

繰返し衝突作用による局所損傷を考慮した RC 版の衝撃応答解析に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員 ○合屋 智史

九州大学大学院 正会員 玉井 宏樹

九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. はじめに

土木構造物の中には、固体の繰返し衝突が作用し、損傷が生じるものがある。特に、港湾構造物の一つである消波ブロック被覆ケーソン式混成堤は、衝撃砕波などの強い波力を受けた際に消波ブロックが動くことでRCケーソン壁に繰返し衝突し、穴が開くという被害事例が多発して問題となっており、合理的な設計法の提案やその対策が必要である。既往の研究において、穴開き現象のメカニズムに関する実験を主体とした研究はあるが、RC版の破壊限界衝突回数や衝突速度を算定可能な一般式を導出するには至っていない。その理由は、解析により、繰返し衝突が作用するRC版の全体応答と局所破壊を適切に評価できていないからである。そこで、本研究では、衝突部近傍の局所損傷を考慮した繰返し衝突解析手法を構築し、その適用性に関する基礎的な検討を実施した。

2. 解析手法について

2.1 本研究の適用範囲

繰返し衝突によるRC版の破壊までのプロセスは図-1に示すように破壊モードの推移により3段階に大別できることが報告されている¹⁾が、本研究は基礎的な検討であることから、比較的低回数(数回~10数回程度)の繰返し衝突により、損傷が進行する1段階目に着目している。

2.2 局所損傷を考慮した繰返し衝突解析手法

RC版の衝突部近傍では圧縮力が卓越する影響で、局部的に剛性や強度が低下すると考えられるが、これを通常の弾塑性解析で再現することは困難である。そこで、損傷度 D という概念を導入し、これにより剛性・強度の低下を再現することとした。損傷度 D は、0(無傷)から1(破壊)の値をとり、本解析では、損傷発生閾値 p_D を圧縮破壊相当の累積塑性ひずみに設定することにより衝突部の圧縮による局所損傷を示すこととした。損傷進展則は、繰返し衝突によるコンクリートの衝突部近傍の累積塑性ひずみ分布の推移を実験で測定し、その結果から決定する必要があると考えられるが、本研究においては、式(1)に示す既往の研究で提案されている Lemaitre の損傷理論を援用することとした。

$$\dot{D} = \frac{Y}{S} \dot{p} \quad (p > p_D) \quad \dot{D} = 0 \quad (p \leq p_D) \quad \cdots (1)$$

ここで、 Y/S は損傷進展を表すパラメータである。

また、式(2)に示す損傷を考慮した von Mises の降伏条件式、式(3)に示す損傷を考慮した弾塑性構成式を用いることで、繰返し衝突による強度と剛性の低下を表現した。

キーワード：衝撃解析，繰返し衝突，局所損傷，RC版

連絡先：〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学伊都キャンパス



写真-1 実際の穴あき被害

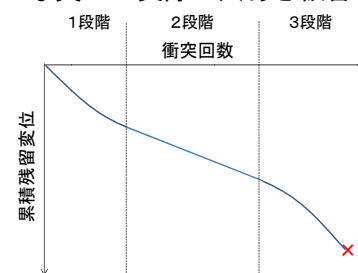


図-1 破壊プロセス

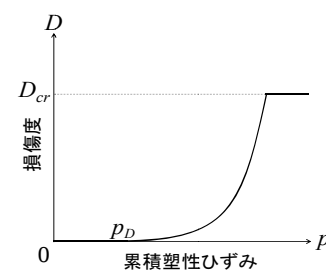


図-2 D-p 曲線

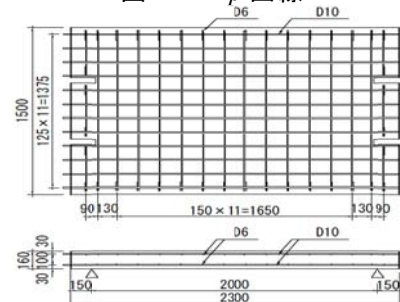


図-3 解析対象の RC 版(単位: mm)

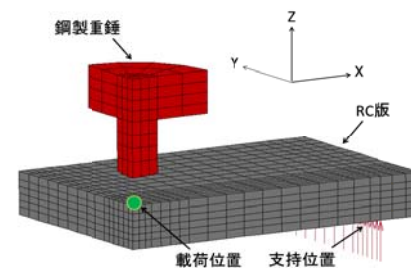


図-4 解析モデル

Tel/Fax: 092-802-3370

$$f = \left(\frac{3}{2} \tilde{\sigma}'_{ij} \tilde{\sigma}'_{ij} \right)^{1/2} - \sigma_y \quad \cdots (2) \quad \therefore \tilde{\sigma}'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{1-D}$$

ここで、 σ_{ij} は偏差応力、 $\tilde{\sigma}_{ij}$ は有効偏差応力である。

$$d\sigma_{ij} = (1-D) \left(E_{ijpq} - \frac{9G^2 \sigma'_{pq} \sigma'_{ij}}{\sigma_{eq}^2 H'(1-D)^2} \right) d\epsilon_{pq} \quad \cdots (3)$$

ここで、 E_{ijpq} は弾性剛性マトリクス、 G はせん断弾性係数である。

時間積分法には陰解法であるシングルステップフーボルト法を用い、時間刻みを自動制御した。

3. 二辺支持 RC 版の繰返し衝撃応答解析

3.1 解析モデルおよび解析条件

港湾空港技術研究所で行われたケーソン壁の側版を模擬した RC 版の重錘衝撃実験¹⁾を対象に、繰返し衝突解析を実施することで、本手法の適用性について検討した。解析対象は図-3 に示す二辺支持 RC 版で、解析モデルを図-4 に示すが、力学的対称性を考慮して 1/4 モデルとした。衝突条件は 400kg の鋼製重錘を衝突速度 3m/s で計 10 回衝突させた。解析で用いた材料定数を表-1、応力-ひずみ曲線を図-5 にそれぞれ示す。

3.2 解析結果および考察

図-6 に 1 回衝突時の衝撃力波形と変位波形の比較図を示す。衝撃力は最大値や継続時間が実験とよく一致した。変位に関しては、残留変位はほぼ値が一致したが、応答特性がやや剛な結果となった。次に、図-7 に示す繰返し衝突による衝突回数と RC 版の最大および残留変位の推移について考察した。損傷を考慮した解析では、最大変位や残留変位が線形に累積した。これは実験とほぼ同様の傾向であり、解析により累積損傷の定性的な傾向を捉えることができたといえる。しかし、最大変位に関して実験値と解析値を比べると、1 回目の衝突から差が生じており定量的な評価はまだ十分に行えていない。図-8 に衝突回数による損傷領域の推移を示す。これより、衝突回数とともに損傷領域が拡大していくことが確認できた。しかし、圧縮による累積塑性ひずみを損傷と定義したにも関わらず、衝突回数の増加に伴い損傷領域が RC 版下面中央部に発生した。この原因は現段階では不明である。

4. 結論

本研究で提案した衝突部近傍の局所損傷を考慮した解析手法を用いることで、コンクリートの剛性および強度の低下を再現可能であり、RC 版の残留変位の累積傾向を定性的に捉えることができた。しかし、定量的な評価を可能にするためには、損傷の判定に用いる閾値や損傷進展則を適切に考案することが不可欠であり、今後実験による測定を実施する必要があると考えられる。

参考文献

1) 岩永光保, 松林卓, 横田弘, 小野寺美昭: 繰返し衝撃荷重を受ける二辺支持鉄筋コンクリート版の破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, p.799-804, 2009

表-1 材料物性値

	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート	20600	0.2	44.3	4.43
鉄筋 D10	206000	0.3	384	384
鉄筋 D6	206000	0.3	365	365

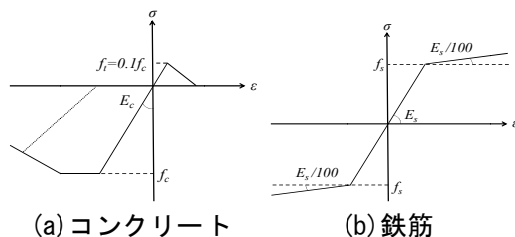
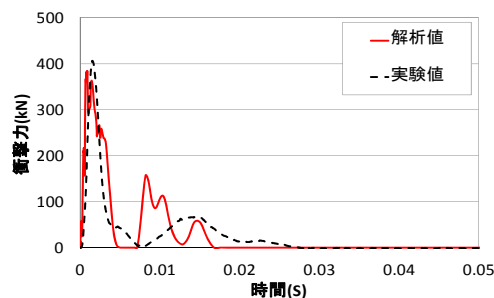
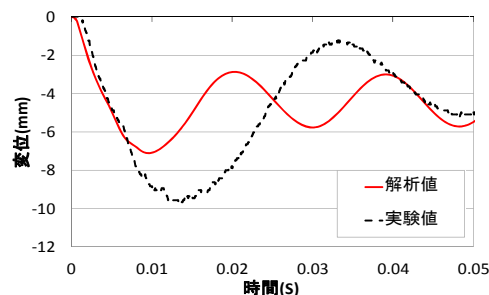


図-5 応力-ひずみ曲線



(a) 衝撃力波形



(b) 変位波形

図-6 1回衝突時の応答

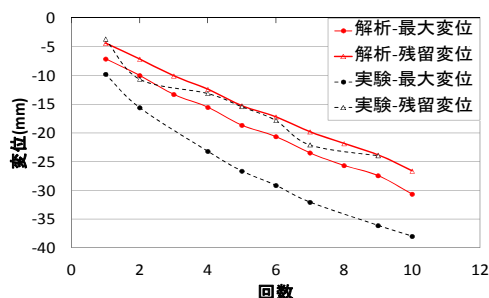


図-7 衝突回数と版の変位の関係

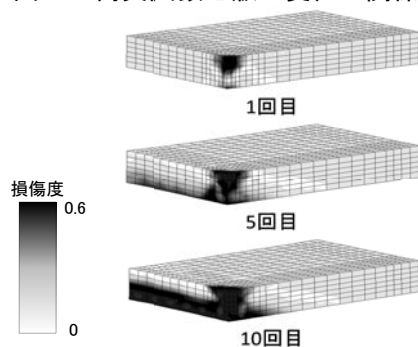


図-8 損傷が進展する様子