

鋼製ロックシェットの落石による衝撃力

IMPULSIVE LOADS BY ROCK FALLS ON STEEL ROCK-SHEDS

榎谷 浩^{*}前川幸次^{**}水木 彰^{***}吉田 博^{****}

By Hiroshi MASUYA Kouji MAEGAWA Akira MIZUKI Hiroshi YOSHIDA

For a rational estimation of the design load of a rock fall on steel rock-sheds, the rock fall experiments have been done using three kinds of full-scale steel rock-shed roof models. The acceleration of the weight simulating a rock, earth pressures propagating through a sand cushion which act on the rock-shed, and deflections, strains, reaction forces of the rock-shed roof were measured.

From the experimental results, the strong correlations were observed among the maximum values of deflection, reaction force and bending moment. These results can be approximated by a static beam theory. Also, It becomes clear that the potential energy of a rock is absorbed into the sand cushion more than 90% and that the rest energy transfers to the rock-shed. Finally, it is shown that the impulsive design load by rock fall can be estimated using the energy theory.

1. まえがき

わが国は、地形が急峻で、地震や雨も多いため、地滑り、雪崩とともに落石に対しても厳しい環境にあり、毎年多くの落石災害が発生しているのが現状である。落石から道路や鉄道を防護するために、防護網、防護柵などいろいろな対策がなされているが、この中でもロックシェットは、道路や鉄道を最終的に護るために建設される重要な落石防護構造物である。

落石がロックシェットに衝突する場合、シェット上に敷かれているサンドクッションにまず衝突し、サンドクッションを介してロックシェットに力が伝達される。サンドクッションの衝撃吸収能などの動特性があまり明らかにされていないため、理論的に直接、衝撃力を評価することは困難と考えられてきた。著者らは、これまでにコンクリート基礎上の土槽への落石衝突実験やPCロックシェット上への落石衝突実験を行い、サンドクッションの影響を考慮した衝撃力特性評価式、ロックシェットの構造特性による応答係数の考えなどある程度明らかにしてきた^{1,2,3,4)}。しかし、衝撃力の最大値一つをとっても一般にばらつきが非常に大きいなどの特徴があり、さらに合理的な衝撃力評価法が望まれている。

そこで、本研究では、RC製やPC製と比べ曲げ剛性の低い構造である鋼製ロックシェット屋根部を用いて落石実験を行い、その衝撃力特性やサンドクッションによる落石のエネルギー吸収率、鋼製ロックシェット

*	工博	金沢大学助手	工学部土木建設工学科	(〒920 金沢市小立野2-40-20)
**	工博	金沢大学講師	工学部土木建設工学科	(〒920 金沢市小立野2-40-20)
***		川田工業株式会社	富山本社設計課	(〒939-15 富山県福野町苗島4610)
****	工博	元金沢大学教授		(〒932-01 富山県小矢部市水島561)

ドのエネルギー分担率について調べ、エネルギー吸収からみた落石の衝撃力の評価について検討してみた。

2. 鋼製ロックシェッド屋根上への落石実験

(1) 実験供試体

実験供試体は、鋼製ロックシェッド屋根部に用いられる主桁を2本取り出し、実物大のモデルとしたものである。主桁として用いたH鋼の諸元を表-1に示し、供試体の全体図(平面図)を図-1に、中央詳細図(側面図)を図-2に示す。2本の主桁は両端を単純支持し、スパン中央部の長さ3mに渡って上フランジにガセット接合したH鋼(H175×175×7.5×11, SS41であり、以後横ばりと呼ぶ。)11本により、主桁間隔が170cmとなるように結合されている。これらの横ばり上に、3.2mm厚の鋼板を敷き、3m×3mの大きさのクッション材用の鋼製土槽(高さ1.2m)を設けた。

(2) 実験方法

実験は、金沢大学落石実験場にて、落石落下用の鉄塔(高さ24.8m、ホイストクレーンの最大吊上げ容量5.0tf)の下に供試体を設置し、落石として鋼殻にコンクリートを充填した重錘を用い、供試体中央部の土槽上に自動落下装置により自由落下させて行った^{1,2)}。なお、重錘の落下高さを1mより順次1m上げ、最大18mまで変えて行った。

クッション材として用いた砂の粒径加積曲線を図-3に、その特性値を表-2に示す。クッション材厚は90cmとした。また、落石として用いた重錘は、図-4に示すように、質量が1000kgで底面形状が球形のものを用いた。

(3) 測定方法

重錘には、サンドクッションへの衝突時の加速度を測定するために、加速度計(新日本測器, 543A)を取り付けた。また、サンドクッション底での土圧を測定するために、土槽の中心(重錘の落下点直下)から30cmの間隔で横ばり中心線上に5個の土圧計(共和電業, BE10KC, BE5KC, BE2KC)を配置した。

この他、レーザ式変位計(KEYENCE, LB60)を用いて、各主桁のスパン中央点のたわみを測定し、主桁のスパン中央点における上フランジおよび下フランジのひずみの測定には、ひずみゲージを用いた。

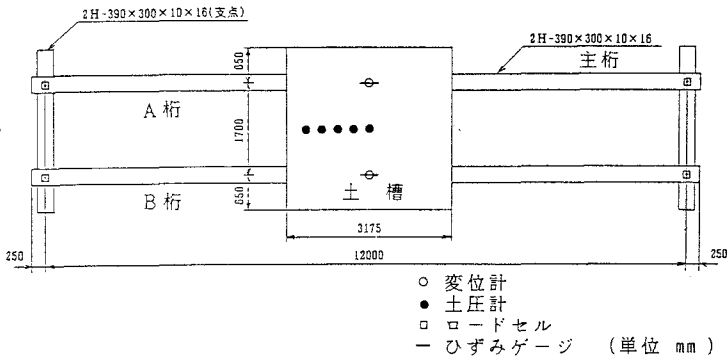


図-1 供試体全体図(平面図)

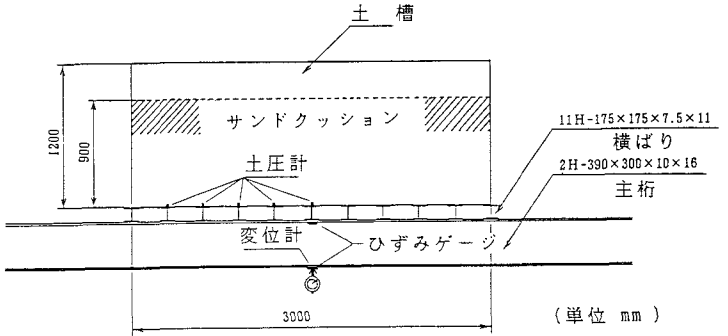


図-2 中央詳細図(側面図)

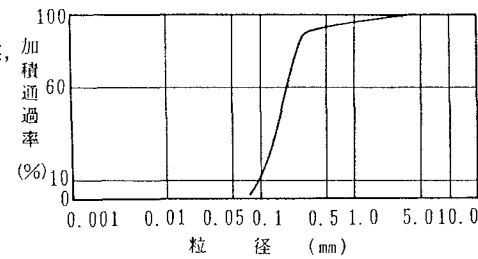


図-3 サンドクッションの粒径加積曲線

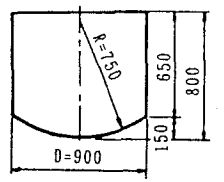


図-4 用いた重錘

また、主桁の各支点（計4点）においては、ロードセル（東京測器、CLU-20A）上に主桁を設置して支点反力を測定した。

土圧、変位、ひずみおよび支点反力の測定は、動ひずみ計（東京測器、DA-1F、DA-1B）を用い、パソコン（NEC、PC9801VM2）により、サンプリング周波数500Hzで2秒間A/D変換を行い、その数値データをフロッピーディスクに記録した。加速度の測定では、重錘に取り付けた増幅器で増幅した後、高周波成分を除去するために、ローパスフィルター（三栄測器、9B06）に通し、パソコンにより、土圧などと同様に処理した。

以上の計測システムの概要を図-5に示す。この他に、サンドクッションの含水比と重錘のサンドクッションへの貫入量（最終めり込み量）の測定も行っている。

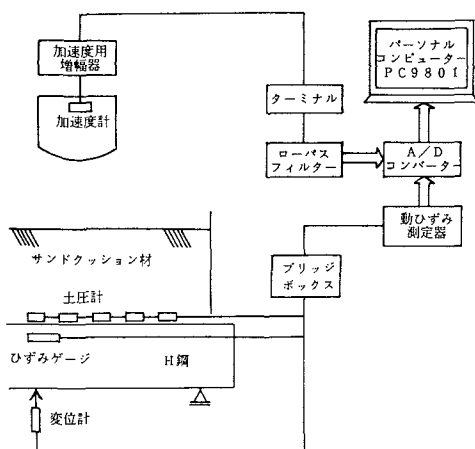


図-5 測定システム

表-1 主桁の諸元

スパン長	12.10.8 m
幅	300 mm
高さ	390 mm
フランジ厚	16 mm
ウェブ厚	10 mm
断面2次モーメント	38700 cm ⁴
弾性係数	2.105×10 ⁶ kgf/cm ²
降伏応力	3240 kgf/cm ²

3. 実験結果

表-2 サンドクッションの特性値

10% 粒径	30% 粒径	60% 粒径	均等係数	曲率係数
$D_{10}(\text{mm})$	$D_{30}(\text{mm})$	$D_{60}(\text{mm})$	$\frac{D_{60}}{D_{10}}$	$\frac{D_{60}^2}{D_{10} \cdot D_{30}}$
0.095	0.125	0.145	1.53	1.13

(1) 衝撃力波形

ここでは、本実験で得られた衝撃力波形の特性について、過去に著者らが行ったコンクリート基礎上への落石実験結果³⁾も参考にし、検討してみる。

図-6は、鋼製ロックシェッド上およびコンクリート基礎上へ高さ10mより重錘を落下させた場合の衝撃力の時間変化を示したものである。なお、コンクリート基礎上で用いた重錘およびサンドクッションは本実験のものと同一である。図中の重錘衝撃力とは、重錘の加速度に重錘の質量を乗じたもの

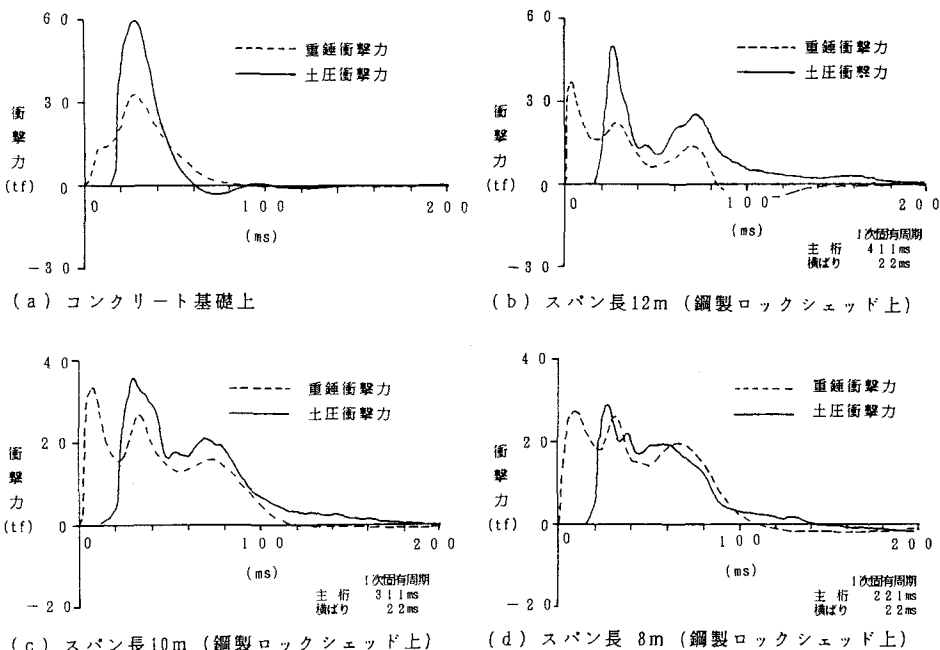


図-6 衝撃力波形

であり、土圧衝撃力とは、サンドクッション底部で得られる土圧を作用域について面積分したものである。コンクリート基礎上のは、ピークが1つの比較的単調な波形であるのに対し、鋼製ロックシェッド上のは、大きなピークを2個有していることがわかる。また、主桁スパンが長いほど、2つ目のピークがはっきりと現れているようである。表-3は、主桁と横ばりの1次固有周期を示したものである。衝撃力の作用時間は主桁の固有周期に比べ非常に小さく、むしろ横ばりの固有周期に近いので、鋼製ロックシェッド上で認められる波形の特徴は、主に横ばりの影響ではないかと推測される。

(2) たわみ、ひずみ、支点反力の測定波形

図-7は、スパン長さ12mの供試体上に、重錘を落下高さ10mより落下させた場合のA桁のスパン中央点のたわみ、下フランジのひずみ、A桁の反力波形の一例を示したものである。この場合、土圧衝撃力の作用時間が100ms程度であるのに対し、主桁の周期が400ms程度と非常に長いため、土圧衝撃力がかなり小さくなってから、たわみ、ひずみ、反力が最大値に達していることがわかる。この場合、土圧衝撃力の最大値を用いた静的解析値を基準に動的倍率を求めると⁴⁾、たわみで0.52、ひずみで0.43、反力では0.56となった。しかし、後述するように、土圧衝撃力の最大値は大きくばらつくため、動的倍率にも同様な傾向が認められた。

表-3 部材の固有周期

種 別	スパン長 L (m)	1 次固有周期 T (s)
主 桁	12.0	0.411
	10.0	0.311
	8.0	0.221
横ばり	1.7	0.022

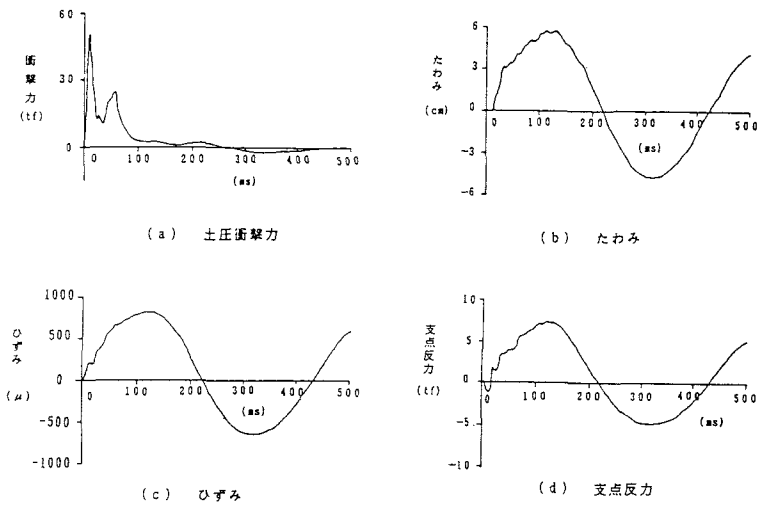


図-7 応答波形の一例

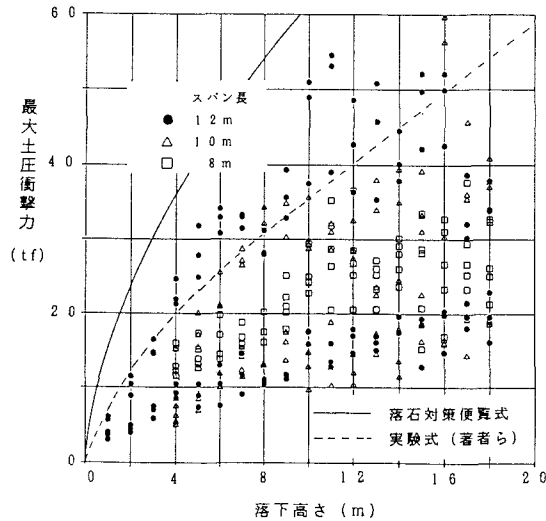


図-8 落下高さと最大土圧衝撃力

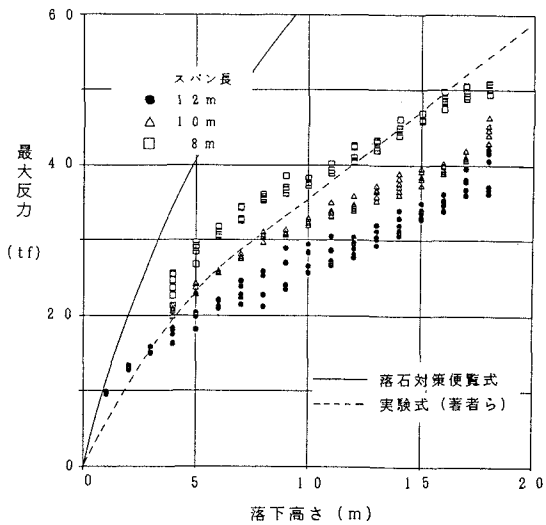


図-9 落下高さと最大反力

(3) 最大土圧衝撃力と各測定値間の相関

図-8は落下高さと土圧衝撃力との関係をスパン長別に示したものである。図中に示した実線は次式で表される落石対策便覧式⁵⁾である。

$$P = 2.46 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \quad (1)$$

ここに、 W は落石重量 (tf) , H は落下高さ, λ はラメの定数 (100tf/m²) である。破線は著者らが過去に行ったコンクリート基礎上のサンドクッションを用いた落石実験結果³⁾により得られた実験式であり、次式で表される。

$$P = \beta_{\theta} \frac{WV}{g T_{\theta}} \quad (2)$$

ここに、 W は落石重量 (tf) , V は衝突速度 (m/s) , g は重力加速度 (9.8m/s²) であり、 T_{θ} は衝撃力の作用時間 (s) , β_{θ} はサンドクッションの厚さの影響を表す係数で、各々次式で表される。

$$T_{\theta} = (0.0481 - 0.00064H) W^{0.27\theta} (U_{\circ} / U_{\circ\theta}) \quad (3. a)$$

$$\beta_{\theta} = -4.81 (h / h_{\theta}) + 5.84 \quad (h / h_{\theta} < 1)$$

$$\beta_{\theta} = 1.03 \quad (h / h_{\theta} \geq 1) \quad (3. b)$$

h はサンドクッション厚, $U_{\circ}$ は均等係数, h_{θ} は基準サンドクッション厚 (90cm) と $U_{\circ\theta}$ は基準均等係数 (1.53) である。この図より、本実験における土圧衝撃力は非常に大きくばらつき、スパン長の違いによる有意な差も認められないことがわかる。これは、主に含水比や締め固めの程度などサンドクッションの状態の影響と考えられる。

図-9は、落下高さと主桁の4支点での測定反力の和の最大値との関係を示したものである。スパンが長い程、最大反力は小さくなっていることがわかる。また、衝撃力の場合に比べて、ばらつきが非常に小さいことがわかる。すなわち、落下高さが同じで、スパン長が同じであれば、図-8に示したように土圧

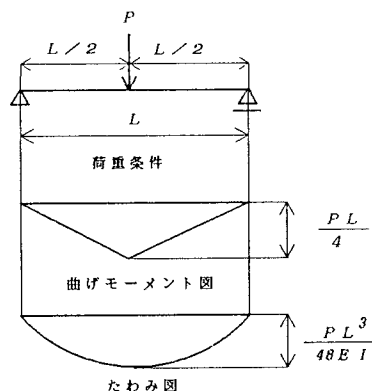


図-10 仮定した荷重条件

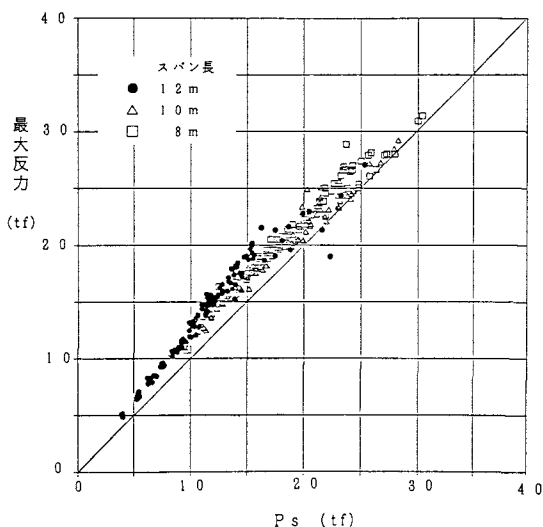


図-11 ひずみより算定した荷重と最大反力

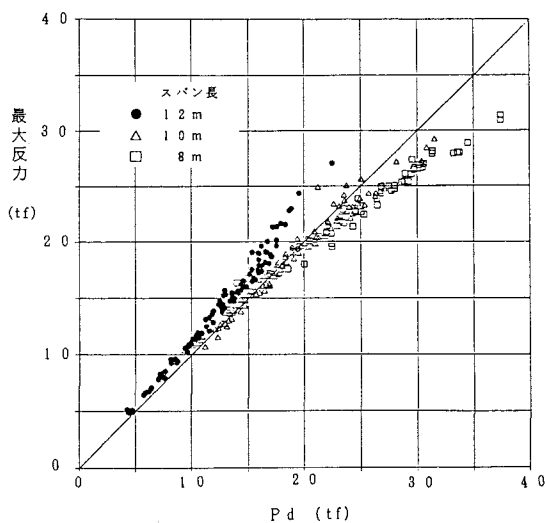


図-12 たわみより算定した荷重と最大反力

衝撃力の最大値が異なっても、応答反力はほぼ同じであるといえる。

そこで、他の応答量についても検討してみることにする。ここで、図-10に示すようにスパン長 L の単純ばりに、中央集中荷重 P が静的に作用した場合を考えてみる。この場合、ひずみやたわみを測定することによって、荷重 P を容易に算定することができる。

このような仮定の基で、スパン中央の下フランジでの最大ひずみより算定した荷重 P_s と最大反力の関係を示したのが図-11であり、同様にスパン中央の最大たわみより算定した荷重 P_d と最大反力の関係を示したのが図-12である。これより、最大ひずみより算定した荷重 P_s は最大たわみより算定した荷重 P_d に比べやや小さいが、主桁の最大反力、最大ひずみ、最大たわみの相関がよく、これらの関係は静的なはり理論によりほぼ近似できることがわかる。

4. 鋼製ロックシェッドの落石の衝撃によるエネルギー吸収について

ここでは、本実験において重錘の持つエネルギーがどの程度サンドクッションに吸収され、ロックシェッドにどの程度のエネルギーが伝達されるかについて検討してみる。

図-13は、スパン10mの供試体上へ高さ9mより重錘を落下させた場合の加速度波形とそれを順次積分して得られる速度と沈下量の時間変化を示したものである。この図より、重錘がサンドクッションに衝突し、急に速度を失い、その後、主桁が自由振動している結果を表していることがわかる。最大変位51cmは、実験後に測定した沈下量（めり込み量）50cmに近いものであった。

この場合の重錘衝撃力と重錘の沈下量の関係を示したのが図-14である。重錘衝撃力が一旦零になるまでの重錘衝撃力-変位曲線の下側の面積を重錘のなす仕事と仮定した。実際には衝撃力が一旦零となっても、その後、主桁の自由振動により力と変位が生ずるが、それによる仕事量は微量と考えられるのでここでは無視することにした。

図-15は同じく高さ9mより重錘を落下させた場

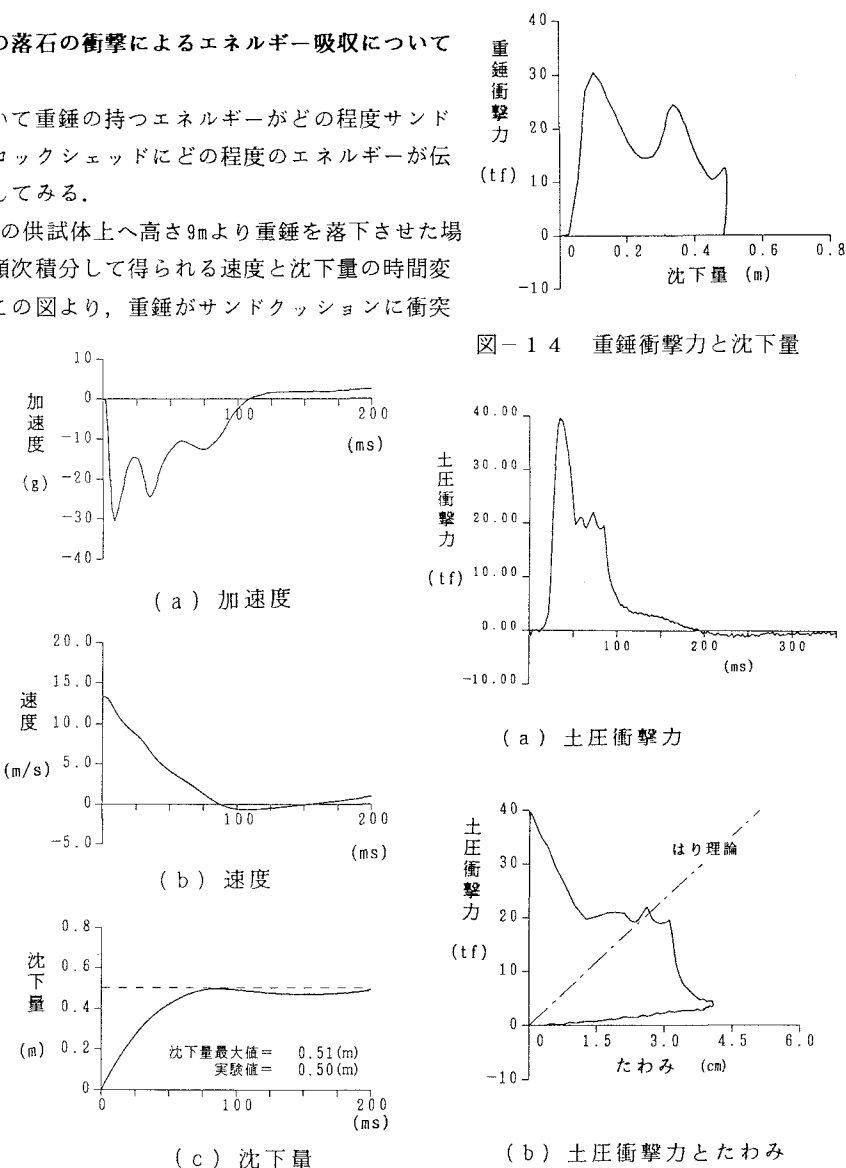


図-13 重錘の運動について

図-15 土圧衝撃力とたわみ

合つて、サンドクッション底で得られる土圧衝撃力波形、土圧衝撃力と主桁のスパン中央点のたわみとの関係を示したものである。この場合、土圧の分布する範囲は主桁のスパン長に比べて十分小さいので、土圧衝撃力—たわみ曲線の下側の面積は、サンドクッションが主桁になす仕事と考えられる。なお、図中には図—10に示した静的はり理論値も示した。

表—4は、重錘の位置エネルギー、上述の方法により求めた重錘がなす仕事と土圧衝撃力がなす仕事、さらに測定たわみと測定ひずみにより算定した各々のひずみエネルギーを示したものである。なお、たわみとひずみより算定した各々のひずみエネルギーとは、図—10に示したように単純ばりのスパン中央点に集中荷重が静的に作用したと仮定し、曲げモーメントによるひずみエネルギーを各々測定最大たわみと測定最大ひずみを用いて算定したものである。なお、横ばりの影響は無視している。これより、ロックシェッドが負担するエネルギー（言い換えれば、ロックシェッドに伝達されるエネルギー）は、土圧のなす仕事 E_e あるいはひずみエネルギー U_d （たわみ）、 U_s （ひずみ）により評価されることになる。この場合、 E_e 、 U_d 、 U_s の順で小さく、これらの値と重錘の位置エネルギーの差がサンドクッションの吸収エネルギーとなるため、少なくとも 重錘の位置エネルギーの90数%がサンドクッションの変形、流動などにより吸収されることがわかる。

そこで、測定たわみと測定ひずみよりすべての実験結果について、主桁のひずみエネルギーを求め、重錘の位置エネルギーとの比を示したのが表—5である。これより、スパン長が大きくなるとエネルギー分担率（ひずみエネルギー／位置エネルギー）が大きくなっていることがわかる。なお、本実験範囲内では、落下高さが異なっても、エネルギー分担率には有意な差は認められなかった。ひずみより算定した分担率は、たわみから算定した場合と比べ、エネルギー分担率が小さいことがわかる。これは、最大ひずみに達する時刻が最大たわみに達する時刻と一致していないことが原因として考えられる。また、土圧のなす仕事は、たわみから算定した場合よりも小さくなっている。これは、実際には土圧は横ばりに分布荷重として作用するのに対し、土圧のなす仕事の計算では、集中荷重として取扱い、変位としては主桁のたわみを用いたことなどが原因として考えられる。

図—16は、主桁の固有周期と主桁のエネルギー分担率の関係を示したものである。図中の○はひずみにより算定した平均値であり、●はたわみにより算定したもの、□は土圧のなす仕事によるものである。また、

表—4 重錘の位置エネルギーの分担率の一例

重錘の位置 エネルギー $E = mgh$	重錘のなす仕事 E_a	ロックシェッドによる吸収エネルギー E_r (下のいずれかの値)		
		土圧のなす仕事 E_e	ひずみエネルギー U_d (たわみ)	ひずみエネルギー U_s (ひずみ)
9.000 tf·m (1.000)	8.502 tf·m (0.945)	0.7555 tf·m (0.084)	0.6567 tf·m (0.073)	0.4186 tf·m (0.047)
サンドクッションによる吸収 エネルギー $E - E_r$		8.2445 tf·m (0.916)	8.3433 tf·m (0.927)	8.5814 tf·m (0.953)

注：括弧内の数値は重錘の位置エネルギーを1としたものである。

表—5 ロックシェッドのエネルギー分担率

スパン長 L (m)	重錘のなす仕事 E_a / E	ロックシェッドによるエネルギー分担 (括弧内はサンドクッションによるエネルギー分担)		
		土圧のなす仕事 E_e / E	ひずみエネルギー U_d / E (たわみ)	ひずみエネルギー U_s / E (ひずみ)
12	0.922	0.058 (0.942)	0.076 (0.924)	0.055 (0.945)
10	0.922	0.048 (0.952)	0.069 (0.941)	0.048 (0.952)
8	0.888	0.035 (0.965)	0.056 (0.944)	0.037 (0.943)

注：Eは重錘の位置エネルギー mgh である。

ばらつきの範囲を標準偏差σで示した。これより、固有周期が大きくなるとエネルギー分担率μは増加することがわかる。なお、図中には次式で表される近似曲線も示した。

$$\mu = aT^b$$

(4)

ここにTは主桁の1次固有周期、a、bは定数であり、各曲線に対してそれぞれ、ひずみで算定した場合は a = 0.0999, b = 0.654, たわみの場合は a = 0.120, b = 0.504, および土圧のなす仕事による場合は a = 0.0811, b = 0.571である。

これまで、落石の衝撃力を直接取り扱った研究が多くなされてきたが¹⁻⁶⁾、サンドクッションを用いたロックシェッドのエネルギー分担率の評価がこのような形で評価できれば、設計荷重の合理的な算定法の一手法となると考えられる^{7,8)}。すなわち、図-17に示すように、落石の落下条件が定まれば落石の持つエネルギーが容易に算定でき、サンドクッションと構造諸元の仮定により、ロックシェッドのエネルギー分担率を決定し、断面力を算定することができる。その後、許容耐力との照合により必要に応じ、サンドクッションと構造諸元の再設定を行うわけである。

本研究は、鋼製ロックシェッドの挙動が弾性範囲内である限られた実験結果をもとに検討したものであるが、塑性変形能の大きな鋼桁の特性を生かすには⁸⁾今後さらに破壊モードや破壊時のエネルギー吸収についても研究が必要と考えられる。

5. あとがき

本研究では、落石の衝撃力評価を目的に、鋼製ロックシェッド屋根部に用いられる主桁2本を取り出し、落石実験を行い、衝撃力特性、サンドクッションのエネルギー吸収、主桁のエネルギー分担について検討した。本研究で得られた結果は以下の通りである。

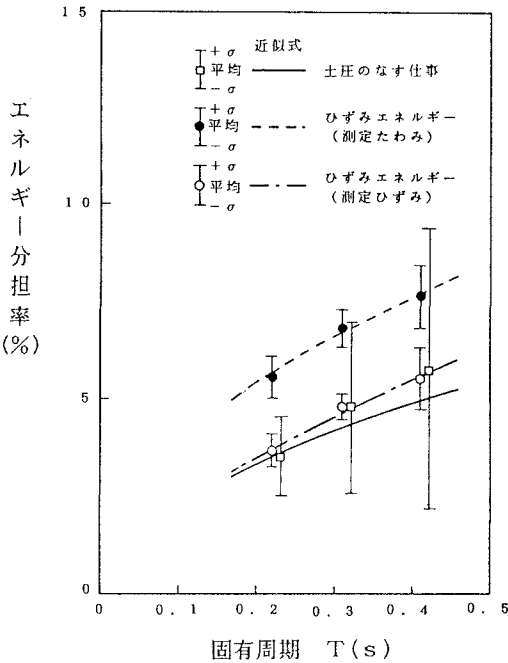


図-16 固有周期とエネルギー分担率

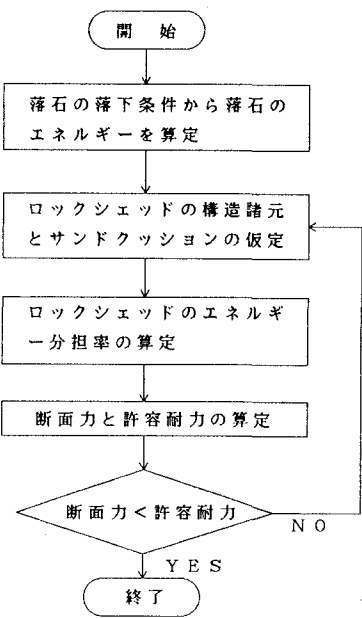


図-17 エネルギー分担率を用いたロックシェッドの設計

- 1) 落石の土圧衝撃力波形形状はロックシェッドの構造特性に依存し、鋼製ロックシェッドでは、コンクリート基礎上のものほど単調なものではなかった。
- 2) 土圧衝撃力の最大値は大きくばらつくのに対し、応答変位やひずみはそれほどばらつかず、本研究では、静的に中央集中荷重を受ける単純ばりと仮定しても、最大応答量に大きな差異は認められなかった。
- 3) 本実験では落石の持つエネルギーの90%以上はサンドクッションに吸収され、10%以下がロックシェッド屋根部に伝達されることがわかった。
- 4) ロックシェッドの落石荷重の評価には、エネルギー分担率による手法も可能であることを示した。

本研究は、鋼製ロックシェッド屋根部を用いた限られた実験結果をもとに検討したものであり、今後サンドクッションのばらつきを考慮したエネルギー分担率の算定法および理論的なエネルギー分担率の算定法を開発する必要があると考えている。また、エネルギー分担率に基づくロックシェッドの衝撃力評価の一般化やロックシェッドの破壊モードや破壊時のエネルギー吸収についても検討が必要と考えている。

本研究の遂行にあたり、金沢大学梶川康男教授には、有益な御助言を頂いた。また、実験においては、御嶽譲君（金沢大学大学院）、城之越宏君（現・佐藤工業株式会社）に御協力を頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田博，榎谷浩，鈴木哲次：数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) H. Yoshida, H. Masuya, T. Ihara : Experimental Study of Impulsive Design Load for Rock Sheds, IABSE PERIODICA 3/1988 (IABSE Proceedings P-127/88), pp. 61-74, Aug., 1988.
- 3) 吉田博，榎谷浩，佐藤真，井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について，構造工学論文集，Vol. 33A，pp. 571-583，1987年3月。
- 4) 吉田博，榎谷浩，岡衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について，土木学会論文集，No. 362，pp. 461-470，1985年10月。
- 5) 日本道路協会：落石対策便覧，pp. 1-239，1983年7月。
- 6) 園田恵一郎，小林治俊，鈴木輝男：ロックシェッドに対する落石荷重計算法（ヘルツ式の改良）について，第1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. 25-35，1983年7月。
- 7) 園田恵一郎：限界状態設計法とロックシェッドの設計，北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集，pp. 22-34，1988年10月。
- 8) 石川信隆，和田総一郎，香月智，星川辰雄：局部変形とはりのせん断変形を考慮した鋼管片持ばりの衝撃弾塑性応答解析，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，Vol. 13，pp. 515-520，1989年7月。

(1989年10月2日受付)