

(38) 落石覆工の非線形性を考慮した落石衝撃力特性に関する一考察

AN INTERACTION BETWEEN IMPULSIVE FORCE BY FALLING ROCKS
AND INELASTIC BEHAVIOR OF ROCK-SHEDS

湧上 正浩*・小畑 康隆**・藤井 智弘***・吉田 博****

Masahiro FUCHIGAMI, Yasutaka OBATA, Tomohiro FUJII and Hiroshi YOSHIDA

* (株) エイ・シー・デイ 設計課長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

**工修 (株) エイ・シー・デイ 設計課 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

***学博 (株) エイ・シー・デイ 技術部長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

****工博 (株) エイ・シー・デイ 代表取締役社長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸3903番地)

キーワード: 落石衝撃力, 落石覆工, 塑性, 終局限界状態

(impact force by a falling rock, rock-shed, plastic, ultimate limit states)

1. はじめに

現在, 落石覆工は, 落石の衝撃力を静的な力に置き換えて, 許容応力度法によって設計されている¹⁾. その際の衝撃力は, ヘルツの衝突理論を基本とし, 半無限体弾性体上に単位体積重量 2.6tf/m^3 の剛球が一定速度で衝突するものとして求められている. 落石対策便覧では, 設計に用いる落石衝撃力をラーメ定数を 100tf/m^2 とした振動便覧の推定式により算出するとしている (以後, この衝撃力を落石対策便覧による衝撃力と称す).

しかし, 衝突現象により発生する衝撃力は, 衝突物と被衝突物の双方の剛性が影響することから, 落石覆工に作用する衝撃力を正確に算定するためには, 落石覆工の剛性も考慮する必要がある²⁾と考えられる. すなわち, 落石がたわみ性の大きい構造物に落下した場合と, 剛性の大きい構造物に落下した場合では, 発生する衝撃力に大きな差異が考えられる.

このようなことから, 荷重に基づく設計法は合理性を欠く可能性があり, エネルギー的観点からの設計法が合理的であるとされてきた^{3,4)}. しかし, 著者らは, 荷重に基づく現行設計法の必要性の重要さを考え, 落石覆工の剛性を考慮した衝撃力特性について検討を行った. 構造物の剛性を考慮した衝撃力

は, 落石覆工の塑性域までを考慮し, 動的応答解析により算出するものとした.

本論文では, まず現行の設計において用いられている落石衝撃力を得られるためのサンドクッションのモデル化について述べる. つぎに, このサンドクッションモデルを用いて剛性を変化させた単純ばりの動的応答解析による伝達衝撃力を示し, 構造物の剛性を考慮した落石衝撃力特性について考察する.

2. サンドクッションのモデル化

2.1 解析モデル

サンドクッションのモデル化は, 落石-サンドクッション間の相互作用を考慮する必要がある⁵⁾と, 2者の関係を2質点系モデルに置換できるものとした. サンドクッションの衝撃応答特性を図2.1に示すような弾性ばねとダッシュポットを組み合わせたレオロジーモデルで表現できるものとした⁶⁾. 図2.1における m_1 は落石の質量であり, m_{2A} はサンドクッションの衝撃力伝播領域の有効質量であり, 図2.2に示す領域を考えた. また, k_1, α は落石とサンドクッションの接触面のばね係数および減衰係数であり, k_2, α はサンドクッションのばね係数および減衰係数である.

このモデルを用いて, サンドクッションのモデル

化に必要な k_1, k_2, c_1, c_2 の4つを、落石対策便覧による衝撃力 $P_{a(t)}$ と図2.1に示す2質点系モデルによる衝撃力 $P_{a(t)}$ とがほぼ一致するように、最適化手法による動的同定法を用いて決定する。すなわち、その基本式は以下ようになる²⁾。

未知数： k_1, k_2, c_1, c_2

$$\text{目的関数：} Z = \sum_{t=0}^T \{P_{a(t)} - P_{a(t)}\}^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{制約条件：} m\ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = m_1 g \quad (2)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + P_{a(t)} - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0 \quad (3)$$

$$P_{a(t)} = k_2 x_2 + c_2 \dot{x}_2 \quad (4)$$

$$k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0$$

ただし、 $P_{a(t)}$ ：落石対策便覧による衝撃力

$P_{a(t)}$ ：2質点系モデルで計算される伝達衝撃力。

式(1)において、目的関数が時刻歴な応答関数として表されるため、各パラメータによる1次変動関数が解析的にしか得られない。したがって、ここでは目的関数の1次偏導関数を求めたうえで、準ニュートン法を用いた計算を行った²⁾。なお動的同定計算に用いる伝達衝撃力-時間曲線は、図2.3に示すように、金沢大学の梶谷らの提案している台形波形³⁾における t_2 の中央で最大衝撃力が発生するものと仮定して求めた。

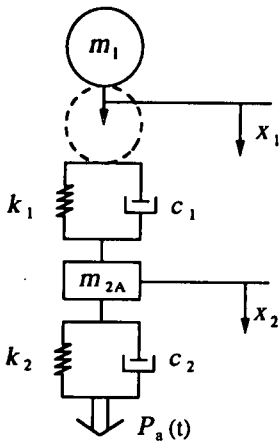


図2.1 2質点系モデル

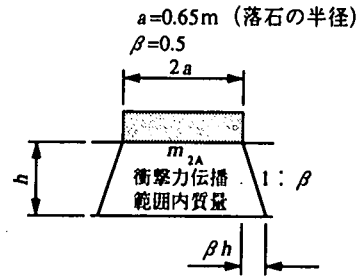


図2.2 衝撃力伝播領域

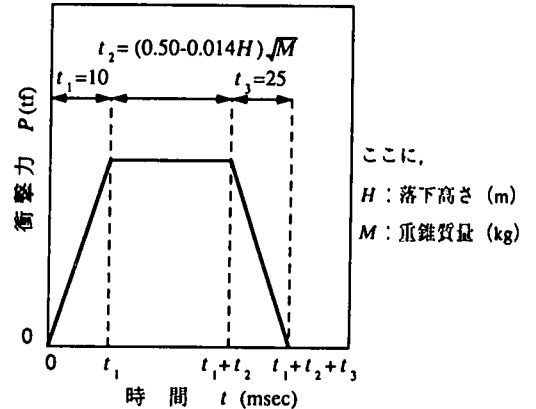


図2.3 衝撃力モデル

2.2 解析結果および考察

動的同定計算によりモデル化を行った荷重ケースを表2.1に、動的同定計算に用いた荷重モデルを表2.2に示す。

このような条件により求めたサンドクッションのパラメータ k_1, k_2, c_1, c_2 を表2.3に示す。また、これらのパラメータにより得られた衝撃力-時間曲線の一例を図2.4に示す。この図より想定した荷重モデルと計算結果がほぼ一致していることがわかる。

このことより、現行の設計法に用いられている衝撃力に対応したサンドクッションのパラメータは、動的同定法で決定できるものと考えられる。

表2.1 荷重ケース

荷重ケース	落石重量(tf)	落石高(m)	落石速度(m/sec)	サンドクッション厚(m)
ケース1	3.0	10.0	14.0	1.3
ケース2	3.0	15.0	17.1	1.3
ケース3	3.0	20.0	19.8	1.3
ケース4	3.0	25.0	22.1	1.3

表2.2 荷重モデル

荷重ケース	最大衝撃力(tf)	t_1 (msec)	t_2 (msec)	t_3 (msec)
ケース1	128.3	10	20	25
ケース2	163.6	10	16	25
ケース3	194.4	10	12	25
ケース4	222.3	10	8	25

表2.3 サンドクッションのパラメータ

荷重ケース	k_1 (tf/m)	k_2 (tf/m)	c_1 (tf·s/m)	c_2 (tf·s/m)
ケース1	1300	150	17.3	44.8
ケース2	1640	115	18.6	44.5
ケース3	2660	143	28.0	38.1
ケース4	3330	143	20.8	37.0

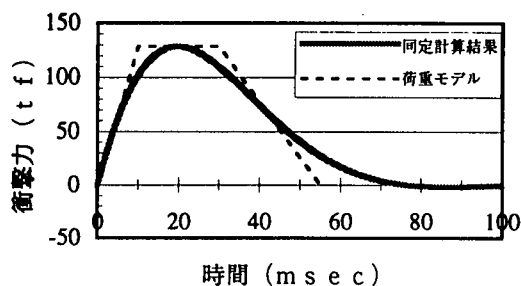


図2.4 衝撃力-時間曲線

3. 剛性を考慮した落石衝撃力特性

3.1 解析モデル

構造物の剛性を考慮した落石衝撃力の算出には、図3.1に示すように単純ばりの支間中央にサンドクッションモデルを結合した解析モデルを用いる。

解析モデルには、支間を20分割した節点を設け、その節点に部材自重およびサンドクッションなどの死荷重を節点荷重として作用させ、初期応力をあてた。

このモデルに対して、落石速度および落石質量を入力として動的応答解析を行い、構造物およびサンドクッションの衝撃力伝播領域の変位、速度から(5)式により構造物に作用する衝撃力を算出した。

$$P_{(t)} = k_2(x_{2(t)} - x_{3(t)}) + c_2(\dot{x}_{2(t)} - \dot{x}_{3(t)}) \quad (5)$$

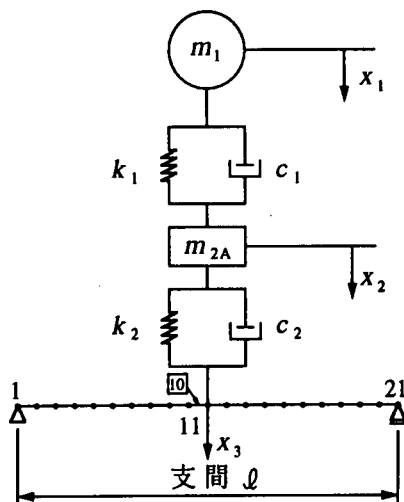


図3.1 解析モデル図

3.2 解析条件

(1) はり部材

構造物の剛性の影響を調べることを目的とした解析であるため、変形性能の優れた部材を想定して解析を行うこととした。変形性能の優れた部材として、アンボンドPC鋼材を緊張することなしに配置し、コンクリートを充填した鋼管ばり（以後、充填鋼管部材という）を用いるものとした。この充填鋼管部材は、過去の実験により極めて大きい終局耐力と変形性能を有していることが明らかとなっている⁹⁾。

この充填鋼管部材を用いて、部材剛性の変化による衝撃力の影響を比較するために、断面を数種類変化させて解析を行った。また、支間長の変化による影響を調べるために、支間長を変化させた解析も併せて行うものとした。図3.2に解析に用いた充填鋼管部材の模式図を示し、表3.1に解析を行った充填鋼管部材条件の一覧表を示す。表3.1中の降伏モーメントは、断面分割法により算出した。なお、解析では断面分割法で得られた曲げモーメント-曲率関係をできるだけ近似するような非弾性均質部材に置換えた。

また、剛性の高い部材として、図3.3に示すPC部材についても解析を行った。なお、PC部材については弾性範囲内で挙動するものとした。

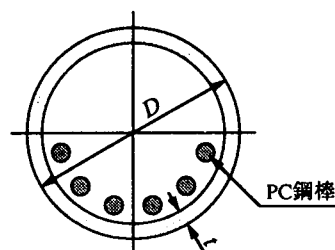


図3.2 充填鋼管模式図

表3.1 充填鋼管部材条件一覧表

呼径	外径D (mm)	管厚 t (tf)	PC鋼棒	降伏モーメント (tf・m)
φ 400	406.4	12.7	SBPR1080/1230 φ 26	115
φ 500	508.0	12.7	SBPR1080/1230 φ 32	217
φ 600	609.6	12.7	SBPR1080/1230 φ 32	319

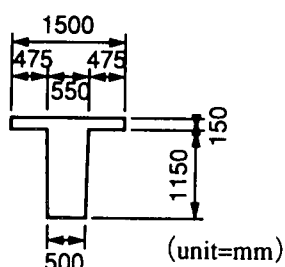


図3.3 P C部材断面図

(2) 落石条件

解析における落石条件は、落石重量を 3tf と一定にし、落下高を 10 ~ 25m の範囲で 5m 単位で変化させることとした。

(3) 支間長

支間長は、一般的によく用いられている落石覆工の支間長を想定し、8m, 10m および 12m の3種類について行った。

3. 3 解析結果および考察

一例として、落石条件を落石重量 3tf, 落下高 20m に固定し、支間長および部材断面を変化させた解析結果について検討する。伝達衝撃力、支間中央における最大変位および中央部材の最大曲げモーメントを表3.2に示す。この表より最大曲げモーメントがすべての解析ケースにおいて、降伏モーメントに達しており、塑性化していることがわかる。また、部材断面の変化に対する伝達衝撃力の変化は大きいですが、支間長の変化に対しては、同一部材ではほとんど変化していないことがわかる。これらのことより、部材が塑性化した場合は、支間長が伝達衝撃力にあたる影響が小さいと考えられる。

図3.4に衝撃力-時間曲線を示し、図3.5に載荷点変位-時間曲線を示す。図3.4より剛性の低いφ 400では最大衝撃力が小さく、長周期で振動しており、剛性の高いφ 600では、最大衝撃力が大きく、短

周期で振動していることがわかる。図3.5において、φ 400 および φ 500 で明らかに残留変位が発生していることがわかる。

表3.3に固有周期一覧表を示す。表3.3における T' は、単純ばりの一次固有周期であり、次式により与えられる。

$$T' = 2\pi \left(\frac{L}{\pi} \right)^2 \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{0.5} \quad (6)$$

ここに、 π は円周率、 L はスパン長、 ρ は密度、 A は断面積、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。

表3.3において動的応答解析による固有周期 T と、式(6)により算出した T' を比較すると、塑性化が激しいφ 400 では、 T の値が長周期化しているが、その他の部材では概ね一致していることがわかる。また、この解析に用いた荷重の作用時間は 0.047sec であり、固有周期は荷重作用時間の 4 倍 ~ 20 倍であった。

次に、落石荷重の変化に対する影響を調べるために、落石重量 3tf で落下高を変化させた解析を行った。この解析では、充填鋼管部材のなかで剛性の高いφ 600、支間長 8m および剛性の低いφ 500、支間長 12m について行った。また、充填鋼管部材に比べ剛性が高く、変形性能の劣る P C 部材についても解析を行った。解析結果における伝達衝撃力と落石対策便覧による衝撃力の比較図を図3.6に示す。この図より剛性が高いほど落石対策便覧による衝撃力に近い値となることがわかる。また、変形性能の優れた充填鋼管部材を用いた場合の伝達衝撃力は、落石対策便覧による衝撃力の 40 ~ 60% であったが、変形性能の劣る P C 部材は、落石対策便覧による衝撃力の 85 ~ 95% の値となった。このことより、P C 桁のような剛性の高い部材を落石覆工の部材として用いる場合は、落石対策便覧による衝撃力を用いて設計を行えば良いと考えられる。

表3.2 解析結果 (W=3.0tf, H=20m)

支間長 (m)	部材 (mm)	伝達衝撃力 (tf)	最大変位 (cm)	最大曲げモーメント (tf・m)
8.0	φ 400	64.7	34.6	115
	φ 500	89.2	15.6	217
	φ 600	113.1	9.7	319
10.0	φ 400	64.1	55.4	115
	φ 500	88.0	24.1	217
	φ 600	107.4	14.8	319
12.0	φ 400	64.1	87.2	115
	φ 500	88.4	35.7	217
	φ 600	107.8	21.1	319

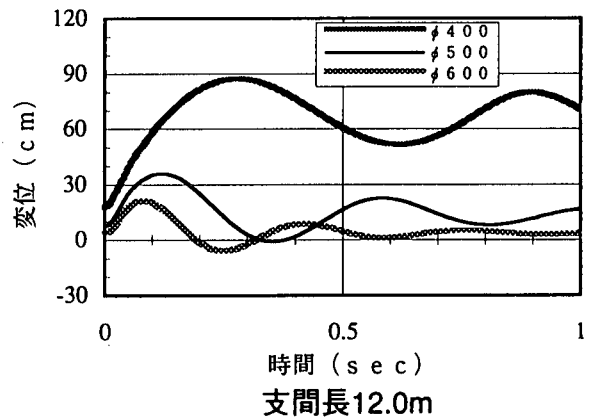
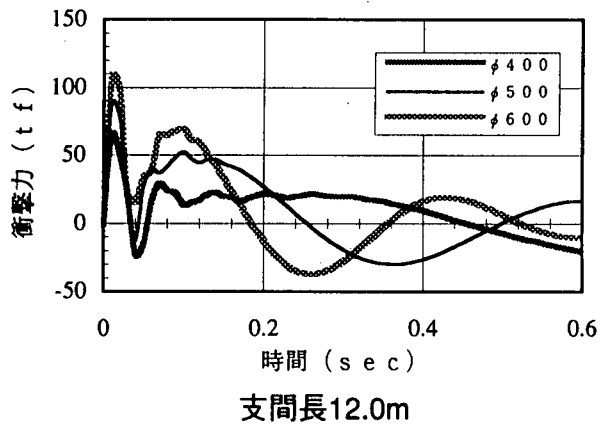
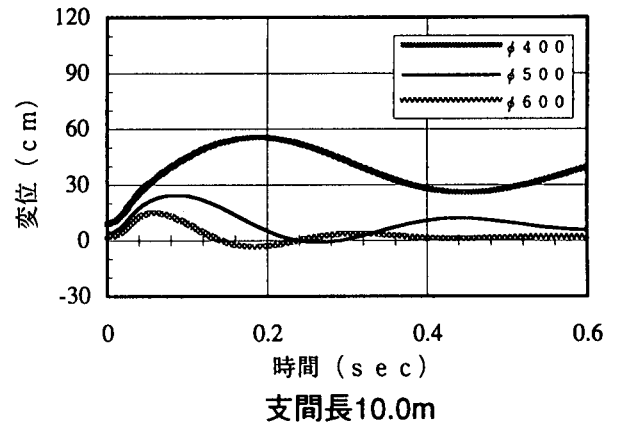
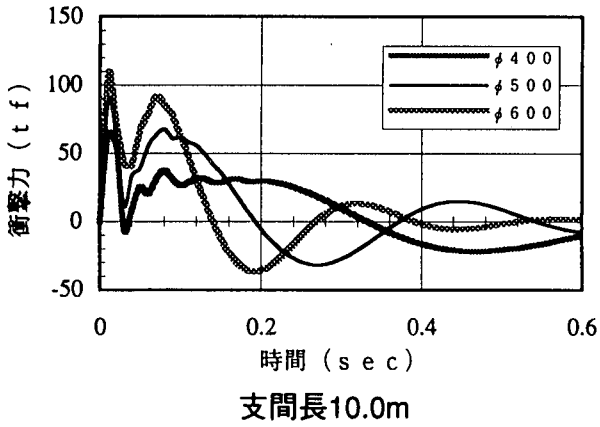
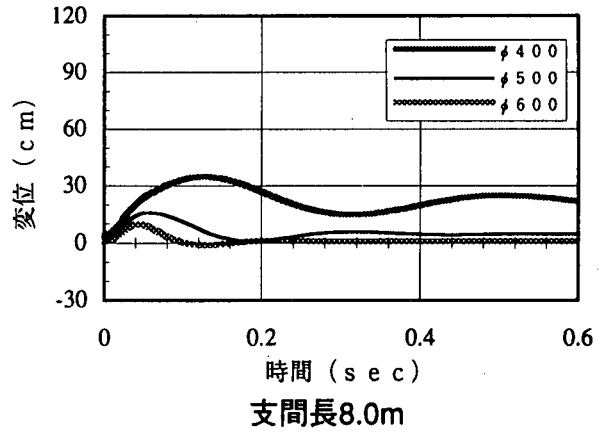
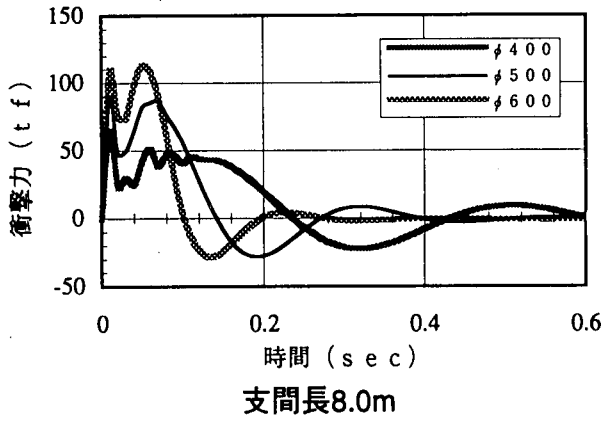


図3.4 衝撃力—時間曲線 (W=3.0tf,H=20m)

図3.5 変位—時間曲線 (W=3.0tf,H=20m)

表3.3 固有周期 (単位sec)

		支間長 8m	支間長 10m	支間長 12m
φ 400	T	0.45	0.66	0.93
	T'	0.35	0.54	0.78
φ 500	T	0.25	0.37	0.51
	T'	0.22	0.35	0.50
φ 600	T	0.18	0.25	0.33
	T'	0.15	0.24	0.34

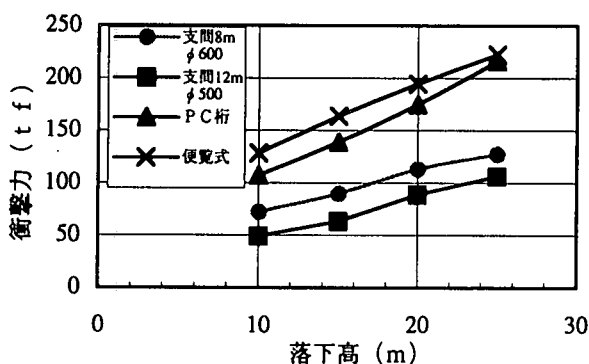


図3.6 衝撃力比較図

4. まとめ

本研究では、落石覆工の剛性を考慮した衝撃力特性を明らかにすることを目的として、動的同定法によりサンドクッションのモデル化を試み、単純ばりモデルを用いた動的応答解析を行った。本研究により得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1) 落石対策便覧に対応したサンドクッションモデルは、金沢大学の榎谷らの提案している台形波形を用いて動的同定法により推定することができる。

(2) 変形性能の優れた部材を用いた場合、部材剛性を考慮した落石衝撃力は、落石対策便覧による衝撃力の1/2～1/3程度となる。

(3) 剛性の高いPC桁を想定した解析による落石衝撃力は、落石対策便覧による衝撃力の85～95%となり、剛性の影響は小さい。

(4) 変形性能の優れた終局耐力の大きい部材を用いれば、構造物に作用する落石衝撃力を低減できる。

今回の研究では、研究の第1段階として、落石重量を一定とした単純ばりモデルについて解析を行った。今後落石重量を変化させたラーメン構造モデルについても、解析を行いたいと考えている。

最後に、本研究を行うにあたり、動的同定法についてご指導頂いた、防衛大学工園田佳巨先生に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月
- 2) 園田佳巨：エネルギー基準による落石覆工の安全性照査に関する研究，九州大学学位論文，1994年2月
- 3) 園田佳巨，佐藤紘志，石川信隆：エネルギー基準による落石覆工のサンドクッション厚の算定法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1617-1625，1991年3月
- 4) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1563-1572，1993年3月
- 5) 榎谷浩：落石覆工の落石による衝撃力に関する研究，大阪市立大学学位論文，1989年4月
- 6) 前川幸次，吉田博：コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘落下実験，土木学会論文集，NO.513/I-31，pp.117-127，1995年4月