

衝撃を受けた砂層の一実験について

最上 幸夫*・阪本 紀博*

An Experiment on the Sand Layer under Impulsive Loading

Sachio MOGAMI and Michihiro SAKAMOTO

Abstract

Many studies have been made on the earthquake response of structures on the soil. But many problems are still reserved about the effects of impulsive loading on the soil, assuming the seismic actions as a kind of impulsive ones, i. e., dynamic properties of soil to impulsive phenomena are not fully declared. So we carried out an experiment on the sand layer under impulsive loading and measured maximum accelerations in three places of the sand layer and the stabilities of concrete blocks on the surface of sand. Some experimental results and their conceptions are reported in this paper.

1. 緒言

地盤上に設置された構造物の地震入力に対するレスポンスについては、これまでかなり多くの研究が行なわれているが、地震の作用を一種の衝撃現象とみなすとき、このような衝撃作用が地盤にどのような影響を与えるものであるかについては、いまなお多くの検討すべき点が残されているものと考えられる。すなわち、衝撃現象に対する土の動力学的性質に関しては、種々研究が進められているが、なお不明なことが多く、発展途上の段階にあり、今後さらに引き続いて研究すべき重要な課題の一つであると考えられる。このような見地から本文においては、砂層に衝撃を加えたとき、砂層中に生ずる加速度を小型加速度計によって測定し、一方また砂層表面にコンクリートブロックを載荷して、衝撃時の転倒に対する安定性を実験的に検討してみた。以下今回行った室内実験の結果とその考察について述べる。

2. 実験の概要

実験装置の概要は、Fig. 1 に示すとおりで、重さ30.8kgの円筒形重錘（直径10cm、長さ30cm）を長さ80.5cm、直径3mmのワイヤロープを固定点からつるし、水平距離 $H=15, 20, 25, 30, 35$ および40cmの6種に変化させて衝撃量の大きさを変化させ

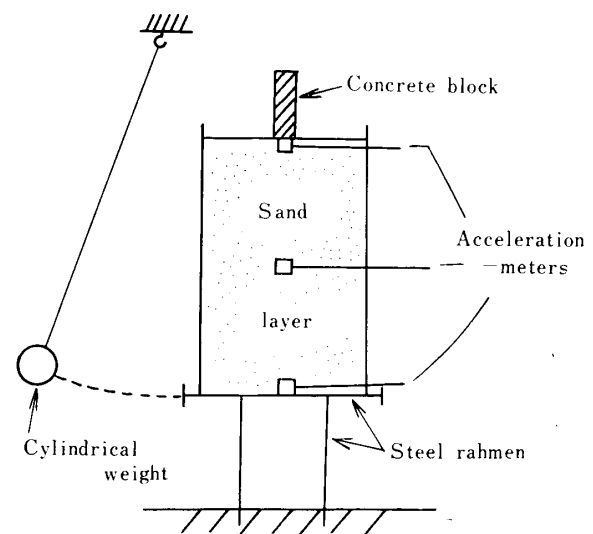


Fig. 1 Experimental apparatus

た。砂層としては北九州市海浜で採取された海砂を自然乾燥状態で用い、これを内容積 $24.5 \times 44 \times 50$ cmの木製わく内に一層16cmごとに重さ1.5kgの突き棒を3cm高さから1箇所20回落下させて突き固め、3層（全層厚48cm）として砂層を作成した。この砂層はFig. 1のごとく、鋼製のラーメン構造によって支持され、ラーメン柱頭の一端に衝撃量 I が作用するようになっている。この構造の奥行は45cm、ラーメンのはり部分は厚さ4mm、柱部分は厚さ3mmの鋼板を用い、柱は15cm深さを基礎コンクリート中に埋め込んだ。はりの長さは40.2cm、柱間隔=20cm、柱高=28cm

*土木工学教室

である。

この砂層の重心軸上底部より、16, 32, 48cmの位置にBA型小型加速度計（新興通信製、最底部は10Gその他は5G容量のもの）を埋め込み、リード線によって歪測定器を経てラピコーダーに接続して加速度記録をとった。一方砂層表面に幅2cm、奥行45cm（模型奥行と同じ）、高さを2.5cmごとに変えたコンクリートブロックを直立させ、衝撃Iを一定としたとき、その衝撃に対してブロックが転倒する高さを実験的に求めてみた。同一状態の実験を12回実施し、一応その平均値によって実験結果を整理した。かくして測定された加速度記録から最大加速度値を求め、近似計算法による解析に適用して種々検討を行ない、若干の考察を試みた。

3. 実験結果とその考察

実験結果については、Table 2の()内に計算値と対比して示されているので、以下本実験の場合について近似的な解析を行なうと、つぎのとおりである。まず鋼製ラーメンの柱頭変位ならびに最大加速度はつぎのようにして近似的に求められる。鋼製ラーメンは一層の固定脚ラーメンであるから、これを近似的に一自由度の振動系とみなせば、その水平自由振動の方程式は周知のごとく、次式で表わされる。

$$M\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

ここに、 x ：ラーメン柱頭の水平変位、 M ：ラーメン柱頭の集中質量で、一般に載荷質量と柱上半部以上の質量の和である。 k ：相当バネ常数で、 $k=24EI_0/l^3$ で与えられる。ただし、 EI_0 ：片側柱の曲げ剛性、 l ：柱高。

したがって式(1)の一般解は次式で与えられる。

$$x = A \cos nt + B \sin nt \quad (2)$$

ここに、 A, B は任意常数である。

$$\text{また } n = \sqrt{k/M} \quad (3)$$

$= 0$ で $x=0$ とすれば、 $A=0$ となるから、

$$x = B \cos nt \quad (4)$$

$$\text{したがって、} \dot{x} = -Bn \sin nt \quad (5)$$

衝撃量Iは運動量の元をもつから、この系の最大運動量と近似的に等置すれば、

$$I = MBn, \quad B = I/(M \cdot n)$$

したがって、

$$x = I/(M \cdot n) \cdot \sin nt \quad (6)$$

それゆえ、

$$\left. \begin{aligned} |x_{max}| &= I/(M \cdot n) \\ |\dot{x}_{max}| &= I \cdot n/M \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。以上ではラーメンの柱頭の変位や加速度を近似的に求めるために、便宜上ラーメン上の砂層を集中質量とみなして取り扱ったが、実際には砂層も一種の弾性体と考えられるので、砂層内部の振動状態をしらべるために、砂層は近似的に水平せん断振動をするものと仮定すれば、水平せん断振動の方程式は次式で表わされる。

$$k'AG \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - bK_h u - \frac{wA}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

ここに、 k' ：断面形により決まる定数で矩形断面では $\frac{1}{3}$ である。 A ：砂層の断面積、 G ：砂層のせん断弾性係数、 u ：砂層の水平変位、 b ：砂層の奥行幅、 K_h ：砂層の水平方向の地盤係数、 w ：砂の単位体積重量、 g ：重力の加速度、 z ：砂層底部の重心位置を座標点にとり、鉛直上方へ採った座標、 t ：時間。式(8)の定常振動（円振動数 ω ）に対する解は、

$bK_h > wA\omega^2/g$ に対しては、次式で与えられる。

$$u = (C \cosh \beta z + D \sinh \beta z) \cos \omega t = U(z) \cos \omega t \quad (9)$$

$$\text{ここに、} \beta^2 = (bK_h - wA\omega^2/g)/(k'AG) \quad (10)$$

C, D は任意常数。

C, D を決める境界条件として、式(7)を近似的に採用し、

$$\left. \begin{aligned} z=0: \quad k'AG \frac{\partial U}{\partial z} &= In \\ z=h: \quad \frac{\partial U}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とする。ここに、 h ：砂層の全高。

式(11)を用いると、砂層の水平変位は次式で与えられる。

$$u = \frac{In}{k'AG\beta} (\coth \beta h \cdot \cosh \beta z - \sinh \beta z) \cos \omega t \quad (12)$$

したがって、

$$|\ddot{u}_{max}| = \frac{In\omega^2}{k'AG\beta} (\coth \beta h \cdot \cosh \beta z - \sinh \beta z) \quad (13)$$

ところが砂層中の加速度記録をしらべてみると、かなり複雑な非線型特性を示しており、周期一定値を示していないので、砂層の固有振動数を簡単に求めることは容易ではない。このような加速度記録の一例をFig.

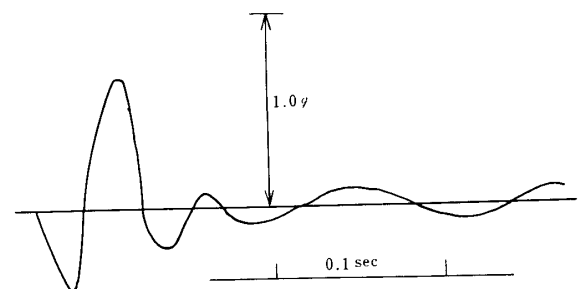


Fig. 2 An example of acceleration record

2に示す。そこで式(13)を用いて最大加速度値を求める場合、 ω の値をいかに採るかにについては、今後さらに検討の余地があるものと考えられるが、ここでは便宜上加速度記録の中で最大加速度値を示した個所の周期を記録から直接求め、これを固有周期とみなして、これより ω^2 の値を決め、これらの値を用いて式(13)によって最大加速度値を計算してみた。加速度記録より求

めた ω^2 の値を示すと、Table 1のごとくなる。ただし、計算に用いた諸数値はつぎのごとくである。

$$\left[\begin{array}{l} k' = 2\%, A = 25.5\text{cm}^2, G = 54.9\text{kg/cm}^2, \\ K_h = 2.56\text{kg/cm}^3 \end{array} \right]$$

また Table 1 の ω^2 の値を用い、式(13)によって計算した最大加速度値と実測値 () との対比を Table 2 に示す。

Table 1 Values ω^2 in each experiment

I \ z	0.0549	0.0732	0.0914	0.1098	0.1280	0.1464
z=16cm	21,100	20,650	20,150	19,650	19,200	18,700
z=32cm	19,700	19,400	19,150	18,150	18,700	18,500
z=48cm	19,500	19,200	19,000	19,000	18,600	18,400

Unit of I : $\text{kg} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^{-1}$

Table 2 Comparison of calculated values of $|\dot{U}_{max}|$ with measured ones

I \ z	0.0549	0.0732	0.0914	0.1098	0.1280	0.1464
z=16cm	0.909 (0.904)	1,160 (1,068)	1,376 (1,325)	1,574 (1,503)	1,749 (1,768)	1,906 (1,856)
z=32cm	0.526 (0.532)	0.678 (0.663)	0.821 (0.835)	0.956 (1,012)	1,054 (1,036)	1,218 (1,205)
z=48cm	0.433 (0.454)	0.556 (0.602)	0.681 (0.701)	0.789 (0.758)	0.904 (0.827)	1,016 (1,024)

Note : unit.....g, () : Mean values of each 12 specimens

Table 1を参照すると、衝撃点(砂層底部)から砂層上部へ遠ざかるにつれて固有周期は次第に伸びていく傾向が認められ、また衝撃量が大きくなるほど周期が伸びていく傾向が目される。このような傾向からみると、砂層の振動特性は明らかに非線型特性を示しているから、より厳密な取り扱いをするためには、非線型要素を導入する必要があるものと考えられ、今後の研究課題とすべきであろう。Table 2を参照すると、計算値と実測値はきわめて良い一致を示しており、本実験の場合に関するかぎりでは、式(13)を用いた近似計算式はかなり妥当な結果を与えていることがわかる。しかし式(13)を用いる場合の ω^2 の値は実験から求めたものであるから、実際に式(13)を利用するためには、ある程度固有円振動数 ω の値を理論的に推定することが必要である。そこで ω の近似値をうるための方法としては、式(8)に対して、つぎの境界条件を採用する。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} z=0 : k'AG \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\mu W}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ z=h : \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \end{array} \right\} \quad (14)$$

ここに、 $\mu = \tan \phi$ で、 ϕ は砂層の動的内部摩擦角を表

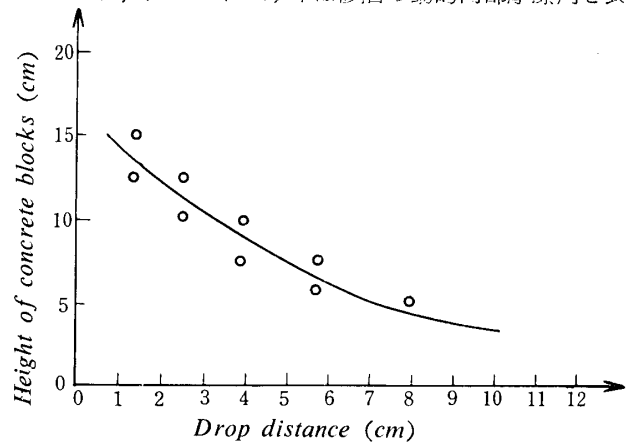


Fig. 3 Stability curve of concrete blocks

わし、一般に振動加速度が大となるほど、 μ の値は低下するものと考えられる。しかし現段階においては μ の値をいかに採るべきかについては不明であり、今後の検討に待たねばならないが、本実験の場合については、 $\mu=0.45$ と仮定すると、 ω の値がほぼ実験値の範囲の値となることがわかった。しかし上述のように砂層の衝撃に対する振動特性は非線型であるから、その厳密な取り扱いについては、今後さらに検討を進めな

ければならない。

つぎに砂層表面上に設置したコンクリートブロックの衝撃による転倒に対する安定性の実験結果からブロックの安定曲線を示すと、Fig.3 のような曲線が得られた。このような実験結果から求めた転倒加速度と式(13)によって計算から求めた最大加速度ならびに安定度(=転倒加速度/計算最大加速度)を示すと、

Table 3 のごとくである。

Table 3 Comparison of experimental accelerations with calculated ones and safety factors

I	Experimental accelerations	Calculated accelerations	Safety factors
0.00335	0.143g	0.029g	4.93
0.00621	0.174g	0.053g	3.30
0.00959	0.223g	0.081g	2.76
0.01386	0.308g	0.118g	2.63
0.01912	0.400g	0.162g	2.48
0.02533	0.572g	0.215g	2.66

Table 3 を参照すると、安定度はきわめて衝撃量の小さい範囲では、かなり大きくなっているが、この付近を除けば、大体2.40~2.80程度の範囲内にあるようである。すなわち、砂層に単に一回の衝撃を加えた場合のコンクリートブロックの転倒に対する安定度は定常振動による転倒加速度値の2.80倍程度の加速度で始めて転倒するということが実験的に認められた。

4. 結 言

以上今回行った実験結果から得られた主な結論をまとめると、およそつぎのとおりである。

- (1) 砂層に衝撃を加えたとき、砂層中に生ずる減衰振動の加速度記録はかなり複雑な非線型振動の特性を示し、その最大加速度値の推定は単に普通の線型振動論によっては十分な説明はできない要素を含んでいる。すなわち、衝撃点に近い砂層の底部から砂層表面へ向かって次第に固有周期が長くなり、また衝

撃量が大きくなるにしたがって、わずかではあるが、周期が長くなる傾向が認められた。このことは水平地盤係数、せん断弾性係数および減衰係数などが複雑な非線型特性をもつものと考えられ、今後さらに検討を進める必要がある問題であろう。しかし本実験の範囲内では一応近似的に線型的取り扱いも可能なようである。

- (2) 砂層表面上に設置したコンクリートブロックの衝撃による転倒に対する安定性については、衝撃が単に一回作用する場合には、定常振動による転倒加速度値のほぼ2.4~2.8倍程度の加速度値で始めて転倒ということが本実験の範囲内で認められた。しかしながらまだ実験数も少ないので確定的な結論をだすまでには、今後さらに引き続いて実験を行なう必要があり、また衝撃の繰り返し回数や衝撃周期などの影響についても実験的に検討を進めていく考えである。終りに本実験に終始熱心に協力された橋本宏君に謝意を表わす次第である。

(昭和43年11月6日受理)