

I-495

落石条件のバラツキを考慮した落石覆工の安全性評価に関する基礎的考察

防衛大学校 正員 ○園田佳巨 正員 佐藤紘志 正員 石川信隆

1. 緒言 落石覆工の設計では、落石による衝撃力を推定することが不可欠であるが、現実には落石の発生位置や規模の予測が難しく、また落石の運動形態等についても不明な点が多いため、落石条件(落石重量、落下高さ等)を決定するのは困難であると思われる。したがって、信頼性理論の導入が望ましいと考えられるが、落石の発生事例に基づいた統計的資料が少なく、この点に関する研究も非常に少ない¹⁾。そこで本研究では、エネルギー的観点から確率論的なアプローチによる落石覆工の安全性評価について基礎的に考察したものである。

2. 落石覆工の安全性評価法

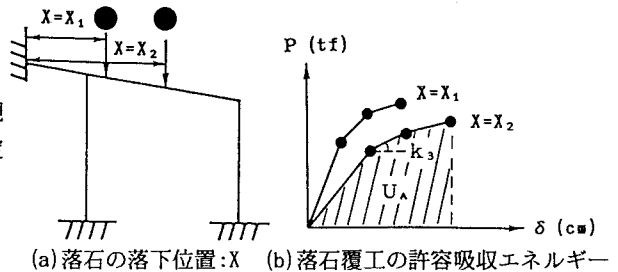
2.1 落石覆工のエネルギーによる性能関数

落石覆工の安全性について、エネルギー的観点から評価すると以下のような性能関数 Z が定義される。 $Z = U_A - \gamma_0 \cdot E$ (1)

ここに、 U_A :落石覆工の許容吸収エネルギー、

γ_0 :落石覆工のエネルギー分担率、

E :落石の運動エネルギー



(a) 落石の落下位置: X (b) 落石覆工の許容吸収エネルギー

図-1 落石の落下位置と許容吸収エネルギー

ここで、落石側の条件は構造物側の条件に比べて非常に不確実性が強いと考えられるため、落石条件のみを確率変数と見なすこととし、具体的には落石重量(W)、落下高さ(H)、落下位置(X)の3つをそれぞれ独立した確率変数と考えることとした。なお、サンドクッションの衝撃緩衝効果も不確実性が強いと考えられるが、ここでは確率論的な取り扱いはしないことにする。以上の3変数については、それぞれ既往の実験結果²⁾および実態調査³⁾による確率分布モデルをもとに、モンテカルロ法を用いてそれぞれの確率分布に従った変数値を抽出する。以下に、3変数を用いた式(1)の各項の計算方法について述べる。

2.2 落石覆工の許容吸収エネルギー: $U_A = f_1(X)$ 落石覆工の許容吸収エネルギー U_A は、静的な弾塑性解析による荷重-変位曲線の面積で計算されるものとする。ここで、落石の落下位置(X)が変わると、落石覆工の応答性状は図-1(b)のように当然異なると考えられる。したがって、許容吸収エネルギー U_A も落下位置(X)の関数として算定されることになる。

2.3 落石覆工のエネルギー分担率: $\gamma_0 = f_2(W, H, X)$ 落石覆工のエネルギー分担率 γ_0 は、落石-サンドクッション-落石覆工の3者間の動的な相互作用により決定されるパラメータであり、図-2に示す3質点系モデルを用いて算定される⁴⁾。すなわち、エネルギー分担率 γ_0 は落石重量(W)、落下高さ(H)、落下位置(X)の3つの確率変数による関数となる。つまり、質量 m_1 、衝突速度 $\dot{x}_1$ は落石重量、落下高さの抽出値より求め、弾塑性バネ定数 k_3 は各落下位置で異なった荷重-変位曲線を選ぶことにより、その曲線の傾きで与えられる。

2.4 落石の運動エネルギー: $E = W \cdot H$ 落石の運動エネルギー E については、落石が自由落下するものと仮定し、落石重量(W)と落下高さ(H)の積としてモンテカルロ法による抽出値をもとに算定される。

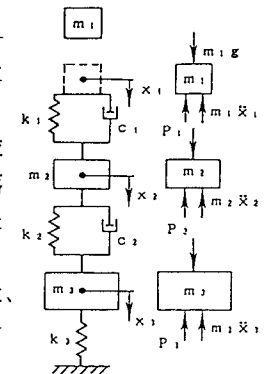


図-2 エネルギー分担率モデル

3. 数値計算結果

ここでは、図-3の落石の跳躍量(h)分布のデータ²⁾、図-4の落石重量(W)分布のデータ³⁾、および図-5の落石の落下高さ(H)分布のデータ³⁾をもとに、モンテカルロ法により3変数に関する1000回の抽出を行い、各回のデータをもとに式(1)の各項の計算を行った。対象とした落石覆工は図-6の既設の鋼製落石覆

工であり、1000回の試行に対する性能関数の値をもとに安全性指標の算定を行った。(%)

3.1 落石覆工の許容吸収エネルギーのシミュレーション結果

落石の落下位置（ $x=h$ と仮定）に関する抽出値をもとに、図-6の鋼製落石覆工について各落下位置を荷重の作用点とした弾塑性解析により許容吸収エネルギー量の計算を行った。図-7にそのシミュレーション結果を示す。この図より、2つのピークが見られるが、最も多い1.0~2.0 t・m程度の吸収エネルギーを示すケースは、落石が山側の柱と崖との支間中央に落下する場合（図-3より50%程度の確率と考えられる）に対応しており、5.0~6.0 t・m程度の吸収エネルギーを示すケースは山側の柱の近傍に落石が落下した場合に対応している。

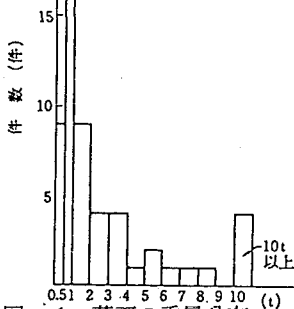


図-4 落石の重量分布

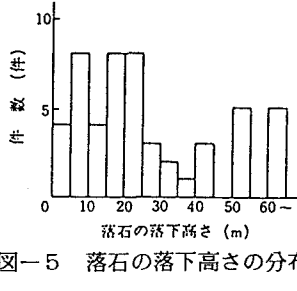


図-5 落石の落下高さの分布

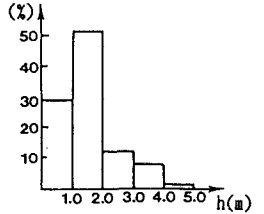


図-3 落石の跳躍量分布

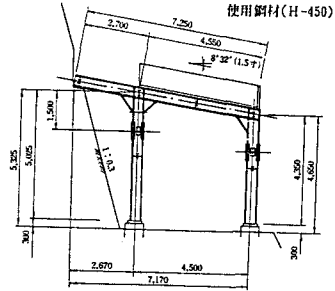


図-6 解析モデル（既設鋼製落石覆工）

3.2 落石覆工のエネルギー分担率のシミュレーション結果

図-8は、図-2のモデルによる衝撃応答解析よりエネルギー分担率を算定したシミュレーション結果を示したものである。これより、エネルギー分担率は4~20%の範囲内となり、約8%がピーク値となっている。

3.3 落石の運動エネルギーのシミュレーション結果

落石重量(W)、落下高さ(H)について1000回の試行で抽出した値を用いて計算した結果を図-9に示す。これより、落石の運動エネルギーについては、過去の研究で衝撃力の確率分布特性について指摘された結果¹⁾と同様に、対数正規分布に近い分布形状となっていることが認められた。

3.4 落石覆工の安全性指標

以上の計算結果をもとに、各試行における性能関数値を求めたうえで、その平均値、および分散値から安全性指標 β を算出すると $\beta = \mu_z / \sigma_z = 1.384 / 0.809 = 1.711$ が得られ、安全に対する信頼性がかなり低いという結果が得られた。その原因として、(1) 安全性の評価を行った鋼製落石覆工は、落石重量1.0t、落下高さ10.0mの落石に対して設計されており、使用した統計資料のデータに対して設計条件が小さい、(2) 落石条件のバラツキの大きさが、そのまま性能関数の分散値を大きくすることで安全性指標の値を低下させている、といった点が考えられる。

参考文献
1) 園田忠一郎、小林治俊、鈴木真男：信頼性設計法のロックシェッドへの適用の一試み、第二回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム、1986年7月
2) 佐々木康等：落石の跳躍量に関する実験、第14回日本道路学会特定課題論文集pp.113~115、1981
3) 佐々木康、谷口栄一、舟見清己：落石防護工の被害に関する実態調査、土木技術資料 Vol.23, No.8, 1981
4) 園田佳司、佐藤純志、石川清隆：落石覆工のエネルギー分担率に関する一考察、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム、1991年3月

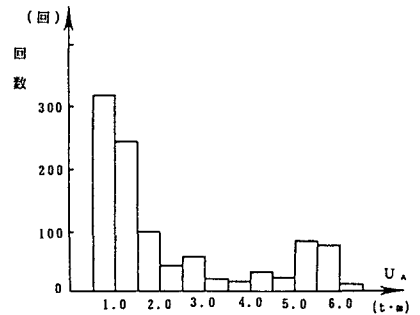


図-7 許容吸収エネルギー分布

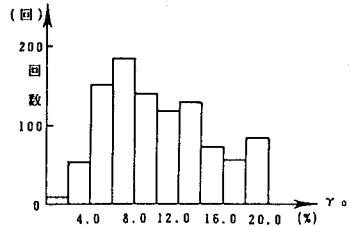


図-8 エネルギー分担率の分布

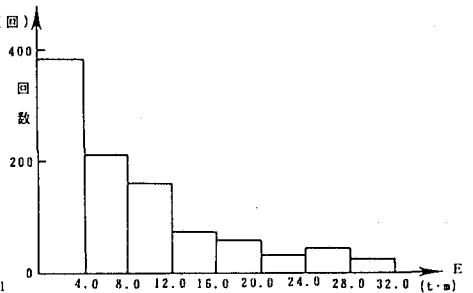


図-9 落石の運動エネルギーの分布