

水蒸気爆発評価における引張応力の考慮について

以下に示すとおり、東海第二発電所の水蒸気爆発評価では、引張応力の影響を考慮することができる解析モデルを適用し、ペDESTALの構造健全性を評価している。

1. コンクリートの材料モデル

LS-DYNAコードにおけるコンクリートの材料モデルとして、RHTモデルを適用している。

RHTモデルは、爆発によってコンクリートに生じる圧縮応力の影響のみならず、コンクリート内を伝播する圧力波が、躯体裏面で反射することで生じる引張応力（負圧）の影響についても考慮可能なモデルである。

また、コンクリートの圧力及び応力の分布の時刻歴により計算される累積塑性ひずみに応じたダメージパラメータを評価しており、このダメージパラメータに対応したコンクリートの残存強度が考慮される。ここで、ダメージパラメータは0から1の変数であり、0は初期状態、1はコンクリートの殆どの強度が喪失した状態に相当する。さらに、相当塑性ひずみ μ) 到達により要素をエロージョンする設定となっている。

これらの機能により、RHTモデルではコンクリートの裏面剥離（スポール破壊）や貫通破壊などの局部破壊状態を模擬することが可能である。なお、RHTモデルの局部破壊状態模擬の妥当性は鉄筋コンクリート版爆破実験との検証解析^[1]により確認されている。第1図に実験体系を、第2図に検証解析結果を示す。

2. 引張応力の影響について

水蒸気爆発が発生することで、床スラブ上表面では圧縮場が発生し、その後遅れて、床スラブ下表面より引張場が発生する。第3図に圧力分布を示す。

水蒸気爆発の影響により、床スラブのコンクリートには一部ひずみが生じるが、ダメージパラメータが示す破壊範囲（ダメージパラメータ1の範囲）は爆発源の直下のペDESTAL床スラブ上表面の僅かな範囲にとどまり、また、相当塑性ひずみはエロージョン設定に到達せず、裏面剥離（スポール破壊）や貫通破壊は生じていない。第4図に最大主ひずみ分布を、第5図に最小主ひずみ分布を、第6図及び第7図に相当塑性ひずみ分布を、第8図にダメージパラメータ分布をそれぞれ示す。

3. 米国ガイダンスを参考としたペDESTAL構造健全性評価

2.において、水蒸気爆発時の引張応力によってペDESTALの構造健全性に影響を与える局部破壊は生じないことを示しているが、参考として米国ガイダンスに示された判断基準と解析結果を比較する。

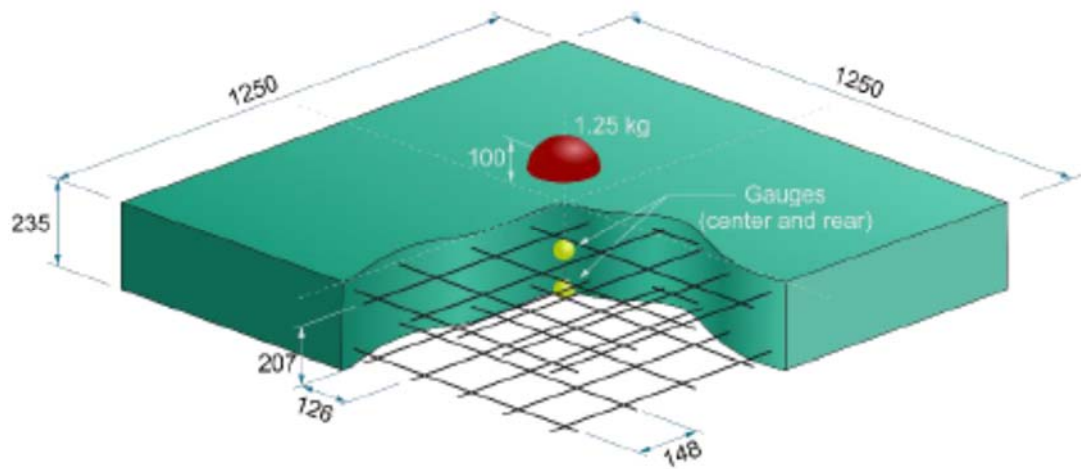
米国NRCの航空機衝突評価審査指針がエンドースしている、原子力エネルギー協会（NEI）ガイダンスNEI 07-13^[2]において、コンクリートのせん断ひずみ0.5%（5,000 μ ）（第9図）が衝撃荷重に対するコンクリート構造物の健全性評価の判断基準として示されている。このせん断ひずみ0.5%を超えない限り、裏面剥離（スポール破壊）や貫通破壊は発生しないと考える。

第10図にコンクリートのせん断ひずみ分布を示す。爆発源の直下のペDESTAL床スラブ上表面を除き、判断基準である0.5%（5,000 μ ）を超過する部位は生じておらず、床スラブ下表面では0.05%（500 μ ）程度と十分に低い値を示している。したがって、水蒸気爆発によって、裏面剥離（スポール破

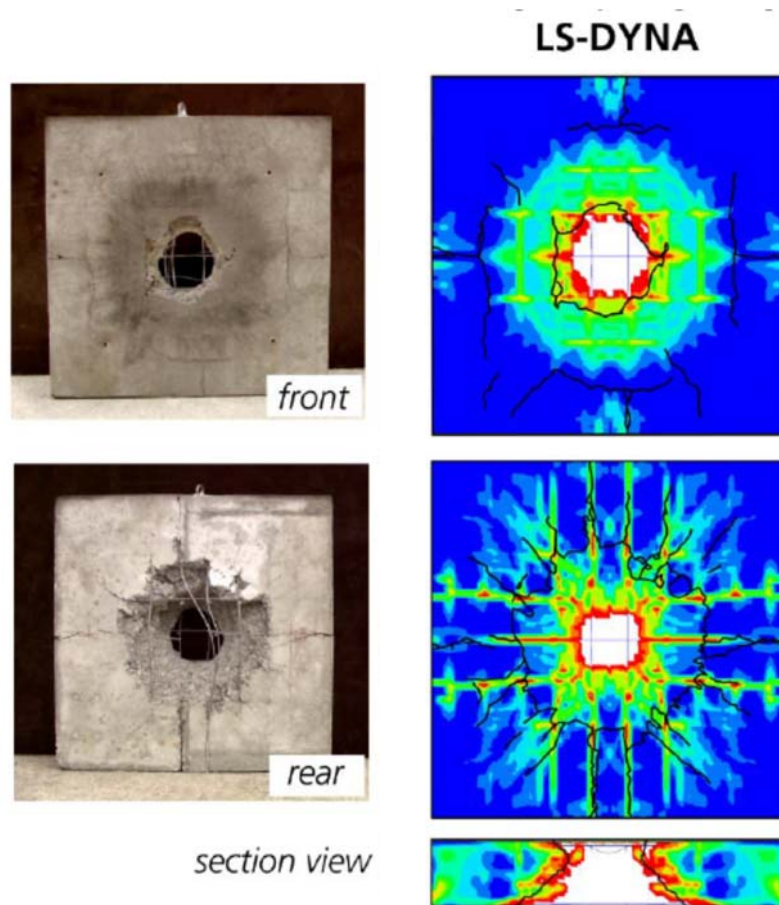
壊) や貫通破壊が生じることはなく, ペDESTALに要求される機能は維持される。

4. 引用文献

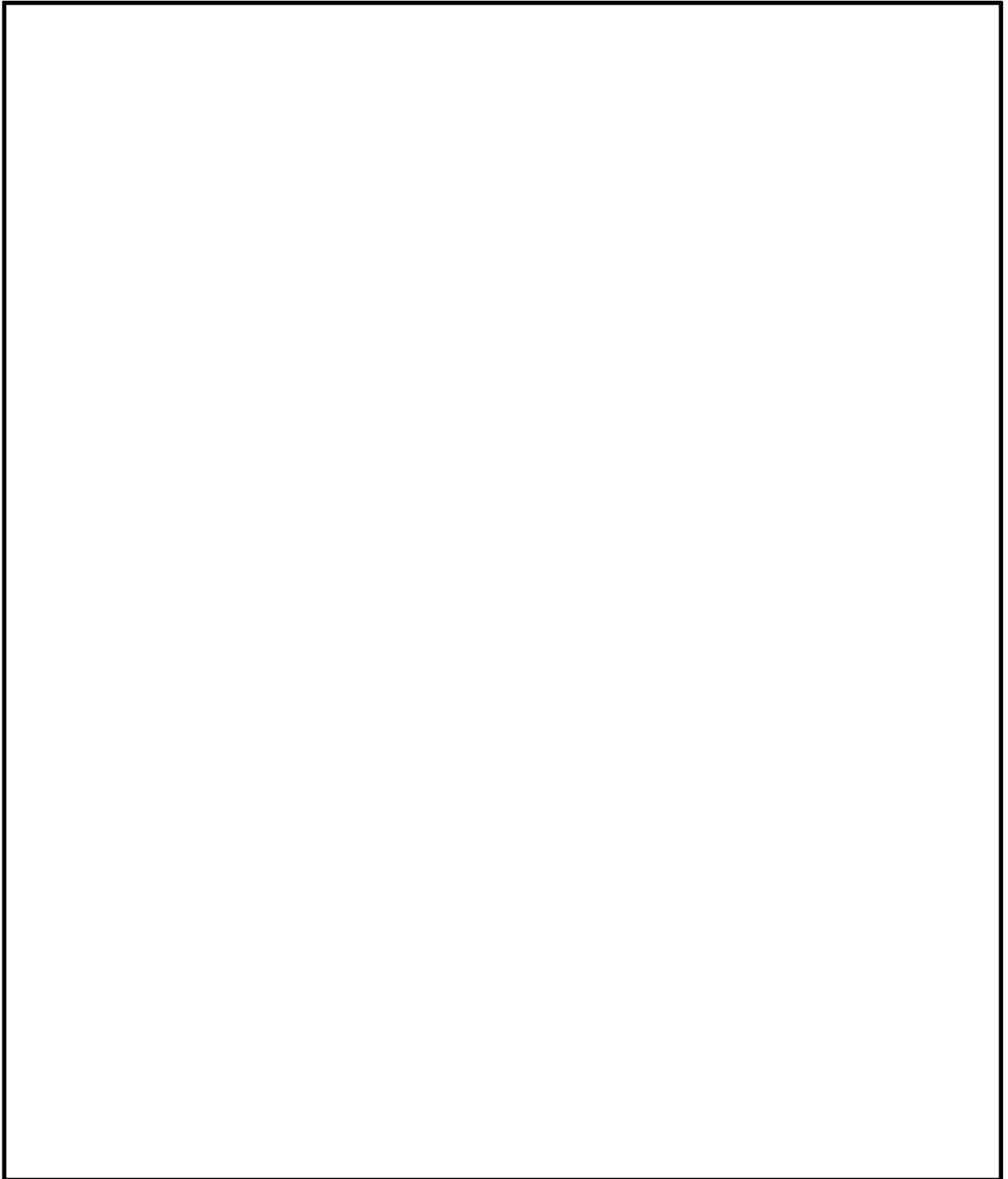
- [1] A General Concrete Model in Hydrocodes:Verification and Validation of the RHT model in LS-DYNA, Grunwald et.al., International Journal of Protective Structures 2017, Vol 8(1), 58-85;
- [2] Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs, NEI 07-13, Revision 8P, ERIN Engineering & Research, Inc., April 2011



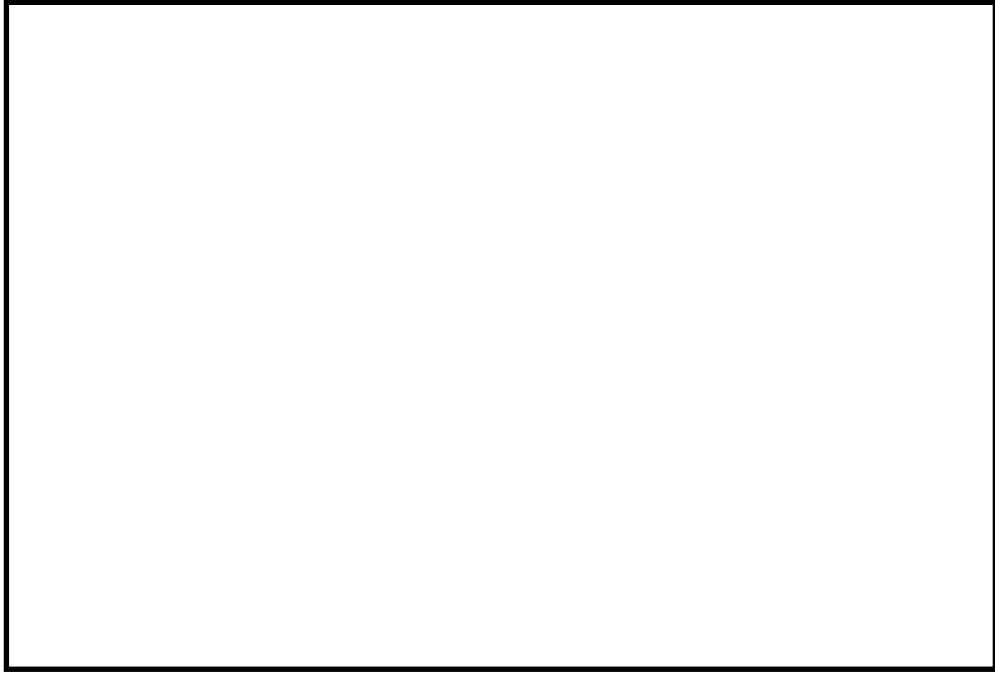
第 1 図 実験体系



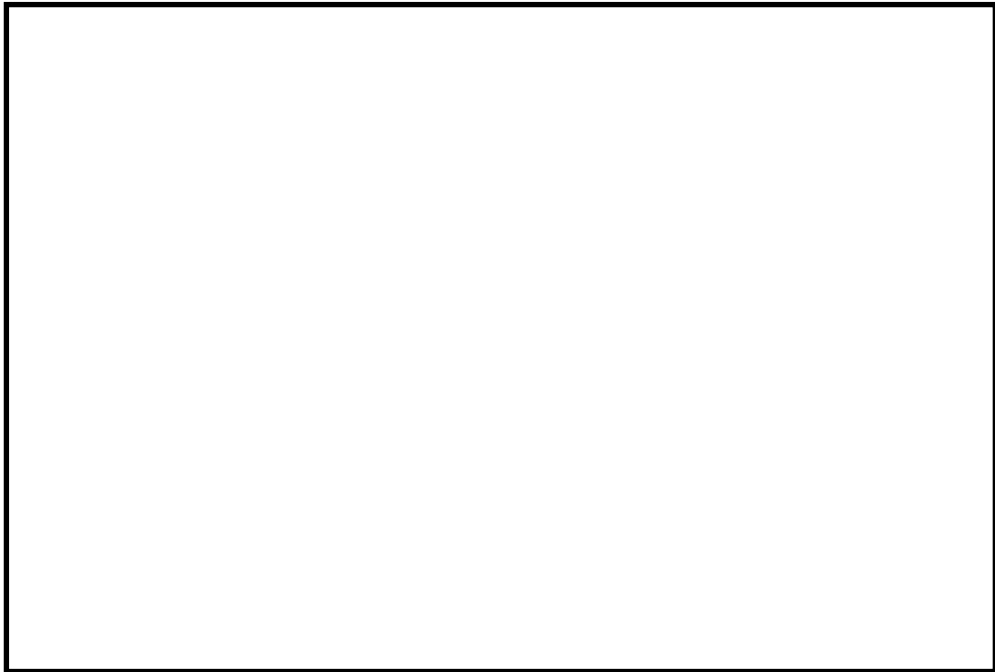
第 2 図 検証解析結果



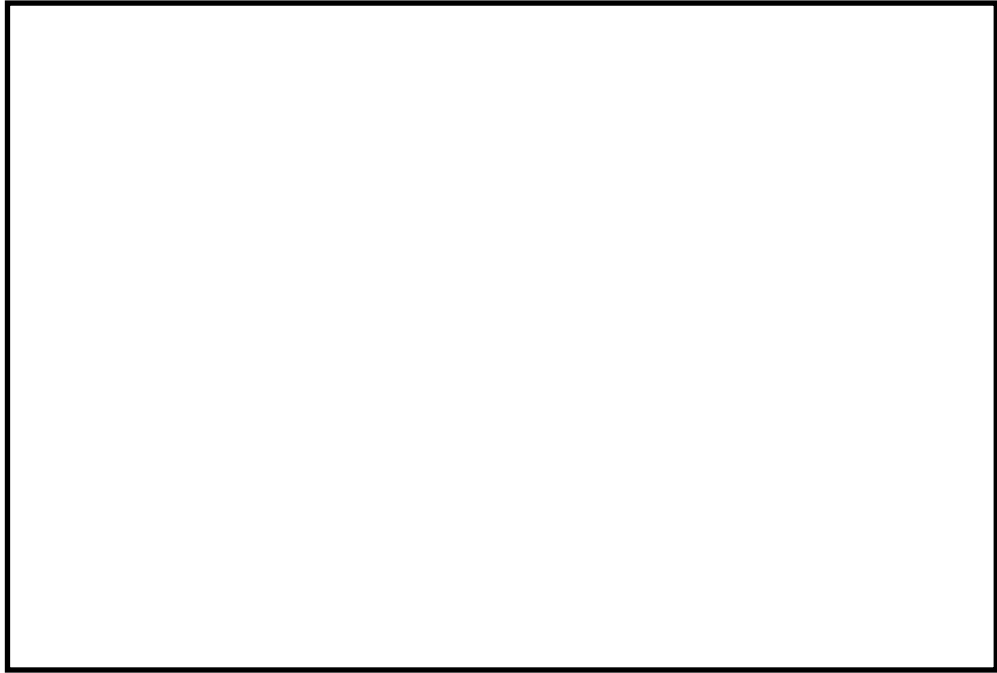
第 3 図 コンクリートの圧力分布



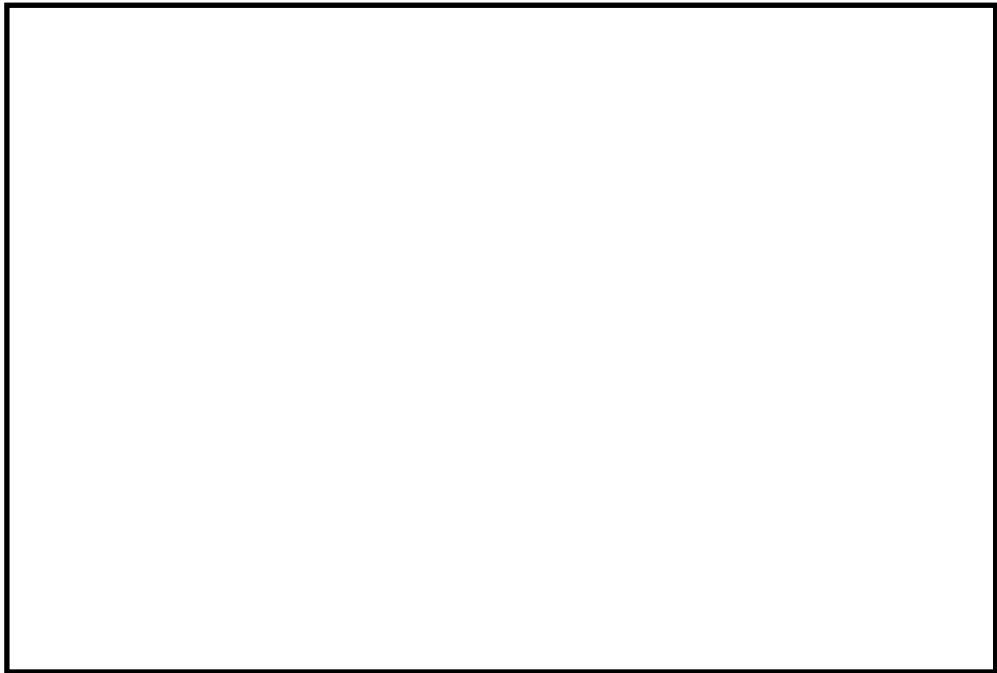
第4図 コンクリートの最大主ひずみ分布（引張）



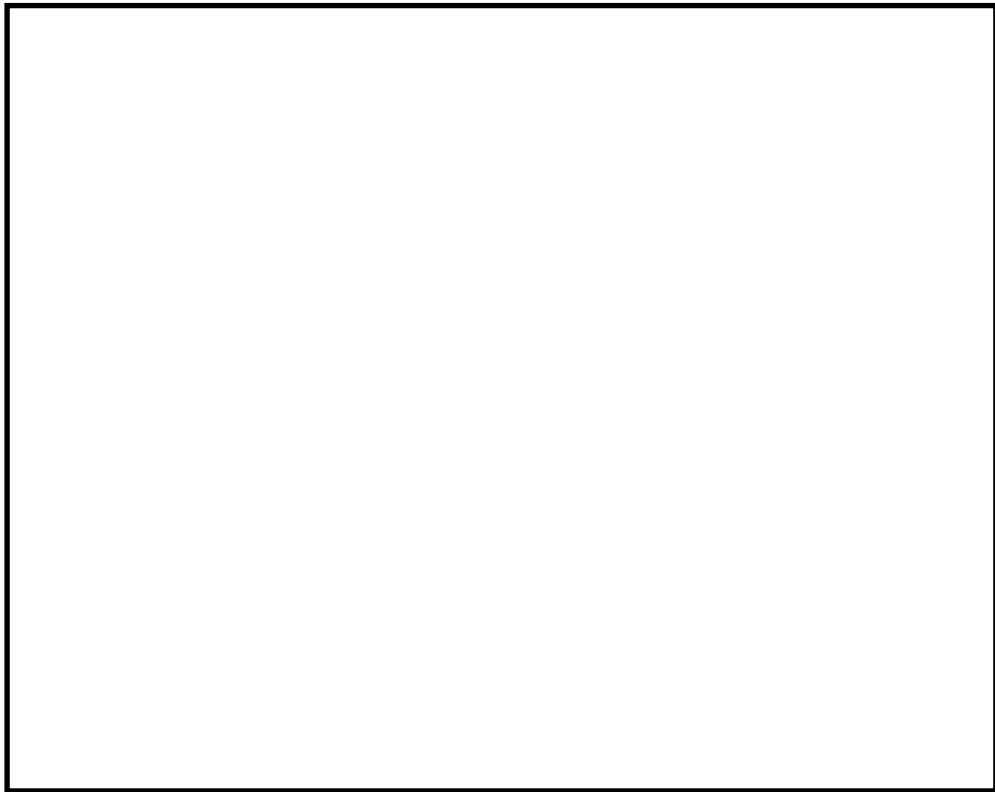
第5図 コンクリートの最小主ひずみ分布（圧縮）



第 6 図 コンクリートの相当塑性ひずみ分布



第 7 図 コンクリートの相当塑性ひずみ分布



第 8 図 コンクリートのダメージパラメータ分布

NEI 07-13, Revision 8P
April 2011

Additional information on the concrete and steel material models can be found in Reference 1.

2.3.5 Structural Integrity Failure Criteria

The recommended structural integrity failure criteria are the same as those used for the EPRI aircraft impact studies of existing nuclear power plants, and have been validated by benchmarking against test results, such as the Sandia National Laboratories rocket sled track water slug impact tests WS-1 and WS-2 [19]. The structural integrity failure criteria for use in realistic analysis are based upon strain levels without any margin.

For concrete structures, the failure criterion for the concrete itself is cracking that leads to a closed-loop shear strain mechanism forming completely through the wall, with the shear strain in the mechanism loop greater than 0.5 % through the wall.

Further detail on these structural acceptance criteria can be found in References 1 and 19.

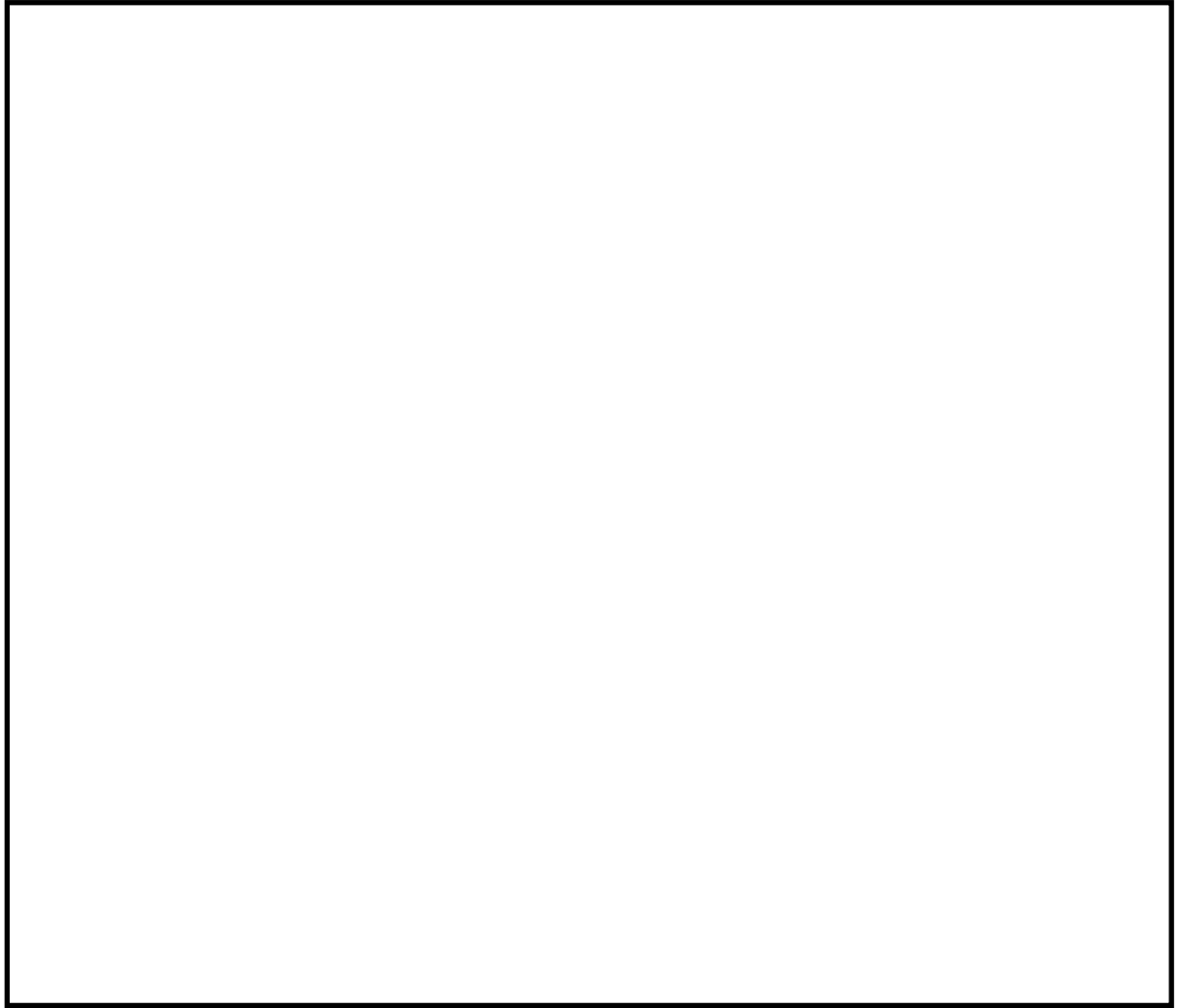
Any deviations from the recommended structural integrity failure criteria require a level of justification comparable to that established in References 1 and 19.

2.4 MAJOR ASSUMPTIONS

The following major assumptions apply to the methodology for assessing the integrity of containment buildings subjected to an aircraft impact. It is noted that many of the assumptions are conservative. This approach helps to at least partially offset uncertainties in both the aircraft impact and the structural response models.

2.4.1 Containment Analyses

1. The aircraft and engine are assumed to strike perpendicular to the centerline of the structure, thereby subjecting the structure to the maximum force of the aircraft. Because the containment is curved, missing the centerline reduces impact forces.
2. For the case of potential aircraft impact on a containment shell dome, expert engineering judgment based on airplane glide slope limitations, combined with curvature effects in both the circumferential and meridional directions, shows that dome impact is a less critical impact location, in comparison to a strike at either mid-height or at the spring-line. However, each vendor must evaluate the relevance of this expert engineering judgment with respect to plant-specific design characteristics, and should determine whether a dome strike should be considered.
3. For free-standing steel containment designs, special consideration of missile-target interaction may be necessary, depending upon the



第 10 図 コンクリートのせん断ひずみ分布

衝撃波が水中を伝播する解析モデルの使用実績について

RHTモデルを適用した鉄筋コンクリートモデルについて、気中での近接爆破実験との比較により検証し、水中での爆破解析に応用した事例^[1]が報告されている。第1図に気中での近接爆破実験体系を、第2図に実験と解析の比較を、第3図に水中爆破解析モデルを、第4図に水中爆破解析結果をそれぞれ示す。

- [1] Numerical simulation analysis of damage mode of concrete gravity dam under close-in explosion, KSCE Journal of Civil Engineering (2017) 21(1):397-407.

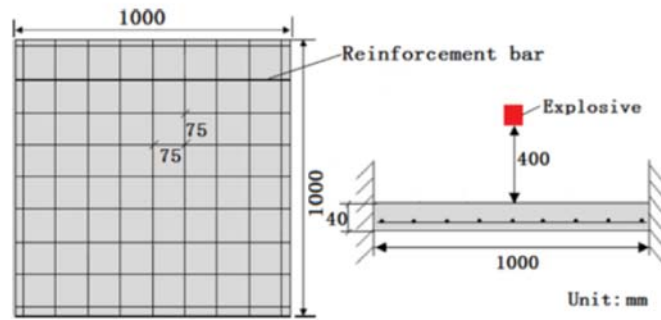
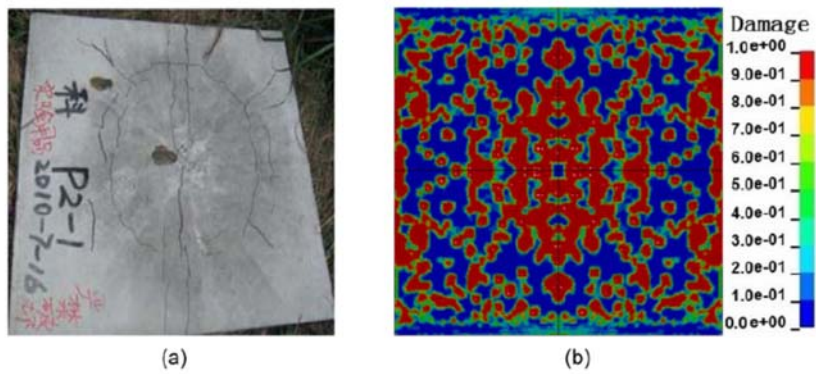
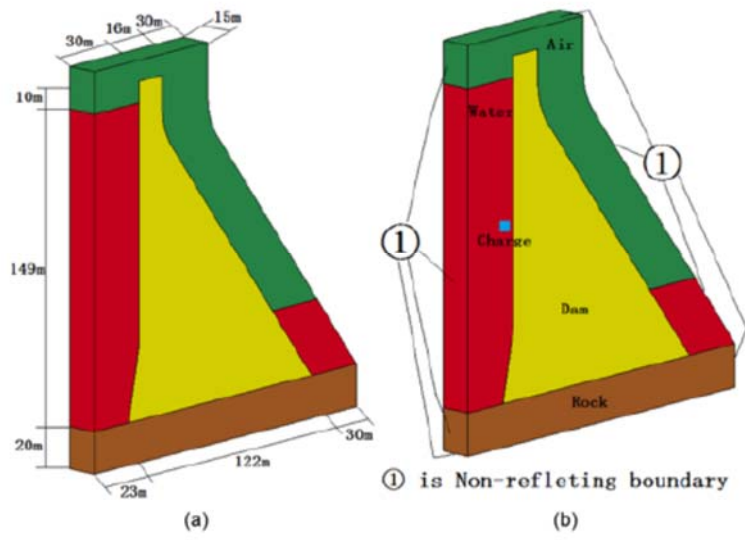


Fig. 2. Geometry of the Reinforcement Concrete Slab

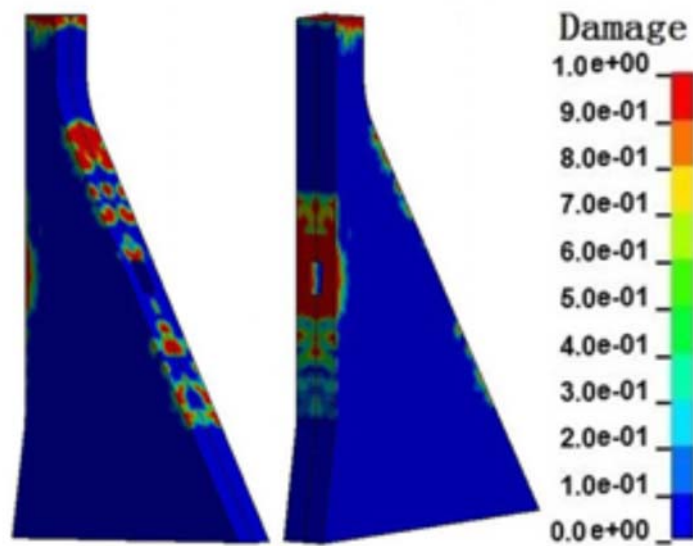
第 1 図 気中での近接爆破実験体系



第 2 図 実験と解析の比較



第 3 図 水中爆破解析モデル



第 4 図 水中爆破解析結果