

# 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突実験と解析

## IMPACT TEST AND ANALYSIS ON TUBES MADE OF STEEL OR ALUMINUM FOR OUTER REINFORCEMENT OF TIMBER BUILDINGS

河西良幸\*、澤本佳和\*\*、堀越清視\*\*\*、内田一義\*\*\*\*、武田幸和\*\*\*\*\*、大野友則\*\*\*\*\*

Yoshiyuki KASAI, Yoshikazu SAWAMOTO, Kiyomi HORIKOSHI, Kazuyoshi UCHIDA, Yukikazu TAKEDA, Tomonori OHNO

- \* 工博 鹿島技術研究所 建築技術研究部 上席研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
- \*\* 工修 鹿島技術研究所 建築技術研究部 主任研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
- \*\*\* 鹿島技術研究所 先端技術研究部 上席研究員 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
- \*\*\*\* 工博 新シーク研究所 主席研究員 (〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦1-1-1 横浜金沢ハイテクセンター)
- \*\*\*\*\* 新シーク研究所 代表取締役 (〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦1-1-1 横浜金沢ハイテクセンター)
- \*\*\*\*\* 工博 防衛大学校システム工学群建設環境工学科 教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

キーワード: 木造家屋、外部補強、模型実験、非線形有限要素法

(timber building, outer reinforcement, model test, elasto-plastic finite element method)

### 1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震においては、約9万棟の木造家屋が全壊、約10万棟が半壊し、6,000人以上の犠牲者の大部分が、これら倒壊建物の下敷きになって亡くなられた。倒壊した木造建物の挙動<sup>1), 2), 3)</sup>を見てみると、70%相当の木造家屋は一定の方向に倒壊し、二階家屋では一階が横から押しつぶされた形、いわゆる「足払い」を受けたように倒壊する現象(図-1参照)が生じた。神戸で記録した記録波等から、兵庫県南部地震の特徴<sup>4), 5), 6)</sup>として、強い横揺れと縦揺れが重なり、しかも加速度が大きい上、地動の速度も大きな値で、初期の激しい1波ないし2波が構造物に衝撃的な破壊を与えたことが原因と考えられる。建物が何回も揺れて最大変形を生ずる普通の地震と異なり、最初の大揺れでそのまま倒壊というパターンであると考えられる。

また、1999年にトルコ、ギリシャ、台湾で大地震が発生したが、将来このような大地震は再び日本のどこかで起きる可能性があり、筆者の内田、武田はそのような被害を最小限にとどめる手段がないかを検討した。その結果、兵庫県南部地震に見られた足払い倒壊現象を防止するためには木造家屋の周囲に

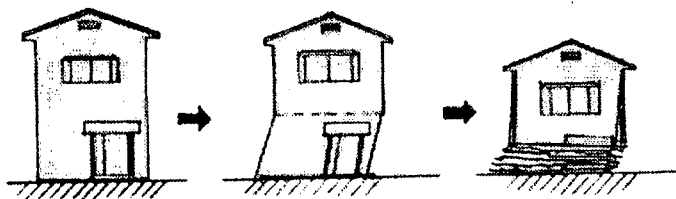


図-1 足払い倒壊現象の概念図

ポール(鋼管ないしアルミ管)を設置し、地震の際に家屋に横から加わる地震力をポールに負担させる「ポールアンカー」と名付ける外部補強構法(図-2参照)を考案した。その構法にはポールと木造家屋を緊結する場合(「タイト式」と称する)と非緊結で隙間を有する場合(「バウンド式」と称する)がある。タイト式は、木造家屋の周囲にポールを立て、建物の二階床位置で、スクリーボルト等を用いて緊結し、木造家屋の地震力をポールに負担させる方式である。このタイト式については、数学モデルに各種の地震波を入力した解析によって有効性を確認<sup>7)</sup>し、実建物への適用を開始している。

本報告では隙間を有するバウンド式の外部補強構法の成立性評価のために行った鋼管の衝突実験とそのシミュレーション解析結果について報告する。なお、ポールの材料として鋼材の他にアルミ材を用いることも考えられ、鋼管と同一の曲げ剛性を有

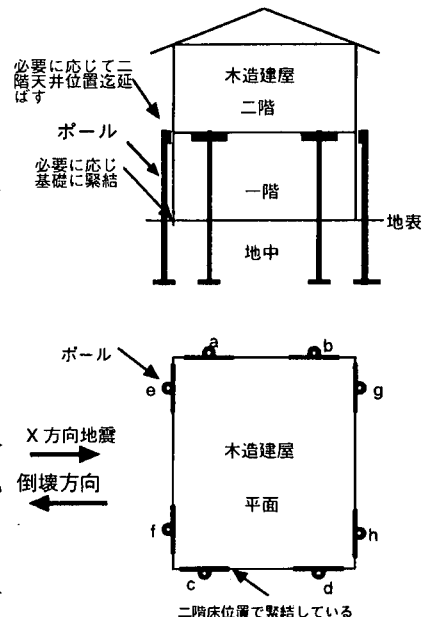


図-2 外部補強(タイト式)の概念

するアルミ管も取り上げ、その結果の一部についても報告する。

## 2. 外部補強構法の考え方と課題

本報告で対象とするバウンド式の外部補強構法は、木造家屋を緊結するという手間を省ける魅力がある。その代わりポールが木造家屋に隙間を持って設置されるために、木造家屋とポールとの衝突現象が生ずること、更に木造家屋がポールを押す場合にのみ有効性を発揮するので、タイト式に比べて少ない本数のポールで木造家屋の地震力に抵抗することとなる。自動車におけるガードレールに相当するものであり、その考え方や評価においては、防護柵の設置基準<sup>9)</sup>をヒントにしている。また、著者の内田、河西、堀越<sup>9)</sup>は、相互に隙間を持って配置した多数の黒鉛集合体を両側からリフレクターと称する支持構造で挟んで地震時安定性を確保する構造物の振動台実験や解析を行い、数学的モデルによる解析で十分現象を評価できることを既に報告している。

このバウンド式の外部補強構法では、木造家屋の二階床部分がある速度を持ってポールに衝突する現象となるので、次のような課題が考えられる。

- 1) ポールを弾性範囲に収めることは経済性から見て得策ではないので、塑性変形を考慮した設計とする。そのためにはポールへの木造家屋の衝突時の荷重条件を適切に設定し、鋼製やアルミ製のポールの最大応答変位や塑性変形能力を正確に評価することが必要である。
- 2) 建物規模、ポール数・断面及び地震波形・入力最大値が変化した場合のポールへの衝撃荷重を評価し、更にポールの最大変位や残留変形を正確に評価しうる解析手法を確立する必要がある。

## 3. 実験及び解析の目的

前記の課題を考慮して、バウンド式外部補強構法の成立性検討の第一段階として、鋼管とアルミ管を用いて縮尺模型衝突実験(図-3参照)を行い、各管の応答性状、最大変位・残留変位性状を実験的に把握するとともに、簡易的な方法や非線形有限要素法によってその性状をどの程度シミュレーションできるかどうかの検討を行った。本実験での衝突現象の特徴としては、筆者の河西や大野が扱ってきた、質量

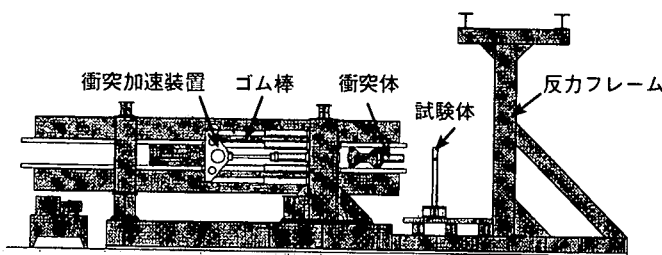


図-3 ゴムばねを利用した衝突実験装置

の大きな鉄筋コンクリートのような被衝突体に質量の小さな衝突体が100~200m/sという高速度で衝突する場合は異なり、質量の小さなポールに質量の大きな衝突体が1~2.5m/sという、地震による構造物の応答速度としては大きい、飛来物の衝突という面からは比較的低速で衝突するという現象を扱う点にある。

## 4. 実験対象試験体

### (1) 検討対象の木造建物、ポールと衝突条件

検討の対象とした建物は、建築延面積約60m<sup>2</sup>の総二階木造家屋(図-4参照)である。この家屋の四隅に図-2に示したように2本ずつのポールを合計8本配置することとする。想定した鋼種STK400の円形鋼管は外径216.3mm、厚さ8.2mm、高さ3.0mで、固有振動数は23.8Hzである。地震時に抵抗するのはその内の2本のポールであるので、ポールに衝突する質量が2階の14.3tの半分の7.2tとして、それが仮に1.0m/sの速度でポールに衝突するとした場合のポールの最大変位を簡易的な方法で評価してみると104mmである。簡易的な方法とは衝突体の運動エネルギー1/2mv<sup>2</sup>がすべてポールの弾性ひずみエネルギー1/2kx<sup>2</sup>に変換するとエネルギー保存の原理に基づくもので、その時のポールのせん断力は69kN、ポールの根元の軸方向応力は772N/mm<sup>2</sup>とJIS規定の降伏強度235N/mm<sup>2</sup>を3.3倍程度上回る状態となる。

図-4に示す、1階の層せん断力係数として0.1の耐力を有する木造家屋と弾性体のポールとの時々刻々の衝突を考慮した地震応答解析<sup>9)</sup>によると、神戸海洋気象台波(最大水平加速度818Gal、関西地震観測協議会による)が作用した場合の衝突点高さでのポールの最大変位(地動に対する相対変位)は66.3mmで、前記1.0m/s衝突時の最大変位104mmの0.64倍、ポール根元の軸方向応力は525N/mm<sup>2</sup>でJIS規

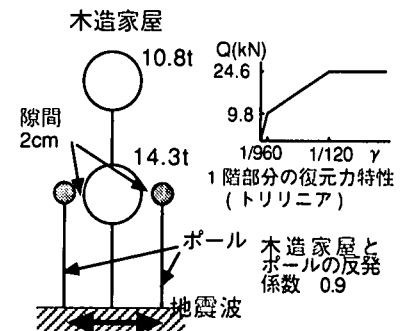


図-4 地震応答解析モデル

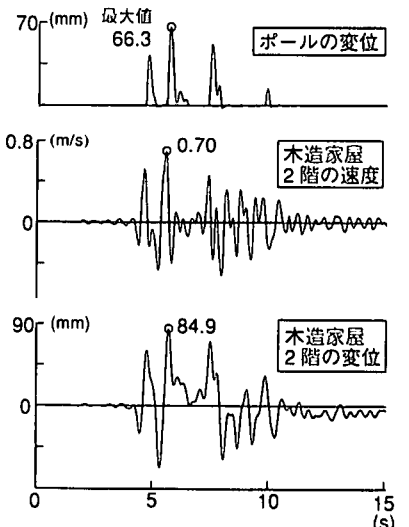


図-5 地震応答時刻歴波形の例 (神戸海洋気象台波)

定の降伏強度 $235\text{N/mm}^2$ の2.2倍、後述の材料試験(表-2参照)による降伏強度 $448\text{N/mm}^2$ の約1.2倍である。なお、木造家屋の2階の最大速度(地動に対する相対速度)は $0.70\text{m/s}$ で、ポールの無い建物の場合の2階の最大速度は $0.77\text{m/s}$ より約1割大きな値である。

以上のような検討を元に実験の衝突速度としては、ポールの塑性変形能力やそれを追跡するための解析手法の適用性を把握するため、神戸海洋気象台波による木造家屋2階の応答速度より2割程度大きな $1.0\text{m/s}$ を基本とし、更にそれより大きな $1.5\text{m/s}$ 及び $2.5\text{m/s}$ についても検討した。衝突回数は谷村らの見解<sup>9)</sup>や図-5に示すポールの変位の解析結果を参考に同一速度による3回の衝突を行うこととした。

## (2) 実験の相似則

本実験で扱う主要な物理力は慣性力と弾性力であり、通常の衝突実験<sup>10)</sup>で採用されている相似則と同一の表-1に示す相似則を採用した。

表-1 衝突実験及び高速載荷実験の相似則

パラメータ	次元	実物	模型
幾何学的縮尺率	L	l	s
長さ・変位	L	d	sd
質量	M	m	$s^3m$
時間	T	t	st
速度	$LT^{-1}$	v	v
応力	$ML^{-1}T^{-2}$	$\sigma$	$\sigma$
歪	L/L	$\epsilon$	$\epsilon$
歪速度	$T^{-1}$	$\dot{\epsilon}$	$s^{-1}\dot{\epsilon}$
加速度	$LT^{-2}$	a	$s^{-1}a$
力	$MLT^{-2}$	f	$s^2f$
エネルギー	$ML^2T^{-2}$	E	$s^2E$

算定すると $27.7\text{mm}$ である。その時のせん断力は $5.4\text{kN}$ 、ポールの根元の軸方向応力は $759\text{kN/mm}^2$ で、4.(1)に記した検討対象の実物のポールとは表-1に示す相似則に基づく関係がほぼ成立している。

## (4) アルミ管試験体

実験対象のアルミ管は、鋼管の曲げ剛性EI(但し、E:ヤング係数、I:断面2次モーメント)と同一な円形の管を選定することとし、A6063TE(質別T5)という外径 $80\text{mm}$ 、厚さ $3.0\text{mm}$ のアルミ押出管を選定した。ちなみに鋼管の $EI=3.67 \times 10^8 (\text{Nmm}^2)$ 、アルミ管の $EI=3.70 \times 10^8 (\text{Nmm}^2)$ で両者ほぼ等しい。

## (5) 材料試験結果

鋼管及びアルミ管の材料試験結果(3個の試験体の平均値)を表-2に示す。JISによる鋼管及びアルミ管の降伏点または耐力の規定値は各々 $235\text{N/mm}^2$ 以上、 $110\text{N/mm}^2$ 以上であるが、実験用の鋼管及びアルミ管とも降伏点がJIS規定値に比べてかなり高くなっていることが分る。

表-2 材料試験結果

	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	降伏点又は耐力 ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)	縦弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
鋼管	514	448	19.4	208,134
アルミ管	212	188	15	66,650

## 5. 衝突実験

### (1) 衝突方法

試験装置(図-3参照)は $0.7 \sim 20\text{m/s}$ の衝突速度が可能であるが、この実験では、4.(1)に述べたように、衝突体の速度として $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.5\text{m/s}$ の3レベルとし、残留変位状況を見るために、残留変位が残った状態で2、3回目の同一速度の衝突実験も行った。

なお、鋼管及びアルミ管の荷重-変形能力を把握するため、別途、高速載荷実験も行っている。

### (2) 計測項目

図-6に示すように衝突点の高さA点及び中間の高さB点の衝突方向水平変位をレーザー式変位計で、固定端近傍の管材軸方向ひずみ4点をひずみゲージで測定した。また、衝突実験後の衝突点の高さA点の累積残留変位を物差により測定した。

## 6. 衝突実験結果

$150\text{kg}$ の質量の衝突体を $1.0\text{m/s}$ で衝突させた場合の鋼管及びアルミ管のA点及びB点の応答変位の時刻歴波形を各々図-7及び図-8に示す。衝突体が鋼管及びアルミ管を押して大きく変形させた後、鋼管単体及びアルミ管単体が各々自由振動して鋼管及びアルミ管とも $2\text{mm}$ 程度の残留変位を生じて静止するに至っている。その状況は後に示す解析結果(図-15参照)によっても把握することができる。鋼管及びアルミ管のA点の最大応答変位は各々 $26.5\text{mm}$ 、 $25.0\text{mm}$

## (3) 鋼管試験体

前記の検討対象の鋼種STK400の円形鋼管の外径 $216.3\text{mm}$ 、厚さ $8.2\text{mm}$ 、高さ $3.0\text{m}$ を $1/3.6$ 縮尺した鋼管の中から既製のSTK400の鋼管として外径 $60.5\text{mm}$ 、厚さ $2.3\text{mm}$

の鋼管を選定し、図-6のような実験用試験体とした。衝突点高さは底部固定端より $800\text{mm}$ の位置としたが、鋼管の長さは実験時の安全確保を考慮して衝突点より $200\text{mm}$ 高い $1000\text{mm}$ とした。計算による固有振動数は $55.7\text{Hz}$ 、 $150\text{kg}$ の衝突体が $1.0\text{m/s}$ で衝突した場合の最大変位を前記のエネルギー保存の原理に基づいて

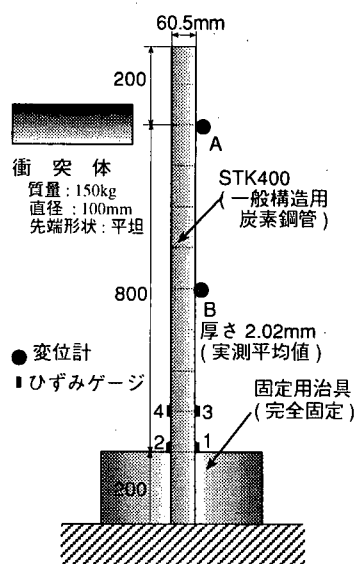


図-6 鋼管試験体と計測点

とほぼ同程度の値である。しかし、管単体の自由振動の減衰は鋼管は小さく、アルミ管はかなり大きいことが分る。また、鋼管の場合について衝突速度を1.5、2.5m/sと増加させた場合の1回目の衝突によるA点の応答変位の時刻歴波形を図-9に示す。衝突速度の増加とともに、衝突体が鋼管から離れ鋼管単体の自由振動が始まるまでの時間が、衝突速度の増加

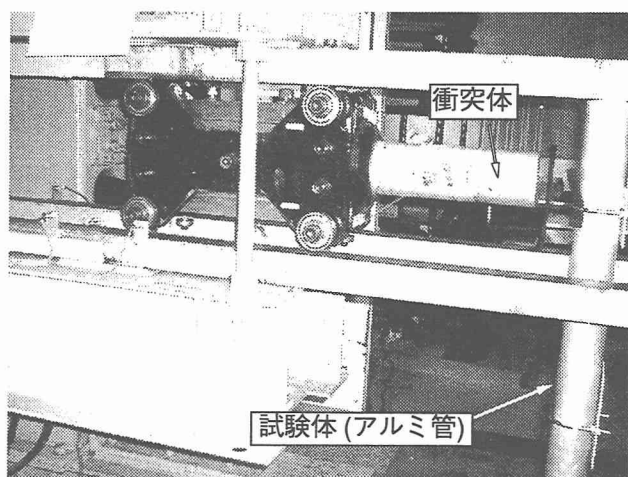


写真-1 衝突体と試験体

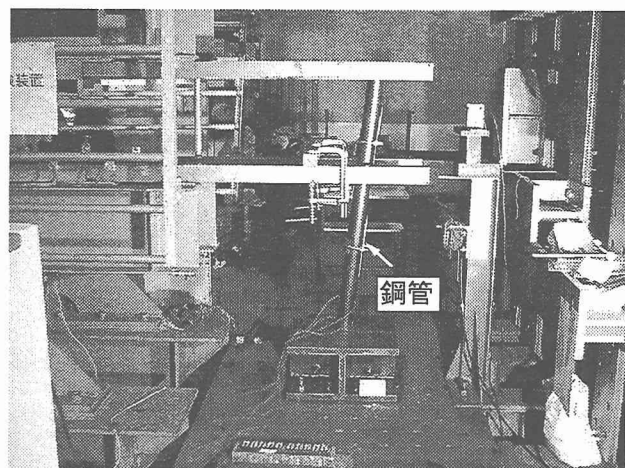


写真-2 鋼管 2.5m/s の1回目衝突終了後の状況

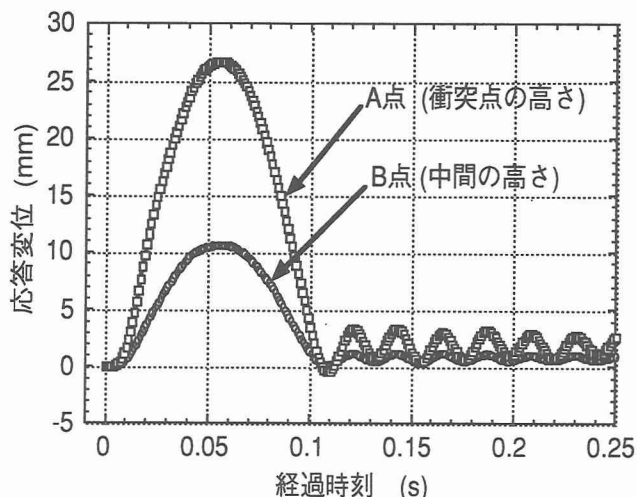


図-7 鋼管の応答変位 (衝突速度1m/s、1回目)

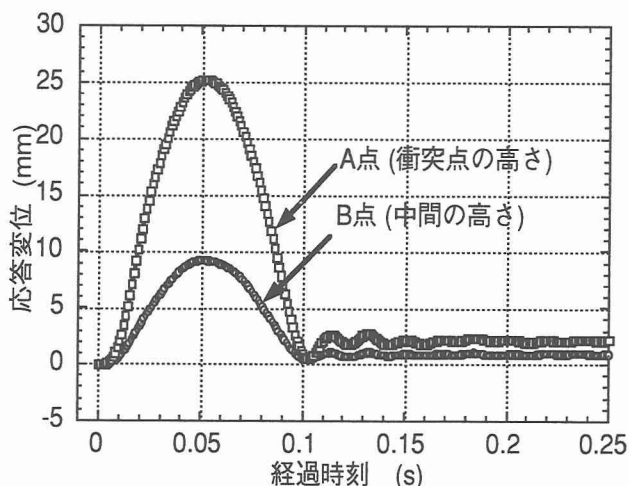


図-8 アルミ管の応答変位 (衝突速度1m/s、1回目)

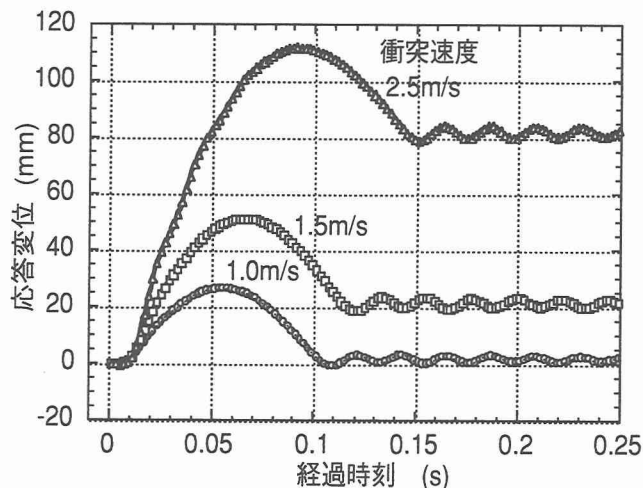


図-9 鋼管A点の応答変位 (衝突速度3レベル)

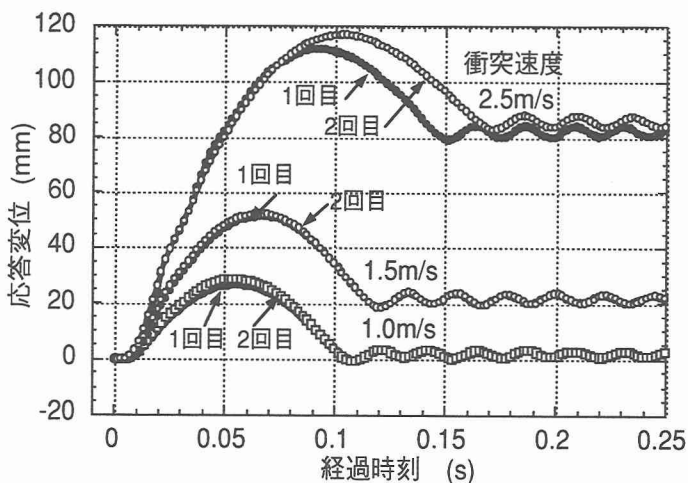


図-10 鋼管A点の応答変位 (1回目と2回目の衝突の比較)

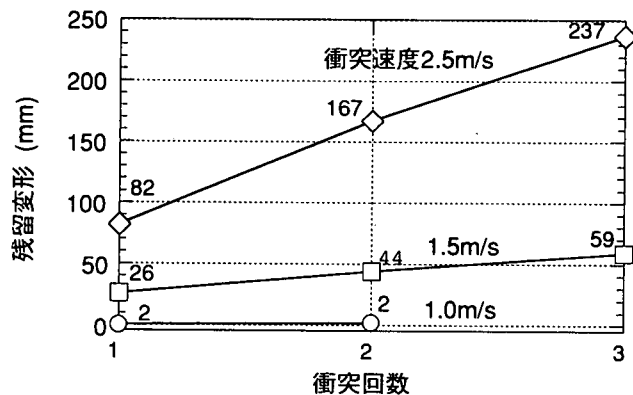


図-11 鋼管のA点の残留変位

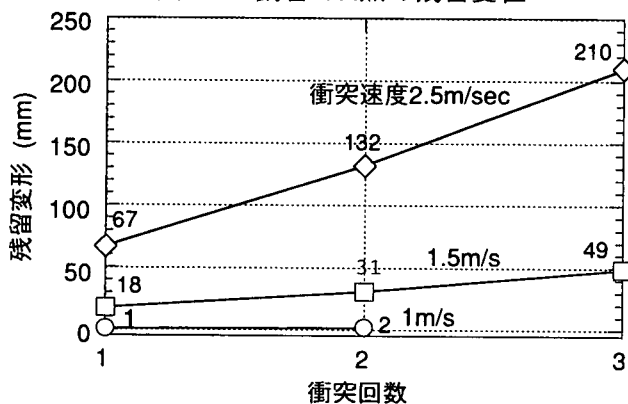


図-12 アルミ管のA点の残留変位

2回目の変位とは1回目の残留変位位置からの変位である。1回目の衝突によって鋼管は残留変位を生じるが、2回目の衝突では、初めて衝突を受けた1回目の場合とほとんど差がない応答変位を示している。鋼管とアルミ管の累積の残留変位について衝突回数を横軸に取って示すと、各々図-11、図-12のようになる。残留変位は衝突回数の増加にほぼ比例して増加し累積していくことが分る。

鋼管やアルミ管の最大変位について4.(1)に示したエネルギー保存の原理に基づく簡易的な方法でチェックした。1.0m/sで衝突させた場合の衝突点高さA点での最大変位の予測値は、材料試験値と測定厚さをを用いた場合、鋼管では27.8mm、アルミ管では25.8mmである。実験によると、鋼管では26.5mm、アルミ管25.0mmであるので、極めて良い一致を示し、エネルギー保存則が成立していると判断できる。なお、その算定法によると最大変位 $x$ は衝突体(質量 $m$ )の速度 $v$ に比例する( $x = v\sqrt{m/k}$ )が、衝突体の速度 $v$ が大きくなると、パイプが塑性域に入ればね $k$ が低下してくるので、図-9に示したように実験での変位が速度の比率より大きくなっていくと判断される。また、衝突回数を重ねても衝突速度が同じであれば最大変位はほぼ同じ結果であったが、別途実施している高速載荷実験の結果を参照すると、2.5m/s程度の衝突速度の応答変位では、鋼管の降伏点を超えていても耐力を十分に保持しているので、残留変位が累積することはあっても、図-10に示すように各

回の衝突による最大変位にはほとんど差が生じないと考えられる。

## 7. 非線形有限要素法によるシミュレーション解析

鋼管の材料的非線形性を考慮した有限要素法(LS-DYNA<sup>11)</sup>)によるシミュレーション解析を行った。鋼管の解析モデルを図-13に示す。

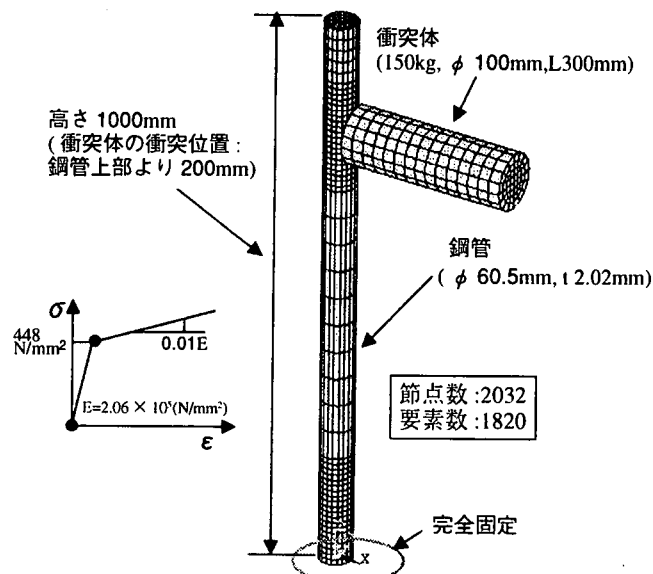
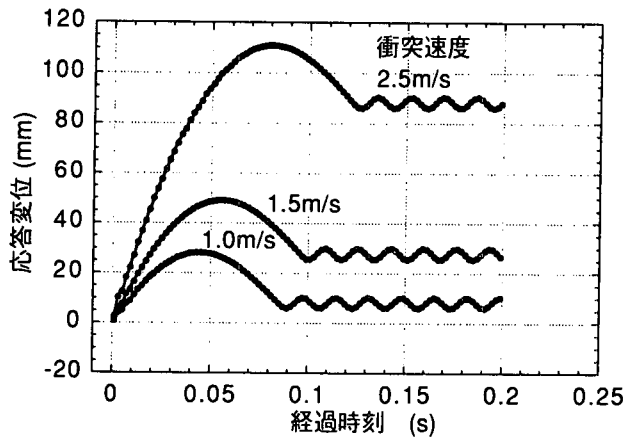


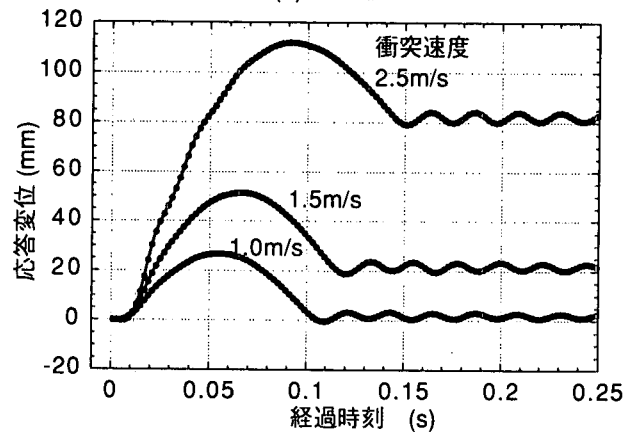
図-13 鋼管の解析モデル

鋼管はシェル要素とし、図-13中に示すように鋼材の応力ひずみ関係としてBi-Linearでモデル化している。衝突体はソリッド要素の弾性体としてモデル化し、試験装置の条件と整合するように衝突する方向以外の変位を拘束したモデルとした。解析と実験による衝突点Aの応答変位の時刻歴波形を比較して図-14に示す。図-14によると、残留変位については解析値の方が実験値よりやや大きい傾向にあるが、衝突速度の増加とともに応答の周期や最大変位が増大する性状や最大変位の大きさは実験と解析で極めて良く対応していることが分る。特に、衝突速度2.5m/sの場合には、衝突点高さのA点では100mmを超える最大変位を生じ、更に残留変位も82mmにも及ぶが、解析によって実験時の性状を良く捉えていると考えられる。なお、アルミ管についても同様な比較検討<sup>7)</sup>を行い、鋼管の場合と同様な対応関係を示している。

また、衝突体と鋼管の挙動を衝突速度2.5m/sの場合について図-15に示す。この図は相当応力の分布をカラーで示したものであるが、本報告では白黒表示で応力の挙動を表現しきれないので、動的挙動について述べる。図-15に示すように、衝突体が鋼管を押している0.02、0.05、0.10sの状態では、鋼管と衝突体が一体となって挙動するので、鋼管の振動に寄与する質量が非常に大きくなり、その結果、振動周期



(a) 解析値



(b) 実験値

図-14 解析と実験による鋼管のA点の応答変位の比較

が、鋼管単体の固有周期よりも非常に長くなっているが、衝突体が離れた0.13s以降では、鋼管単体の周期で自由振動する挙動を理解することができる。

## 8. まとめ

以上の検討から主要な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 入力速度が1m/s程度の範囲の大きさならば運動エネルギーと歪エネルギーが一致するとエネルギー保存則により、衝突条件下のポールの最大変

位を簡易に予測できる。

- (2) 1.5m/sを超える大きな衝突条件下においては非線形有限要素法を適用すれば、最大応答、座屈性状、残留変位の状態をかなり正確に評価できる。
- (3) 木造家屋とポールの衝突を含む地震時挙動も解析できるので、様々な建物条件、ポール数・断面、ポールと木造家屋の隙間、地震入力条件に応じた耐震補強効果を評価できる。
- (4) 以上よりポールの埋め込み深さを十分に取ってポール下部の固定度を確保できればバウンド式外部補強構法は木造家屋の倒壊を防止できる有効な補強法となりうると判断される。

本実験の実施に協力いただいた防衛大学の藤掛一典博士、上林勝敏氏、アルミ管を提供いただいた新日軽株式会社の諸橋雅晴博士、実験結果の評価に有益な助言をいただいた鹿島技術研究所の小林俊夫博士に感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 松田高明他「1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向」、地質学論集、第51号、pp.67-77、1998年3月
- 2) 後藤正美他「一方向水平加力実験による実在木造建物の耐震性能の検討」、日本建築学会構造系論文集 第506号、pp.147-154、1998年4月
- 3) 村上雅英他「阪神淡路大震災における木造建物の倒壊原因に関する考察」、日本建築学会構造系論文集 第523号、pp.95-101、1999年9月
- 4) 谷村真治「衝撃的破壊」、科学、Vol.67、No.6、pp.420-423、1997年6月
- 5) 朝日新聞(95年3月31日)、「一気に大揺れ『衝撃地震』、足払い、地盤のずれ直接作用か」
- 6) 家村浩和「橋梁の被害と復旧・補強」、安全工学、Vol.34、No.6、pp.426-435、1995年6月
- 7) 内田一義他「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、その2. 金属製ポールを非緊結にした場合」、日本建築学会大会(東北)、2000年9月
- 8) 日本道路協会「防護柵の設置基準・同解析」、1998年11月
- 9) 武藤清、河西良幸、内田一義、堀越清規他「高温ガス炉炉心の一次元振動実験とシミュレーション解析」、第4回日本地震工学シンポジウム、pp.759-766、1975年11月
- 10) 坪田張二、河西良幸他「縮尺模型と実物による鉄筋コンクリート板の衝撃実験と解析」、第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集、pp.157-162、1996年5月
- 11) Livermore Software Technology Corporation、日本総合研究所「LS-DYNA Version 940 Users Manual」、1997年6月

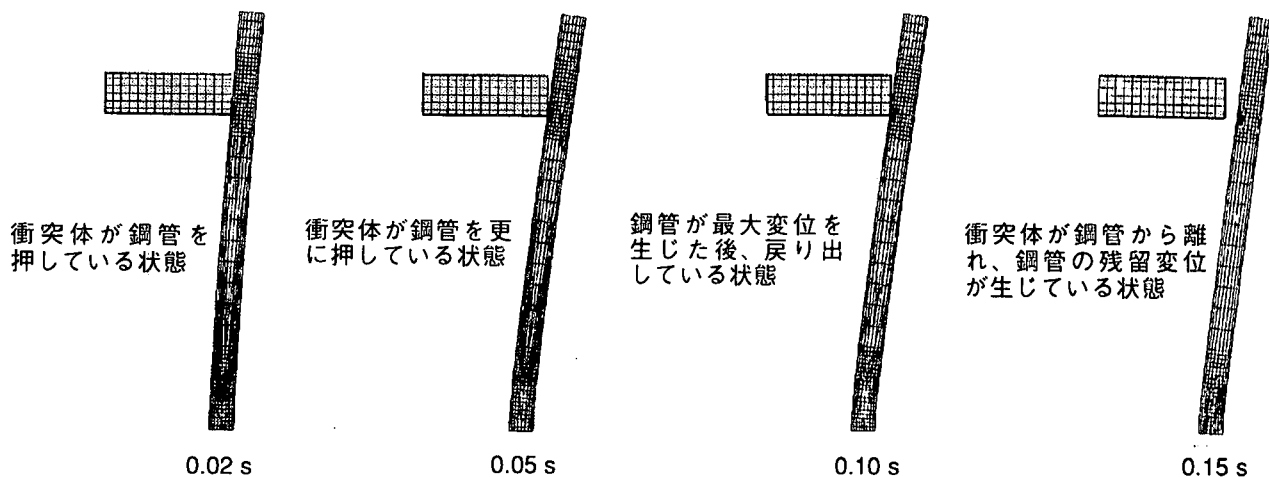


図-15 解析による衝突体と鋼管の挙動(衝突速度2.5m/sの場合)