

図-2 重錘落下位置

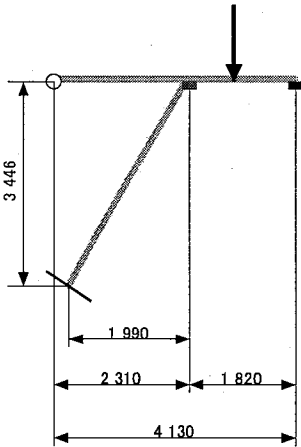
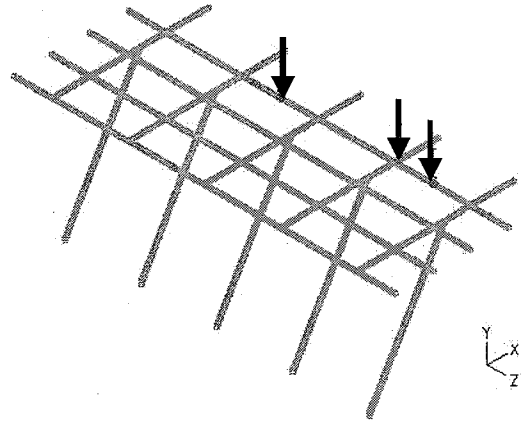
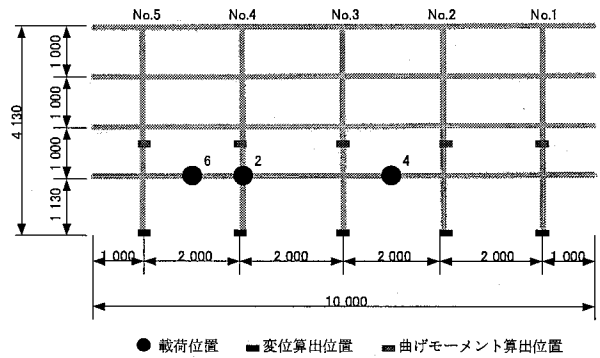


図-3 2次元解析モデル

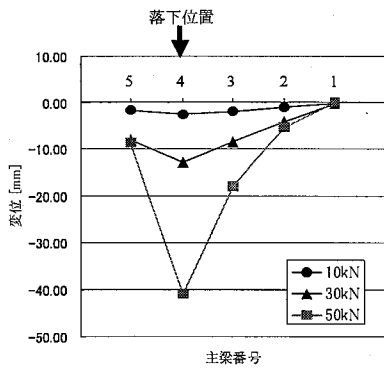


a) 全体図

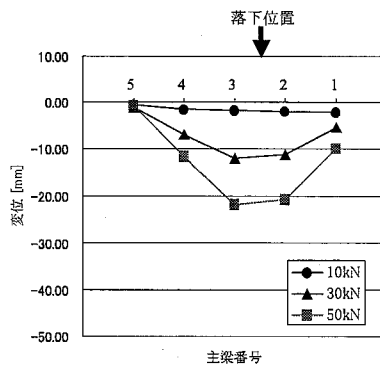


b) 平面図

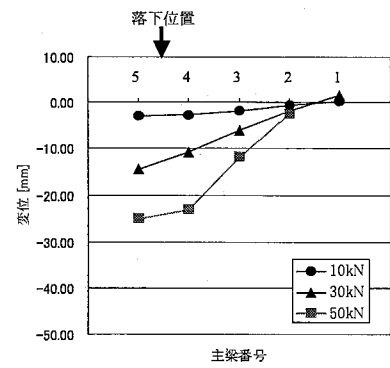
図-4 3次元解析モデル



a) 落下位置 2



b) 落下位置 4



c) 落下位置 6

図-5 落下位置近傍りの下方変位最大時における各はりの変位

3.2 衝撃力の算出

2次元モデルによる静的弾性解析により、図-3に示す位置における荷重-変位関係および荷重-曲げモーメント関係を求め、曲げモーメントについては応力に換算した。そして、それらの関係を用いて、線形係数をそれぞれ求めた。各算出位置は実験供試体に設

置した変位計およびコンクリートひずみゲージの位置に対応している。そして、実験変位による衝撃力の算出は、実験で得られた変位を係数で除することにより求めた。また、コンクリートひずみはコンクリートの弾性係数を乗じて応力を求め、応力を係数で除して

算出した。算出に使用した実験データの一例として、落下位置 2, 4, 6 において落下位置近傍のはりの鉛直下方変位が最大になった時刻での各はりの変位を図-5 に示す。なお、変位は鉛直上向きを正としている。

図-5 より、重錘重量が大きくなるにつれて各はりの変位の総和に対する落下位置近傍にあるはりの変位の割合は大きくなっており、荷重が集中していることが分かる。さらに、落下位置 6 の場合、載荷された No.4 はりおよび No.5 はりの下方変位が最大の時 No.1 はりの変位は上方になる傾向があることが分かる。

3.3 各種衝撃力の評価

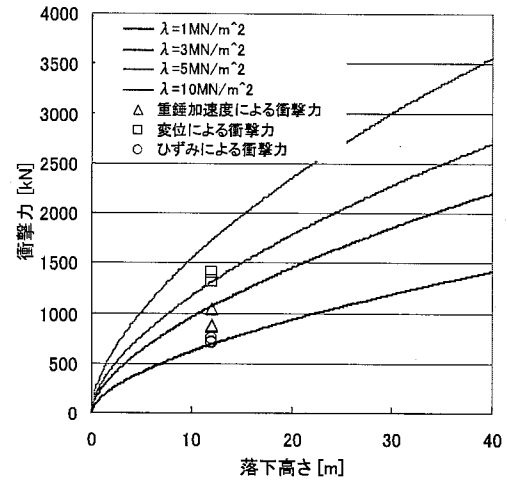
図-6 は、重錘重量別に落下高さと衝撃力の関係を示したものである。図中には重錘加速度から求めた衝撃力、静的弾性解析による実験変位から求めた衝撃力、ひずみから求めた衝撃力をそれぞれプロットしてある。また、図中の曲線は落石対策便覧⁹⁾に記載されている落石衝撃力算出式(式1)に割り増し係数 α を1.0とし、ラメ定数 λ を変化させて計算した値を示している。

$$P = 2.108(mg)^{\frac{2}{3}} \lambda^{\frac{2}{3}} H^{\frac{5}{3}} \alpha \quad (1)$$

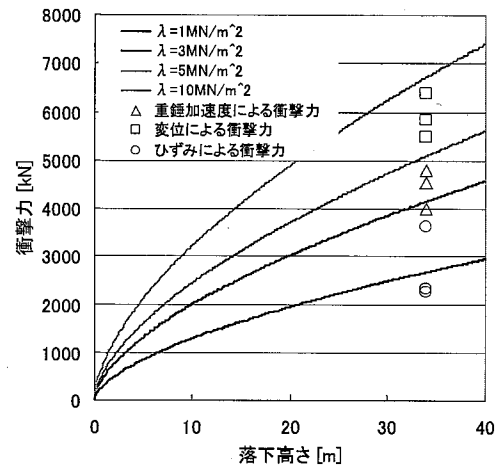
ここに、P:衝撃力(kN)、m:落石の質量(t)、g:重力加速度(m/s^2)、 λ :ラメ定数(kN/m^2)、H:落下高さ(m)、 α :砂層厚と落石直径の比から決定される割り増し係数である。

いずれのケースにおいても、変位から求めた衝撃力は重錘衝撃力よりも大きく、ひずみから求めた衝撃力は重錘衝撃力よりも小さい値となった。重錘衝撃力はラメ定数が $3kN/m^2$ と同程度の値であるが、実験変位による衝撃力は、重錘重量 10kN の場合は $\lambda=5MN/m^2$ 、30kN では $\lambda=6\sim 8MN/m^2$ 、50kN では $\lambda=20MN/m^2$ と、重錘重量が大きくなるにつれて重錘衝撃力との比率が大きくなった。特に 50kN のケースでは、変位による衝撃力は重錘衝撃力の 2 倍以上である。これは、重錘重量の増加により上部工の塑性変形の程度が大きくなったことと、実験が単一載荷実験ではなく繰り返し載荷実験であるため、実験によって得られた変位が単一落下による変位より大きかったことが挙げられる。その結果、静的弾性解析により得られた線形係数よりも実験による衝撃荷重と変位の増加の割合が大きかったため、算出された衝撃力が大きな値となったと考えられる。また、ひずみによる衝撃力は $\lambda=1\sim 2MN/m^2$ であり、重錘衝撃力に近い値となった。

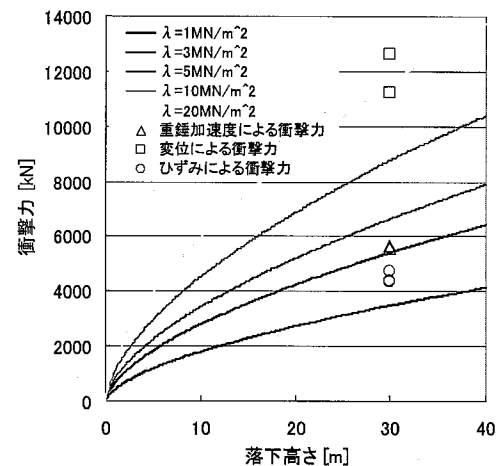
これより、変位やひずみにより求めた換算衝撃力は、重錘衝撃力と異なり、衝突位置での局所的な設計と主部材での荷重の取り方が異なることも一つの合理的な考えである。また、サンドクッションの特性値と衝撃力との関係や、落石からのエネルギー伝達率と衝撃力との関係についても衝撃荷重評価は重要と考えられる。これらについても現在データ分析中である。



a) 重錘重量 10kN

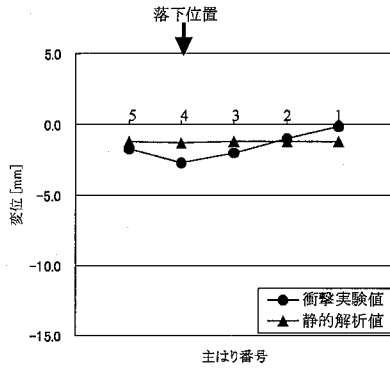


b) 重錘重量 30kN

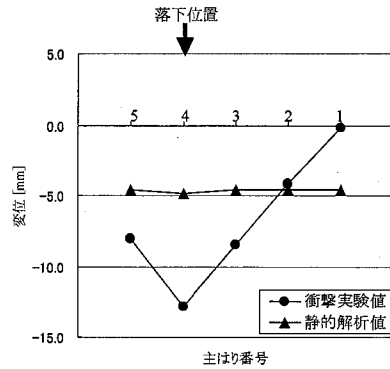


c) 重錘重量 50kN

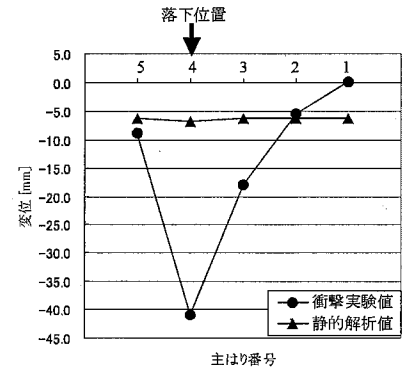
図-7 落下高さと各種衝撃力の関係



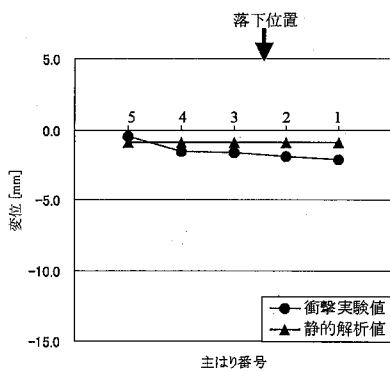
a) 落下位置 2・重錘重量 10kN



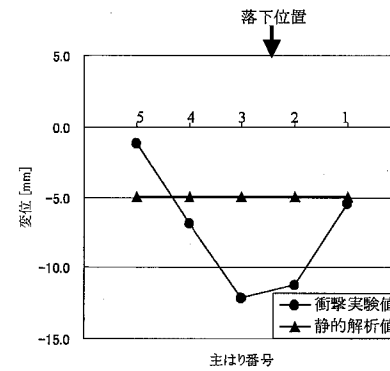
b) 落下位置 2・重錘重量 30kN



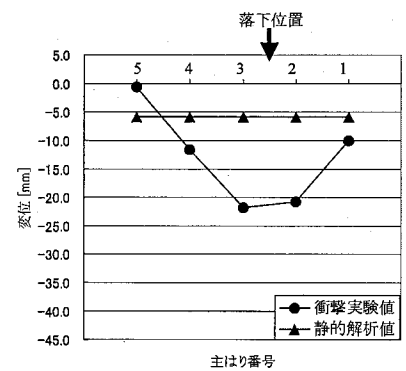
c) 落下位置 2・重錘重量 50kN



d) 落下位置 4・重錘重量 10kN



e) 落下位置 4・重錘重量 30kN



f) 落下位置 4・重錘重量 50kN

図-8 衝撃実験および静的解析による各はり先端の変位

表-2 静的解析結果 (変位)

a) 変位による分担率

	変位の分担率 (%)				
	No. 5	No. 4	No. 3	No. 2	No. 1
落下位置2	19.75	21.07	19.74	19.72	19.71
落下位置4	19.99	19.99	20.01	20.01	20.00
落下位置6	20.02	20.01	20.00	19.99	19.98

b) 各種変位

荷重		3次元解析による変位の総和 (mm)	2次元解析による変位 (mm)
1000kN	落下位置2	-5.75	-5.75
	落下位置4	-5.20	
	落下位置6	-5.20	
3000kN	落下位置2	-17.25	-17.25
	落下位置4	-15.59	
	落下位置6	-15.59	
5000kN	落下位置2	-28.76	-28.75
	落下位置4	-25.99	
	落下位置6	-25.99	

表-3 静的解析結果 (応力)

a) 応力による分担率

	応力の分担率 (%)				
	No. 5	No. 4	No. 3	No. 2	No. 1
落下位置2	19.74	21.24	19.71	19.66	19.65
落下位置4	19.98	19.99	20.01	20.01	20.00
落下位置6	20.04	20.02	20.00	19.98	19.97

b) 各種応力値

荷重		3次元解析による応力の総和 (N/mm ²)	2次元解析による応力 (N/mm ²)
1000kN	落下位置2	21.62	21.90
	落下位置4	18.85	
	落下位置6	18.85	
3000kN	落下位置2	64.86	65.69
	落下位置4	56.54	
	落下位置6	56.54	
5000kN	落下位置2	108.10	109.48
	落下位置4	94.24	
	落下位置6	94.24	

表-4 衝撃実験における最大重錘衝撃力

重錘重量		最大重錘 衝撃力 (kN)
10kN	落下位置2	1046
	落下位置4	884
	落下位置6	893
30kN	落下位置2	4016
	落下位置4	4799
	落下位置6	----
50kN	落下位置2	5598
	落下位置4	5670
	落下位置6	5700

3.4 静的載荷における各はりの変位および応力分布

次に、3次元モデルによる静的弾性解析を行い、各はりの変位および応力分布を調べた。算出位置は2次元解析と同様、主はり先端の変位および主はり柱の接合部分の曲げモーメントである。図-8に落下位置2および4における最大重錘衝撃力発生時の各はり先端の衝撃実験による変位および静的解析による変位を重錘重量別に示す。図中の静的解析値としてプロットしてある変位の値は、衝撃実験時の最大重錘衝撃力を静的荷重として入力したときの値である。また、表-2に各はりの変位の総和、分担率および2次元解析による変位を、表-3には応力についての各値を落下位置別にそれぞれ示す。分担率は各はりの変位または応力を総和で除することにより求めた。なお、表-4に衝撃実験による最大重錘衝撃力を示す。表中の実験データが無い箇所はケーブルの破断によるものである。

図-8より、いずれの重錘重量のケースにおいても、載荷点直下あるいは近傍のほりに関して、衝撃実験による変位は静的解析による変位よりもかなり大きな値であり、逆に載荷点から最も遠いほりに関しては、衝撃実験による変位は静的解析による変位よりも小さな値となっている。この傾向は重錘重量が大きくなるほど顕著であり、衝撃応答において載荷したほりに変位が集中する傾向があるのに対し、静的載荷の場合は変位が分散する傾向があることがわかる。これも、3.3節の実験変位による衝撃力の算出の場合と同様に、重錘重量の増加による上部工の塑性変形の増加と、単一載荷実験ではなく繰り返し載荷実験であるためであると考えられる。ただし、衝撃応答は実験値で静的の場合は解析値であるため、より厳密に比較を行う上では、動的の場合の解析データを得る必要がある。よって、3次元モデルによる動的解析を行い、静的解析結果との比較および衝撃実験結果と一致するかどうか検討することが今後の課題である。また、表-2および表-3より、載荷位置によらず荷重が同一値の場合、3次元解析における変位の総和および2次元解析における変位および応力はほぼ等しく、荷重が大きくなるにつれ

て変位および応力の総和も大きくなる。さらに、主はり上載荷の場合、載荷点直下のほりの変位および応力は他のほりと比べやや大きく、主はり間の横はり上載荷(落下位置4, 6)の場合、各はりの変位および応力の分担率はすべて約20%であり、各ほりともほぼ等しい変位および応力が発生していることが分かる。

以上の結果を踏まえて、次の段階としてサンドクッションや土砂囲いを考慮した3次元モデルによる衝撃応答解析を行い、実験結果との関係について明らかにすることが必要と考えられる。よって、今後もさらに研究を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、ロックキーパーの性能を実証するために、重錘衝突実験および有限要素法による静的弾性解析を行い、実験と解析の両面からロックキーパーの衝撃破壊挙動の解明に関する研究を進めた。特に、本論文では静的弾性解析によって実験応答値から得られた各種衝撃力の評価および解析値に関する考察を行った。

本研究をまとめると以下の通りである。

- 1) 最も単純な衝撃力としての重錘衝撃力はラメ定数が 3kN/m^2 の落石対策便覧による落石衝撃力算出式と同程度であるが、変位から求めた衝撃力は重錘衝撃力よりも大きく、ひずみから求めた衝撃力は重錘衝撃力よりもやや小さい値となった。
- 2) 変位やひずみにより求めた換算衝撃力は、重錘衝撃力と異なり、衝突位置での局所的な設計と主部材での荷重の取り方が異なることも一つの合理的な考えである。
- 3) 衝撃応答において載荷したほりに変位が集中する傾向があるのに対し、静的載荷の場合は変位が分散する傾向がある。
- 4) 主はり上載荷の場合、載荷点直下のほりの変位および応力は他のほりと比べやや大きく、主はり間の横はり上載荷の場合、各はりの変位および応力はほぼ等しい。また、載荷位置によらず同一荷重の場合、変位および応力の総和はほぼ等しい。
- 5) 静的解析結果および衝撃実験結果との比較をより厳密にするために、3次元モデルによる動的弾性解析および動的弾塑性解析を行い、解析データをさらに蓄積する必要がある。
- 6) サンドクッションの特性値と衝撃力との関係や、落石からのエネルギー伝達率と衝撃力との関係についてもさらに研究する必要がある。
- 7) サンドクッションや土砂囲いを考慮した3次元モデルによる衝撃応答解析を行い、実験結果との関係について明らかにすることも性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けての今後の課題である。

参考文献

- 1) 松葉美晴, 後藤吉晴, 佐藤彰, 音田奨, 岡畑博子, 井上理恵: 実物 PC 製シェッドの落石による破壊実験について(1), (2), 第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会構造工学委員会, pp.241-246, pp.247-253, 1993.6
- 2) 岸徳光, 松岡健一, 佐藤昌志, 今野久志, 池田泰博: 逆 L 型及び門型覆工の衝撃応答性状, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会構造工学委員会, pp.59-64, 1998.6
- 3) 橋紗代子, 榊谷浩, 中村佐智夫: 有限要素法を用いた RC はりの衝撃応答解析に関する一考察, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会構造工学委員会, 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会, pp.77-82, 2004.11.
- 4) 玉井宏樹, 園田佳巨: 衝撃応答解析への損傷力学の適用に関する研究, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会構造工学委員会, 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会, pp.59-64, 2004.11.
- 5) 中村博史, 玉井宏樹, 園田佳巨, 別府万寿博: 粒子法を用いた鉄筋コンクリートはりの衝撃応答解析, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会構造工学委員会, 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会, pp.71-76, 2004.11.
- 6) 日本道路協会: 落石対策便覧, 日本道路協会, 2006.6.
- 7) 榊谷浩: 性能照査型設計と落石防護構造物, 防災土木, 北陸 PC 防雪技術協会, Vol.12, pp.30-37, 2005.
- 8) 榊谷浩, フランソア デキュードラ: 敷砂上への落石衝突による荷重の評価に関する一考察, 第 3 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会構造工学委員会, pp.275-278, 1996.5.