

アウグスタ飛行船格納庫常時微動測定報告書（速報）

目次

1. 調査目的とその概要

2. アウグスタ飛行船格納庫
 - 2.1 建物概要
 - 2.2 常時微動測定
 - (1) 測定位置と測定方法
 - (2) 測定結果

3. まとめ

1. 調査目的とその概要

本報告は科学研究費補助金「ラクイラ震災被害における文化遺産建築の修復・補強と保護に関する調査・研究（研究代表者：青木孝義 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科助教授，平成 22 年度～25 年度 基盤研究(A)（海外学術調査））」の調査の一環として，構造補強工事後のアウグスタ飛行船格納庫（1917 年建設，1987 年国宝指定）の常時微動測定の結果を取りまとめたものである。調査の日程および調査メンバーは以下のとおりである。

■調査メンバー（五十音順）

青木孝義（名古屋市立大学）	研究統括
岸本一蔵（近畿大学）	静的モニタリング
迫田丈志（堀江建築工学研究所）	静的モニタリング
高橋典之（東京大学生産技術研究所）	微動計測
崔 琥（東京大学生産技術研究所）	微動計測
濱崎 仁（建築研究所）	静的モニタリング
松井智哉（豊橋技術科学大学）	微動計測

■微動計測チーム*調査日程（2012 年 11 月 11 日～11 月 17 日：現地時間）

2012 年 11 月 11 日

21:55 成田発ーパリ行／JL5055 便

2012 年 11 月 12 日

04:20 パリ着

09:45 パリ発ーローマ行／AF1504 便

11:50 ローマ着

14:20 ローマ発ーカタールニア行／AZ1741 便

15:40 カタールニア空港着／ロストバゲージ対応待ち／レンタカー

20:30 ホテル（Hotel Villa Dei Cesari）着

2012 年 11 月 13 日

08:00 ホテル（Hotel Villa Dei Cesari）発

08:20 飛行船格納庫着／補強状況の確認

10:20 微動計設置予定箇所の確認／ロストバゲージ対応

12:30 昼食

13:30 ロストバゲージ到着

14:00 微動計動作確認

14:40 計測ケース 0-1（地盤北側：東 30m／C22 フォルダ）の H/V 計測

15:10 計測ケース 0-2（地盤南側：南 10m／C23 フォルダ）の H/V 計測

- 15:20 高所作業車による軒高レベル・キャットウォークレベルの設置予定位置確認
- 16:00 計測ケース 0-3 (地盤南側：南 20m/C24 フォルダ) の H/V 計測
- 16:25 計測ケース 0-4 (地盤南側：南 30m/C25 フォルダ) の H/V 計測
- 17:00 飛行船格納庫発
- 17:20 ホテル (Hotel Villa Dei Cesari) 着

2012 年 11 月 14 日

- 07:50 ホテル (Hotel Villa Dei Cesari) 発
- 08:00 飛行船格納庫着
- 09:00 計測ケース 1 (C26, C27 フォルダ) の計測
- 10:10 計測ケース 2 (C28 フォルダ) の計測
- 11:20 計測ケース 3-1 (C29 フォルダ) の計測
- 11:30 計測ケース 3-2 (C30 フォルダ) の計測
- 12:20 計測ケース 4 (C31 フォルダ) の計測
- 12:40 計測ケース 5 (C32 フォルダ) の計測
- 13:00 昼食
- 13:30 計測ステーションの移動
- 14:30 計測ケース 6 (C33 フォルダ) の計測
- 15:10 片づけ
- 15:30 飛行船格納庫南側 (海岸側) の視察
- 16:40 飛行船格納庫発
- 17:30 ホテル (Hotel Villa Dei Cesari) 着

2012 年 11 月 15 日

- 08:30 ホテル (Hotel Villa Dei Cesari) 発
- 12:35 カターニア発ーローマ行/AF9911 便
- 14:00 ローマ着
- 15:30 ローマ発ーパリ行/AF9845 便
- 17:40 パリ着
- 19:00 ホテル (Only Suites Paris CDG) 着

2012 年 11 月 16 日

- 08:00 ホテル (Only Suites Paris CDG) 発
- 18:05 パリ発ー成田行/JL406 便

2012 年 11 月 17 日

- 14:05 成田着

2. アウグスタ飛行船格納庫

2.1 建物概要

アウグスタの飛行船格納庫（1917年建設，1987年国宝指定）は，イタリアシチリア島東部アウグスタの丘陵地帯にあり，鉄製の大扉と左右に各16のバットレスを有する鉄筋コンクリート構造物である．15の鉄筋コンクリートフレームと水平方向のつなぎ材である梁の上にレンガを詰めたものから成っており，外形長さ105.5m，幅45.20m，高さ37.00mで内法は長さ100.00m，幅26.00m，高さ31.00mである．ヨーロッパにおいて鉄筋コンクリートで作られた唯一の現存する飛行船格納庫であると言われ，イタリア国宝として指定された歴史的価値の高い建築物の一つである．

図 2-1 に格納庫の南側外観を，図 2-2 に北側からの内観を，図 2-3 に平面図と柱番号割付，図 2-4 に断面図と柱番号割付をそれぞれ示す．

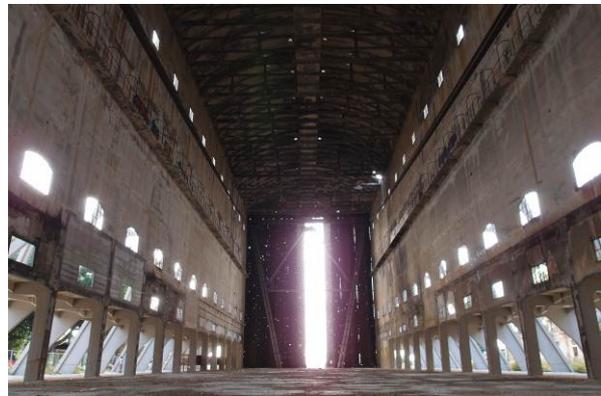


図 2-1 飛行船格納庫概観（南面より）

図 2-2 飛行船格納庫内観（北面より）

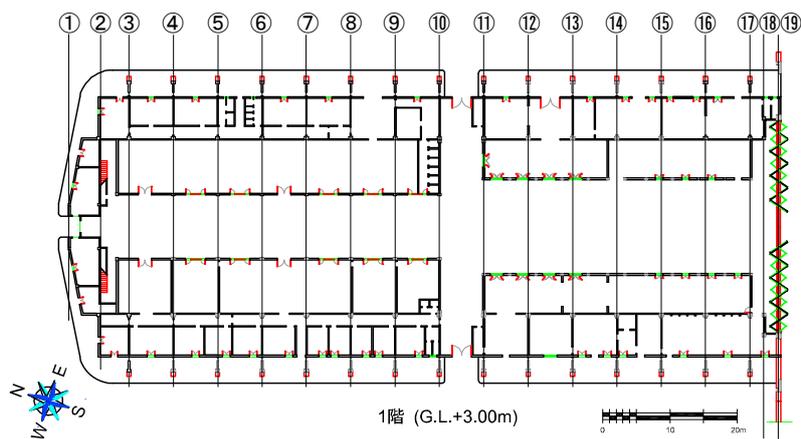


図 2-3 アウグスタ飛行船格納庫平面図（改修工事前）と柱番号割付

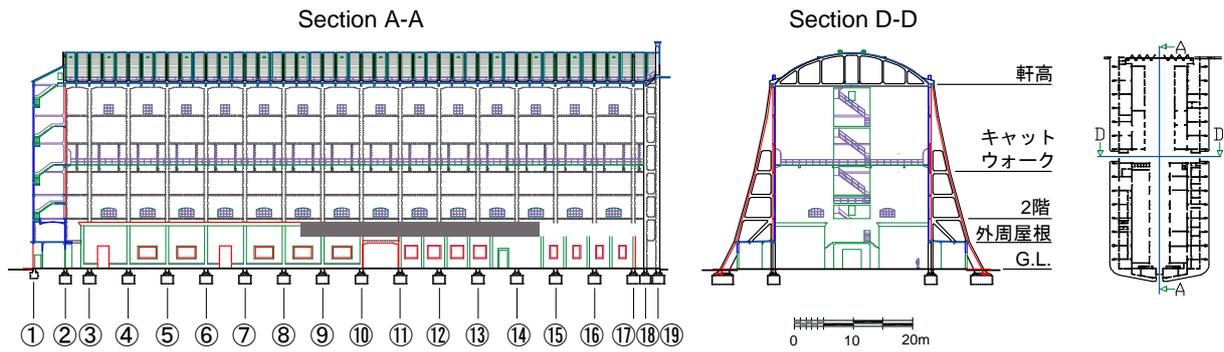


図 2-4 アウグスタ飛行船格納庫断面図（改修工事前）と柱番号割付

アウグスタの飛行船格納庫は、鉄製大扉の重量による不同沈下の影響で、屋根および壁面に大きな亀裂が生じ、構造的安定性が危惧されていた。1989年には大扉の倒れ防止のためのワイヤとアンカーが設置され、1994年には右側バットレスが補修された。その後、地元住民からの根強い愛着を受け、保存活動の一環として飛行船格納庫を中心とした国立公園化が計画された。2007年の改修工事前に名古屋市立大学および東京大学生産技術研究所を中心とする調査隊により常時微動計測による振動性状調査が実施された。2007年より基礎梁の補強、外壁亀裂の補修、1階雑壁の撤去、化粧モルタルの塗布などの改修工事が進められ、2012年の本調査は改修工事完了後の振動性状調査を再度実施するものである。



図 2-5 基礎補強工事の様子



図 2-6 基礎梁改修工事の様子



図 2-8 外壁亀裂のエポキシ補修跡



図 2-9 改修工事後の様子（ピロティ化）

2.2 常時微動測定

(1) 測定位置と測定方法

測定時の様子を図 2-9 および図 2-10 に示す。測定位置は、図 2-11～2-18 に示した全 8 ケースである。測定方法は、測定機器に収録器（物探サービス株式会社製 GEODAS-15-HS）およびピックアップ（物探サービス株式会社製 ムービングコイル型速度計 CR4.5-2 型）を使用し、サンプリング周波数 100Hz で収録時間を 327 秒間とした。



図 2-9 測定の様子



図 2-10 ピックアップ設置作業

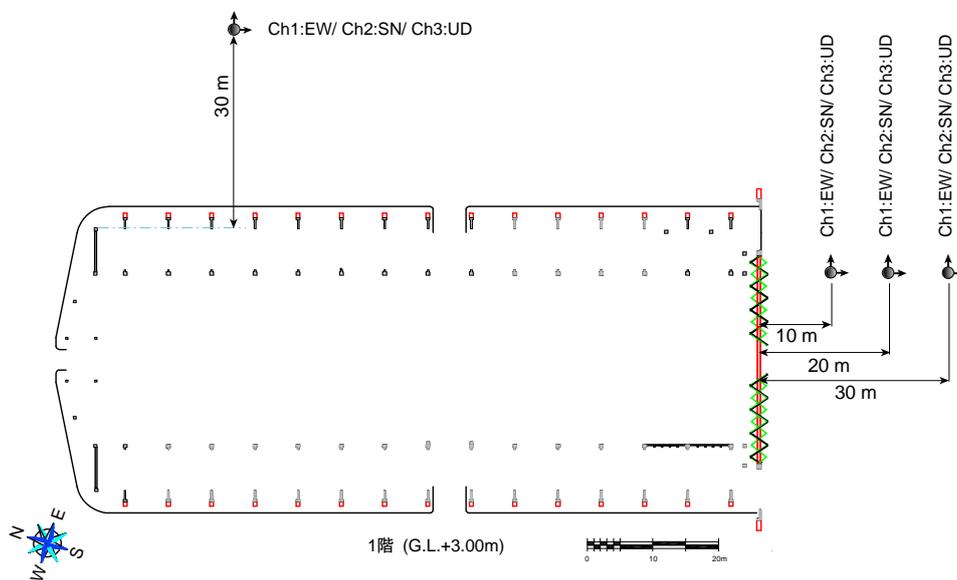


図 2-11 計測ケース 0-1, 0-2, 0-3, 0-4 (地盤北側, 地盤南側 10m・20m・30m)

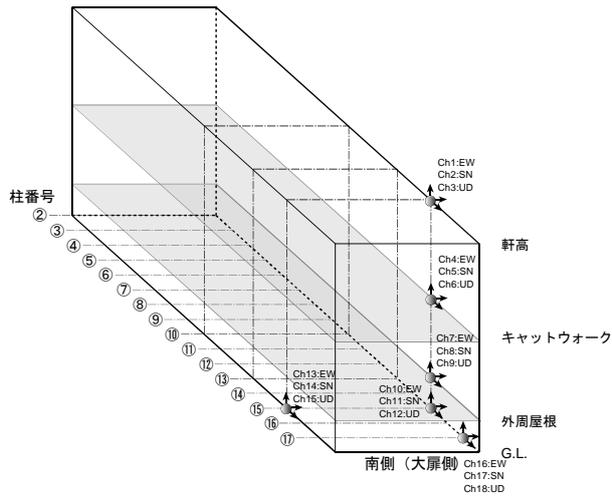


図 2-12 計測ケース 1

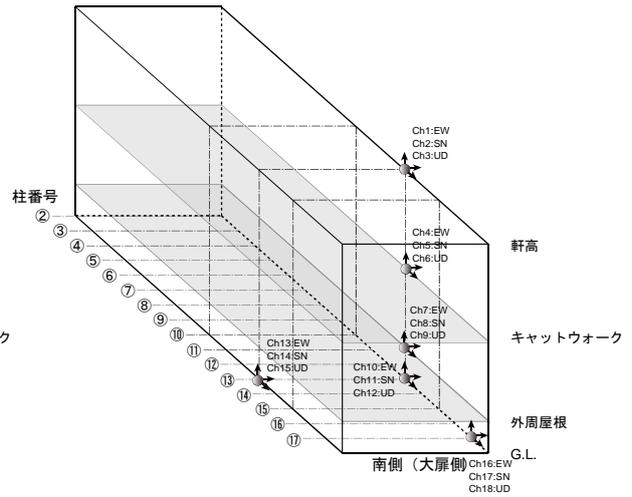


図 2-13 計測ケース 2

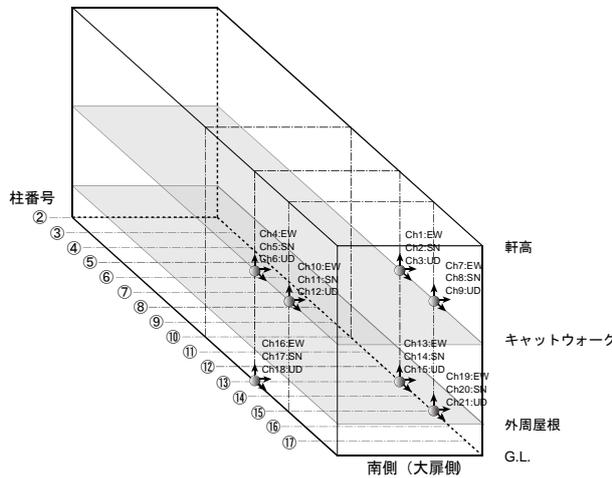


図 2-14 計測ケース 3-1

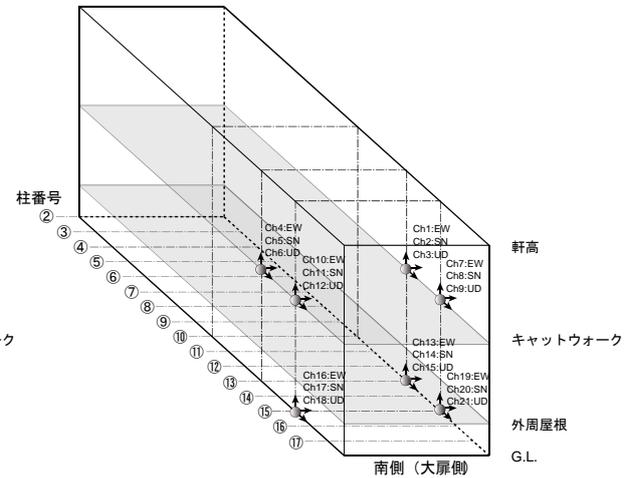


図 2-15 計測ケース 3-2

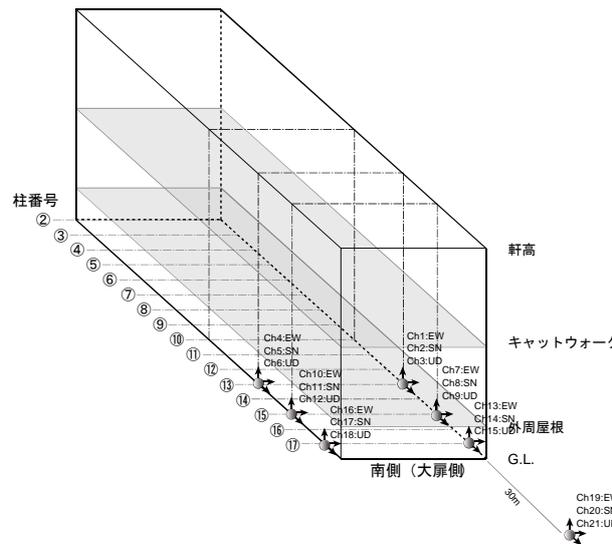


図 2-16 計測ケース 4

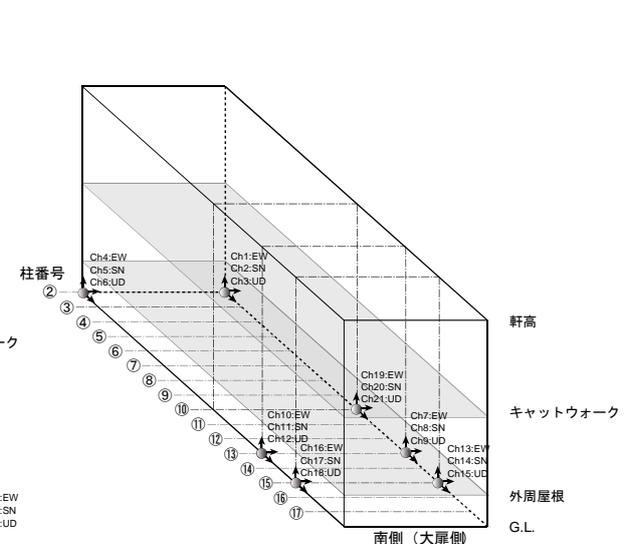


図 2-17 計測ケース 5

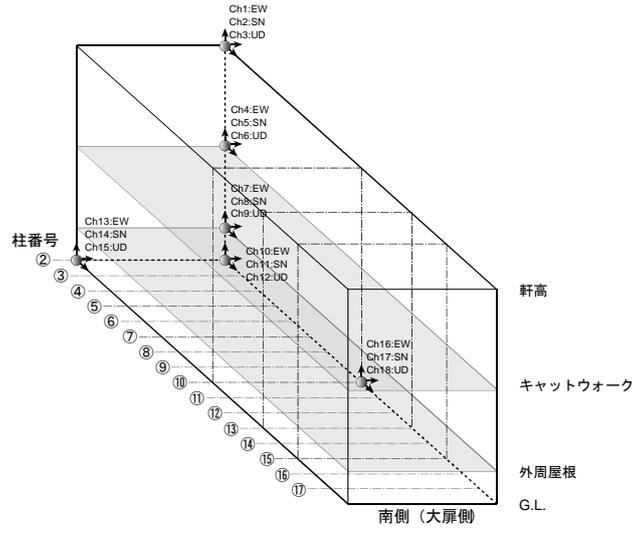


図 2-18 計測ケース 6

(2) 測定結果

以下に、図 2-11～図 2-18 に示した各計測ケースについて測定結果を示す。

計測ケース 0 (地盤北側, 地盤南側 10m, 地盤南側 20m, 地盤南側 30m) :

計測ケース 0-1 (地盤北側, 格納庫から 30m 離れた地点) は、飛行船格納庫北東側の地盤の振動性状把握を目的とした計測である。図 2-19 に示す H/V スペクトル比より地盤北側の卓越周期は 1.65[s]である。

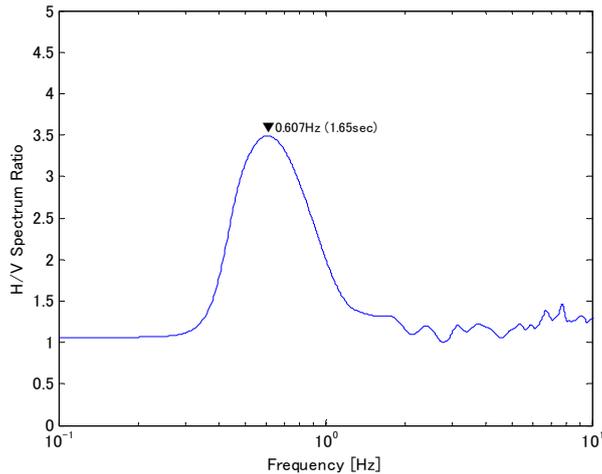


図 2-19 計測ケース 0-1 (地盤北側) の H/V スペクトル

2007 年 9 月の調査時に計測した地盤北側の卓越周期は 1.64[s]であり、今回の調査とほぼ同様の結果であった。

計測ケース 0-2 (地盤南側 10m) は、飛行船格納庫南側の地盤の振動性状把握を目的とした計測である。図 2-20 に示す H/V スペクトル比より地盤南側 (格納庫から 10m 離れた地点) の卓越周期は 1.54[s]である。2007 年 9 月の調査時に計測した地盤南側 (格納庫から 10m 離れた地点) の卓越周期は 1.71[s]であり、今回の調査よりやや長周期の値となっていた。

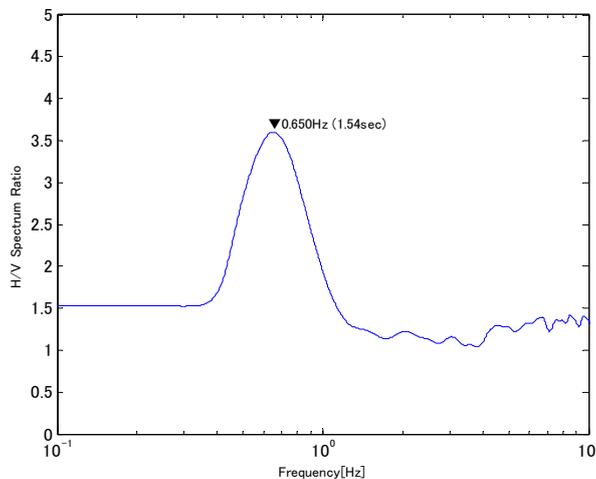


図 2-20 計測ケース 0-2 (地盤南側 10m) の H/V スペクトル

計測ケース 0-3（地盤南側 20m）は、飛行船格納庫南側の地盤の振動性状把握を目的とした計測である。図 2-21 に示す H/V スペクトル比より地盤南側（格納庫から 20m 離れた地点）の卓越周期は 1.48[s]である。

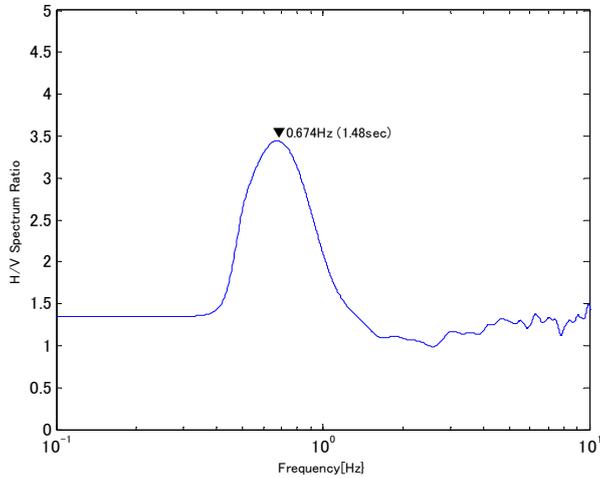


図 2-21 計測ケース 0-3（地盤南側 20m）の H/V スペクトル

計測ケース 0-4（地盤南側 30m）は、飛行船格納庫南側の地盤の振動性状把握を目的とした計測である。図 2-22 に示す H/V スペクトル比より地盤南側（格納庫から 30m 離れた地点）の卓越周期は 1.65[s]である。

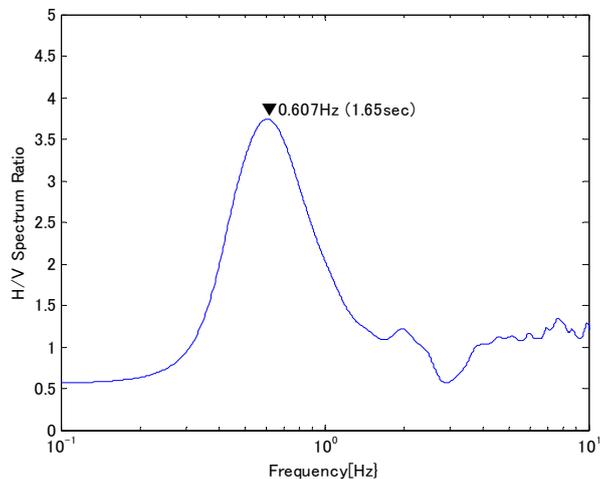


図 2-22 計測ケース 0-4（地盤南側 30m）の H/V スペクトル

今回の計測結果は、国土交通省告示 1793 号の分類（地盤周期 $T_g \leq 0.2[s]$ ：第 1 種， $0.2[s] < T_g \leq 0.75[s]$ ：第 2 種， $0.75[s] < T_g$ ：第 3 種）に従えば第 3 種地盤ということになるが、立地条件を考慮すると単純に堆積層の影響による結果とは言い切れない点に注意が必要である。

一般に、海岸波浪によって生じる微動は沖合 10km 程度のところで生じる定常波によると言われ^[1]、発生する微動の周期は理論的に定常波周期の 1/2 程度とされており^[2]、微動計測による地盤

卓越周期の算定にやや長周期側の結果を与えることが指摘されている^[3]。また、海岸波浪は、表面張力波 (周期 0.1[s]以下)、短周期重力波 (周期 0.1[s]~1[s])、重力波 (周期 1[s]~30[s])、長周期重力波 (周期 30[s]~数 10 分)、長周期波 (周期 5 分~12 時間)、潮汐波 (周期 12 時間以上) に分類され^[4]、仮に、海岸から 500m 程の位置に建つアウグスタ飛行船格納庫の沖合で観測される波浪周期 (重力波の周期) が 3~4 秒程度であれば、今回計測された地盤卓越周期は、海洋波浪による影響を強く受けた結果と言えることになる。

計測ケース 1 (柱⑮/亀裂補修外壁構面) :

計測ケース 1 は、改修工事前に不同沈下に伴う大きな亀裂が多数生じていた大扉側の構面 (東側柱⑮) の 1 階床、外周屋根、キャットウォーク、軒高レベルの高さ方向の振動性状の把握を目的とした計測である。図 2-23 に 1 階床レベルに対する各レベルでの伝達関数を示す。ここで、軒高レベル/1階床レベルの伝達関数より張間方向に 1.65[Hz] (0.61[s])、桁行方向に 1.71[Hz] (0.59[s]) の固有周波数を有し、キャットウォークレベル/1 階床レベルの伝達関数より張間方向 (壁面外方向) に 3.55[Hz] (0.28[s])、桁行方向 (壁面内方向) に 1.69[Hz] (0.59[s]) の固有周波数を有していることが分かる。

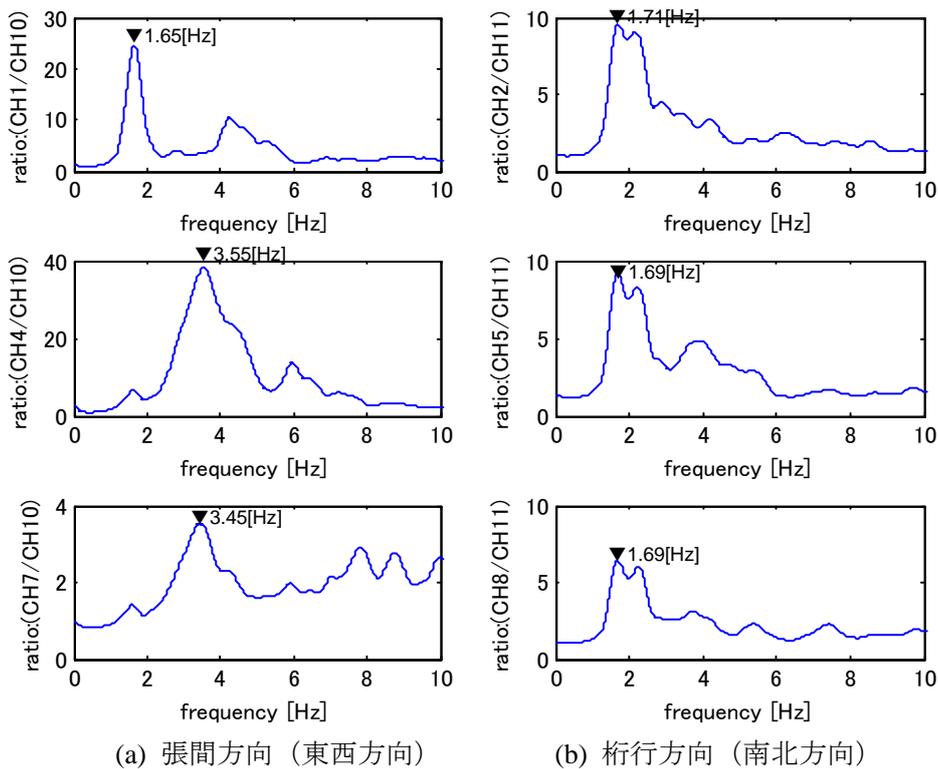


図 2-23 計測ケース 1 の伝達関数

改修工事前 (2007 年 9 月) の調査では、軒高レベル/1 階床レベルで張間方向に 1.54[Hz] (0.65[s])、桁行方向に 2.10[Hz] (0.48[s])、キャットウォークレベル/1 階床レベルで張間方向 (壁面外方向) に 3.30[Hz] (0.30[s])、桁行方向 (壁面内方向) に 2.10[Hz] (0.48[s]) の固有周波数を有していた。

改修工事において1階の壁を撤去しピロティ化したことにより、桁行方向の周期が0.48[s]から0.59[s]に長周期化した。一方、元々壁のなかった張間方向では基礎補強工事により門型フレーム脚部の固定度が上がったことで、周期が0.65[s]から0.61[s]へとわずかではあるが短周期化した。

計測ケース2 (柱⑬／非損傷構面) :

計測ケース2は、改修工事前に不同沈下に伴い生じた大きな亀裂よりも北側の比較的健全な構面(東側柱⑬)の1階床、外周屋根、軒高レベルの高さ方向の振動性状の把握を目的とした計測である。図2-24に1階床レベルに対する各レベルでの伝達関数を示す。ここで、軒高レベル/1階床レベルの伝達関数より張間方向に1.65[Hz] (0.61[s])、桁行方向に1.77[Hz] (0.56[s])の固有周波数を有し、キャットウォークレベル/1階床レベルの伝達関数より張間方向(壁面外方向)に3.85[Hz] (0.26[s])、桁行方向(壁面内方向)に1.78[Hz] (0.56[s])の固有周波数を有していることが分かる。

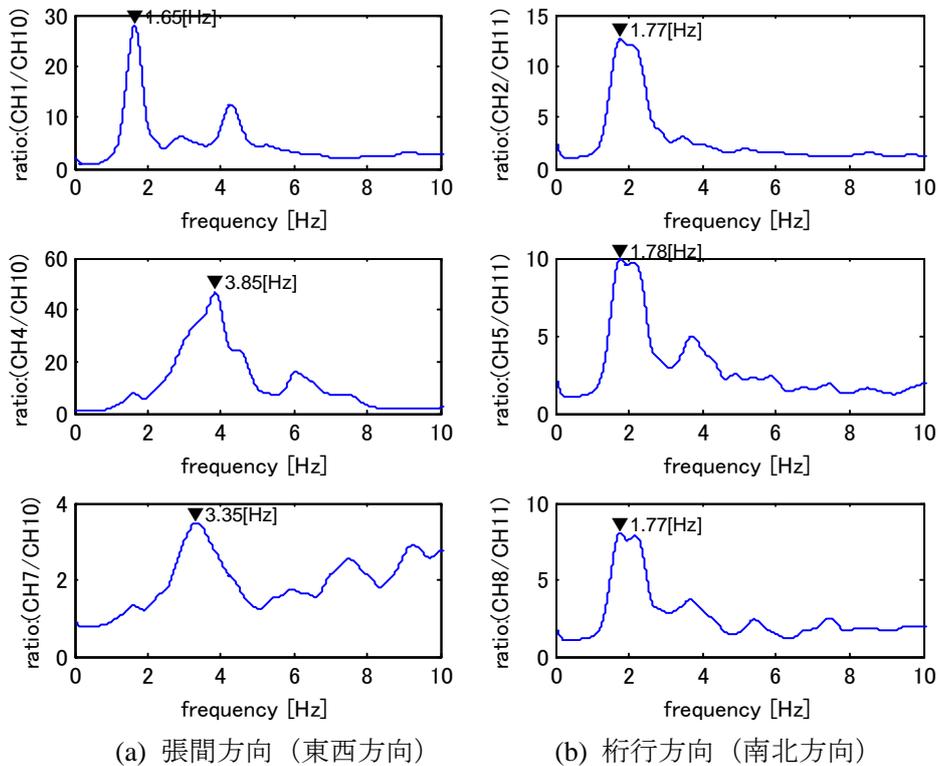


図 2-24 計測ケース2の伝達関数

改修工事前(2007年9月)の調査では、軒高レベル/1階床レベルで張間方向に1.50[Hz] (0.67[s])、桁行方向に5.13[Hz] (0.20[s])、キャットウォークレベル/1階床レベルで張間方向(壁面外方向)に3.44[Hz] (0.29[s])、桁行方向(壁面内方向)に5.10[Hz] (0.20[s])の固有周波数を有していた。

改修工事において1階の壁を撤去しピロティ化したことにより、桁行方向の周期が0.20[s]から0.56[s]に長周期化した。一方、元々壁のなかった張間方向では基礎補強工事により門型フレーム脚部の固定度が上がったことで、周期が0.67[s]から0.61[s]へとわずかではあるが短周期化した。

また計測ケース 1 と 2 の比較において、改修工事前 (2007 年 9 月) の調査では桁行方向の周期が損傷側構面 (柱⑮) 0.48[s]に対し非損傷側構面 (柱⑬) 0.20[s]と大きく異なるのに対し、今回の調査では旧損傷側構面 (柱⑮) 0.59[s]に対し非損傷側構面 (柱⑬) 0.56[s]とあまり違いはなく、(撤去した 1 階壁を除く) 亀裂のエポキシ補修により外壁面の一体性が増したことで、構面間の振動性状の違いがほとんど見られなくなったものと考えられる。ここで、構面間の周期比を (質量が等しいと仮定して) 剛性比に置換すると、表 2-1 の結果を得る。

表 2-1 面内剛性比の変化 (柱⑮損傷構面/柱⑬非損傷構面)

	(柱⑮構面/柱⑬構面) 面内剛性比
改修工事前 (2007 年 9 月)	17.3%
改修工事後 (2012 年 11 月)	90.1%

計測ケース 3 (柱⑬および柱⑮構面) :

計測ケース 3 は、柱⑬および柱⑮構面における東側・西側各外壁面の 1 階床およびキャットウォークレベルに微動計を設置し、門型フレームの一体性の検討するための計測である。ピックアップ数の制限により、計測ケース 3-1 では西側柱⑮の 1 階床レベルのピックアップ設置を省いており、計測ケース 3-2 では西側柱⑬の 1 階床レベルのピックアップ設置を省いている。

キャットウォークレベル/1 階床レベルの伝達関数 (図 2-25 および図 2-26) より、東西各構面で桁行方向の周期は概ね一致するものの、張間方向の周期は一致しなかった。門型フレームは梁を介して一体とならずに、東側柱 (およびバットレス) と西側柱 (およびバットレス) でそれぞれ張間方向に独立した挙動を示している。

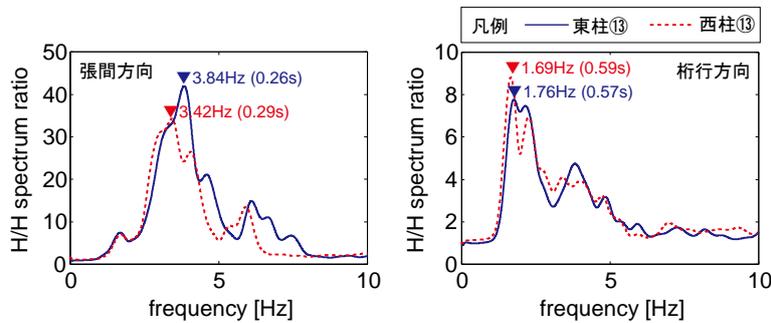


図 2-25 柱⑬構面の伝達関数 (計測ケース 3-1)

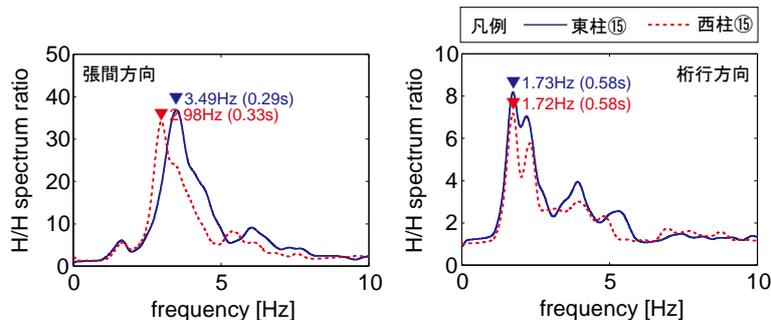


図 2-26 柱⑮構面の伝達関数 (計測ケース 3-2)

計測ケース 4 (1 階南側床面およびフリーフィールド) :

計測ケース 4 は, 1 階床面の一体性を検討するための計測である. 比較的定常な波形が記録された計測開始から 90 秒~100 秒の 1 階床レベル (柱番号⑬, ⑮, ⑰) および自由地盤で観測された微動波形を, 図 2-27 (東西方向), 図 2-28 (南北方向), 図 2-29 (鉛直方向) に示す.

東西方向, 南北方向, 鉛直方向ともに, 柱番号および桁行構面の東西によらず位相および振幅が, 自由地盤 (大扉より南側 30m 地点) で観測された波形とほぼ同一の形状を示している. 2007 年 9 月の調査では 1 階床レベルで計測された波形では柱番号によって波形 (位相) が異なっていたが^[5], 今回の調査結果から基礎補強工事により 1 階床面の一体性が向上したことが推察される.

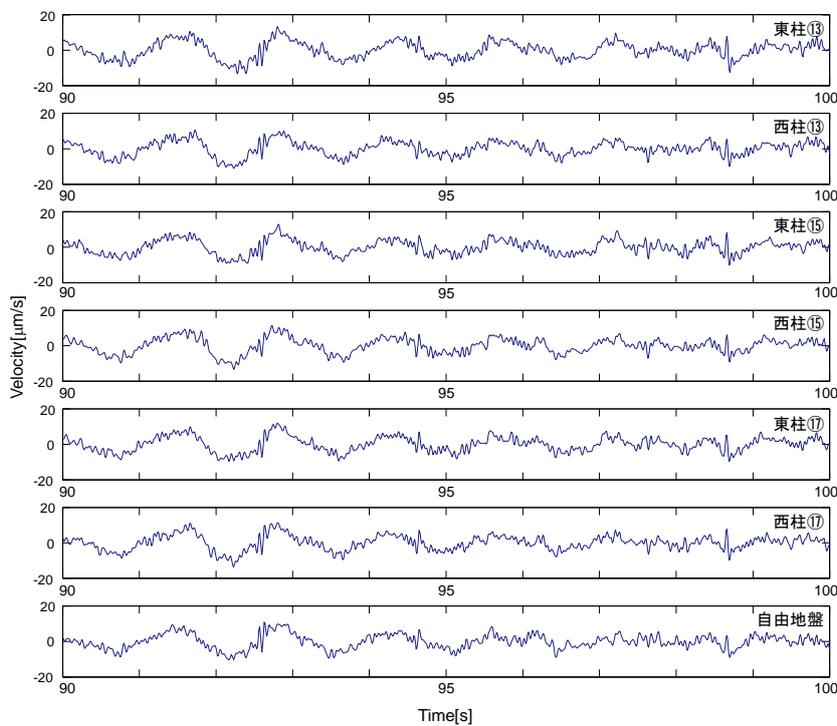


図 2-27 1 階床レベルおよび自由地盤で観測された微動波形の一部 (東西方向)

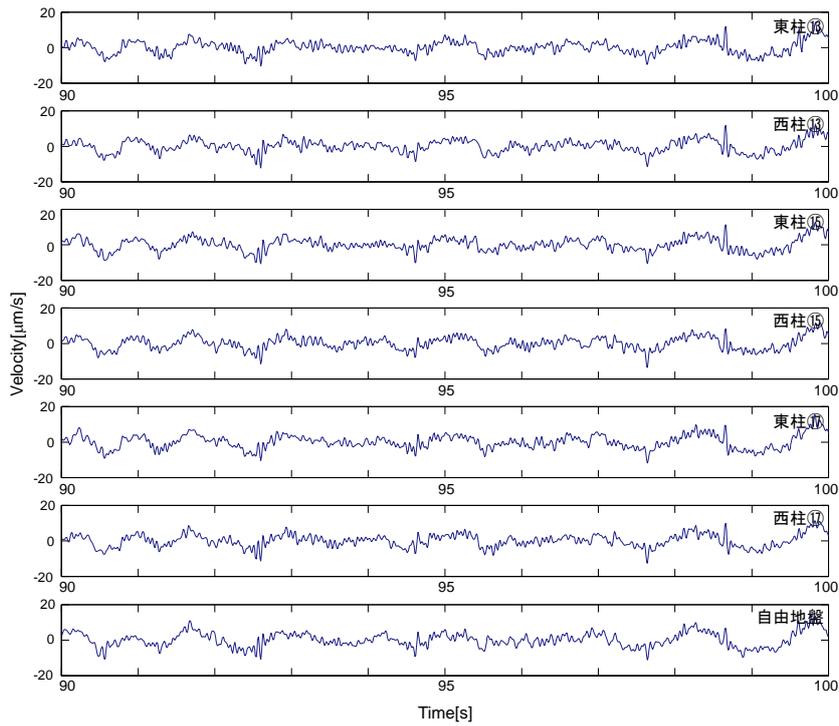


図 2-28 1 階床レベルおよび自由地盤で観測された微動波形の一部 (南北方向)

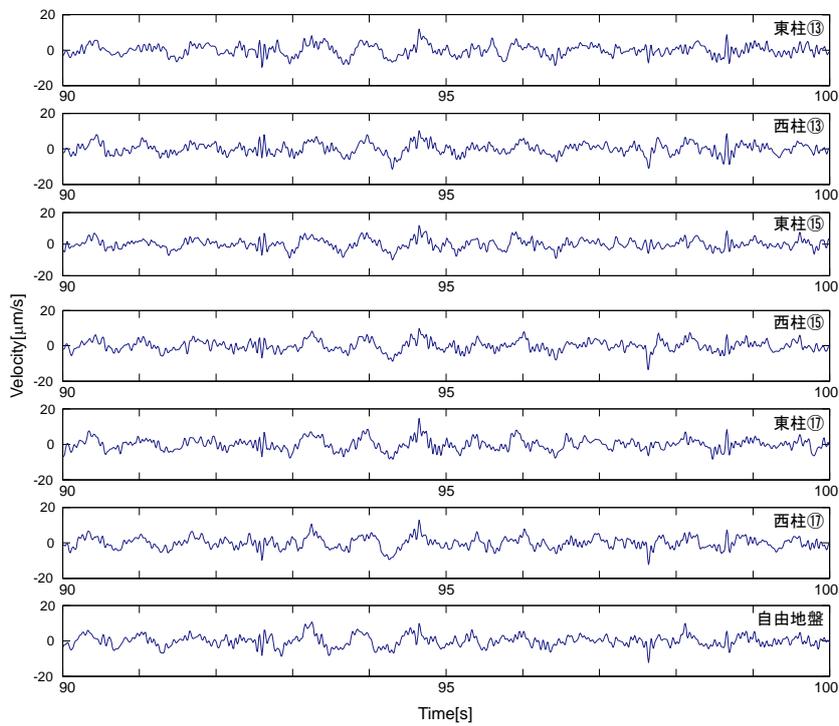


図 2-29 1 階床レベルおよび自由地盤で観測された微動波形の一部 (鉛直方向)

計測ケース 5 (1 階南側および北側床面) :

計測ケース 5 は, 1 階床面の一体性を検討するための計測である. 比較的定常な波形が記録された計測開始から 40 秒~50 秒の 1 階床レベル (柱番号②, ⑩, ⑬, ⑮) で観測された微動波形を, 図 2-30 (東西方向), 図 2-31 (南北方向), 図 2-32 (鉛直方向) に示す.

東西方向, 南北方向, 鉛直方向ともに, 柱番号および桁行構面の東西によらず位相および振幅がほぼ同一の形状を示している. 2007 年 9 月の調査では 1 階床レベルで計測された波形では柱番号によって波形 (位相) が異なっていたが^[5], 今回の調査結果から基礎補強工事により 1 階床面の一体性が向上したことが推察される.

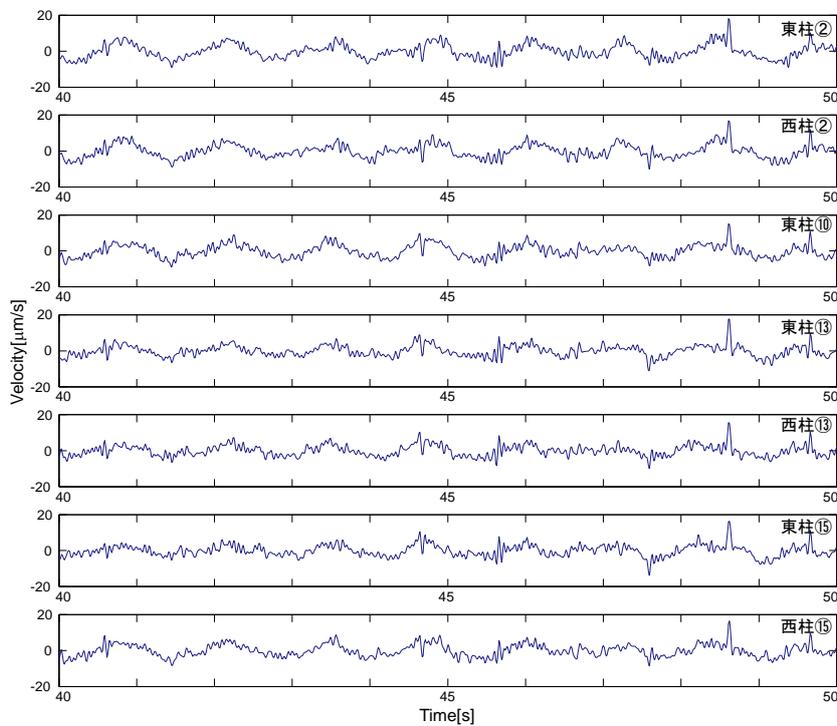


図 2-30 1 階床レベルで観測された微動波形の一部 (東西方向)

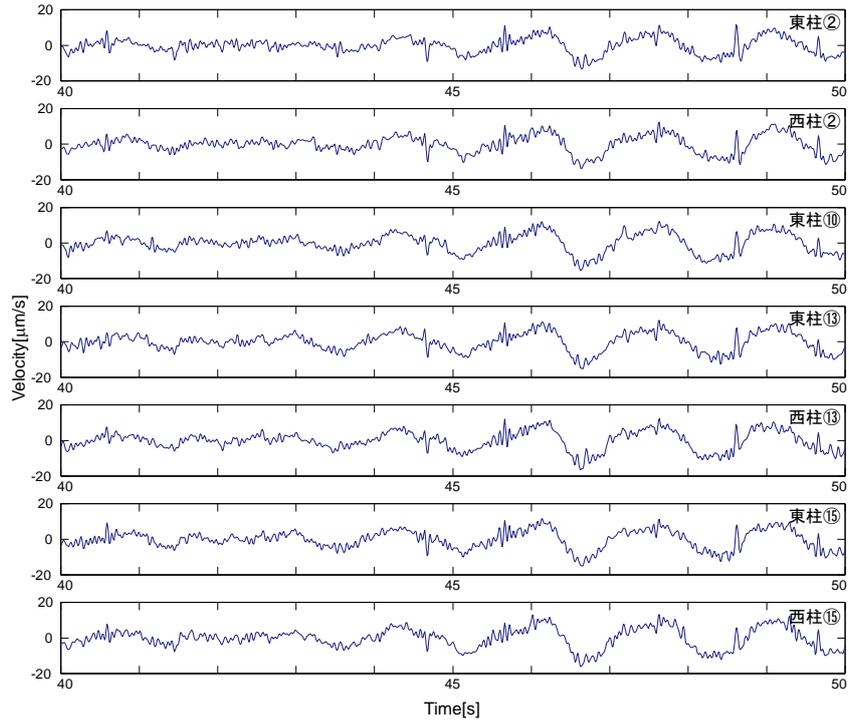


図 2-31 1 階床レベルで観測された微動波形の一部 (南北方向)

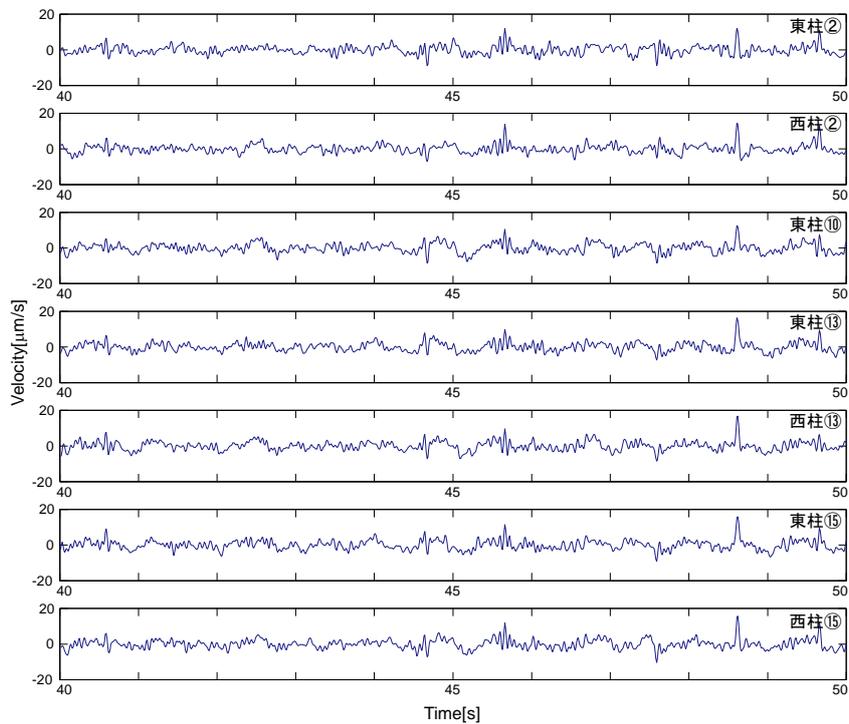


図 2-32 1 階床レベルで観測された微動波形の一部 (鉛直方向)

計測ケース 6 (柱②/階段室構面) :

計測ケース 6 は、北側階段室構面 (東側柱②) の 1 階床、外周屋根、キャットウォーク、軒高レベルの高さ方向の振動性状の把握を目的とした計測である。図 2-33 に 1 階床レベルに対する各レベルでの伝達関数を示す。ここで、軒高レベル/1 階床レベル、キャットウォークレベル/1 階床レベル、外周屋根レベル/1 階床レベル、いずれの伝達関数においても張間方向では 2.07[Hz] (0.48[s])、桁行方向では 1.71~1.75[Hz] (0.57~0.59[s]) の固有周波数を有していることが分かる。

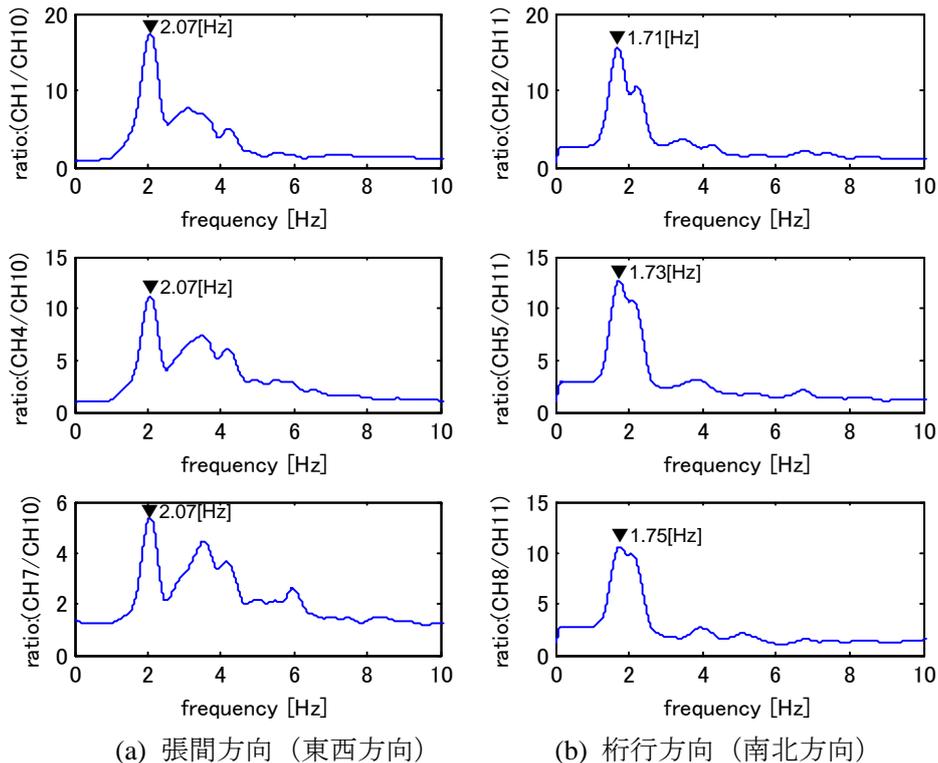


図 2-33 計測ケース 6 の伝達関数

改修工事前 (2007 年 9 月) の調査では、いずれのレベルにおいても、張間方向に 2.04[Hz] (0.49[s])、桁行方向に 1.72[Hz] (0.58[s]) の固有周波数を有していた。

北側階段室構面 (東側柱②) においては改修工事前後で張間方向、桁行方向ともに固有周期の変化は見られなかった。

3. まとめ

アウグスタの飛行船格納庫の常時微動測定を行い以下の知見を得た。

- (1) 飛行船格納庫周辺地盤の卓越周期はおよそ 1.5～1.7[s]であった。
- (2) 改修工事に伴い、階段室を除く桁行方向の周期は 1 階の壁を撤去しピロティ化したことにより長周期化し、張間方向の周期は基礎補強工事により門型フレーム脚部の固定度が上がったことでわずかに短周期化した（表 3-1）。

表 3-1 固有周期の変化

		伝達関数（軒高／1階床） より求めた固有周期	
		改修工事前 (2007年9月)	改修工事後 (2012年11月)
柱⑮（損傷構面）	張間方向	0.65[s]	0.61[s]
	桁行方向	0.48[s]	0.59[s]
柱⑬（非損傷構面）	張間方向	0.67[s]	0.61[s]
	桁行方向	0.20[s]	0.56[s]
柱②（階段室側）	張間方向	0.49[s]	0.48[s]
	桁行方向	0.58[s]	0.57[s]
		H/V スペクトル比 より求めた卓越周期	
地盤（北側）		1.64[s]	1.65[s]
地盤（南側 10m）		1.71[s]	1.54[s]

- (3) 非損傷側（柱⑬）構面に対する損傷側（柱⑮）構面の面内剛性の比が、改修工事前は 17.3%だったが、亀裂のエポキシ補修により 90.1%に向上し、外壁面の一体性が増した。
- (4) 門型フレームは梁を介して一体とならずに、東側柱（およびバットレス）と西側柱（およびバットレス）でそれぞれ張間方向に独立した挙動を示した。
- (5) 改修工事前は 1 階床レベルで計測された波形では柱番号によって波形が異なっていたが、改修工事（基礎補強工事）後は柱番号によらずほぼ同一の波形を示しており、1 階床面の一体性が向上した。

【参考文献】

- [1] 三東哲夫：波浪はどこで脈動に変わるか？，地震，第2輯，第13巻，第3号，pp.150-162，1960
- [2] Longuet-Higgins, M.S.: A Theory of the origin of microseisms. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 243A, pp.1-35, 1950-51
- [3] 森芳信：地盤の微動に現れるやや長周期成分についての実測による検討，土木学会論文集，第424号，III-14，pp.169-177，1990.12
- [4] 土木学会・エネルギー土木委員会新エネルギー技術小委員会：波エネルギー利用技術の現状と将来展望，1990
- [5] 高橋典之，中埜良昭，青木孝義：歴史的建築物の常時微動測定に基づく振動特性評価 その2 アウグスタ飛行船格納庫（鉄筋コンクリート造建築）の振動特性評価，日本地震工学会大会 2008 梗概集，pp.8-9，2008年11月