

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 1989年7月に福井県越前町において、落石によるロックシェットの崩壊事故が発生し、落石防護施設の設計法について、外力の評価方法、衝撃荷重に対する構造物の挙動（限界衝撃性能、破壊形式等）の解明などの問題点が提示された。従来、落石荷重の評価方法については、比較的多くの実験的研究^{1), 2)}がなされているが、設計法についての研究は以外に少なく、特に限界状態設計法の適用の試みについては一部³⁾を除いてあまりなされていない。本研究は、この限界状態設計法の確立を図るため、まずエネルギーの観点からロックシェットの終局限界についての安全性評価式を提示した。次に、構造物の弾塑性変形吸収エネルギー量に着目した設計法を提案し、現行の落石対策便覧の外力評価式⁴⁾を用いた許容応力度設計法と比較するとともに、その基礎的考察を行ったものである。

2. 構造物の弾塑性吸収エネルギー量による安全性評価

(1) 吸収エネルギー量算定法 構造物の弾塑性吸収エネルギー量は、図-1に示すような荷重-変位曲線の面積（斜線部）で表され、数値的には、図-2に示すような解析フローチャートにより、塑性関節法を用いた静的な弾塑性増分解析を行って、構造物が崩壊メカニズムに至る（最終塑性ヒンジが形成される）までの面積として吸収エネルギー量を算定する。ここで、静的吸収エネルギー量は、厳密には衝撃載荷時の衝撃吸収エネルギー量とは異なるが、一般的にその下限値として安全側の値を与えると言われており⁵⁾、本研究ではこれを設計吸収エネルギーとして採用することとする。

(2) エネルギーによる安全性評価式 2.(1)で算定した吸収エネルギー量と、落石の持つ運動エネルギー量のうち、サンドクッションによって散逸したエネルギー量を差し引いたロックシェットのエネルギー分担量とを比較することにより安全性評価を行うものである。以下にその安全性評価式を示す。

$$U \geq \gamma_B \cdot E \quad (1)$$

ここに U : ロックシェットの弾塑性吸収エネルギー量

E : 落石の持つ運動エネルギー量 $(=1/2mv^2=W \cdot H)$

γ_B : ロックシェットのエネルギー分担率

3. エネルギー設計法

ここでは、式(1)を満たすように、図-3の計算過程により、各部材の設計変数である塑性断面係数(Z_p)を修正しながら求める。その後、以下の式(2)の関係式によって、断面積、および断面2次モーメントを決定する。

$$A(m^2)=0.70 \cdot Z_p(m^3)^{2/3}, \quad I(m^4)=1.78 \cdot Z_p(m^3)^{4/3} \quad (2)$$

なお式(2)は、一般的に鋼製ロックシェットに使用されている中幅および細幅H形鋼(500×300~900×300)の断面性能表より、最小2乗法によって求めた換算式である。

4. 計算結果と考察

計算例として、落石重量1.0t、落下高さ10.0mの落石荷重に対し、図-4

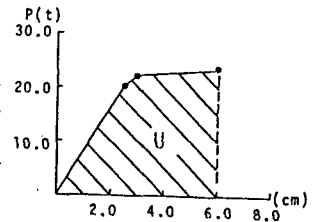


図-1 弾塑性吸収エネルギー量

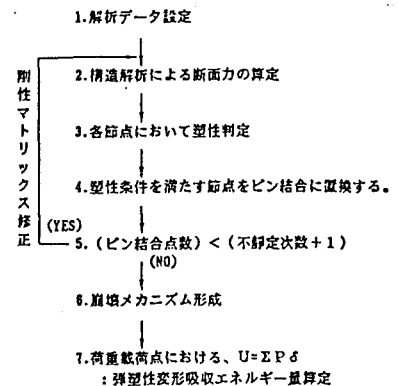


図-2 弾塑性吸収エネルギー量算出過程

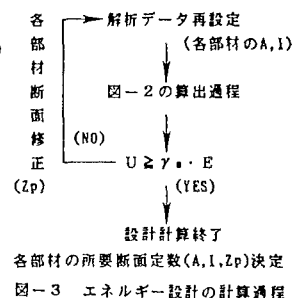


図-3 エネルギー設計の計算過程

に示すような鋼製ロックシェッドについて行った。なお、4. (1)では、屋根角度(α)をパラメータとして吸収エネルギー量の計算を行った。

(1) ロックシェッドの吸収エネルギー量による安全性評価

現行の許容応力度設計法によって決定した断面諸元のロックシェッドについて、計算から得られた弾性および弾塑性吸収エネルギー量を表-1に示す。落石の運動エネルギー量($E=10.0\text{t}\cdot\text{m}$)に対するロックシェッドの弾性吸収エネルギー量はほぼ $0.4\text{t}\cdot\text{m}$ であり、また同一断面のロックシェッドの弾塑性吸収エネルギー量は $4\text{t}\cdot\text{m}$ 程度である。したがって、ロックシェッドのエネルギー分担率 γ_E が仮りに10%

とすれば、弾性エネルギーによる分担率 γ_E ($=U_E/E$)=4%では吸収しきれないが、弾塑性吸収エネルギーまで許容すれば、エネルギー分担率が γ_{EP} ($=U_{EP}/E$)=40%となり安全であることが認められる。

(2) エネルギー設計法 (屋根角度 $\alpha=0^\circ$ の場合)

表-2はエネルギー設計法 (弾塑性吸収エネルギーまで許容した) と許容応力度設計法とで、ロックシェッドの各部材の所要断面積、断面2次モーメントを比較したものである。表より、エネルギー分担率 γ_E が10%~30%程度であれば、エネルギー設計法によってかなり経済的になることが明らかである。

表-2 設計結果の比較

		許容応力度設計法	エネルギー設計法			
			(分担率10%)	(分担率20%)	(分担率30%)	(分担率40%)
梁	断面積(cm^2)	222.1	56.0	108.7	160.9	211.6
	断面2次モーメント(cm^4)	182300.0	11520.0	43410.0	95170.0	164700.0
柱	断面積(cm^2)	164.5	41.5	80.5	119.2	156.8
	断面2次モーメント(cm^4)	100000.0	6321.0	23810.0	52200.0	90340.0

5. 結論

- (1) 落石の運動エネルギーから、サンドクッション等で散逸されるエネルギーを差し引いたエネルギー量の割合、すなわちロックシェッドのエネルギー分担率 γ_E が既知となれば、吸収エネルギー量による安全性評価、およびエネルギー設計法が可能となる。
- (2) 本設計例の範囲内では、ロックシェッドのエネルギー分担率 γ_E が40%以下であれば、エネルギーによる設計の方が経済的な設計となった。
- (3) ロックシェッドのエネルギー分担率 γ_E は、サンドクッション層の砂質、落石重量、衝突速度、ロックシェッド本体の重量および剛性等の諸要因によって変化すると考えられるので、今後の実験的かつ理論的な検討が必要である。

参考文献

- (1) 吉田博、榎谷浩、鈴木哲次：敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究，土木学会論文集，No.352，pp.61-70，1984年12月。
- (2) 三上敬司、能町純雄、松岡健一、岸徳光：落石による落石覆工への衝撃力に関する評価，構造工学論文集，Vol.33A，pp.559-569，1987年3月。
- (3) 園田恵一郎、小林治俊、鈴木輝男：信頼性設計法のロックシェッドへの適用の一試み，第2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論文集，pp.110-117，1986年7月。
- (4) 日本道路協会：落石対策便覧，p.177，昭和58年7月。
- (5) 斎藤英明、大野友則、石川信隆、水山高久：局部変形を考慮した鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1057-1068，1989年3月。

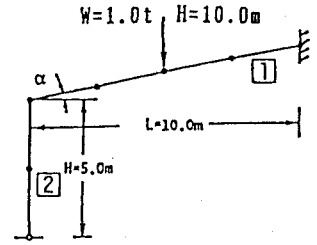


図-4 設計モデル

表-1 ロックシェッドの吸収エネルギー量 (t・m)

屋根角度 α (°)	0	10	20	30
弾性吸収エネルギー量 U_E	0.371	0.376	0.394	0.429
弾塑性吸収エネルギー量 U_{EP}	4.246	4.289	4.354	4.455