

2007年能登半島地震による總持寺の被害と地盤探査・建物振動計測

DAMAGES OF SOUJI-JI TEMPLE DUE TO THE 2007 NOTO HANTO EARTHQUAKE AND RELATED SOIL SURVEY AND BUILDING RESPONSE OBSERVATION

藤井智規 — *1 魚津忠弘 — *1
福和伸夫 — *2 飛田 潤 — *3

Tomoki FUJII — *1 Tadahiro UOTSU — *1
Nobuo FUKUWA — *2 Jun TOBITA — *3

キーワード：
能登半島地震, 伝統木造建築, 常時微動計測, 強震観測, 微動アレイ探査, レイリー波探査

Keywords:
The 2007 Noto Hanto Earthquake, Traditional wooden structure, Microtremor measurement, Seismic observation, Array observation, Rayleigh wave investigation

Seismic damage of a temple of traditional wooden building due to the 2007 Noto Hanto Earthquake was investigated. Some additional survey on surface soil layers and buildings were also done. As a result, soft reclaimed soil under Hatto, one of the largest temple building in the site, was shown to be one of the dominant reason for the building damage. The Hatto building and its surrounding ground were investigated in detail by microtremor and seismic response observations. Dynamic characteristics of the buildings and ground were shown.

1. 序論

2007年3月25日に発生した能登半島地震により、輪島市門前町では震度6強を観測しており、周辺では多数の建物被害が報告されている¹⁾。本報告で対象とする總持寺祖院も境内の多くの建物が被害を受けた。總持寺祖院はかつての曹洞宗大本山であり、明治時代に殆どの建物を焼失したため大本山を神奈川県に移転したが、現在は建物が復元されている。

本報告では、2007年能登半島地震による總持寺祖院の被害状況をまとめ、なかでも主要な建造物である法堂について詳細な被害調査を行った結果を述べる。またその被害要因を検討するために、敷地内での表層地盤探査や建物常時微動計測、余震観測などを行った結果について分析を加える。

2. 總持寺祖院の被害状況

總持寺祖院は震度観測点のある旧門前町役場から200mほど、緩やかな傾斜を登った所に位置する。境内の配置図を図1に示す。図中の円内の数値は山門を基準とした地面の高低差を表しており、敷地内に段差があることが分かる。山門は旧門前町役場から約5m高く、南東側の仏殿や法堂は更に2~4m高い所にある。表層地質は第三期層で²⁾、比較的良好な地盤と考えられるが、敷地内の地盤調査資料は得られていない。

表1に建物の被害状況を簡単にまとめた。なかでも被害が大きい僧堂は建物全体が大きく南側に傾き、芳春院は後堂柱が礎石から落ちて南側に傾いた。法堂や仏殿は建物が傾き、漆喰壁が剥がれる、建具の建付けが悪くなるなどの被害が見られた。その他の建物は柱が礎石から落ちる、漆喰壁が剥がれるなどの

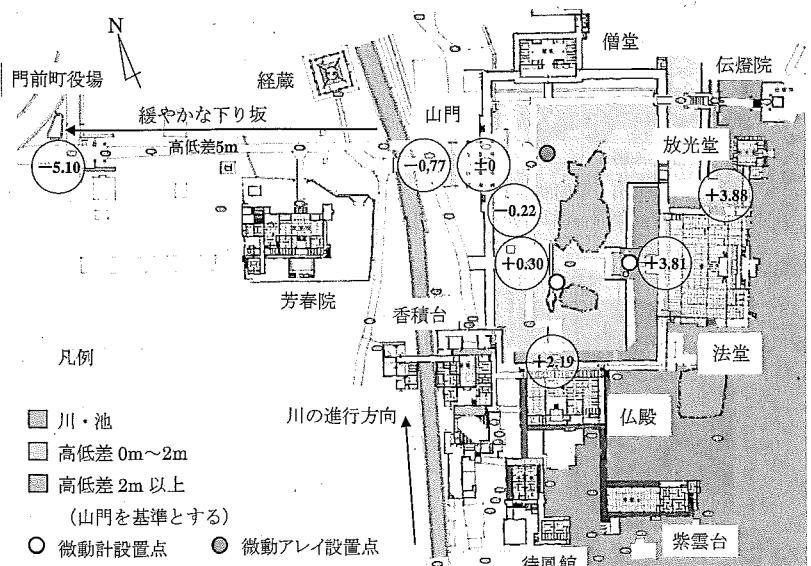


図1 境内配置図

表1 境内建物の主な被害

建物名称	主な被害
芳春院	後堂柱が礎石から落ち傾斜
経蔵	漆喰壁が剥がれる
廻廊	柱が礎石からずれる、一部建物の傾斜
山門	大きな被害無し
僧堂	境内側へ大きく傾斜、土壁が剥がれる
伝燈院	柱が礎石からずれる
法堂	向拝側に傾斜、漆喰壁が剥がれる
放光堂	漆喰壁が剥がれる
仏殿	漆喰壁が剥がれる
紫雲台	漆喰壁が剥がれる
待鳳館	漆喰壁が剥がれる
香積台	漆喰壁が剥がれる

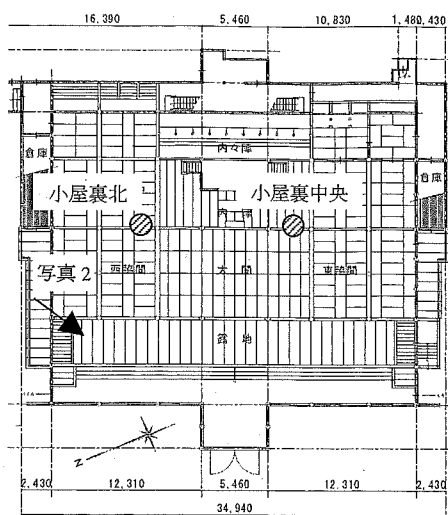
表2 法堂の緒元

社寺名称	總持寺祖院・法堂
所在地	石川県輪島市門前町
宗派	曹洞宗
本堂建立年	1910
軒高[m]	20.57
面積[m ²]	941
柱の最大径[mm]	375
計測時の補強	無
表層地質	新第三紀層
耐震補強	無
基礎	礎石

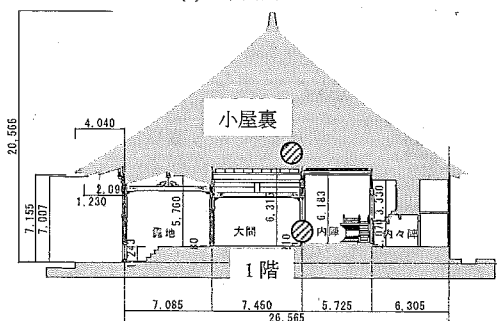
*1 魚津社寺工務店 修士(工学)
(〒454-0004 愛知県名古屋市中西区西日置2-12-20)
*2 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博
*3 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博

*1 Uotsu Shaji Corporation, M. Eng.

*2 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.
*3 Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.



(a) 平面図



(b) 梁間断面図
図2 法堂図面

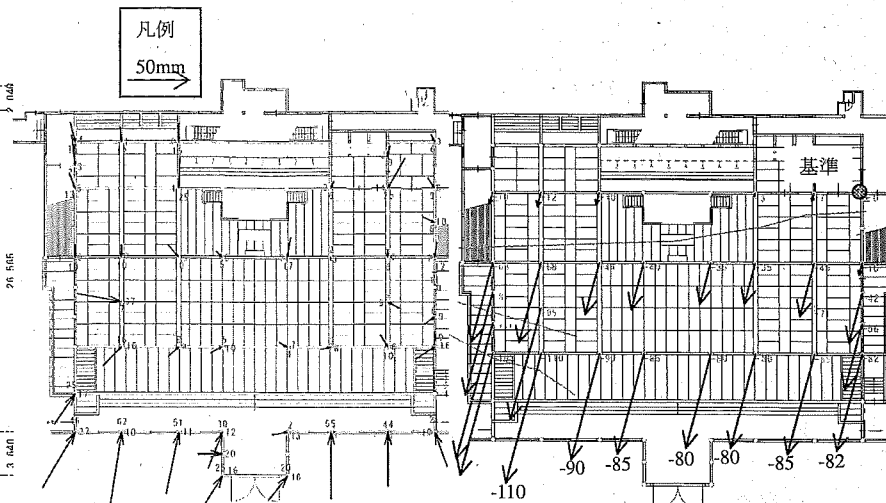


図3 柱の傾斜



写真1 總持寺・法堂

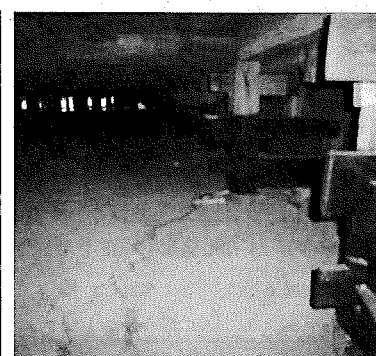


写真2 床下のクラック

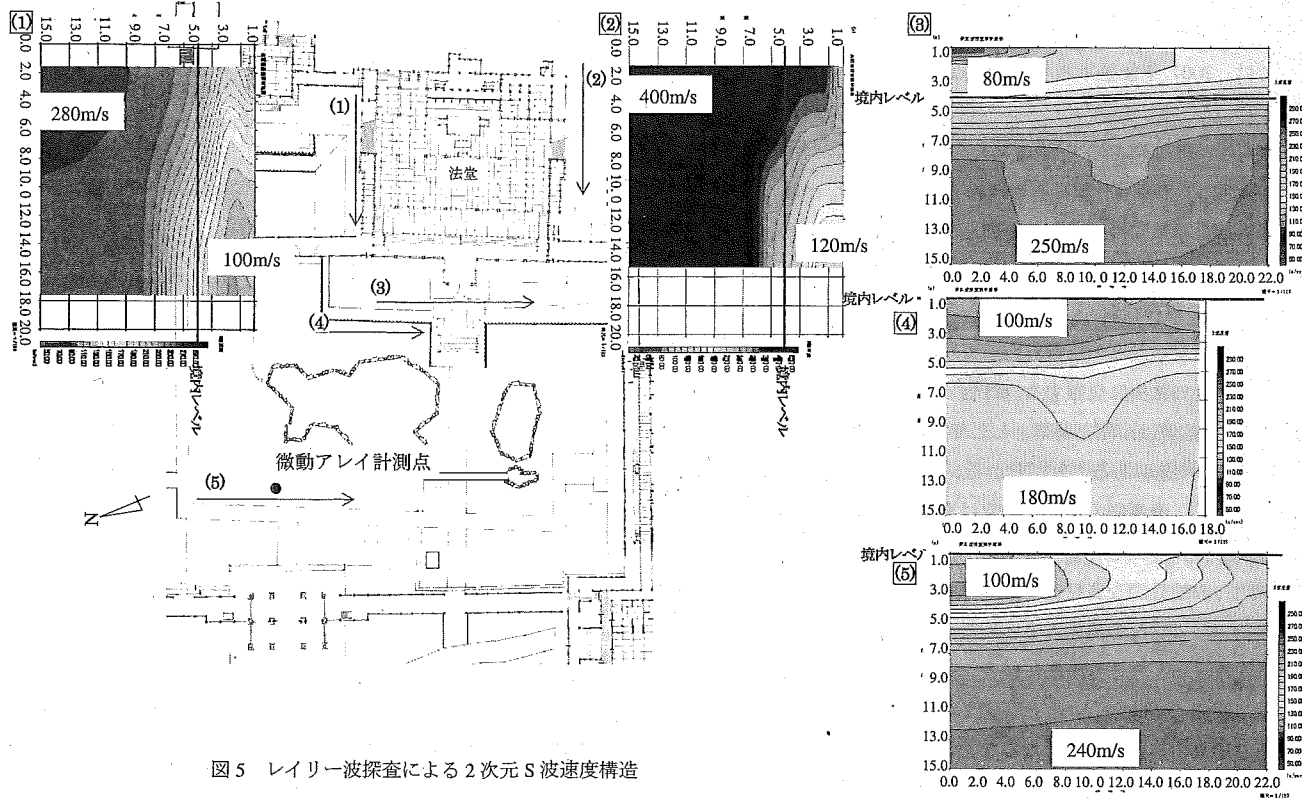


図5 レイリー波探査による2次元S波速度構造

比較的軽微な被害であった。

本報告では、重要な建物で被害も大きかった法堂を詳細に調査した。法堂の緒元を表2に、平面と断面を図2に示す。図中の丸印は微動計設置点を表す。一般的な社寺の本堂と比べて建物規模がやや大きい。

能登半島地震から約3週間後に柱の傾斜および床の沈下量を実測した。その結果を図3,4に示す。また法堂外観および床下のクラックを写真1,2に示す。図3は下げ振りをを用いて実測した柱の傾斜の結果であり、矢印は柱脚に対する柱頭の相対変位の方向および変位量を表している。図4は床の沈下量と地盤クラック位置を示す。沈下はレーザー水平器を用いて測定し、図の矢印は沈下量が最小の点を基準として各柱脚の沈下量を矢印の大きさで表している。なお、矢印の向きに意味は無く、図を見やすくするように決めた。図3の結果および桁・貫のほぞの抜けが小さかったことから、大間および露地の柱脚が西側へ移動・傾斜したと見られる。床下地盤のクラックが南北方向に走っており、地盤レベルの低い西側の柱の沈下量が著しく大きいことから、地震により盛土が崩れクラックが発生し、クラックより西の礎石・柱が西側へ引っ張られたと考えられる。

3. 法堂周辺の表層地盤探査

境内の地質調査資料が無く、新規調査も困難であったため、正三角形型の常時微動アレイ計測およびレイリー波探査を行った³⁾。法堂周辺の計測位置および分析結果を図5に示す。(1)~(5)は浅層レイリー波探査の測線であり、それぞれの断面図と対応している。

(1)および(2)より、法堂下の表層地盤の浅い位置にS波速度約100m/sの軟弱層が見られ、いずれも西に行くほど軟弱層が厚い。中でも(1)の西側のS波速度が最も小さかった。一方、内陣側の表層はS波速度が300m/s以上あり、建物が比較的硬い地表面に接していると考えられる。図1より敷地が西側で低くなっていること、図3,4から西側ほど沈下が大きく柱も傾いていることも考えて、法堂は傾斜地の切盛境界上に建てられており、今回の地震で盛土が大きく変形したために被害を受けたと予想される。図5に示す位置で微動アレイ計測を行い得られた1次元S波速度構造を図6に示す。(5)測線の結果と対応したS波速度構造が得られている。

4. 法堂の常時微動計測結果

法堂および地盤の常時微動計測を2007年4月20日に実施した。水平と上下の3成分が同時に計測可能な動コイル型速度計を地盤、1階中央、1階北、小屋裏中央、小屋裏北の5点に設置し、30分間の計測を2回行った。収録は100Hzサンプリングで、速度計の周期を5秒とした。速度波形のノイズ部分を除き、41秒間の記録を30サンプル以上重ね合わせて平均化した。減衰定数はRD法を用いて自由振動波形を生成し、2自由度の理論自由振動波形をフィッティングして求めた⁴⁾。法堂の伝達関数を図7、RD波形を図8に示す。図7のピークは明確であり、梁間、桁行ともに1.27Hzが大きく卓越しており、一次固有振動数と考えられる。図8より、得られたRD波形と理論波形がほぼ一致しており、

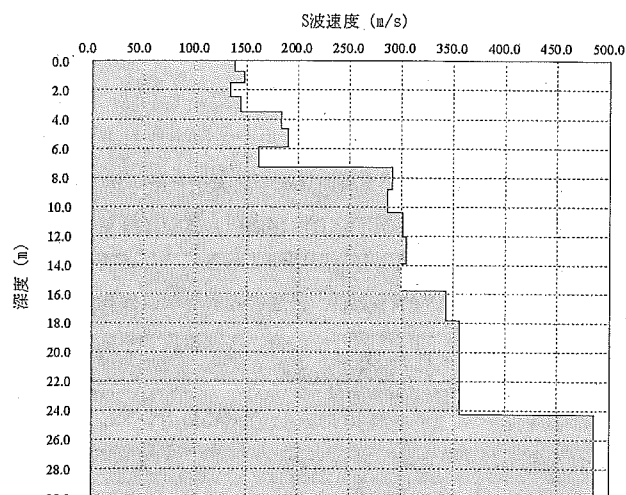


図6 微動アレイによる1次元S波速度構造

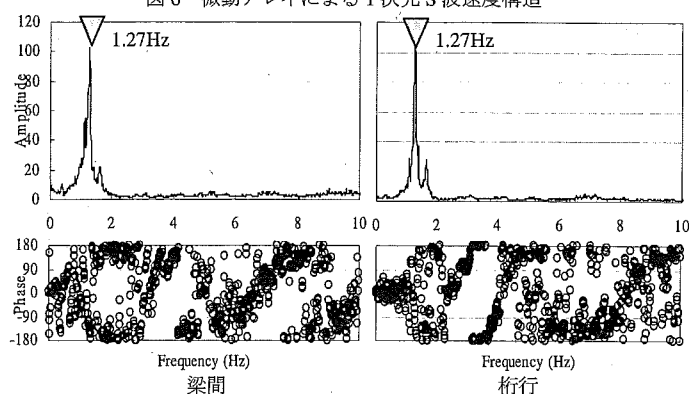


図7 小屋裏中央/地盤 伝達関数

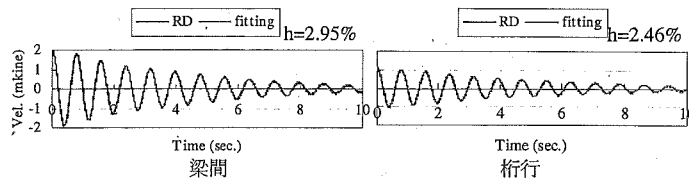
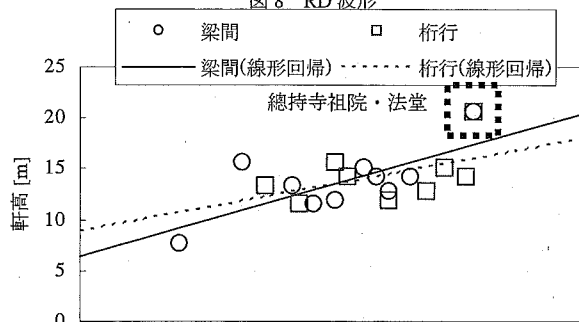
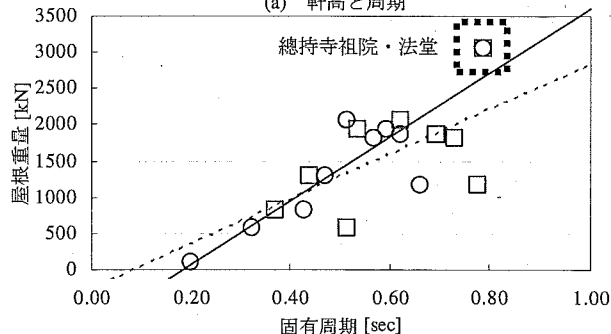


図8 RD波形



(a) 軒高と周期



(b) 屋根重量と周期

図9 固有周期の相関関係

減衰定数の推定は妥当と判断した。得られた固有振動数・減衰定数はいずれも地盤-建物連成系の値である。

ここで、過去に計測を実施した 8 棟の一般的社寺建築の常時微動計測結果と比較する^{5),6)}。固有周期と軒高との関係を図 9(a)、屋根重量との関係を図 9(b)に示す。屋根重量は建物の床面積を基に算出した⁷⁾。

法堂は一般的な社寺の本堂に比べて規模が大きく、建物の固有周期は過去に計測を行った本堂より長周期側にある。ここで既往の計測結果を基に回帰直線を求めたところ、法堂の固有周期は軒高から推定される周期よりも短周期側に位置し、同様に建物重量から推定される周期よりも短周期側にあることが分かる。

地盤の H/V スペクトルを図 10 に示す。法堂の境内レベル上および盛土上の結果をそれぞれ実線、破線で表している。境内上と盛土上のいずれも、約 0.25~0.5 秒の短周期が卓越している。ここで、図 6 から 30m 以内の S 波速度の平均を 300m/s と仮定すると、1/4 波長則より周期は 0.25 秒となり、H/V スペクトルの結果と概ね一致することが分かる。

5. 強震観測記録による考察

2007 年 4 月 20 日から 5 月 9 日までの期間、法堂小屋裏および地盤に地震計を設置し、余震観測を行った。この期間に起きた地震のうち、法堂小屋裏で震度 2 以上を観測した地震記録の一覧を表 3 に示す。法堂と震源の震央距離を求めると、いずれも 10km 未満であった。

また、地盤および法堂の最大加速度、最大変位、法堂の建物-地盤連成系の伝達関数から求めた固有周期を表 4 に示す。変位記録は、地震計から得た加速度記録にバンドパスフィルタをかけて 2 回積分した波形から求めた。地震による振幅の最大値と固有周期の関係を図 11 に示す。振幅が微小な値を示す記録は、常時微動計測から得た固有周期を表している。図 11 より、サンプル数は少ないものの、中規模地震までの法堂の振幅と固有周期の振幅依存性を見ることが出来た。最大振幅が 1mm を超えると固有周期が 1 秒を超える結果が得られた。

6. まとめ

かつての曹洞宗大本山であった總持寺祖院について、建物配置と 2007 年能登半島地震の被害状況を簡潔にまとめた。なかでも重要かつ被害の大きかった法堂を対象に、柱脚の傾斜や床の沈下量を実測し、表層地盤探査による切盛土の調査、および建物の常時微動計測・余震観測を実施した。

法堂の詳細な調査と表層地盤探査の結果から、被害の主な原因は傾

斜地の盛土が変形したことにより礎石・柱脚が引き摺られたものと考えられる。常時微動計測から法堂と地盤の周期の関係が得られ、大地震後の余震観測によって、固有周期の振幅依存性を得た。

【謝辞】 總持寺祖院には、被害調査および各種計測にあたり、ご理解とご協力を示して頂きました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 横路聡,増田剛美,畑中宗憲,加倉井正昭:2007 年能登半島地震被害調査速報,学術講演梗概集,B-2,pp163-164,2007.8
- 2) 地質調査所:日本列島の地質,1995
- 3) 鈴木晴彦,林宏一,信岡大:表面波を用いた地震探査—人工振源を用いた基礎的実験—,物理探査学会第 102 回学術講演会論文集,pp62-65
- 4) 吉田昭仁,田村幸雄,舩田健次,伊藤隆文:超高鋼製煙突の動特性評価:その 2 自由度 RD 法と FDD による動特性評価,学術講演梗概集,B-2,pp887-888,2002.8
- 5) 藤井智規,福和伸夫,飛田潤,吉田明義:文化財の耐震性向上のための社寺建築の振動特性に関する研究,学術講演梗概集,C-1,pp465-466,2006.9
- 6) 藤井智規,福和伸夫,飛田潤:耐震改修予定の社寺建築の常時微動計測に基づく振動特性データベース,学術講演梗概集,C-1,pp437-438,2007.8
- 7) 重要文化財建造物基礎診断実施要領,文化庁

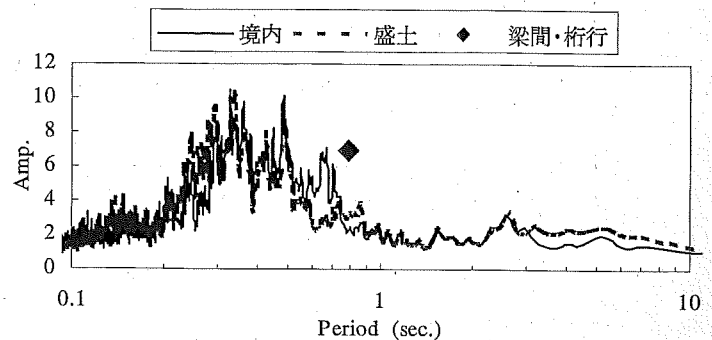


図 10 地盤の H/V スペクトル

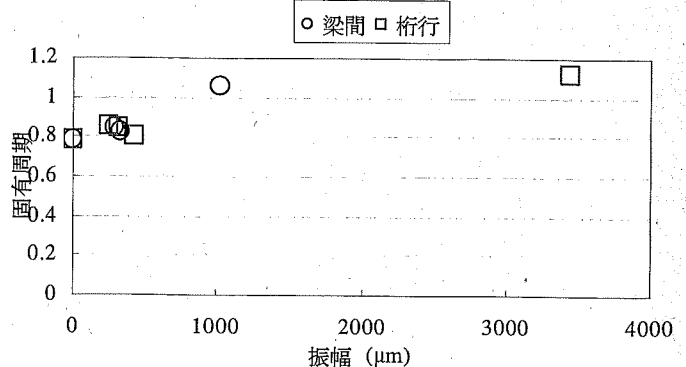


図 11 最大振幅と固有周期の関係

表 3 地震観測記録一覧

日時	震源地	緯度	経度	震央距離 (km)	震源深さ (km)	マグニチュード	計測震度
2007年4月28日17:55:56.7	石川県能登地方	37° 14.8'N	136° 44.4'E	5.2	4	3.2	地盤 2 法堂 2
2007年5月2日10:15:43.4	能登半島沖	37° 14.3'N	136° 41.3'E	9.0	8	3.4	2 2
2007年5月2日20:44:38.2	石川県能登地方	37° 19.8'N	136° 45.7'E	4.9	7	4.7	4 4
2007年5月2日21:47:23.5	石川県能登地方	37° 20.2'N	136° 45.5'E	5.7	7	3.4	2 2

表 4 最大加速度・最大変位・固有周期

日時	地盤最大加速度(gal)			法堂最大加速度(gal)		地盤最大変位(μm)			法堂最大変位(μm)		法堂固有周期(sec.)	
	梁間	桁行	上下	梁間	桁行	梁間	桁行	上下	梁間	桁行	梁間	桁行
2007年4月28日17:55:56.7	16.2	27.8	2.9	8.9	10.5	265	236	245	285	427	0.84	0.81
2007年5月2日10:15:43.4	22.0	25.3	3.0	11.2	10.3	348	359	279	284	243	-	0.85
2007年5月2日20:44:38.2	179.5	142.9	34.1	69.1	34.3	6053	2861	1022	1027	3444	1.05	1.12
2007年5月2日21:47:23.5	24.8	14.1	3.8	8.1	7.1	256	210	247	329	321	0.82	0.84
常時微動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.79	0.79