

(45) 敷砂を緩衝材とするPC版上への重錘落下実験について

IMPACT TEST OF PC SLAB WITH SAND CUSHION

中村佐智夫\*, 榎谷 浩\*\*, 藤井智弘\*\*\*, 音田 奨\*

Sachio NAKAMURA, Hiroshi MASUYA, Tomohiro FUJII and Susumu ONDA

\*日本サミコン（株）技術部（〒950 新潟市弁天橋通1-8-23）

\*\*工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科（〒920 金沢市小立野2-40-20）

\*\*\*学博 日本サミコン（株）技術部（〒950 新潟市弁天橋通1-8-23）

キーワード：重錘衝撃力，伝達衝撃力，緩衝材

(weight impact force, transmitted impact force, cushion)

1. はじめに

従来，落石覆工の緩衝材としては敷砂が多く用いられ，多くの機関で衝撃力の推定に関する研究<sup>1)~3)</sup>などが行われてきており，構造物の設計のための荷重として伝達衝撃力が重要であること<sup>4)</sup>や，動倍率を考慮すべきこと<sup>5)</sup>などが指摘されてきている。そこで，敷砂を緩衝材とする落石覆工にかかる力（重錘衝撃力・伝達衝撃力）と落石覆工の応答（ひずみ・支点反力）の関係を明らかにすることを目的として重錘落下実験を行った。本論では3質点系モデルを用いた解析および個別要素法と有限要素法の結合法による解析を試みたので結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験は，長さ3000mm幅1500mm厚さ250mmのPC版をスパン2700mmで2辺単純支持し，緩衝材として砂を60cm敷設したところに0.3tfの重錘を1,2,3mの高さから自由落下させることにより行った。落下位置はすべてスパン中央とした。実験中，PC版にクラックは発生せず，すべて弾性範囲内の実験であった。また静的曲げ試験によれば，PC版のヤング係数は， $4.08 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。図-1に実験供試体の外形を示す。

2.2 重錘

実験に使用した重錘は直径60cmの錘底のものを用いた。

2.3 敷砂

実験に用いた敷砂の均等係数は2.5，平均粒径は0.52mmであった。また，実験時には砂厚30cmごとにタンパーで1回締め固めた。実験時の含水比は4.32%，湿潤密度は $1.466 \text{ g/cm}^3$ であった。

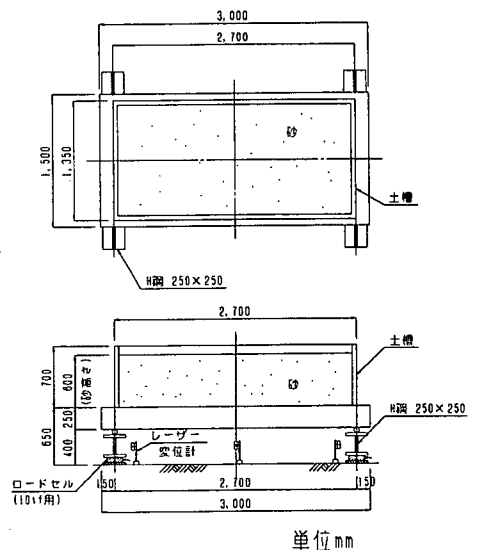


図-1 実験供試体

## 2. 4 測定

測定は、重錘加速度・土圧・PC版のひずみと変位・PC版の支持点の反力について行った。

図-2に測定位置を示す。

## 2. 5 データ処理

データは、すべて0.5msec間隔でサンプリングし、平均化点数13点の多項式適合法による平滑化を行った。

伝達衝撃力は、各時刻の土圧データを直線で結び、落下位置回りに積分して求めた。

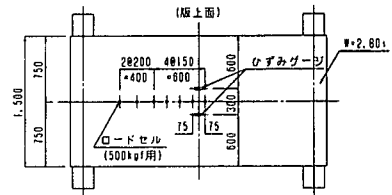
支点反力も各時刻のロードセルの値を合計して求めた。

## 3. 実験結果および考察

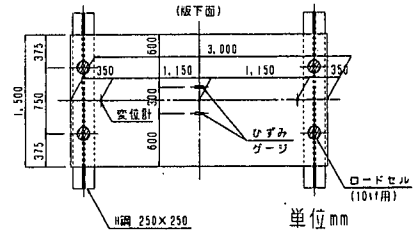
### 3. 1 実験結果

図-3に各落下高さの実験結果の衝撃力波形を示す。また、最大値については、表-1に解析結果とともに一覧表にした。

図-3中の波形は、実験番号1, 4, 5のものを示した。実験番号3を除いて本実験の範囲では、いずれの落下高さの場合も伝達衝撃力は重錘衝撃力の1.1~1.3倍程度であった。また、支点反力は、重錘衝撃力の1.5~1.9倍程度であった。支点反力および伝達衝撃力には振動が観測され、敷砂の質量を考慮したPC版の固有周期の理論値が24msecであるのに対し、実験では40msec程度であった。これはPC版の支持部が弾性的な挙動をしたことによる影響と思われる。また、重錘衝撃力についても、衝撃力の下降部においてPC版の振動によるものと思われる波形が観測された。表-1には、PC版のひずみから換算した衝撃力の最大値を示す。換算の方法は、静的弾性骨組解析において、荷重を60cmの部分等分布荷重として算出したモーメントとひずみから求めたモーメントを比較することにより行った。ひずみから換算した衝撃力は、重錘衝撃力の1.2~1.4倍程度で、支点反力に比べ小さかった。これは、解析で仮定した荷重と実際の荷重分布が違うことや、解析では敷砂の剛性を無視したことなどの影響と思われる。



(1) 土圧測定用ロードセルとひずみゲージ



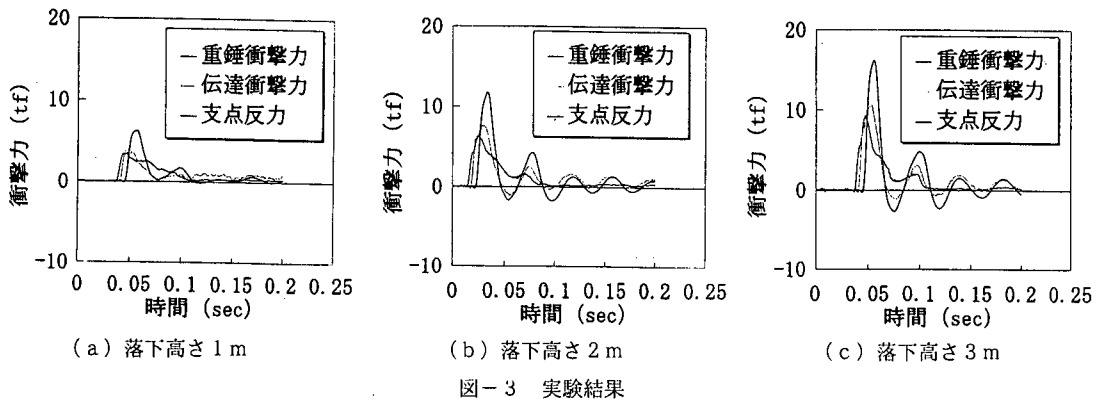
(2) 反力測定用ロードセル、変位計とひずみゲージ

図-2 測定位置

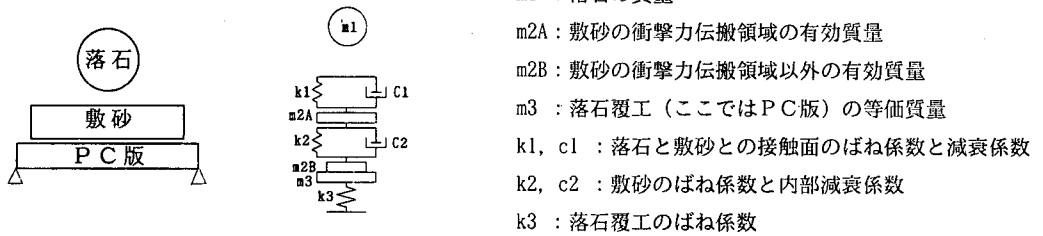
表-1 実験および解析結果の最大値一覧表 (単位: tf)

実験番号	1	2	3	4	5	6	7	
落下高さ	1 m		2 m		3 m			
実験	重錘衝撃力	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	
	伝達衝撃力	(1.10)	(1.16)	(1.74)	(1.19)	(1.12)	(1.28)	(1.15)
結果	支点反力	3.75	3.47	10.70	7.63	10.60	12.37	11.46
	ひずみ	(1.83)	(1.48)	(1.80)	(1.84)	(1.71)	(1.87)	(1.84)
便覧	換算衝撃力	6.23	4.43	11.04	11.80	16.19	18.05	18.32
	$\lambda =$	(1.16)	(1.25)	(1.23)	(1.28)	(1.23)	(1.35)	(1.38)
式	$100\text{tf}/\text{m}^2$	3.93	3.74	7.58	8.16	11.63	13.03	13.78
	$50\text{tf}/\text{m}^2$	(2.04)	(2.31)	(1.71)	(1.64)	(1.41)	(1.39)	(1.35)
3	$100\text{tf}/\text{m}^2$	6.94	10.52	13.42				
	$50\text{tf}/\text{m}^2$	(1.55)	(1.75)	(1.30)	(1.25)	(1.07)	(1.05)	(1.02)
モ質	$50\text{tf}/\text{m}^2$	5.26	7.97	10.17				
	3	(0.98)	(1.11)	(0.99)	(0.95)	(0.92)	(0.90)	(0.88)
デ点	伝達衝撃力	3.34	6.10	8.73				
	支点反力	(1.84)	(2.08)	(1.90)	(1.82)	(1.75)	(1.72)	(1.66)
D	支点反力	6.24	11.64	16.56				
	重錘衝撃力			(1.06)	(1.02)			
E	伝達衝撃力			6.52				
	支点反力			(1.71)	(1.64)			
M	伝達衝撃力			10.52				
	支点反力			(1.81)	(1.74)			
Kn	伝達衝撃力			11.11				
	支点反力							
50	伝達衝撃力							
	支点反力							
tf/m								

注) 上段の ( ) 内の値は重錘衝撃力の実験値を1として基準化した値



### 3. 2 3質点系モデルによる解析

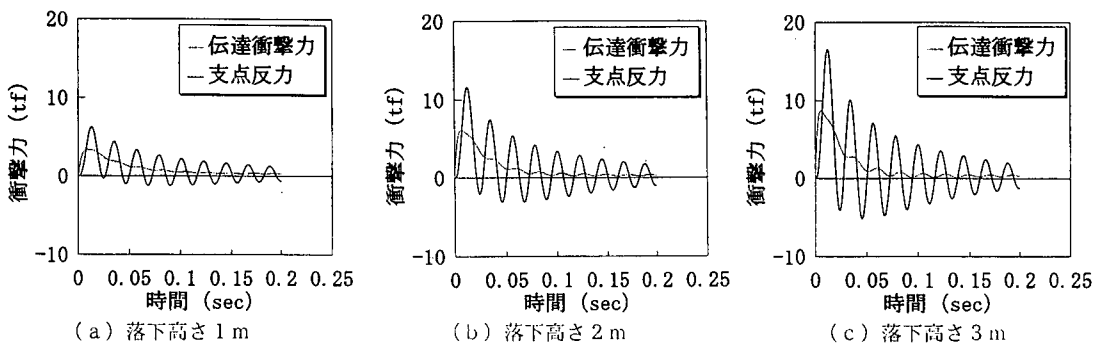


防衛大の園田<sup>9)</sup>は、図-4に示す3質点系モデルを用いて落石覆工のエネルギー伝達率の解析を行っており、図中のパラメータのうち、 $k_1, c_1, k_2, c_2$ に関して、山砂、川砂、砕砂のそれぞれに回帰式を提案している。回帰式の適用範囲は、 $0.3tf \leq \text{重錘重量} W \leq 3tf$ 、 $5.0m \leq \text{落下高さ} H \leq 20.0m$ 、 $0.9m \leq \text{敷砂厚} h \leq 1.2m$ であり、本実験の範囲外であるが、敢えて適用を試みる。本実験に用いた敷砂の粒径分布に近い山砂の回帰式を解析に用いる。

パラメータ回帰式 山砂

$$\begin{aligned}
 c_1 &= 7.70 \cdot W^{0.313} \cdot H^{0.410} \cdot h^{-0.146} \\
 c_2 &= 4.30 \cdot W^{0.317} \cdot H^{0.412} \cdot h^{-0.104} \\
 k_1 &= 20.6 \cdot W^{0.251} \cdot H^{0.296} \cdot h^{-0.273} \\
 k_2 &= 2.90 \cdot W^{0.214} \cdot H^{0.416} \cdot h^{-0.090}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3質点系モデルを用いて解析した結果の衝撃力波形を図-5に、衝撃力の最大値を表-1に示す。実験結果に比較し伝達衝撃力は2、3割低い値を示したが、支点反力は実験結果とほぼ等しい値となった。



### 3. 3 個別要素法と有限要素法の結合法による解析

従来の衝撃問題に関する解析法として、有限要素法 (FEM) や剛体ばねモデル (RBSM) および個別要素法 (DEM) などがあげられる。このうち有限要素法は、連続体の微小変形に対しては広く用いられてきたが、大変形解析には多くの困難を伴う。また、個別要素法は、離散体の大変形解析には適しているが、隣接要素が連続したままで要素の変形により系全体の変形を表現する場合にはあまり用いられない。ここでは、離散体である敷砂を個別要素法で解析し、連続体であるPC版を有限要素法で解析した。解析法の詳細については文献<sup>7)</sup>に譲る。

図-6に個別要素法の要素間の接触点における粘弾性モデルを示す。また、図-7には今回の解析に用いた要素配列を、表-2には解析に用いた諸定数を示す。

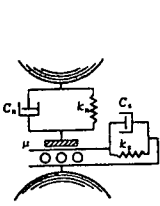


図-6 接触点における粘弾性モデル

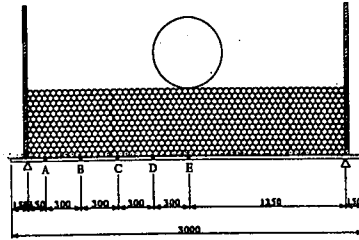
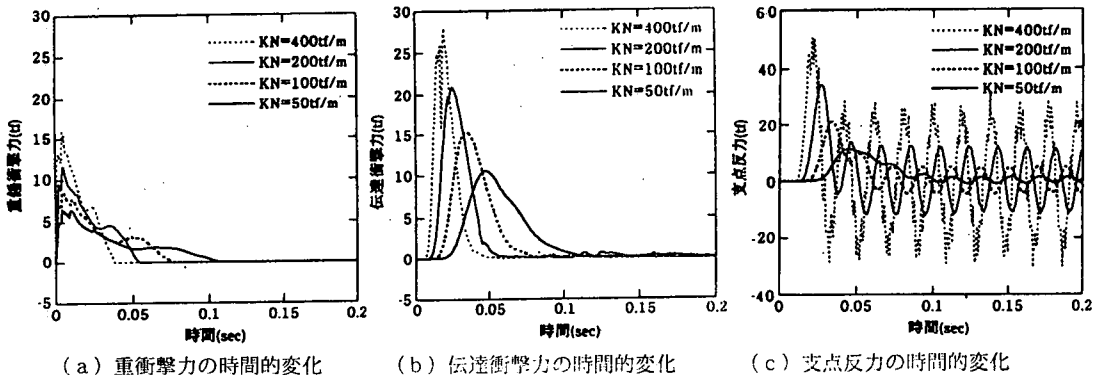


図-7 要素配列

表-2 解析に用いた諸定数

砂粒子の内部摩擦角	30°
壁面との摩擦角	15°
法線方向のばね定数 Kn	400, 200, 100, 50tf/m
逓減率	0.25
法線方向の減衰係数 Cn	0.2
接線方向の減衰係数 Cs	1.0

吉田ら<sup>8)</sup>によれば、解析結果に接線方向のばね定数や、法線方向および接線方向の減衰係数は、重錘衝撃力や伝達衝撃力の解析結果にほとんど影響を与えない。また本解析に先立ち、砂粒子の内部摩擦角を30°から45°まで変化させて影響を確認したが、解析結果にはほとんど影響しなかった。そこで本研究では、落下高さ2mのみを解析の対象とし、法線方向のばね定数Knのみをパラメータとして、400tf/mから50tf/mまで変化させて解析を行った。解析結果の衝撃力波形を図-8に示す。解析の結果、Kn=50tf/mの場合が実験結果に合うようである。法線方向のばね定数を50tf/mにした場合の衝撃力の最大値を表-1に示す。図-8(a)に示すように、Knが小さくなるにしたがって重錘衝撃力の最大値は小さくなるが、最大値に達するまでの時間はあまり変化しない。また、Knが小さくなるにしたがって、衝撃力下降域の作用時間が長くなる。図-8(b)に示すように、Knが小さくなるにしたがって伝達衝撃力の最大値は小さくなる。また、衝撃力の立ち上がり開始時刻が遅くなり、上昇域および下降域とも作用時間が長くなる。図-8(c)に示すように、支点反力は、Knが小さくなるにしたがって、反力の最大値は小さくなる。支点反力/伝達衝撃力は、Kn=400tf/mの場合は約2だが、Kn=50tf/mの場合は約1であった。また、自由振動領域の振幅も急激に小さくなる。これらは荷重速度の影響と思われる。



(a) 重錘衝撃力の時間的変化 (b) 伝達衝撃力の時間的変化 (c) 支点反力の時間的変化

図-8 個別要素法と有限要素法の結合法による解析結果

### 3. 4 振動便覧式との比較

落石対策便覧<sup>9)</sup>において落石の衝撃力の最大値は(2)式に示す土木技術者のための振動便覧<sup>10)</sup>の衝撃力算定式でラーメ定数 $\lambda = 100 \text{tf/m}^3$ とおいた式で与えられる。

$$P_{\max} = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \quad (2)$$

ここに  $P_{\max}$  : 落石の最大衝撃力 (tf)

$\lambda$  : 緩衝材のラーメ定数 (tf/m<sup>2</sup>)

$w$  : 落石重量 (tf)

$H$  : 落石の落下高さ (m)

落石対策便覧においては、敷砂厚が90cmに満たない場合は衝撃力を割り増すこととしているが、本検討では割増さないこととした。ラーメ定数 $\lambda = 50, 100 \text{tf/m}^2$ について計算した結果を表-1に示す。実験結果の重錘衝撃力と比較すると落下高さ3mの場合、 $\lambda = 50 \text{tf/m}^2$ とした計算値とほぼ一致し、落下高さが低くなるにしたがって計算値のほうが大きくなり安全側となる。また、実験結果の伝達衝撃力と比較すると、落下高さ3mの場合、 $\lambda = 100 \text{tf/m}^2$ とした計算値は若干大きめの値を与え、落下高さが低くなるにしたがって安全側となる。

### 4. まとめ

本研究は、敷砂を緩衝材とする落石覆工に作用する衝撃力と応答の関係を明らかにするために重錘落下実験を行った。本研究で得られた結果を整理すると、

- 1) 本研究の範囲内では伝達衝撃力は重錘衝撃力の1.1~1.3倍程度であった。伝達衝撃力は、重錘衝撃力の1.5倍以上とする報告<sup>11)</sup>とは反する実験結果となったが、これは落石重量や落下高さの落石条件、敷砂の性状や敷砂厚、構造物の固有周期などの違いによるものと思われる。
- 2) 本研究の範囲内では支点反力は、重錘衝撃力の1.5~1.9倍程度であった。
- 3) 支点反力に関していえば、3質点系モデルによる解析、および個別要素法と有限要素法の結合法による解析ともに最大値はおおむねシミュレートできた。
- 4) 伝達衝撃力の最大値に関しては、3質点系モデルによる解析と個別要素法と有限要素法の結合法による解析は異なる結果を与え、落下高さ2mの場合、後者は前者の約1.7倍であった。実験結果は両者の中間であった。

また、今後の課題を整理すると、

- 1) 本論では、衝撃力の大きさについて検討を行ったが、エネルギーや運動量にも着目して研究を進める必要がある。
- 2) 3質点系モデルによる解析、および個別要素法と有限要素法の結合法による解析ともに任意の落石条件や砂の性状に対するパラメータ決定方法を確立する必要がある。
- 3) 実験で確認された伝達衝撃力の振動は、3質点系モデルによる解析および個別要素法と有限要素法の結合法による解析ともに表現できなかった。これは実験時に支点部が弾性的に挙動した影響の可能性も有り、今後の研究で明らかにしたい。

### 参考文献

- 1) 金沢大学工学部土木工学科構造力学研究室：落石実験報告（I）防護覆い上への落石による衝撃力の推定に関する研究、1984年1月
- 2) 米田義弘、鷲田修三、古賀泰之、松葉美晴、佐藤 彰：落石覆工に作用する落石衝撃力に関する重錘落下実験、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、pp.161-166、1993年6月
- 3) 佐藤 京、佐藤昌志、松岡健一、西 弘明：敷砂材の物理特性が緩衝性能に及ぼす影響、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集I-B、pp.1044-1045、1995年9月
- 4) 岸 徳光、中野 修、松岡健一、西 弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1587-1597、1993年3月

- 5) 藤井智弘：プレキャストPC集成構造物における接合部の力学特性の評価とその応用に関する研究，金沢大学学位論文，1991年1月
- 6) 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法－落石覆工の設計法－資料集，pp113-121，1995年4月
- 7) 榎谷 浩，梶川康男，中田吉彦，八町禎彦：個別要素法と個別要素法の結合法による落石衝突解析について，構造工学における数値解析シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，第18巻，pp. 17-20，1994年7月
- 8) 吉田 博，榎谷 浩，今井和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝撃特性に関する解析，土木学会論文集，No. 392/I-9，pp. 297-306，1988年4月
- 9) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月
- 10) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1985年10月
- 11) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，pp. 187-189，1994年1月