

砂地盤を伝わる応力波による物体の跳躍現象

Jumping phenomenon on a sandy ground due to stress wave

高田直俊¹, 藤間和貴², 園田恵一郎³, 小林治俊¹

Naotoshi Takada, Kazutaka Tohma, Keiichiro Sonoda and Harutoshi Kobayashi

¹大阪市立大学大学院工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程 (現大阪府土木部)

³大阪工業大学八幡工学実験場 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一の谷4)

キーワード: 衝撃的地震動、跳躍現象、応力波、水中線爆、砂地盤、減衰

(Vertical impulse, Jumping phenomenon, Stress wave, Wire explosion, Sandy ground, Damping)

1. 研究目的

1995年1月に兵庫県南部地震が発生し、土木構造物に甚大な被害をもたらした。入手された地震計の記録波を用いて多くの研究者が破壊した高架橋や地下構造物のモデルに対する地震応答解析を行った結果、地盤動の鉛直成分の影響はあまりなく、水平成分が破壊の主因であるとの見解が受け入れられるようになっている。

しかし、被害を受けた構造物の中には従来の地震では見られなかった、衝撃的な鉛直力によって破壊・損傷を受けたと考えられる構造物が多数みられた。さらに、被災者の証言の中で、「ドンと突き上げられた」などの体験談に裏付けられており、鉛直方向の衝撃的な力が働いたのではないかと考えられる。このような背景の下、著者らは「兵庫県南部地震において観察された破壊現象は衝撃的鉛直動によるものである」という仮説を検証し、真相を解明するため、モルタル柱、金属パイプ柱の圧壊・座屈挙動、門傘の跳躍現象などの実験、数値解析で鉛直衝撃動の研究を行ってきた[1~3]。

本報告では、物体の跳躍現象を模型実験で再現し、地震時に地盤から構造物に入った鉛直衝撃圧について検証する。これまでの跳躍実験[3]では構造物に衝撃圧を直接与えたものであったが、地震波は地中から現れるため、地震で鉛直動が存在したことを示唆するには、地盤を考慮した研究が必要である。衝撃的鉛直動は非常に高周波で地盤中での減衰が大きいと一般的に考えられているが、これについての研究は未だ行われていない。ここでは水中線爆による衝撃圧を地震の鉛直衝撃動と見立て、それを砂柱底面に与え、砂柱上面に置いた物体の跳躍量、地盤減

衰、衝撃圧を定量的に求め、地震時に発生する地表面の岩石、墓石や門傘などにみられる物体の跳躍現象を地盤条件を含めて調べるのを目的とする。

2. 跳躍実験

(1) 実験概要

図-1に実験装置を示す。実験装置は衝撃発生部と内径190mmの砂柱円筒・観測室からなる。衝撃

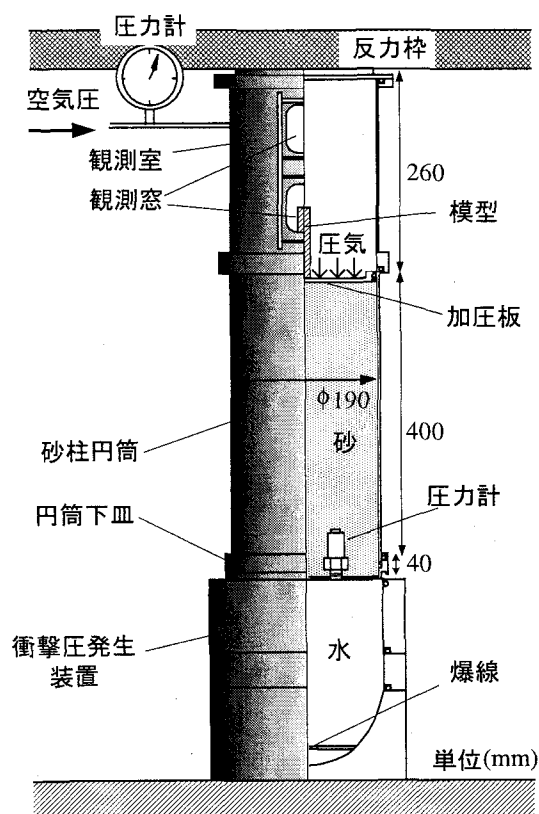


図-1 実験装置

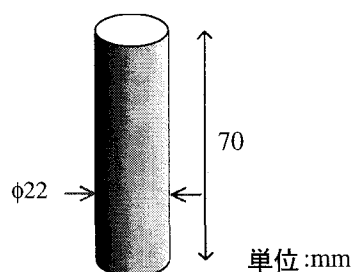


図-2 模型 (材質：ジュラルミン)

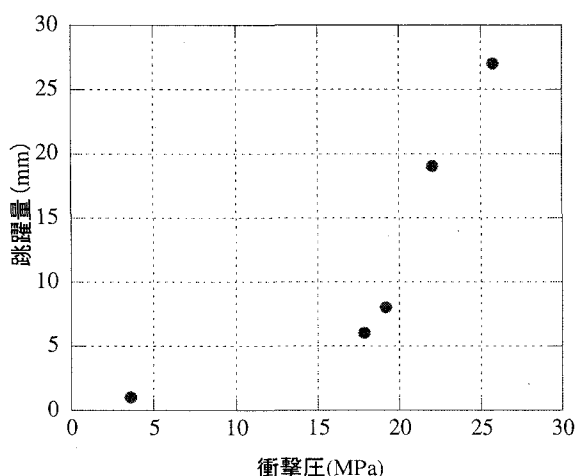


図-3 跳躍量と衝撃圧 (载荷圧 0.2MPa)

圧発生部は放物面を持つ厚い鋼板で、水を満たした放物面の焦点においた幅 2 mm、長さ 2 cm のアルミ箔にコンデンサーから高圧電流を流して爆発させ、その圧力を砂柱円筒の底板に受けて砂柱 (乾燥豊浦砂 $D_r = 95\%$ で作製) の中に応力波を発生させる [1]。砂柱上面に模型を置いて応力波による挙動を調べる。砂柱上面は加圧板を置いて、その上の観測室内の空気圧によって砂地盤に载荷圧を加えることができる。計測は観測室内の物体の跳躍をビデオカメラで測るほか、砂柱内の加速度、底板 (円筒下皿) に加わる衝撃圧を測定した。観測室空気圧、爆線に与える電気エネルギーなどを変えた実験を行い、跳躍量、砂中を伝わる圧力波の波速、応力低減率などを求めた。

(2) 物体の跳躍

図-2 に跳躍物体の模型を示す。模型を圧力室内の加圧板の上に置き、衝撃圧を与えると跳躍するので、跳躍量をビデオカメラの記録から求めた。

図-3 に衝撃圧と跳躍量の関係を示す。衝撃圧は放電容量とコンデンサ容量で変化を与え、衝撃圧の計測は円筒下皿に取り付けた圧力計で行った。衝撃圧が大きいほど、跳躍量が大きい。

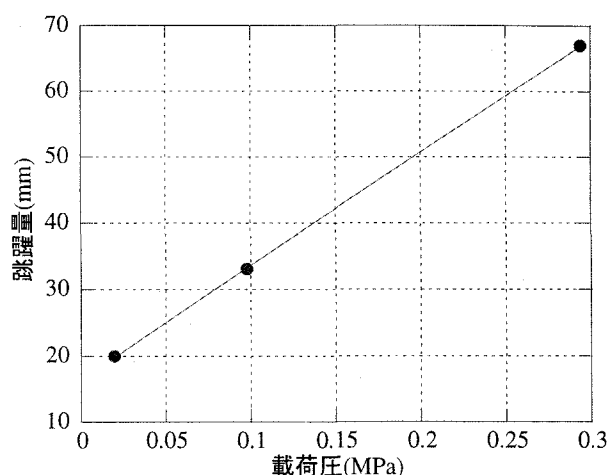


図-4 载荷圧と跳躍量 (電気容量 10 μ F、電圧 7 kV)

表-1 応力履歴と跳躍量

载荷圧 (MPa)	跳躍量 (mm)	備考
0.1	20	正規圧密地盤
0.4→0.1	63	過圧密地盤

図-4 に観測室内の空気圧による载荷圧と跳躍量の関係を示す。载荷圧が大きいほど跳躍量が大きい。これは载荷圧が大きいほど、砂柱の変形係数が増して衝撃を伝えやすくなることを示唆する。表-1 に载荷条件と跳躍量の違いの関係を示す。正規圧密は作製した砂柱に 0.1 MPa の上載圧をかけた状態をいい、過圧密地盤は 0.4 MPa の载荷圧を 1 分間かけた後、0.1 MPa に戻した状態をいう。過圧密状態の地盤は砂が締まることにより衝撃圧が伝わりやすいことを示す。ただし、両者の密度の違いはほとんどない。

(3) 重ねた物体の跳躍

重ねた物体がどのように跳躍するかを調べた。これは、地震時に墓石や石碑の上の石だけが飛び、下の石はそのままであったことを再現することを目的とする。数値解析によると、重ねた物体に入力される衝撃圧が高周波であれば、上の物体に入った応力波が上端で反射したのち後退して下端に達したときに下の物体を打って自身が跳躍する。低周波では両物体が同時に跳躍することがわかっている。

図-5 に模型の構成を示す。写真-1 に実験中の跳躍の様子を示す。跳躍中の写真を見ると、2 つの物体の間に隙間が開いていることがわかる。この隙間が起こる現象は上述の上段物体内での応力波の反射によるものと考えられる。上の物体を塩化ビニル製

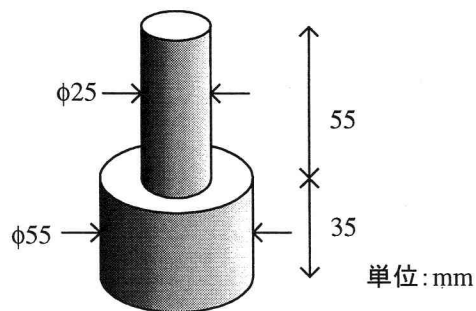


図-5 重ねた物体 (材質: ジュラルミン)

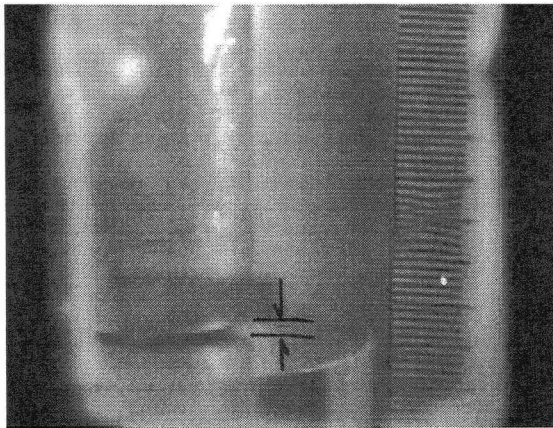


写真-1 重ねた物体の跳躍の様子

のものに変えて実験を行い、同様に2つの跳躍物の間に隙間が開いたが、上段物体の長さが制限されたことから材質の違い（波速の違い）による跳躍量の違いまでは捉えることができなかった。

3. 応力波の波速と減衰率

(1) 実験概要

地盤面においた物体の跳躍実験を数値解析するために必要な応力波が地盤中を伝播するときの応力波の波速と応力減衰率を求める実験を行った。跳躍実験と同じ実験装置と地盤構成のもとに、図-6のように、砂中に加速度計3個を設置し、加速度から得られる粒子速度と波速から算出される応力を求め、応力波の距離による減衰を求めた。加速度計は直径6mm×高さ6mm、質量0.6gで、みかけの密度を砂地盤と同じで、また砂中で位置が変わらないように厚さ2mm、直径15mmの亚克力板を底面に貼り付けている。跳躍実験と同じように、上載圧の影響をみるため、観測室内の空気圧を変えて載荷圧を変化させた実験を行う。応力履歴にも着目する。

(2) 波速と低減率

図-7に加速度と圧力の時刻歴を示す。圧力計と加速度計は記録計が異なるので、時刻軸の原点が異

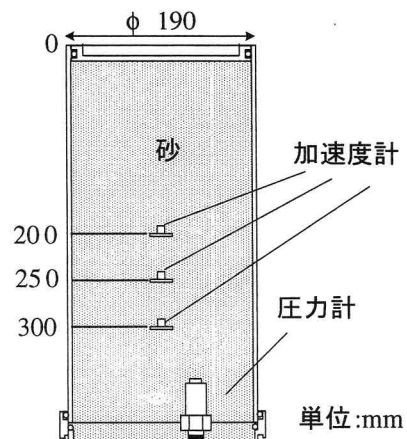


図-6 実験の構成

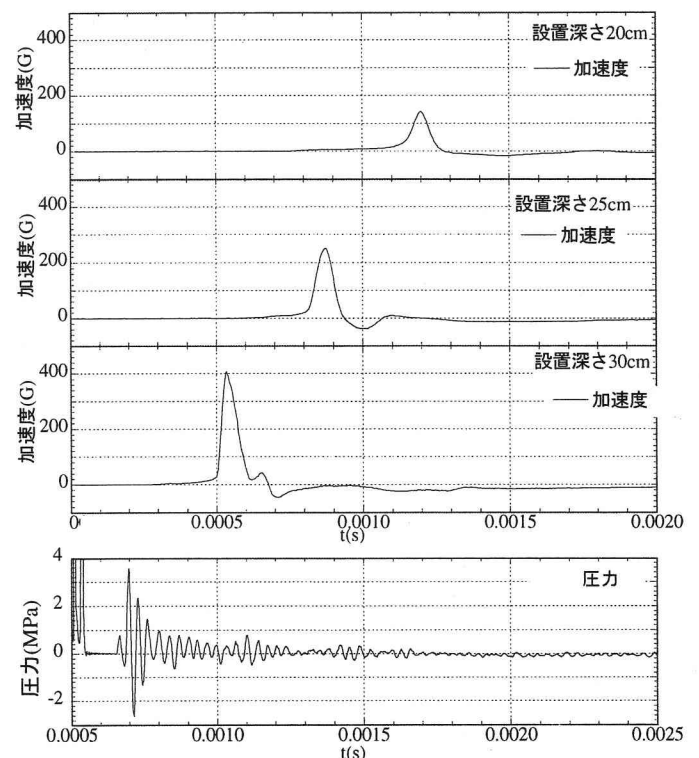


図-7 加速度と圧力の時刻歴

なる。圧力計の時間 $t = 0.0005$ (s) 付近の出力値は、衝撃発生装置の電氣的ノイズである。

図-8に載荷圧と波速の関係を示す。載荷圧が大きいほど波速が速い。応力波の波速は深さを変えて設置した加速度計から得られる加速度ピークの時間差で加速度計間の距離を割って求めた。波速に及ぼす衝撃圧の強さの影響はほとんど認められなかった。

次に、応力波は砂柱を一次的に伝わりと仮定すると、応力波の波速 c 、砂の粒子速度 v 、地盤密度 ρ から応力波による砂地盤の応力 σ が次式より算出できる。

$$\sigma = \rho c v$$

なお、砂の粒子速度は測定加速度を積分して求めた（図-9）。

応力の距離低減を定量的にみるため、応力低減率として次の式を定義した。この単位は 1/cm である。

$$(\text{応力低減率}) = [(\text{ある位置の応力}) - (\text{後方の応力})] / (\text{ある位置の応力}) / (\text{距離})$$

図-10 に応力低減率と载荷圧の関係を示す。载荷圧が大きいときは応力低減率が小さくなる傾向を示す。表-2 に载荷圧の違いと過圧密の効果の比較を示す。過圧密地盤は応力低減率が低く、跳躍量が過圧密地盤で大きくなる表-1 の結果と整合する。

4. まとめ

砂地盤上の物体が砂中を伝わる衝撃的な応力波で跳躍する現象を室内実験で再現することができた。

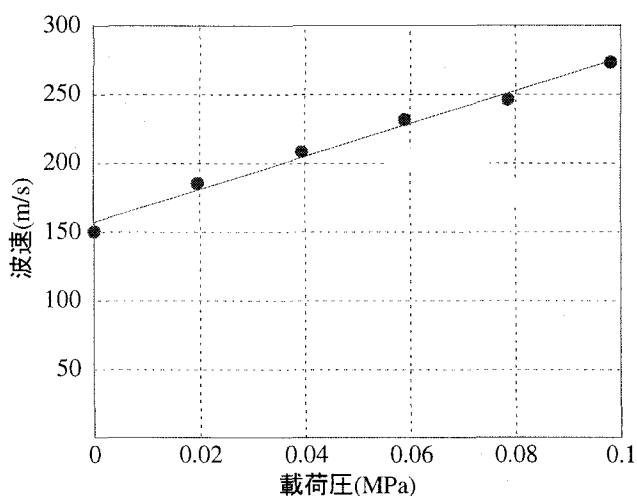


図-8 応力波の波速と载荷圧（30cm～20cm間）

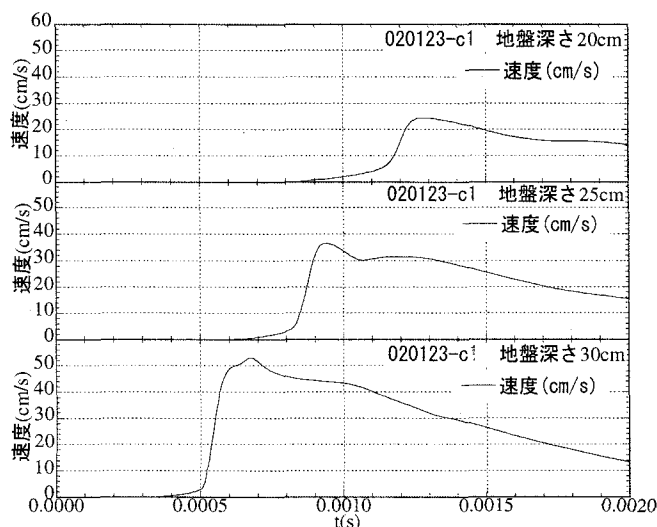


図-9 地盤の粒子速度の時刻履歴

また、やや不完全ではあるが、2 段重ねの物体の上段がより高く飛ぶことが確認できた。波速と応力波の減衰には地盤の応力レベルが大きく関わり、さらに先行圧を受けて過圧密状態にある地盤は応力波の減衰が少ない。ただし、この実験は単純化した条件での再現実験である一方、実際の地盤状態は多種多様であるので物体の跳躍を生じる地盤条件が地震動の特性との関係でどういうものかは今後の課題である。

参考文献

- [1] 園田恵一郎、高田直俊、他：水中線爆装置による高架橋 R C 橋脚のモデル衝撃破壊実験、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、1999
- [2] 園田恵一郎、高田直俊、他：水中線爆装置による衝撃破壊実験に関するシミュレーション解析、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、1999
- [3] 園田恵一郎、高田直俊、他：兵庫県南部地震での物体の跳躍現象から見た衝撃的地震動の検証、第 5 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、2000

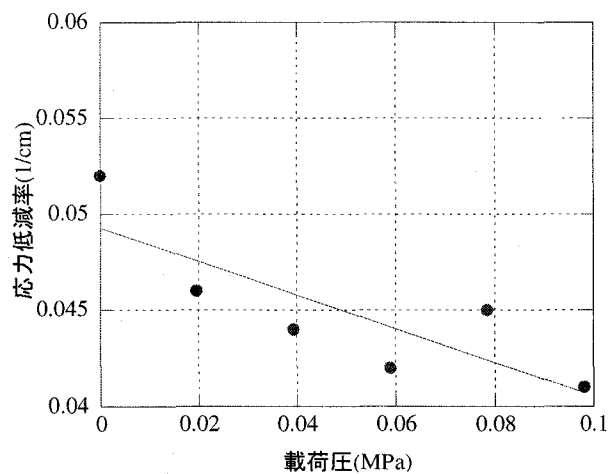


図-10 応力低減率と载荷圧（30cm～20cm間）

表-2 応力履歴と応力低減率

载荷条件 (MPa)	応力低減率	備考
0	0.052	正規圧密地盤
0.1	0.042	
0.1→0	0.026	過圧密地盤