

地震時における建物倒壊挙動の解明

京都大学大学院工学研究科 正会員 清野純史
 京都大学大学院工学研究科 正会員 Charles Scawthorn
 国土交通省 正会員 ○ 原口祐子

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では、全壊戸数が約 10 万 5 千戸、半壊戸数が約 14 万 4 千戸にものぼり、死者 6,433 名、負傷者 43,782 名に及んだ。死傷者の多くは、建物の倒壊による圧死・窒息死であった。このような人的被害を軽減するためには、建物の倒壊過程を知ることが重要である。したがって本研究では、3次元個別要素法（以下 DEM）を用いて地震時における建物の破壊挙動シミュレーション¹⁾を行い、地震時の揺れを受けた建物がどのような挙動を示し、破壊に至るのかを検討する。

2. DEM

DEM とは、個々の要素ごとに独立した 2 階常微分の運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域で前進的に解くことにより要素の挙動を追跡し、その集合体としての動的挙動を解析しようとするものである。各要素間には仮想のばねとダッシュポットがあり、要素に作用する力はこれらのばねとダッシュポットを介して伝達される。本研究では、梁と柱・梁と梁の間の引張抵抗を表現するためジョイントを導入している。初期状態では各要素はジョイントによって結合されており、建物全体は連続体としての挙動を示すが、ジョイントの引張抵抗を超える強い力によって一度ジョイントが切れるとその後はばらばらな単体として運動する。

3. 要素実験

実際の構造物において、ほぞまたは釘等で接合されている部分は、解析においてはジョイントによって繋がれている。このジョイントのパラメータを求めるために、ほぞ部分の実験を行った。

実験は引き抜き試験、せん断試験、モーメント試験の 3 種類を行い、引き抜き試験、せん断試験で得られた力と変位の関係から法線、接線方向のばね定数を求め、その値を用いてモーメント試験の解析を行い、実験結果と比較したところよく一致した（図 1）。

4. 模型振動台実験

DEM による解析が実際の振動過程を精度よく再現できるかを確かめるため、1/5 の模型を作成し振動台実験を行った。模型は屋根を除き全てほぞで接合されている。入力は、損傷による長周期化を考慮して、あらかじめ調

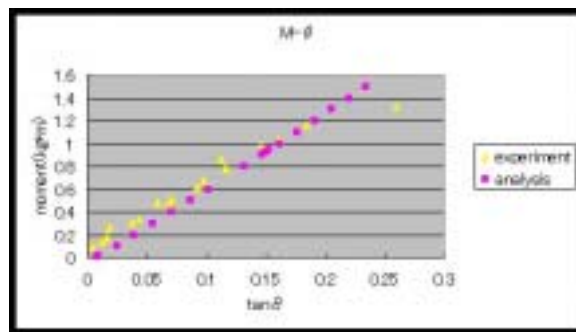


図1 モーメント試験

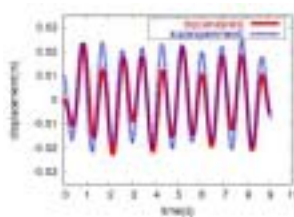


(a)実験モデル

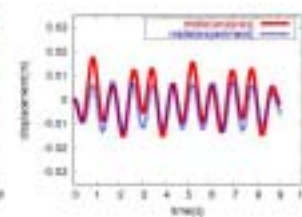


(b)解析モデル

図2 モデル



(a)2階桁



(b)1階柱

図3 結果の比較

べておいたモデルの固有周期（0.42 秒）より長い 1 秒の sin 波とした。

結果の比較は、振動の最中と倒壊過程の 2 パターンで行った。振動最中のパターンでは、撮影したビデオから振動台の速度、2 階桁と 1 階柱の相対変位を求めた。得られた振動台加速度を入力として解析し、それぞれの階の相対変位の値を実験結果と比較すると、ほぼ一致した（図 3）。

一方倒壊過程のパターンは、実験では加速度・変位ともに測定不能であったため、1 秒の sin 波の振幅を徐々に大きくして解析したところ、300gal となったところで倒壊した。数値シミュレーションでは、片側に傾き、

表1 要素の密度

case	屋根	家具床	壁	case	屋根	家具床	壁
1	1	×	×	8	2	×	×
2	1	1	×	9	2	4	×
3	1	4	×	10	2	4	○
4	1	4	○	11	1	10	○
5	1	10	×	12	5	4	○
6	5	×	×	13	2	4	密度4倍
7	5	4	×	14	1	10	ジョイント3倍



(a)壁無し

(b)壁あり

図4 実構造物モデル

1 階の柱が破壊されて倒れるという実験結果の特徴を表現できていた。

5. 実大構造物のシミュレーション

前節の結果を踏まえ、実際に販売されている木造 2 階建て住宅を参考にモデル化し、阪神大震災と新潟県中越地震で記録された加速度波形を入力として、実構造物の地震時挙動シミュレーションを行った。

屋根や床の重量、壁の有無などを変化させ各入力につき 14 ケースを解析した。表 1 に case2 を標準とした各要素の密度を示す。case1 が一般的な屋根の重量、case5 の家具・床の重量が構造計算の設計基準値となっている。

case5、case11 と case14 において神戸を入力した場合の層間変位の比較を図 8 に示す。case5 と case11・case14 とは揺れの周期が異なっており、壁の設置による固有周期の変化が見られる。応答は case5>case11>case14 と小さくなっており、被害でも case5 は完全崩壊、case11 は一部破壊、case14 は壁の剥離のみという結果であった(図 5-7)。このことから、壁や筋交いの設置や、接合部の改良で被害が軽減されることがわかる。

その他のシミュレーションも含めて解析結果をまとめると、

- ◆ 床や屋根が重いと被害は大きくなる。
- ◆ 柱が少ない箇所では破壊が生じやすい。
- ◆ 壁を設置することで倒壊を免れたケースがあった。
- ◆ 壁の接合が良いと被害は軽減される。



図5 case5(神戸)



図6 case11(神戸)



図7 case14(神戸)

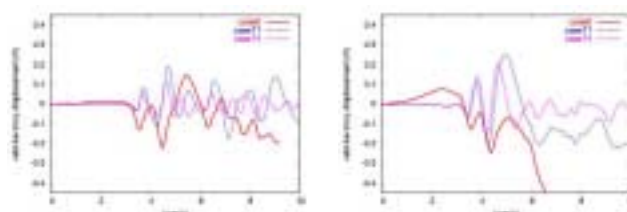


図8 層間変位の比較

以上のことは、実際の被害調査でも確認されており、DEM による実構造物のシミュレーションは実際の被害をよく再現できていると思われる。

6. 結論

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 要素実験で求めたパラメータを用いたDEM解析は、静的実験を精度よく再現する事ができた。
- 1/5 木造模型の振動台実験結果とDEMによるシミュレーション結果はよく一致し、DEMによる解析の精度の高さを証明した。
- 実構造物のシミュレーションは実際の地震被害状況を再現できている。

参考文献

- 1) Junji Kiyono & Aiko Furukawa : Casualty occurrence mechanism in the collapse of timber-frame houses during earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.33, issue12, pp.1233-1248, 2004.