

鎌倉大仏およびその周辺地盤の常時微動調査 ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GREAT BUDDHA OF KAMAKURA AND ITS SURROUNDINGS

中村 豊¹⁾、齋田 淳²⁾、立花三裕³⁾、森井順之⁴⁾、井上修作⁵⁾、大町達夫⁶⁾
Yutaka NAKAMURA¹, Jun SAITA², Mitsuhiro TACHIBANA³, Masayuki MORII⁴,
Shusaku INOUE⁵, Tatsuo OHMACHI⁶

1) (株)システムアンドデータリサーチ、代表、工博
東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、連携教授

¹ President, System and Data Research, Co., Ltd., Dr. Eng.

Visiting Professor, Tokyo Institute of Technology,

e-mail : yutaka@sdr.co.jp

2), 3) (株)システムアンドデータリサーチ、主任研究員

^{2,3} Senior Research Engineer, System and Data Research, Co., Ltd.

4) 国立文化財機構東京文化財研究所保存修復科学センター

⁴ National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo

5) 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻

⁵ Tokyo Institute of Technology,

6) 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、教授

⁶ Professor, Tokyo Institute of Technology,

ABSTRACT: Great Buddha of Kamakura was built over 750 years ago. The statue retains the original shape despite repeated natural disasters and loss of the Great Buddha hall. By the Kanto earthquakes of 1703 and 1923, the front part of the foundation had settled 90cm and 50cm respectively and the statue was moved ahead, but the statue had been not suffered severe damage at these times. We must pass this heritage on the next generation had been good condition. So we started investigation to grasp current situation of the statue and its surrounding ground using microtremor. Here we report the preliminary results of the measurement early in this year.

キーワード： 鎌倉大仏、地震、常時微動、地盤、耐震性調査

1. はじめに

昭和の修理報告書¹⁾によれば、鎌倉大仏殿高德院の大仏（以下、鎌倉大仏）は、約 750 年前に造られた後、暴風雨や洪水、地震など幾多の災害に遭遇してきたが、今日まで仏像本体は大きく損傷することなく伝えられてきた。現在は露座であるが、当初は大仏殿があり、14 世紀か 15 世紀の災害（風、地震・津波）の後、最終的に大仏殿はなくなったと考えられている。大きな地震にも何度か遭遇している。少なくとも、1703 年の元禄関東地震（M7.9～8.2）と 1923 年の大正関東地震（M7.9）では基壇が損壊し、仏体は移動・沈下する被害が記録されているが、仏像本体が大きく破壊されることはなかった。大きな地震動に見舞われ、周りの建物などが倒壊するなどの被害を受けながら、なぜ大仏本体が大きな被害を受けることなく、ほぼ当初のままの姿で今日まで伝えられてきたかについては興味のあるところである。

大正関東地震の修復は、地震後すぐに行われたが、それを補う形で昭和の修理が 1960 年に行われている。昭和の修理では、仏像の頸部周辺を FRP（ガラス繊維補強プラスチック）で補強している。さらに、基壇と仏像基部を鉄筋コンクリートで補強するとともに、仏像基部の鉄筋コンクリート下面にステンレ

ス板を貼り付け、大きな地震動の際には、基壇上面に貼り付けられた花崗岩ブロック（表面ビシャン仕上げ）の上を滑動させることにより、地震動を大仏本体に伝えにくくする工夫なども実施されている。この新しい工夫は、文化財に対する最初の免震対策として知られている。

昭和の修理後、今年でちょうど50年が経過する。大仏頸部の強化に使われているFRPの劣化も進み、改めて、鎌倉大仏を地震から護る諸方策について検討する機運が高まっている。文化財の適切な管理体制を構築するためにも、文化財の立地環境条件を地震防災の観点から見直すことが求められている。ここでは、古都鎌倉を代表する鎌倉大仏について周辺地盤を含めた地震動特性を調査した²⁾ので報告する。

2. 調査概要

調査対象である鎌倉大仏は、三方を丘陵で囲まれ海に向かって開かれた鎌倉の西端に位置し、さらに三方を小さく丘陵で囲まれた標高14m程度のやや開けた場所にある。地形の関係から、狭い範囲で変化するやや複雑な堆積構造になっているものと推測される。修理報告書に掲載されたボーリング調査データによると、この付近の地下水位は0.7m～1.7m程度となっている。

2.1 測点配置

本調査では、地盤特性が狭い範囲で変化すると予想される基礎地盤や大仏の地震動特性を明らかにするため、図1～図3に示すような大仏を中心にしたやや稠密な測点配置とした。

まず、高德院境内の全体的な傾向を把握するため、南北に8測点、東西に5測点を設けた。

大仏が鎮座する回廊域内とその周辺については、大仏基壇（Z0）を中心に、基壇周り地盤（Z1）、石畳（Z2）、回廊内側（Z3）および回廊外側（Z4）と、大仏を5重の測線で取り囲むように測点を設けた。基壇周り地盤（Z1）では、昭和修理時に実施したボーリング調査位置の近傍でも測定している。およそ50m四方の地盤領域に合計54測点がある。地盤での微動測定の様子を写真1に例示する。

なお、旧大仏殿の柱礎石下の地盤は版築で固められていると考えられ、それ以外の地盤とは特性が異なる可能性がある。高德院ホームページ（www.kotoku-in.jp）によると、60個あったとされる柱礎石は56個が現存し、数個を除いて当初の位置から移動されているが、柱礎石の跡と思われるところはできるだけ避けた。測点 OG1、OG2、OG4、IG4、IG14、IG20、F5 および F9 では、礎石下の版築にかかっている可能性がある。関連する礎石跡は赤丸で囲んで示した。なお、近年の発掘調査³⁾によれば、大仏を中心とした小山のような盛土の痕跡が確認され、大仏造営方法に関連していると考えられている。

昭和の修理時に実施された6箇所のボーリング結果が修理報告書に掲載されている。報告書に掲載された地図を参考に調査地点を白抜き黒丸で示したが、BFWB（ボーリング#2）以外の確度は高い。

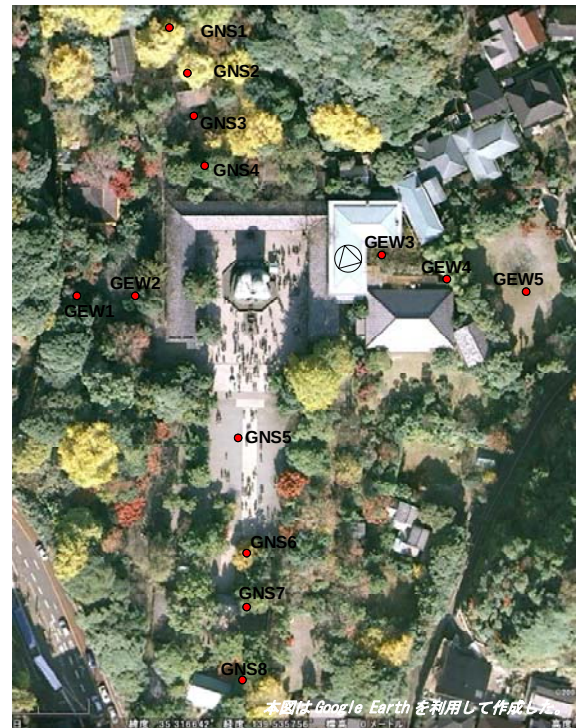


図 1 高德院境内の常時微動測点配置

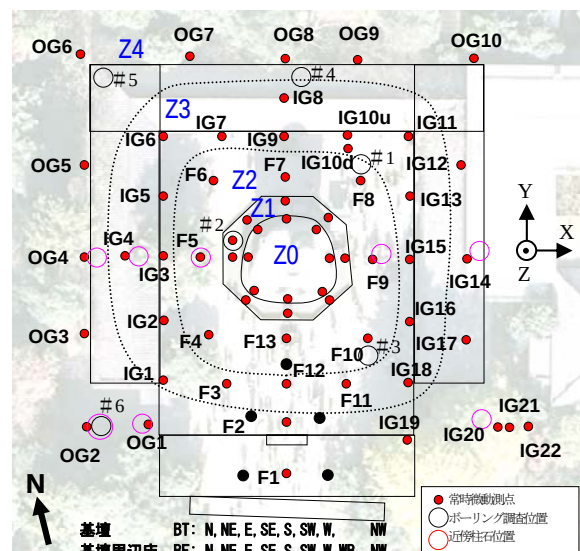


図 2 大仏周辺の詳細測点配置

基壇上の測点（合計 8 測点）については、対応する大仏基壇周りの地盤測点と同時に測定し、周辺地盤に対する基壇上面の増幅スペクトルを算定した。基壇での微動測定状況を写真 2 に示す。

大仏本体については（図 3 参照）、昭和の修理で付加された大仏下部の補強コンクリート架構に東西南北 4 測点を設けるとともに、胸腹部の荷重を一部負担するために内部に設置された鋼製門型支持架構に 2 測点、さらに背面の窓部（創建時よりある大仏本体背面に空けられた窓）に 2 測点を設けた。さらに基壇上面では、中心位置と両膝の内側の合計 3 測点を設けた。大仏および基壇上面の測点では、対応する左右測点とともに基壇上面中心の測点 **BFC**、合計 3 測点の同時測定を行っている。大仏本体に関する測点は合計 11 測点である。大仏内部での微動測定状況を写真 3 に例示する。

これらの測定を、地盤については2010年1月25日（月）に、大仏本体については翌1月26日（火）に、それぞれ実施した。なお、測定時、観光客は通常どおり参拝しており、測点近傍の通行を避けていただいた他は特に制限していない。また、微動測定に用

CAD CENTER (www.cadcenter.co.jp)
の太仏等高線図に加筆した。



写真1 地盤での微動測定



写真2 基壇上と周辺地盤



写真3 大仏内背面窓での測定

計測方位は、回廊より外側の境内 8 測点では、Y を北（磁北）に、X を東に、Z を上方に設定した。その他の地点では、すべて、回廊の方向にあわせて、大仏像が向いている方向を南とし、その反対側を Y としている。両者の相違は 20 度程度であり、同じとみなしても大きな相違はない。

ひとつの測点で 40.96 秒間 (1/100 秒サンプリング、4096 個のデータ) の微動波形を原則 3 回測定したが、非定常ノイズが混入したと思われる時には、適宜追加して測定した。

1 回の測定毎に、全データを使って 3 方向のフーリエスペクトル X 、 Y および Z を算定し、これらから X/Z と Y/Z を算定する。これらのスペクトルおよびスペクトル比を 3 回分平均して、各測点の各方向成分のスペクトルと H/V スペクトル比を求めた。平均過程で、計測時には見逃されたが非定常ノイズが多いと見られる測定データを除外しているため、平均回数が 3 回に満たない測点がいくつかある。

同時測定したデータを使って、増幅スペクトルを算定した。測定毎に算定したスペクトル比を、非常ノイズが少ない測定について平均したものを各測点のスペクトルおよび増幅スペクトルとした。

各測点の H/V スペクトル比の最大ピークとその周波数を各方向毎に抽出し、 i 方向の増幅倍率 A_i および卓越振動数 F_i (Hz) とする。これらの値を用いて、表層地盤の K_g 値⁴⁾ を方向毎に算定し、増幅倍率が大きい成分のデータを用いて表層平均 S 波速度 V_s (m/s)、表層層厚 h (m) を推定した。

(1) K_g 値

K_g 値は、地盤の壊れやすさに関する指標として提案されているもので、 K_g 値に地震時の基盤最大加速度 α_b を掛けると、表層地盤に生じる地震時のせん断歪 γ が大まかに推測できるというものである。

$$\gamma = K_g \times \alpha_b \quad (1)$$

$$K_g = \frac{A^2}{F} \quad (2)$$

ここで、 K_g の単位はマイクロストレイン/Gal ($10^{-6}/(\text{cm/s}^2)$) である。なお、 K_g 値は地盤上の列車の転倒や木造二階建て住宅など小規模構造物の被災しやすさにも関係していると考えられている⁵⁾。

(2) 表層平均 S 波速度 V_s と表層層厚 h ⁶⁾

インピーダンス比と増幅倍率の関係から表層の平均 S 波速度 V_s は次のように求められる。かつこ内は基盤(添字 b)と表層地盤(添字 s)の密度比であるが、不明の場合には、これを 1 と置いても大きな誤差はないので、最終的に (3) 式が得られる。(3) 式は(1)式を導く際にも用いられている。

$$V_s = V_b \times (\rho_b / \rho_s) / A = V_b / A \quad (3)$$

固有振動数 F は次式で表されるので、 V_b を仮定すれば、表層層厚 h を推定することができる。

$$F = V_s / 4h = V_b / 4Ah \quad (4)$$

$$\therefore h = V_b / 4AF \quad (5)$$

3. 調査結果

3.1 周辺地盤

図 4 に回廊より外側の境内で計測された H/V スペクトル比を示す。これによると、大仏を中心にして、西側の地盤がもっとも堅硬であり、南に行くほど、また東に行くほど地盤は軟弱になる。南北測線では南北方向の振動成分が卓越し、東西測線では東西方向の振動成分が卓越する傾向が認められる。

図 5 は、回廊周辺から内側の測点の H/V スペクトル比を、大仏を取り囲む 5 つのゾーン (Z0:基壇上、Z1:基壇周辺地盤、Z2:周辺石畳部分、Z3:回廊内側部分、Z4:回廊外側部分) に分けて示したものである。左側が X 方向 (ほぼ東西)、右側が Y 方向 (ほぼ南北) である。これを見ると、XY ともすべての測点で 2~3Hz の振動が卓越していることがわかる。Y 方向の増幅度が大きいので、地震動は南北方向が卓越するものと予想される。Y 方向の増幅度に着目すると、Z1 では、増幅度は 3 倍を中心に分布しているが Z0 や Z2 では、やや小さい 2.5 倍を中心に分布しており、Z1 の基壇周辺地盤の方が、相対的にやや大きくなっている。

以下、これらのスペクトルから読み取られた卓越振動数と増幅倍率のデータを基に議論を進める。

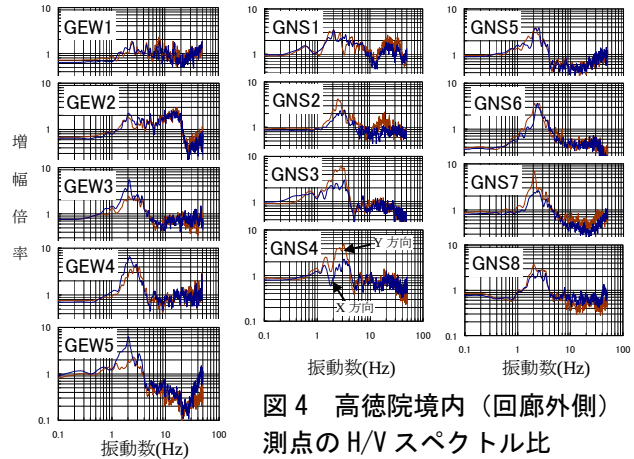


図 4 高德院境内 (回廊外側) 測点の H/V スペクトル比

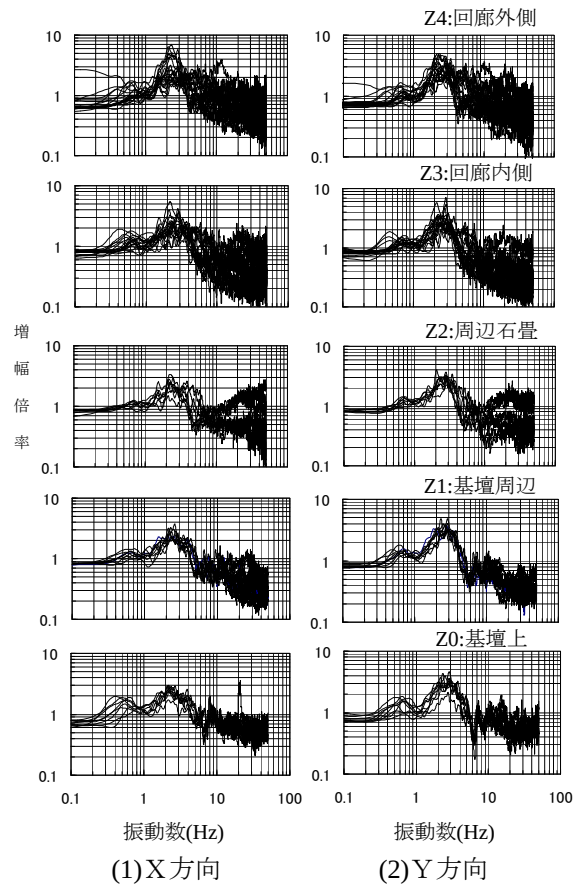


図 5 回廊周辺 Z0~Z4 での H/V スペクトル比

(1) 固有振動数 F と増幅倍率 A

図 6 は、 H/V スペクトル比から読み取った XY 二組の固有振動数 F と増幅倍率 A のペアのうち、増幅倍率の大きい方向成分のものを、測点に対応する位置にバブルの大きさと色で示したものである。バブルの面積が F や A の大きさに比例するように描いている。これによると、 F は西側で振動数が高くなるが、そのほかでは概ね一様であり、 A は場所により大きく変化することがわかる。

(2) 表層平均 S 波速度 V_s と対応する表層層厚 h

ここでは、増幅倍率が大きい方向の固有振動数と増幅倍率を使って、表層の平均 S 波速度 V_s と基盤までの深さ（表層層厚） h を推定した。その際、文献 6) に従い、基盤 S 波速度を 600m/s と仮定した。

推定の精度を確認するため、ボーリング調査データがある地点付近の測点で h の推定値を測定値と比較した。結果を図 7(a) に示すが、両者は概ね一致している。また、図 7(b) は、 V_s の推定結果を表層の平均 N 値と比較したもので、ボーリング調査結果に掲載された基盤の N 値も基盤速度 600m/s に対応させて示している。これによると、 V_s は N 値のほぼ $1/3$ 乗に比例し、既往関係式群の係数と整合している。

以上のことから、ここで採用した V_s と h の推定方法に大きな問題はないと判断した。計測結果から V_s と h を推定した結果を、図 8 と図 9 に示す。

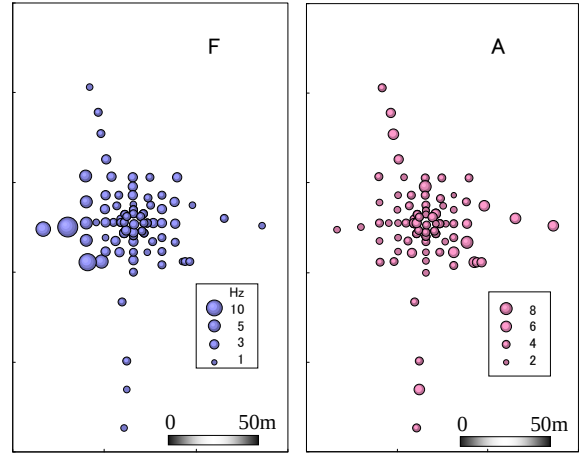


図 6 固有振動数と増幅倍率の分布

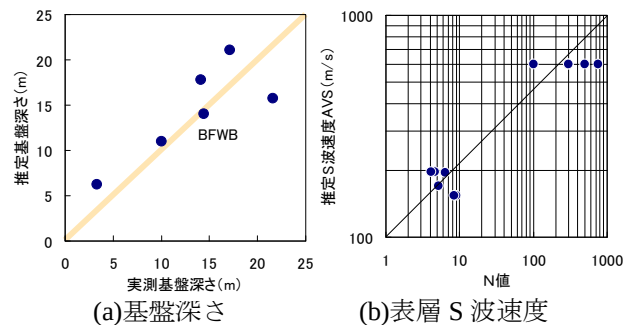


図 7 ボーリング調査結果との比較（検証）

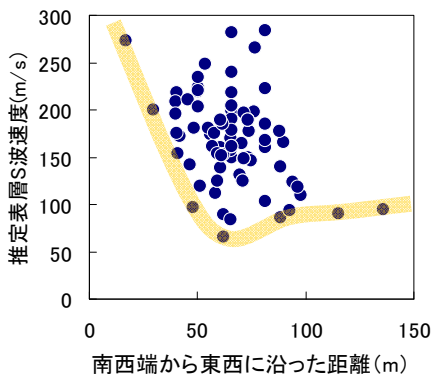
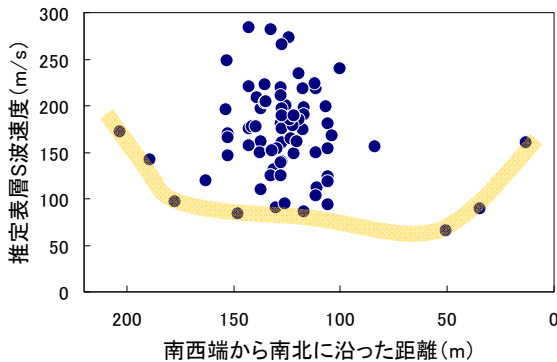


図 8 表層 S 波速度の推定結果

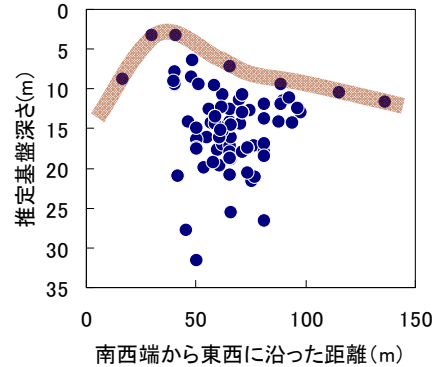
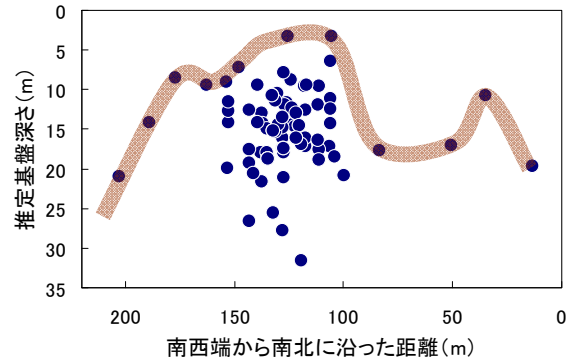


図 9 基盤深さの推定結果

図 8 の V_s についてみると、東西に沿った分布では、西から東に移るにつれて、 V_s が小さくなる傾向が認められ、また、南北に沿った分布では、大仏に向かって V_s が小さくなる傾向が認められる。これに対して、大仏周辺測点では、東西と南北の両測線から推測される値を下限として、それより大きな S 波速度になっている。大仏造立時の版築盛土による圧密効果など人工的な地盤強化の結果とも考えられ、興味深い。なお、柱礎石の下で実施されたと考えられる版築の影響はわからなかった。

図 9 にみられる基盤までの深さは、西に行くほど深くなり、大仏から北に行っても南に行っても深くなるという傾向を示す。基壇周辺の基盤までの深さ h は図 10 に示すように概ね 15m 前後と推定される。これは #2 ボーリングの調査結果と概ね一致している。

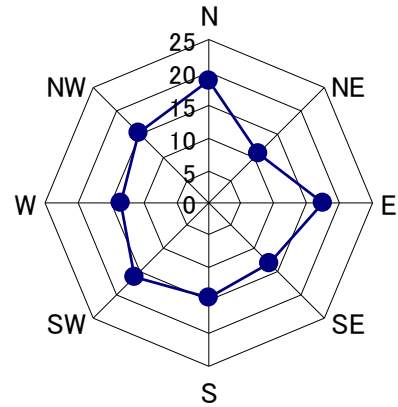
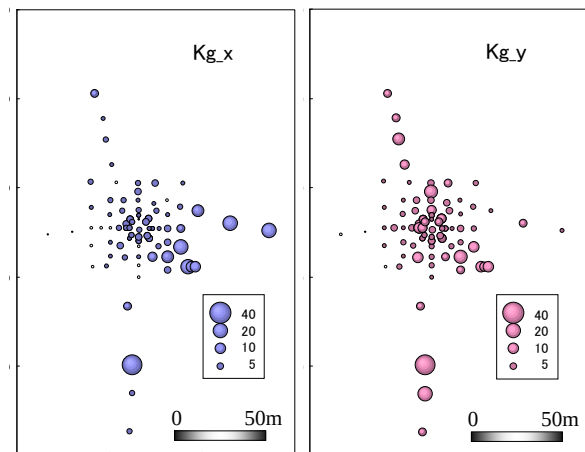


図 10 基壇周辺の推定基盤深さ (m)

(3) K_g 値

図 11 は、地盤の壊れやすさ指数 K_g 値の大きさをバブルの面積に対応させて、測点に対応する位置に示したものである。 K_g 値は場所によって値が大きく変化しており、東西方向の K_g 値は、大仏の左前方 (南東) と東方で大きいこと、基壇周辺では全般に K_g 値がやや大きくなっており、概ね Y 方向 (南北) が卓越していること、などがわかる。なお、以下の議論では K_g 値の単位 ($10^{-6}/\text{Gal}$) を省略している。

図 11 地盤の壊れやすさ指数 K_g 値

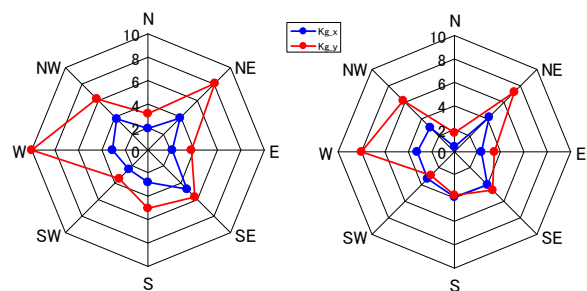
回廊の外側の、旧大仏殿の東南端付近 (大仏から見て左側) の柱礎石跡付近や東方では、X 方向 (東西) の K_g 値が 20 前後とかなり大きい。これは写真 5 に示す被災状況と矛盾しない。また、大仏基壇の北側 IG8 では Y 方向 (南北) の K_g 値が 18 近くの値となっている。これらの K_g 値によれば、地盤変状が始まる基盤地震動加速度は、概ね 50Gal 以上と推測される。表層地盤の増幅を考えれば、地表では概ね 150Gal 以上となる。これは震度 5 に相当するが、修理報告書にある河角広博士の調査結果によると、この程度の地震動には、鎌倉大仏創建以後、幾度も遭遇している。旧大仏殿が地震で損壊したとすれば、それは大仏後方と左前方から始まったと考えることができる。なお、大仏の左肩にはやや後方からの落下物によると思われる凹みが残っている (写真 4)。



写真 4 大仏左肩に残る凹み

次に、地震時の大仏基壇の被害と対比するため、大仏基壇上と周辺地盤の K_g 値について検討する。

図 12 に基壇周辺地盤と基壇における H/V スペクトルから算定した K_g 値を方向成分毎に示す。全般に Y 方向成分 (ほぼ南北方向成分) が卓越しており、西側で突出している (基壇で最大 8、基壇周辺で最大 10)。南側基壇での K_g 値は 3.7 で、北側基壇 (1.6) の 2 倍以上となっている。大正地震における大仏周辺の基盤最大加速度は 300Gal 程度と推測されるが、基壇の下の地盤で発生したせん断歪は北側で約 500



(a) 基壇周辺地盤

(b) 基壇

図 12 基壇およびその周辺地盤の K_g 値

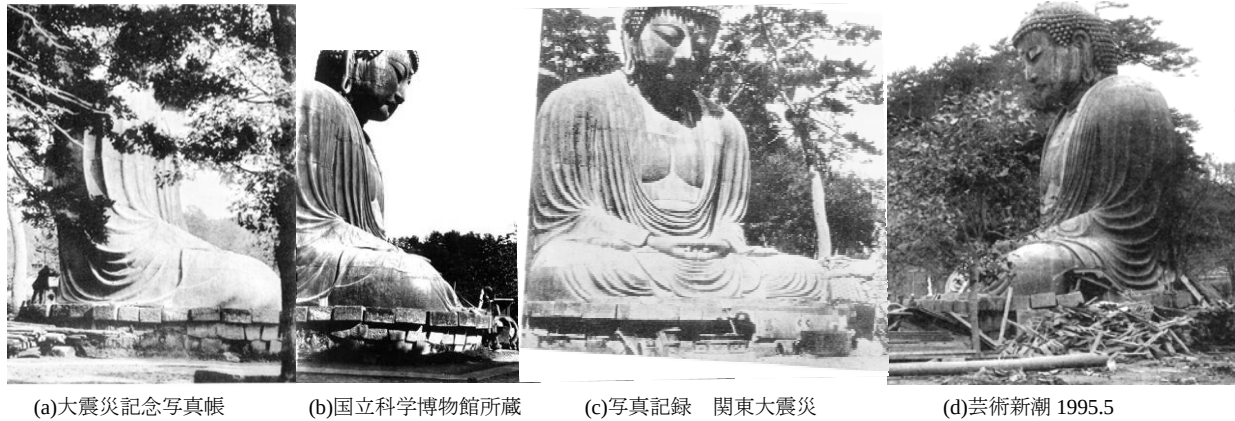


写真 5 大正関東地震による被災状況

$\times 10^{-6}$ 、南側で約 1100×10^{-6} 、西側で約 2400×10^{-6} と推定される。すなわち、北側ではほとんど基壇下の地盤は変状せず、南側で軽微な地盤変状が発生、西側では液状化した可能性がある。

写真 5 に示すように、大正関東地震では、大仏は、南 15 度東の方向に約 30cm 前進し、のめり込むように約 50cm 沈下したとされている。また、西側の基壇笠石が大きく変状している被災状況は、 K_g 値の分布と整合しているようにみえる。

3.2 基壇と大仏

図 13 には、大仏本体と大仏基部の測点と基壇上面中心 BFC のスペクトル比を一番上とその下に、またその下には基壇上測点と基壇周辺地盤のスペクトル比を示した。

周辺地盤が 2-3Hz で卓越しているのに対して、基壇では、X 方向が 6.2Hz と 9Hz 前後、Y 方向が 5.5Hz、7.5Hz と 10Hz 前後、で卓越している。

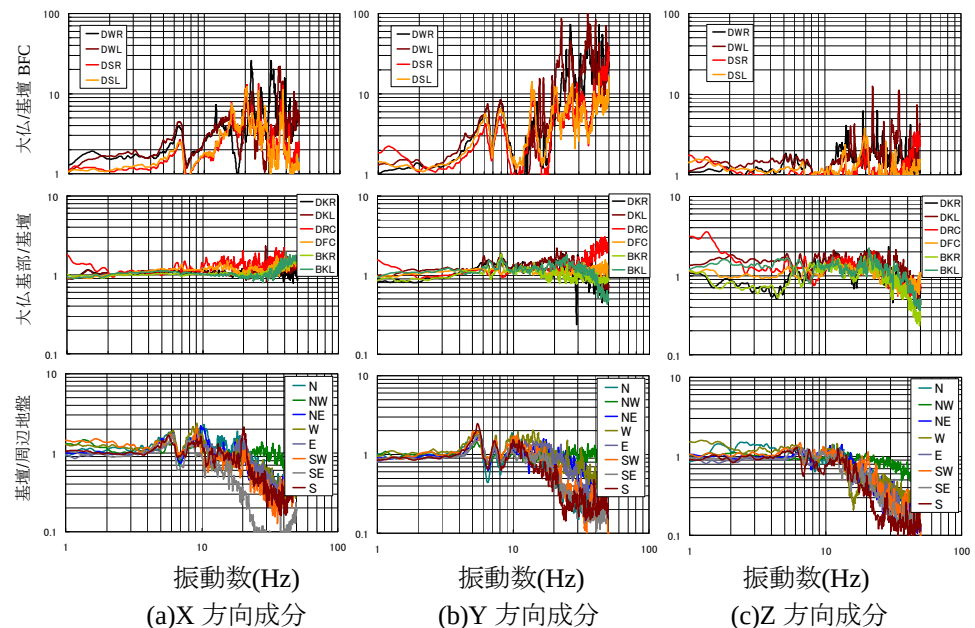


図 13 基壇と大仏各部の応答スペクトルほか

しかし、増幅倍率は、概ね 2 倍以下と小さい。基壇の増幅スペクトルは 10Hz～20Hz のカットオフ周波数で 2 次近くのハイカットフィルターがかかっているように見える。これは入力損失の効果が現れているものと推察されるが、高い振動数の増幅度が大きい大仏にとっては好ましい効果である。

また、基壇上面の測点 (BFC、BKL、BKR) と、大仏下部を強化しているコンクリート基部上の測点 (DKL、DKR、DRC、DFC) では、基壇中央の BFC に対して水平動は大きな増幅を示さずほぼ同一の動きを示しており、基壇および大仏基礎コンクリートがともに健全であることを示唆している。上下動については、特に 6Hz 以下の部分で 1/2 倍～2 倍の範囲で場所により異なる動きを示しており、低い振動数の振動に対してやや可撓性があることを示唆している。

基壇中央面上面 BFC に対する大仏内の支持架構測点 (DSL、DSR) や背面窓枠測点 (DWL、DWR) の応答倍率はこれらの測点で類似する特徴ある傾向を示している。すなわち、1) 20Hz 以上で急に増幅が大きくなる、2) Z 方向で小さく、Y 方向で顕著に大きな増幅を示す。これらは各所に継ぎ目が存在す

る仏体の構造に起因しているものと推察される。

まず、10Hz 以下の振動についてみると、X 方向(東西動)が 6.5Hz 前後で約 2.5 倍(DS)～4.2 倍(DW)、Y 方向が 6.3Hz 前後と 8Hz 弱で、それぞれ、約 5.3 倍(DS)～8.6 倍(DW)、約 4.3 倍(DS)～7.6 倍(DW)、となっている。前後動は左右動の 2 倍以上の増幅倍率となっており、地震時には前後動が卓越するものと推測される。これらの振動に対応する上下動の増幅は小さく明瞭ではない。ロッキング的な振動ではない可能性がある。頭部の振動は前後動が主体的で、構造上、その振動の影響は、胸腹部を通じて支持架構測点の上下動に現れると考えられる。つまり、10Hz 以下の振動は頭部に関係してないと推測される。これに対して窓部や支持架構測点の Y 方向(前後動)に見られる 14Hz や 20Hz の振動は、支持架構測点の Z 方向にも明瞭に認められ、頭部の振動に関係する可能性が高い。20Hz を超える振動が仏体に与える影響は大きくないと考えられるので、その分析については今後の課題としたい。

胸腹部を支える鋼製門型支持架構は仏体の前後方向のロッキング振動を抑えるような構造となっている。なお、支持架構の原型である支持石柱は、元禄地震の被害の後、はじめて設けられたが、大正地震の際、石柱頭角部がかなり損傷した。大正修理の際、コンクリート柱に置き換えられ、さらに昭和の修理で仏体とともに基壇上を動くことができる鋼製門型架構に替えられている。

4. おわりに

本調査は予備的に行ったものであるが、いくつか興味深い知見が得られた。

大仏基壇は、記録に残っているものだけでも二度、地震により大きく沈下傾斜している。微動調査の結果によれば、その要因は地盤変状にある可能性が高い。この地盤変状は、強震動を仏体に伝える効果もあり、天然の免震装置として機能したと思われる。しかし、現状ではステンレス板による免震機構のため、地震で基壇が沈下傾斜すれば仏体が滑り落ちるおそれがあり、早急な対策が望まれる。なお、地震時に基礎地盤が変状する可能性については、昭和の修理では考慮されていない。

また、頸部の補強対策も 50 年を経て FRP の経年劣化が心配されているが、微動調査の結果から頭部の固有振動数はかなり高いと推測され、もともと胴体と頭部の定着はそれほど悪くない可能性がある。これについては、頭部の振動を早急に実測して確認する必要がある。

境内の様子は、震災当時とも修理当時とも、大きく異なっている。まず現状を把握することが重要である。そこで、とりあえず計測できるものを計測して、現状把握を試みたが、今回は、大仏本体の計測に関しては、限られた部分しか行っていない。重要な頭部の振動なども計測できていないが、頸部の状況を正確に把握するためにも、今回の知見を踏まえながら、今後、改めて詳細な調査を行う必要がある。本調査結果が、今後の合理的な地震対策策定に資することができれば幸いである。

ステンレス板を用いた免震機能についてはある程度以上の強震動のもとでなければ、確認することはできない。震度 0.3 以下の地震では滑り出さないことを目標に作られているが、台座の花崗岩(ビシャン仕上げ)とステンレス板の摩擦係数は実験的に 0.45 と求められている。450Gal 以上の地震動で滑り始めることになるが、地震動には高い振動数成分の上下動振動も含まれており、実際の滑り出し加速度は地震観測を行って確認するしかない。関係者と緊密な連携をとりながら、頭部の地震動応答なども含めた強震観測の実現をめざしたい。

謝辞

本調査は、高德院住職 佐藤孝雄師(慶応大学教授)のご理解とご支援の下に実施された。記して深甚の謝意を表す。地盤の測定に際しては、東京工業大学大町研究室の田原徹也君と古川陽君に手伝っていただいた。東京文化財研究所の久世めぐみ様には大正関東地震の被害写真の情報を教えていただいた。これらの方々に謝意を表するとともに、本調査に関係された皆様のご協力に改めて感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 関野 克(編集)：高德院国宝銅造阿弥陀如来座像修理工事報告書、1961. 7.
- 2) 中村 豊、井上修作、森井順之、大町達夫：鎌倉大仏およびその周辺地盤の地震動特性調査、首都圏大震災軽減のための実践的都市工学研究の展開 平成 21 年度成果報告シンポジウム予稿集、2010. 3.
- 3) 鎌倉市教育委員会：鎌倉大仏周辺発掘報告調査書、2002. 3.
- 4) 中村 豊、滝沢太朗：常時微動を用いた地盤の液状化予測、土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集、I-519、pp. 1067-1069、1990. 9.
- 5) 中村 豊：兵庫県南部地震による留置列車の脱線・転覆と周辺地盤の常時微動特性の関係、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、I-470、pp. 940-941、1995. 9.
- 6) 中村 豊、滝沢太朗：常時微動による表層層厚と基盤および表層地盤の S 波速度の推定、鉄道総研報告、Vol. 4、No. 9、pp. 29-35、1990. 9.