鋼板についてそれぞれシェル要素-ソリッド要素-シェル要素を使用し、材料定数を各要素に与え、要素境界面の各節点を共有させることで合成構造と仮定した。タンク下端部の境界条件は固定境界とした。この解析モデルについて固有値解析を実施し

表-2 解析モデルの諸元

鋼板 (SS400)	降伏応力度 (MPa)	板厚 (mm)	ポアソン比	弾性係数 (GPa)	単位体積重量 ( $kN/m^3$ )
	235	9.0	0.3	205	78
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	厚さ (mm)	ポアソン比	弾性係数 (GPa)	単位体積重量 ( $kN/m^3$ )
	29.5	150	0.2	27.4	25

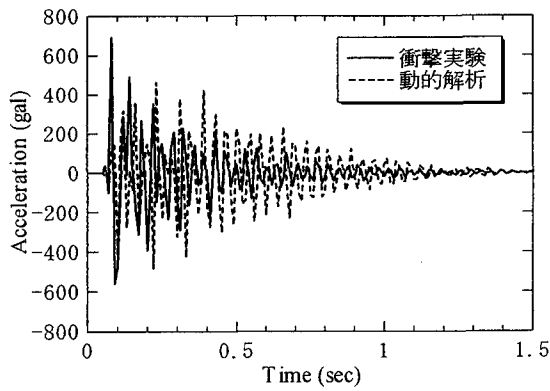


図-13 加速度応答時刻歴の比較 (潜函前)

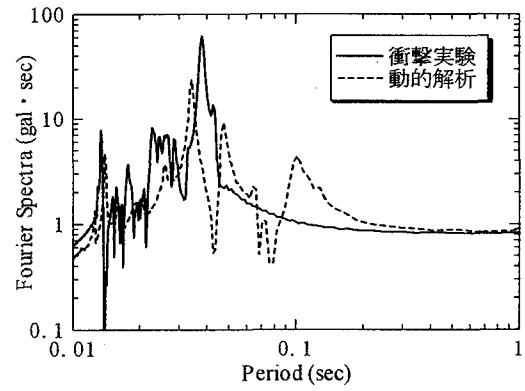


図-14 フーリエスペクトルの比較 (潜函前)

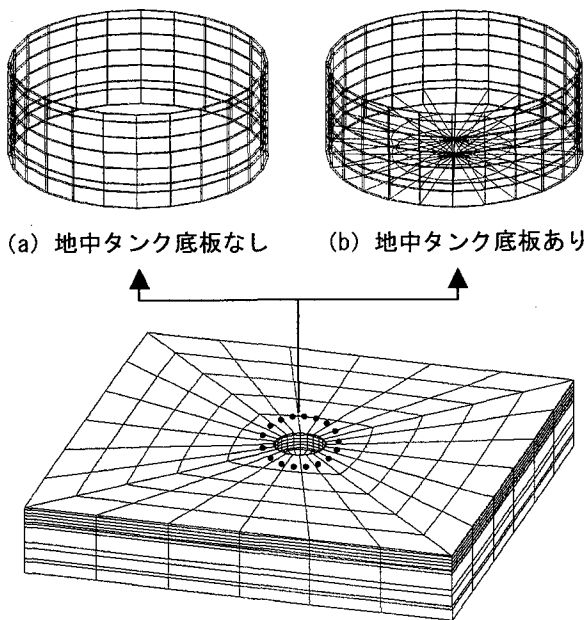


図-15 地中タンクの解析モデル

た結果、1次固有周期は0.031秒であった。タンク潜函前の衝撃実験から求めた固有周期は0.035秒であり比較的よく一致している。

この解析モデルにタンク潜函前の衝撃実験で測定された衝撃荷重時刻歴を実験と同様に入力した。数値解析は直接積分法によって行い、数値積分法として Newmark  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用いた。減衰の種類はレーリー減衰を用いた。その結果、衝撃実験と動的解析で同じ地点で得られた加速度応答時刻歴の一例を図-13に示す。なお、数値解析は直行座標系で行ったため、円筒タンクの中心方向に計測した実験の加速度応答時刻歴を  $x$ 、 $y$  の2方向に分解してそれぞれ比較をした。加速度応答波形、応答値とも比較的よく一致しているといえる。他の計測地点でも同じような傾向が見られたことを確認している。図-13の衝撃実験および動的解析の加速度応答時刻歴から得た自由振動部のフーリエスペクトルの一例を図-14に示す。その結果、卓越周期はおおむね一致した。その他の結果についても同様であったことを確認している。以上より、タンク本体の解析モデルは妥当であると判断した。

表-3 地盤データ

No.	地層区分	層厚 (m)	N値	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/sec)	せん断弾性係数 (GPa)
1	砂礫	1.5	50	18.2	294	16.1
2	シルト	9.3	3	14.0	140	28.0
3	砂礫	1.8	30	20.4	248	12.9
4	シルト	3.2	5	14.7	163	3.99
5	砂	1.0	25	19.5	234	10.9
6	砂礫	3.4	42	21.2	325	22.8

#### 4.2 タンク潜函後

次に、タンク潜函後の地中タンクの衝撃実験を DINAS でシミュレーションした。タンク潜函後の底板なしの解析モデルは、タンク潜函前の解析モデルにソリッド要素を用いてモデル化した3次元有限要素地盤を付け加えた。地盤は成層地盤とし、すべての地盤は地表面と水平な面を成すと仮定した。ボーリングデータに基づいたタンク建設地点の地盤データを表-3に示す。境界条件は底面で全方向固定境界、側面は水平方向が自由、鉛直方向を固定とした。タンクの外側鋼板と地盤の境界面上の各節点は線形結合とした。

タンク潜函後の底板ありの解析モデルは、タンク潜函後の解析モデルにソリッド要素を用いてモデル化した底板コンクリートを付け加えた。タンクの内側の鋼板と底板コンクリートの境界面の節点は共有させることによって一体化させ、地盤と底板の境界面の節点は線形結合とした。

一例として底板なしの状態での解析結果を図-16に示す。実験結果に比較して解析結果の加速度応答値は半分程度である。図-17に、図-14と同様にして得られたフーリエスペクトルを示す。卓越周期が0.03秒以上のところに見られることから、図-14を参考にすれば地盤影響がそれほど大きくないことがわかる。これは、地表面において、潜函直後はタンクと地盤にわずかな隙間が生じていたためと考えられる。解析結果は地盤の影響により、卓越周期が0.02秒程度と小さくなり、地盤の拘束効果が現れている。

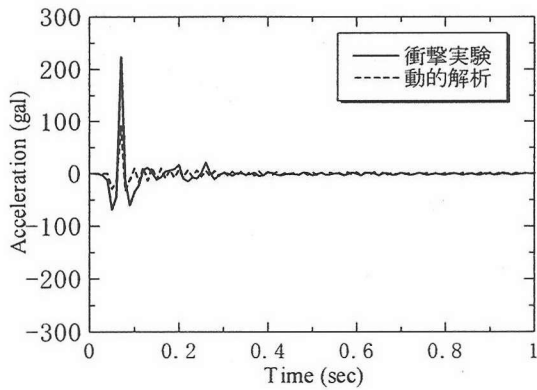


図-16 加速度応答時刻歴の比較 (潜函後)

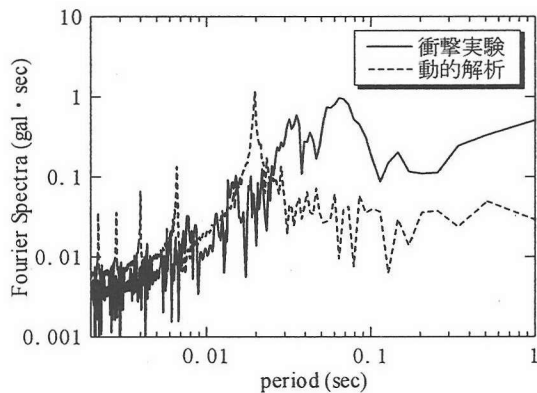


図-17 フーリエスペクトルの比較 (潜函後)

## 5. 地震時動的応答解析

### 5.1 解析方法

図-15 (b) に示した解析モデルを用いて地盤を考慮した地震時動的応答解析を行った。

水道施設耐震工法指針・解説では、水槽など水に接する構造物の耐震設計においては、地震時動水圧を考慮するものとし、必要に応じて水面動揺の影響を考慮するものとしている。しかし、本研究で使用したDINASでは3次元液体要素、3次元自由表面要素が扱えなかったこと、また本解析は地中タンクの安全性の検討を目的としており、満水時の地中タンクは水圧と土圧が互いに打ち消し合う方向に働くことから、むしろ地中タンク空虚時の方が満水時よりもタンク側壁に対して危険な状態であり得る。

そこで本解析では、地中タンク空虚時の状態、および地中タンク満水時の状態として、静水圧を動的解析の初期応力として考慮するものとした、2通りの状態での動的応答解析を行った。

数値解析は直接積分法によって行い、数値積分法としてNewmark  $\beta$ 法 ( $\beta=1/4$ )を用い、積分時間間隔は0.01秒とした。減衰の種類はレーリー減衰を用いた。

### 5.2 入力地震動

入力地震動は、このタンクの建設地点は岐阜市内であり、地域特性や震源特性を考慮することが望ましいと判断し、工学的基盤面で得られた濃尾地震の地震波を基盤から入力した。その入力地震波形を図-18に示す。

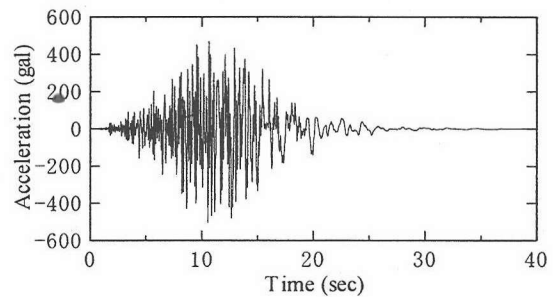


図-18 入力地震波形 (濃尾地震)

### 5.3 解析結果および考察

図-19から図-22にタンク空虚時、満水時の常時荷重が側壁におよぼす相当応力分布、および動的応答解析で側壁に発生した最大相当応力分布を示す。表-4に示すようにいずれの場合においても最大相当応力値は弾性範囲内にあることがわかる。以上より、地中タンクが水道施設耐震工法指針で定められたレベル2地震動に相当する濃尾地震に対して十分な安全性を保持することが確認された。

表-4 最大相当応力値

	基準強度 (MPa)	満水時 (MPa)	空虚時 (MPa)
鋼板 (内側)	235	83.5	83.9
コンクリート	29.5	14.2	14.2
鋼板 (外側)	235	81.7	89.4

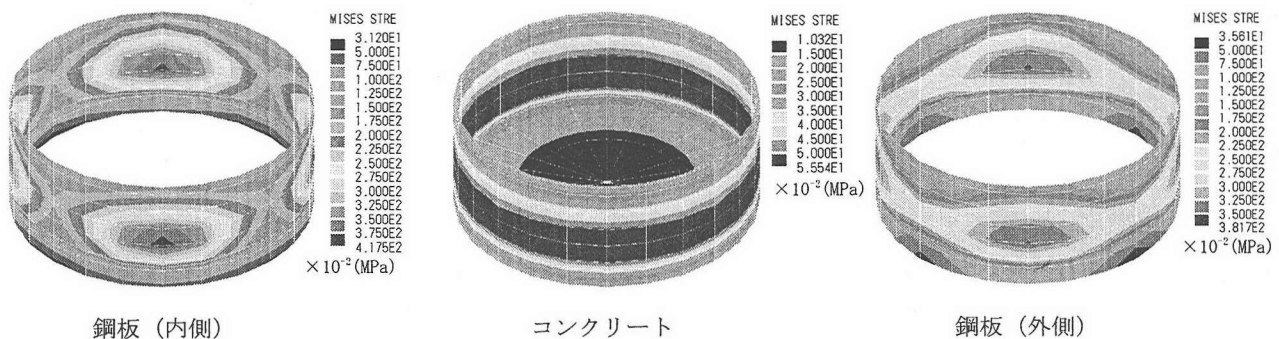


図-19 常時荷重による相当応力分布 (タンク満水時)



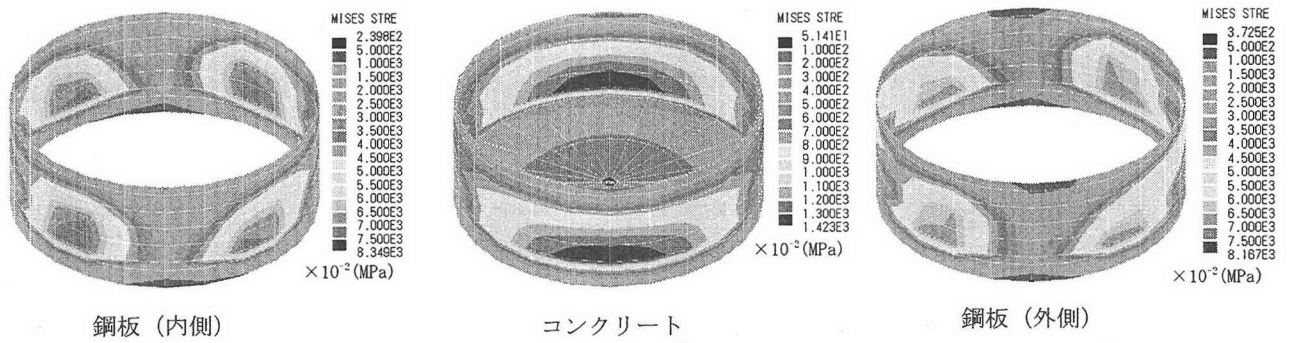


図-20 動的応答解析による相当応力分布 (タンク満水時)

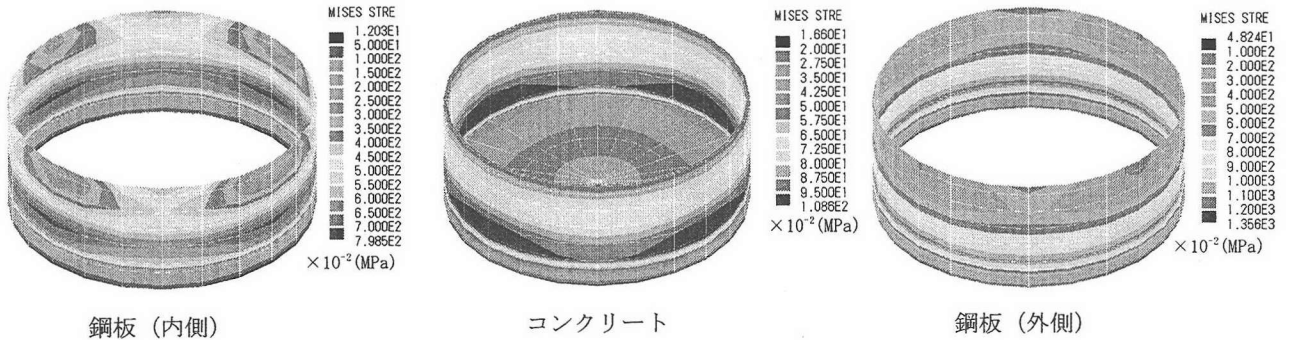


図-21 常時荷重による相当応力分布 (タンク空虚時)

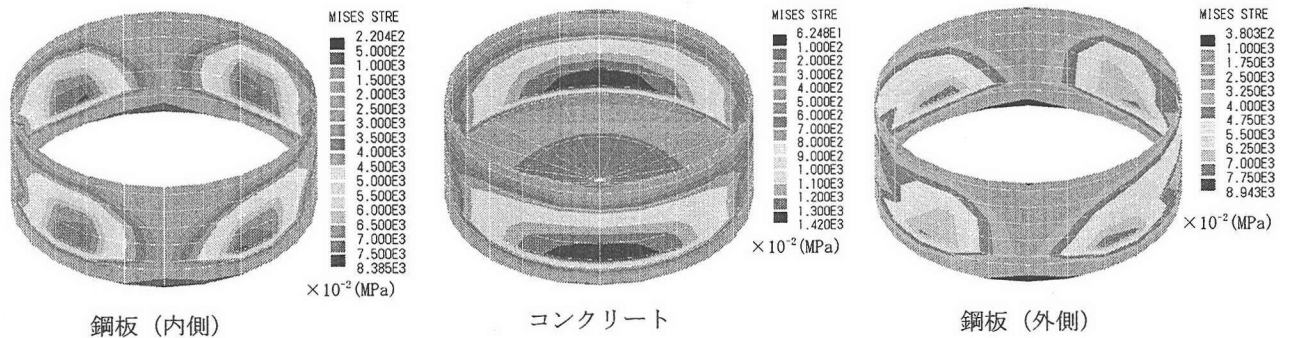


図-22 動的応答解析による相当応力分布 (タンク空虚時)

## 6. 結言

本研究では、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造を側壁に持つ地中タンクを開発し、タンクの側壁に使用する鋼とコンクリートのサンドイッチ板の繰返し曲げ載荷実験、実物大タンクの衝撃実験、およびその結果を基にした地震時動的応答解析を行い、このタンクの地震時安全性について検討した。その結果をまとめると以下のようである。

- 1) タンク側壁に使用されるサンドイッチ構造板の繰返し曲げ載荷実験結果より、設計荷重作用下においては、鋼とコンクリートの合成構造が保持されることが確認された。
- 2) 衝撃実験結果から、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を側壁に持つ実物大タンクの固有周期および減衰定数を求めた。また、加速度応答時刻歴およびそのフーリエスペクトルを比較し、数値解析

モデルの妥当性を検証した。

- 3) 地震時動的応答解析の結果から、鋼とコンクリートのサンドイッチ構造部材を側壁に持つ地中タンクが、満水時および空虚時のいずれにおいても応答値は弾性範囲内であり、レベル2地震動に対して十分な安全性を保有していることが確認された。

今後の課題としては、大型化に向けて、スタッドボルトの引き抜き耐力ならびに、サンドイッチ合成板のせん断耐力の評価について明らかにしたい。

## 謝辞

本研究は、岐阜県RSP事業ならびに岐阜大学地域共同研究センターにおける民間企業との共同研究の一環として行ったものである。供試体の製作と施工および実験実施にあたり協力いただいた(株)森松総合研究所ならびに(株)カンチ総合技術研究所の関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) T.Matuhisa, N.Matsuhisa : Development and Achievement of Large-Sized stainless Steel Storage Tanks (invited), Proceedings of the Second International Conference on Environment Sensitive Cracking and Corrosion Damage, ESCCD2001, Hiroshima, Japan, 29 Oct.-2 Nov.1, 2001, pp.129-135.
- 2) 奈良 敬, 村上茂之, 岡寄孝和, 岡田 豊, 大前伸友 : 鋼とコンクリートのサンドイッチ合成板の繰り返し曲げ載荷試験, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 I, pp. 582-583, 2001 年 10 月.
- 3) 奈良 敬, 村上茂之, 岡寄孝和, 岡田 豊, 大前伸友 : 鋼-コンクリートサンドイッチ構造を有する地中タンクの地震時動的応答解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集 I, pp. 48-49, 2001 年 10 月.
- 4) 精木紀男ら : 地震工学・振動学入門, 吉井書店, pp. 48-50, 1997 年 5 月.
- 5) 日本水道協会 : 水道施設耐震工法指針・解説, 1997 年 11 月.
- 6) CRC 総合研究所 : DINAS 使用説明書, 2000 年 1 月.

(2001 年 12 月 7 日 受付)

### **DYNAMIC SEISMIC BEHAVIOR OF A WATER TANK MADE OF COMPOSITE DOUBLE SKIN WITH STEEL PLATE AND CONCRETE SLAB**

Satoshi NARA, Shigeyuki MURAKAMI, Takakazu OKAZAKI and Yutaka OKADA

This report presents a dynamic seismic behavior of a water tank made of composite double skin with steel plate and concrete slab. The behavior is clarified through the following three steps. At first, a cyclic bending loading test of the double skin plate is carried out. Secondly, an impact test of the tank is examined. Cyclic strength of the skin and dynamic characteristics of the tank are clarified after these two steps. Finally, dynamic behavior of the tank under seismic loading is demonstrated by using of FEM analysis.