

## 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

VERIFICATION OF IMPULSIVE SEISMIC FORCES AT HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE  
FROM JUMPING PHENOMENA OF A BODY

園田恵一郎\*, 高田直俊\*, 小林治俊\*, 小林康之\*\*, 高橋孝二\*\*, 管野秀人\*\*,  
横地尚子\*, 中原広樹\*

Keiichiro Sonoda, Naotoshi Takada, Harutoshi Kobayashi, Yasuyuki Kobayashi, Kouji Takahashi, Hideto Kanno,  
Shouko Yokochi and Hiroki Nakahara

\* 大阪市立大学工学部土木工学科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

\*\* 西松建設(株) 愛川衝撃振動研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津字桜台 4054)

キーワード：衝撃的地震動，物体の跳躍現象，同定問題

(Keywords: Impulsive seismic forces, Jump phenomenon, Inverse analysis)

### 1 研究の背景と目的

1995年1月17日の兵庫県南部地震において、六甲山の岩石の浮き上り、墓石の飛び跳ね、ピアノや家具の飛び跳ね、車両の跳び上りなどの物体の跳躍現象が数多く報告されている[1,2]。しかしながら、これらの現象は非常に局所的に発生していることに大きな特徴がある。たとえば、墓石の飛び跳ねを例にとっても、狭い墓地の中での同じ構造の墓石でも大きく飛び跳ねたものもあるが、まったくずれもなく倒れずに直立して残っているものもある。他の例でも同様に同じ構造と設置条件にあるにも係わらず飛び跳ねたものも飛び跳ねなかったものもあるという状況にある。これらの現象から、物体や構造体に導入された地震力はそれらの設置地盤との界面特性に大きく支配されることが推測される。

本研究の目的は、物体の飛び跳ね現象から地震時にその物体と地盤との界面に存在した入力特性を同定することにある。ここで取り上げた飛び跳ね現象は、写真1に示す門柱の門傘である。門傘は柱頭での4つのお椀状のコンクリートせん断キーにはめ込まれており、写真が示すようにこれらのせん断キーが残ったままで門傘が落下しており、門傘は一旦跳び上がり偏心して落下したものと推察できる。この門柱を取り上げた理由は、寸法が小さく実物大の実験が可能であること、ならびに構造が簡単で数値シミュレーションが容易であることにある。本門柱は2本あったが東側の門傘のみが落下しており、

門柱の取り付け部の舗装コンクリートは割れているが、特に大きな抜け出しは認められない(いずれも写真および現地調査による判定)。なお、西側の門傘は落下しておらず、また特に大きなずれも観察できない。本門柱の設置場所は神戸市東灘区本山北町であり、そこから西に約800mにある本山第2中学校に設置されていた地震計は上下、水平成分とも速度40kineで振り切れていたことを付記しておく。

実験は2段階に分けて行った。すなわち、実物とほぼ同じ形状・寸法の門柱を通常の施工法により数体製作し、第1段階として、本門柱供試体を振動台に載せ、兵庫県南部地震で最大加速度を記録した神戸海洋気象台での観測波(NS、

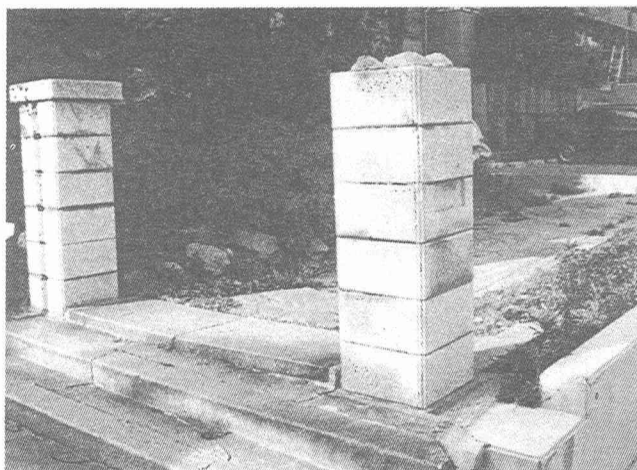


写真1 門柱の門傘の落下 (神戸市東灘区本山北町：犬飼保介氏撮影)

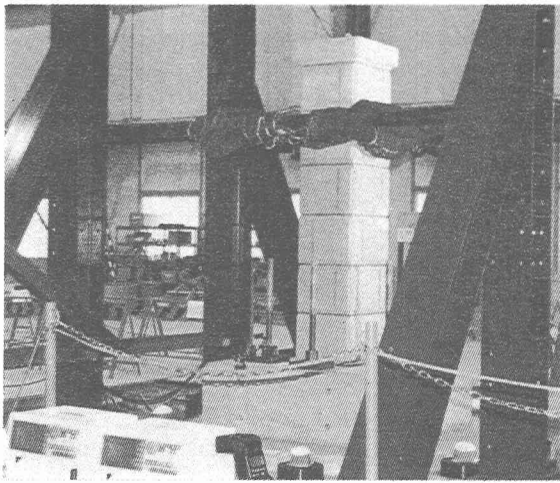


写真2 振動台上の供試体

EW および UD の 3 成分) を入力したときの門柱および門傘の応答を調べた。つぎに、第 2 段階として、同じ振動台の底面に飛翔体を衝突させて鉛直衝撃力を与えたときの門柱の応答および門傘の飛び跳ね性状を調べた。最後に、実験結果を数値シミュレーション結果と照合した後に、モデル化した鉛直衝撃力の特性と門傘の飛び跳ね量との関係を調べ、実物門傘が落下するための入力特性を検討した。

## 2 実物大門柱の衝撃および振動実験

### 2.1 門柱モデルの製作

写真 1 とほぼ同じと思われる門柱を新たに製作した。この門柱を写真 2 に示すが、市販のブロックを 6 段重ね、その上端に門傘を取り付けたものである。門柱の製作は、門柱の施工実績のある業者に委託し、コンクリートブロック塀

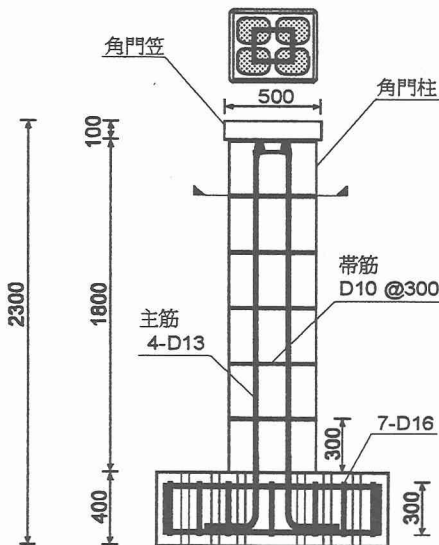


図1 門柱供試体と配筋図

設計基準・同解説[3]に従った通常の施工法により製作した(図 1 に構造と配筋図を示す)。門傘(約 50kg)の取り付けは、門柱の上端に突き出した鉄筋を包む 4 つのお椀状のコンクリートモルタルを打ち、その上に門傘を乗せたものである。また門柱の基礎は 1.2m×1.2m×0.4m のフーチングスラブをとおして振動台に固定されており、実物の門柱の基礎は地中に埋め込まれているが、本実験では門柱供試体底部に地震動を直接入力したときの応答問題として取り扱っている。

### 2.2 実験装置

実験は、西松建設(株)愛川衝撃・振動研究所が所有する振動・衝撃装置にて行った。本装置は振動実験と衝撃実験が行えるもので、振動装置部は通常の振動台と同じ機能を有し、地震計での記録波を入力した応答実験が行える。一方、衝撃装置部は振動台(約 15t)の底面に飛翔体(5.3t)を油圧により速度 0.1~10m/s で衝突させることによって与えるものである。衝撃力の大きさは、衝突速度の他に飛翔体と振動台の取付台底面の間に入れた介在物の特性にも支配されるが、本実験では介在物を何も用いなかった

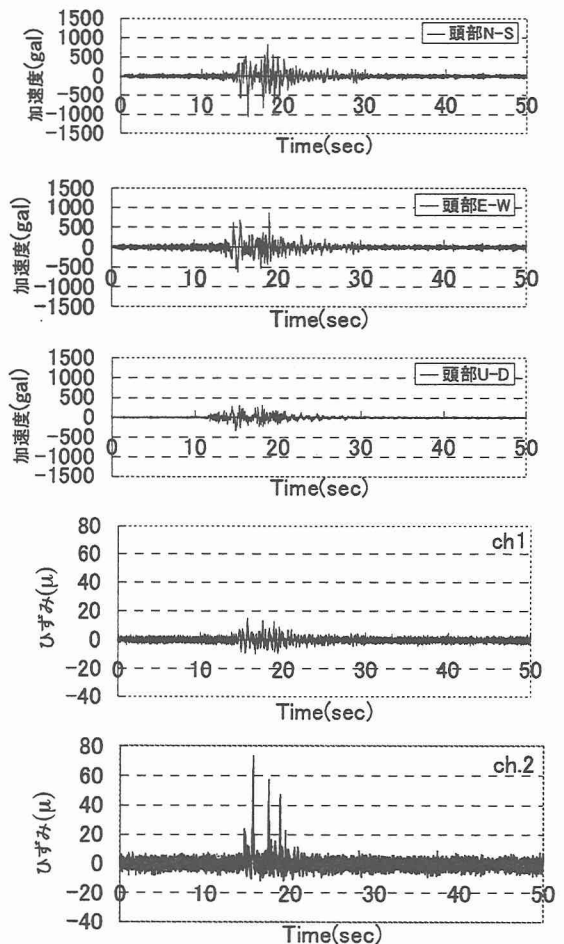


図2 門傘部の加速度および門柱下部の鉄筋ひずみの時刻歴応答

たので、振動台の最大速度は飛翔体の衝突速度の約 1/3 である。

### 2.3 計測装置

門柱の取り付け部の変位はレーザー変位計 (KEYENCE LB-300) により、遮断周波数が 915Hz、サンプリング周波数が 10kHz で測定した。また、門柱取り付け部および門傘の加速度はひずみ計型の加速度計 (東京測器 RA-200) また鉄筋のひずみは動ひずみ計にてサンプリング周波数 10kHz で測定した。一方、門傘の跳び上り量の計測は高速ビデオ (最大コマ数は 1 秒間に 4500) によった。

### 2.4 実験結果

#### (a) 振動実験

振動台での応答が神戸海洋気象台での観測波と同じになるように事前に調整した後に、加振実験を行った。図 2 には門傘部での加速度および門柱下部の鉄筋計ひずみ (ch1 は門柱下端から 36cm 上, ch2 は 72cm 上の位置) の時刻歴を示す。入力加速度の最大値が NS 成分で約 800gal であるのが、門傘部での最大応答加速度は 1100gal となっており、若干の増幅が見られるが、鉄筋計のひずみ (ch2) の最大値は  $70 \times 10^{-6}$  で大きな応力は生じておらず、また門傘の跳び上りやずれは一切認められず、門柱はほぼ剛体として運動している。神戸海洋気象台の観測波は兵庫県南部地震で観測された最大加速度 818gal を有していることより、本実験に用いた門柱の門傘部は兵庫県南部地震での観測地震波による振動応答としては跳び上ったり、落下することがないと思われる。

#### (b) 衝撃実験

衝撃実験は、飛翔体の衝突速度  $v_0$  を 1m/s, 2m/s および 3m/s と変えて行った。門傘の跳び上り量  $y$  と飛翔体の衝突速度  $v_0$  の関係を図 3 に示す。実験は同じ供試体に対して 2 回行った。最初の

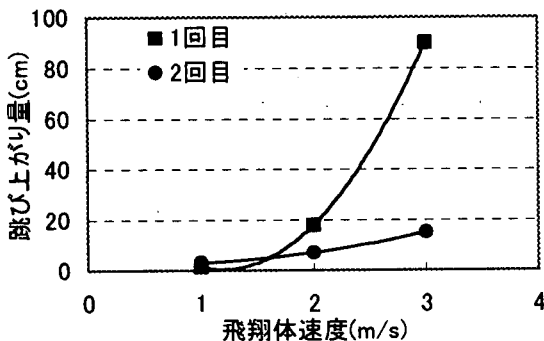
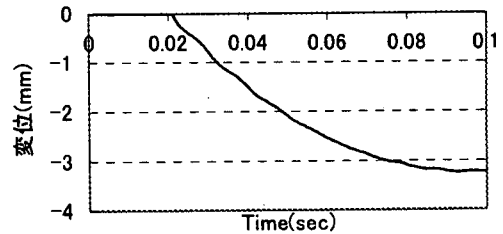
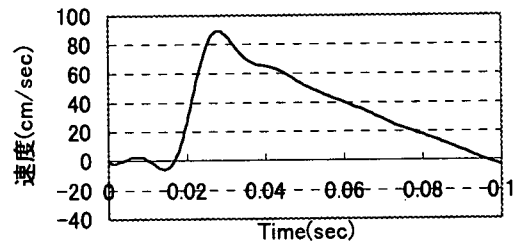


図 3 飛翔体の衝突速度と門傘の跳び上り量との関係

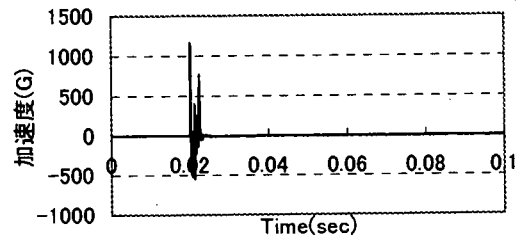
実験では、 $v_0 = 1\text{m/s}$  では  $y = 1.2\text{cm}$  であり、 $v_0 = 2\text{m/s}$  では  $y = 23\text{cm}$ 、 $v_0 = 3\text{m/s}$  では  $y = 90\text{cm}$  となっている。2 回目の実験で、 $v_0 = 1\text{m/s}$  では  $y$  は 1 回目より大きくなり、 $v_0 = 2, 3\text{m/s}$  では逆に 1 回目より  $y$  は小さくなっている。これは最初の実験では門傘の取り付け部のコンクリートモルタルせん断キーには某かの自然付着引張強度があったこと、ならびに  $v_0$  が大きい場合には、1 回目の実験で鉄筋は降伏し、最下段ブロック間の継ぎ目に空隙ができたことにより (実験終了後 1.0mm 程度のひび割れ幅を観測)、2 回目の実験ではこれが緩衝材として働いたものと推察できた。図 4 には、飛翔体の衝突速度 3m/s



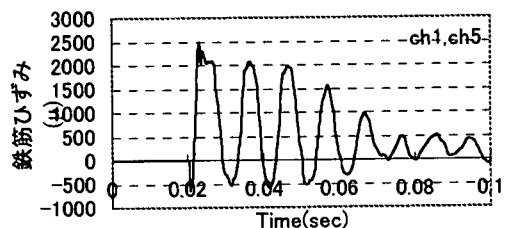
(a) 変位



(b) 速度



(c) 加速度



(d) 鉄筋計ひずみ (ch1 と ch5 の平均)

図 4 飛翔体速度  $v_0 = 3\text{m/s}$  時の取り付け部変位、速度、加速度、および門柱の鉄筋計ひずみ

の場合の取り付け部の変位，速度，加速度ならびに鉄筋計ひずみ（最下段断面の ch1 と ch5 の平均値）の応答を示している．ひずみ値に軸剛性を掛けたものが軸力を与えるが，コンクリートが寄与する圧縮軸剛性に比して鉄筋のみが抵抗する引張軸剛性はかなり小さいことより，引張りひずみが降伏ひずみを越えているが，軸引張力は軸圧縮力より小さい．また入力軸圧縮力は最初の波が最も大きく出ており，後続する波は門柱の縦振動によるものと推察される．

### 3 実験結果に対する数値解析

#### 3.1 数値解析モデル

図 1 には実験に用いた門柱供試体を示したが，フーチングの寸法は  $1.2\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.4\text{m}$  であり，その底部は高力ボルトにて振動台に固定されている．数値解析には剛体バネモデル (RSBM) を用い，フーチング，柱部の 6 個のブロックおよび門傘の計 8 個の剛体要素がバネとダッシュポットで連結されたモデルを用いた．軸剛性を表すバネ係数  $k$  は圧縮領域ではコンクリート断面と鉄筋断面の合成断面の弾性伸び剛性を要素間距離で割った値とし，引張領域では鉄筋断面のみが抵抗するとし，鉄筋はバイリニアの応力-ひずみ曲線で表される完全塑性体として取り扱った．なお，柱断面積  $A_c$  :  $0.18\text{m}^2$ ，コンクリートの弾性係数  $E_c$  :  $24 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$  (23.5GPa)，鉄筋断面積  $A_s$  :  $4\text{-D16} = 7.94\text{cm}^2$ ，鉄筋の弾性係数  $E_s$  :  $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$  (206GPa)，鉄筋の降伏強度  $\sigma_y$  :  $3000 \text{kgf/cm}^2$  (294MPa)，また，門傘と門柱上端の接触面積はせん断キーとしての 4 個のコンクリート突起の総面積である  $4 \times 0.14 \times 0.17 = 0.0952\text{m}^2$  とした．

減衰はひずみ速度に比例する形で与え，バネに並列するダッシュポットの定数  $c$  はつぎのよう

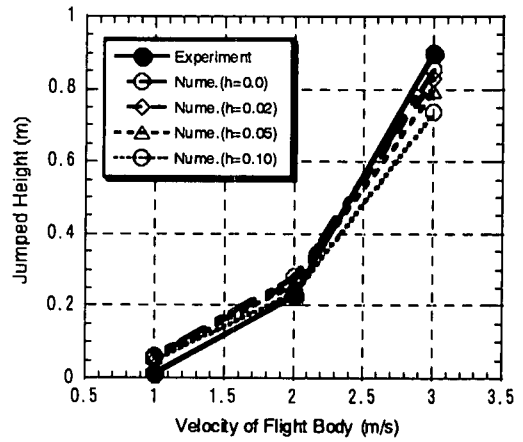


図 6 実験値と解析値の比較

に与えた．

$$c = 2h\sqrt{m_0k_0} \quad (1)$$

ここに， $m_0$ ， $k_0$ ：それぞれ門傘の質量および門傘と柱上端間の圧縮バネ係数， $h$ ：減衰係数であり，定数  $c$  は要素間の全バネに対して同一とした．

#### 3.2 応答解析結果

入力については，最初は実験での振動台でレーザー式変位計（応答周波数：1kHz）により計測した変位の時刻歴をフーチング底面に入力したが，得られた門傘の跳び上り量は実験値に比べて非常に小さな値となった．これより 1kHz 以上の高周波域の特性が結果に大きく影響することが分かったので，つぎに門柱下部の鉄筋計でのひずみゲージの計測値 (ch1 と ch5 の平均値；応答周波数は DC~20kHz，サンプリングタイムは 10kHz) に軸剛性（圧縮はコンクリートと鉄筋の合成断面として，引張は鉄筋断面のみ考慮）を掛けた軸方向力（図 5 にその時刻歴を示す）を入力として応答解析を行ったところ，図 6 に示す結果を得た．なお，図 5 の軸方向力（軸力）の時刻歴が示すように，最初に圧縮力が入った後に応力波は柱頭で反射し，再度柱下端で反射する応答を反復しながら減衰している．門傘は最初の圧縮波の到来によって跳び上っているが，入力が小さいとき ( $v_0 = 1\text{m/s}$ ) には門傘はわずかに跳び上った後に落下し，再度衝突して大きく跳び上る結果になった．しかしながら，実験では，門傘は最初に跳び上ると何らかの偏心により回転運動を起こし，元の状態よりずれてしまうので，図 6 は最初の跳び上り量の解析値のみを示している．また，実験での衝撃力は飛翔体の振動台底面への衝突によって与えているが，飛翔体の速度が小さいとき（入力が小さいとき）は解析値が実験値より大きく出て

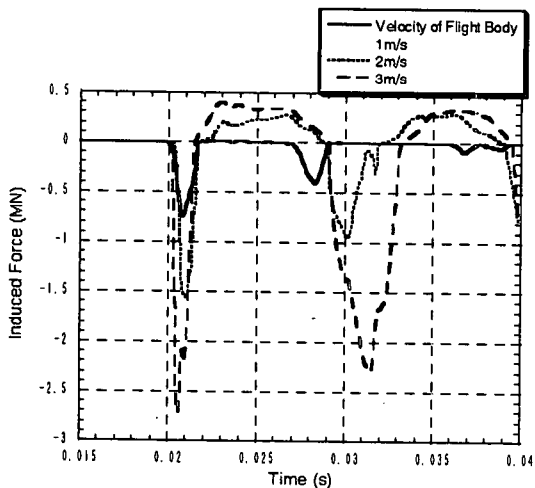


図 5 門柱下端への入力軸方向力の時刻歴

いる。この原因の一つは、門柱上端と門傘の間のせん断キーであるコンクリート突起の施工上、門傘と門柱の頭との間には某かの自然付着引張強度（接着力）が存在していると考えられるが、数値解析ではこの付着強度を無視していることによるものと思われる。一方、減衰係数の影響は門傘の跳び上り量にはさほど大きな影響を与えていないように思われる。

#### 4 衝撃力モデルによる数値シミュレーション

##### 4.1 衝撃入力モデル化

図6から分かるように、実物大門柱モデルの実験で得られた門傘部の飛び跳ね現象は、門柱の下部に埋め込まれた鉄筋計から読みとった軸方向力を入力とした数値解析によって十分説明できた。図5が示すように、門柱の底面から導入された軸圧力は柱頭で反射し、再度柱下端で反射し、減衰しながら反復している。門傘の跳び上りは最初の圧力波によって起っているの、門傘の最大跳び上り量に着目する限り、数値解析には最初の圧縮パルスのみを入力として考慮すればよいと思われる。なお図5において、軸力の時刻歴に引張部が発生しているが、これは門柱底部の鉄筋が引張られていることを意味しており、門柱底面での応力の反射により鉄筋の引張ひずみは大きく出ているが、門柱のコンクリート全断面が寄与する圧縮抵抗に比して鉄筋の引張抵抗が小さいことより、引張力としては大きな値にはなっていない。地震により構造物に導入された衝撃的な力が直接に測定された例はなく、その特性は不明であるが、物体の跳躍現象を支配する入力圧は、前述の門柱の実験を参照すれば、継続時間の短い（図5では1.6ms

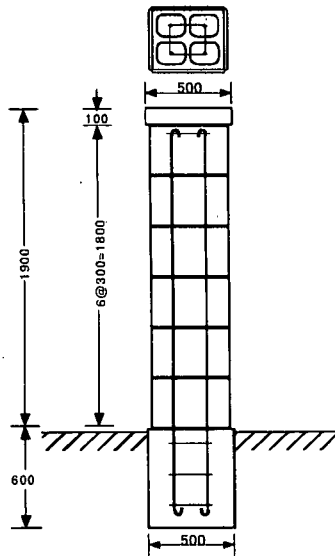


図7 数値シミュレーション用の門柱モデル

程度)パルス状のものでなければならぬと推察できる。

ところで、物体の衝突や爆破によって発生するパルス状の圧力  $p(t)$  は、武藤[4]によれば、以下のような表示式で与えられる。

$$p(t) = p_0 \frac{1}{K} e^{-2st} \sin st$$

$$K = e^{-2t_0} \sin t_0 \quad (2)$$

$$s = 2\pi / T_0$$

$$t_0 = \tan^{-1}(1/2)$$

ここに、 $p_0$ は最大圧力、 $T_0$ は圧力波の周期である。武藤は式(2)を爆心からの小距離にある物体への爆圧力の時間的分布として推奨している。式(2)による圧力と時間の関係においては、圧力の最大値は極く初期 ( $t = t_0/s$ ) に現れ、その後は減少し、 $t = T_0/2$ 以降はほとんど圧力は零になる。したがって、式(2)による圧力パルスの継続時間は  $T_0/2$  と見なすことができる。

つぎに、式(2)のようなパルス状の衝撃力による物体の跳躍や破壊現象の解明には、その力積の評価が大切である。式(2)による力積（ただし単位面積当たり）は、以下のように表される。

$$I_0 = \int_0^{T_0} p(t) dt = \frac{1}{10\pi} \cdot \frac{p_0 T_0}{K} (1 - e^{-4\pi}) \quad (3)$$

すなわち、式(3)より、門柱の底面での単位面積当たりの力積は  $p_0$  と  $T_0$  の積に比例していることが分かる。冒頭に述べた門傘が飛び跳ねた門柱の基礎工を調査していないので断定できないが、コンクリートブロック塀設計基準・同解説[3]に

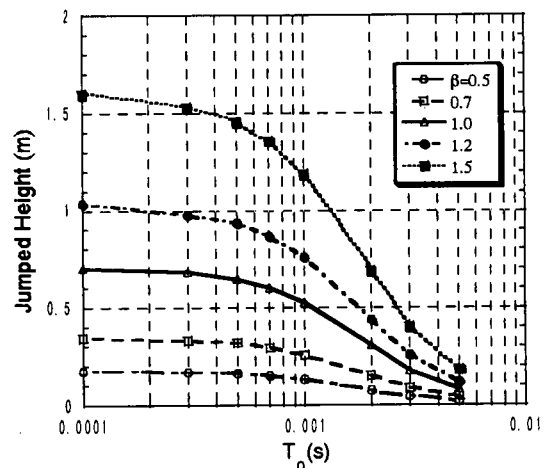


図8 一定の力積の下での圧力パルスの継続時間と跳び上り量との関係

基づくフーチング形式を参照し、根入れ深さを約 60cm として、図 7 のモデルを仮定して以下の検討を進める。

一般に、門柱のフーチング底部に入力された衝撃エネルギー  $E$  は、門柱の運動エネルギー  $E_m$ 、ひずみエネルギー  $E_s$  ならびに音や熱などによる逸散エネルギー  $E_d$  に変換される。すなわち、

$$E = E_m + E_s + E_d \quad (4)$$

入力圧の力積が同じであっても、その継続時間 ( $T_0/2$ ) が短いと、ひずみエネルギーに変換される率が大きくなり、逆に長いと、運動エネルギーに変換される率が大きくなると言える。

一方、門傘の跳び上り開始の時刻とフーチングの抜け出しの時刻が大きく異なり、陽的時間積分法による全過程の解析には長時間を必要とするので、これらの問題を分離して取り扱った。すなわち、門傘の跳び上り問題に対しては、フーチングの引き抜き抵抗を無視し、フーチング底面に式(2)の圧力を作用させたときの応答解析を行った。また、フーチングの抜け出し量の解析には、門柱全体を剛体として取り扱い、式(4)においてひずみエネルギー  $E_s$  および逸散エネルギー  $E_d$  を無視した解析を行った。紙数の関係上、ここでは前者についてのみ記し、後者は省略することにす。

さて、式(2)のパルス状の圧力により、図 7 の門柱モデルに対して剛体バネモデル（ただし減衰係数は零）を用いて数値解析を行った結果、一定の力積の下での入力圧の周期  $T_0$  と門傘の跳び上り量の関係が図 8 のように得られた。ここに、 $\beta$  は基準に選んだ力積値に対する導入した力積値の比である。基準力積値は、前節での実物大門柱実験で得られた入力圧の継続時間（約 0.0016s）を参照して、 $T_0 = 0.002s$  および  $p_0 = 100\text{kf/cm}^2$  (9.8Mpa) と仮定し、式(3)より

$$p_0 T_0 = 19.6, I_0 = 3.528\text{kN}\cdot\text{s/m}^2 \quad (5)$$

とした。すなわち、門柱のフーチング底面に導入した基準力積値 ( $\beta = 1$ ) は  $3.528 \times 0.5 \times 0.5 = 0.882\text{kN}\cdot\text{s}$  である。

図 8 から分かるように、同じ力積の入力の下では、パルス圧の継続時間  $T_0$  が短くなればなるだけ門傘の跳び上り量が増加しているが、 $T_0 \leq 0.0005s$  では、跳び上り量はほぼ一定になっている。また、 $T_0 \geq 0.003s$  の領域では、跳び上り量は非常に小さくなっている。すなわち、パルス圧の継続時間の非常に短い領域では、式(4)での

入力エネルギー  $E$  のほとんどがひずみエネルギー  $E_s$  に変換されるが、継続時間が長いと入力エネルギーのほとんどが運動エネルギー  $E_m$  に変換されたことが裏付けられる。

#### 4.2 門傘の落下から見た衝撃力特性の推定

兵庫県南部地震時に門傘（寸法：0.5m×0.5m×0.1m）が落下している事実より、せん断キーである突起高さ（数 cm）に回転運動を加味すれば、門傘は少なくとも 0.3m 以上は跳び上ったものと推定できる。もし、実物大門柱モデルの実験結果である図 3 および図 5 より入力を推定すれば、門傘が 0.3m 以上跳び上るには、飛翔体の速度が 2.1m/s 以上、すなわち入力軸圧縮力の最大値が 1.6MN（柱断面応力で 8.9MPa）以上、かつ圧力パルスの継続時間が 1.6ms であることが必要と言え。また、式(2)によるモデル入力によるシミュレーション解析では、門傘が 0.3m 以上跳び上るためには、フーチング底面に導入されたパルス状の圧力の力積値が  $\beta \geq 0.7$ 、すなわち  $0.882 \times 0.7 = 0.617\text{kN}\cdot\text{s}$  以上で、その継続時間 ( $T_0/2$ ) が 1.5ms 以下であると推定できる。

#### 5 まとめ

兵庫県南部地震で確認された門柱の門傘の落下事象（神戸市東灘区本山町本山北町）より、この門柱のフーチング底面に入射された圧力パルス特性を同定すれば、力積値は  $0.617\text{kN}\cdot\text{s}$ （単位面積当たり  $2.468\text{kN}\cdot\text{s/m}^2$ ）以上で、その継続時間が 1~2ms 以下という、通常の地震計の周波数帯域をはるかに越えた高周波成分の入力が存在した可能性を示唆できる。

#### 謝辞

本研究での実物大門柱の実験を行うに当たっては、西松建設（株）技術研究所・細井 武 所長ならびに阿世賀 宏 研究部長に大変お世話になったことをここに記し、感謝致す次第であります。

#### 参考文献

- [1] 園田恵一郎, 小林治俊, 永野圭, 兵庫県南部地震一初期上下動の証言について, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号, 1997
- [2] 嘴本 格, 他 (江川多喜雄編著), 地震学校, 星の環会, 1995
- [3] コンクリートブロック塀設計基準・同解説, 1989 年版
- [4] 武藤清, 構造物の動的解析 (耐震設計シリーズ 4), 丸善, 1966