

(37) 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

STATIC AND IMPULSIVE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF ALUMINUM POLE BURIED IN SOIL

河西良幸*, 内田一義**, 丹羽一邦***, 藤田壮裕****

Yoshiyuki Kasai, Kazuyoshi Uchida, Kazukuni Niwa, Morihiro Fujita

*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 大塚ビル4F)

****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)

キーワード: 衝撃, ポール, 鋼, アルミニウム, 土, 弾塑性解析, 3次元FEM
(impact, pole, steel, aluminium, soil, elasto-plastic analysis, three dimensional FEM)

1. はじめに

1995年1月の阪神・淡路大震災においては、約9万棟の木造家屋が全壊、約10万棟が半壊し、死者約6,400人の大部分が、これら倒壊家屋の下敷きになり亡くなられた。松田ら²⁾が淡路島から宝塚の範囲で、約2,640戸の倒壊方向を調査した結果によれば、「全倒壊木造家屋の70%相当は、一定方向に倒壊し、2階建では2階以上がそのまま残され、1階が横から押しつぶされた形が多かった。」と報告している。その他、学者や新聞等が「土台部分がパルス的な振動を受け、一気に『足払い』されたように倒壊した。」と述べている。また、独立行政法人防災科学技術研究所の振



写真1 振動台実験による木造家屋崩壊状況³⁾

動台(E-ディフェンス)によってなされた兵庫県明石市の築31年の実物木造建物の振動実験の映像³⁾(写真1)によると、前記松田らの記述のように、2階はそのままに残され、1階が横から押しつぶされるように倒壊した様子がリアルに再現されている。

筆者の一人の内田、武田ら⁴⁾は、図1に示すような倒壊を防ぐために簡便で、しかも居ながら施工できる外部耐震補強工法を考案した。その概要は図2に示すように、木造家屋の周囲に設置するスティール製またはアルミ製のポールと家屋を2階床位置の胴差または梁に緊結し、木造家屋からの地震水平力をポールに負担させようとするものである。

補強効果の確認^{4), 5)}のために、質点系の振動解析モデルを設定し、各種の地震波を入力した補強前後の地震応答解析を行っている。また、ポールと建物を非緊結の状態にすることについても検討⁶⁾している。

更に、筆者らは、外部耐震補強工法に関して、耐震性能評価に関わる各種の実証的な研究⁷⁾を行ってきた。それらの検討課題の中で、地盤中に埋め込まれた金属製ポールの水平耐力と変形能力を各種の設計条件(金

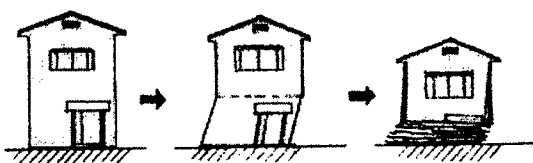


図1 木造建物崩壊の概念図

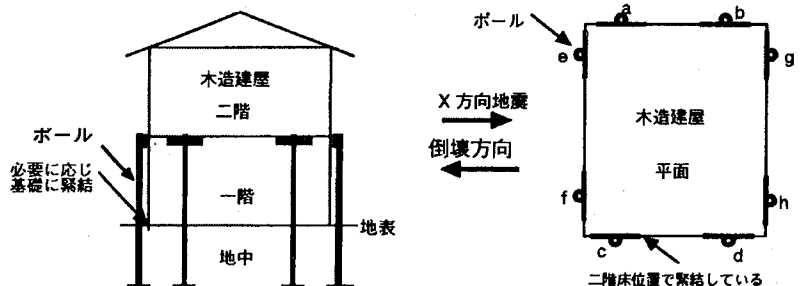


図2 木造家屋の外部耐震補強工法

属製ポールの材質・形状・肉厚・高さ、地盤の種類と硬さ、地盤への根入れ深さ等)下で正確に評価することが重要であると考えた。そのためには、それらの設計条件を考慮した実大での実験的な評価も考えられるが、設計に関わるパラメータの数が多く、実験の手間と費用の負担が大きいため、構成材料の非線形性を考慮した解析手法(3次元弾塑性有限要素法解析)に基づくのが最も有効かつ効率的と考えた。その場合、解析では次のような条件を考慮することとした。

- 1) 地盤の3次元的な広がりとともに部材の3次元性も考慮すること
- 2) 各種の材料(砂質土・粘性土、スチール・アルミ、コンクリート)の非線形性を取り入れること
- 3) かなり大きな変形(木造建物の層間変形角1/15に相当する、金属製ポール頂部で200mm程度の変形)までの解析結果を得ること

しかし、剛性行列の逆マトリックスを解く陰解法ではそのような条件での保有耐力を得ることは容易ではないと考えた。そこで、本検討では、自動車の衝突解析等に用いられている陽解法を採用することとし、陽解法コードの中から筆者らの解析経験^{7), 8)}があり、解析事例の報告⁹⁾も多いLS-DYNA¹⁰⁾を用いることにした。LS-DYNAは衝撃(動的)アルゴリズムに基づく解析コードであるが、運動エネルギーがひずみエネルギーに比例して十分小さい範囲で解析モデルの質量を大きくし、固有周期と時間ステップを増大させることにより、LS-DYNAによる準静的な問題にも適用可能である。

当面の解析目標は地盤中に埋め込まれた金属製ポールの水平荷重と変位の関係を得ることである。そのために解析的な検討を次の①～⑤に示す段階を踏んで実施してきた。

- ① 両端を支持したスチール梁への重錘落下実験に関する解析の妥当性検証⁸⁾

- ② 下部を固定としたスチール管及びアルミ管模型への重錘衝突実験に関する解析の妥当性検証⁶⁾

- ③ 地盤中に埋め込んだ実物大アルミ製ポール(但し実際より短い地上高さ)について、その地中根入れ深さを種々に変化させた静的水平載荷実験に関する解析の妥当性検証

- ④ 地盤中に埋め込まれた実物大アルミ製ポールに重錘を衝突させた場合の解析

- ⑤ 実物条件下でのスチール製ポールに関して種々の設計パラメータを変化させた解析

①～②に示したスチール製及びアルミ製の部材の実験とシミュレーション解析によって大変形(実物換算で400mm程度の変形)に至るまで解析の適用性があることを把握した。③、④については本論文で報告する。また、⑤に示す種々の設計パラメータを考慮した解析と水平荷重と変位関係の算定結果については別途報告¹¹⁾している。

2. 地盤への根入れ深さを变化させた実物大アルミ製ポールの解析

2.1 水平載荷実験

ポールの根入れ深さに対する地盤耐力を確認するために図3及び写真2、3に示すような根入れ深さの異なるポールの静的な水平載荷実験を実施し、設計用の地表面許容変位(10mm)時の水平耐力を求めている。但し、ポールの地上長さは実際の3.5mより短い0.5mとしている。ポールの断面の外寸法は200mm×200mmの正方形、肉厚は11mmのアルミ合金製であり、根入れ深さは1.0m、1.25m、1.50m、1.75m、2.0mの計5種類である。地盤は神奈川県相模野台地に位置し、地盤状況は表層から深さ16mまではN値3～4の関東ローム層が主体である。

なお、ポールの地中部分には図3のようにコンク

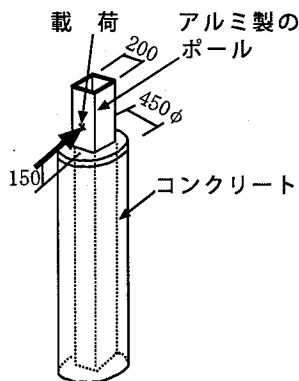


図3 試験体

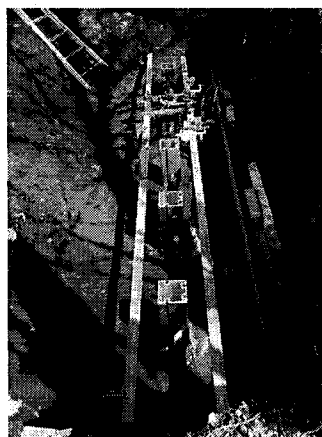


写真2 載荷実験の状況

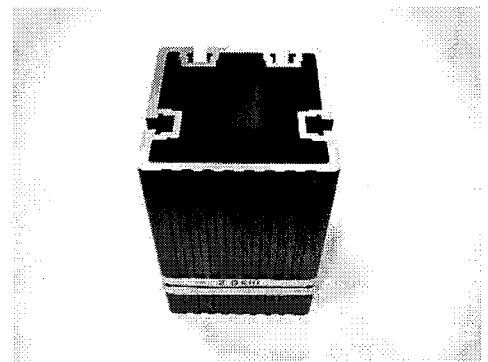


写真3 アルミ製のポール

リートを直径が450mmになるように打設してある。実験結果については、文献¹⁾に報告している。

2.2 実験の解析

実験のシミュレーション解析として、地盤及びポールを図4(a)のように3次元非線形有限要素によりメッシュ化した。

実験の解析モデルは、対称性を利用して2分の1モデルとし、解析領域はポールの断面中心から半径2.5m、地中深さ4.0mとした。これ以遠の領域の影響は、地盤の連続性を反映する無反射境界条件を設定した。

ポールの根入れ深さは1.5mの場合を主な解析対象とし、アルミ製のポールとその周囲のコンクリートは実際と同じように図4(b)のようにモデル化し、各々の材料の復元力特性を考慮した。アルミ製ポールは、辺の長さ200mm、厚さ11mmで、アルミは、質量密度2.695g/cm³、ヤング係数7.0×10⁴(N/mm²)、降伏強度160(N/mm²)のバイリニア型の応力度-ひずみ度関係とし、第2勾配は第1勾配の1/100、戻りは第1勾配と同じとした。コンクリートは、質量密度2.30g/cm³、ヤング係数2.0×10⁴(N/mm²)、圧縮強度18(N/mm²)、引張強度1.8(N/mm²)、体積弾性係数1.0×10⁴(N/mm²)として、圧力が破壊強度に達した時点で引張力を伝えなくすることで、破壊を考慮できるモデルとしている。

要素数はポール600、コンクリート260、地盤7480の合計8440要素である。地盤は関東ロームのN値3~4から、せん断波速度を125m/s(図5参照)の1様地盤と見込み、既往の土質の実験結果も参照して、Ramberg-Osgoodモデルを選定し、図5のような非線形のせん断応力度とせん断ひずみ度の関係を設定し、地

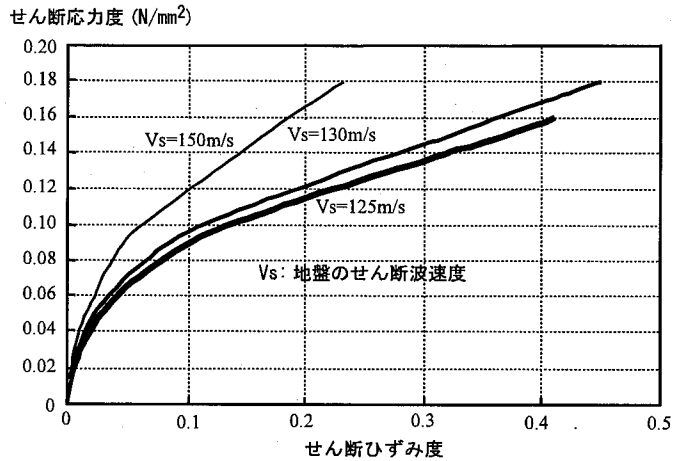


図5 解析における地盤のせん断応力度とひずみ度の関係

盤物性はこの非線形性に則るものとした。垂直応力度と軸ひずみ度の関係も同じ非線形性を仮定している。

根入れ深さを1.25m、1.5m、1.75mと変化させた場合の解析によって求めた水平載荷荷重と地表面水平変位の関係を図6に示す。この解析では、動的解析アルゴリズムを用いて大変形までの準静的問題の解を得るために、モデルの質量を大きくして系の固有周期を長くし、慣性力の発生を抑えるという工夫をしている。その上で、重錘(図8の重錘参照)状の載荷盤を一定の高さと姿勢を保持して、言わばレール上を移動する載荷盤のように強制変位を与える方法によって計算した。図6では、実験で行った載荷範囲(地表面水平変位10mm程度)よりはるかに大きな地表面水平範囲まで載荷しているが、約10mmまでの載荷範囲について解析と実験の比較を示すと、図7の荷重-変位曲線の図のようになる。この荷重-変位曲線には、所々に負勾配のような部分が見られるが、これは動的解析アルゴリズムを用いて前記のように質量を大きくしたことによ

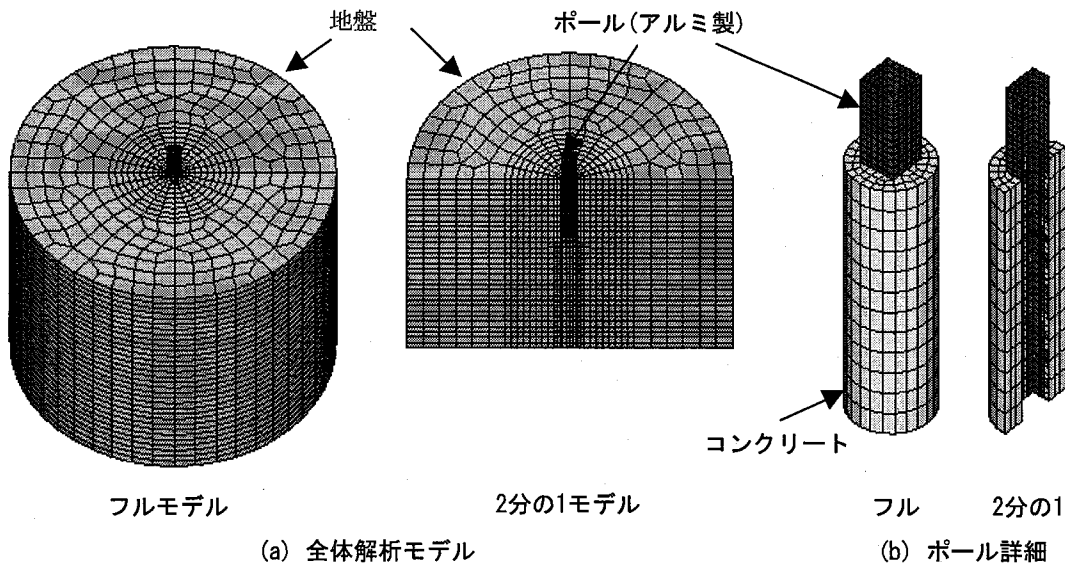


図4 異なる根入れ深さを有するアルミ製ポールの実験結果を解析のための3次元弾塑性FEMモデル

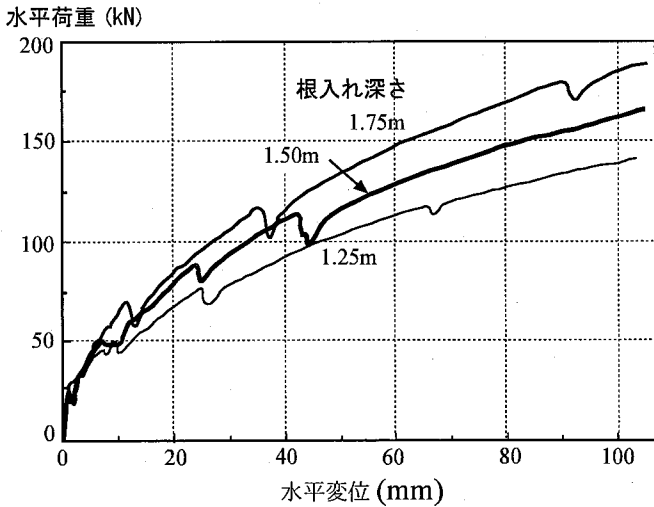


図6 解析による荷重と変位の関係

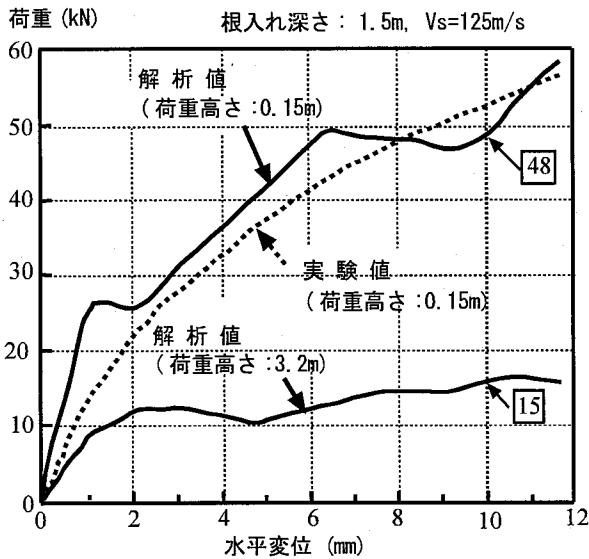


図7 解析による荷重高さの影響の検討

る系の固有周期のうねりが現れたため、構造的な原因によるものではない。また、図6に所々に荷重が一時的に低下する部分が現れているが、これは載荷盤が一定の高さと姿勢を保って変形しているポールを押し

ていく内に、載荷盤が一時的に離れてしまう現象が生ずるためである。

図6及び図7より次のことが分かる。

- 1) 地表面水平変位が10mmでは、図7のように、実験と解析とも、水平荷重が48～54kNの大きさであり、概ね対応している。
- 2) 根入れ深さに対する水平荷重の比率を図6の解析による水平変位の全範囲で平均的に見みると、1.5mの場合に比べて1.75mの場合には15%大きく、1.25mの場合には13%小さい。

2.3 実物条件での解析

実際の金属製ポールによる補強では、地表面上約3.2m位置でポールと建物と緊結させるので、地表面上3.2mを水平載荷した場合には、前記の0.15m位置に載荷した実験に比べて曲げモーメントの付加が大きくなる。そこで、解析によって高さの影響を検討した。地表面上0.15m位置での水平載荷と3.2m位置での水平載荷の解析結果を比較すると、図7の荷重と変位の関係図のように地表面変位10mm時の3.2mと0.15mでの荷重の比率は $15/48 \approx 1/3.2$ となり、水平載荷位置が高いことによるモーメントの効果等によって地盤の水平耐力は実験結果に比べて1/3程度に低減して評価すべきことが分かる。

次に、ポール模型の衝撃実験⁶⁾の場合と同様に、ポールと建物が非緊結の状態、建物の荷重がポールに衝撃的に作用する場合の解析を試みた。

図8は解析モデルを示す。地盤部分のモデルは図4と同じせん断波速度 $V_s=125\text{m/s}$ の一樣地盤である。ポールは地上高さ3.5m(載荷高さ3.2m)、根入れ深さ1.5mで、実験で使用したアルミ製である。衝撃荷重を与える衝突物の質量は、ポールと建物が非緊結で2本のポールのみが有効に作用する場合を想定して7.2tと定めたが、ポール模型の衝突実験⁷⁾の際に想定した実物相当の質量である。衝突速度は、その衝突実験の

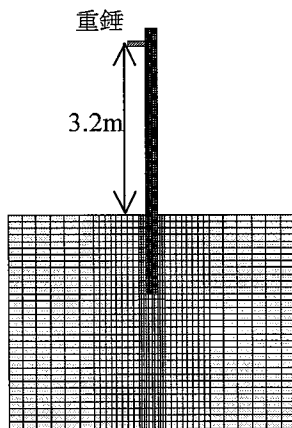


図8 解析モデル

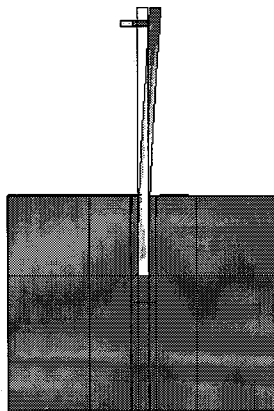


図9 最大変位

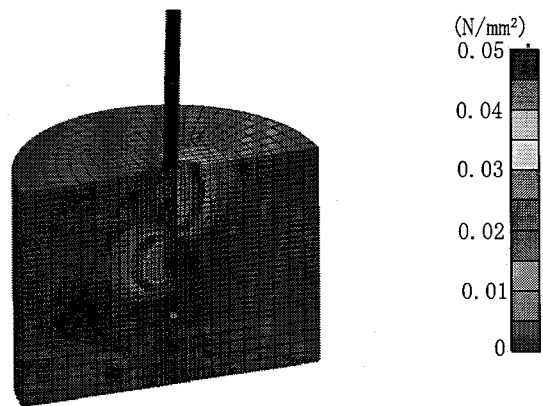


図10 相当応力度の分布

際の基本となった速度である1.0m/sを採用した。

ボールの水平変位が最大となる時刻0.35sでの最大変位と相当応力度の分布を各々図9及び図10に示す。ボールの衝突点での水平変位の時刻歴波形を図11に、地盤地表面の水平変位の時刻歴波形を図12に、ボールの衝撃荷重の時刻歴波形を図13に、ボールの衝撃荷重とボールの衝突点位置の水平変位の関係を図14に示す。以上の図より、次のことが分かる。

- 1) ボールの衝突点位置の水平変位波形(図11参照)は、模型実験によるスティール管やアルミ管の水平変位の時刻歴波形⁷⁾に類似している。即ち、重錘が最初にボールに衝突した後、数回の衝突を繰り返しながらボールを押していくので、あたかもボールの質量が増大したようになって、変形状態にあるボールの卓越周期は非常に増大し半周期 T_{half} が0.75s程度となっている。0.75s以降は、重錘がボールと離れるので、ボール単体の卓越周期 T (0.17s程度)で自由振動し、ボールは34mm程度の残留変位位置を生ずる。この現象については、文献¹¹⁾で説明している。
- 2) ボールの水平変位が最大となる0.35sでは、ボールの衝突点位置での水平変位221mmに対して、地

盤の地表面の水平変位は29.6mmで、ボールの衝突点位置での水平変位の約13%である。(図11, 図12参照)

また、別途実施したアルミ製ボールの基部を固定として7.2tの衝突体を1m/sで衝突させた場合の解析によると、ボールの衝突点位置での水平変位が144.5mmであり、衝突点の全変位221mmに占めるボールの水平変位の割合は65%、残りが地盤の水平変位(前記の29.6mmに相当)と回転による変位(46.9mm相当)となり、35%である。

- 3) 衝突終了後には、ボールの衝突点では最大変位221mmの15%程度の34mmの残留変位(図11参照)を、地盤の地表面では、最大変位29.6mmの47%の14mmの残留変位(図12参照)が生じている。
- 4) 図15からボールの衝突点での最大変位 X_{max} に達するまでの吸収エネルギーを図上で算定すると3.6(kN・m)であり、重錘の衝突時の運動エネルギー $1/2mv^2 = 1/2 \times 7200(\text{kg}) \times 1^2(\text{m}^2/\text{s}^2) = 3.6(\text{kN} \cdot \text{m})$ と一致している。衝突実験⁷⁾でも重錘の運動エネルギーとボールの吸収エネルギーは一致することが確認されているが、本解析においても、その原理が成立していることが分かる。

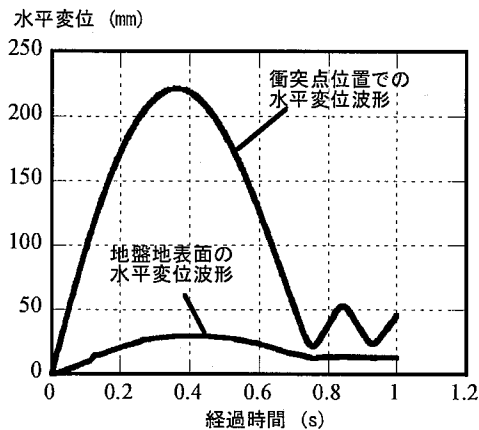


図11 時刻歴変位波形(衝突点と地盤地表面)

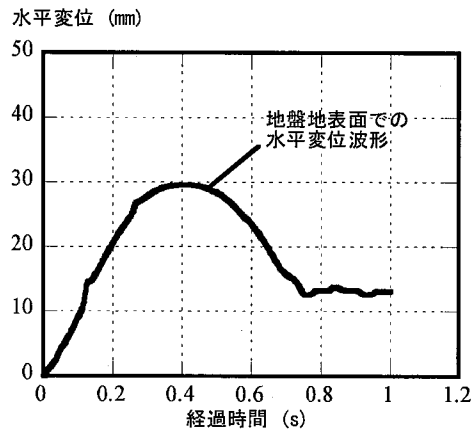


図12 時刻歴変位波形(地盤地表面)

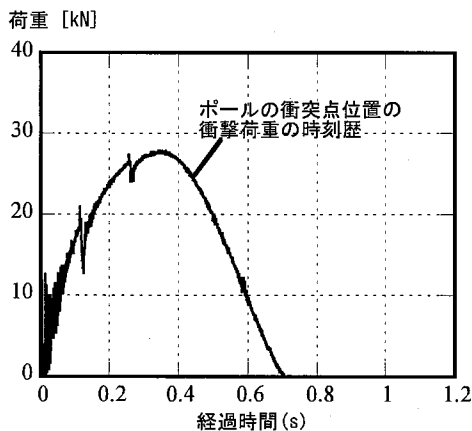


図13 衝撃荷重の時刻歴

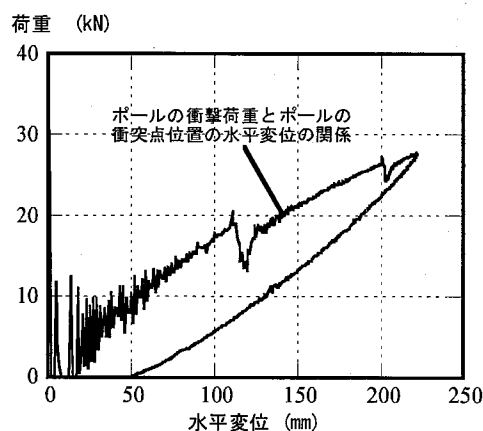


図14 衝撃荷重と水平変位の関係

- 5) 4) のエネルギー保存の結果(1 質点系として $1/2mv^2=1/2kx_{max}^2$ の関係)から, ポールの衝突点位置の最大変位 x_{max} は $x_{max}=(T_{half}/\pi)\cdot v$ (v :衝突速度)で概算できることになる。1) に示した $T_{half}=0.75$ (s), $v=1$ (m/s) を代入すると, $x_{max}=240$ (mm) となり, 1) に記載の 221 (mm) とかなり良く合っている。ポールの塑性化の程度がまだ少ないためであると考えられる。
- 6) ポールの衝撃荷重(ポールの反力から算定)の時刻歴波形(図 13 参照)を見ると, ポールは重錘の衝突により最大 28kN 程度で継続時間が約 0.7s の正弦波状の衝撃力を受けたと言える。その衝撃力積(面積)を概算すると, 10.3 (kN・s) であり, 重錘の持っていた運動量 $mv=7.2$ (kN・s) の 1.4 倍程度である。重錘はポールと複数回の衝突を繰り返しながらポールを変形させていくので比較的大きな衝撃力積になったものと考えられる。1 回の衝突の場合であるなら力積と運動量の比率から, 反発係数を算定することが可能¹²⁾であるが, 今回のように衝突体の質量が大きくて, 複数回の衝突を生ずる場合には, 反発係수에相当するものを評価することは難しい。なお, 重錘衝突の初期に高振動数の波形(図 13 及び図 14 参照)が見られるが, 重錘衝突の際のオーバル振動が発生するためと考えられる。
- 7) 地盤の相当応力度(図 10 参照)は重錘の左から右への衝突に対して地中部の地表面に近い右側, 先端部に近い左側に比較的大きな応力度を生じており, Broms¹³⁾による短杭の極限水平支持力算定で仮定されている応力分布の性状が現れている。
- 8) ポール及び地盤とも, 非線形性(図 14 参照)が生じており, 地盤, ポールともに非線形性を考慮した 3 次元の衝撃解析によってポールの挙動を捉える必要がある。

3. まとめ

アルミ製ポールを地盤中に埋め込み, 根入れ深さを变化させた静的載荷実験結果を動的アルゴリズムに基づく 3 次元弾塑性有限要素法解析コードによってシミュレーション解析を行った。その後, 地盤に支持された実物に近い条件のアルミ製ポールに重錘を衝突させた場合の弾塑性解析を行い, アルミ製ポールと地盤の弾塑性の相互作用を考慮した状態での衝撃現象を分析した。

以上の解析により金属製ポールに静的や衝撃荷重が作用した場合の弾塑性性状をかなり正確に解析できることが分かった。ポールの設計パラメータを考慮した

3 次元弾塑性有限要素法解析によって地盤中に埋め込まれたポールの水平耐力や変形能力を評価できるので, パラメータ解析結果と荷重-変位の算定結果については別途報告¹¹⁾している。

謝 辞

根入れ深さを变化させた実大アルミ製ポールの水平載荷実験を担当した鹿島技術研究所(当時)の持田悟氏, 木造家屋の外部補強工法に関する貴重な助言をいただいた(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) 河西良幸他「地盤に埋め込まれた金属製ポールの静的及び衝撃荷重に対する挙動」, 前橋工科大学研究紀要, 第 9 号, pp. 45-50, 2006 年 3 月
- 2) 松田高明, 竹村厚司, 「1995 年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向」, 地質学論文集, 第 51 号, pp. 67-77, 1998 年 3 月
- 3) 日本テレビ,ズームイン, 2005 年 11 月 22 日
- 4) 内田一義, 武田幸和, 河西良幸, 堀越清視「既存木造家屋の外部耐震補強工法-補強前後の地震応答性状-」, 日本建築学会技術報告集, 第 15 号, pp. 109-pp. 114, 2002 年 6 月
- 5) 内田一義, 武田幸和, 鈴木勇三, 斉藤隆晴, 河西良幸他「木造家屋の外部耐震補強構法 その 1 金属製ポールを家屋に緊結した場合」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造Ⅲ, pp. 309-310, 2000 年 9 月
- 6) 河西良幸, 堀越清視, 澤本佳和, 内田一義, 武田幸和「木造家屋の外部耐震補強構法 その 2 金属製ポールを家屋に非緊結した場合」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造Ⅲ, pp. 311-312, 2000 年 9 月
- 7) 河西良幸, 澤本佳和, 堀越清視, 内田一義他「木造家屋の外部補強構法に関わるスチール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-pp. 274, 2000 年 6 月
- 8) 河西良幸, 澤本佳和, 「重錘衝撃を受けるスチール梁の実験前予測解析と実験後シミュレーション解析」, 前橋工科大学研究紀要, 第 7 号, pp. 79-pp. 84, 2004 年 3 月
- 9) 土木学会, 「衝撃実験・解析の基礎と応用」, 土木学会構造工学シリーズ, 2003 年 3 月
- 10) Livermore Software Technology Corporation, The Japan Research Institute Limited, "LS-DYNA Version 940 Users Manual", June 1997
- 11) 藤田壮裕, 河西良幸, 内田一義, 丹羽一邦「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」, 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
- 12) 小林俊夫, 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突実験」, 第 7 回構造物の衝撃実験に関するシンポジウム講演論文集, pp. 187-pp. 192, 2004 年 11 月
- 13) B.B.Broms, Lateral Resistance of Piles in Cohesion Soils", ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27-63, 1964