

地震時における墓石の動的挙動の検討

日本石材産業協会 井口 健二 京都大学 正会員 清野 純史
九州大学 正会員 古川 愛子 飛島建設(株) 正会員 ○三輪 滋

1. はじめに

地震時の墓石の動的挙動は、滑りやロッキングを伴う非線形性の強い複雑な現象であるため、幅と高さの比率から一意に決定される静的な転倒基準に従うとは限らない。来たる大地震に備えて地震に強い墓石の形状、および有効な耐震補強対策について検討するためには、様々な形状を有する墓石がどのようなメカニズムによって地震時に転倒に至るののかを知ることは非常に重要である。本研究では、振動台実験から解析諸元を決定した後、著者らによって開発された個別要素法プログラム¹⁾を用いて、墓石の地震時挙動をトレースし、結果を可視化情報として出力することにより、各々の墓石の転倒メカニズムを明らかにする。

2. 解析手法

本研究では、3次元個別要素法を用いて墓石の地震時動的挙動の解析を行った。図1に示すように、個別要素法とは、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を介して伝達される。解析で必要となる接触パラメータ等の解析諸元は、振動台実験の結果をうまく再現しうる値を採用した。解析諸元を表1に示す。

3. 解析モデル

和型墓石については幅に対する高さの比、洋型墓石については奥行きに対する高さの比をパラメータにとり、それぞれ5モデルについて検討を行った。これらを図2、表2に示す。入力地震動としては、図3に示すように、1995年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された加速度波形の3成分を用いた。

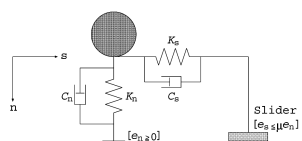


図1 接触モデル



図2 墓石モデル(左：和型、右：洋型)

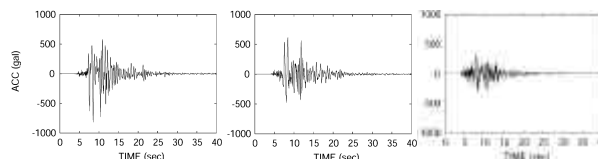


図3 入力地震動(左から、NS,EW,UD 成分)

表2 解析ケース (左：和型、右：洋型)

表1 接触パラメータ

法線方向の接触ばねのばね定数	$K_n(N/m)$	3947.8
接線方向の接触ばねのばね定数	$K_s(N/m)$	1579.1
法線方向の接触ダッシュポットの減衰係数	$C_n(N \cdot sec/m)$	125.66
接線方向の接触ダッシュポットの減衰係数	$C_s(N \cdot sec/m)$	50.265
動摩擦係数	μ	0.438

モデル	竿		上台		中台		下台		モデル	竿		上台		下台	
	高さ	幅	高さ	幅	高さ	幅	高さ	幅		高さ	幅	奥行き	高さ	幅	奥行き
1	24								1			12			
2	22								2			11			
3	20	8	9	14	10	20	5	28	3	16	20	10	7	25	15
4	18								4			9			
5	16								5			8			

4. 1995年兵庫県南部地震における墓石の転倒挙動の再現

和型墓石について、幅高さ比の両極端であるモデル1と5の挙動を図4、図5に示す。水平面内の回転を伴いながらロッキング現象を示し両モデルとも竿が転倒した。幅高さ比の大きいモデル1の方がロッキングし始める時間が早いことがわかる。洋型墓石についても、幅高さ比の両極端であるモデル1と5の地震時挙動を図6、図7に示す。シミュレーション結果から転倒のメカニズムを探ると、洋型の場合は、上台に対する竿の、または下台に対する上台の相対変位が大きくなり、竿または上台が滑り落ちる形で転倒に至っている。ロッキングにより転倒に至った和型と違い、洋型の転倒メカニズムは滑りによる過大な変位によるものである。

転倒し始める時間を和型と洋型とで比較すれば、和型では地震動が最初に大きなピークを迎える7～8秒台で転倒し始めるのに対し、洋型では10～11秒台と、和型に比べて遅い。地震動の最初の大きな加速度でロッキング転倒を起こさない洋型墓石は、地震動による水平力が摩擦力を上回れば水平面内で滑り始め、過大な変位が生じた場合は、下の台の端から落ちてしまうということである。

5. 地震動強さと墓石の転倒現象との関係

最大加速度を示すNS方向の最大加速度を100galから1000galまで100galきざみで振幅調整を行い、地震動強さと転倒挙動の関係について、墓石の寸法をパラメータに検討を行った。地震動の作用方向として、(a)NS方向1成分、(b)水平動2

キーワード 墓石、地震時挙動、3次元個別要素法

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設(株) 技術研究所 TEL:04-7198-7553

成分、(c)水平上下動 3 成分の 3 通りの解析を実施した。卓越する NS 成分以外の成分については、NS 成分と同じ比率で振幅調整を行った。シミュレーション結果を表 3 に示す。最大加速度の増加とともに、被害の程度が大きくなる傾向が見て取れる。

和型墓石では、1成分入力では、モデル1, 2, 3は500galで、モデル4では700galで、モデル5では800galでそれぞれロッキングにより転倒しており、ロッキングによる転倒には幅高さ比が非常に強い相関を持っていることがわかる。2成分入力では、モデル1, 2, 3は500galで、モデル4, 5は600galで転倒に至っている。3成分入力の場合は、5モデルともに500galで転倒に至っている。兵庫県南部地震で転倒を起こす和型墓石では、上下動を考慮することにより被害が大きくなっている。

洋型墓石では、過大な水平変位によって転倒に至る為、幅高さ比と被害の相関は確認されていない。1方向入力の場合、モデル1, 3, 4, 5は800galで、モデル2は1000galで転倒に至っている。また、モデル1が2成分入力においては500galで転倒するのに3成分入力では転倒しないことからわかるように、過大な水平変位によって転倒に至るケースでは、上下動によって必ずしも被害が大きくなるわけではない。これは、上下動によって瞬間的に台が宙に浮いたときに台との摩擦が無くなり、地面からの地震動が伝わらなくなり、水平変位が抑制されるためであると考えられる。

6. 転倒基準

図8は、最大加速度を指標にして、墓石の転倒基準をまとめたものである。青線は静的な水平外力が作用したときの転倒基準であり、幅高さ比から一意に決めることができる。しかし、動的な水平外力(1成分)が作用する場合には一般にはこの基準には従わず、赤線のように上方にシフトした状態、すなわち転倒しにくい状態に遷移する。また、特に幅高さ比の小さい洋型の場合には、700galを超えると台から滑落して転倒に至るケースが多い。一方、実現象と同じ3成分入力を考えると、幅高さ比がほぼ2~3程度の和型の場合には、400galを超えるとロッキングによる転倒に至り、幅高さ比がほぼ1.3~2程度の洋型の場合には500galを超えると滑りによる転倒に至ることがわかる。

7. まとめ

解析結果から、和型墓石よりも、高さが低い洋型墓石の方が転倒しにくいことがわかった。和型墓石の転倒メカニズムは、ロッキングによる転倒であるため、幅高さ比に強く支配される。地震に強い墓石にするためには、幅高さ比の小さい竿を選択する必要がある。また、竿が低くなればロッキングに対する抵抗力が強まり、その転倒メカニズムは、洋型と同じく滑りによる過度な水平変位による転倒へと遷移すると考えられる。この場合は、幅高さ比は明確な影響を持っていないことがシミュレーション結果より明らかになったので、形状の検討よりも、竿や上台が滑り落ちないような対策を行うことが重要であると考えられる。

参考文献

1) J. Kiyono, A. Furukawa: Casualty occurrence mechanism in the collapse of timber-frame houses during an earthquake, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.33, pp.1233-1248, 2004



図4 和型モデル1の地震時挙動（左から,7.8秒,8.2秒,9.0秒後）



図5 和型モデル5の地震時挙動（左から,7.8秒,8.2秒,9.0秒後）



図6 洋型モデル1の地震時挙動（左から,9秒,10秒,11秒後）



図7 洋型モデル5の地震時挙動（左から,9秒,10秒,11秒後）

表3 シミュレーション結果

最大加速度 () の中は計測震度		和型墓石					洋型墓石				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
100 gal	水平動1成分	(4.66)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(4.83)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3成分	(4.83)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
200 gal	水平動1成分	(5.27)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(5.43)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3成分	(5.43)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
300 gal	水平動1成分	(5.62)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(5.78)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3成分	(5.78)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
400 gal	水平動1成分	(5.87)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(6.03)	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3成分	(6.03)	△	△	△	△	△	△	△	△	△
500 gal	水平動1成分	(6.06)	×	×	×	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(6.23)	×	×	×	△	△	△	△	△	△
	3成分	(6.23)	×	×	×	×	△	△	△	△	△
600 gal	水平動1成分	(6.22)	×	×	○	○	○	○	○	○	○
	水平動2成分	(6.38)	×	×	×	×	×	×	△	△	△
	3成分	(6.38)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
700 gal	水平動1成分	(6.35)	×	×	×	×	○	△	△	△	△
	水平動2成分	(6.52)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	3成分	(6.52)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
800 gal	水平動1成分	(6.47)	×	×	×	×	×	△	△	△	△
	水平動2成分	(6.63)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	3成分	(6.63)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
900 gal	水平動1成分	(6.57)	×	×	×	×	×	△	△	△	△
	水平動2成分	(6.73)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	3成分	(6.74)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
1000 gal	水平動1成分	(6.66)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	水平動2成分	(6.83)	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	3成分	(6.83)	×	×	×	×	×	×	×	×	×

○： 静止状態を保つ
△： 転倒しないが水平面内で変位を生じる
—： 滑りによる過度の水平変位によって転倒に至る
×： ロッキングにより転倒に至る

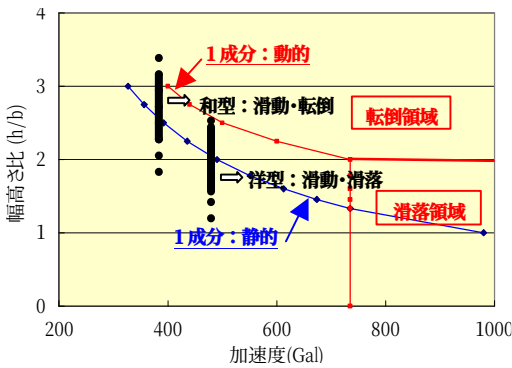


図8 シミュレーション結果