

振動台実験による墓石の地震時挙動の定量的分析と可視化

京都大学 正会員 ○清野 純史 飛鳥建設(株) 正会員 三輪 滋
 九州大学 正会員 古川 愛子 京都大学 学生員 樺山 貴昭
 日本石材産業協会 井口 健二

1. はじめに

墓石の地震時挙動を把握し、各種の耐震対策の効果を確認することを目的とし、墓石の実物大模型を用いた振動台実験を行った。加振に用いた地震動は、兵庫県南部地震のような直下型地震の地震動の特性をもつ比較的継続時間の短い地震動であり、振幅を震度6弱、震度6強、震度7に調整して加振を行った。試験体



図1 墓石モデル(左：和型，右：洋型)

には、加速度計を設置し、それぞれの石の加速度を記録することで、その挙動を分析した。また、得られた加速度記録から各種墓石模型の地震時挙動を再現し、施した対策による耐震性の効果を定量的に検討した。

表1 墓石モデルの分類

W0101	和型の墓石を補強無しで積み重ねたまま
W0102	和型の墓石の間を耐震ボンドで接着
W0103	和型の墓石の棹石と上台の間にステンレス棒を1本挿入
Y0101	洋型の墓石を補強無しで積み重ねたまま
Y0102	洋型の墓石の間を耐震ボンドで接着
Y0103	洋型の墓石の棹石と上台の間にステンレス棒を2本挿入

2. 墓石モデル¹⁾

試験体の概観を図1に示す。和型墓石は上から棹石、上台、中台、芝台であり、洋型墓石は上から棹石、上台、芝台と呼ばれる。本研究では、表1に示す補強が施された6モデルを対象に挙動の定量的分析・再現を行った。

3. 入力地震動¹⁾

本研究の実験では直下型地震の地震動を用いることとした。水平動については、設計用加速度応答スペクトル²⁾と兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での記録の位相特性を用いて模擬地震動を作成した。上下動については、NTTの通信機器耐震性検討用のスペクトル³⁾をターゲットスペクトルとし兵庫県南部地震の記録の位相を用いて模擬地震動を作成した。作成した加速度時刻歴波形とその加速度応答スペクトルをそれぞれ図2に示す。作成した地震動を基に加速度レベルを調整して、震度7、震度6強、震度6弱の地震動とした。また、加振は、震度6弱、震度6強、震度7、震度6強(余震)の順で行い、転倒などが生じた時点で終了した。震度6強(余震)まで耐えた場合には、継続時間の長い地震動で加振を行った。地震動はNTTの通信装置等の耐震試験方法³⁾で検討用のスペクトルに基づいた地震動の例として示された主要動継続時間が約40秒の長い地震動を参考にして作成した地震動を最大振幅が1100cm/s²程度となるように調整した地震動(震度7)を用いた。ここではこの地震動をNTT波(震度7)と呼ぶこととする。

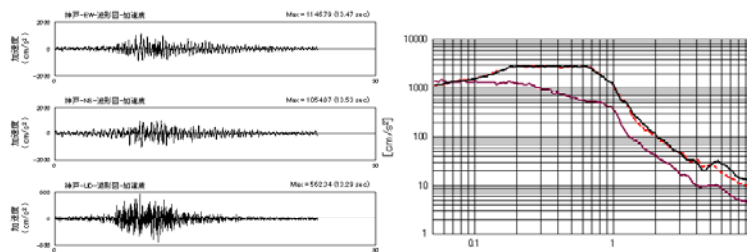


図2 模擬地震動(左：加速度波形，右：加速度応答スペクトル)

表2 試験体の転倒状況

試験体	震度6弱	震度6強	震度7	余震6強	NTT震度7
和型0101	△	×	×		
和型0102	○	○	○	○	○
和型0103	△	△	×		
洋型0101	△	△	×		
洋型0102	○	○	○	○	○
洋型0103	△	△	△	△	

○：変化無 △：変位・ずれが生じる ×：倒壊

4. 実験結果

表2に各試験体の実験結果一覧を示す。また、加速度波形の分析から得られた特筆すべき事項を以下に示す。
(和型W0102) どの震度においても中台の最大加速度が大きかった。また、震度の増加に伴って下部の補強部位へと負担箇所が移って行くことが分かった。これは、この試験体においては棹石・上台・中台の結びつきが強く、ほぼ一体となって振動したためであると思われる。また、余震6強で加振したときの最大加速度は、震度6強を加振したときよりも大きく、震度7を加振した段階において若干の補強の損傷があったようである。震度が上がるに連れて加速度値は大きくなるものの、全ての石が一体化していることもあり、石の違いによる波形の違いは見られない。接着の経年劣化や複数の地震の繰返し载荷による劣化など、接着面の損傷・劣化程度の把握と健全性の維持が今後の課題となると思われる。

キーワード 墓石、地震時挙動、3次元振動台実験

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 TEL: 075-753-5132

(和型W0103) 上台と棹石はステンレス棒によって連結されているのでほぼ同じ加速度波形を示した。棹石と上台の連結による高さの増加により、ロッキング運動はより長周期の地震動に対して起こりやすくなっていることがわかった。

(洋型W0102) 補強が強いため、墓石が一体となって振動するため、石の違いによる加速度波形の差は見られなかった。震度6強と、震度7経験後の余震6強の違いもほとんど見られなかった。

(洋型W0103) 棹石と上台が一体となって振動するため、両者の加速度波形にはほとんど差が見られなかった。しかし、震度6強と震度7経験後の余震6強を比較すると、余震6強の方が全体的に大きな最大加速度を示し、強度の低下が確認された。

5. 墓石の挙動の再現

実験時、棹石と上台には上面の3頂点に加速度計を3個ずつ設置しており、3方向の加速度を記録している。加速度は変位の2階微分であることから、適当な初期条件のもとで加速度を2回積分することにより、3頂点の変位へと変換することができる。さらに、墓石は剛体であり変形がないと仮定すると、8頂点の幾何学的関係より残りの頂点の変位が算定され、墓石全体としての挙動を再現することができる。ここでは、震度7で加振を行ったときの墓石の動的挙動の再現を試みた。

(和型 W0101, 震度 7) 和型墓石 W0101 を震度 7 で加振したときの動的挙動を図 3 に示す。補強をしていないケースであるが、棹石が大きく振動している様子を再現することができた。

(和型W0102, 震度7) 和型墓石W0102を震度7で加振したときの動的挙動を図4に示す。耐震ボンドにより補強をしたケースであるが、墓石全体が一体となって振動している様子を再現することができた。

(和型W0103, 震度7) 和型墓石W0103を震度7で加振したときの動的挙動を図5に示す。ステンレス棒によって棹石と上台を固定したケースであるが、棹石と上台が一体となって振動している様子を再現することができた。

(洋型W0101, 震度7) 洋型墓石Y0101を震度7で加振したときの動的挙動を図6に示す。補強をしていないケースであるが、棹石・上台は倒壊には至らないものの、下台の上で大きく滑る様子を再現することができた。

(洋型W0102, 震度7) 洋型墓石Y0102を震度7で加振したときの動的挙動を図7に示す。耐震ボンドにより補強をしたケースであるが、墓石全体が一体となって振動している様子を再現することができた。

(洋型W0103, 震度7) 洋型墓石Y0103を震度7で加振したときの動的挙動を図8に示す。ステンレス棒によって棹石と上台を固定したケースであるが、棹石と上台が一体となって下台上で僅かに滑っている様子を再現することができた。

6. まとめ

和型・洋型墓石それぞれに対して、無補強時、補強時における墓石の地震時挙動を加速度波形から定量的・可視的に検証した。耐震ボンドによる接着補強した和型 0102, 洋型 0102 では、墓石全体が一体となって挙動したことが加速度波形、再現結果から確認された。震度7の地震動により接着効果が弱まった可能性があり、接着効果が発揮されてはじめて意味のある補強方法だけに、接着面の損傷・劣化が今後の課題となることが明らかとなった。ステンレス棒により連結補強した和型 0103, 洋型 0103 では、棹石と上台が一体となって挙動することが、加速度波形、再現結果から確認された。震度が大きくなると一体となって転倒するため、対策が必要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 井口ら他：振動台実験による墓石の耐震補強対策効果の検証，第61回土木学会年次学術講演会，2006年9月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002年
- 3) 日本電信電話公社：通信装置等の耐震試験方法，1998年12月



図3 和型 W0101 の挙動の再現(左から 13, 14, 15 秒後)



図4 和型 W0102 の挙動の再現(左から 15, 17.5, 20 秒後)



図5 和型 W0103 の挙動の再現(左から 12.5, 15, 17.5 秒後)



図6 洋型 W0101 の挙動の再現(左から 15, 15.5, 16 秒後)



図7 洋型 W0102 の挙動の再現(左から 17.5, 20, 22.5 秒後)



図8 洋型 W0103 の挙動の再現(左から 17, 23.5, 26.5 秒後)