

## (38) 地盤中に埋め込まれたスチール製ポールの 衝撃応答と荷重-変位関係の算定

IMPACT RESPONSE OF STEEL POLE BURIED IN SOIL AND DETERMINATION  
OF LOAD-DISPLACEMENT RELATIONSHIP

藤田壮裕\*, 河西良幸\*\*, 内田一義\*\*\*, 丹羽一邦\*\*\*\*

Morihiro Fujita, Yoshiyuki Kasai, Kazuyoshi Uchida, Kazukuni Niwa

\*前橋工科大学 大学院工学研究科建築学専攻 修士課程 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

\*\*工博 前橋工科大学教授 大学院工学研究科建築学専攻 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

\*\*\*工博 株式会社シーク建築研究所 (〒236-0004 横浜市金沢区福浦1-1-1 横浜金沢ハイテクセンターテクノコア6階)

\*\*\*\*株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島3丁目31番6号 大塚ビ4F)

キーワード: 衝撃, ポール, スチール, せん断波速度, 粘性地盤, 砂質地盤, エネルギー保存  
(impact, pole, steel, shear wave velocity, cohesive soil, sandy soil, energy preservation)

### 1. はじめに

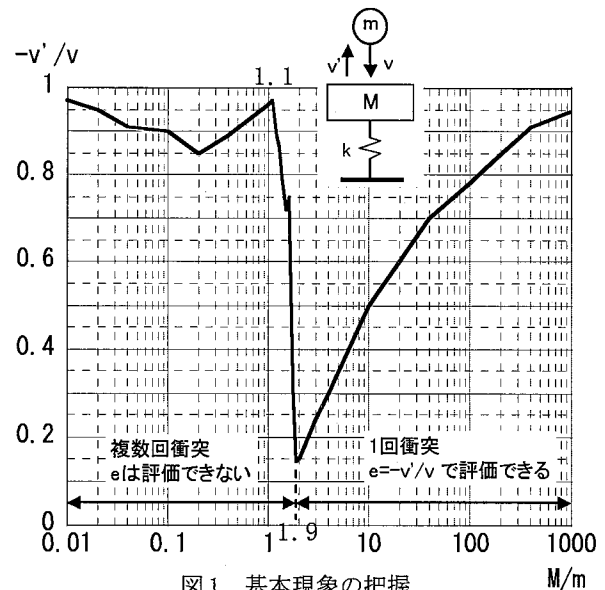
文献1)では、木造家屋の耐震補強に用いるアルミ製ポールの静的載荷試験(地上0.15m高さ載荷)に関し3次元弾塑性有限要素法解析コードLS-DYNA<sup>2)</sup>を用いてシミュレーション解析を行った。更に地盤中に埋め込まれた地上高さ3.5mの実物条件のアルミ製ポールの静的及び重錘衝突時の挙動を3次元・弾塑性の条件下で解析し、アルミ製ポールの静的・衝撃載荷時の挙動を良く解析できることを把握した。

本報では、先ず重錘衝突時のポールの基本性状を把握するため、質量比をパラメータとした簡易モデルによる解析を行った。次に、金属製ポールとして使用頻度の高いスチール製ポールを取り上げ、設計する上で重要な地盤に係わるパラメータ、①地盤種別(粘性地盤, 砂質地盤), ②せん断波速度 $V_s$ (100, 125, 150m/s), ③根入れ深さ(1.25, 1.50, 1.75m)を取り上げ、パラメータ解析を実施した。

また、耐震補強では、ポールの耐震性能を評価する上で重要な荷重-変位曲線を求める必要がある。しかし、3次元・弾塑性という条件では逆マトリクス演算を必要とする陰解法による解析手法では算定することは非常に難しい。そこで、今回陽解法の衝撃応答解析LS-DYNAによってポールの荷重-変位曲線を求めたので、算定法と算定結果を示した。

### 2. 重錘衝突時のポールの基本現象の把握

最初に重錘衝突時のポールの基本現象を把握するために、図1の模式図に示す簡易なモデルを作成し、



の質量の重錘がMの質量の被衝突体に衝突したときの、跳ね返り速度と衝突回数の変化を求める解析をLS-DYNAにより行った。後の図3のポールのモデルを参考にしてmを2t, vを1m/s, kを $3.9 \times 10^4$ N/mmの弾性モデルとした。Mを変化させて速度vの重錘を被衝突体に衝突させ、最終的に飛び出した重錘の速度 $v'$ を求め、縦軸に $-v'/v$ を、横軸にM/mをとって図1のように示した。

解析からM/mが1.9を境にして、1.9以下の領域では2回以上の複数回の衝突を繰り返して跳ね返り、1.9以上では1回の衝突で跳ね返ることが分かった。

1.9の1回衝突の領域では、M/mが増加すると、対数軸の横軸に対して $-v'/v$ は放物線状に変化し、M/mが1000のように非常に大きくなるとあたかも剛体

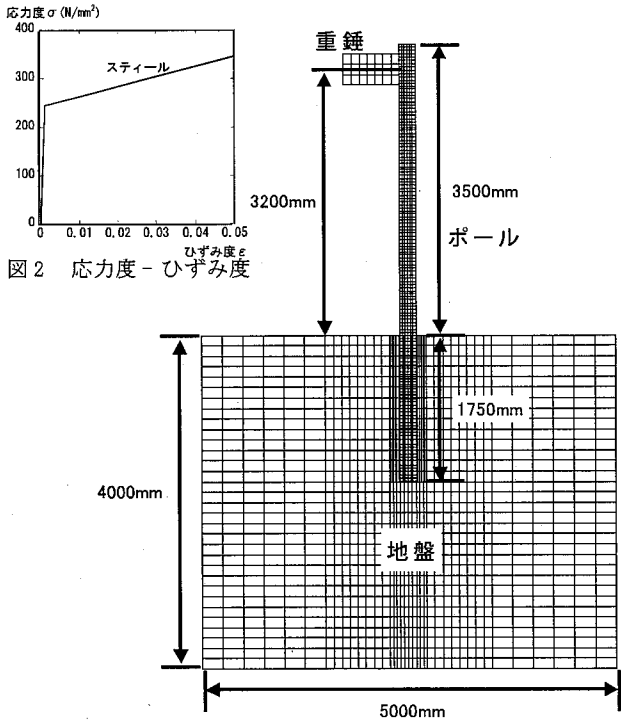


図2 応力度 - ひずみ度

図3 3次元弾塑性有限要素解析モデル

表1 スティール製ボールの解析ケース

ボール高さ (mm)	衝突高さ (mm)	根入れ深さ (mm)	せん断波速度 (m/s)	地盤種別	衝突体速度 (m/s)
3500	3200	1750	125	粘性	1
		1750	125	砂質	
		1750	150	粘性	
		1750	100	粘性	
		1500	125	粘性	
		1250	125	粘性	

### 3. パラメータ解析

#### 3.1 スティール製ボールのモデルと材料特性

金属製ボールの実際の耐震補強への適用に当たっては、アルミ製に比べて安価なスティール製を選択する機会が多い。そこで、本報では、スティール製のボールを取り上げ、地盤の条件を変化させた場合のパラメータ解析結果を示す。解析に採用したスティールのバイリニア型の応力度  $\sigma$  - ひずみ度  $\epsilon$  の関係を図2に示す。後述の降伏強度  $245\text{N/mm}^2$ 、降伏ひずみ  $0.0012$  で折れ曲がり、第2勾配は弾性の第1勾配の  $1/100$  とし、復元力の戻りは弾性勾配とした。スティール製のボール(角型鋼管)は、辺の長さ  $200\text{mm}$ 、厚さ  $12\text{mm}$ 、降伏強度  $245\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数  $2.06 \times 10^5 (\text{N/mm}^2)$  とした。解析モデルは報告<sup>1)</sup>及び図3に示すように、地上高さ  $3,500\text{mm}$  のボールが円筒状の地盤中に埋め込まれた3次元弾塑性有限要素モデルである。地盤中のボールはその周囲をコンクリートによって直径  $450\text{mm}$  の円筒状に囲まれている。地表面から  $3,200\text{mm}$  高さのボールの位置に質量  $2\text{t}$  の重錘がある速度をもって衝突するというモデルである。地盤は連続性を反映する無反射境界を設定した。本報で示すスティール製ボールの解析条件を表1に示す。Aの解析ケースが基本ケースである。本報では、ボールと建物が緊結で4本のボールが有効に作用する場合をイメージして質量の大きさは  $7.2\text{t}$  の  $1/4$  の  $1.8\text{t}$  と考え、丸めて1本当たり  $2\text{t}$  を重錘の質量として設定した。

#### 3.2 スティール製ボールの解析結果

図4は表1のAの条件で解析したスティール製ボールの変位時刻歴波形を示し、 $2\text{t}$  の質量の重錘が衝突した  $3,200\text{mm}$  高さ位置での水平変位波形(以下全変位と称する。)と地盤地表面位置での水平変位波形である。最大変位と残留変位の値を図中の表に表示している。図5は衝撃荷重の時刻歴を示す。図6は、荷重と衝突点位置の水平変位の関係を示したものである。

まず、衝突時のスティール製ボールの挙動を見てみると、重錘は衝突の初期にボールと数回の衝突(図6の  $0 \sim 10\text{mm}$  範囲の荷重参照)を繰り返しながらボールと

に衝突するかのようになり、 $-v'/v$  が1に近づいていく。 $M/m$  が50以上の大きい領域では、反発係数  $e$  を求めることができ<sup>4)</sup>、図1の  $-v'/v$  を反発係数  $e$  と読み換えても問題ない。

$M/m$  が1.9以下の複数回衝突の領域では、 $M/m$  が1.1から1.9になるにつれて  $-v'/v$  は急速に減少している。2回衝突の2回目の衝突が小さくなればなるほど  $v'$  が小さくなる。 $M/m$  が1.1以下では衝突回数が増加して数回にも及び、 $-v'/v$  は  $0.85$  を最小値として  $M/m$  の減少とともに1に近づいていく。 $M/m$  が、図1の  $0.01$  以下のように小さい場合は、重い重錘がばねのみを有する質点に衝突するような場合である。その場合には、重錘が非衝突体と複数回衝突しながら一体化(ランピングと称する)して最大変形に達した後、衝突速度  $v$  とほぼ同じ速度  $v'$  で跳ね返って離れていく。エネルギー的には、衝突前の重錘の運動エネルギーはランピングした状態での非衝突体の最大変位においてばねのひずみエネルギーに変換し、再び衝突開始位置で重錘の運動エネルギーに変換する。 $M/m$  が  $1000$  というような非常に大きな場合と  $0.01$  というように小さな場合とも、 $v'$  と  $v$  が同じ速度に近づくこととなる。次節以降で述べるボールにおいては  $M/m$  が  $0.05$  以下であるため、 $-v'/v$  は1に近づき、衝突体の運動エネルギーが非衝突体のひずみエネルギーに変換する条件にあると言える。

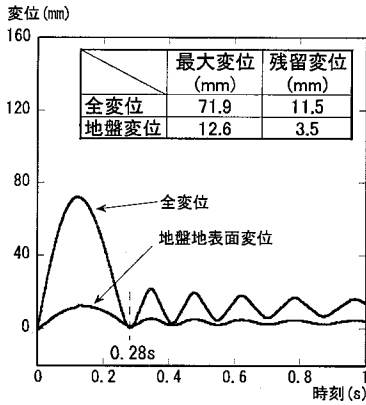


図4 変位時刻歴波形(ケースA)

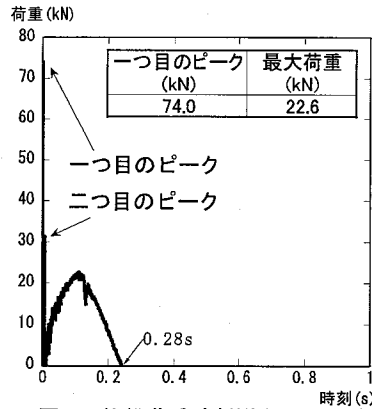


図5 衝撃荷重時刻歴(ケースA)

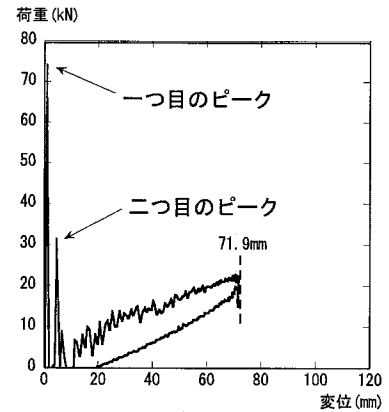


図6 荷重-変位関係(ケースA)

重錘が一体となった卓越半周期0.28sで変形していく、最大変位71.9mmに達する。その後は変位が戻ってくるが、途中の0.28sで重錘とポールが離れ、ポールは自己の卓越周期(0.15s)で自由振動しながらある変位に収束していく。収束した変位が前記の残留変位である。また、別途実施したスチール製ポールの基部を固定として2tの重錘を1m/sで衝突させた場合の解析によるとポール衝突位置での水平変位が40.3mmであるので、衝突点の全変位に占めるポールの変形割合は56%、残りが地盤の水平と回転による変位の割合で44%となる。

図5の衝撃荷重の時刻歴を見ると、重錘がポールに衝突した直後に74kNにも達するパルス状の大きな荷重が生じるが、その後は正弦半波状の水平変位波形(図4参照)に対応した継続時間0.28sを有する衝撃荷重時刻歴になっている。パルス状の荷重は重錘とスチール製ポールの衝突がスチール同士の衝突のために、瞬間的に大きな衝撃力が生じたが、複数回の衝突の後にはポールと重錘が一体となって変形するために、正弦半波0.23sのゆっくりした卓越周期で変形すると考えられる。なお、図6を見ると、2つ目のパルス状ピークは30kN程度で、1つ目のピーク74kNに比べると、かなり低下している。

図6の荷重-変位関係において最大変位71.9mmに達するまでにポールに吸収されるエネルギーを算定してみると、1.02kN・mになる。一方、重錘がポールに衝突する直前の運動エネルギー( $1/2mv^2$ )を算定すると、1.0kN・mであり、吸収エネルギーと良く一致していることが分かる。

また、図5の荷重時刻歴から力積(荷重曲線で囲まれた面積)を求めてみると、3.2kN・sであり、重錘の衝突直前の運動量(mv)が2.0kN・sであるので、力積は運動量の1.6倍程度の大きさになっている。これは、重錘がポールに衝突した後、ポールが衝突前と逆方向に跳ね返っていくために1より大きな値になって

いると考えられる。但し、重錘とポールは複数回の衝突を繰り返した後に跳ね返っていくために、反発係数に相当するものを評価するのは難しいと考えられる。

以上の解析結果より、重錘の持っていた運動エネルギーがポールの吸収エネルギーと良く一致していることが分かったので、この結果を応用して4.に示すポールの荷重-変位関係を評価することが可能になる。

### 3.3 地盤パラメータを変化させた場合の解析結果

本節では、1.に述べたように重要な地盤に係わるパラメータである①地盤種別、②せん断波速度 $V_s$ 、③根入れ深さを取り上げ、パラメータ解析を行った。解析の条件は表1に示している。

解析では、解析コードLS-DYNAに用意されている地盤の復元力特性の中から、Ramberg-Osgoodモデルを選定し、そのせん断応力度 $\tau$ とせん断ひずみ度 $\gamma$ の関係を、図7及び図8に示す。図7は報告<sup>1)</sup>で採用したせん断波速度 $V_s$ 125m/sの場合について、 $G_0 = \rho V_s^2$ ( $\rho = 1.2g/cm^3$ )の関係をを用いて $\tau$ と $\gamma$ の関係を示したものである。垂直応力度と軸ひずみ度の関係も同じ非線形性を想定している。図8は基本のせん断波速度 $V_s$ 125m/sに対して20%増減させた150m/sと100m/sの場合のせん断応力度 $\tau$ とひずみ度 $\gamma$ の関係を示したものである。告示(平12建告第1457号)別表第一の限界耐力計算法に使用される粘性土、砂質土のせん断剛性低減係数 $G/G_0$ を図9に示すが、解析で使用した $G/G_0$ - $\gamma$ 関係をプロットすると告示の $G/G_0$ - $\gamma$ の粘性土、砂質土と概ね一致している。

パラメータ解析の結果を図10に示す。上側の図は、衝突点位置の変位時刻歴波形を、下側の図は衝撃荷重時刻歴を示したものである。( )内の数値は、基本ケースAケース(1.00)に対する比率を示している。以上の図から下記のことが分かる。

1) 地盤種別の影響(図10(a)参照)

砂質地盤の場合は粘性地盤よりも、最大変位、残

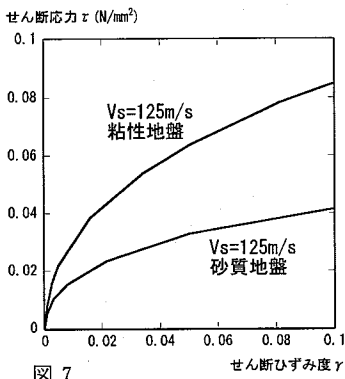


図 7

$V_s=125\text{m/s}$  粘性地盤と砂質地盤

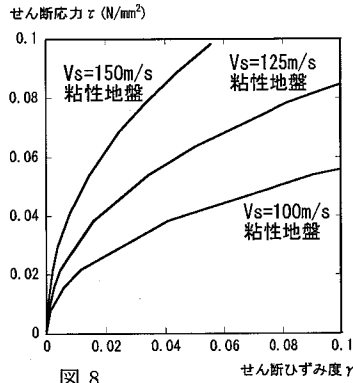


図 8

$V_s$  粘性地盤の  $\tau - \gamma$  関係

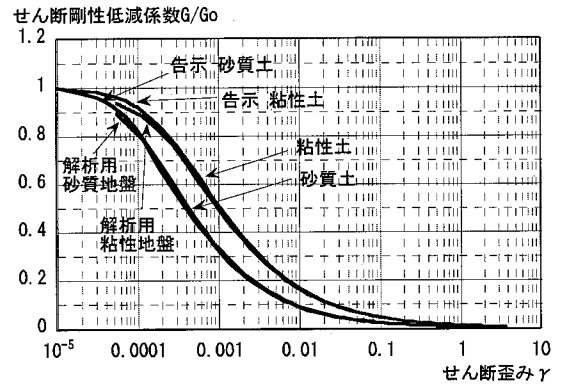


図 9 告示と解析用の低減係数  $G/G_0$

留変位が大きくなっているのが分かる。図 9 に示すように剛性低減係数  $G/G_0$  が砂質地盤の方が小さいからである。初期に発生するパルス状のピーク(図 10 (a) 下図の一つ目のピーク参照)は地盤種別のみならず、後述のせん断波速度、根入れ深さの影響を全く受けない。ポールの最大変位に対応した荷重のピーク(図 10 (a) 下図の最大荷重参照)の相違は 2 割程度あるが、力積(衝撃荷重の面積)については、差がない。

2) せん断波速度  $V_s$  の影響(図 10 (b) 参照)

125m/s の基準値に対して、2 割の増減により最大変位が 0.92 ~ 1.16 の変動である。最大荷重の相違も 1.11 ~ 0.80 の変動で、せん断波速度が小さいと

最大荷重は小さくなるが、逆に荷重の継続時間が長くなるので、力積については地盤種別の場合と同じように差がないと言える。

3) 根入れ深さの影響(図 10 (c) 参照)

基準の 1.75m に対して 1.5m, 1.25m と浅くなるにつれて、ポールの下部固定度が下がるので、当然のことではあるが、最大変位の比率が 1.08, 1.23 と増大していく。下部固定の場合のポールの最大変位が 40.3mm であるので、衝突位置の全変位に占める地盤の水平と回転による変位の比率が 1.75m の 0.44 から、1.5m の 0.48, 1.25m の 0.54 と増大していくこととなる。根入れ深さが浅くなった場合の最大荷重については、せん断波速度が低下した場

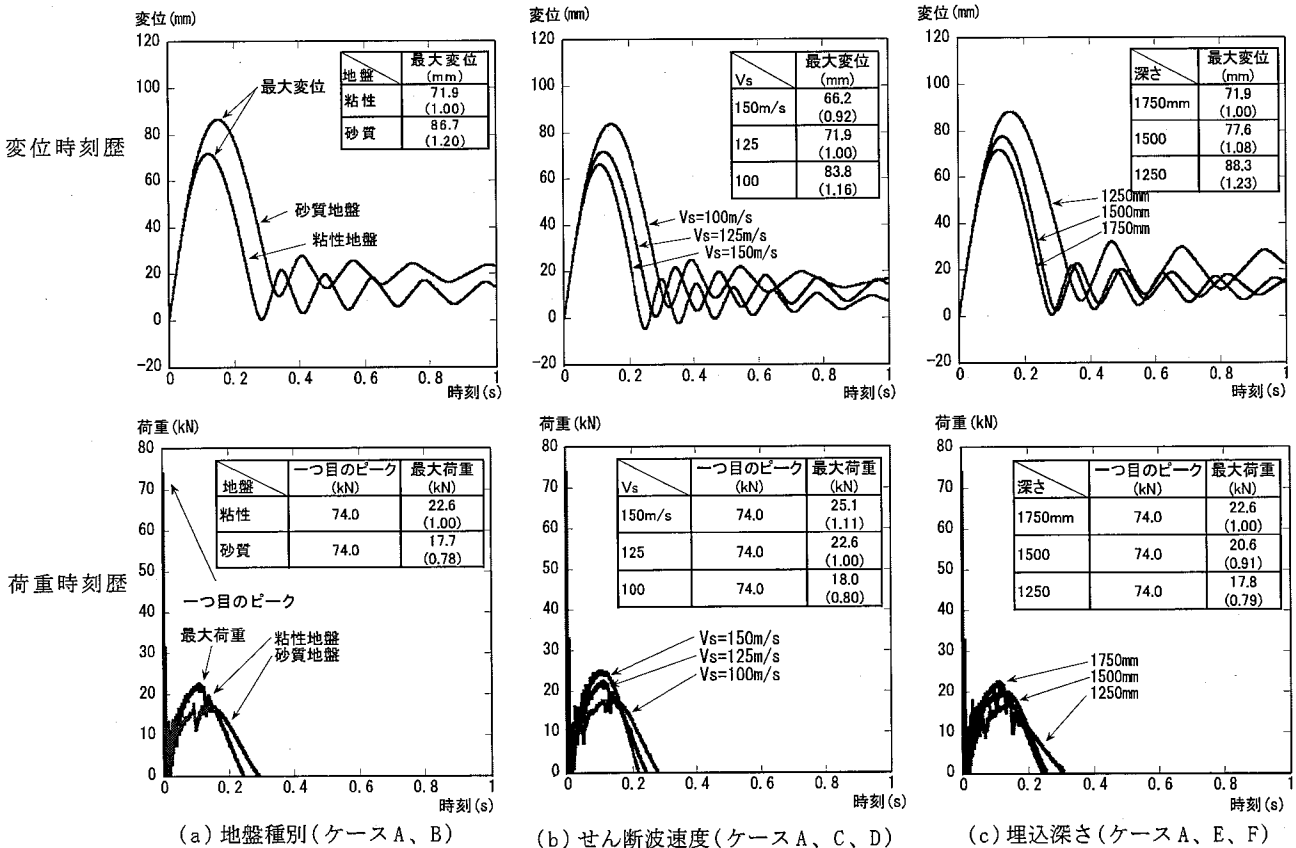


図 10 パラメータの相違による変位時刻歴波形と荷重時刻歴

合と同じ傾向で、根入れ深さが減ると、最大荷重は小さくなるが継続時間が長くなるので、力積については差がない。

#### 4. ポールの荷重と変位関係の算出

ポールの地震時の耐震性能を地震応答解析等によって正確に評価するには、ポールの荷重-変位関係が必要になる。今回実施した陽解法の衝撃応答解析結果を利用して荷重-変位関係を算定することが可能となったので、その算定法と結果を示す。

##### 4.1 算定法

前述の衝撃解析モデル(図3参照)において、重錘にある速度を与えて最大衝撃荷重とポールの最大変位をまず求める。次に衝突速度を変化させて同様な計算を行い、荷重と変位を同一図上にプロットしていくと荷重と変位の関係を求められると一般的には考えられる。しかし、衝撃問題として扱っているので、初期ピークのような評価上邪魔な荷重も生ずることがある。従来の構造工学で扱われる荷重-変位関係は、静的な荷重と変位の関係を元に評価されるので、荷重には動的や衝撃に影響されない荷重を評価したいと考えた。

3.2で述べたように、今回解析した結果によると、重錘の運動エネルギーがポールの吸収エネルギーと良く一致することを確認している。また既に実施している基部固定の模型ポールの衝突実験<sup>3)</sup>でも衝突前の運動エネルギーとポールの吸収エネルギー(ひずみエネルギーと同一)が一致することを実験的にも確認できている。図1の結果でも、本ポールのようなM/mが非常に小さい場合(重錘の質量が大の場合)には、エネルギー保存の原理(図11参照)が成立する条件にある。例えば1質点弾性系で言えば重錘の運動エネルギー( $1/2mv^2$ , m:質量, v:衝突速度)と質点系の吸収エネルギー( $1/2kx^2$ , k:ばね, x:最大変位)が一致するので、

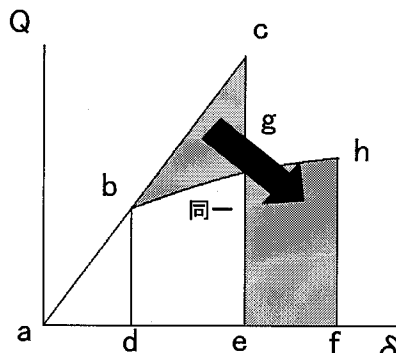


図11 弾塑性の荷重の算定概念

$1/2mv^2=1/2kx^2$ となり、最大変位  $x=\sqrt{m/k}\cdot v$ 、弾性荷重  $P=\sqrt{mk}\cdot v$  という簡単な式になる。弾性系では、荷重Pは衝突速度vに比例しており、LS-DYNAでの計算でも確認されている。

そこで、今回の対象であるスチール製のポールについては、片持梁の荷重と変形の関係からkを求め  $P=7.4 \times 10^2 x$  (N) (x:mm) という関係で弾性時の荷重Pを求めることとした。

衝突速度が大きくなると、ポールが弾塑性の挙動を示すようになるが、弾塑性変形になってもエネルギー保存の原理が成立しているので、弾性時の荷重  $c_e$  を弾塑性時の荷重  $h_f$  に変換することとする。なお、弾塑性時の変位  $a_f$  は、LS-DYNAの解析によって計算されているので、それを用いる。これを以下繰り返していく。

##### 4.2 算定結果

図12は、ケースA及びBについてせん断波速度Vs125m/sの地盤でのポールの荷重と衝突位置での変位の関係を400mmまでの変位の範囲で求めたものである。粘性地盤及び砂質地盤とも40kN 辺りから弾塑性の性状が強く現れてくる。また、横軸の変位の範囲についてはLS-DYNAによる解析の適用性が模型ポールの衝突実験のシュミレーション解析から実大400mm相当まで把握されているので、図12では400mmまで示したが、陽解法の解析アルゴリズムで解いているので、更に大きな変位まで算定することは計算上可能である。

#### 5. まとめ

木造家屋の耐震補強のためのポールを設計する上で重要な地盤に係わるパラメータを変化させて解析

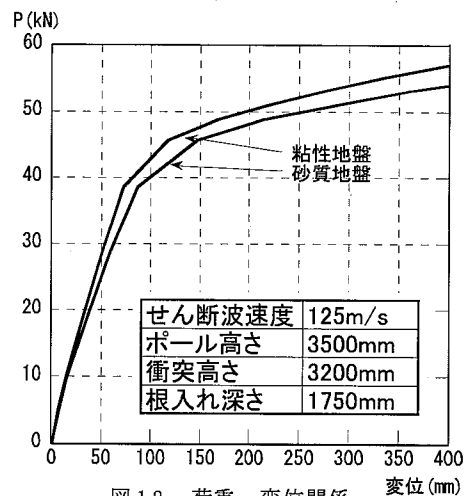


図12 荷重-変位関係

を行うとともに、耐震性能を評価する上で必要な荷重-変位関係を陽解法の衝撃解析法を用いて評価することが可能となった。

### 謝 辞

木造家屋の外部補強工法に関する解析に関して貴重な助言を頂いた(株)シーク建築研究所の武田幸和氏、松川正士氏、柳瀬正敏氏に感謝いたします。

### 参考文献

1) 河西良幸, 内田一義, 丹羽一邦, 藤田壮裕, 「地盤中に埋め込まれたアルミ製ポールの静的及び衝撃

荷重に対する構造特性」, 第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2006年11月

- 2) Livermore Software Technology Corporation, The Japan Research Institute, Limited, "LS-DYNA Version 970 Users Manual", December 2003
- 3) 河西良幸, 澤本佳和, 堀越清視, 内田一義, 武田幸和, 大野友則, 「木造家屋の外部補強構法に関わる鋼管及びアルミ管の衝撃実験と解析」, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp. 269-274, 2000年6月
- 4) 小林俊男, 河西良幸, 大野友則, 「高所からの落下物に対する安全性検討のための衝撃実験」, 第7回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2004年11月