

投稿論文
Paper
(In Japanese)

緩衝砂を有する RC 版の耐落下物衝撃性能と 落石覆工の動的設計法

STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SLAB WITH SAND CUSHION AGAINST FALLING WEIGHT IMPACT AND A DYNAMIC DESIGN METHOD OF ROCK-SHELTER

本名一夫*・今野久志**・太田利隆***

By Kazuo HONNA, Hisashi KONNO and Toshitaka OHTA

Although many reinforced concrete rock shelters have been designed against static loads that are of same level as the maximum rock impact, the design should be carried out by dynamic analyses.

In order to grasp shelter slab's behavior under falling rock impact, we executed dynamic and static loading experiments on RC slabs with sand cushion. It was found from the results that impact force brings far less displacement or strain to RC slab than that of static loading case. Time-lag between impact force and slab's response explains most part of such difference. The result of these experiments were ascertained by F. E. M analyses, and at the same time, a dynamic design method for rock shelter was presented.

Keywords : rock-shelter, impact dynamic design-method

1. ま え が き

落石荷重に対する現行の落石覆工の設計は、落石時の最大衝撃力を覆工頂版に静的に載荷して行われている。

しかし、落石の衝突は一瞬のうちに力の伝達が行われる衝撃的現象であり、構造物は静的載荷状態と異なった挙動を示す。したがって、落石荷重に対して覆工を合理的に設計するためには、「構造物の衝撃力に対する極限耐荷力を明確にしたうえで、構造物の弾塑性変形による吸収エネルギーを把握する必要がある」（日本道路協会「落石対策便覧」）のであるが、これまで、落石荷重に対する動的設計法というものが具体的に示されたことはなかった。

確かに、落石衝撃時の覆工の挙動を一般化して提示するためには、いくつかの困難がある。そもそも、外力としての落石による衝撃力の大きさ、時間的変化および平面的分布がケースによってばらつきのあるものであり、これを一般化しなければならない。次にこの衝撃力に対

して覆工がどう応答するかを知らなければならない。しかも前者（外力）と後者（応答）が相互に密接な関連をもつのではないかとも考えられている。現在まで覆工設計のための研究は主として、落石による衝撃力の大きさを知ることに向けられてきたのであり、それはその範囲において、成果が出されている^{1)~4)}。

一方、サンドクッションを有する覆工の落石荷重に対する耐荷力は、それが静荷重に対するものよりも高いであろうことは、以前から予見されていても⁵⁾、定量的にとらえられたことはなかった。

本研究の目的は、RC 覆工頂版の落石荷重作用時の挙動および耐荷力を知り、それに基づく合理的な覆工設計法を提示することである。

研究の手法は、RC 版模型による衝撃実験とこれに対する数値解析からなる。前者によって落石荷重の性質と RC 版の耐荷限度を知り、後者によって動的設計手法を得る。この2つを組み合わせることで、落石に対する覆工の動的設計法または極限設計法が構築されるのである。

2. 実験概要

落石覆工の構造は、一般的に門型ラーメンまたは矩形ラーメンが多い。それらの設計において頂版に対する落

* 正会員 北海道開発局開発土木研究所構造研究室長
(〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

** 工修 北海道開発局開発土木研究所構造研究室室員
(同上)

*** 正会員 工修 北海道開発局開発土木研究所構造部長
(同上)

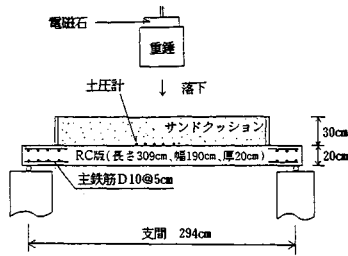


図-1 重錘落下による衝撃実験の概要

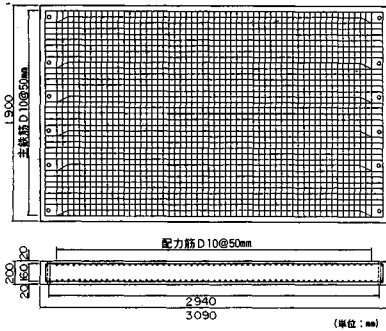


図-2 供試体 RC 版

石荷重が断面決定に支配的であるので、頂版を対象に載荷実験をすることとした。現行の覆工設計法では構造を二次元ラーメンに置き換えているので、版支持の仕方を2辺支持とし、結合条件は計測誤差を小さくするため、単純支持とした。

実験は衝撃力載荷実験と静的載荷試験の2種類に区別される。

衝撃力載荷実験では、RC版のサンドクッション上に重錘を落下させ、衝突時の重錘の負の加速度、主鉄筋ひずみ、RC版の加速度・変位を計測した(図-1)。また、一部の実験では、RC版表面に土圧計を置き、衝撃力が土圧に変換される状況を見た²⁾。

各計測器の応答周波数の上限は、加速度計2kHz、土圧計400Hz以上、インダクタンス式変位計1kHz、ひずみゲージ60kHzである。これらのデータを0.2msecのサンプリングタイムでパソコンに収録した。各計器の応答周波数はいずれも、測定に対して十分な精度を与える。

重錘形状、落下高およびサンドクッションの厚さは、実験の衝撃現象が実際の落石現象に近似されるよう決定

表-1 衝撃実験結果

Test No	Weight (kgf)	Falling Height (cm)	Cone Test qc of Sand Cushion (kgf/cm ²)	Negative Acceleration of Weight (-Gmax)	Impact force (tf)	Calculated Lamé Value λ (tf/m ²)	Displacement of slab at centre (mm)	Strain of steel bar (μ)		Strain Rate **** (%/s)	Behaviour of Weight Acceleration		Acceleration ↑ T ₁ T ₂ time
								at slab centre	10cm apart from centre		First peak Time T ₁ (sec)	Ending time T ₂ (sec)	
1-1	300	60	2.50	16.9	5.1	100	1.1	330	270	1.8	0.013	0.057	
1-2	600	300	3.28	39.3	23.6	129	6.4	1760	1660	10.3	0.010	0.060	
2	800	300	3.36	33.6	26.9	111	9.3	2730	2640	15.6	0.009	0.064	
3-1	1000	60	2.67	8.3	8.3	45	4.5	915	790	2.4	0.016	0.097	
3-2	1000	180	3.10	14.3	14.3	34	7.1	1940	1770	5.0	0.013	0.075	
4	1000	300	3.11	39.4	39.4	199	11.5	2320	2855	17.3	0.008	0.069	
* 5	1000	200	6.69	65.7	65.7	1310	18.3	3145	3890	29.6	0.005	0.058	
6-1	1000	300	5.85	50.9	50.9	377	12.7	2630	2340	25.1	0.004	0.066	
** 6-2	"	"	not observed	21.9	*** 21.9	46	13.2	18000以上	2422	—	0.014	0.076	
** 6-3	"	"	"	21.7	*** 21.7	45	13.6	2804	2359	—	0.012	0.076	
6-4	"	"	"	86.9	86.9	1435	14.9	1775	2484	—	0.003	0.059	
6-5	"	"	"	89.4	89.4	1540	15.2	1450	2508	—	0.005	0.069	
* 7-1	1000	300	3.71	84.6	84.6	1342	14.4	10000以上	3140	44.9	0.004	0.060	
* 7-2	"	300	4.45	125.7	125.7	3610	16.2	3420	10000以上	—	0.004	0.063	
* 7-3	"	300	3.60	26.7	26.7	75	14.7	2150	1570	—	0.009	0.065	
* 7-4	"	240	3.60	44.0	44.0	366	14.0	1770	1355	—	0.007	0.065	

* : これらはサンドクッション厚20cm。これら以外はすべて30cm厚。
 ** : 重錘が真直ぐに落下しなかった。
 *** : 2山目の極値。
 **** : 主鉄筋ひずみ速度は、応答初期を対象に、概算した値である。

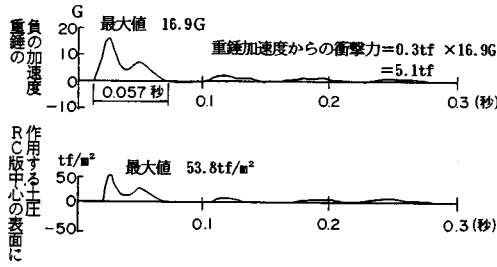


図-3 重錘加速度とRC版表面土圧の関係
(実験 No.1-1, 重錘 300kgf, 落下高 60cm)

した。つまり、衝撃の強弱の指標であるラーメ定数(表-1, Calculated Lamé Value)が、通常の設計で想定する100~400tf/m²を中心に分散するように、重錘形状やクッション厚を決定した。

静的載荷実験は、衝撃力載荷実験に対するRC版の耐荷力比較のために行ったものであり、荷重分布を衝撃力作用時と近似させるために、サンドクッションの上から重錘を介して載荷した。

サンドクッションは、コンクリート用細骨材を敷き均し、足踏みして締固め、オランダ式コーン貫入試験によって締固め度を管理した。

RC版供試体(図-2)に用いたコンクリートは、設計基準強度210kgf/cm²として施工したもので、テストピースの破壊試験結果から得られた弾性係数は平均 1.73×10^5 kgf/cm²である。鉄筋はSD30, D10である。

3. 実験結果

(1) 衝撃時の挙動

重錘落下実験は7枚のRC版を用いて、16個のデータを得た。その結果を表-1に示す。このうち、白字欄は健全状態のRC版の耐衝撃性能を調べたもので、第1回目の重錘落下結果である。ただし、実験No.1-2, 3-2はその前の1回目に与えた荷重レベルが低く、これによる版の性状変化が小さいものと考え、2回目の重錘落下も行った結果である。

着色欄は、1枚のRC版に繰り返して重錘落下衝撃を与え、耐荷力の変化をみたものである。

図-3は実験No.1-1において重錘加速度とRC版表面土圧の関係を調べたものである。重錘の負の加速度のうち、第1ピークはサンドクッション貫入初期の抵抗によるものと考えられる。他の同種の実験^{2)~4)}に比べてサンドクッションの厚さが薄いので、RC版表面土圧の時刻応答は重錘の加速度応答とほとんど遅れを生じていない。土圧の分布は第1ピーク時において図-4のようになっている。観測値から分布全体形状を想定して求めた土圧総量は当然ながら、重錘の質量と加速度の積にほぼ

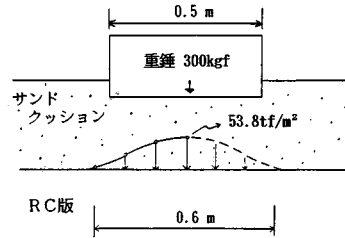


図-4 サンドクッションを介して、RC版に作用する衝撃力の分布

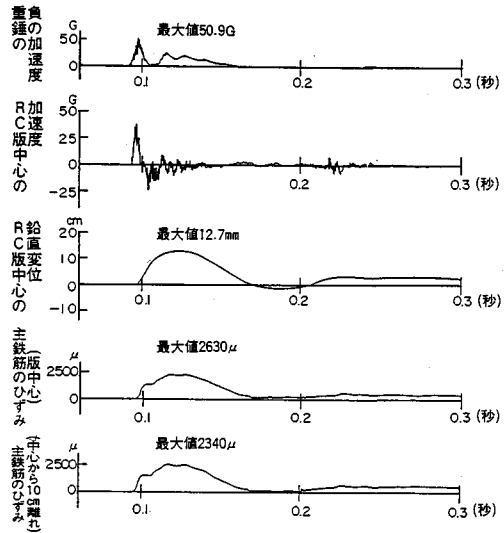


図-5 重錘落下衝撃時の挙動
(実験 No.6-1, 重錘 1000kgf, 落下高 300cm)

等しくなっている。

図-5に実験No.6-1におけるRC版と重錘の挙動を示す。ここで、RC版の鉛直変位および主鉄筋ひずみの最大応答が、重錘加速度の第1ピークに完全に遅れて発生していることが注目される。

重錘が最大加速度に達する時点で、版がほとんど主要な応答をしていないことから、重錘と版の間には力学的相互作用がないと考えられる。すなわち、重錘の挙動は、サンドクッションのみから影響を受ける。それは、サンドクッションとRC版を圧倒的に剛性の異なるばねと考えたとき、ここに衝突する物体のエネルギーがほとんど弱い方のばねで吸収されることから明らかである。

なお、応答の過程で版が降伏すれば剛性が低下し、荷重との相互作用もあり得るようだが、その時点では、すでに、荷重自体が減少している。

(2) ラーメ定数と衝撃力立ち上がり時間

表-1中、Calculated Lamé Value(逆算ラーメ定数)とは、振動便覧による落石衝撃力 $P=2.455 W^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5}$ に実験結果をあてはめてラーメ定数 λ を逆算

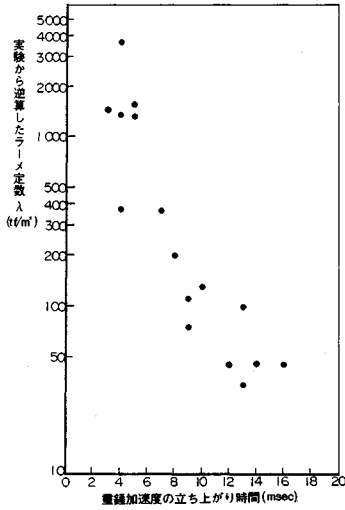


図-6 重錘加速度立ち上がり時間とラーメ定数の関係

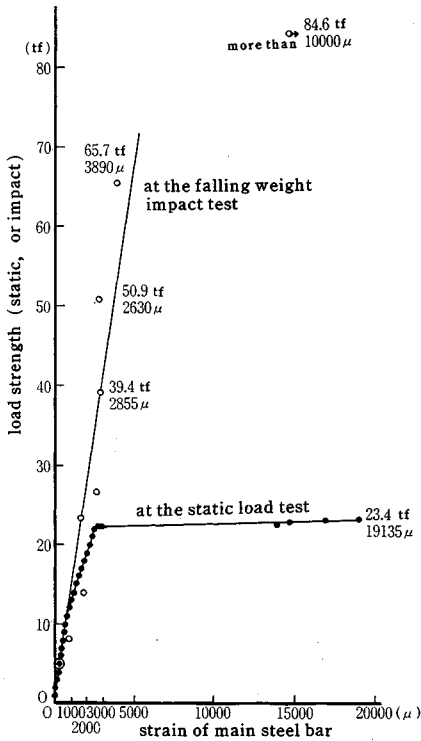


図-7 衝撃力載荷実験および静的載荷実験における荷重-主鉄筋ひずみの関係

した値である。

上記衝撃方式においてラーメ定数は、クッション材のやわらかさを反映するものであるとされているから、重錘加速度の立ち上がり時間とは密接な関係のあることが考えられる。そこですべての実験値を対象として両者の関係を見ると(図-6)、逆比例のよい相関が見出された。

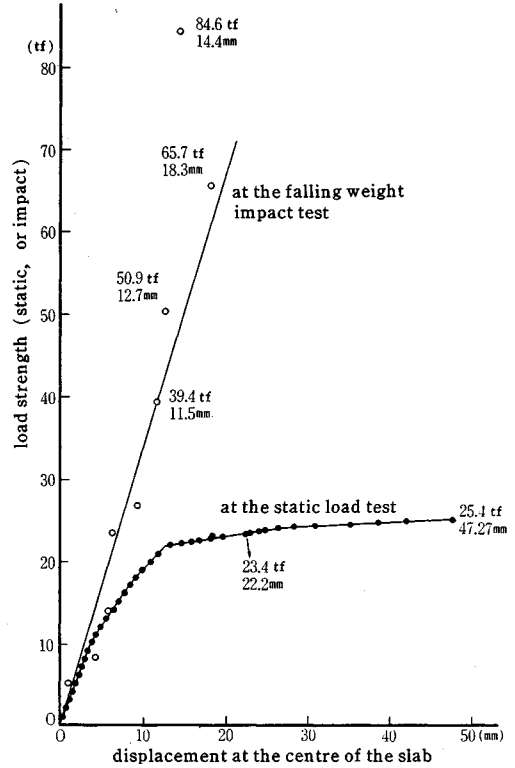


図-8 衝撃力載荷実験および静的載荷実験における荷重-RC版中心鉛直変位の関係

通常、設計で用いられるラーメ定数は100~400 tf/m²である。実験結果のうち逆算ラーメ定数がこの範囲にあるものを対象にして、重錘加速度の継続時間を平均すると0.0635秒であり、最初の立ち上がり始めから最大値に達するまでの時間は平均0.0085秒である。後述する覆工の動的設計に用いる衝撃力波形のうち、第1ピークについては、0.0085秒を底辺とする2等辺3角形波が推奨される。

(3) 衝撃に対するRC版の初期耐荷力

図-7および図-8は、表-1に基づき静的載荷実験および衝撃実験の荷重-主鉄筋ひずみ関係、および荷重-変位関係をプロットしたものである。低い荷重段階では衝撃荷重時と静的荷重時の両者がよく一致しているが、荷重が大きくなるにつれて著しい差を生じている。すなわち、静的載荷実験では荷重11tf以降、ひびわれ発生のためRC版の剛性が低下し、荷重22tfで明確に降伏している。一方、衝撃実験では、荷重波形の違いにより、値のばらつきは生じているが、荷重65.7tfまで弾性的に挙動している。

このような挙動の違いは、まず第1に載荷時間の長短および載荷速度の緩急の差によるものである。急速かつ瞬間的にだけ載荷される状態では、載荷重と対象物応答

表—2 RC 版供試体用鉄筋静的引張試験結果
(鉄筋：SD 30 D10)

供試体 No.	降伏ひずみ μ	弾性係数 kgf/cm^2
1	2.033	2.10×10^6
2	2.084	2.10×10^6
3	2.054	2.13×10^6
平均	2.056	2.11×10^6

は時刻的に1対1の対応をしない。ここで再び図—5をみる。重錘の負の加速度(≒荷重)とRC版の変位および鉄筋ひずみの時刻的变化波形はその形状もピーク時刻も一致していない。RC版自体の固有周期を計算してみると46.9 msecである。荷重変化のサイクルと比べて相当な長周期であるから、このような応答のずれはしごく当然の現象である。結局、RC版の挙動はその一次振動モードに強く支配され、最大応答は荷重1山目の終了以降に発生している。単純化すれば、衝撃力により初速度を与えられたRC版が一次振動を行っていると言えよう。そしてその変位応答増大の途中で鉄筋が降伏し、版の剛性が低下しても、そこに作用する力としての〔減少しつつある衝撃力〕+〔版の慣性力〕は応答を持続的に大きくさせるまでに至らなかったのである。

静的載荷状態と衝撃力載荷状態との差異を説明する第2の理由に、鉄筋およびコンクリートの降伏点が、急激な載荷条件下では高くなることが挙げられる。睦好ら⁶⁾による鉄筋の動的一方向単調載荷実験では、ひずみ速度50%/secの上降伏点は、ひずみ速度0.05%/secのそれよりも27%~40%上昇することが報告されている。

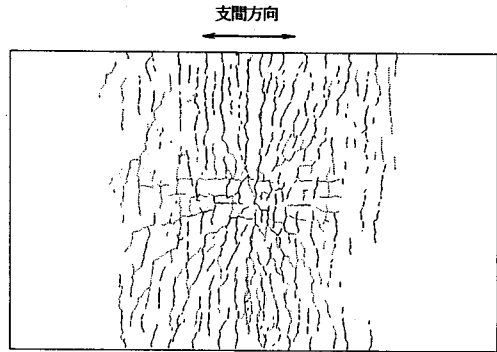
本実験における主鉄筋ひずみの時間変化は、たとえば表—1実験No.5の場合、ひずみ開始後0.013秒で3890 μ となり(ひずみ速度30%/sec)、衝撃が収まった後の残留ひずみは1100 μ 程度である。その差は2790 μ であるが、一方、この鉄筋は静的載荷時で降伏ひずみ平均値2056 μ である(表—2)。それらの差を降伏点上昇分と考えると734 μ 、静的降伏ひずみの36%となる。

(4) 繰り返し衝撃に対する RC 版の耐荷力

覆工頂版のまったく同一箇所に大きな落石が2回以上あるということは、まれと思われるが、土木構造物の供用期間の長さを考慮すれば、そのような可能性も一応検討しておいた方がよい。このため実験No.6-1~7-4では繰り返し落下実験を行った。

図—9は実験No.6-1~6-5におけるひびわれ状況である。実験の結果を整理すると以下のとおりである。

- 版の変形モードは、初期衝撃およびその後の繰り返し衝撃を通じて「曲げ」が、卓越している。
- 主要な曲げひびわれは、最初の1回で入る。
- その後荷重の繰り返しによって縦ひびわれが入るとともに、曲げひびわれの幅は広がるが、数回程度の衝撃



図—9 繰り返し衝撃実験後の RC 版のクラック状態
(実験 No. 6-1~6-5)

〔実線は第1回目落下衝撃によるクラック〕
〔破線は第2回目以降の落下衝撃によるもの〕

では版の鉛直変位にきわだった増加はみられない。すなわち、1回の落石衝撃に耐えれば同じ荷重に対しては、その後の供用期間中も機能を保持し続けるということが示唆されるのである。

4. 落石衝撃力に対する動的設計法

(1) 考え方

静的載荷時の材料の性質として、降伏ひずみ≒破壊ひずみであるから、現行の土木構造物の設計体系では、降伏ひずみ(降伏応力度)に対して、ある安全率を考慮することになっているわけである。そして現行の落石覆工の設計は「衝撃荷重を静的荷重に置き換えて¹⁾」行われている。しかし、同じレベルの荷重であっても、その作用の仕方が緩速持続的か、急速瞬間的かで構造物の応答は大いに異なる。実験結果から衝撃荷重下のRC版の挙動を総括すると以下のようである。

まず、版の応答は荷重に遅れて始動し、応答ピーク時には荷重はすでに低下している。応答の過程で、主鉄筋にはひずみ速度に応じた降伏点上昇が現われる。版が変位していくにつれ、主鉄筋ひずみは、上昇した降伏ひずみ値を超える場合もある。しかしそのとき載荷されている荷重は降伏荷重以下となっているので、事実上、弾性的な挙動を保つ。つまり、荷重が持続しない、応答のタイムラグにより鉄筋降伏時の荷重が小さい、鉄筋にひずみ速度に応じた降伏点上昇が生じるという3点が静荷重時との大きな違いをもたらす。

ここで、そのような挙動が実際の構造物にもあてはまるかという疑問が出るであろう。それに答えるために、まず実験結果を机上で再現することを試みる。動的挙動が計算でシミュレート可能となれば、それを実際の覆工に適用することによって、前述のような挙動が現実にも生じることが確かめられるわけである。

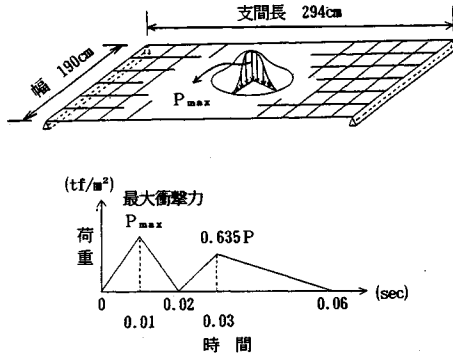


図-10 衝撃力載荷時のRC版動的解析概念図
(構造系および外力)

また、落石現象は非常に複雑かつ不規則なものであるが、設計用として落石の重量、落下高などを設定したあとの力の作用の仕方は単純であるから、机上でシミュレートされた構造物の挙動と、実際との間の相違は小さいと考えられる。したがって、落石に対するRC覆工の設計法として、「構造物の動的応答を考慮した、極限的な設計」というものも考えられるのである。

(2) 設計手法

そのような設計に必要なものは、①衝撃荷重の最大値、②荷重強度-時間曲線、③許容ひずみ値の設定(安全率)、④衝撃の現象の解析技術である。

①は衝撃力式の問題であるが、設計で一般的に用いられている落石対策便覧の式を用いることとする。②は実験結果を平均することで得られる。③の許容ひずみ値の設定の仕方は難しいが、鉄筋については実験結果から3000 μ 程度を推奨する。

(3) 実験結果を対象とした計算

静的載荷および衝撃力載荷実験より得られた結果を有限要素法解析による時刻歴応答解析を行って再現することを試みた。計算には、「複合構造解析プログラムISAP」を使用した。

モデルは、RC版の短辺を20分割、長辺を30分割した600要素の弾性の平板である(図-10)。

本計算はすべて弾性計算である。それは(1)で述べたように、RC版の主鉄筋が降伏ひずみ値以上にひずんだ状態でも、その時点での荷重は降伏荷重より小さくなっており、RC版は事実上、弾性体といえるからである。なお、破壊条件は設定していない。

計算用の荷重分布は静的載荷、衝撃力載荷とも、実験計測結果(図-4)に近似させた。衝撃力の時刻変化は、実験で計測した重錘加速度波形をモデル化し、各計算ケースについて P_{max} のみを変化させた。RC版モデルの剛性は、静的載荷実験における荷重-変位(版中心)の関係(図-8)から算出した $E=1.04 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ を

表-3 計算値と実験値の比較

計算ケース			版中央の変位 (mm)		主鉄筋ひずみ (μ)		
実験No.	W (kgf)	H (cm)	P (tf)	実験値	計算値	実験値	計算値
1-1	300	60	5.1	1.1	2.6	330	485
1-2	600	300	23.6	6.4	9.4	1760	1659
3-1	1000	60	8.3	4.5	4.4	915	828
5	1000	200	65.7	18.3	20.2	3890	3804
6-1	1000	300	50.9	12.7	15.0	2630	2989
静的載荷			荷重 10tf	4.0	3.9	750	786

表-4 荷重波形の違いによる応答の差 (試算)

計算ケースNo.	載荷波形	版中心の最大応答値	
		変位 (mm)	主鉄筋ひずみ (μ)
1 (基本形)		9.4	1,659
2		9.3	1,632
3		11.2	1,951
4		13.5	2,371
5		9.4	1,604

用いた。RC版の減衰は実験における鉄筋ひずみの振動波形から算出した減衰定数 $h=0.05$ を用いた。サンドクッション質量は考慮していない。計算ケースは、表-1の実験No.1-1, 1-2, 3-1, 5, 6-1を対象とした。計算の時間間隔は0.001秒である。

主鉄筋ひずみの計算値は、曲げモーメントからRC断面計算により求めた応力度を鉄筋の弾性係数 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ で除して算出した。

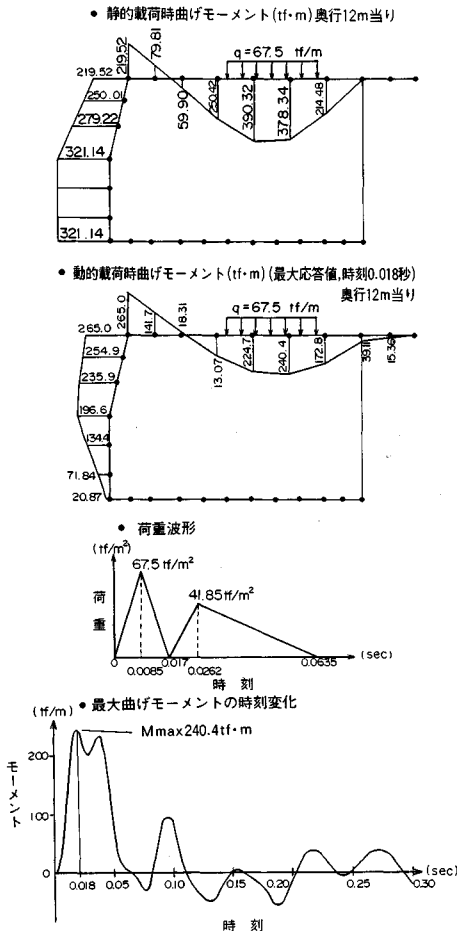
計算結果は、表-3に示すとおり実験値とよく一致している。

(4) 荷重-時間波形に対する応答感度

ある標準的な荷重-時間波形に基づいて動的設計した場合、実際の荷重波形との微妙な相違が問題となる。

最大衝撃荷重を一定値として、波形の違いによる5個のシミュレーションを行った(表-4)。計算対象は表-3、実験No.1-2である。

計算ケースNo.1およびNo.2の比較から、荷重立ち上がり時間の長短は、この範囲においてはわずかしか応答に影響を及ぼしていない。吉田ら²⁾の指摘のように、応答に大きく影響を与えるものは、極値継続時間であることが、ケースNo.1, 3, 4の比較からわかるが、荷重波形1山目の鋭さについて実験観測結果と表-4、計算ケースNo.3とを比較すれば、前者が格段に尖鋭である。そして、後者における応答増大が基本形(計算ケースNo.1)の2割程度であることをあわせ考えれば、實際上、動的設計用荷重波形としては、三角形波を用いてよいも



図—11 実際の覆工を対象とした落石荷重曲げモーメントの試算（静的計算と動的計算の比較）

表—5 最大応答発生時刻の比較（単位：sec）

対象ケース	実験 No. 6-1	実際の落石覆工モデル
実験において観測された時刻	0.023	—
数値計算における時刻	0.022	0.018

表—6 静的設計と動的設計の許容荷重の比較（試算）

・落石時の鉄筋の許容応力度 $\sigma_s = 1.800 \times 1.7$ (割り増し率) $= 3.060 \text{ kg/cm}^2$
 ・静的設計で落石時の鉄筋応力度が $\sigma = 3.060 \text{ kg/cm}^2 (= \sigma_s)$ となるような設計をしたとする。
 ・その応力度のうち、落石荷重分を70%と仮定すると、落石荷重による鉄筋応力度は $\sigma^* = 3.060 \times 0.7 = 2.142 \text{ kg/cm}^2$ 、
 常時荷重による分は $3.060 - 2.142 = 918 \text{ kg/cm}^2$
 ・鉄筋のひずみ $3,000 \mu$ を、弾性体として応力度換算すると、 $\sigma_s = 3,000 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^6 = 6,300 \text{ kg/cm}^2$
 ・ $\sigma_s = 6,300 \text{ kg/cm}^2$ のうち、 918 kg/cm^2 が常時荷重分に費やされるので、落石荷重分としては $6,300 - 918 = 5,382 \text{ kg/cm}^2$ の
 応力度を振り向けることができる。
 ・また、図11より動的設計での落石荷重応力度は、静的設計の62%である。
 ・従って、

$$\frac{\text{動的設計での最大許容荷重 } 5,382 \text{ kg/cm}^2}{\text{静的設計での最大許容荷重 } 2,142 \text{ kg/cm}^2 \times 0.62} = 4.1 \text{ 倍となる。}$$

のと考えられる。

また、応答に占める波形2山目の影響について調べるため、2山目をまったく無視した計算（ケース No.5）を行った。その結果、基本形（ケース No.1）とほぼ同じ応答が計算されたことは、2山目以降の波形の相違は応答にほとんど影響を与えないことを意味しよう。

(5) 実際の落石覆工を対象とした計算

落石覆工設計法に対する本稿の提案は、①ひずみ速度に対応した鉄筋の降伏点上昇を考慮すること、および②荷重-時間波形を用いた動的設計を行うことである。構造系については本稿での論議の対象としない。実際の設計では、便宜上、構造系を二次元ラーメンとしているが、そこに上記①、②の提案を適用して、従来型の静的計算と比較を行う(図—11)。荷重分布は実際の設計と同じく、等分布荷重とした。

動的計算の荷重-時間波形は表—1の加速度波形のうち、逆算ラーメン定数が100~400 tf/m^2 の範囲にあるものを平均して得た。

計算の結果、頂版部の衝撃荷重時曲げモーメントは、静的荷重時曲げモーメントの62%であった。RC版を対象とした先の実験では、静荷重応答と衝撃荷重応答とが、弾性範囲では同じであったが、対象とする構造物の構造系、剛性、質量などのいかんによってこのように動的載荷時断面力と静的載荷時断面力とが異なる場合も当然あり得る。ここで最大応答発生時刻を先の実験の場合と比較すると表—5のようになる。この落石覆工モデルでの最大応答発生時刻が、RC版実験をモデルとした計算時刻よりも約2割早くなっていることから、実際の落石衝撃においては、実験で観測された以上のひずみ速度（降伏点上昇）が現われるものと推測される。

ここで、鉄筋のひずみを $3,000 \mu$ まで許容する場合の動的設計による落石荷重耐荷力について、ある試算をしてみると(表—6)、静的設計での約4倍の荷重までとり入れることができるということになった。

5. 結 論

落石に対する RC 覆工の耐荷力を究明し、落石覆工の合理的な設計法を提案するため、サンドクッションを有する RC 版への重錘落下実験を行い、さらにこれに対する数値計算および実際の落石覆工を対象としたシミュレーションを行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

(1) サンドクッションを有する RC 版の対落下物衝撃応答は、支間方向の曲げ変形が卓越している。

(2) 実験から、振動便覧の落石衝撃力式におけるラーメ定数 λ と、衝撃力立ち上がり時間とは逆比例のよい相関を示すことがわかった。

これより、設計で一般的に想定されているラーメ定数 ($100 \sim 400 \text{ tf/m}^2$) に対応する動的設計用の衝撃力-時間波形が得られた。

(3) サンドクッションを有する RC 版の、落下物衝撃力に対する降伏耐力は、静荷重に対するそれを大幅に上回る。その理由は、衝撃力という急速かつ瞬間的な荷重の下では、構造物応答は荷重変化に追従せず、荷重低下後に最大応答を迎えるという点にある。よって、応答の途中で主鉄筋が降伏ひずみ領域に入っても、低下しつつある荷重と、版の慣性力はそのひずみを限りなく増大させるまでに至らなかった。鉄筋ひずみが降伏域に入っても構造物としては弾性的な挙動を保ったということである。また、主鉄筋の、ひずみ速度に応じた降伏点上昇も衝撃荷重時の耐力向上に寄与したものと考えられる。

(4) 実験結果と数値計算結果とはよく一致した。そのことは、落石覆工の動的設計を可能とする。

本稿で提案する動的設計法は次の 2 点を主な特徴とする。

- 頂版の動的応答を考慮して、部材のひずみを大きなレベルまで許容する。

- 落石衝撃荷重-時間波形に基づいた荷重入力を行う。

(5) 荷重波形第 1 ピークの形状変化が応答計算値に与える影響は小さい。このことは動的設計の確実性を高める。

(6) 同じ落下エネルギーによる数回の繰り返し衝撃に対して RC 版の耐力は低下しない。すなわち、落石覆工が、設計で想定する上限の落石荷重を同一箇所に 2 回以上受けてもなお安全であることがいえる。

大きなひずみレベルまでを考慮の対象としたとき、瞬間的な荷重に対する RC 版の耐荷力は、静的荷重に対するよりも、はるかに高いものである。しかし、一瞬にせよ構造物が静的状態での降伏ひずみを大幅に超えるという設計は、現行の土木構造物の設計思想からは、かなりの飛躍であるかもしれない。しかし、落石荷重に対する覆工設計のあり方として、「高確率小荷重」に対しては従来式の静的設計によることとし、「低確率大荷重」に対しては本稿で示した「落石衝撃力に対する極限設計法」による、という手法は現実的に考えられよう。実際に覆工では、設計で考慮しているものより、はるかに大きな落石もしばしば報告されているが、覆工頂版への影響としては多少のクラックが入る程度である。このような現実起こり得る低確率大荷重の落石に対しては、本稿で示した設計法が適当であろう。また、現に供用されている落石覆工の極限的な耐荷力を知る方法としても本設計法は最適のものであろう。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，丸善，昭和 58 年 7 月。
- 2) 吉田 博：落石覆の設計荷重の評価に関する研究，金沢大学工学部土木工学科，昭和 60 年 3 月。
- 3) 建設省土木研究所 構造橋梁部橋梁研究室：衝撃力を受ける落石覆工部材に関する実験報告書 (I)，土研資料第 1886 号，昭和 57 年 11 月。
- 4) 建設省土木研究所 構造橋梁部橋梁研究室：衝撃力を受ける落石覆工部材に関する実験報告書 (II)，土研資料第 2054 号，昭和 59 年 3 月。
- 5) 千葉利則・今野久志・吉田絃一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の模型実験，第 31 回北海道開発局技術研究発表会論文集，北海道開発協会，昭和 63 年 2 月。
- 6) 陸好宏史・町田篤彦：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，第 354 号/V-2，1985. 2。

(1989. 3. 7・受付)