

津波波力による体育館の崩壊解析

Collapse Analysis of Gymnasium under Tsunami Force

大野剛義¹⁾, 田中聖三²⁾, 磯部大吾郎³⁾

Takeshi Ohno, Seizo Tanaka and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s1620874@s.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学助教 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: stanaka@kz.tsukuba.ac.jp)

3) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Although gymnasiums are often used as refuge when big earthquake occurs, many were damaged under tsunami force in the 2011 Great East Japan Earthquake. The main objective of this study is to figure out the damage process of a gymnasium when attacked by a tsunami. The investigation was carried out using a one-way, fluid-structure coupling analysis. The VOF method by stabilized FEM was applied for the fluid analysis and the ASI-Gauss code for the structural analysis. From the numerical result, it was confirmed that the tsunami force acting on a gymnasium had great effect on the damage.

Key Words : *Tsunami Analysis, Gymnasium, ASI-Gauss Code, Stabilized FEM, VOF Method*

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、地震や津波および漂流物の衝突により多くの建物が損壊した。中でも津波による被害は大きく、多くの構造物が低層階の層崩壊、杭の破壊、引き抜きによる転倒などの被害を受けた[1]。被害を受けた構造物には体育館も含まれる。例えば、図-1には宮城県の陸前高田市民体育館での被害状況を示すが、当体育館では外壁の転倒や屋根フレームの変形、柔剣道場の流出が見られ、避難していた被災者が襲来した津波により流される事態まで発生した。体育館は災害発生時に避難所として用いられる施設であり、津波襲来時における体育館などの大空間構造の破壊メカニズムを把握することは、それらの設計、運用上も重要な事案である。そこで本研究では、有限要素法による一方向流体構造連成解析手法を用い、津波による体育館の崩壊解析を実施した。体育館の崩壊挙動を再現し、津波の浸水深や流速による被害状況の変化を把握することを目的とする。

2. 解析手法

本研究では、流体解析から構造解析への一方向連成解析[2]を実施する。流体解析においては、Navier-Stokesの連

動方程式に対し通常の有限要素法を適用すると、移流の卓越や非圧縮性に起因する圧力振動により数値不安定性が生じる。そこで、移流項の卓越による数値不安定性に対して安定化を施すSUPG法と、非圧縮性による圧力振動を抑えるPSPG法に基づいた、安定化有限要素法を適用する。使用した解析コード[3]には、MPIを用いた領域分割法に基づく並列計算手法と、OpenMPを用いたスレッド並列を組み合わせたhybrid並列計算法が導入されている。そのため、計算時間と計算機記憶容量が大幅に削減され、大規模数値計算が可能となっている。また、自由表面流れの表面形状の表現には、VOF関数による界面捕捉法を用いた。自由表面の表現手法には界面捕捉法と界面追跡法が存在するが、界面捕捉法では界面を関数などにより間接的に表現するため、固定メッシュでの解析が可能である。一方、メッシュ境界で界面を直接的に表現する界面追跡法では移動メッシュを用いる必要があり、メッシュのゆがみによる数値不安定が発生する可能性がある。本研究の解析対象である津波は、巻き込みや砕波などの複雑な界面形状が発生するため、界面捕捉法の使用が適切であると考えた。

構造解析には衝突解析や崩壊解析に実績のあるASI-Gauss法[4]を用い、流体解析コードにより算出された津波波力データを構造解析コードへ入力することで、一方向流体構造連成解析を実施する。

3. 流体解析モデルおよび解析条件

(1) 流体解析モデル

解析対象には、災害発生時に避難所として用いられることが考えられる小学校の体育館を想定した。その形状は、設計例[5]に基づいて決定した。作成した体育館モデルの概形を図-2に示す。寸法は30×18.6mで、屋根頂部の



図-1 津波による体育館の外壁の転倒[1]

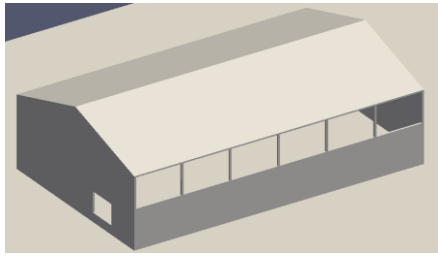


図-2 体育館モデルの概形

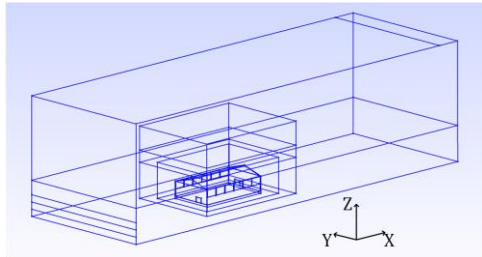


図-3 流体解析モデル

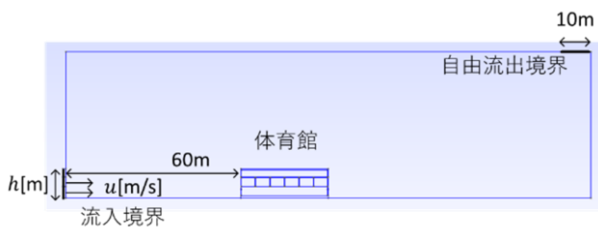


図-4 津波流出入境界

高さは9.99 mである。体育館の側面上部（高さ4 m）には大型の窓が設けられている。

この体育館および周辺の流体解析モデルを図-3に示す。体育館周辺の津波の流れがモデル端部の境界条件の影響を受けないよう、流体解析モデルは体育館に比べて十分に大きな領域を確保した。要素には四面体要素を用い、そのサイズは計算コストの都合上、体育館内部と近傍で一边0.5 m、モデル外周部で一边6 mとし、外側に向かい徐々に大きくなるようにした。また、体育館側面の窓は津波が自由に流入できるような開口部としてモデル化した。このモデルの総要素数は296,342、総節点数は1,728,530である。

(2) 津波条件

津波の浸水深は、窓および屋根の高さを考慮し、4 m、7.2 m、10 mの3ケースとした。7.2 mのケースで津波は窓

表-1 津波条件

浸水深 h [m]	流速 u [m/s]	フルード数 F_r	Case
4	5.01	0.80	A
	7.51	1.20	B
7.2	6.72	0.80	C
	10.1	1.20	D
10	7.92	0.80	E
	11.9	1.20	F

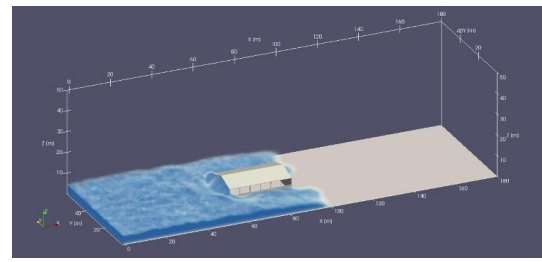


図-5 Case A (津波衝突時, 浸水深 4 m, 流速 5.01 m/s)

上端の高さとなり、10 mのケースでは体育館頂部までの高さとなる。また浸水深に対し、流速を2ケースずつ設定した。この流速は、浸水深の間で流れが力学的に相似になるようフルード数が $F_r=0.80, 1.20$ をそれぞれ満たす値とし、表-1 に示すように合計6ケースの津波条件を設定した。津波の流出入境界としては、モデル端部に図-4 に示すようなものを与えた。モデル上部には、津波が流入した分の体積の流体が流出できるように流出境界が設けてある。6つの津波条件について、時間増分0.01 sの解析を5,000ステップ行った。並列計算機にはIntel(R) Xeon X5680 (3.33 GHz)、48 GB RAMのPCクラスター型並列計算機を使用した。解析の所要時間はノード数8、ノード当りプロセッサ数12の96プロセス並列で4~12時間であった。

4. 流体解析結果

Case A (浸水深4 m, 流速5.01 m/s)の津波衝突時における解析結果を図-5に示す。津波が体育館に衝突し壁で跳ね

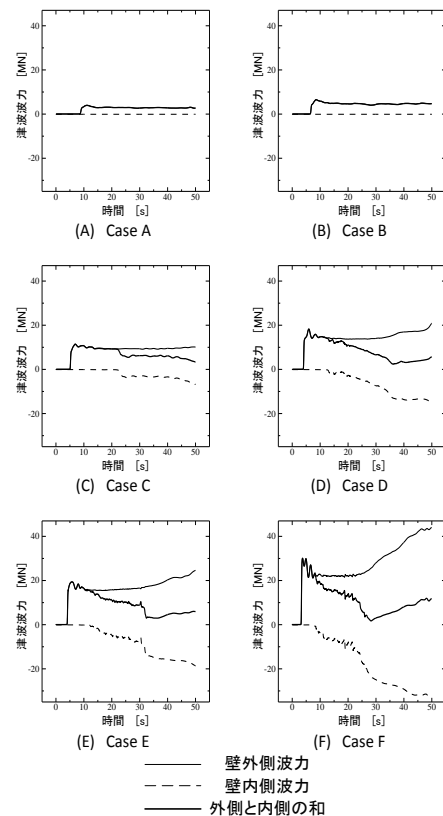


図-6 体育館前面の壁に作用する津波波力

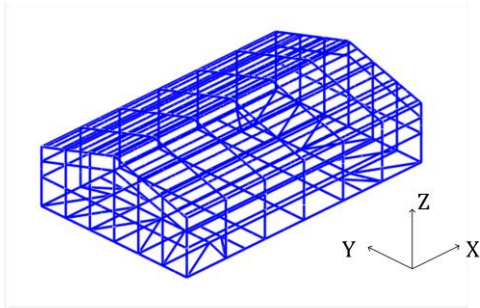


図-7 構造解析モデル

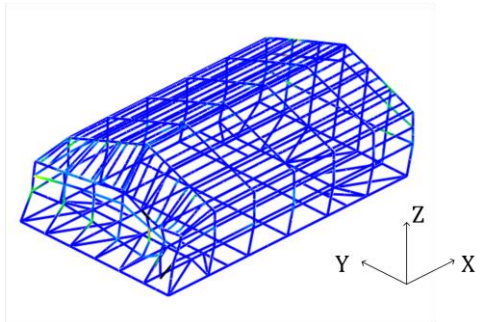
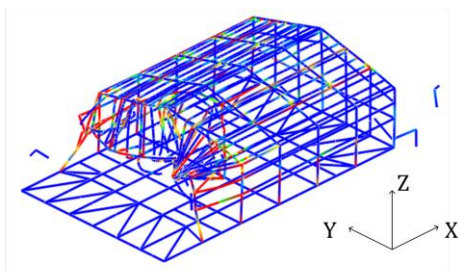
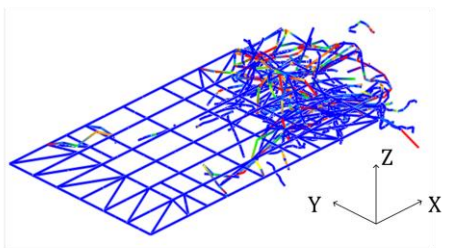


図-8 体育館の変形の様子 (Case A)



(a) 3.1 秒時



(b) 9.0 秒時

図-9 体育館の変形の様子 (Case F)

上がった後、二手に分かれて進行していく様子が確認できる。また、津波の浸水深が窓の高さを超えているケースでは、体育館内部に津波が流入し、溜まっている様子が確認できた。

次に、体育館前面の壁に作用している波力を図-6に示す。前面の壁に津波が到達し、衝撃的な波力が作用した後、継続時間の長い重複的な津波波力が作用している。また、浸水深が高くなるほど津波波力が増大していることが確認できる。体育館内部に津波が流入したCase C~Fでは、流入後に内側から波力が作用することで外側の波力と打ち

消しあい、壁に作用する波力が減少していることが確認された。また、流速の速いCase B, D, Fでは、遅いCase A, C, Eに比べ津波波力が大きく、重複的な波力に対する衝撃的な波力の比率が大きかった。

5. 構造解析モデルおよび解析条件

(1) 構造解析モデル

構造解析の対象とした体育館は、図-7に示すような流体解析と同様の鉄骨造構造物である。スパン数は梁間方向、桁行き方向ともに6、柱および梁部材の材質はSS400とした。モデルはすべて線形要素を用いて構築した。なお、建物の強度に寄与しない壁はモデル化していない。モデルの総要素数、総節点数はそれぞれ2,390, 2,128である。

(2) 解析条件

前章の流体解析Case A~Fで得られた津波波力を外力とし、構造解析モデルに作用させた。流体解析モデルの要素ごとに求められている波力の作用点近傍4点の柱梁接合部に外力を分配した。破断条件としては、部材を構成する各要素の曲率、せん断ひずみおよび引張軸ひずみによる次式を用いた。

$$\begin{aligned} \left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \\ \text{or } \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 κ_x , κ_y , γ_{xz} , γ_{yz} , ε_z はそれぞれx軸、y軸回りの曲率、x軸、y軸方向のせん断ひずみ、引張軸ひずみである。また下添え字 "0" は破断臨界値であることを示す。解析は時間増分1 msの解析を49,501ステップ行い、Intel(R) Core i5-4670 (3.40 GHz), 8 GB RAMのPCを使用し、所要時間は約3時間であった。

6. 構造解析結果

構造解析の結果、Case A, Bでは体育館に変形が生じ、前面の壁が内側にたわむ様子が確認されたが、倒壊には至らなかった。一方、Case C~Fでは体育館が全壊し、完全に瓦礫化した。図-6に示すようにCase A, Bでは津波衝突時の波力は4~6 MNであったのに対し、Case C~Fでは11~30 MNと著しく上昇しており、この波力の差が体育館の挙動に大きく影響したことが考えられる。

解析結果の例として、Case A, Fの結果をそれぞれ図-8, 図-9に示す。体育館は、Case Aでは変形が生じたものの倒壊には至らなかったが、Case Fでは次のような過程で倒壊してしまった。初めに津波が衝突した衝撃で前面が内側に大きく変形し、柱および梁が破断した。その後、前面の柱および梁が後方へ向かう波に引きずられ、それに付随する形で屋根や側面の壁が内側へ陥没し、崩壊が進行した。その後一度は崩壊の進行が止まったが、津波が後方の壁へ回り込んだ際に後方から水圧を受け、完全に倒壊し

てしまった。

なお、図-9において建物の崩壊よりも先に部材が後方へ飛散する現象が確認できる。これは、建物形状が不変の流体解析モデルに加わる荷重が構造解析モデルに加わっているため、移動した部材に対しても初期の荷重が作用し続けてしまうからである。したがって建物が大きく倒壊した場合には、初期形状との差異が大きくなるため、その時刻における正確な波力が体育館モデルに与えられないこととなる。大規模崩壊の正確な挙動を把握するためには、解析ステップごとに部材位置を更新し、その位置で受ける波力を加えるなどの工夫が必要であると考えられる。

7. 結言

本研究では、津波襲来時における体育館の崩壊挙動を再現することを目的とし、一方向流体構造連成解析を行った。まず流体解析を行い、体育館に津波が進行、衝突する様子を再現し、その際の津波波力を把握した。続いて流体解析により求められた津波波力を構造解析モデルに入力し、構造解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 津波到達時の波力の大きさが倒壊挙動に大きく影響する。
- 波力を受け前面の壁が内側に大きく変形することで柱や梁が破断し、倒壊が開始した。

構造解析において体育館が大規模に変形、崩壊する場合には、構造解析モデルの変形に応じた荷重を与えることが重要であり、今後は部材の変形、移動に応じてその位置で受ける波力を作用させる必要があると考える。また、流体解析モデルと構造解析モデルの双方向の力学作用が重要となるため、将来的には双方向の流体構造連成解析を導入する必要がある。

参考文献

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)(東日本大震災)，2011.5.
- [2] 田中 聖三，荻野 弘明，磯部大吾郎：津波避難ビルの損傷評価のための津波伝播解析，計算工学講演会論文集CD-ROM，第21巻，(2016).
- [3] 田中 聖三，孫 方涛，堀 宗朗，市村 強，ラリス マツダゲダラ：動的津波荷重による構造物の破壊解析の基礎的研究，土木学会論文集，Vol.54，pp.903-908，2013.
- [4] 磯部 大吾郎，チョウ ミヨウ リン：飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析，日本建築学会構造系論文集，第579号，pp.39-46，2004.5.
- [5] 日本建築家協会：DA建築図集，体育館，1980.