

### 3. 弱 L2 入力後の解析結果

時間領域のモード解析は、初期状態と同様、1F の記録を入力、奇数階の記録をその応答と見なして実施しました。ただし、解析では、x、y 成分について 10Hz まで、z 成分については 20Hz までを対象にしました。解析で使った x、y、z の 3 成分の波形の一部を図 3.1~3 に示します。ここに、A に付く番号は階数を意味します。解析では、0.0~40.96 秒間 (8192 個) の記録を使用しました。

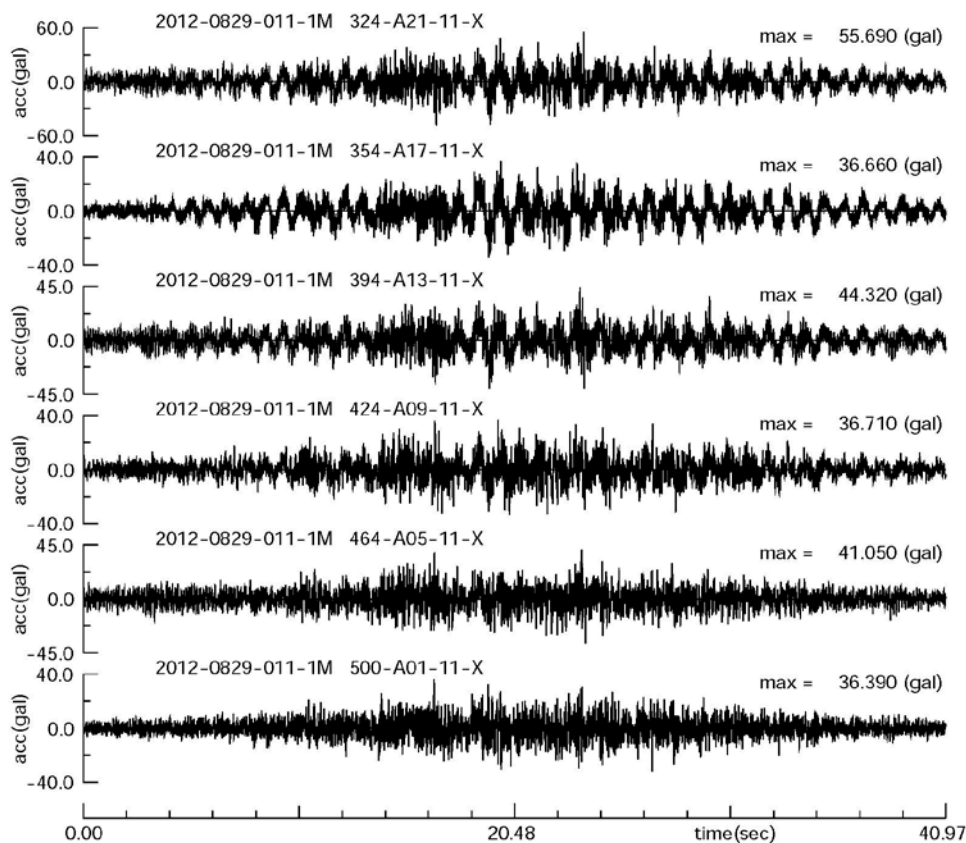


図 3-1 弱 L2 入力後の x 成分

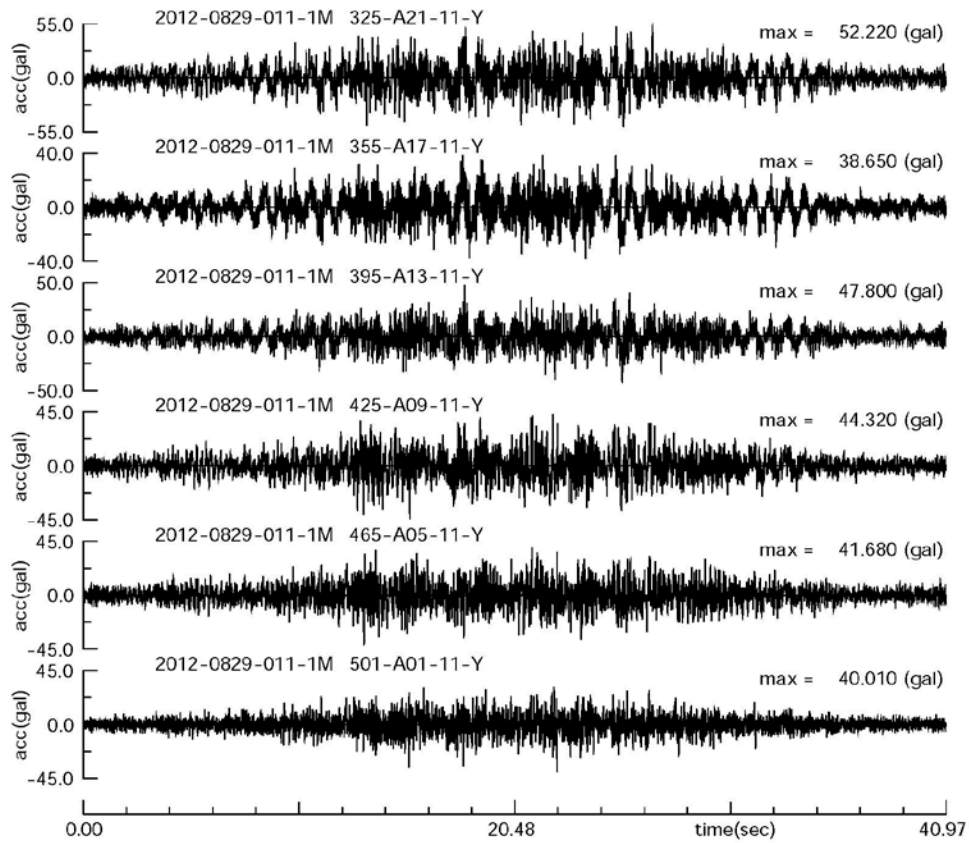


図 3-2 弱 L2 入力後の y 成分

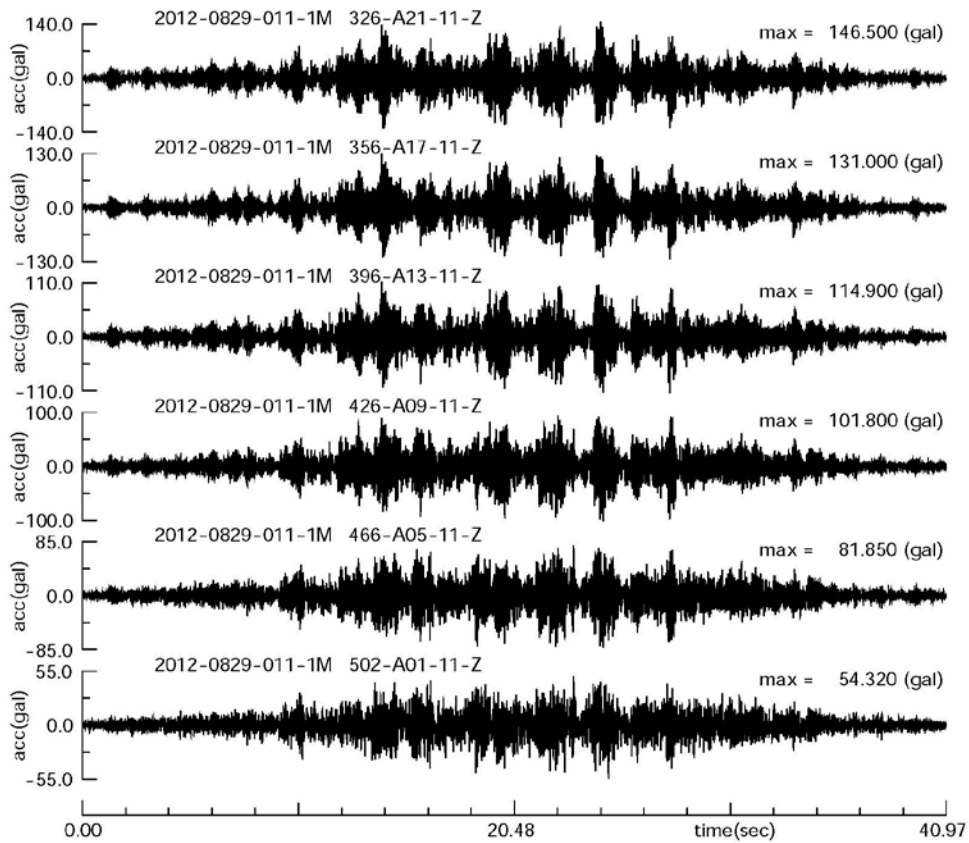


図 3-3 弱 L2 入力後の z 成分

### 3.1 x成分の解析結果

時間領域のモード解析より3個のモードが求められました。各モードの固有周波数、固有周期、減衰定数および刺激係数を表3.1-1に示します。括弧内の数値は初期状態の値ですが、これら値と比較して固有周波数はおよそ4割減に、減衰定数は4倍の大きさにそれぞれ変化をしています。

表 3.1-1 x成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)	刺激係数
1	1.115 (1.882)	0.897 (0.531)	6.06 (1.56)	0.503
2	3.977 (6.027)	0.251 (0.166)	4.39 (1.07)	0.285
3	7.359 (11.00)	0.136 (0.091)	5.10 (0.98)	0.212

#### (1) 加速度波形の比較

解析より求められた3個のモードの和による加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を最上階 A21 と中間の階 A11 について図3.1-1~2に示します。再現性は良好と言えます。他の階も同様です。

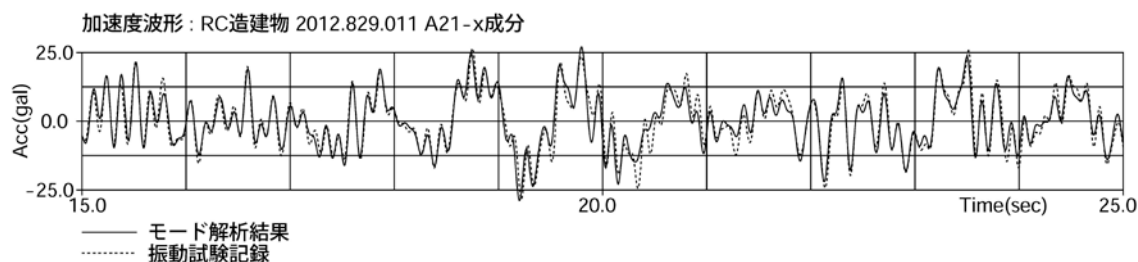


図 3.1-1 A21 の加速度波形の比較

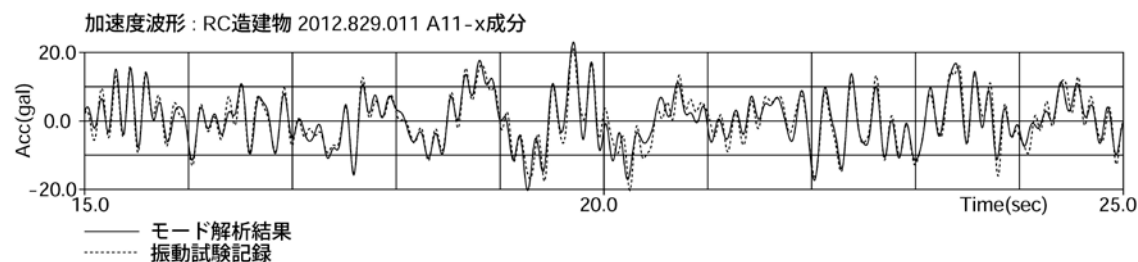


図 3.1-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 3.1-3~4 に解析より求められた 3 個のモードの和による伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。ピーク周波数はよく捕らえられています。

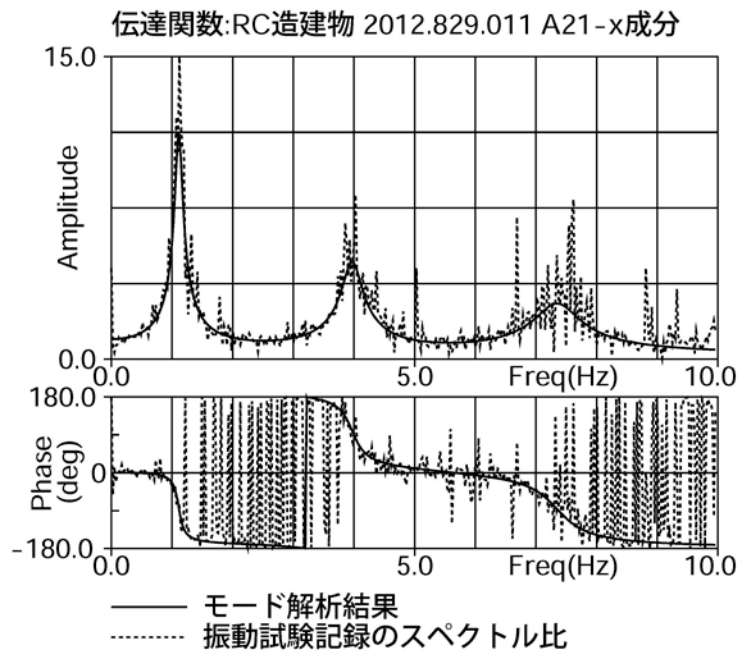


図 3.1-3 A21 の伝達関数の比較

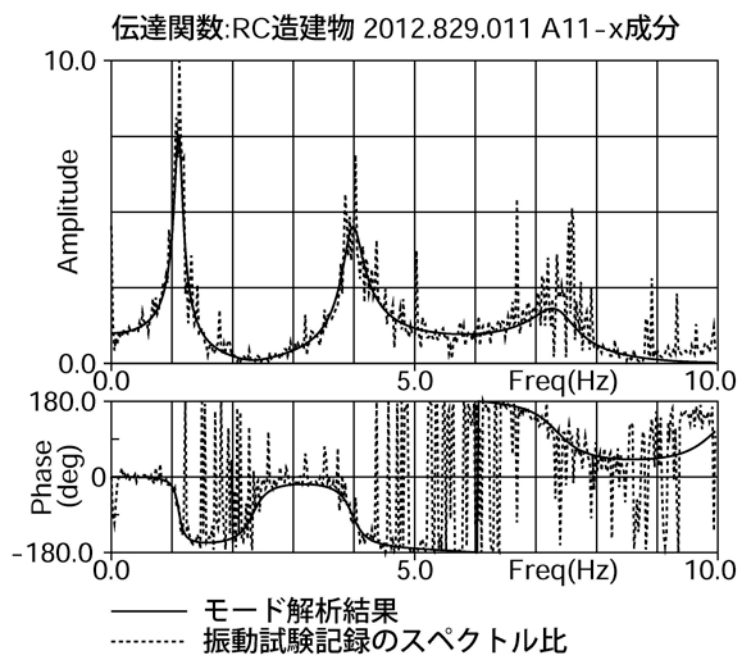


図 3.1-4 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められた 3 個のモードの形状を図 3.1-5 に示します。各モードの最大値を一定の長さに規格化して描いています。いずれも並進モードです。ただし、第 2 次および第 3 次のモードの腹部の階間に僅かながら位相差が見られます。

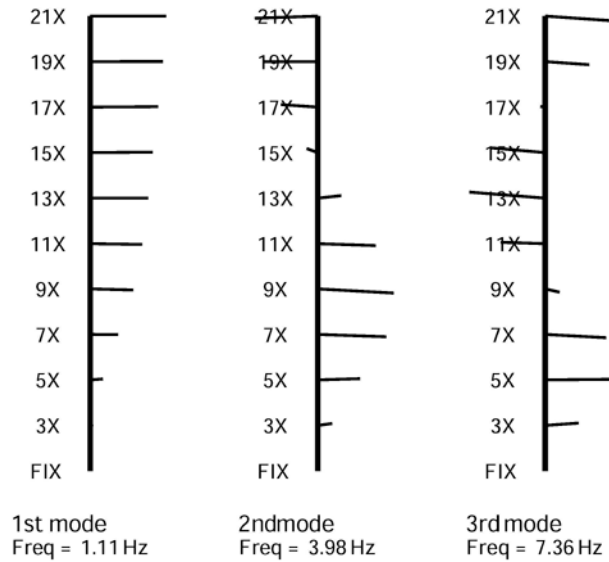


図 3.1-5 x 方向のモード形状

3.2 y 成分の解析結果

時間領域のモード解析より 3 個のモードが求められました。各モードの固有周波数、固有周期、減衰定数および刺激係数を表 3.2-1 に示します。括弧内の数値は初期状態の値ですが、これら値と比較して固有周波数はおよそ 3 割減に、減衰定数は 2 倍の大きさにそれぞれ変化をしています。

表 3.2-1 y 成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)	刺激係数
1	1.240 (1.688)	0.807 (0.592)	3.37 (1.57)	0.463
2	4.267 (5.592)	0.234 (0.179)	2.73 (1.08)	0.352
3	7.904	0.127	3.21	0.185

(1) 加速度波形の比較

解析より求められた 3 個のモードの和による加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を図 3.2-1~2 に示します。再現性は良好です。

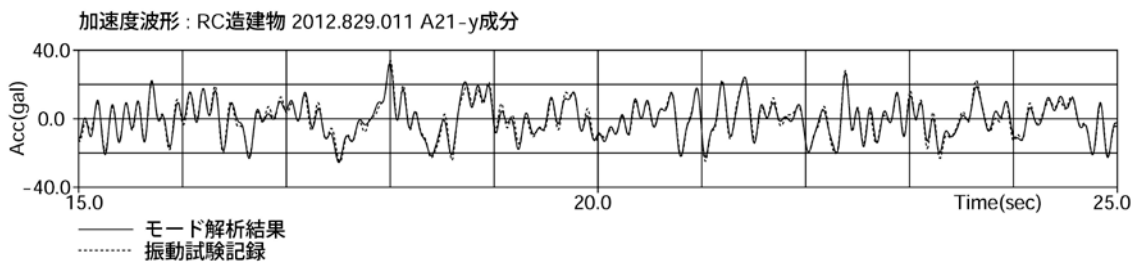


図 3.2-1 A21 の加速度波形の比較

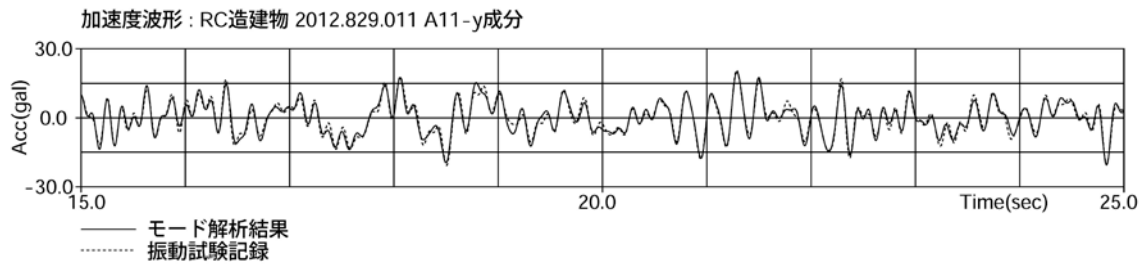


図 3.2-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 3.2-3~4 に解析より求められた 3 個のモードの和による伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。ピーク周波数はよく捕らえられています。

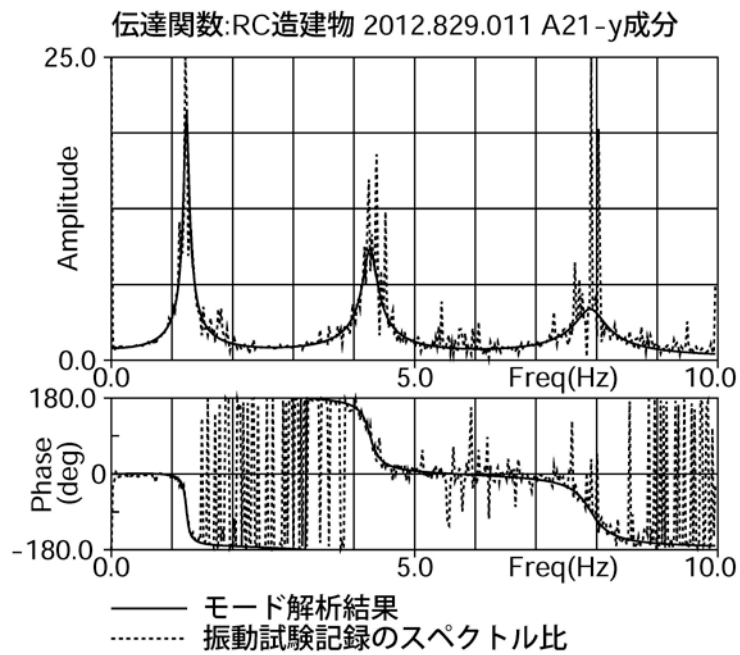


図 3.2-3 A21 の伝達関数の比較

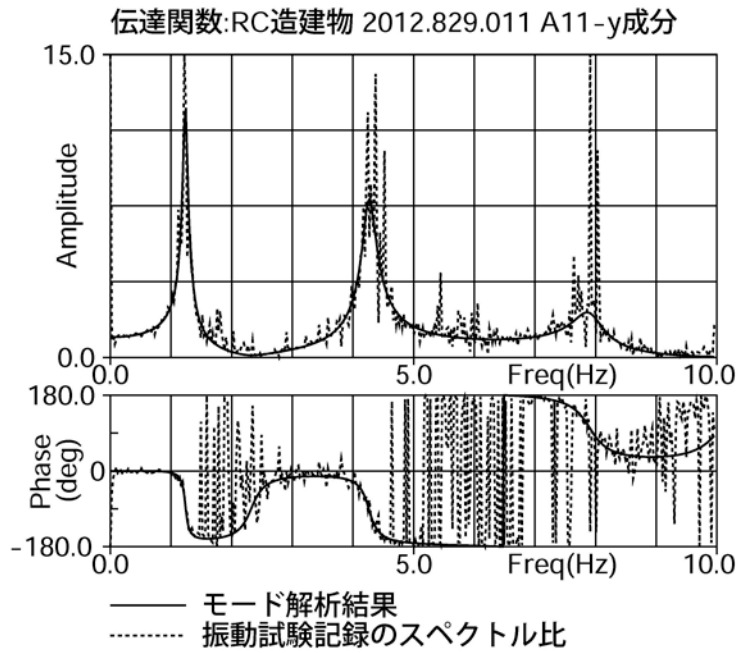


図 3.2-4 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められた 3 個のモードの形状を図 3.2-5 に示します。各モードの最大値を一定の長さに規格化して描いています。いずれも並進モードです。やはり、x 成分ほどではないが、第 2 次および第 3 次のモードの腹部の階間に僅かながら位相差が見られます。

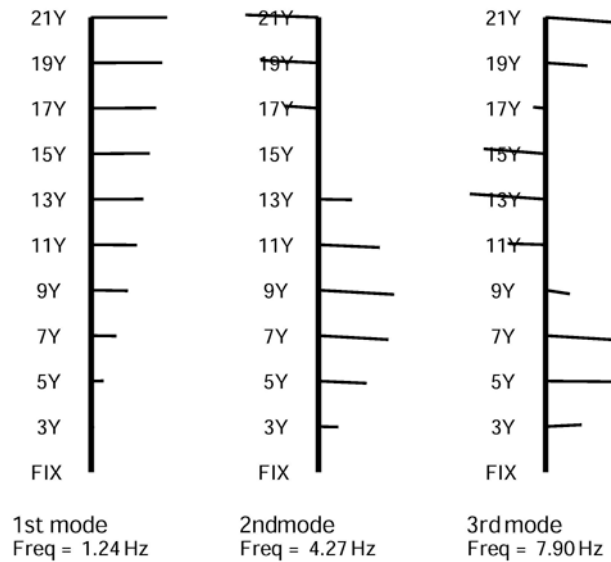


図 3.2-5 y 方向のモード形状

### 3.3 z成分の解析結果

時間領域のモード解析より 1 個のモードが求められました。そのモードの固有周波数、固有周期および減衰定数を表 3.3-1 に示します。括弧内の数値は初期状態の値ですが、その値に比較して固有周波数はおよそ 1 割減であり、減衰定数は x、y 成分とは異なり小さく半減しています。

表 3.3-1 z成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)
1	13.483 (14.659)	0.074 (0.068)	1.26 (2.22)

#### (1) 加速度波形の比較

解析より求められた 1 個のモードによる加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を図 3.3-1~2 に示します。再現性は良好です。

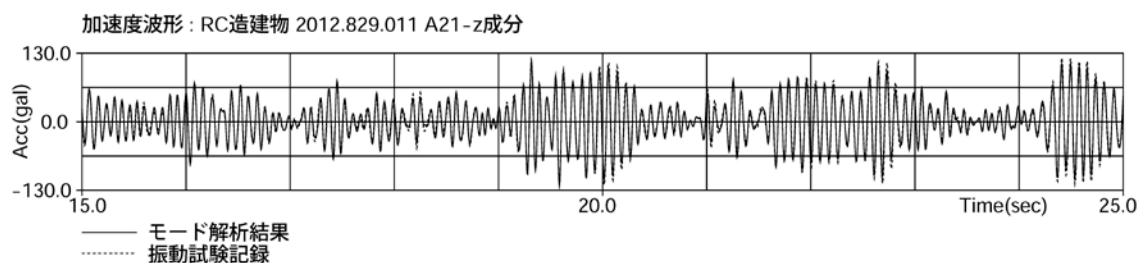


図 3.3-1 A21 の加速度波形の比較

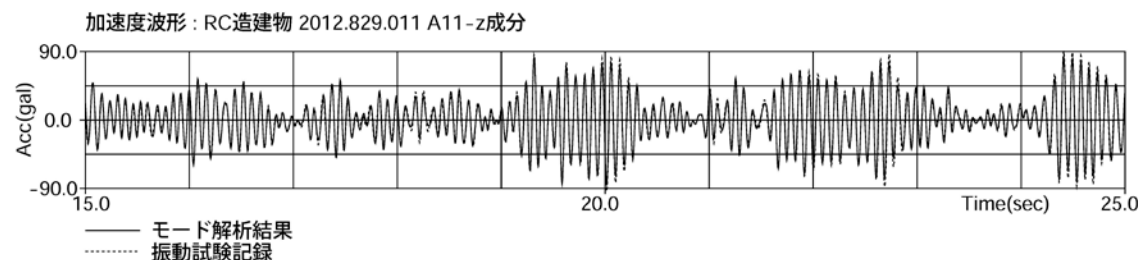


図 3.3-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 3.3-3~4 に解析より求められた 1 個のモードによる伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。ピーク周波数はよく捕らえられています。第 1 次モードの絶対値は初期状態 (図 2.3-3、4) に比較しておよそ 2 倍の大きさであり、x、y 成分とは異なる挙動が見られます。

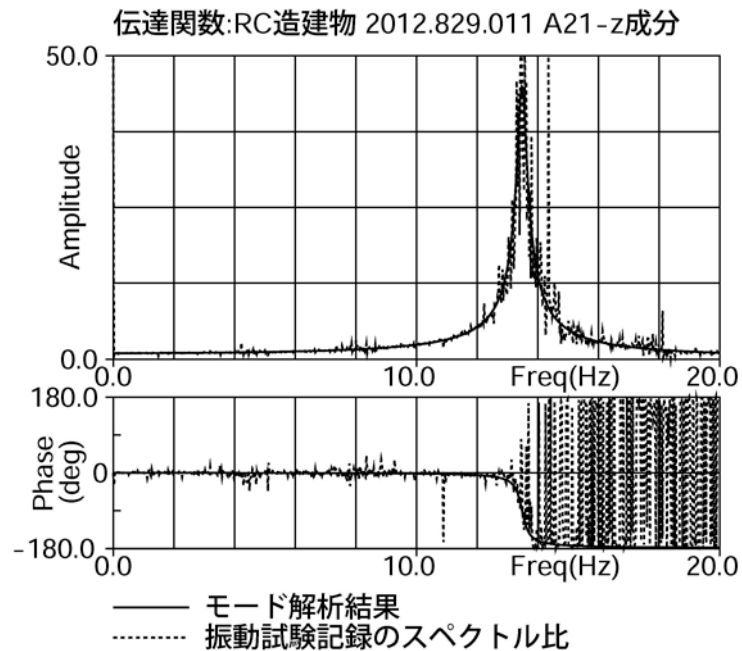


図 3.3-3 A21 の伝達関数の比較

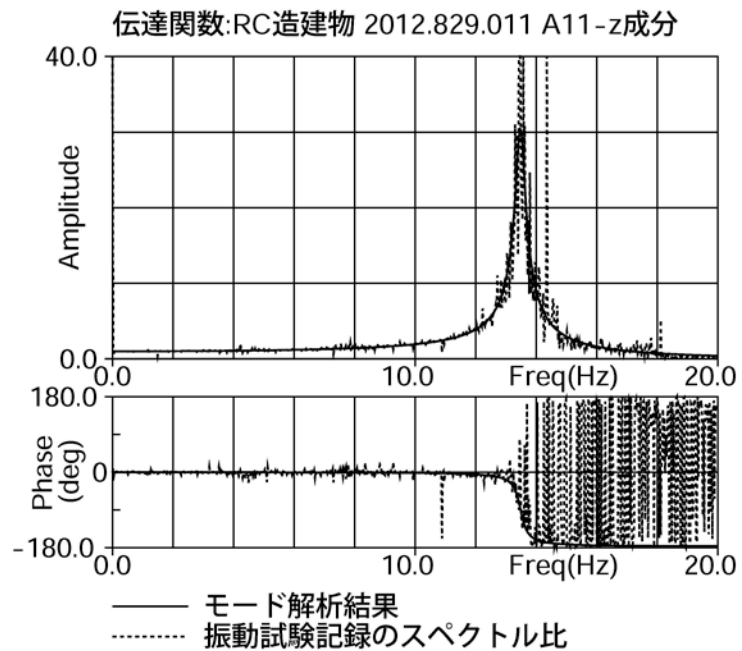


図 3.3-4 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められた刺激関数によるモードの形状は図 3.3-5 のようになります。

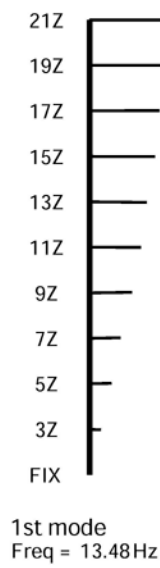


図 3.3-5 z 方向のモード形状

#### 4. 終局状態の解析結果

時間領域のモード解析は、初期状態および弱 L2 入力後と同様、1F の記録を入力、奇数階の記録をその応答と見なして実施しました。ただし、解析では、x、y 成分について 10Hz まで、z 成分については 20Hz までを対象にしました。解析で使用した x、y、z の 3 成分の波形を図 4.1~3 に示します。ここに、A に付く番号は階数を意味します。解析では、0.0~40.96 秒間（8192 個）の記録を使用しました。

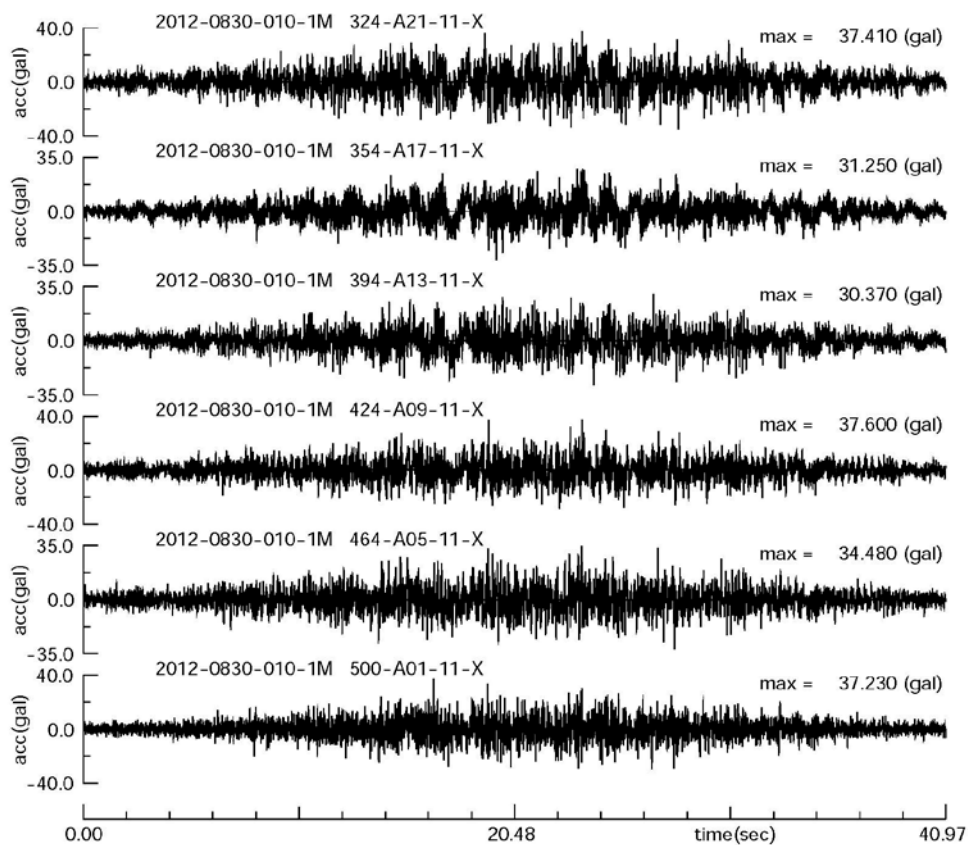


図 4-1 終局状態の x 成分

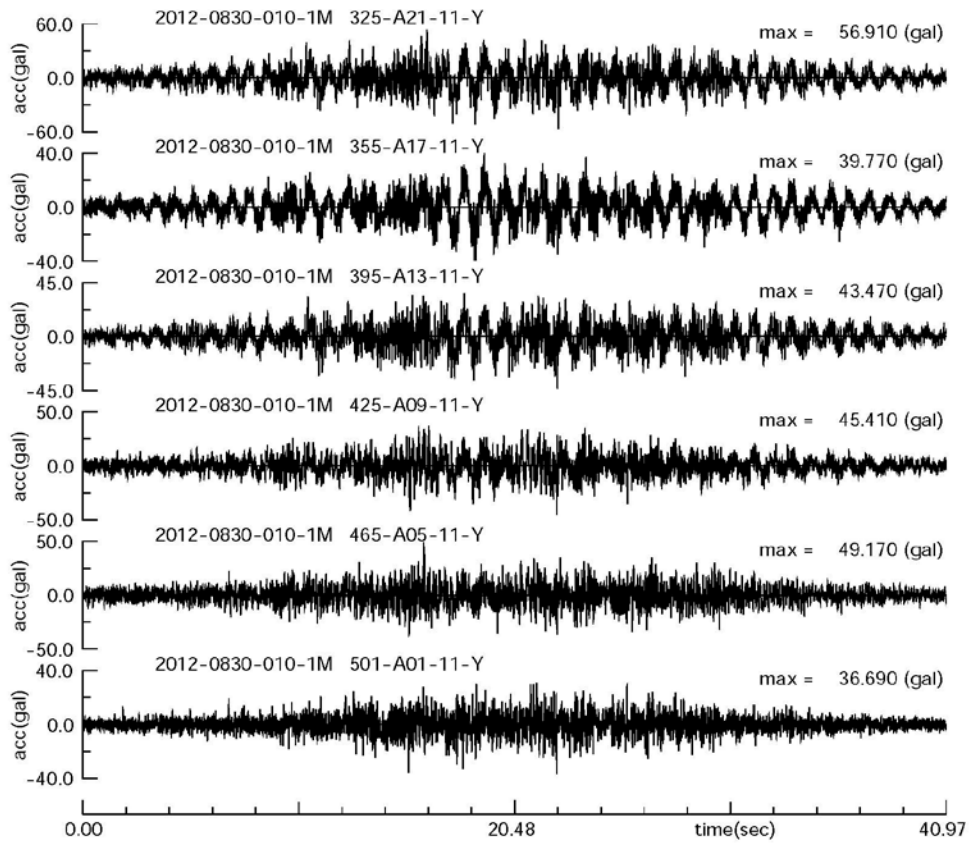


図 4-2 終局状態の y 成分

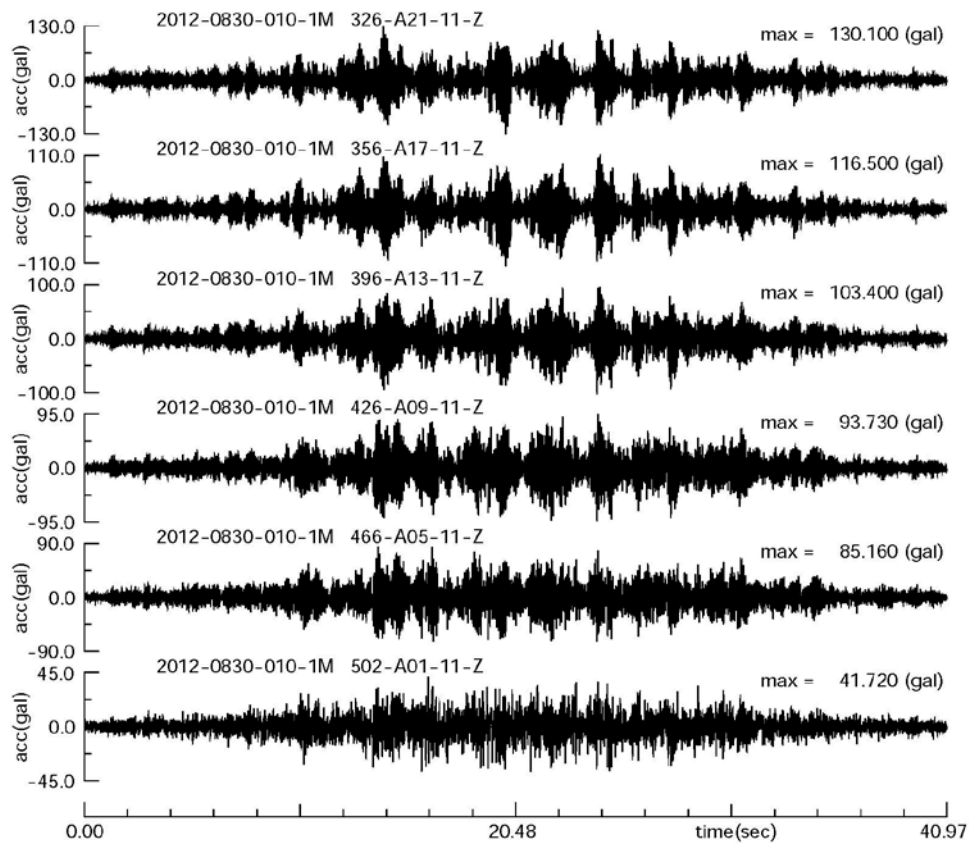


図 4-3 終局状態の z 成分

#### 4.1 x成分の解析結果

時間領域のモード解析より4個のモードが求められました。それらモードの固有周波数、固有周期、減衰定数および刺激係数を表4.1-1に示します。刺激係数より応答に対して第2次モードの方が第1次モードより寄与率が高いことがわかります。括弧内の数値は初期状態の値です。これら値に比較して固有周波数は6割弱減に、減衰定数は6~7倍の大きさに変化をしています。

表 4.1-1 x成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)	刺激係数
1	0.804 (1.882)	1.244 (0.531)	9.89 (1.56)	0.278
2	3.108 (6.027)	0.322 (0.166)	8.38 (1.07)	0.317
3	5.733 (11.00)	0.174 (0.091)	7.23 (0.98)	0.241
4	9.157 (15.931)	0.109 (0.063)	5.15 (0.84)	0.165

##### (1) 加速度波形の比較

解析より求められた4個のモードの和による加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を最上階A21と中間の階A11について図4.1-1~2に示します。再現性は良好です。他の階も同様です。

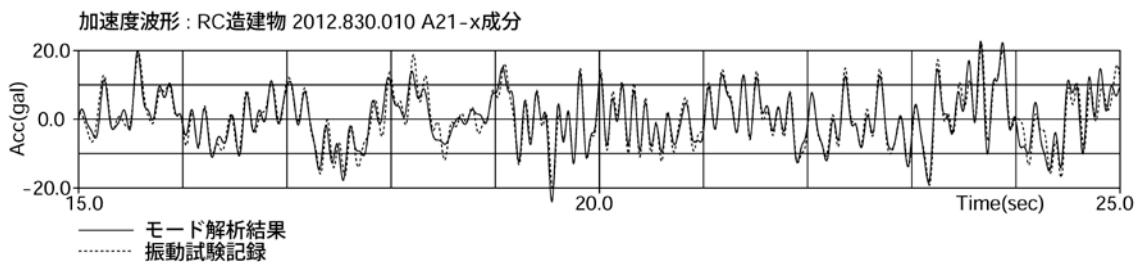


図 4.1-1 A21 の加速度波形の比較

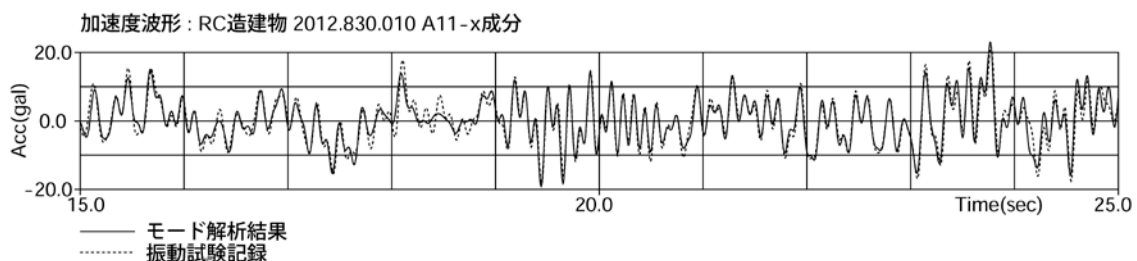


図 4.1-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 4.1-3~4 に解析より求められた 4 個のモードの和による伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。ピーク周波数はよく捕らえられています。

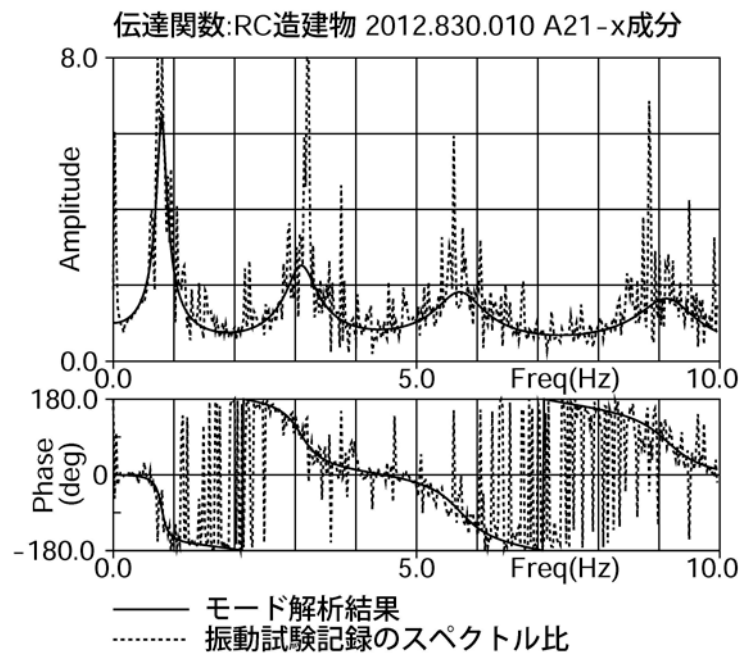


図 4.1-3 A21 の伝達関数の比較

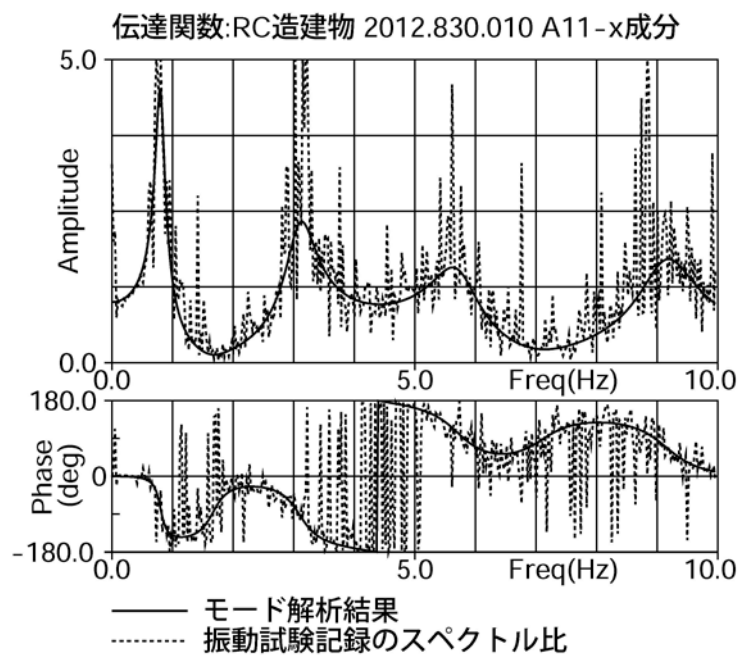


図 4.1-4 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められた 4 個のモードの形状を図 4.1-5 に示します。各モードの最大値を一定の長さに規格化して描いています。いずれも並進モードです。ただし、第 2 次以降の高次モードほどモードの腹部の階間に位相差が見られます。

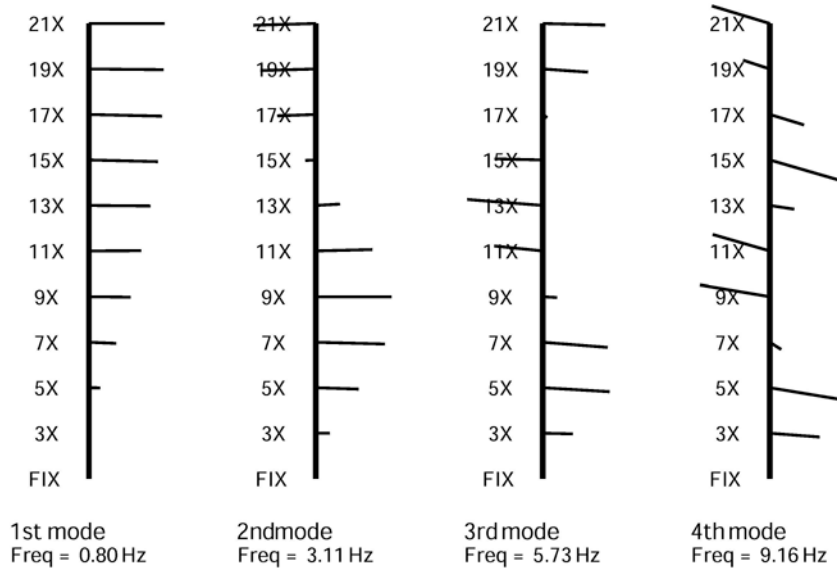


図 4.1-5 x 方向のモード形状

4.2 y 成分の解析結果

時間領域のモード解析より 3 個のモードが求められました。それらモードの固有周波数、固有周期、減衰定数および刺激係数を表 4.2-1 に示します。括弧内の数値は初期状態の値ですが、これら値に比較して固有周波数は 4 割弱減に、減衰定数はおよそ 3 倍の大きさに変化をしています。

表 4.2-1 y 成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)	刺激係数
1	1.090 (1.688)	0.917 (0.592)	4.37 (1.57)	0.422
2	3.815 (5.592)	0.262 (0.179)	3.54 (1.08)	0.356
3	6.987	0.143	3.28	0.222

(1) 加速度波形の比較

解析より求められた 3 個のモードの和による加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を図 4.2-1~2 に示します。再現性は良好です。

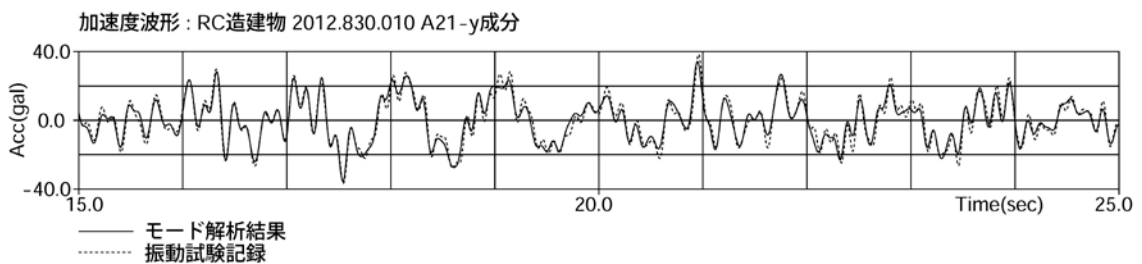


図 4.2-1 A21 の加速度波形の比較

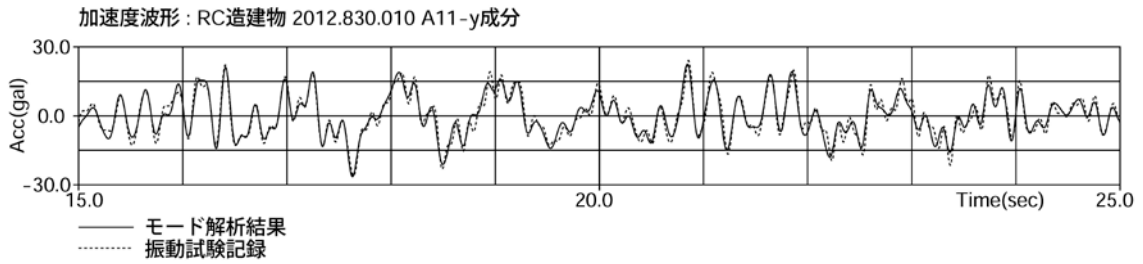


図 4.2-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 4.2-3~4 に解析より求められた 3 個のモードの和による伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。ピーク周波数はよく捕らえられています。

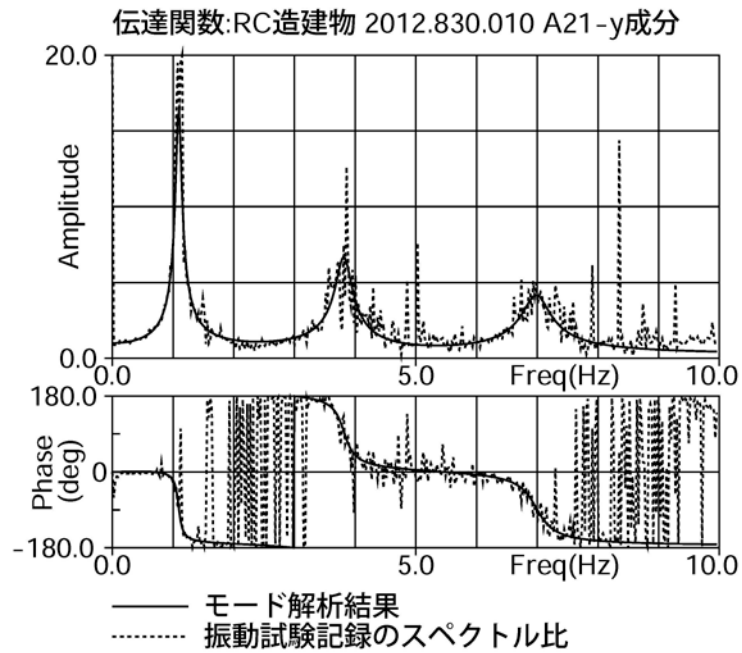


図 4.2-3 A21 の伝達関数の比較

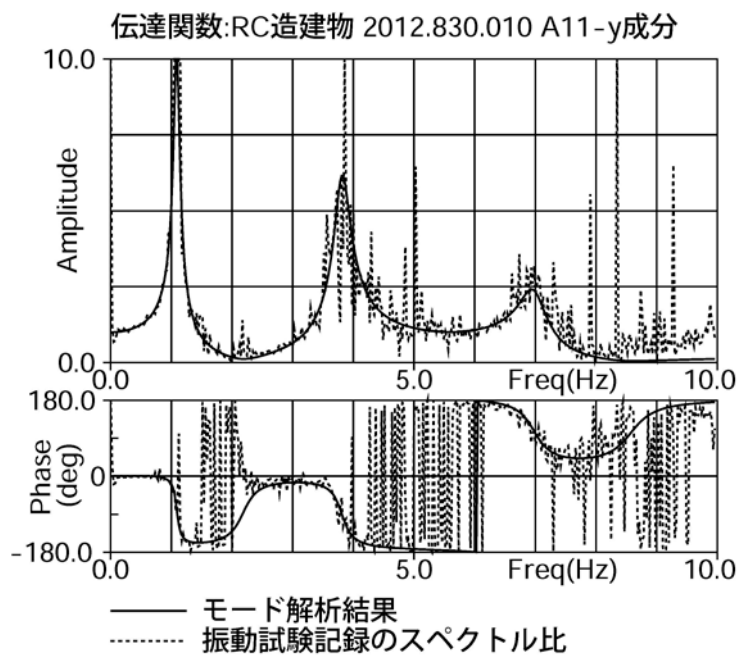


図 4.2-4 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められた 3 個のモードの形状を図 4.2-5 に示します。各モードの最大値を一定の長さに規格化して描いています。いずれも並進モードです。ただし、x 成分程ではないが、第 2 次および第 3 次モードの腹部の階間に位相差が見られます。

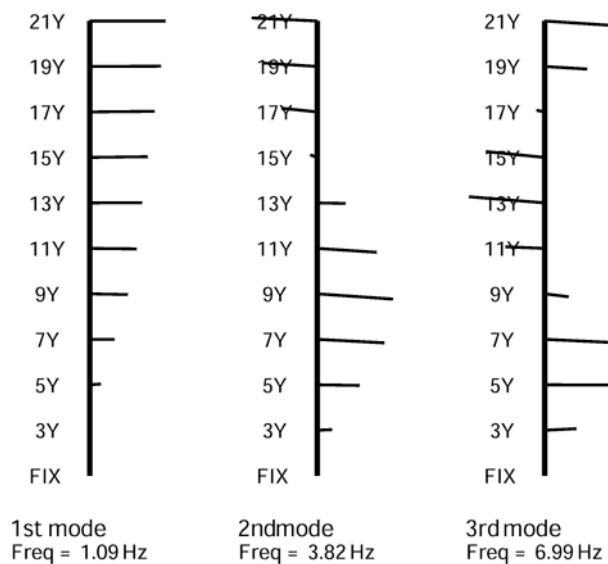


図 4.2-5 y 方向のモード形状

### 4.3 z成分の解析結果

時間領域のモード解析より求められた1個のモードの固有周波数、固有周期および減衰定数を表4.3-1に示します。括弧内の数値は初期状態の数値ですが、固有周波数は1割強減に、減衰定数はおよそ3割減の大きさに変化をしています。

表 4.3-1 z成分の解析結果

No.	固有周波数(Hz)	固有周期(sec)	減衰定数(%)
1	12.755 (14.659)	0.078 (0.068)	1.62 (2.22)

#### (1) 加速度波形の比較

解析より求められた1個のモードによる加速度応答と振動試験記録との主要動部の比較図を図4.3-1~2に示します。再現性は良好です。

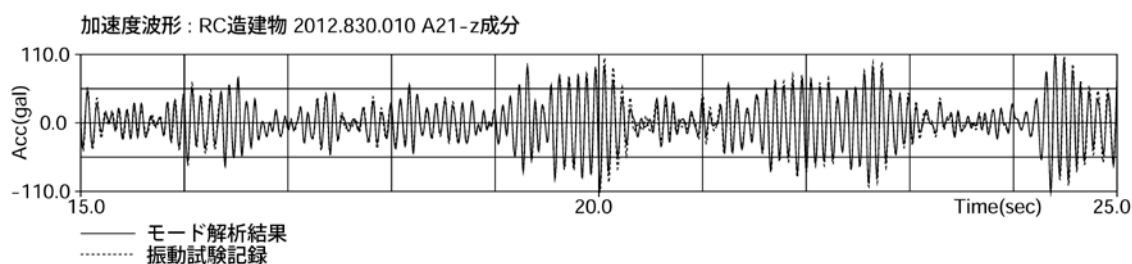


図 4.3-1 A21 の加速度波形の比較

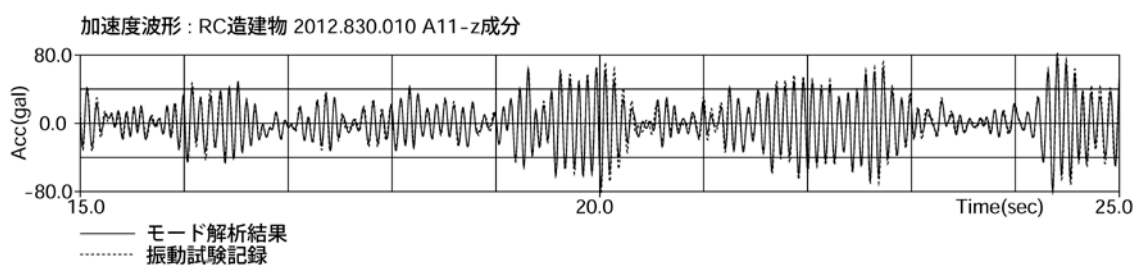


図 4.3-2 A11 の加速度波形の比較

(2) 伝達関数の比較

図 4.3-3~4 に解析より求められた 1 個のモードによる伝達関数と振動試験記録のスペクトル比との比較図を示します。結果は良好です。

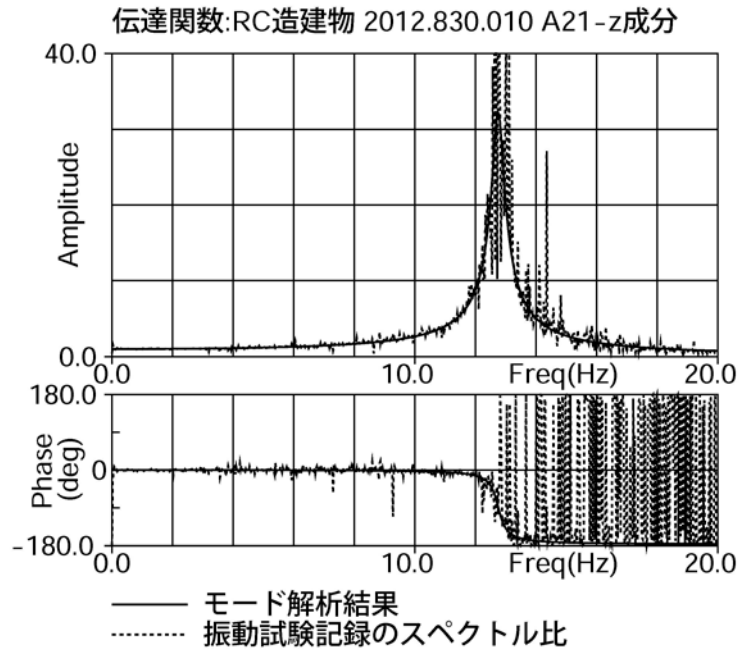


図 4.3-1 A21 の伝達関数の比較

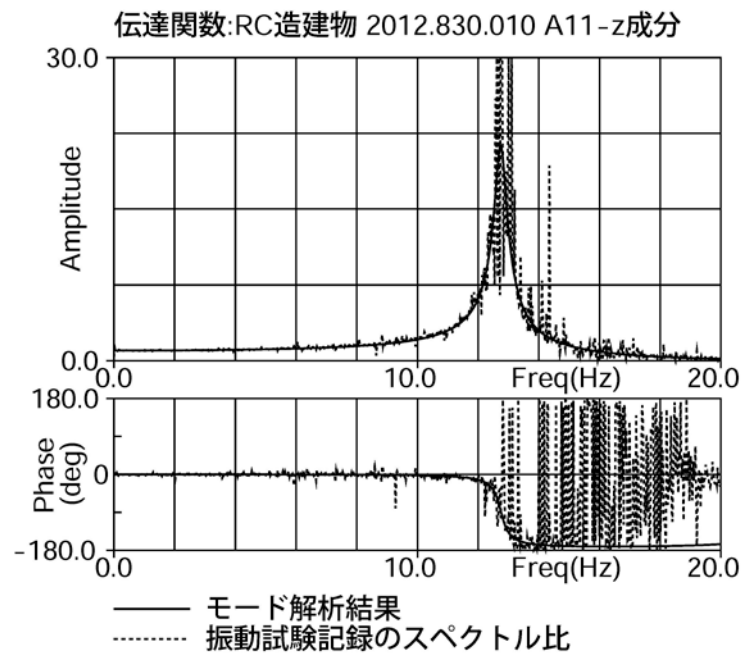


図 4.3-2 A11 の伝達関数の比較

(3) モード形状

解析より求められたモードの形状を図 4.2-5 に示します。

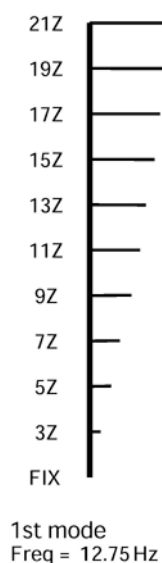


図 4.3-5 z 方向のモード形状

5. おわりに

超高層建物の長周期地震動に対する応答性状を把握するため、大林組技術研究所によって、E-ディフェンスを使用して振動試験が実施されました。本件では防災科学技術研究所の ASEBI<sup>1)</sup> で公開された加速度記録を用いて時間領域のモード解析を行い、建物の状態の変化に伴う固有周波数や減衰定数等の動的特性の推移について検討しました。

解析より求められた記録の水平 2 成分 x、y（長手、短手各方向）、および上下成分 z の各成分の第 1 次モードの固有周波数は表-5 のようになります。通常の建物の場合は、このモードの刺激係数が最大となり、建物の状態の変化を示すための物理量として適切であると考えられます。ただ、既述の通り、y 成分の刺激係数は初期状態で第 1 次モードより第 2 次モードの方が大きく求められたため、他の成分と同様の考察は難しいと思いますが、とりあえず固有周波数の変動は次のようになります。

同表より、固有周波数の変化は建物の長手方向の x 成分が顕著であり、弱 L2 で 4 割減に、終局で 6 割弱減となっています。y 成分はそれぞれ 3 割弱減、4 割弱減、z 成分については双方わずかな変化に留まっています（y 成分の第 2 次モードについてはそれぞれ 2 割強減、3 割強減です）。また運動方程式の固有方程式より、試験体を 1 質点系とみなした場合、剛性の低下量の割合は、固有周波数の 3 割減に対しておよそ 5 割減に、同 4 割減に対して 6 割～7 割減に、同 6 割減に対して 8 割～9 割減にそれぞれ相当します。

ただし、実験では実在建物の 1/4 モデルを使用しているため、解析結果を実建物に適用する場合は、相似則に従い、固有周波数について 0.354 倍しなければなりません。変動率は変わりません。また、記録には y 成分の刺激係数の問題があり、試験対象建物が実在建物の動的特性を正確に反映した構造であったのかどうか疑問に思われますが、時間領域のモード解析より、建物の健全な状態および損傷状態、そして終局状態における各々の動的特性の差異が明らかになり、同解析は、巨大地震による長周期地震動に備え、超高層ビルの耐震性評価手法として活用可能であることが示されたと考えます。

表-5 固有周波数 (Hz) の推移 (括弧内の数値は固有周期 (sec))

No.	成分	初期状態	弱 L2 入力後	終局状態
1	x	1.882 (0.531)	1.115 (0.897)	0.804 (1.244)
2	y	1.688 (0.592)	1.240 (0.807)	1.090 (0.917)
3	z	14.659 (0.068)	13.483 (0.074)	12.755 (0.078)

参考文献

- 1)国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」より  
課題名「長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法に関する検討」  
(<https://www.edgrid.jp/datas/>)
- 2)長周期地震動を受ける超高層鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能 その 1 20 層 RC 造  
建物試験体の震動実験 大林組技術研究所報 No.78 2014
- 3)長周期地震動を受ける超高層鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能 その 2 大規模  
FEM による架構耐力に対する分析 大林組技術研究所報 No.78 2014
- 4)安藤幸治・岩楯徹広:時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用、  
土木学会論文集、No.450/ I -20、pp.151～160、1992.7
- 5)安藤幸治, 岩楯徹広, 小田義也: 数値モデル同定解析手法とその適用, 機械学会年次大  
会, 2011.9
- 6)安藤幸治, 岩楯徹広: 時間領域のモード解析とその適用—E-ディフェンスによる超高層  
RC 造建築物の振動特性—, 土木学会年次大会, 2016.9