地震時における墓石の転倒基準の提案

古川 愛子¹・大塚 久哲²・三輪 滋³・小野 達也⁴

¹九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 助教(〒819-0395 福岡市西区元岡 744) E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授(〒819-0395 福岡市西区元岡 744) E-mail: otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

3 飛島建設㈱ 技術研究所 所長(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

E-mail: Shigeru_Miwa@tobishima.co.jp

⁴九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: ono@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究では,3次元個別要素解析によって地震時における墓石の転倒基準を作成した.転倒基準は,最大 加速度と振動数が与えられたときに,転倒に至る墓石の高さ幅比の最小値を表したものである.まず,正 弦波を入力した解析によって,無補強墓石の転倒基準を作成した.転倒基準を実地震動に適用するには, 正弦波に等価な振動数を決定する必要がある.そこで,地震動と正弦波を与えた解析結果の比較によって, 地震動の等価振動数を決定する方法を提案した.さらに,心棒で石材間を連結する補強墓石の転倒基準も 作成した.提案した無補強・補強墓石の転倒基準の有用性は,実寸大模型を用いた振動台実験結果と比較 することにより検証した.最後に,転倒基準から転倒率曲線を算出する方法について述べ,青山墓地の転 倒率曲線を試算した.過去の被害調査で得られた転倒率と比較することにより,信頼性を検証した.

Key Words : gravestone, earthquake, overturning criterion, overturning rate curve, DEM analysis

1. はじめに

地震工学の分野における墓石に関する研究を見ると,古 くから被害調査の一環として,墓石の転倒調査が実施され ることが多い^{11,2,33}.墓石の形状が立方体であることから, 主に,その転倒現象から震度分布を推定することを目的と して実施される.強震観測網の整備が進んだ現在において も,震源域における強震記録は未だ十分とは言えず,これ に対して墓地は比較的広範囲に分布しているため,墓石は 強震記録を補うことのできる有効な材料として注目され ている.

しかし, お墓は本来先祖を祀るための大切なものであ ることから, 地震によって倒れたり壊れたりしないように することが望ましい.お墓参りの最中に地震が発生し,墓 石の転倒により人的な被害がでることは避けなければな らない.さらに,青山墓地のように災害時の広域避難場所 に指定されている場合もあり,2次災害を防ぐ意味でもお 墓の耐震性向上は重要課題である, 地震調査研究推進本部 によると, 関東地方では今後30年以内にマグニチュード 7級の地震が70%の確率で起こるとされている⁴⁾.しかし, 政府の中央防災会議や東京都防災会議は建物,人的,経済 被害などの推定を行っているが 墓地の被害推定は行われ ていない .墓地の転倒率曲線を求めることができれば ,地 震時の被害推定を行うことができ ,事前に墓石を補強する など大地震に備えた対策ができると考えられる .

そこで本研究では,墓地の耐震性評価に必要な転倒基 準を提案することを目的とする.まず,様々な正弦波を入 力した解析によって、各最大加速度に対して転倒する墓石 の高さ幅比の最小値を振動数毎に求め 転倒基準を作成し た 心棒で石材間を連結する補強墓石の転倒基準も作成し た.実地震動は様々な振動数成分を有するため,転倒基準 を実地震動に適用するには 正弦波に等価な振動数を決定 する必要がある .そこで ,地震動と正弦波を与えた解析結 果の比較によって 地震動の等価振動数の決定方法を提案 した.さらに,提案した転倒基準を,実寸大墓石模型を用 いた振動台実験結果と比較することにより 転倒基準およ び等価振動決定方法の妥当性を検証した.最後に,作成し た転倒基準をもとに転倒率曲線を作成する方法について 述べ,青山墓地を例にとり転倒率曲線を作成した.青山墓 地の転倒率曲線を 過去の被害調査で得られた転倒率と比 較することにより,転倒率曲線の信頼性を検証した.



図-1静的な水平力による転倒(静的転倒基準)



図-2 正弦波入力による転倒(Housnerの転倒基準)

2. 既往の剛体の転倒基準

剛体の転倒限界に関しては、今までに多数の検討が行われてきた.ここでは、設置面との摩擦が大きく滑りにくい 場合の代表的な剛体の転倒基準について述べる.

(1) West の式⁵⁾(静的転倒基準)

幅が B,高さが H,重量が Wの物体の重心に水平力 A が作用した場合,その物体はひとつの角のまわりに回転し ようとする(図-1).このとき水平力によって生じる転倒 モーメントは A H となる.これに対し,重力は転倒モー メントを打ち消す方向に抵抗モーメント W B を生じる. 物体の転倒は 転倒モーメントが抵抗モーメントを上回っ たときに生じると仮定すると,転倒条件は式(1)となる.

 $A \times H/2 > W \times B/2 \tag{1}$

水平力・重力をそれぞれ,水平方向の加速度 *a* (gal)およ び重力加速度 *g*(gal)に置き換えると,幅が *B*,高さが *H*の 物体が転倒する最小の加速度は式(2)のようになり,高さ 幅比(H/B)の関数となる.

$$a_{static} = B/H \cdot g \tag{2}$$

この静的な力のつりあいに基づく転倒基準は,ロッキン グを開始させる必要条件であって転倒に対する十分条件 ではないことが知られている.しかしながら,入力地震動 の卓越振動数が低い場合には式(2)の転倒加速度 *a_{static}* を用 いて墓石の転倒を評価することが多い. (2) Housner の転倒基準⁶⁾(動的転倒基準)

Housner は,地震波形の最大加速度を含むパルス状の部分が,一波長分の正弦波で近似できることに基づき,動的な転倒基準を提案している.

回転軸周りの回転の運動方程式は次式で表される.

$$I\frac{d^2\boldsymbol{q}}{dt^2} = -WR\sin(\boldsymbol{a}-\boldsymbol{q}) + WR\frac{a}{g}\sin(\boldsymbol{w}t+\boldsymbol{y}) \quad (3)$$

ここに,*I*は慣性モーメント,*q*は回転角,*t*は時間,*R*は 回転の中心から回転軸までの距離,*a*は図-2 に示す角度 (*a*=arctan(*B/H*)),*w*は入力波の角振動数である(図-2). *y*は,

$$a\sin y = g\sin a$$
 (4)

によって決まる値であり,時刻0において式(2)の静的転 倒基準を満たすように設定される. Housnerは,

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{a} \quad at \quad t = \frac{\boldsymbol{p} - \boldsymbol{y}}{\boldsymbol{w}}$$
 (5)

を転倒条件とし,転倒式(6)を提案している.

$$a = g \boldsymbol{a} \sqrt{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{R \boldsymbol{w}^2}{g}} = g \arctan\left(\frac{B}{H}\right) \sqrt{1 + \frac{\sqrt{B^2 + H^2} \boldsymbol{w}^2}{3g}} \quad (6)$$

ここで、Housnerの転倒基準の信頼性について検討する. 式(5)の条件式は、「入力波の振幅が0になったときに,重 心Gと回転中心Oを結ぶラインが鉛直になり,重力によ って生じる回転モーメントの向きが反転する」という意味 である.しかし,仮に式(5)が成立したとしても,入力波 の向きが反転して剛体を元の位置に戻す外力が作用すれ ば、転倒を免れる可能性がある.低い振動数では、入力波 の向きが反転するまでに時間があるため式(5)の仮定で転 倒基準を表現できるかも知れないが振動数が大きくなる ほど式(6)に基づく転倒基準の信頼性は低いと考えられる.

しかし,剛体が転倒する加速度の大きさは高さ幅比 (H/B)だけの関数でなく振動数wの影響も受けるという定 性的な傾向は成り立つものと考えられる.

3. 墓石の転倒基準の作成

(1) 個別要素法

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、個別要素法は前進的 に運動方程式を解くため、時々刻々と変化する各要素間の 接触問題を個別に取り扱いながら解析することができる. 各要素は全て剛体と仮定した.



図-3 無補銷和型墓石概要図(単位:mm)

耒 1	和刑草石モデル	(畄位・寸	1 🕁	20.2mm)	
<u>तर-</u> ।	和空奉白モナル	(里1), 1,	1 1	50.5mm)	

竿		上台		中台	
高さH	幅 奥行きB	高さ	幅 ·奥行き	高さ	幅 ·奥行き
10~52	8	9	14	10	20
下台			水鉢		□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □
高さ	幅・奥行き	高さ	幅	奥行き	。 回 の 语 に こ/D
5	28	9	16	5	1.25~6.5

表2 接触パラメータ

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

(2) 墓石モデル(無補強)

墓石のタイプとしては、和型墓石の中から代表的な形状を選択した.和型墓石の概要図を図-3に示す.1番上の石から,竿,上台,中台,下台と呼ばれる.墓石の配置については,中台から上はすべて左右対称に配置する.下台の前面に水鉢を置くため,中台は6寸下げて配置する.

上台,中台,下台の寸法と,竿の幅・奥行きが一定で, 竿の高さのみが異なる計 29 種類(高さ幅比の範囲 1.25~6.5)の墓石モデルを作成した 墓石モデルの詳細を表 -1 に示す.解析に用いた接触パラメータは,表-2 のとお りである.これは,墓石の縮小模型を用いた振動台実験に よって決定したもの⁷⁰である.

(3) 正弦波入力による墓石の転倒基準の作成 a) 解析概要

振幅と振動数の様々に異なる正弦波を入力した 3 次元 個別要素解析により,墓石の転倒の有無を調べた.正弦波 の振幅は,100gal~1300gal まで100gal 刻みで与えた.振 動数は,0.5Hz,1.0Hz,1.5Hz,2.0Hz,2.5Hz,3.0Hzの6通りと した.入力波の入力方向は水平1方向とし,図-3に示す y 方向に与え,継続時間は20秒とした.

b) 墓石の動的挙動

様々な振幅・振動数を有する正弦波に対する墓石の動的 挙動を調べたところ,転倒するのは竿のみであり,それ以 外の墓石が転倒するケースは見られなかった.

竿の転倒メカニズムは、上台の上でロッキングを起こし て転倒に至るというものであり、滑って落下するという転 倒モードは見られなかった.

振動数によって、竿が転倒に至るまでのロッキング回数 に差が見られた.0.5Hz~1.5Hz の低い振動数では、半波 長が作用するまでの間に大きく傾き転倒に至った.半波長 を越えても転倒に至らない場合は、その後20秒間の繰り 返しの正弦波を与えても転倒しなかった.2.0~3.0Hz の高 い振動数では、半波長では転倒せず、2~3 回ロッキング した後、突然転倒至るという転倒モードであった.

c) 転倒基準

各最大加速度に対して転倒する竿の高さ幅比の最小値 を振動数毎にプロットし 滑らかな線で結んだものを転倒 基準とした.正弦波入力による和型墓石の転倒基準を図4 に示す.

振動数が低いほど,転倒基準のグラフは左下に移動し, 同じ最大加速度に対して転倒しやすくなることがわかる.

0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz の結果がほぼ一致していることか ら明らかなように,低振動数では振動数の影響を受けず, 最大加速度のみによって評価されることがわかる.前述の とおり, 0.5Hz~1.5Hz では半波長以内に竿が転倒してお り,振幅の向きが変わる前に転倒するためである.

0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz, 3.0Hzの転倒基準は右下がりの滑 らかな曲線となったのに対し, 2.0Hz, 2.5Hz のグラフは右 下がりの滑らかな曲線とはならなった この理由は 0.5Hz ~1.5Hz では竿が半周期分の正弦波で倒れるのに対し, 2.0Hz, 2.5Hz では数回ロッキングして転倒しており, 転倒 するまでのロッキング回数および時間がモデルによって 異なるためであると考えられる 剛体のロッキング運動の 固有振動数は応答の振幅に依存し⁶,振幅が大きいほど固 有振動数は短くなることが知られている.一度ロッキング を起こすと応答に応じて固有振動数がロッキング開始前 に比べて短くなる、半波で転倒しなかったとしても摹石の 固有振動数は振幅に応じて時々刻々と変化するため 次の サイクルの正弦波に対する応答特性が変化する このよう にロッキングを繰り返していくうちに 墓石の固有振動数 が変化するため 安定した後に突然転倒するという現象が 生じたものと考えられる。

d) 転倒基準の関数による近似

一般に,振動数が一定の場合,加速度が大きい方が墓石 は転倒しやすくなると考えられるため、転倒基準は右下が りの形状が適切であると考えられる.そこで,転倒基準の 関数近似を行った.



式(1)の静的な転倒基準では,転倒に至る高さ幅比は最 大加速度の双曲線関数で表されている.一方,式(6)の動 的な転倒基準では,振動数wを固定すれば,転倒に至る 高さ幅比は最大加速度の正接関数と重心-回転軸間距離 *R*の関数で表される.

関数近似においては、できるだけ変数が少なくシンプル なものが望ましいと考えられることから、本研究では双曲 線による最小二乗近似を行った.近似式を以下に示す.

$$H/B = a(f)/PGA \tag{7}$$

ここに,H/B は竿の高さ幅比であり,PGA は最大加速度である.a(f)は転倒基準が振動数によって異なることを表すための関数である.図-5 に近似によって得られた転倒基準を示す.また,a(f)を振動数 f の関数としてプロットしたものを図-6 に点で示す.本研究ではさらに,a(f)を振動数 f の関数として表記する.式(6)を参考に,以下の式でフィッティングすることとした.

$$a(f) = p\sqrt{1 + (f/q)^r}$$
 (8)

最小二乗法による近似を行ったところ, p=8.268, q=1.92, r=4.6 が得られた.式(7)(8)を組み合わせることにより, 墓石の転倒基準として,式(9)が得られる.

$$H / B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{826.8\sqrt{1 + (f/1.92)^{4.6}}}{PGA}$$
(9)

今後,図-5および式(9)を転倒基準として用いることと する.

(4) 既往の剛体の転倒基準との比較

a) 静的転倒基準との比較

図-7 に、本研究で提案した転倒基準と静的転倒基準(式 (2))の比較を示す.静的な外力は振動数 0.0Hz の正弦波 に相当するため、静的転倒基準のグラフは 0.5Hz のグラフ の左下になる(0.5Hz より転倒しやすい)と予想されるが、 実際は 0.5Hz ~ 1.5Hz のグラフのわずかに上側(転倒しに くい側)にあることがわかった.この理由は、静的転倒基 準は図-1 のような単一の長方形のつりあい式から求めた ものであり 本研究が対象としている複数の石から構成さ れる墓石の転倒基準とは異なるためであると考えられる. 墓石は複数の石が相互に運動するため 静的基準よりわず かに転倒しやすいものと考えられる.

2(1)で述べたように,一般的に剛体の転倒限界を表す式 として,入力波の卓越振動数が低い場合には静的転倒基準 式が用いられることが多い静的転倒基準と個別要素法に よる転倒基準を比較すると 1.5Hz 以下の低振動数のグラ フが近い値を示している(図-7).よって,1.5Hz 以下の 低振動数領域では,静的転倒加速度の式を用いて墓石の転 倒を評価しても実用上差し支えないと考えられる.

b) Housner の転倒基準との比較

Housner の転倒式に, 棹石の幅 B=242mm を代入して, 0.5Hz~3.0Hz に対する転倒基準を作成すると図-8 のよう になった.本研究で作成した転倒基準(図-5)と比較する と, Housner の転倒基準は転倒加速度がかなり大きくなっ ており,振動数が高くなるほど一致しない結果となった.

2(2)で述べたように,正弦波入力に対する Housner の 転倒式は,入力波の振幅が0になる時刻tにおける回転角 がq=aになったときに転倒するという仮定の下で求めら れている実際には正弦波の周期とロッキングの周期が一 致していないため,q=aとなってもロッキング方向と逆 方向に速度を有すれば転倒しないし,入力の向きが反転す れば傾きが元に戻ることもあると考えられる.したがって, Housnerの転倒基準と個別要素法による転倒基準は振動数 が高くなるほど一致しないものと考えられる.

(5) 地震動を入力した転倒基準との比較

正弦波入力により作成した転倒基準は最大加速度と振動数によって評価されるが,実際の地震動は正弦波のよう に振動数が決まってはおらず様々な振動数成分を含んで いる.そのため、地震動波形から正弦波と等価な振動数(等 価振動数)を定める必要がある.ここでの「等価」とは, 地震動入力による転倒基準と正弦波入力による転倒基準 が一致するという意味における「等価」である.実地震動 の等価振動数をどのように決定すればよいかについて検 討するため,以下 a)~d)に示す4つの地震動を用いた個別 要素解析を実施した.最大加速度を100gal~1300galまで 振幅調整し,各最大加速度において転倒する最小の竿の高 さ幅比を求めた.

a) 1995年兵庫県南部地震

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 NS 成分を用いた.この地震動の時刻 歴波形を図-9(a)に示す.最大加速度は817.8gal である.

b) 2003年十勝沖地震(余震記録)

2003年十勝沖地震の際に,K-netの広尾の観測点で観測 された余震記録の加速度波形のEW成分を用いた.この地 震動の時刻歴波形を図-9(b)に示す.最大加速度は425.9gal である.

c) 2004 年新潟県中越地震

2004 年新潟県中越地震の際に,K-net の柏崎の観測点で 観測された加速度波形のNS成分を用いた.この地震動の 時刻歴波形を図-9(c)に示す.最大加速度は667.4gal である. d) 2005 年福岡県西方沖地震

2005年福岡県西方沖地震の際に,福岡市中央区の(株) 建設技術研究所九州支社の免震基礎部(地表面相当)で観 測された加速度波形のNS成分を用いた.この地震動の時 刻歴波形を図-9(d)に示す.最大加速度は488.8galである.



e) 等価振動数の決定方法

地震動波形から正弦波と等価な振動数(等価振動数) を定める方法として、以下の ~ の3つの方法から最も 適した等価振動数の決定方法を選択することとした.

等価振動数 = (最大加速度) / (2 $p \times$ 最大速度) に より計算する⁸⁾ .

フーリエ変換して卓越振動数を等価振動数とする. 時刻歴波形で最大加速度をとる一山の幅を半周期 T/2 とみなし, f=1/T により計算する.

表-3 3つの方法により求めた等価振動数(単位:Hz)

兵庫県南部地震	1.55	1.48	1.32
十勝沖地震	4.40	4.84	4.55
新潟県中越地震	1.93	0.46	1.56
福岡県西方沖地震	1.73	0.93	1.39



図-10 正弦波と地震動に対する転倒基準の比較

図-9 に示した 4 つの地震動を対象に, の 3 つの 方法により等価振動数を求めた結果を表-3 に示す.

次に,この4つの波に関して,最大加速度を100galか ら1000galまで振幅調整した波を用いて転倒基準を作成し, 正弦波入力による転倒基準との比較を行った(図-10).

その結果,十勝沖地震以外の3つの波は正弦波入力の 2.0Hz の転倒基準に近い値となった.また,十勝沖地震は どのモデルも転倒しなかったため、転倒基準の振動数はか なり高いと予想される.の3つの方法のうち,十勝 沖地震以外の3つの波ではの方法がそれぞれ最も2.0Hz に近い値をとった.また,十勝沖地震では,表-3を見る とどの方法とも等価振動数が約4.5Hz 程度と高くなって いるため、等価振動数の決定方法としての方法を選択す ることとした.

(6)補強墓石の転倒基準

a)補強工法

近年,墓石の耐震補強に対する意識が高まっており, 様々な補強工法が開発されている本研究では採用実験豊 富なダボ工法により墓石を補強することを想定し,補強墓 石の転倒基準を作成した.ダボ工法とは,竿の下面と上台 の上面に穴を空け,この穴にステンレスの丸棒を通すこと により,竿と上台とを連結する補強工法である.丸鋼は, モルタルや接着剤で固着させてはおらず,ただ石材の穴に 挿しただけで無接着である.上台 - 中台間,中台 - 芝台間 は全く補強されない 現在多く使用されている工法である. 試験体の概観を図-11に示す.竿と上台に開けた穴は,各 石の中心に1箇所,穴の寸法は直径21mm,深さ210mm である.そこに通すステンレスの丸鋼は,直径18mm,長 さ400mmである.



b)補強墓石の転倒基準

補強墓石の転倒基準は 竿と上台の連結がはずれないと 仮定し,図-12のように竿と上台を1つの要素とみなして 作成した.一体となった竿と上台の重心をGとすると, 見かけの高さ幅比は h'/b'となるが,ここでは無補強墓石 と同様に竿の高さ幅比 H/B を指標として転倒基準を作成 した.

補強墓石の転倒基準は図-13 のようになった . 見かけの 高さ幅比が減少するため 無補強墓石の転倒基準と比べグ ラフが右側に移動しており 転倒しにくくなっていること がわかる .

無補強墓石と同様に,式(8)を用いて最小二乗法による 近似を行ったところ *p*=1162.9 *q*=1.85 *r*=4.5 が得られた. 式(7)(8)を組み合わせることで,補強墓石の転倒基準とし て式(10)が得られた.

$$H/B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{1162.9\sqrt{1 + (f/1.84)^{4.5}}}{PGA}$$
(10)

無補強墓石と補強墓石の転倒基準式(9)(10)を比較する と, pの値が異なるだけで qとrの値はほぼ同じである. グラフの形状はそのままに 転倒に至る最大加速度が大き くなることがわかった.

表-4 振動台実験に用いた入力地震動

(a) 最大加速度

最大加速度(gal)	震度6弱	震度6強	震度7
х	553	894	1170
у	484	818	1049
Z	279	468	733

(b) 最大速度

最大速度(kine)	震度6弱	震度6強	震度7
х	39	65	92
у	38	63	86
Z	12	19	28

(c) 等価振動数

等価振動数(Hz)	震度6弱	震度6強	震度7
х	2.3	2.2	2.2
у	2.0	2.0	1.9
Z	3.7	3.9	4.2

表-5 転倒基準を用いた転倒状況判定結果と実験結果の比較

(a)	転倒基準を用いた判定結果(x方向)	
()		

墓石モデル	高さ幅比 H/B	震度6弱	震度6強	震度7		
和型墓石(無補強)	2.6		×	×		
和型墓石(補強)	2.6			×		

墓石モデル	高さ幅比 H/E	3 震度6弱	震度6強	震度7				
和型墓石(無補強)	2.6		×	×				
和型墓石(補強)	2.6			×				
(c) 振動台実験の結果								
墓石モデル	高さ幅比 H/E	3 震度6弱	震度6強	震度7				
和型墓石(無補強)	2.6		×	×				
和型墓石 (補強)	2.6			×				

:転倒しない

:転倒基準線上 億石の高さ幅比が転倒高さ幅比の±0.1 x :転倒する

(7) 振動台実験による転倒基準の検証

図-3,11 に示す無補強および補強墓石の実物大模型を用 いた3次元振動台実験の転倒結果⁹と,本研究で作成した 転倒基準を用いた転倒判定結果を比較する.

振動台実験では,1995年兵庫県南部地震の波形を基本 入力波として震度6弱,6強,7となるように振幅調整し た3つの入力波を用いている.それぞれの波の最大加速度, 最大速度,等価振動数を表4に示す.

実験は3成分入力であるが本研究で作成した転倒基準 は1成分入力によるものである和型墓石は正方形断面の ため転倒しやすさはx,y方向ともに同じと考えられるた め,x,y方向を別々に検討する.転倒基準によって転倒 する竿の最小の高さ幅比を求め実験で用いた竿の高さ幅 比2.6と比較することにより,転倒の有無を予測した.

まず,x方向の最大加速度と等価振動数を用いて,転倒 基準によって転倒の有無を評価すると,表-5(a)のようになった. は「転倒しない」,×は「転倒する」を表す.無 補強・補強ともに,表-5(c)に示す振動台実験の転倒状況と うまく一致している.



図-15 青山墓地の竿の高さ幅比の累積分布

高さ幅比 H/B

次に, y方向の最大加速度と等価振動数を用いて転倒の 有無を判定した 転倒基準により転倒が予測される最小の 高さ幅比が,実際の高さ幅比 2.6 に対して±0.1 以内(2.5 ~2.7)であれば, と評価した.震度 6 弱時の無補強モ デルと震度 6 強時の補強モデルは 振動台実験では転倒し なかったが 本転倒基準を用いた推定結果では の評価と なり 転倒するかしないかの分かれる境界に位置すること がわかった.この 2 ケース以外の判定結果は,振動台実験 の転倒の状況と一致している.

これらの結果は、正弦波入力による転倒基準と等価振動 数を用いることの妥当性を示している.また,水平動2 成分を別々に評価しても、良好な精度で評価することがで きた.

4. 転倒率曲線の作成

本節では,前節で提案した転倒基準を用いて転倒率曲線 を導出する手法について述べ,青山墓地の転倒率曲線の算 定を行う.

(1) 青山墓地の墓石の高さ幅比分布

青山墓地で現地調査を実施した.青山墓地にある墓石の 中からランダムに選んだ100体の墓石の寸法を調査し、竿 の高さ幅比のヒストグラムを作成した(図-14).また,図 -15に高さ幅比の累積分布を示す.



(2) 青山墓地の転倒率曲線

転倒率曲線は,図-15の高さ幅比の累積分布と図-5,13の 転倒基準を掛け合わせることにより作成できる.

最大加速度と等価振動数が与えられれば、転倒基準より 転倒する最小の高さ幅比が求まる.この高さ幅比を上回る 墓石の割合を累積分布から求めたものが墓石の転倒率と なる.以上の手順により算定した青山墓地の転倒率曲線を 図-16,17 に示す.転倒基準と同様に,最大加速度と等価振 動数の関数である.図-16 は無補強墓石,図-17 は補強墓 石の転倒率曲線であり、補強によりグラフが右側に大きく ずれ,転倒しにくくなっているのがわかる.

(3) 過去の地震調査で得られた転倒率データとの比較

青山墓地の転倒率曲線と,鳥取県西部地震の際の地震被 害調査で得られた転倒率データ³⁾との比較を行う.墓石形 状には地域性があるため,青山墓地と鳥取県西部地震で被 害を受けた墓地の高さ幅比分布は異なると考えられるが, 全体的な傾向は捉えられていると考えられることから,こ こでは比較を行った.

鳥取県西部地震の際の代表的な観測地点の地震動強さ と観測地点周辺の転倒率調査結果を表-6 に示す³⁾.また, 本研究で作成した無補強・補強墓石の転倒率曲線に各観測 地点の転倒率データをプロットしたものを図-18,19 に示 す.図-18 において,凡例に示す各振動数に対する転倒率 曲線と,各観測点の等価振動数に対する転倒率を比較する と,よい精度で一致していることがわかる.

図-20の横軸に無補強墓石の転倒率曲線から推定した転 倒率 縦軸に被害調査によって得られた転倒率をプロット

表-6 観測点の地震動強さと周辺の墓石転倒率3)

	+	∦雪勧治⇒			転倒家			
知测占夕	·····································			14日平 地宁伯				
散测呆石	取八川述皮	取八述皮 (kina)	「「山」の別数	調査結果	加油沙	追述法		
伯士	(gal)	(KINE)	(HZ)	0.05	無1相近	1開5虫		
旧人	120	30	3.18 2.75	0.05	0.1	0.02		
江府	125	42	2./5	0.30	0.35	0.08		
不于	280	27	1.65	0.07	0.1	0.04		
	029	30	2.78	0.40	0.2	0.05		
日期 327 113 1.31 0.3 1								
現港(巾伎所)	213	90	0.38	0.36	0.05	0		
1 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0 0	•境港 0.3 •米子 0 200 400	●日南 8H z)● 江 165H2)● 住 600 80 最大力	<u> </u>	31Hz)	- 0.50Hz - 1.00Hz - 1.50Hz - 2.00Hz - 2.50Hz - 3.00Hz - 1600	1800		
図-1 1 0.9 0.8 0.7 0.6 例 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0 0 0	8 無補強募 • 境港 0.33 • 東港子 (1 200 400	●日南 3Hz)●汀 65日z)伯 600 80 最大功	●日野(1: ●日野(1: 府(2.75Hz) 府(2.75Hz) 太(3.18Hz) 0 1000 12 D速度(gal)	実被害の 31Hz) 000 1400				
図-19 補強墓石の転倒率曲線と実被害の比較 1 9 8 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1								
	転倒率囲線による推正値(無補強)							

図-20 無補強墓石の転倒率と実被害の比較

したところ、比較的良い精度で推定値と調査結果が一致した.日南・境港では、調査結果の方が大きな値となったが、これは、墓地によって高さ幅比の累積分布が異なること、 個々の墓石の設置(補強)状況の違い、地震動の空間的な ばらつきなど、実際のデータには解析で考慮できなかった 種々のばらつきの要因が含まれているためと考えられる. また、無補強墓石の転倒率曲線の方が補強墓石よりも調査 結果と精度良く一致していることから、観測地点周辺の墓 石は無補強のものが多かったと推察される.

5. 結論

本研究では,3次元個別要素解析によって地震時の墓石 の転倒基準を作成した.

まず,様々な正弦波を入力した解析によって,各最大加 速度に対して転倒する墓石の高さ幅比の最小値を振動数 毎に求め,転倒基準とした.得られた成果を以下に示す.

- 1.5Hz 以下の低振動数では,振動数の影響を受けず, 最大加速度のみによって評価される.
- 3) 1.5Hz 以下の低振動数領域では,静的転倒加速度の式 を用いて墓石の転倒を評価できる.
- 4) 無補強墓石の転倒基準式は次式で表される.

$$H / B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{826.8\sqrt{1 + (f / 1.92)^{4.6}}}{PGA}$$

- 5) 正弦波による転倒基準を実地震動に適用するには、等 価振動数=最大加速度/(2p×最大速度)の式を用い て振動数を決定すればよいことを提案した.
- 心棒によって補強することで転倒しにくくなる.補強 墓石の転倒基準式は,次式で表される.

$$H/B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{1162.9\sqrt{1 + (f/1.84)^{4.5}}}{PGA}$$

 7) 提案した転倒基準によって,実寸大墓石を用いた3 次元振動台実験結果をよい精度で推定できた.

最後に,作成した転倒基準をもとに転倒率曲線を作成す る方法について述べ,青山墓地の転倒率曲線を作成した.

青山墓地の転倒率曲線を ,鳥取県西部地震の被害調査で 得られた転倒率データと比較したところ ,比較的良い精度 で推定値と調査結果が一致した . 謝辞:本研究は,平成20年度科学研究費補助金(基盤研究(c),課題番号19560490)の援助を受け,執り行われたものであります.

参考文献

- 2) 翠川三郎,藤本一雄:墓石の転倒調査から推定した兵庫県 南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布,日本 建築学会構造系論文集, Vol.480, pp.111-118, 1996.12.
- 宮腰淳一,林康裕,渡辺宏一,田村和夫:1995年兵庫県南部 地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価,日本建築学 会構造工学論文集, Vol. 43B, pp.269-276, 1997.
- 林康裕,北原昭男,平山貴之,鈴木祥之:2000 年鳥取県西部 地震の地震動強さの評価,日本建築学会構造系論文集,No. 548,pp.35-41,2001.10.
- 4) 地震調査研究推進本部:

http://www.jishin.go.jp/main/index.html

- J. Milne: Experiments in Observational Seismology, Transactions of the Seismological Society of Japan, Vol.3, pp.12-64, 1881.
- George W. Housner: The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes, Bulletin of the Seismological of America. Vol. 53, No.2, pp.403-417. 1963.
- 7) 古川愛子,清野純史,三輪滋: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.221-230,2005.11
- 金子美香,林康裕:剛体の転倒率曲線の提案,日本建築学会 構造系論文集, No. 536, pp.55-62, 2000.10.
- 9) 古川愛子,清野純史,三輪滋,樅山貴昭:実寸大模型を用 いた振動台実験に基づく墓石の各種耐震補強策の効果の検 証,地域安全学会論文集,No.8,pp.31-40,2006年11月.

PROPOSAL OF OVERTURNING CRITERIA OF GRAVESTONES DURING EARTHQUAKE

Aiko FURUKAWA, Hisanori OTSUKA, Shigeru MIWA, Tatsuya ONO

In this study, overturning criterion of unreinforced gravestones during earthquake is developed by using the 3-dimensional distinct element method. The overturning criterion estimates the height/width ratio of gravestones which overturns under a given peak ground acceleration for each frequency. The overturning criterion of reinforced gravestones with steel bar is also developed. The validity of criteria is confirmed by comparing with the shaking table results. Finally, overturning rate of the Aoyama Cemetery is estimated by combining the overturning criteria and the cumulative density function of the height/width ratio. The estimated overturning rate showed a good agreement with the actual data observed after the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake.