

心棒の寸法が墓石の地震時挙動に及ぼす影響の解析的検討

京都大学 正会員 ○清野 純史 九州大学 正会員 古川 愛子
飛鳥建設(株) 正会員 三輪 滋

1. はじめに

心棒を挿入して石材間を連結する墓石の耐震補強法(ダボ工法¹⁾)は、心棒の寸法・設置方法に関する規定が無く、経験に基づいた様々な施工法が各地で行われている。先に行われた振動台実験²⁾により、寸法と長さによって連結効果と転倒モードが異なることが明らかとなった。本研究では、3次元個別要素法によって、心棒の最適な寸法について検討した。

2. 墓石試験体モデル

表1に墓石モデルの分類を示す。上の石から順に、棹石、上台、中台、芝台と呼ばれる。モデル1は図1(a)に示す無補強のモデル、モデル2は図1(b)に示す直径18mm/長さ400mmの心棒1本で連結したモデル、モデル3は直径10mm/長さ150mmの心棒1本で連結したモデルである。

3. 入力地震動

本研究では、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記録の位相特性と、設計などに用いられる加速度応答スペクトル³⁾⁴⁾を用いて水平・上下動の模擬地震動を作成した。作成した加速度時刻歴波形を図2に示す。加速度レベルを調整して、震度6弱、6強、7の地震動を作成した。表2に各震度の入力地震動の最大加速度を示す。

4. 振動台実験により明らかとなった心棒の寸法が耐震性に及ぼす影響

各試験体の転倒状況を表3に示す。心棒で補強することにより、震度6強時の棹石の転倒を防ぐことができるが、さらに強い震度7では棹石と上台が一体となって転倒に至った。心棒の寸法に関係なく転倒の有無は同じ結果となったが、加振中の挙動は心棒の寸法により異なった。太く長い心棒を用いた場合は、棹石と上台の連結効果が発揮され、棹石は単独の運動を起こさず、一体となって移動・転倒した。一方、心棒が細く短い場合は連結が不完全で、棹石が上台に対しロッキングと回転の相対運動を起こし、心棒が抜け出そうなほど激しかった。この不完全な連結は、心棒が細いからなのか、それとも短いからなのか、振動台実験結果からは推測できない。そこで、個別要素法による数値シミュレーションによって、直径と長さが転倒モードに与える影響について検討する。

5. 直径と長さの異なる心棒で補強された墓石のシミュレーション

(1) 振動台実験結果の再現

3次元個別要素法⁵⁾により、各モデルの地震時挙動を再現し、振動台実験結果との比較を行った。解析で用いた接触パラメータを表4に示す⁵⁾。計算時間間隔は 1×10^{-4} (sec)とした。

a) モデル1

キーワード 墓石、耐震補強、心棒、最適寸法、3次元個別要素法

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科 TEL: 075-383-3250

表1 墓石モデルの分類と各石の寸法・重量(長さの単位: mm)

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	棹石	上台	中台	芝台	水鉢
1	なし	-	W636 × D636 × H242	W424 × D424 × H273	W606 × D606 × H303	W848 × D848 × H152	W484 × D152 × H272
2	1本	d18 L400					
3	1本	d10 L150	108kg	142kg	322kg	315kg	46kg

(d: 直径, L: 長さ, W: 幅, D: 奥行き, H: 高さ)

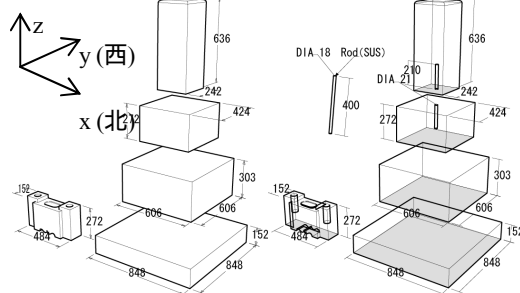


図1 墓石試験体の概要(単位 mm)

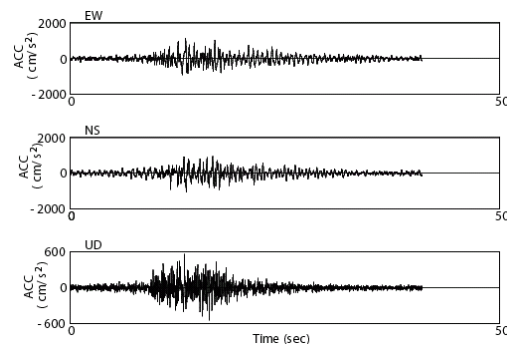


図2 模擬地震動の加速度波形

表2 各震度に対する入力波の最大加速度(gal)

計測震度	震度6弱	震度6強	震度7
x方向	553	894	1170
y方向	484	818	1049
z方向	279	468	733

表3 試験体の転倒状況

モデル名	心棒本数	心棒寸法	震度6弱	震度6強	震度7
1	なし	-		×	×
2	1本	d18/L400			×
3	1本	d10/L150			×

○: 変化なし : 変位・ずれ ×: 転倒

図3に、震度6弱、6強、7加振後のモデル1の様子を示す。解析では、震度6弱では棹石が上台の上で滑りながら回転したものの転倒には至らず、震度6強、7では棹石がロッキングして倒壊するという結果になり、表3に示す実験結果に一致した。

b)モデル2

図4に解析結果を示す。震度6弱、6強では棹石と上台が一体となって中台上で僅かに滑るものの転倒には至らず、震度7では棹石が上台と一体となって中台から滑り落ちるという結果になった。これは、表3に示した振動台実験結果と一致しており、倒したケースの転倒メカニズムも実験結果と一致している。

c)モデル3

図5に解析結果を示す。震度6弱では転倒せず移動量も小さいことが、震度6強では心棒によって上台と連結されているにも関わらず棹石が上台の上でロッキングしている様子が再現できており、実験結果に一致した。震度7では心棒が抜けて棹石のみが転倒した。これは実験の転倒モードとは異なるものであるが、実験時、棹石のロッキングは心棒が抜け出そうなほど激しかったことから、解析結果は妥当であると判断した。

棹石が心棒から抜け出て転倒に至るメカニズムを図6に示す。棹石が心棒とともに飛び上がり(図6(a))、心棒が外れた後、心棒の上に被さろうと棹石が元に戻るときに、心棒の先端が棹石の穴以外の底面に引っかかり(図6(b))、その反動とその後の地震動により棹石が転倒に至る(図6(c))というものであった。うまく棹石が心棒の上に被さるかどうか、転倒モードを分ける。

(2) 直径と長さの異なる心棒で補強された墓石の地震時挙動

表5に示す直径18mm、10mmの心棒の長さを変えたモデルについて、震度7を入力した数値解析を実施した。

表5に転倒モードの判定結果を図7に転倒後の様子を示す。いずれも転倒に至ったことに違いないが、心棒の寸法によって転倒モードが異なることが解析によっても確かめられた。直径が18mmと太い心棒を用いる場合は、150mmの短い心棒で連結効果が得られること、直径が10mmと細い心棒を用いる場合は、連結効果を発揮するには250mm以上の長さが必要であることがわかった。施工性から、棹石を人力で持ち上げられる心棒の方が適切と考えられることから、直径の大きい18mmを用いて心棒長さを150mmと短くするのがよいと考えられる。

6. まとめ

3次元個別要素法を用いた数値解析により、心棒の直径・長さの違いが地震時挙動に及ぼす影響について検討を行った。

参考文献 1)日本石材産業協会、飛島建設(株)：地震に強いお墓に関する研究(実験編)、2006年 2)三輪滋他：心棒の寸法・本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の実験的検討、第63回土木学会年次学術講演会、2008年 3)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編、2002年 4)日本電信電話公社：通信装置等の耐震試験方法、1998年 5)古川愛子他：物理シミュレーションによる兵庫県南部地震時の墓石の転倒メカニズムの解明、地域安全学会、No.7、pp.221-230、2005年

表4 接触パラメータ(単位質量あたり)

ばね定数(N/m/kg)		減衰係数(N・sec/m/kg)		摩擦係数
法線方向	接線方向	法線方向	接線方向	
3947.8	1579.1	125.66	50.265	0.438



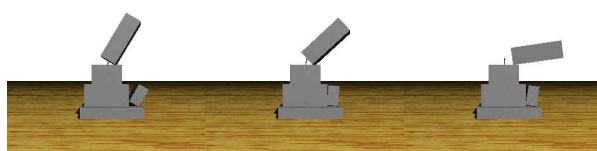
図3 モデル1の解析結果(左から、震度6弱、6強、7後)



図4 モデル2の解析結果(左から、震度6弱、6強、7後)



図5 モデル3の解析結果(左から、震度6弱後、6強中、7後)



(a)16.4秒後 (b)16.6秒後 (c)16.8秒後

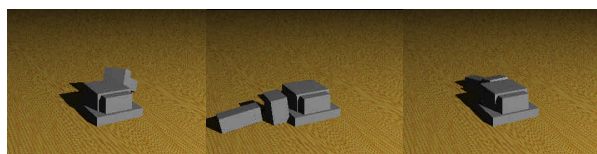
図6 モデル3の震度7加振時の棹石の転倒メカニズム

表5 心棒の直径・長さが異なる墓石の解析結果
(括弧内は実験結果)

長さ	直径18mm	結果	直径10mm	結果
150mm	モデル2a	一体	モデル3(一体)	棹石
200mm	モデル2b	一体	モデル3b	棹石
250mm	モデル2c	一体	モデル3c	一体
400mm	モデル2(一体)	一体	モデル3d	一体

一体： 棹石と上台が一体となって転倒

棹石： 心棒から抜け落ちて棹石のみ転倒



(a)モデル2a

(b)モデル2b

(c)モデル2



(d)モデル3

(e)モデル3b

(f)モデル3d

図7 直径と長さの異なる心棒を用いた墓石の解析結果(震度7)