

(40) 水中爆発による水中構造物の強度評価に関する考察

A Study of FEM Simulations on the Impact Strength of Structures by the Underwater Explosion

丹羽一邦*, 星名博文**, 川端昌史**, 眞鍋慶生**

Kazukuni Niwa, Hirofumi Hoshina, Masafumi Kawabata, Yoshio Manabe

*工修 (株) テラバイト 取締役 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3丁目 21番 4号 三倉ビル 4F)

**工修 (株) テラバイト 第一技術部 (〒113-0034 東京都文京区湯島 3丁目 21番 4号 三倉ビル 4F)

キーワード: 水中爆発、爆発荷重、水中構造物、バブル、FEMシミュレーション
(underwater explosion, blast loading, underwater structure, bubble, FEM simulation)

1. はじめに

水中爆発荷重の衝撃による構造物の変形や破壊の評価に関する研究^{1), 2)}は、第2次大戦のころより理論と実験の両面からなされているが、有限要素法などの解析による研究では、克服すべき課題が少なからず存在し、今だ確立されているとは言い難い。水中爆破の実験自体も容易ではなく、解析結果を検証する十分なデータが少ないことも一因である。

特に近年、テロによる重要構造物の耐衝撃強度評価への関心が高く、原子力発電所等の設備における航空機衝突問題や、爆発による構造物破壊強度評価の問題を、解析によって調査研究する活動が活発になされている。本論文では、弊社がこれまで実施してきたこれらの取組みの内、水中爆破による水中構造物の強度評価解析について述べ、気中爆破による構造挙動との相違、水中爆破で特徴的なバブルの影響などについて考察する。

2. 爆発衝撃波とバブルの関係

水中爆発により発生する過大な圧力は、周囲の水中に衝撃波として音速の数倍の速度で伝搬・拡散してゆき、その継続時間は1ms以下のオーダーと極めて短い。一方、爆発生成ガスはこの衝撃波の発生・伝搬からかなり遅れて徐々に膨張しバブルを形成する。バブル内の圧力は膨張により低減し、水中の静水圧より低くなっても慣性力によりしばらく膨張を続けるが、慣性力が静水圧に抗しきれなくなるとバブルは収縮し始める。バブル内部の圧力は収縮によって上昇し、充分圧縮されるまで収縮すると今度は再び膨張を始める。このような膨張と収縮を

周期的に何回か繰り返す様子は実験でよく知られた現象である。爆発により発生する初期衝撃波圧力と、その後のバブルの最大半径と膨張収縮の周期は、実験式により予測でき、解析精度の検証に利用できる。これらの予測式²⁾を以下に示す。

$$a_{\max} = \frac{J_{ex} W^{1/3}}{(H + H_0)^{1/3}} \quad (1)$$

$$t_b = \frac{K_{ex} W^{1/3}}{(H + H_0)^{5/6}} \quad (2)$$

a_{\max} : バブル最大半径, t_b : バブル周期

J_{ex} : TNTの水中爆発のバブル半径に関する定数3.5

K_{ex} : TNTの水中爆発のバブル半径に関する定数2.11

W : TNTの質量[kg], H : 爆薬までの水深[m]

H_0 : 1気圧の水深[m]

図-2.1は水深約90m, TNT薬量約240gによる、衝撃圧力、バブル半径と周期について、LS-DYNAによる解析結果を実験計測値¹⁾および式(1),(2)の実験式結果と比較している。衝撃圧力値は、メッシュサイズに敏感であり、ここでは最少9mmの立方体メッシュ180万要素で、実験式の結果と一致する結果が得られた。また、バブルの最大半径はよく一致しているが、バブルの履歴は、最大半径に達した後の収縮時間が実験結果とは7%程度短くなっている。第2バブル以降は、解析の方がバブル半径は大きく、周期は長くなっている。これらの要因の一つとして、有限の解析領域と一定圧力境界条件が考えられる。

3. 爆発衝撃波とバブルによって構造物が受ける衝撃荷重

図-2.1 に示したように、バブルの径が最小となる収縮時にも初期衝撃圧力に比較して小さいが、圧力波が発生する。このようなバブル圧力による構造強度の評価は、潜水構造物等に対して行われており、特に爆薬が構造物に接触しない条件（スタンドオフ）で、構造物の損傷がバブル圧力によって生じていると報告されている。バブルは、スタンドオフの量が、バブル半径程度以内であるとバブル収縮時に構造物に接近し、最少径になる時点で構造物に付着する傾向を有する。従って、この場合にはバブル収縮時に発生する圧力が直接構造物に作用し、初期衝撃圧力では損傷に至らないでも、バブル圧力が構造物に損傷を与えることは十分考えられる。

図-3.1 は水中の 0.6m 四方剛体版上中心にペントライト 51g の爆薬がある場合に、剛体版が爆薬から受ける版上の平均圧力の履歴である。初期衝撃圧からバブル圧力が発生する時刻までを示している。最大となる初期衝撃圧力の発生後は、図-3.2 に示すように衝撃波が剛体版上を通り過ぎる 0.2ms 程度まで 20MPa を超える高い圧力が継続する。この時の剛体版上の圧力分布を見ると、図-3.3 に示すように円形に拡大する衝撃波先端の外周圧力は高く、外周円内側の圧力はその 1/4 程度に低減している。この時点では、爆発生成ガスの膨張はまだ小さく、その後バブルを形成しそれが収縮する約 36ms まで高い圧力は発生しない。図-3.1 に示したようにバブル衝撃圧の大きさは、最大約 17MPa で作用時間は長く、力積という視点からは、バブル荷重も無視できないものとなる。

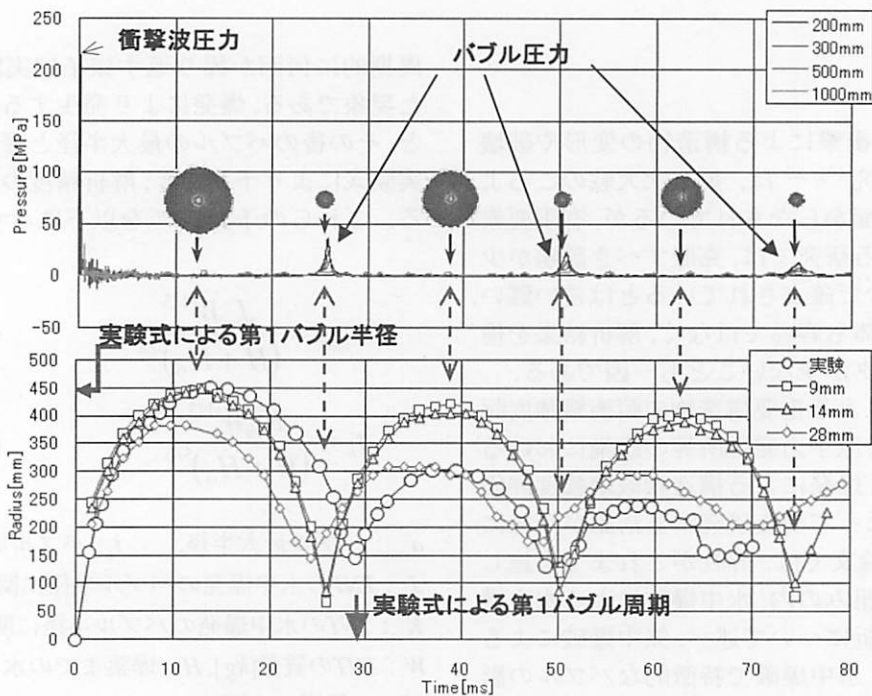


図-2.1 衝撃圧力とバブル圧力およびバブル半径とバブル周期

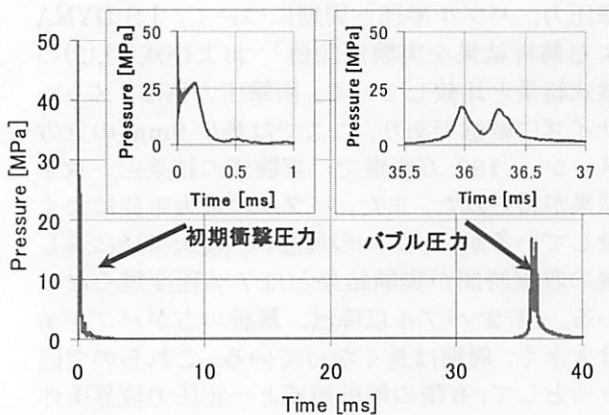


図-3.1 水中爆破の初期衝撃圧とバブル圧力

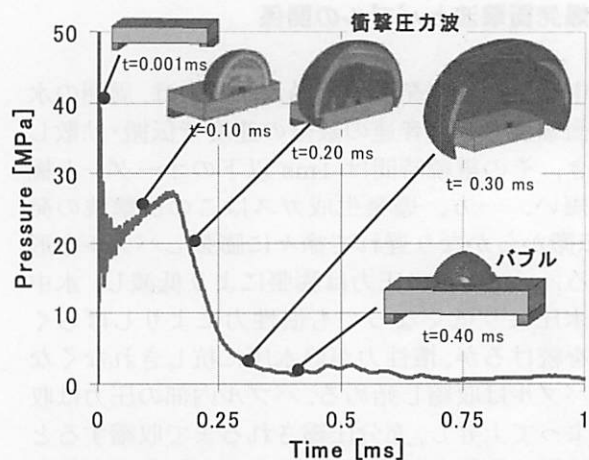


図-3.2 初期衝撃圧力と圧力波及びバブルの形成

4. 鉄筋コンクリート版の爆発衝撃波による挙動

4. 1 気中爆破実験と解析モデル

(1) 実験概要

森下ら³⁾は、図-4.1に示すRC版の爆薬による気中での破壊実験を行っている。実験は図に示すようにRC版を2本の角材上に設置し、爆薬をRC版中央に設置している。本研究では、コンクリート強度47.5MPa、51g ペントライト爆薬の実験結果を対象として数値シミュレーションを実施した。

(2) コンクリートの有限要素モデル

図-4.2にRC版の気中爆発及び水中爆発による数値シミュレーションモデル⁴⁾を示す。空気あるいは水はEuler要素、構造体はLagrange要素とし、構造流体連成問題として解析する。図に示すように、RC版は形状対称性を考慮し1/4モデルとした。モデル規模は30万要素である。ただし、水中爆発シミュレーションでは1/1モデルとした。モデル規模は120万要素である。

コンクリートの材料構成則には、圧力依存の塑性モデルを採用し、コンクリートの圧壊とスポール破壊が模擬できるモデルを利用した。また、コンクリートの圧縮特性は、藤掛ら⁵⁾の3軸圧縮載荷試験結果を参考に決定した。

コンクリートの破壊には、1)スポール破壊のような局所的な引張側圧力による破壊、2)主応力方向に

直交する引張りひび割れ破壊、3)圧壊による圧縮破壊が考えられる。1)は爆破衝撃による圧縮応力波がコンクリートの裏面で膨張波として反射する結果生じ、裏面剥離を引き起こす。これは引張の圧力により判定する。2)については曲げによる引張り領域に発生する。3)は爆薬直下のクレータの発生を引き起こすと考えられる。

本研究では、引張りひび割れ破壊の判定にはコンクリート圧縮強度の1/10の値の引張応力値を用い、圧壊についてはコンクリート圧縮軟化剛性特性として取り入れた。

コンクリートの破壊後の扱いとして、破壊した要素の削除を行った。要素削除の判定基準には、4)引張圧力によるスポール破壊、5)引張側のひび割れ破壊、6)圧壊によるせん断ひずみをそれぞれ考慮した⁴⁾。

(3) 鉄筋の有限要素モデル

鉄筋はビーム要素にてモデル化し、2直線近似の弾塑性材料とした。

(4) 爆薬の有限要素モデル

爆薬と空気または水をEuler要素でモデル化し、爆薬の材料モデルにおける圧力計算にはJWL(Jones-Wilkins-Lee)の状態方程式を利用する。空気は線形多項式の状態方程式を使用する。水については圧縮性を考慮する場合、一般的に用いられるGRUNEISENの状態方程式を使用する。

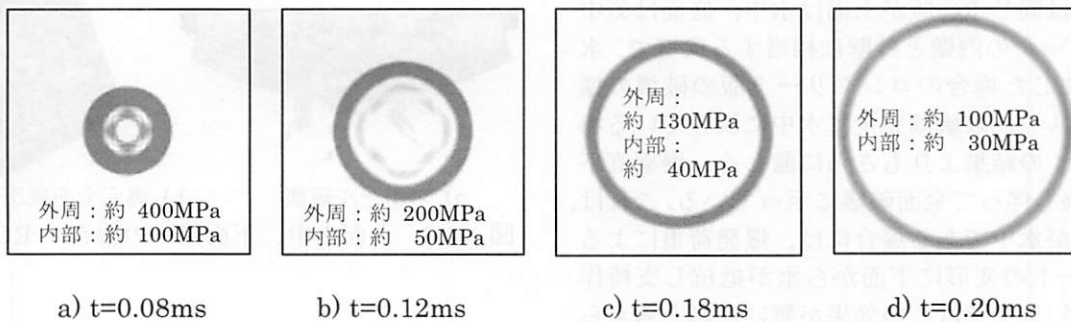


図-3.3 剛体版面上の衝撃圧力分布推移 (剛体版 □0.6m)

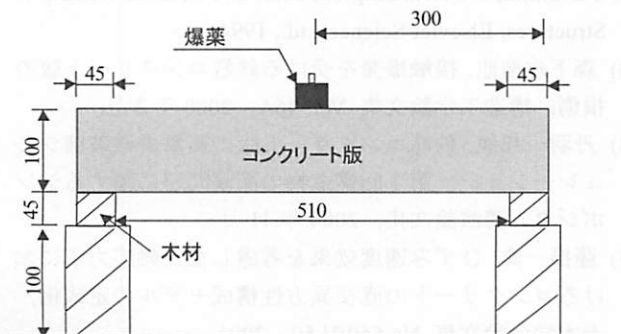


図-4.1 気中でのRC版の爆破実験モデル

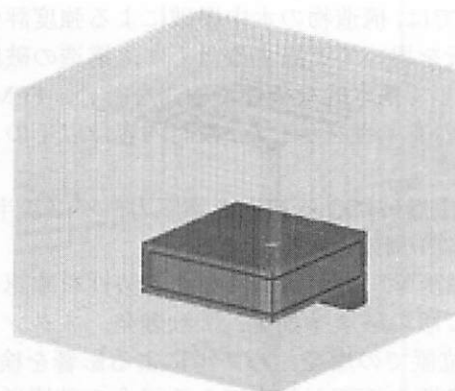


図-4.2 RC版の爆破解析有限要素モデル

4.2 数値シミュレーション結果

図-4.3a), b)に森下ら³⁾が実施したRC版の気中爆発による実験結果を示す。図に示すように、RC版上下面にクレータ及びスポール破壊とひび割れが生じている。

同図c)にRC版の気中爆発による数値シミュレーション結果を示す。気中爆発の実験結果と比較すると、数値シミュレーション結果による破壊の状態は実験結果のものと同様一致している。

図-4.4にRC版の水中爆発による破壊の数値シミュレーション結果を示す。図-4.4 a)は接触爆発による爆発後10msでのRC版の破壊の様子である。3章で述べた剛体版が受ける衝撃荷重とほぼ同等の20MPa程度の圧力が負荷され、版上全面に過大な荷重を受けてせん断破壊モードによる破壊が生じていると思われる。この破壊は、図-4.3に示した気中での同量の爆薬による破壊モードとは、その破壊損傷程度に於いて比較にならないほど甚大である。一方、図-4.4 b)は爆薬とのスタンドオフが式(1)から計算されるバブル半径約450mm以内で240mmの場合の破壊を示しており、曲げ破壊モードが生じている。

図-4.5は爆薬量を10gとしてバブルによる破壊への影響を見るために解析した結果であるが、接触爆発では、初期の衝撃圧力による破壊が支配的であり、バブルの影響によりわずかに破壊が進行するのみであることを確認した。

図-4.6は同じRC版が上面は水中、底面は気中にあり、プールの内壁と外壁に相当する環境で、水中爆発が生じた場合のコンクリート版の破壊の様子を示している。破壊は完全に水中に没している場合の図-4.4の結果よりもさらに激しく、爆薬直下の貫通破壊も伴って全面破壊に至っている。これは、RC版下部が水中である場合には、爆発荷重によるコンクリートの変形に下面から水が抵抗し支持作用となるが、気中ではこの効果が無いためと考えられる。

まとめ

本研究では、構造物の水中爆破による強度評価をFEM解析を用いて実施するために、構造の破壊挙動に着目して基本的な条件で検討を行い、FEMによる解析の有効性を示した。検討内容は以下のようである。

- (1) 水中爆破による初期衝撃圧力、バブル半径、バブル周期を模擬できる
- (2) 初期衝撃圧力が構造に与える特性を確認した
- (3) RC版の破壊挙動を、接触爆発、スタンドオフ位置での爆発、バブルによる影響を検討
- (4) RC版の下面が気中である場合の破壊挙動

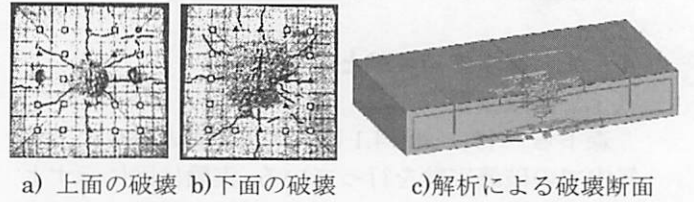


図-4.3 森下らの気中爆破実験結果と解析結果の比較

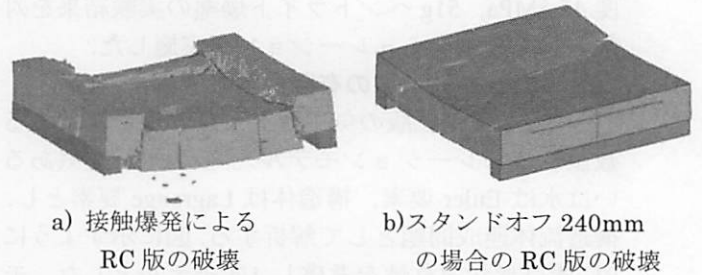


図-4.4 RC版の水中爆破による破壊モード

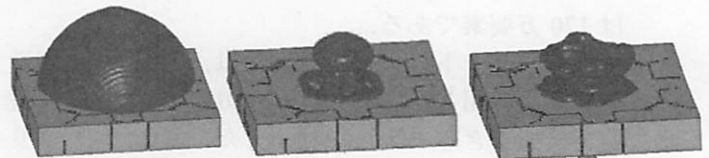


図-4.5 バブルによるRC版破壊への影響

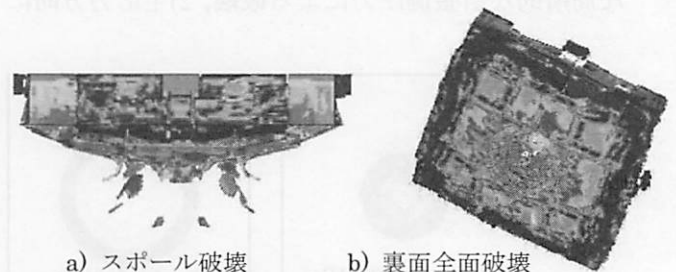


図-4.6 上面水中、下面気中の場合のRC版破壊

参考文献

- 1) ROBERT H. COLE, UNDERWATER EXPLOSIONS, Princeton University Press, Princeton, NJ., 1948
- 2) P.D.Smith, J.G.Hetherington, Blast and Ballistic loading of Structures, Elsevier Science Ltd., 1994
- 3) 森下政浩他, 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集 Vol. 46A, 2000年3月
- 4) 丹羽一邦他, 鉄筋コンクリート版の衝撃爆破破壊シミュレーション, 第7回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2004年11月
- 5) 藤掛一典, ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集 No.669/V-50, 2001