

石油タンクに作用する津波波力と津波波圧に対する座屈解析

Tsunami Force Acting on Oil Tanks and Buckling Analysis for Tsunami Pressure

榊山 勉¹・松山昌史²・松浦真一³・河島宏治⁴・佐野正和⁵

Tsutomu SAKAKIYAMA, Masafumi MATSUYAMA, Shin-ichi MATSUURA

Koji KAWASHIMA and Masakazu SANO

Experiments on tsunami force and pressure acting on oil tanks were carried out with scale factor of 1/40. The tsunami concerned is that due to Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes and the maximum water level is about 5 m high. If the tanks of which diameter ranges from 5.8 m to 48.6 m and weight from 5.8t to 540t are empty, they can be floated due to the 2-m high tsunami flooding. Pressure acting on tanks surrounded by oil protection walls is not uniform and buckling of side wall is affected by the distribution of pressure around the tank. The lowest level of oil in the tank should be kept to prevent the tanks from floating and buckling.

1. 緒 言

近年, 陸上構造物の津波波力の算定方法に関する実験的研究が進み, その成果が津波避難ビルの設計法に採用された (内閣府, 2005). 石油タンクに関しては, スマトラ島沖地震インド洋津波によるバンダアチェ周辺でのタンクの浮遊, 座屈, 2次被災について詳細な被災状況が報告された (後藤, 2005). また, 石油タンクに作用する津波波力の実験が行われ, 波力算定方法と被害予測の簡易的な方法が提案された (秋山ら, 2005; 池谷ら, 2005; 藤井ら, 2005; 藤井ら, 2006). この被害予測方法の座屈に関する判定ではタンクの構造や外力分布が単純な条件のもとで円筒シェルの座屈理論 (Chiba ら, 1989) を適用しているため, 津波波圧が円周方向に変化する場合や大型石油タンクのように板厚が高さ方向に変化する場合には数値計算を適用することが考えられる.

本研究では, 中央防災会議が想定する津波の条件のもとで種々の直径の石油タンクに作用する津波波力と波圧分布を実験により求め, 津波波力に対する石油タンクの安定性を評価するとともに, 測定された波圧分布を外力として数値計算により座屈に関する評価を行う.

2. 実験方法と実験条件

実験は, 図-1 に示す長さ 205 m, 深さ 6.0 m, 幅 3.4 m の大型造波水路内に模型縮尺 1/40 の海底地形模型と敷地模型を製作して行った. 海底勾配 1/100 以浅が海底地形を簡略化した範囲で, その沖の 1/11 斜面は一樣水

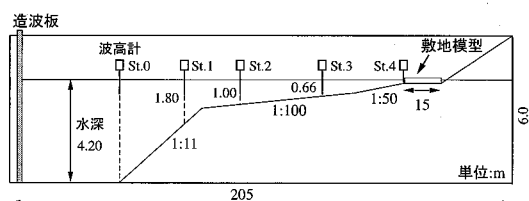


図-1 実験装置

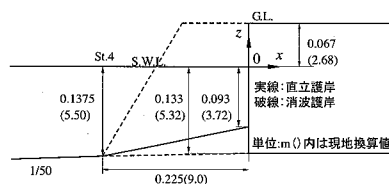


図-2 敷地前面の護岸断面

深部への接続部である.

単体のタンクを対象とした基礎的な実験とタンク群を対象とした2種類の実験を行った. 敷地と護岸の断面図を図-2に示す. 敷地の地盤高さは静水面上 0.067 m である. タンク単体の実験は, 実線で示す直立護岸の条件で, タンク群の実験は破線で示す消波護岸の条件で行った.

単体のタンクの実験には直径 $D=0.145, 0.266, 0.654, 1.215$ m の4種類を用いた. 図-3に各タンクの位置を示す. 直径の2倍の位置に設置した. また, タンク C ($D=0.654$ m) については, $1D, 2D, 10D, 20D$ の位置でも測定した.

タンクに作用する津波波力の水平, 鉛直成分を分力計で測定した. 波圧は鉛直方向に 1 cm 間隔, 円周方向に 30 度間隔で 210 度の範囲で測定した. タンク D は模型の重量が 100 kg を越え, 分力計に設置できない重量となったので, 波圧分布の積分値から合力を求めた. タンク A, B, C については防油堤がある場合とない場合で

1 正会員 博(工) 電力中央研究所 流体科学領域
2 正会員 工修 電力中央研究所 流体科学領域
3 正会員 工博 電力中央研究所 構造工学領域
4 非会員 中部電力 土木建築部
5 非会員 中部電力 土木建築部

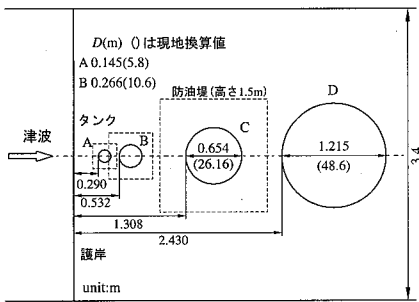


図-3 石油タンクと防油堤の配置

実験を行い、防油堤の効果を調べた。タンク群の実験では防油堤で囲まれたタンク E ($D=0.194$ m), タンク F, G ($D=0.388$ m), タンク H ($D=0.485$ m) に作用する波力とタンク E とタンク F に作用する波圧を測定した。タンク H の離岸距離は 0.9 m で、タンク E がその背後 0.9 m の位置にある。タンク F の離岸距離は 1.25 m で、その背後約 0.5 m にタンク G がある。タンク E とタンク F の沿岸方向の間隔は約 0.5 m である。

タンク設置前に水位と水平流速を、設置後はタンク前面の水位を、容量式波高計、プロベラ式流速計で測定した。以下現地換算値で表示する。

実験では中央防災会議による東海・東南海・南海地震が同時に発生した場合に想定される津波高さを対象とした。護岸前面での水深 5.5 m 地点での最大水位は約 5.3 m である。図-4 に計算による津波の水位変動と実験で設定した水位変動の比較を示す。横軸の時間 t は実験での造波開始時間を 0 として示した。図中の破線が護岸の天端高さを示す。実験では、津波が護岸を越流する時間帯の水位変動を中心に再現した。すなわち、 $t=0$ から 500 s の間の計算結果にみられる緩やかな水位上昇と $t=800$ から 1000 s の低下時の水位変動を実験では省略した。また、想定津波の最大水位の 0.8 倍と 1.1 倍の条件でも実験を行った。

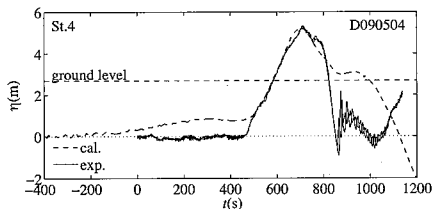
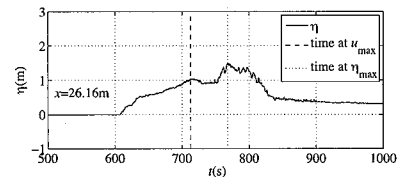


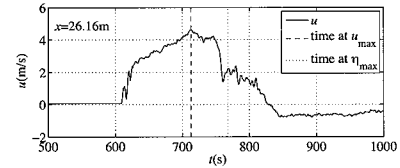
図-4 対象とした津波の水位

3. 実験結果と考察

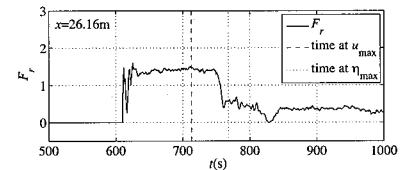
図-5 と図-6 は、それぞれ離岸距離 $x=26.16$ m と $x=52.3$ m における進行波の水位変動と水平流速、フルード数



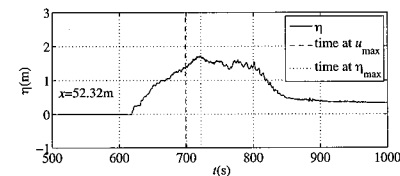
(a) 水位



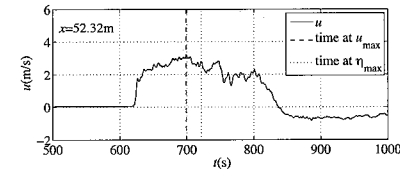
(b) 水平流速



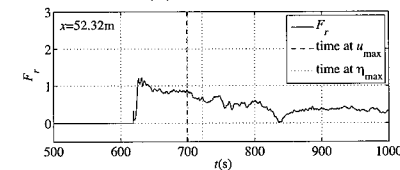
(c) フルード数

図-5 進行波の水位、水平流速、フルード数 ($x=26.16$ m)

(a) 水位



(b) 水平流速



(c) フルード数

図-6 進行波の水位、水平流速、フルード数 ($x=52.3$ m)

ード数の時間変化である。各図中の破線と点線はそれぞれ水平流速と水位が最大の時刻を示す。護岸を射流で越流する津波が陸上を伝播すると常流になる。護岸近傍の津波の水位が低下すると跳水の位置が護岸方向に移動し図-5(a) にみられるように水位が最大となる。このとき、水平流速は急激に減少する。図-5(c) にみられよう

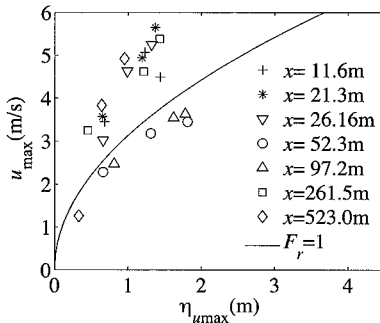


図-7 最大水平流速と水位との関係

フルード数は1を越え、射流状態を維持している間は水位や流速の大きさによらずフルード数はほぼ一定である。

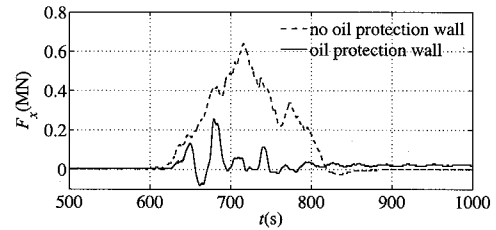
護岸から離れた図-6の $x=52.3\text{ m}$ の地点では最大水位と最大流速の発生する時刻が近くなる。さらに離れると両者の発生する時刻は一致する。このような流れでは水位の先端近傍だけ射流となり本体は常流である。

図-7はタンク位置での最大水平流速 $u_{\max}$ とそのときの水位 $\eta_{\max}$ との関係を示したものである。護岸からの距離により最大水位と最大水平流速の発生する時刻が異なる。図中にはフルード数 $=1$ の関係を図示した。本実験では曲線の上下に分布し、離岸距離が中位の位置で常流、それ以外の離岸距離が小さいか、大きい場所で射流となっている。

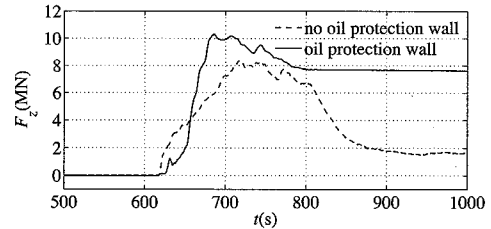
図-8に水平力 F_x 、鉛直力 F_z の時系列の防油堤の有無による比較を示す。防油堤がない場合では津波の水位に対応した一方向の水平力が作用する。図-6(a)水位と(b)水平流速の時間変化と波力波形を比較すると最大波力は、最大水位と最大流速の発生時刻の間で生じている。防油堤がある場合には、防油堤内での反射があるため振動する。鉛直力は、防油堤がない場合には、週上波の最大水位でピークを示す。防油堤がある場合には堤内に水が貯留されるために最大値は防油堤がない場合よりも大きくなり、浮力が作用し続ける。

図-9に3種類の直径のタンクについて防油堤の有無による水平力と鉛直力の比較を示す。防油堤により水平力は低減されるが(図-9(a))、逆に鉛直力は増加する(図-9(b))。水平力は防油堤により0.1倍から0.4倍に低減する(図-9(c))。一方、鉛直力はタンクの直径によらず概ね1.5倍に増加する。防油堤は耐震設計されているが耐津波設計はされていない。防油堤を耐津波設計することで水平力の低減が期待できる。

表-1に対象としたタンクの諸元と最大水位、津波波力の水平、鉛直成分をまとめた。ここに、 D :直径、 H :高さ、 b :側板厚である。約1mから1.5mの浸水深に対して各大きさのタンクに作用する浮力は空のタン



(a) 水平力の時系列の比較



(b) 鉛直力の時系列の比較

図-8 防油堤の有無による津波波力の時系列の比較

表-1 実験条件と水位、津波波力

タンク	$D(\text{m})$ $H(\text{m})$ $b(\text{mm})$	自重 $W(\text{t})$ $gW(\text{MN})$	進行波 最大水位 $\eta_{0\max}(\text{m})$	最大津波力	
				水平力 $F_x(\text{MN})$	鉛直力 $F_z(\text{MN})$
A	5.8	5.79	—	0.012	0.53
	6.1	0.057	1.45	0.14	0.37
	4.5		1.50	0.18	0.36
			1.01	0.043	0.24
B	10.6	34.27	—	0.027	1.86
	13.7	0.336	1.59	0.29	1.19
	6~8		1.50	0.48	1.30
			0.95	0.072	0.82
C	26.16	152.5	—	0.21	9.81
	14.6	1.49	1.69	0.58	7.37
	8~15		1.94	0.78	9.14
			0.99	0.18	4.67
			1.46	0.59	7.77
			1.26	0.48	6.17
D	48.6	539.2	1.66	1.44	42.4
	17.4	5.28	1.82	1.97	40.8
	8~34		0.99	0.78	29.2

D : 直径, H : 高さ, b : 側板厚, — は防油堤が有る場合

クの自重に比べて数倍から1オーダー大きい。このことからタンクが空の場合には約1mの浸水深でも浮遊することが懸念される。実際には運用時の最低液位の油等の自重により浮力に対する抵抗が働くため、浮遊を防ぐことができる。後藤(2005)の調査結果でも内容油の量による浮遊の差が確認されている。

図-10にタンク壁面での最大水位 $\eta_{w\max}$ と進行波の最大水位 $\eta_{0\max}$ との比をフルード数 F_r の関係で示す。タンク直径による顕著な差はみられないが、フルード数が大きくなると増加する傾向にあり最大で2倍程度である。図中の曲線は、式(1)で示される位置エネルギーと運

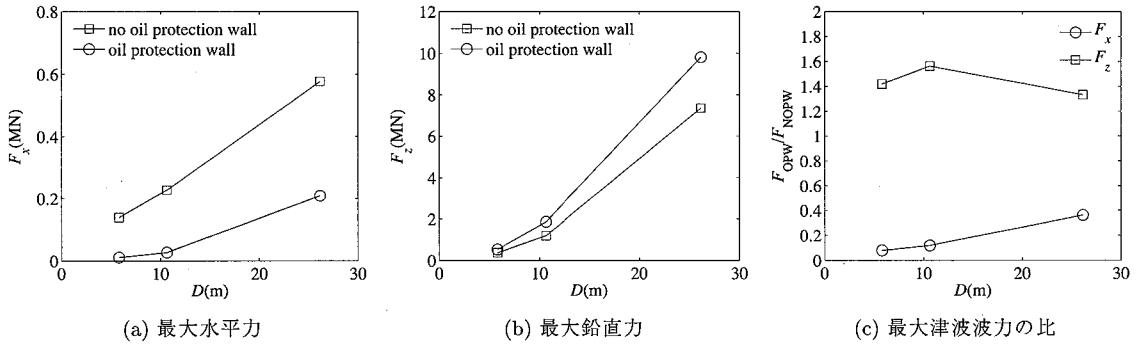


図-9 防油堤の有無による津波波力の最大値の比較

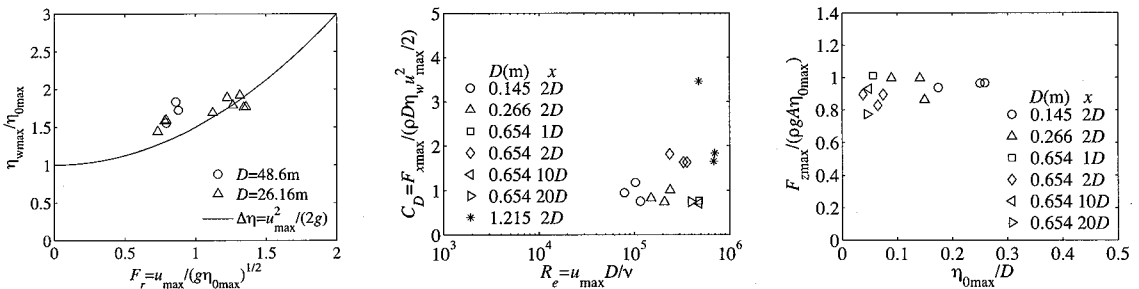


図-10 タンク壁面での浸水深と進行波の最大水位との比(防油堤なし)

図-11 レイノルズ数 R_e と抗力係数 C_D との関係 (防油堤なし)図-12 相対水深 $\eta_{0\max}/D$ と無次元鉛直波力 F_z との関係 (防油堤なし)

動エネルギーの関係から、壁面での水位をフルード数で表した式(2)の関係である。津波避難ビル設計指針の波圧作用高さと水深の比の3倍はフルード数が2に相当する。実験結果はフルード数が1より小さい範囲で式(2)の関係より若干大きくなっているが、1以上で曲線にほぼ一致している。

$$\eta_w - \eta_0 = u^2 / (2g) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_w / \eta_0 = 1 + 0.5 F^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-11に最大水平波力 F_x と進行波の流速 $u_{\max}$ から算出した抗力係数 C_D を示す。投影面積は、タンク壁面の浸水高さ $\eta_{w\max}$ とタンク直径 D の積で与え円周方向への水位低下分は無視した。横軸のレイノルズ数 R_e は模型値である。 $R_e = 10^5 \sim 10^6$ で抗力係数は3.5の値を除き0.8から2の範囲にある。自由表面のない円柱構造物の抗力係数はレイノルズ数が $R_e = 10^5 \sim 10^6$ の範囲では $R_e = 10^5$ で $C_D = 1.4$ 、 $R_e = 2 \times 10^5$ で $C_D = 1.4$ から0.3に変化する。自由表面の影響が表れているものと思われる。

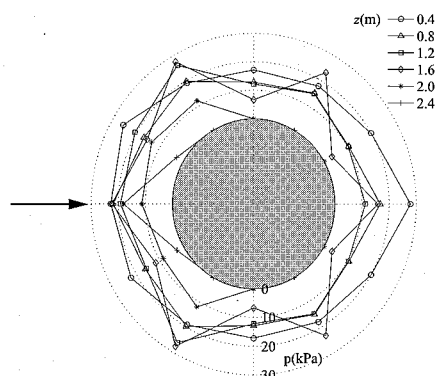
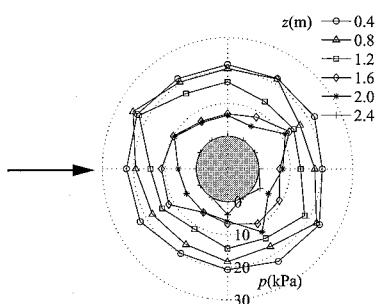
図-12は進行波の最大水位 $\eta_{0\max}$ とタンクの断面積 A で無次元化した鉛直波力 F_z を示したものである。タンク周りの水位は円周方向に変化し、その分布は藤井ら(2006)に報告されている。進行波の水深 $\eta_{0\max}$ の80%から110%に相当する平均水深による浮力が作用している。

4. 座屈解析

浮き屋根式大型タンク(タンクC、直径 $D = 26.16$ m)と固定屋根式小型タンク(タンクE、直径 $D = 7.7$ m)を対象に有限要素解析による数値計算により座屈強度を評価した。解析には汎用構造解析コードABAQUS/Standard Ver.6.5X1を用いた。外力は防油堤がある場合の波圧分布を適用した。座屈の対象となるのはタンク側壁の周方向の圧縮応力が最大になる瞬間の波圧分布である。それぞれのタンクの波圧分布を図-13と図-14に示す。防油堤内の流れは複雑なので波圧分布は周方向にも変化する。座屈解析に適用する正味の圧力分布は外圧と内圧との差圧で与える。運用時の最低液位はタンクCが2.0 m、タンクEが0.5 mである。

図-15にモデル化した浮き屋根式大型タンクを示す。高さによる側板の厚さの変化、アニュラプレート、ウィンドガータを考慮した。固定屋根小型タンクの側板の厚さは一定で、アニュラプレートをモデル化した。計算ではタンクの初期不整の有無の影響も調べた。材料はSS400であり、ヤング率は205.8 GPa、ポアソン比0.3とした。

図-15と図-16(a)に座屈の1次モードの変形形状を示す。変形量はそれぞれ1000倍と100倍で表示した。解析結果は、単純な円筒状の静水分布を与えた場合の周

図-13 タンク C($D=26.16\text{m}$)に作用する波圧分布図-14 タンク E($D=7.7\text{m}$)に作用する波圧分布

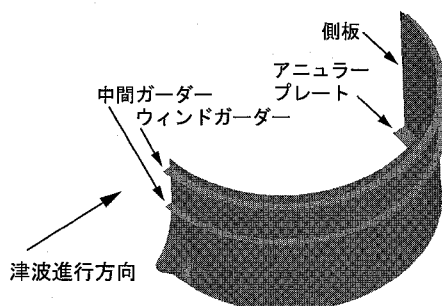
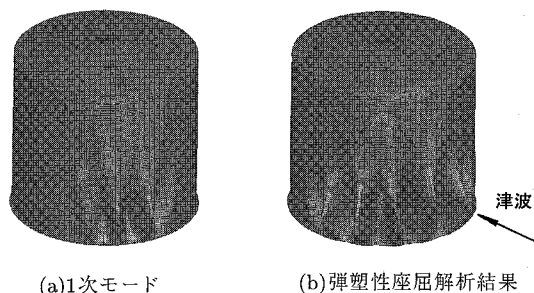
方向に一定の波数で発生する座屈とは異なり、波圧の大きい箇所を中心に局所的な変形となった。

タンク D については、弾性固有値解析による座屈固有値は、約 2.3 となりタンクの座屈発生までに余裕がある。これは運用時の最低液位が高く、座屈外力が低減されるためである。一方、タンク E については、運用最低液位が低く津波波圧の影響が大きいので、塑性化する可能性があった。そこで、弾塑性解析により強度を確認した。図-16(b) に弾塑性解析による変形形状を示す。座屈固有値は約 1.3 となり座屈発生までの余裕は小さい。初期不整による座屈倍率固有値への影響は両者のタンクともほとんどなかった。

5. 結 言

本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

浸水深が 2 m 前後の津波により今回対象とした直径 5.8 m から 48.6 m の石油タンクは空の状態であれば浮上することが明らかになった。実際には運用で最低液位の油が貯蔵されており、タンク E を除き総重量では安定性を確保することが確認できた。タンク E のように浮上と座屈の危険性がある場合には、運用時の最低液位を上げることで安全性を確保することができる。ただし、常時の液位が高すぎると地震による座屈には厳しくなる

図-15 浮き屋根式石油タンク C($D=26.16\text{m}$)の座屈 1 次モード (変位量を 1000 倍で表示)図-16 固定式屋根タンク E($D=7.7\text{m}$) (変位量を 1000 倍で表示)

ので注意が必要である。

参 考 文 献

- 秋山真吾・池谷 毅・大森政則・藤井直樹(2005): 津波が作用する石油タンク周辺の流動特性, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 157-162.
- 池谷 毅・秋山真吾・藤井直樹・大森政則(2005): 石油タンクに作用する津波波力の評価と被害予測手法, 地域安全学会論文集, No. 7, pp. 307-314.
- 後藤洋三(2005): 2004 年 12 月スマトラ沖地震インド洋津波災害調査, ロンガ(Lhonga)セメント工場貯油施設クルンラヤ(Krueng Raya)石油配送ターミナルの被害調査結果, pp. 1-25.
- 内閣府(防災担当)(2005): 津波避難ビル等に係るガイドライン, 構造的要件の基本的な考え方, 巻末資料②構造的要件の基本的な考え方, 内閣府(防災担当)発行, 15p.
- 日本機械学会(1998): 配管内円柱状構造物の流体振動評価指針, pp. B20-B36.
- 藤井直樹・大森政則・朝倉良介・池谷 毅(2005): 津波による石油タンクに係わる被害について, 地域安全学会梗概集, No. 16, pp. 87-90.
- 藤井直樹・大森政則・池谷 毅・稲垣 聡(2006): 石油タンクに作用する津波波力と被害予測手法, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 271-275.
- ABAQUS, Inc.(2005): ABAQUS/Standard Version 6.5 User's Manual, 同 Example Problems Manual.
- Chiba, M., Yamashida, T., and Yamauchi, M.(1989): Buckling of Circular Cylindrical Shells Partially Subjected to External Liquid Pressure, Thin-Walled Structures, 8, pp. 217-333.