

繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの応答値の算定

(独) 港湾空港技術研究所 (前田建設工業 (株)) 正会員 ○白根 勇二

(独) 港湾空港技術研究所 正会員 岩波 光保

(独) 港湾空港技術研究所 フェロー 横田 弘

(株) 神戸製鋼所 正会員 山田 岳史

(株) 神戸製鋼所 正会員 竹鼻 直人

1. はじめに

港湾構造物では、巨大な衝撃荷重が繰返し作用し破壊に至った事例が報告されている。港湾構造物の衝撃荷重に対する現行設計では、時間的、空間的変動の大きい衝撃荷重を簡便な分布形状に置き換え、構造物の静的な耐力と比較して安全性を照査しており、荷重のばらつきや構造物の動的応答、繰返し作用については考慮されていない。そこで本研究では、繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの発生変位量および最大支点反力の算定を力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則による簡易な手法で試み、重錘落下による繰返し衝撃載荷実験の結果と比較し、その適用性を検討した。

2. 繰返し衝撃載荷実験概要¹⁾

衝撃載荷実験の原理は、所定の高さまで重錘を引き上げ、ロープを用いてフックを解除し重錘を自由落下させるものである。検討ケースを表-1に、試験体の形状および配筋を図-1に示す。衝突速度 2~4m/s のケースは、終局破壊をより中央部の累積残留変位がスパン長の 2% (60mm) に達した時点と定義し、これに達するまで衝撃荷重を繰返し与えた。

表-1 検討ケース

	スパン長 L (m)	重錘質量 M (kg)	衝突速度 V (m/s)
L3-V1	3.0	400	1.0
L3-V2			2.0
L3-V2.5			2.5
L3-V3			3.0
L3-V4			4.0
L3-V5.5			5.5
L3-V7			7.0

3. 応答値の算定方法

まず、力学的エネルギー保存則によってはりの最大中央変位を求める²⁾。衝突直後の重錘速度とRCはり中央の変形速度が等しいと考えれば、両者の運動エネルギーの総和 U_1 ははりの有効質量を考慮して式(1)となる。また、RCはりの変形によるひずみエネルギー U_2 は式(2)となる。

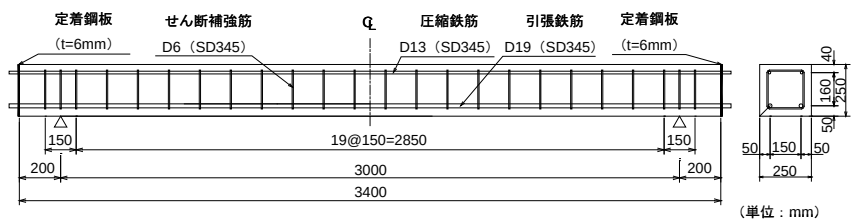


図-1 試験体形状および配筋

$$U_1 = \frac{1}{2} Mv^2 + \frac{1}{2} \frac{17}{35} mv^2 \quad (1)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} k\delta^2 = \frac{24EI}{l^3} \delta^2 \quad (k = \frac{48EI}{l^3}) \quad (2)$$

M : 重錘質量 m : RCはりの質量 v : 衝突直後の重錘およびRCはりの変形速度

E : コンクリートの弾性係数 I : 曲げ剛性 (RC断面と仮定する) δ : 最大中央変位 l : スパン長

U_1 と U_2 が等しいと仮定し、衝突前後の速度の関係として式(3)を用いると、最大中央変位 δ は式(4)となる。

$$v = \frac{M}{M + \frac{17}{35}m} V \quad (3)$$

$$\delta = V \sqrt{\frac{Ml^3}{48EI} \frac{M}{M + \frac{17}{35}m}} \quad (4)$$

V : 衝突直前の重錘速度

ここで、最大中央変位 δ を発生させるために必要なRC断面の静的最大荷重 P_E を求め、これを最大支点反力とする。

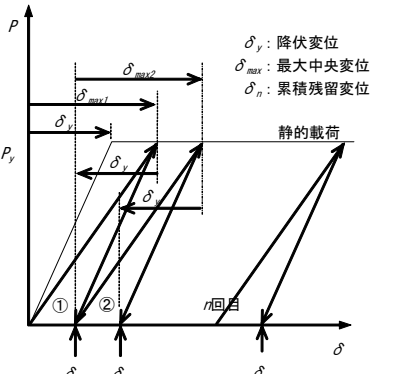
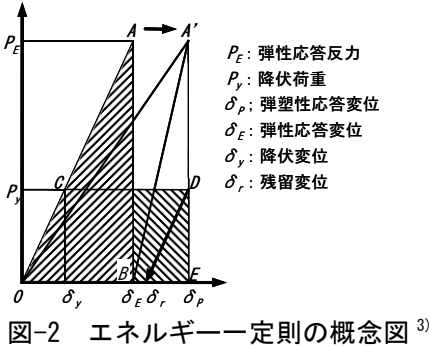
$$P_E = \frac{48EI}{l^3} \delta \quad (5)$$

式(4)ははり変形を弾性応答であると仮定しており、はりの塑性化が顕著となった場合には精度が劣るため、次に、式(4)で求めた最大中央変位をエネルギー一定則で修正する。図-2にエネルギー一定則の概念図³⁾を示す。エネルギー一定則は橋脚等の耐震設計で用いられ、弾性応答と弾塑性応答の入力エネルギーがほぼ同値であるという考えに

キーワード：港湾構造物、繰返し衝撃荷重、重錘落下実験、力学的エネルギー保存則、エネルギー一定則

連絡先：〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室 TEL 046-844-5059 FAX 046-844-0255

基づいた近似的手法である。重錘の衝突によってはりの変形が塑性域に入った場合、 $\triangle OAB$ と $\square OCDE$ の面積が等しくなるように最大中央変位を補正する。力学的エネルギーで求めた任意の衝突速度における最大中央変位は、図-2中のA点 (P_B, δ_B) であるが、補正の結果、A' 点 (P_B, δ_p) となる。



更に、図-3 に示す概念図に従い、繰返し衝撃荷重への適用を検討した。衝撃荷重を受け、弾塑性応答したはりの最大中央変位 δ_{max} は静的載荷時の降伏変位 δ_y だけ復元すると仮定し、累積残留変位と破壊までの繰返し回数を求めた。

4. 応答値の算定結果

図-4 に衝突速度と最大支点反力の関係を示すが、両者は直線的な関係となり、実験値と力学的エネルギー保存則から求めた計算値はほぼ一致する結果になった。

図-3 累積残留変位算定の概念図

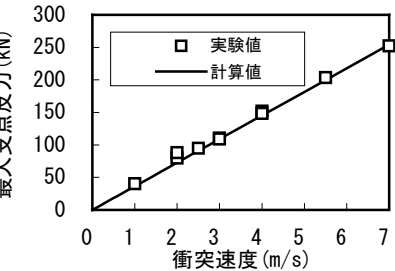


図-4 衝突速度と最大支点反力の関係

図-5に衝突速度と最大中央変位の関係を示す。衝突速度が2.5m/s以下では実験値と力学的エネルギー保存則による計算値がほぼ一致する結果となり、衝突速度3m/s以上ではエネルギー一定則による計算値と一致する結果となった。衝突速度3m/s以上のケースでは、発生変位量がはりの弾性限界（静的荷重下では $\delta_y \approx 12\text{mm}$ ）を大きく超え、圧縮縁コンクリートの破壊が生じるなど、はりが塑性化したが、エネルギー一定則による補正を行うことによりはりの塑性化が顕著な場合でも最大中央変位を精度良く算出できた。

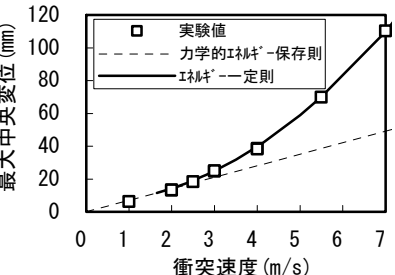


図-5 衝突速度と最大中央変位の関係

図-3に従い、衝撃荷重を1回だけ受けたときに発生する残留変位を求めた結果を図-6に、同様の計算を破壊に至るまで繰り返し、最終的に破壊した回数を求めた結果を表-2に示す。図-6より衝突1回目の実験値と計算値の残留変位はほぼ一致した。表-2より、破壊までの繰返し回数は衝突速度3m/s以上では実験値と計算値が等しくなったが、衝突速度が2.5m/s以下では計算値が小さくなり差が見られた。衝突速度2.5m/sでは、1回の衝撃荷重で発生する変位量が降伏変位をわずかに超える程度であり、材料の力学的物性値の設定誤差や、高速変形による材料物性の変化等の要因が残留変位算定に影響を与えたためと考えられる。しかし、実験値と計算値とも衝突速度2m/sと2.5m/sの間で破壊までの繰返し回数が増加する傾向となっており、本手法による残留変位と破壊までの繰返し回数の算定が概ね妥当であると判断できる。

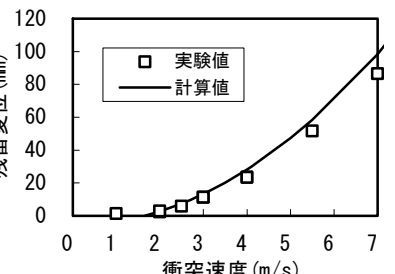


図-6 衝撃荷重1回目の残留変位

表-2 破壊までの繰返し回数

	衝突速度 (m/s)	破壊までの繰返し回数	
		実験値	計算値
L3-V2	2.0	105	22
L3-V2.5	2.5	15	9
L3-V3	3.0	5	5
L3-V4	4.0	3	3

5. まとめ

力学的エネルギー保存則とエネルギー一定則により、衝撃荷重を受けるRCはりの発生変位量および最大支点反力を精度良く算定でき、繰返し衝撃荷重を受ける場合にも適用可能であった。本報では限られたケースのみ報告したが、スパン長や重錘質量が変化した場合に振動モードの変化やはりと重錘の質量比等が算定結果に誤差を与えることを確認しており、今後これらの影響を考慮して検討を進める必要がある。

【参考文献】1) 白根勇二ら：繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，2007. 7

2) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，2004

3) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編，2002. 3