

衝撃荷重を受ける構造物の最大応答解析法

An analysis method for maximum response of structures
subjected to impulsive forces

(株)東芝	仲村 岳	Gaku NAKAMURA	Non member
(株)東芝	奥田 幸彦	Yukihiko OKUDA	Non member
(株)東芝	川幡 宏亮	Hiroaki KAWABATA	Non member
(株)東芝	神保 雅一	Masakazu JIMBO	Non member

A simplified evaluation method for the nuclear power plant structures subjected to impulsive forces caused by the floating debris and tornado missiles is proposed. In this study, the maximum shock response displacement is obtained on the assumption that the impulse of the collision is constant. Then the maximum shock response displacement is used to evaluate structural damage by the classical elastic analysis. To verify the proposed method, impact analysis with FEM was performed. Comparisons of the maximum effective strain between the impact analysis and the proposed method show the conservative estimation of the displacement and the strain by the proposed method.

Keywords: Impact, Impulsive force, shock response, debris, missile

1. はじめに

東日本大震災では、遡上津波の流体力の作用に加え、自動車や流木等の漂流物の衝突によっても海岸付近の構造物が破壊された。そのため、将来予想される津波に対する被害を最小限に留めるためには、津波波力評価だけでなく、津波漂流物が衝突した場合の衝撃力も評価しておく必要がある。原子力発電プラントの各種構造物については、実用発電用原子炉の安全性向上に関するガイド[1]で津波や竜巻等の外部事象に対して安全性評価が要求されている。こうした安全評価を実施するうえでは、ある程度の安全率が担保され、かつ簡便な衝撃力の評価手法が望まれる。簡便な評価法の一つとして、米国緊急事態管理庁 (FEMA) が示したガイドライン[2]に示されている評価式が挙げられるが、衝撃荷重の時間変化を無視しており動的な評価結果に比べて過大評価となる場合がある。

そこで、本研究では衝撃荷重を受ける構造物の健全性を従来法よりも精度良く評価できる簡易な手法の構築に向けて、球体が平板に衝突する基本モデルについて、衝

撃荷重の時間変化を考慮した評価式を提案した。この手法による評価結果と FEM 衝突解析及び従来の静的荷重による結果を比較し評価式を検証した。

2. 弾性系の衝撃応答解析法

評価対象となる構造物の 1 自由度モデルを用いた衝撃応答の解析法を示す。この 1 自由度系を無減衰の線形系とし、三角波衝撃荷重が作用すると仮定する。1 自由度モデルの運動方程式は、

$$m\ddot{u} + ku = P(t)$$

ここに、 m は質点の等価質量、 u は応答変位、 k は等価剛性、 $P(t)$ は衝撃荷重、 t は時刻を表す。図 1 に示すような三角波衝撃荷重 $P(t)$ は次式で定義する。

$$P(t) = \begin{cases} P_0 t / t_0, & (0 \leq t < t_0) \\ P_0 (2t_0 - t) / t_0, & (t_0 \leq t < 2t_0) \\ 0, & (2t_0 \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

上式で、 P_0 は荷重のピーク値、 t_0 は荷重の立ち上がり時間である。ここで、衝撃荷重 $P(t)$ に対する応答 $u(t)$ を畳

み込み積分により求めると、

$$u(t) = \int_0^t \frac{P(\tau)}{\omega m} \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

となる。衝撃荷重の時間区分に応じて $u(t)$ の具体形を求めると、

(i) $0 \leq t < t_0$ のとき

$$\begin{cases} u_1(t) = \frac{P_0}{\omega^2 m t_0} \left(t - \frac{1}{\omega} \sin \omega t \right) \\ \dot{u}_1(t) = \frac{P_0}{\omega^2 m t_0} (1 - \cos \omega t) \end{cases} \quad (3)$$

(ii) $t_0 \leq t < 2t_0$ のとき

$$\begin{cases} u_2(t) = \frac{P_0}{\omega^2 m t_0} \left[2t_0 - t - \frac{1}{\omega} \{ \sin \omega t - 2 \sin \omega(t-t_0) \} \right] \\ \dot{u}_2(t) = \frac{P_0}{\omega^2 m t_0} \{ -1 - \cos \omega t + 2 \cos \omega(t-t_0) \} \end{cases} \quad (4)$$

(iii) $2t_0 \leq t$ のとき

$$\begin{cases} u_3(t) = \frac{P_0}{\omega^3 m t_0} \{ 2 \sin \omega(t-t_0) - \sin \omega t - \sin \omega(t-2t_0) \} \\ \dot{u}_3(t) = \frac{P_0}{\omega^2 m t_0} \{ 2 \cos \omega(t-t_0) - \cos \omega t - \cos \omega(t-2t_0) \} \end{cases} \quad (5)$$

次に、最大応答変位を求めるために、式(3)から式(5)の各時間区間での応答が極値をとる際の時刻 t_m を求める。式(3)から式(5)を時刻 t について微分して 0 と置けば、

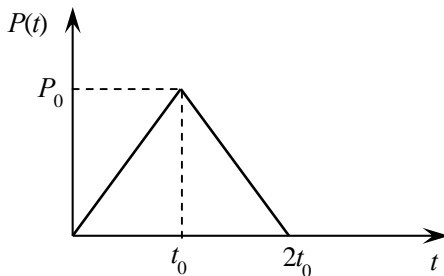


Fig.1 Time history of isosceles triangular load pulse

(i) $0 \leq t < t_0$ のとき

$$t_{m1} = \frac{2\pi}{\omega} (i+1), \quad (i=0,2,3,\dots) \quad (6)$$

(ii) $t_0 \leq t < 2t_0$ のとき

$$t_{m2} = \frac{1}{\omega} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{1}{r} \right) - \phi \right\} \quad (7)$$

ここに、 $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ 、 $a = 2 \sin \omega t_0$ 、 $b = 2 \cos \omega t_0 - 1$ であり、 ϕ は $\cos \phi = a/r$ 及び $\sin \phi = b/r$ を満たす。

(iii) $2t_0 \leq t$ のとき

$$t_{m3} = \frac{\pi}{2\omega} (2i+1) + t_0, \quad (i=0,1,2,\dots) \quad (8)$$

式(6)(8)中の整数 i は、それぞれの区間で極値が複数存在する場合があることを示している。

次に、式(6)から(8)で求めた t_{m1} 、 t_{m2} 、 t_{m3} を対応する時間区分の応答変位式(3)から式(5)に代入して応答変位の最大値 u_{\max} を求める。このとき、二等辺三角波衝撃荷重のピーク値 P_0 と t_0 を力積 I 、

$$I = \int_0^{2t_0} f(\tau) d\tau = P_0 t_0 \quad (9)$$

が一定となるように変えて、その力積が作用する構造物の最大応答変位 u_{\max} を求める。

3. 簡易評価法の比較検証

ここでは、平板への球体の衝突問題を例題として、簡易評価法による結果を FEM 解析と比較し妥当性を検証する。まず構造物が受ける衝撃荷重及び力積を、被衝突物を剛体とした FEM 衝突解析によって評価する。このような仮定により、構造物側のエネルギー吸収が無い状態で衝撃荷重を評価するため、安全側の評価結果が得られると考える[3]。次に、構造物に作用する力積が一定であれば衝撃荷重のピーク値が極端に大きくなったとしても、構造物の動的応答変位がある最大値に収束することを確認する。最後に、この最大応答変位を用いた静的な解析により構造物の健全性を簡易評価する手法について述べる。この評価結果が、従来の衝撃荷重のピーク値による評価結果に比べて合理的であり、かつ衝突挙動を模擬した FEM より保守側の評価結果を与えることを示す。

なお、簡易評価法における力積の評価は剛体への FEM

衝突解析を実施しなくても、反発係数が 1 となる完全弾性衝突を仮定することで $I=2MV$ と求めることができる。また、衝突体の貫通などといった局所的な破損モードについては別途評価することとし、本研究では構造物の全体応答を評価することを考える。

3.1 評価例題の設定

前章で定式化した 1 自由度系の衝撃応答解析法を用いた簡易評価法を示しその適用性を検討する。まず図 2 に示すような 4 辺を固定した板の中心に質量 18kg、初速 5m/s の半球体が衝突する例題について FEM による衝突解析を行う。このとき、剛性の異なる構造物が評価対象となることを想定し、図 2 の平板の板厚を 30mm、50mm、80mm と変えた場合について FEM 衝突解析を実施する。さらに、FEM 衝突解析で得られた最大応答変位を参照解として、簡易評価法による結果と比較することで、簡易評価法の保守性や妥当性について検討する。FEM 衝突解析では、材料特性としてステンレス鋼を想定し、ヤング率 195GPa、ポアソン比 0.3、降伏応力 277MPa とした弾完全塑性体を仮定する。さらに、降伏応力は図 3 に示すような速度依存性[4]を仮定する。

3.2 最大応答変位の評価

ここでは、衝撃荷重のピーク値を静的に与える従来の方法と、力積を入力値とした衝撃応答解析による方法の 2 つの簡易評価法を、FEM 衝突解析と比較検討する。

まず、FEM 衝突解析で得られた相当ひずみが、平板の衝突点下面で最大となるときの分布図を図 4 から図 6 に示す。図中では相当ひずみが 0.2% を超える部分を黒色で表示した。いずれの板厚においても衝突点近傍で相当ひ

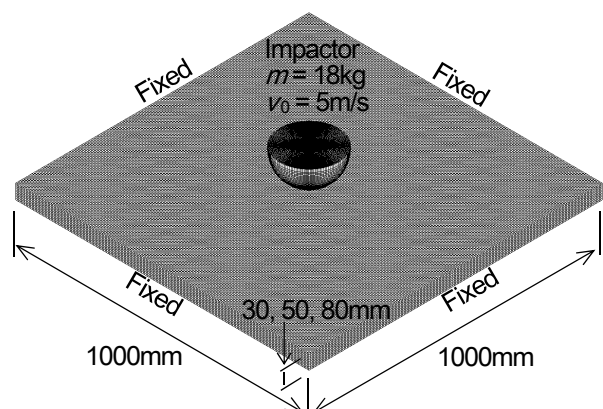


Fig.2 FEM model for fixed elasto-plastic plate subjected to mass impact load

ずみが 0.2% を超えており、局所的な塑性変形を生じているが、板全体の応答には大きな影響を与えていない。

次に、衝突体による衝撃荷重及び力積を評価するために、平板を剛体として評価した衝撃荷重の時刻歴波形を図 7 に示す。図中には衝突解析で得られた衝撃荷重の二等辺三角波による近似波形も示す。波形の近似は、荷重作用時間 $2t_0$ を衝突解析で得られた 0.42ms とし、近似波形による力積が衝突解析による衝撃荷重の波形と同一となるように荷重のピーク値 P_0 を定めた。衝突解析で得られた荷重のピーク値は 531kN、近似波形の荷重のピーク値 P_{0rigid} は 624kN であった。さらに、板厚 30mm、50mm、80mm とした場合の衝撃荷重の波形を前述の板を剛体とした場合の結果と比較して図 8 に示す。衝撃荷重のピーク値は板を剛体とした場合が最も高く、板厚が薄くなるにつれてピーク値が低下するとともに、衝突時間は長くなった。板に作用した力積は板厚 30mm のとき 103Ns、板厚 50mm のとき 109Ns、板厚 80mm のとき 124Ns となり、剛体による力積値 131Ns と同等であった。なお、板厚 30mm の FEM 衝突解析では、変位振幅が他の板厚よりも大きく時刻 2ms にて 2 度目の衝突が発生しているが、平板の最大応答に影響を与えないと判断し、これを除外して力積を算出した。さらに、板厚 30mm、50mm、80mm とした場合の衝撃荷重の波形を、前述と同様の方法で二等辺三角波形により近似し求めた衝撃荷重のピーク値 P_0 と荷重の立ち上がり時間 t_0 の関係を図 9 に示す。図中には力積値が 131Ns で一定となる曲線を併記する。異なる板厚の衝突解析で得られた衝撃荷重のピーク値 P_0 と荷重の立ち上がり時間 t_0 の関係は、いずれも力積値 131Ns で一定の曲線と一致し、平板の剛性が高くなるほど衝撃荷重のピーク値が高くなった。

ここで、簡易評価法で用いる 1 自由度系の等価剛性 k

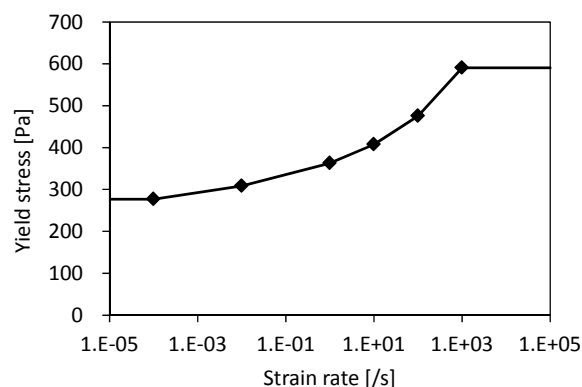


Fig.3 Strain rate dependency of yield stress

と固有円振動数 ω を次式によって求める[5].

$$k = \frac{1}{0.0056 a^2} D \quad (10)$$

$$\omega = 3.646 \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (11)$$

ここに、 a は板の一辺の幅、 h は板厚、 D は板の曲げ剛性である。なお、等価質量 m は式(10)と式(11)より $m = k / \omega^2$ として求める。得られた 1 自由度モデルの等価剛性 k と質量 m を FEM 解析結果と比較して表 1 に示す。

衝撃荷重のピーク値を静的に与える従来の簡易評価法では、剛体平板への FEM 衝突解析で得られた衝突荷重を二等辺三角波で近似した際のピーク値 $P_{0 \text{ rigid}}$ と平板の等価剛性 k を用いて、最大応答変位 $u_{\max P}$ を次式で評価する。

$$u_{\max P} = \frac{P_{0 \text{ rigid}}}{k} \quad (12)$$

力積を入力値とした衝撃応答解析による簡易評価法では、平板の等価剛性 k と等価質量 m を用いて力積値 131Ns に対する平板の最大応答変位 u_{\max} を求める。得られた最大応答変位と立ち上がり時間比 t_0 / T の関係を図 10 に示す。最大応答変位 u_{\max} は立ち上がり時間比 t_0 / T が小さくなるほど大きくなるが、一定値に収束していることがわかる。このときの u_{\max} は、衝撃荷重により質点を得た運動エネルギーと、ばね要素の変形量が最大となるときのひずみエネルギーの保存則より、

$$u_{\max I} = \frac{I}{\sqrt{km}} \quad (13)$$

と求められる[6]。図 10 には式(13)により求めた $u_{\max I}$ を実線で併記する。立ち上がり時間比 t_0 / T を事前に評価できない場合にはエネルギー保存則により求めた式(13)の最大応答変位を用いるのが保守的であると考えられる。

最大応答変位 u_{\max} について式(12)と式(13)による簡易評価法と FEM 衝突解析による結果を比較して図 11 に示す。衝撃荷重のピーク値を静的負荷した結果は、FEM 衝突解

析に比べて板厚 30mm で 4.5 倍、板厚 50mm で 2.2 倍、板厚 80mm で 1.3 倍大きな変位を与えた。このように、平板の剛性が高くなると剛体による力積の評価条件に近づくため、FEM 衝突解析との差が小さくなる。一方、1 自由度系の衝撃応答解析法による結果は、FEM 衝突解析に比べて板厚 30mm で 1.5 倍、板厚 50mm で 1.2 倍、板厚 80mm で 1.2 倍であった。これらの結果から、衝撃荷重のピーク値を用いた静的解析による評価は、構造物の変形が無視できない場合には過度に保守的となり、1 自由度系の衝撃応答解析に基づく評価法がより合理的な結果を与えるといえる。

3.3 最大相当ひずみの評価

さらに、平板の健全性を評価するために、平板中心部の下面の最大相当ひずみを求める。簡易評価法における最大相当ひずみは、剛体を用いた FEM 衝突解析で得られた衝撃荷重のピーク値 $P_{0 \text{ rigid}}$ を弾性平板の中心部に作用するとして求める。このとき、衝突体の変形を考慮して、衝撃荷重が平板の上面に局所的に一樣分布するとして理論解[7]により最大相当ひずみ $\epsilon_{\max}(P_{0 \text{ rigid}})$ を求める。さらに、式(13)のエネルギー保存則により求めた最大応答変位 u_{\max} を用いて、静的な荷重負荷により u_{\max} が得られるときの等価荷重 P_{eq} ;

$$P_{\text{eq}} = k u_{\max} = I \omega \quad (14)$$

を求め、この等価荷重 P_{eq} が弾性平板の上面の半径 10mm の円内に一樣分布するとして最大相当ひずみ $\epsilon_{\max}(P_{\text{eq}})$ を求める。なお、平板上面の荷重の分布形状は円形とし、FEM 解析の結果から分布半径を 10mm とした。

最大相当ひずみについて、簡易評価法と FEM 衝突解析による結果を比較して図 12 に示す。最大相当ひずみの評価結果は最大応答変位の評価結果と同様の傾向であり、剛体平板への FEM 衝突解析で得られた衝撃荷重にピーク値を静的負荷した結果は過度に保守的な評価となった。なお、理論解[7]は平板上面の局所的な分布荷重による厚さ方向の応力を無視したため、平板下面の最大引張応力を大きく評価している[7]。そのため、平板下面の最大相当ひずみについても、FEM 解析結果よりも大きく評価する傾向となる。ただし、FEM 衝突解析の結果から板厚が 30mm の場合の相当ひずみは塑性ひずみ成分が含まれていることに注意が必要である。

Table 1 Equivalent SDOF model

Thickness [mm]	Equivalent stiffness [kN/mm]	Natural frequency [Hz]
30	86.1	257
50	399 (391)	428 (418)
80	1633	685

(): results obtained by FE analysis

3.4 評価フロー

1 自由度系の衝撃応答解析またはエネルギー保存則を用いた簡易評価法のフローを図 13 に示す。まずは、衝突体の質量 M と速度 V を決定し、その衝突体が構造物へ与

える力積を評価する。力積の評価は剛体への FEM 衝突解析を用いる方法や、反発係数が 1 となる完全弾性衝突を仮定し $I=2MV$ とする方法などが考えられる。また、健全性を評価する構造物を選定し、1 自由度系を作成する。

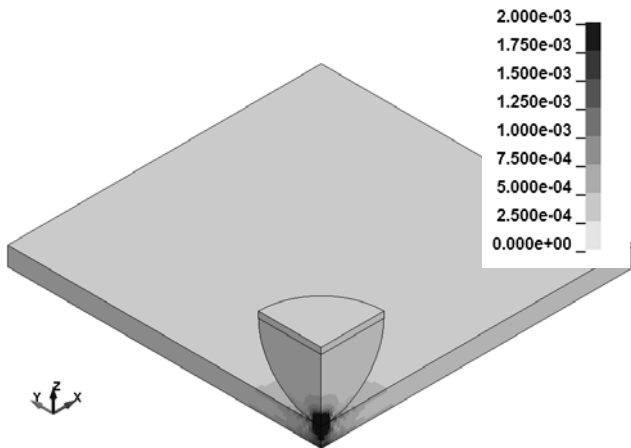


Fig.4 Contour of effective strain (t30mm)

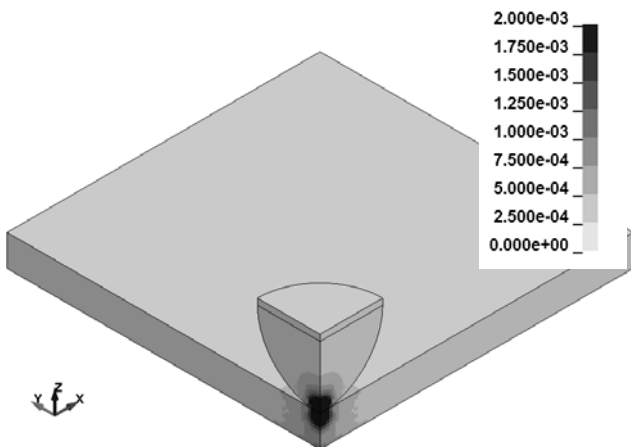


Fig.5 Contour of effective strain (t50mm)

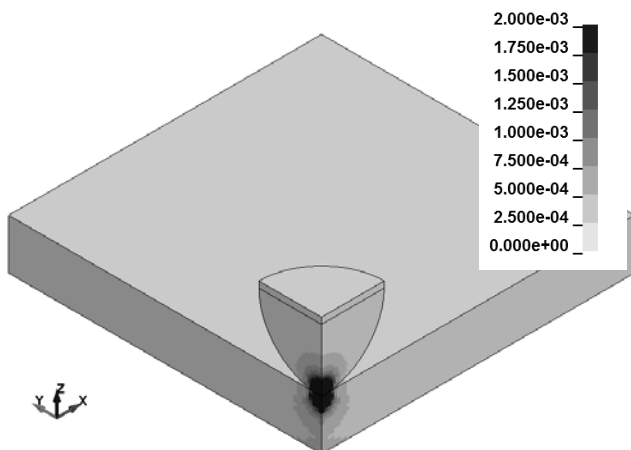


Fig.6 Contour of effective strain (t80mm)

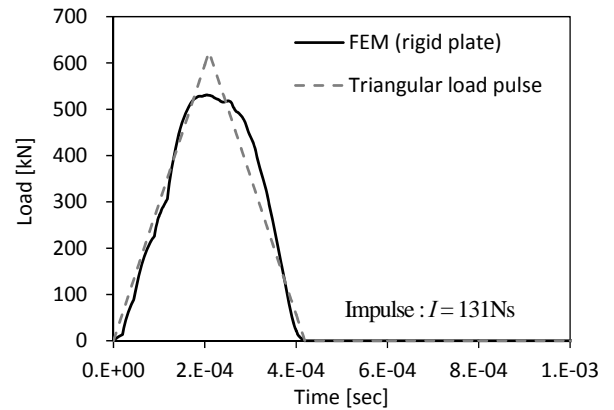


Fig.7 Load pulse obtained by mass impact to elasto-plastic plate and approximated triangular load pulse

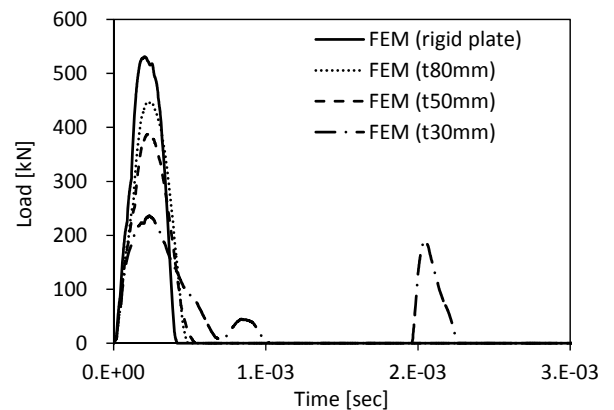


Fig.8 Load pulse obtained by mass impact to rigid and elasto-plastic plates

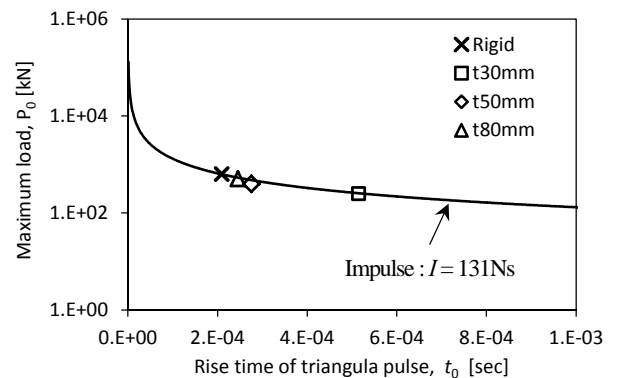


Fig.9 Maximum load P_0 and rise time t_0 obtained by mass impact to rigid and elasto-plastic plates

次に、1 自由度系の衝撃応答解析やエネルギー保存則による式(13)を用いて最大応答変位 u_{\max} を求める。さらに、ひずみを評価する場合には、1 自由度系の衝撃応答解析で得られた変位やエネルギー保存則による最大応答変位 u_{\max} から求めた等価荷重 P_{eq} を用いて静的な解析を行う。

4. まとめ

衝撃荷重を受ける構造物の健全性を従来法よりも精度

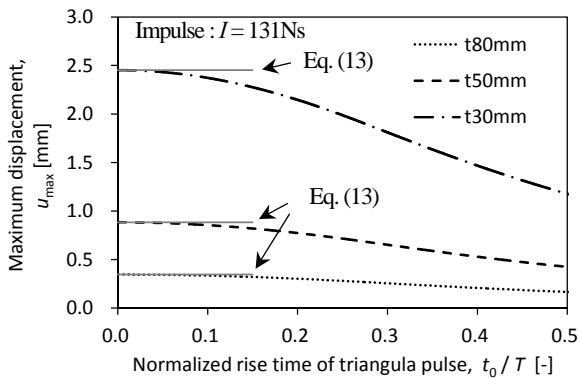


Fig.10 Evaluation of maximum displacement with SDOF system

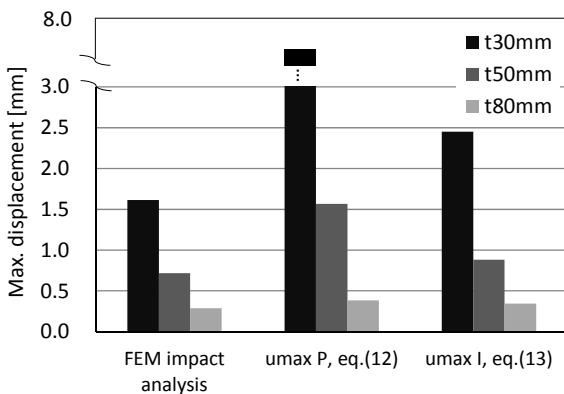


Fig.11 Evaluation of maximum displacement

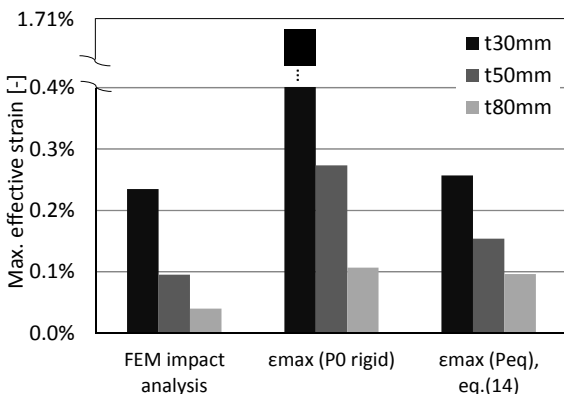


Fig.12 Evaluation of maximum effective strain

良く評価できる簡易な手法の構築に向けて、球体が平板に衝突する基本モデルを例題として、衝撃荷重の時間変化を考慮した評価式を提案した。この手法による評価結果と FEM 衝突解析及び従来の静的荷重による結果を比較したところ、最大応答変位については従来法が FEM 衝突解析に比べて最大 10 倍となったが提案法では最大 1.6 倍となり、提案法が従来法よりも精度良く、かつ安全側の評価結果を与えることを確認した。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会, 実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド, 平成 25 年 11 月 27 日.
- [2] Federal Emergency Management Agency, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, 2nd edition, FEMA P-646/2012.
- [3] 日本建築学会, “建築物の耐衝撃設計の考え方”, 丸善出版, 2015.
- [4] 日本溶接協会, “動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の脆性破壊性能評価方法 (WES2808 : 2003)”, 2003
- [5] 土木学会, “構造力学公式集”, 2010.
- [6] 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博, “基礎からの衝撃工学”, 森北出版, 2008, pp.192-196.
- [7] S.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger, “Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.

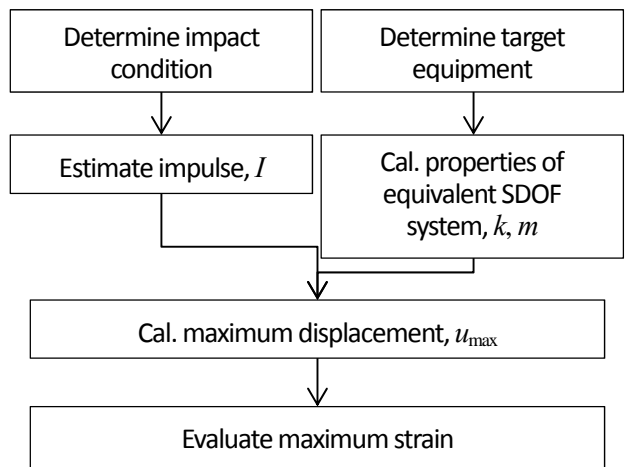


Fig.13 Evaluation procedure of shock resistant performance