地盤中に埋め込まれたアルミ製 ポールの静的水平载荷実験と解析

ANALYSIS OF STATIC LATERAL LOADING TEST OF ALUMINUM POLE BURIED IN SOIL

河西良幸 —*1 内田一義 —*2
丹羽一邦 —*3 藤田壮裕 —*4

Yoshiyuki KASAI —*1 Kazuyoshi UCHIDA —*2
Kazukuni NIWA —*3 Morihiro FUJITA —*4

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

Keywords：
Impact, Pole, Steel, Aluminium, Soil, Elasto-plastic analysis, Three dimensional FEM

This paper deals with analyses of aluminum poles for reinforcement of old or weak wooden houses due to static lateral loading test.

Three-dimensional elasto-plastic Finite Element Method (FEM) analyses were carried out to examine whether the computer analysis could accurately simulate or not results for the elasto-plastic behaviors of aluminum columns buried in soils with different embedment depths due to laterally loading tests. The behaviors were simulated fairly precisely by the elasto-plastic FEM. In addition, impact analyses were made for the horizontal load tests for aluminum poles with actual size buried in a soil to examine the applicability of the three-dimensional FEM. In consequence, the impact behaviors of the aluminum column could be found in consideration of the elasto-plastic interaction between aluminum column and soil.

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。

写真1 振動台実験による木造建物の崩壊状況³⁾

図1 木造建物崩壊の概念図

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

図2 木造家屋の外部耐震補強工法

本報告は、大学の紀要¹⁾で報告した内容に加筆・修正したものである。

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

*2 ㈱シーク建築研究所 工博

*3 ㈱テラバイト

*4 前橋工科大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

*1 Prof., Dept. of Archit. Graduate School of Eng., Maebashi Inst. of Technology, Dr. Eng.

*2 I-SHEC, Dr. Eng.

*3 Terrabyte Co., Ltd.

*4 Graduate Student, Dept. of Archit. Graduate School of Eng., Maebashi Inst. of Technology

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という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次元的な揺れとともに部材の3次元性も考慮すること
- 2) 各種の材料的(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解析結果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、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した静的水平荷重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に近い条件での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ている。次に今回報告の③、④の、地盤中に埋め込まれたアルミ製のポールの解析を行った。なお、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アルミ製ポールの解析

2.1 水平荷重実験

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荷重実験を実施し、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のようにコンクリートを直径が450mmになるように打設してある。根入れ深さを変えた場合の各ポールの荷重実験による地表面許容変位(10mm)時の水平荷重は、表1及び図4の通りである。根入れが深くなるに従い、荷重が大きくなる事が分かる。

図3 試験体

写真2 荷重実験の状況

写真3 アルミ製のポール

水平荷重 (kN)

図4 実験による荷重と変位の関係

表1 実験による最大荷重と最大変位

根入れ深さ (m)	水平変位 (mm)	水平荷重 (kN)
1.00	10.89	31
1.25	10.31	38
1.50	10.8	54
1.75	10.07	62
2.00	(4.04)	(50)

注) 根入れ深さ 2.0m の場合には、50kN 以上の荷重は不可能であった。

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5(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5(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 7.0×10^4 (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 2.0×10^4 (N/mm²)、圧縮強度18(N/mm²)、引張強度1.8(N/mm²)、体積弾性係数 1.0×10^4 (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6参照)の様な地盤と見込み、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6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7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9の重錘参照)状の荷重盤を一定高さで姿勢を保って、言わばレール上を移動する荷重盤により強制変位を与える方法によって計算した。図7では、実験で行った荷重範囲(地表面水平変位10mm程度)よりはるかに大きな地表面水平変位範囲まで荷重しているが、実験での荷重範囲について解析と実験の比較を示すと、図8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7に所々

図5 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

せん断応力度 (N/mm^2)

図6 解析における地盤のせん断応力度とひずみ度の関係

水平荷重 (kN)

図7 解析による荷重と変位の関係

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、載荷盤が一時的に外れてしまう現象が生ずるためである。

荷重高さ: 0.15m

荷重高さ: 3.2m

図8 解析による荷重高さの影響の検討

・図7及び図8より次のことが分かる。

- 1) 地表面水平変位が10mm(表1参照)では、図8の荷重荷重高さ0.15mの場合の結果に見るように、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7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。実験は、地表面水平変位が10mmの比較的小さな場合であるが、水平荷重の比率は1.5mの場合に比べて1.75mの場合には15%と解析値とはほぼ同じ比率であるが、1.25mの場合には30%小さい結果(図4参照)となっている。水平荷重の低減の度合いが大きい。

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、実験結果からその高さの効果を考慮してポールの挙動を評価することとし、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8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。

以上の結果より、N値3～4程度の関東ローム層地盤において、ポールを3.2m前後の位置で既存家屋に緊結する場合は表1の水平荷重を一律1/3低減させて、根入れ深さに対する地盤耐力を評価すればよいと言える。

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行った。この衝撃解析を利用することによりポールの水平荷重と変位関係の把握も可能となるものである。

図9は解析モデルを示す。地盤部分のモデルは図5と同じで

図9 解析モデル

図10 最大変位

図11 相当応力度の分布

ん断波速度 $V_s = 125 \text{ m/s}$ の一様地盤である。ポールは地上高さ 3.5 m (载荷高さ 3.2 m)、根入れ深さ 1.5 m 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 7.2 t 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、その衝突実験の際の基本となった速度である 1.0 m/s を採用した。

ポールの水平変位が最大となる時刻 0.35 s での最大変位と相当応力度の分布を各々図10及び図11に示す。ポールの衝突点

での水平変位の時刻歴波形を図12に、地盤地表面の水平変位の時刻歴波形を図13に、ポールの衝撃荷重の時刻歴波形を図14に、ポールの衝撃荷重とポールの衝突点位置の水平変位の関係を図15に示す。以上の図より、次のことがわかる。

1) ポールの衝突点位置の水平変位波形(図12参照)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、重錘が最初にポールに衝突した後、数回の衝突を繰り返しながらポールを押していくので、あたかもポールの質量が増大したようになって、変形状態にある

図12 時刻歴変位波形(衝突点と地盤地表面)

図13 時刻歴変位波形(地盤地表面)

図14 衝撃荷重の時刻歴

図15 衝撃荷重と水平変位の関係

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。

- 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 12, 図 13 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 12 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 13 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 (kJ・m) であり、重錘の衝突時の運動エネルギー $1/2mv^2 = 1/2 \times 7200(\text{kg}) \times 1^2(\text{m}^2/\text{s}^2) = 3.6(\text{kJ} \cdot \text{m})$ 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。

- 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、ボ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 $T_{half} = 0.75(\text{s})$, $v = 1(\text{m/s})$ を代入すると、 $x_{max} = 240(\text{mm})$ となり、1) に記載の 221 (mm) とかなり良く合っている。ボ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) ボールの衝撃荷重(ボールの反力から算定)の時刻歴波形(図 14 参照)を見ると、ボ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 (kJ・s) であり、重錘の持っていた運動量 $mv = 7.2(\text{kJ} \cdot \text{s})$ の 1.4 倍程度である。重錘はボールと複数回の衝突を繰り返しながらボ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 14 及び図 15 参照)が見られるが、重錘衝突の際のオーバー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 11 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) ボール及び地盤とも、非線形性(図 15 参照)が生じており、地盤、ボ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ボールの挙動を捉えることができる。

3. まとめ

アルミ製ボールを地盤中に埋め込み、根入れ深さを変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ボールに重錘を衝突させた場合の弾塑性解析を行い、アルミ製ボ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ボ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。ボ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ボ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

根入れ深さを変化させた実大アルミ製ボ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ボ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, 斎藤隆晴, 河西良幸他「木造家屋の外部耐震補強構法 その 1 金属製ボ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, 他「木造家屋の外部耐震補強構法 その 2 金属製ボ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ボールの衝撃解析と荷重-変位関係の算定」, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, 2006 年 12 月(掲載予定)
- 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撃実験」, 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

[2006 年 4 月 20 日原稿受理 2006 年 7 月 27 日採用決定]