

機器上下免震構造の具体化に関する調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年2月



株式会社 大林組

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section
Technology Management Division
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

◎ 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

機器上下免震構造の具体化に関する調査

(契約業務報告書)

榎木 孝裕* 宮本 明倫*

要 旨

機器上下免震構造概念（コモンデッキ方式）を実現するための研究開発の一環として、現在、機器上下免震構造の具体化に関する調査を行っている。具体化に当たっては使用する要素である免震要素、減衰要素それぞれの構造計画を作成し、これら構造計画に基づき試験計画の立案、試験結果の分析・反映を行うこととなる。

本報告書では、機器上下免震要素の解析検討、構造計画及び試験計画の立案について報告する。

- 皿ばねのFEM解析を行い、荷重特性とひずみを試験結果と比較することで解析の妥当性を確認した。また、並列(5並列)に重ねた場合の荷重伝達及び応力状態を解析により把握した。
- クリープ試験結果に基づきクリープ評価式の検討を行った。また、本評価式を用いたクリープ解析から耐用年数(60年)での変形量を算出し、影響の無いことを確認した。
- 試験結果、設計式及びFEM解析から実機体系(5並列14直列)での荷重特性を推定した。評価は概ね一致することを確認し、実機の設計手法の妥当性を示した。
- コモンデッキを含む機器上下免震システムについて、水平及び上下方向の地震動を同時に考慮した応答解析を行い、上下免震装置の上下変位及び機器の応答加速度が制限値以下であることを確認した。
- これまでの検討結果を踏まえ、全体組立図及び各部詳細図を作成した。
- 試験装置、構成部品の製作性・入手性等より試験体(免震要素)の縮尺率を定め、試験体図面を作成した。また、指針化までの各種試験計画の立案をした。

* 株式会社大林組

本報告書は、株式会社大林組が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室： 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

The investigation about embodiment of vertical isolation structure

T.Somaki* A.Miyamoto*

Abstract

In order to realize the concept of a vertical isolation system called common deck system, research and development on the vertical isolation structure is now underway. In its first step, structure plans of each of the isolation element and the damper element will be drawn up, and in the next step, tests on these elements will be planned, executed, analyzed, and evaluated, to be reflected to the structure plan.

In this report, the study of analysis, the structure plan and test plan of vertical isolation devices is reported.

- The appropriateness of analysis was confirmed by comparison between test results and analysis results. And the loading mechanism and the stress condition of dish spring as piling five lines were analyzed.
- The formula of Creep was examined on creep test results. And the influence of amount of deformation by creep behavior was made clear on the life of building.
- The characteristic of loading in actual typical model was presumed by test results, design formula and FEM analysis. These results were mostly coincided and the appropriateness of design method was confirmed.
- Response displacement of a vertical isolation and response acceleration of primary instruments were analyzed and confirmed beyond restriction values by dynamic analysis.
- The total fabrication of isolation device and each component were drowned on the result of these studies.
- The scale of test model was estimated and the map of test model was drowned. And several test plans reflects design guideline were made.

* OBAYASHI COPORATION

This report is related with the operating result which OBAYASHI CORP. carried out by contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

The division of contract : Structural Mechanics Research Group, Advanced technology division,

O-arai Engineering Center

目 次

要旨	I
目次	III
表リスト	IV
図リスト	V
1. はじめに	1-1
2. 検討内容	2.1-1
2.1 皿ばねの設計、製作、品質管理	2.1-1
2.2 FEM による皿ばねの荷重伝達及び応力状態の把握	2.2-1
2.3 クリープ試験結果に基づく皿ばね形状への影響評価	2.3-1
2.4 実機皿ばねユニット荷重特性評価と上下免震システムへの適用性検討	2.4-1
2.5 コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合地震応答解析	2.5.1-1
2.5.1 FEM によるコモンデッキの固有値解析	2.5.1-1
2.5.2 コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合地震応答解析	2.5.2-1
2.6 機器上下免震装置の具体化検討	2.6.1-1
2.6.1 機器上下免震装置の具体化検討	2.6.1-1
2.6.2 ガイド構造の検討	2.6.2-1
2.6.3 全体組立図及び各部詳細図	2.6.3-1
2.7 縮小試験体の検討	2.7-1
2.8 機器上下免震システム開発試験計画	2.8-1
3. おわりに	3-1

表 リ ス ト

表 2.3-1 クリープ試験の試験パラメータ	2.3-2
表 2.5.1-1 固有値解析結果	2.5.1-3
表 2.5.1-2(1/2) 固有モードの比較	2.5.1-6
表 2.5.1-2(3/2) 固有モードの比較	2.5.1-7
表 2.7-1 供試模型の相似則	2.7-3
表 2.7-2 相似則による試験体の振動特性の推定	2.7-4
表 2.7-3 盤ばね荷重特性値からの試験体振動特性の推定	2.7-5
表 2.7-4 盤ばね高さ・厚さ寸法の変更による試験体振動特性の推定	2.7-5
表 2.7-5 盤ばね直列数及び全たわみ変更による試験体振動特性の推定	2.7-6
表 2.7-6 実機(5並列14直列)の振動特性	2.7-7
表 2.7-7 縮尺1/2(5並列14直列)の振動特性	2.7-8
表 2.7-8 縮尺1/2.78(5並列14直列)の振動特性	2.7-9
表 2.7-9 縮尺1/2(5並列14直列:全たわみ減少)の振動特性	2.7-10
表 2.7-10 縮尺1/2(5並列14直列:厚さ減少)の振動特性	2.7-11
表 2.7-11 縮尺1/2(5並列14直列:全たわみ・厚さ減少)の振動特性	2.7-12
表 2.7-12 縮尺1/2(5並列15直列:全たわみ減少)の振動特性	2.7-13
表 2.7-13 縮尺1/2(5並列15直列:全たわみ減少)の振動特性	2.7-14

図 リ ス ト

図 2.1-1	平成 14 年度 METI 研究にて製作した皿ばねの形状寸法	2.1-3
図 2.2-1(1/2)	皿ばねの FEM 解析モデル	2.2-3
図 2.2-1(2/2)	皿ばねの FEM 解析モデル	2.2-4
図 2.2-2	皿ばねの材料特性	2.2-4
図 2.2-3	1 並列 1 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-5
図 2.2-4	1 並列 2 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-5
図 2.2-5	1 並列 10 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-6
図 2.2-6	2 並列 1 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-7
図 2.2-7	2 並列 2 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-7
図 2.2-8	3 並列 1 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-8
図 2.2-9	5 並列 1 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-9
図 2.2-10	5 並列 2 直列での試験結果と試験結果と解析結果の比較	2.2-9
図 2.2-11	皿ばね FEM モデルでのひずみ評価位置	2.2-10
図 2.2-12	ひずみの比較(ゲージ No.1)	2.2-11
図 2.2-13	ひずみの比較(ゲージ No.2)	2.2-11
図 2.2-14	ひずみの比較(ゲージ No.3)	2.2-12
図 2.2-15	ひずみの比較(ゲージ No.7)	2.2-12
図 2.2-16	ひずみの比較(ゲージ No.8)	2.2-13
図 2.2-17	ひずみの比較(ゲージ No.9)	2.2-13
図 2.2-18	5 並列 1 直列(変形: 12.5mm、荷重: 2844KN)での荷重伝達	2.2-14
図 2.2-19	変形 12.5mm での 5 並列 1 直列の応力状態	2.2-15

図 2.2-20 変形 31.5mmでの 5 並列 1 直列の応力状態	2.2-16
図 2.3-1 クリープ試験結果	2.3-3
図 2.3-2 クリープ評価式との比較	2.3-3
図 2.3-3 1 並列 1 直列クリープ変形解析	2.3-4
図 2.3-4 5 並列 1 直列クリープ変形解析	2.3-4
図 2.3-5 1 並列 1 直列:60 万時間経過後の荷重特性の比較	2.3-5
図 2.3-6 5 並列 1 直列:60 万時間経過後の荷重特性の比較	2.3-5
図 2.4-1 試験結果から推定した実際の荷重特性	2.4-3
図 2.4-2 実機推定荷重特性と解析結果との比較	2.4-3
図 2.4-3 上下解析モデル	2.4-4
図 2.4-4 上下応答加速度と減衰力の関係	2.4-5
図 2.4-5 上下応答変位と減衰力の関係	2.4-5
図 2.5.1-1 コモンデッキ長辺方向の原子炉容器等の機器系解析モデル (皿ばね: 28 台、長辺方向)	2.5.1-2
図 2.5.1-2 コモンデッキ長辺方向の原子炉容器等の機器系解析モデル (皿ばね: 28 台、短辺方向)	2.5.1-3
図 2.5.1-3 上下応答変位と減衰力の関係	2.5.1-4
図 2.5.1-4(1/5)コモンデッキ短辺方向のモード図(1次、2次)	2.5.1-8
図 2.5.1-4(2/5)コモンデッキ短辺方向のモード図(3次、4次)	2.5.1-9
図 2.5.1-4(3/5)コモンデッキ短辺方向のモード図(16 次、17 次)	2.5.1-10
図 2.5.1-4(4/5)コモンデッキ短辺方向のモード図(18 次、19 次)	2.5.1-11
図 2.5.1-4(5/5)コモンデッキ短辺方向のモード図(20 次、21 次)	2.5.1-12
図 2.5.1-5(1/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(1 次、2 次)	2.5.1-13

図 2.5.1-5(2/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(3次、4次)	2.5.1-14
図 2.5.1-5(3/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(5次、6次)	2.5.1-15
図 2.5.1-5(4/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(17次、18次)	2.5.1-16
図 2.5.1-5(5/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(19次、20次)	2.5.1-17
図 2.5.1-5(6/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(21次、22次)	2.5.1-18
図 2.5.1-5(7/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(23次、24次)	2.5.1-19
図 2.5.1-5(8/8)コモンデッキ長辺方向のモード図(25次)	2.5.1-20
図 2.5.2-1 コモンデッキ短辺方向の水平入力応答時刻歴波形 及び応答スペクトル	2.5.2-3
図 2.5.2-2 コモンデッキ長辺方向の水平入力応答時刻歴波形 及び応答スペクトル	2.5.2-4
図 2.5.2-3 上下入力応答時刻歴波形及び応答スペクトル	2.5.2-5
図 2.5.2-5 ダンパの荷重一変位関係(短辺方向)	2.5.2-6
図 2.5.2-6 コモンデッキ上下応答変位波形の比較(短辺方向)	2.5.2-7
図 2.5.2-9 地震時コモンデッキの変形差分布(短辺方向)	2.5.2-8
図 2.5.2-10 原子炉支持位置での水平応答加速度時刻歴波形(短辺方向)	2.5.2-9
図 2.5.2-11 原子炉支持位置での上下応答加速度時刻歴波形(短辺方向)	2.5.2-9
図 2.5.2-12 原子炉下部での水平応答加速度時刻歴波形(短辺方向)	2.5.2-10
図 2.5.2-13 原子炉下部での上下応答加速度時刻歴波形(短辺方向)	2.5.2-10
図 2.5.2-14 原子炉支持位置での水平床応答曲線(短辺方向)	2.5.2-11
図 2.5.2-15 原子炉支持位置での上下床応答曲線(短辺方向)	2.5.2-11
図 2.5.2-16 原子炉下部での水平床応答曲線(短辺方向)	2.5.2-12
図 2.5.2-17 原子炉下部での上下床応答曲線(短辺方向)	2.5.2-12

図 2.5.2-18 皿ばねの荷重一変位関係(長辺方向)	2.5.2-13
図 2.5.2-19 ダンパーの荷重一変位関係(長辺方向)	2.5.2-13
図 2.5.2-20 コモンデッキ水平応答変位波形(長辺方向)	2.5.2-14
図 2.5.2-21 コモンデッキ上下応答変位波形の比較(長辺方向)	2.5.2-14
図 2.5.2-22 供用時コモンデッキの変形分布	2.5.2-15
図 2.5.2-23 地震時コモンデッキの変形差分布(長辺方向)	2.5.2-15
図 2.5.2-24 原子炉支持位置での水平応答加速度時刻歴波形(長辺方向) ..	2.5.2-16
図 2.5.2-25 原子炉支持位置での上下応答加速度時刻歴波形(長辺方向) ..	2.5.2-16
図 2.5.2-26 原子炉下部での水平応答加速度時刻歴波形(長辺方向)	2.5.2-17
図 2.5.2-27 原子炉下部上下応答加速度時刻歴波形(長辺方向)	2.5.2-17
図 2.5.2-28 原子炉支持位置と IHX/ポンプ支持位置での 水平床応答曲線の比較(長辺方向)	2.5.2-18
図 2.5.2-29 原子炉支持位置での上下床応答曲線(長辺方向)	2.5.2-18
図 2.5.2-30 IHX/ポンプ支持位置での上下床応答曲線(長辺方向)	2.5.2-18
図 2.5.2-31 原子炉下部での水平床応答曲線(長辺方向)	2.5.2-19
図 2.5.2-32 原子炉下部での上下床応答曲線(長辺方向)	2.5.2-19
図 2.6.1-1 各部構造の形状具体化	2.6.1-1
図 2.6.2-1 ガイド構造の FEM 解析モデルと固定条件	2.6.2-3
図 2.6.2-2 ガイド構造の FEM 解析結果	2.6.2-4
図 2.6.2-3 減衰装置下部取付け軸の FEM 解析結果	2.6.2-4
図 2.6.2-4 ガイド構造の水平方向荷重一変位関係	2.6.2-5
図 2.6.2-5 スライド部鋼球が受ける荷重の分布	2.6.2-5
図 2.6.2-6 ガイド構造の水平変位分布	2.6.2-6

図 2.6.2-7 ボルトの検討	2.6.2-6
図 2.6.3-1 上下免震ユニット総合図(中立変位時の全体側面図)	2.6.3-2
図 2.6.3-2 上下免震ユニット総合図(中立変位時の全体平面・断面平面図)	2.6.3-3
図 2.6.3-3 上下免震ユニット総合図(最高変位時の全体側面図)	2.6.3-4
図 2.6.3-4 上下免震ユニット総合図(最低変位時の全体側面図)	2.6.3-5
図 2.6.3-5 上下免震ユニット部分詳細図(3連リング平面・断面図)	2.6.3-6
図 2.6.3-6 上下免震ユニット部分詳細図(皿ばね水平拘束板最高変位時図)	2.6.3-7
図 2.6.3-7 上下免震ユニット部分詳細図(皿ばね水平拘束板最低変位時図)	2.6.3-8
図 2.6.3-8 上下免震ユニット部分詳細図(鋼球集合体組立平面・側面図)	2.6.3-9
図 2.6.3-9 上下免震ユニット部分詳細図 (鋼球集合体組立平面・側面拡大図)	2.6.3-10
図 2.6.3-10 上下免震ユニット部分詳細図(下部軸周辺詳細図)	2.6.3-11
図 2.7-1 縮尺 1/2 試験体総合図(5 並列×14 直列(板厚 13mm、 全たわみ 16mm) : 中立変位時の全体側面図)	2.7-15
図 2.7-2 縮尺 1/2 試験体総合図(全体平面・断面図)	2.7-16
図 2.7-3 縮尺 1/2 試験体総合図 (5 並列×16 直列 : 中立変位時の全体側面図)	2.7-17
図 2.8-1 機器上下免震システム開発の全体フロー	2.8-6
図 2.8-2 縮小皿ばねの静的・動的加力試験のイメージ	2.8-7
図 2.8-3 ガイド構造の上下摺動性確認試験・限界状態確認試験	2.8-8
図 2.8-4 直並列に重ねた皿ばね集合体確認試験	2.8-8
図 2.8-5 3 次元振動台による性能・健全性確認試験	2.8-8

1. はじめに

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター殿（以下、サイクル機構殿という）において、高速炉プラントを 3 次元免震化する方策として有望なコモンデッキ方式機器上下免震構造の開発を進められている。

本研究においては、機器上下免震要素の構造計画の具体化を行うとともに、構造成立性を確認するための試験計画を立案する。また、免震要素と組み合わせて用いる減衰要素の構造についても調査検討を行い機器上下免震構造全体の具体化を図るものである。

2. 檢討內容

2. 検討内容

2.1 盤ばねの設計、製作、品質管理

(1) これまでの経緯

平成 13 年度にて、2 枚の実大盤ばねを試作してその製作性を確認するとともに、静的試験による荷重特性を調査した。

製作した実大盤ばねの寸法は、外径 1000φ、内径 500φ、板厚 27mm、盤ばねの自由高さ 32mm（全高 58.85mm）である。静的試験は、1 並列 1 直列、2 並列 1 直列及び 1 並列 2 直列について行った。しかし、実機を想定した盤ばね組合せの状態（5 並列 14 直列）と比較して、盤ばねに加わる鉛直荷重の大きさは非常に小さいものであった。

平成 14 年度においては、METI 研究にて実大盤ばねを 10 枚製作しており、実機盤ばねの最小ユニット 5 並列を 2 直列組むことが可能となり、実機と同じ荷重状態での力学特性試験を行った。

本検討では、METI で製作した 10 枚の実大盤ばねについて、設計、製作及び品質管理に関して得られた知見を示す。

(2) 盤ばねの設計・製作・品質管理

平成 13 年度の実大盤ばねの試作に先立って、JNC 殿にて実施したクリープ予備試験結果（市販品である SUP10 を対象）を踏まえて行ったクリープ解析によるクリープ変形ば、供用 60 年で 1.8mm であった。この他に燃料交換時の荷重変動等を考慮して、平成 12 年度実大盤ばねの試設計結果の自由高さ 31mm に対して 31mm～34mm までを成立範囲とした。そこで、平成 13 年度試作実大盤ばねは、ストロークを大きく確保した方が望ましいと判断し、自由高さを 33mm とした。しかしながら、製造過程（セッティング）において実大盤ばねの自由高さが 1mm ほど減少することが新たな知見として分かった。

その後、クリープ試験は、実大盤ばねと一緒に熱処理を行った試験片に対して、2 回のクリープ試験を平成 14 年度初頭から JNC 殿にて実施していた。

平成 14 年度 METI にて製作した実大盤ばねの自由高さは、第 1 回クリープ試験データに基づくクリープ変形量が予備試験ほど大きくはならないとのデータが得られたこと、また、平成 13 年度実大盤ばねの試作での製造時高さ減少を考慮して、34mm とし

た。

図 2.1-1 に、本検討のベースとなる皿ばねの寸法を示す。

皿ばねの設計・製作・品質管理に関して今年度得られた知見を、以下に示す。

METI での実大皿ばね 10 枚の製作を通して、平成 13 年度の試作から製作・品質管理上の新たな知見は得られていない。但し、製造時のセッティングにおいて、平成 13 年度と同様に 1mm 前後の高さの変化が認められたが、試験を実施するまでの約 2 月の寸法検査、表面処理等の期間にて 0.5mm の復元が認められ、各試験体とも自由高さは 33.5mm ほどになった。

また、JNC 殿で実施した平成 14 年度の 2 回のクリープ試験結果より、クリープ変形が平成 13 年度の試験結果ほど大きくない結果が得られた。詳細については、次章にて示す。

2.1.3

注記

1. 盤ばねは熱焼き入れ一焼き戻し後旋削加工仕上げを行う。

2. 盤ばねは下表に従い表面処理のこと。

1	デブリックコートFTT16A(厚さ5μm以上)
項目番号	表面処理

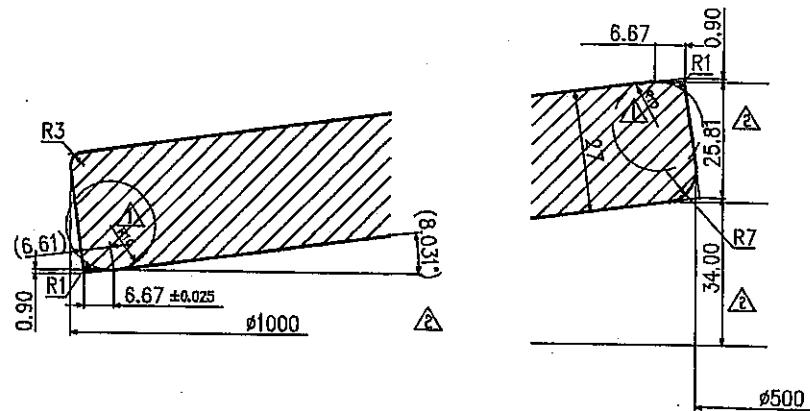
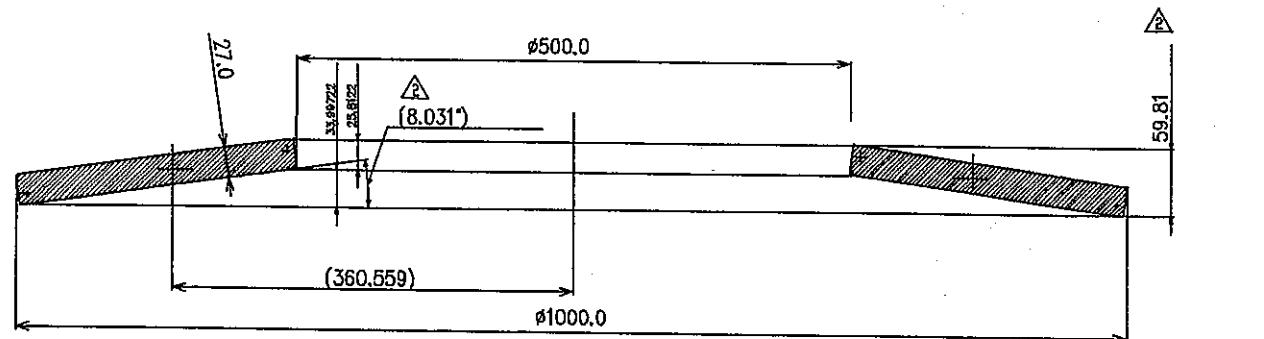


図 2.1-1 平成 14 年度 METI 研究にて製作した盤ばねの形状寸法

2.2 FEM による皿ばねの荷重伝達及び応力状態の把握

本検討では、METI で実施した 10 枚の実大皿ばねの試験より得られた荷重特性やひずみについて FEM 解析との整合性を確認した上で、荷重伝達及び応力評価を行う。

これは、2.3 章及び 2.4 章にて検討するクリープ評価及び実機 5 並列 14 直列の荷重特性推定等に資する。

なお、実大皿ばね 10 枚の試験結果（荷重特性、摩擦係数、試験データ）は、平成 14 年度 METI 研究成果による。

(1) 皿ばねの荷重特性

平成 14 年度 METI 研究にて行った実大皿ばねの静的試験結果について、FEM 解析を行った。図 2.2-1 に、FEM 解析モデルを示す。ここで、向かって左側が内径側、右側が外径側である。解析は軸対象回転体とし、幾何学的非線形を考慮している。図 2.2-2 に、引張試験データに基づく材料特性を示す。

図 2.2-3～10 に、試験結果と FEM 解析結果の比較を示す。FEM 解析では、皿ばねのセッティングを経験させる載荷を加え、皿ばねの製造工程の実状に合わせた。なお、図中には、設計式による評価も合わせて示した。ここで、設計式に用いる座面及び面間での摩擦係数は、0.118 とした。平成 13 年度にて得られた摩擦係数よりも大きい。（ここで、設計式における面間摩擦係数の取扱について引用した文献に記載ミスがあり、摩擦係数値としては従来の倍 0.039→約 0.08 となる。正しい式を下式に示すが、結果は変わらない）

$$P^* = \frac{n P}{\left\{ 1 \pm \mu M (n-1) \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{1}{a/t} \right\}} \times \frac{1}{\left[1 \pm \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{1}{a/t} \left\{ \frac{h_0}{t} \left(1 - \frac{\delta}{h_0} \right) + 1 \right\} \mu R / m \right]}$$

ここに、P : 荷重、 P* : 摩擦を考慮した荷重、 δ : たわみ、

a : 外半径、 t : 厚さ、 h0 : 全たわみ α : 内外径比 (=a/b)、

μM : 皿ばねの面間での摩擦係数、 μR : 皿ばねと座金との摩擦係数

m : 直列数、 n : 並列数

また、1 並列 1 直列の試験にて測定したひずみの比較について、図 2.2-11 にひずみの評価位置を、図 2.2-12～17 に双方の比較結果を示す。

皿ばねの荷重特性について、FEM 解析結果及び設計式はともに試験結果とよく整合

している。また、ひずみにおいても、良好に模擬していると考えられる。

以上より、実大皿ばねの試験結果に対する FEM 解析アプローチが妥当であることが示されるとともに、実大皿ばねの応力状態も把握できることが判る。

(2) 荷重伝達

図 2.2-18 に、実機と同じ荷重レベルである 5 並列 1 直列についてほぼ供用時（変形 12.5mm、支持荷重 2844kN）の状態における皿ばね上面及び下面での節点反力（Z 方向）を円周方向に積分して求めた荷重分布を示す。

図より、座金から受ける上からの荷重に対して、上段の皿ばねは内周側と外周側のわずかな範囲を介して下段の皿ばねに荷重を伝達している。最上段で受けた荷重が、徐々に外側へ移動しているのが認められる。一方、平成 14 年度 METI 研究にて実施した実大皿ばねの 5 並列 2 直列による多回数繰返し載荷（S2 応答の ±100mm に相当する変位振幅を 45 回経験）後の皿ばねの損傷箇所が、この解析結果と対応している。

(3) 皿ばねの応力状態

図 2.2-19～20 に、12.5mm 及び 31.5mm 変形時における 5 並列 1 直列の応力状態を応力コンタにて示す。変形 12.5mm は供用時の変形状態であり、変形 31.5mm はセッティングに近い変形状態である。ここで、図中の単位は、kgf/mm²である。

通常、皿ばね単体では、皿ばねが O 点を中心点として回転すると考え、円周方向の長さ変化による応力と板の曲率変化による応力による回転中心廻りのモーメントが外力に釣り合うと考えて、単体の応力状態は内周側上面が最大圧縮、外周側下面が最大引張となる。

応力図より、半径方向の応力は内周及び外周にて大きくなり、中央部は小さい。Z 方向は、皿ばねが座金と接触して荷重を受ける部分の応力が最も大きく、座金が遠ざかるほどその応力は小さい。また、円周方向は、内周上面が圧縮状態、外周下面が引張状態であり、トータルな応力状態を示す Von Mises では内周上面が最大であり、外周下面の順で応力が小さくなる。なお、31.5mm 変形時における応力値は、最大円周方向は内周上面で圧縮 1750N 及び外周下面で引張 1200N、Von Mises では内周上面 1620N である。

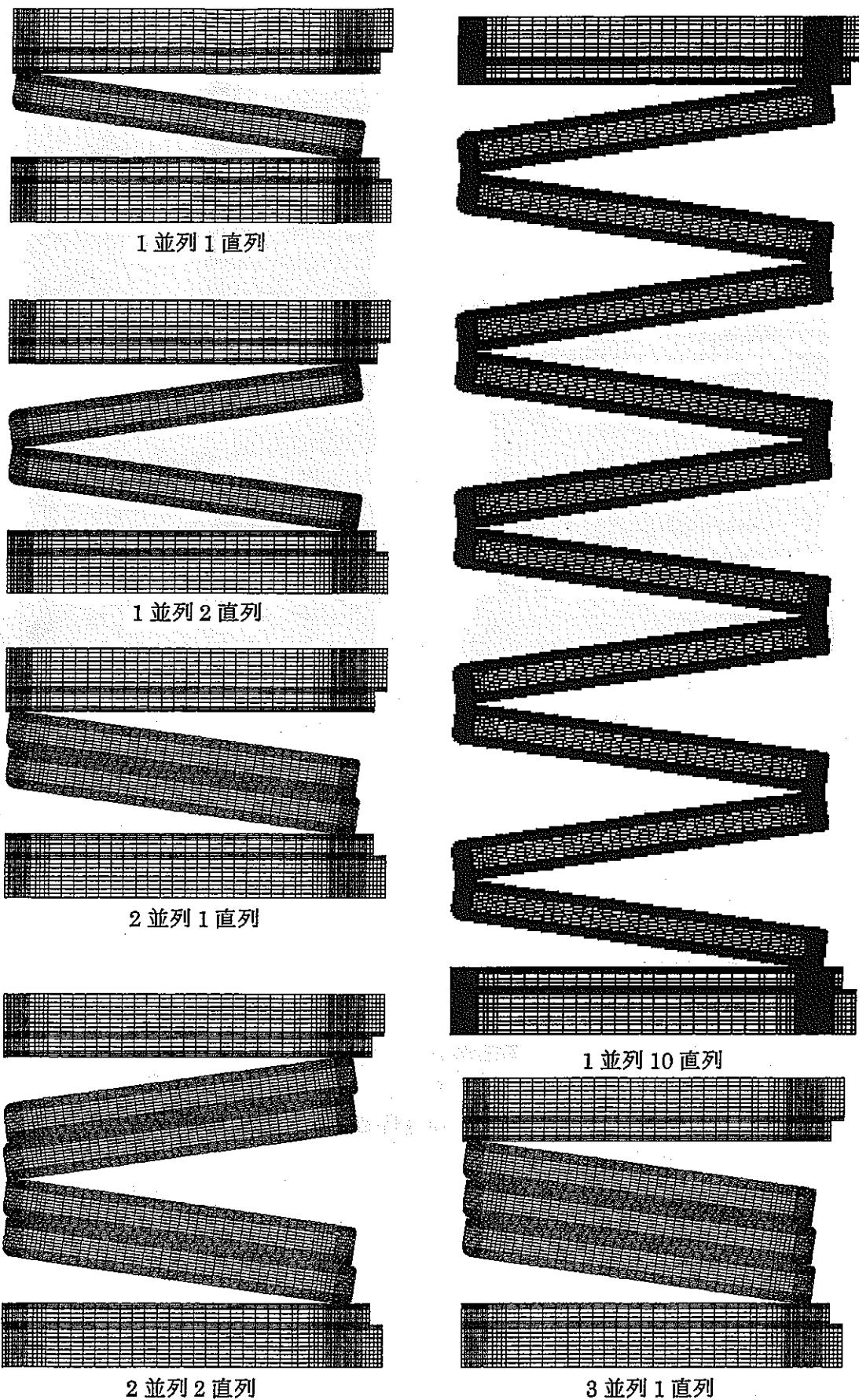


図 2.2-1(1/2) 皿ばねの FEM 解析モデル

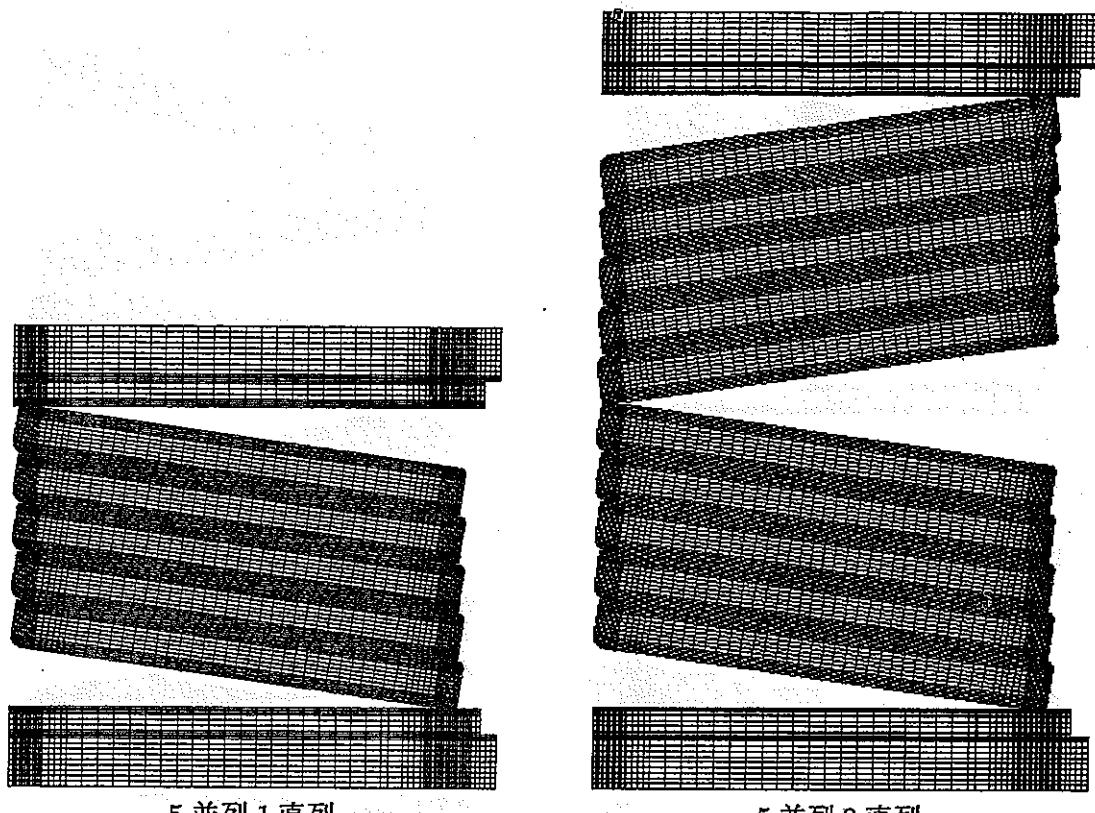


図 2.2-1(2/2) 盤ばねの FEM 解析モデル

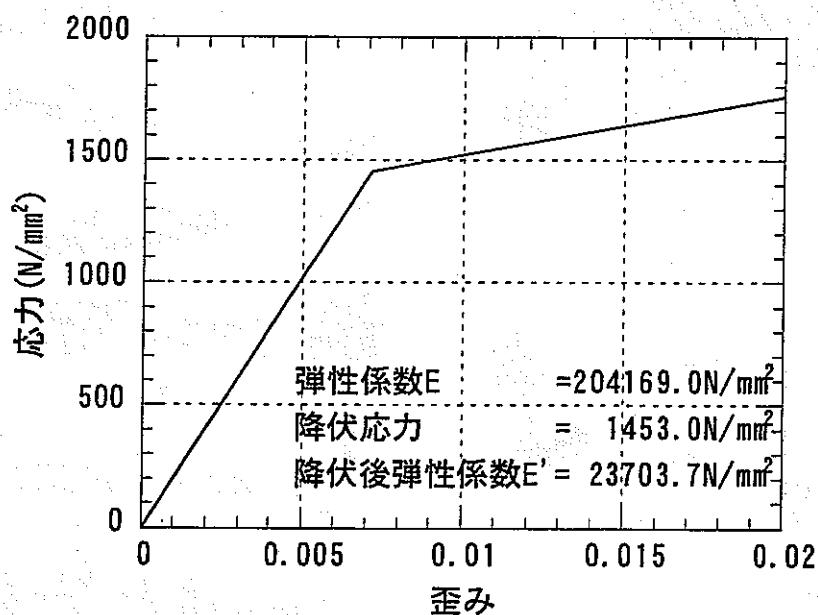


図 2.2-2 盤ばねの材料特性

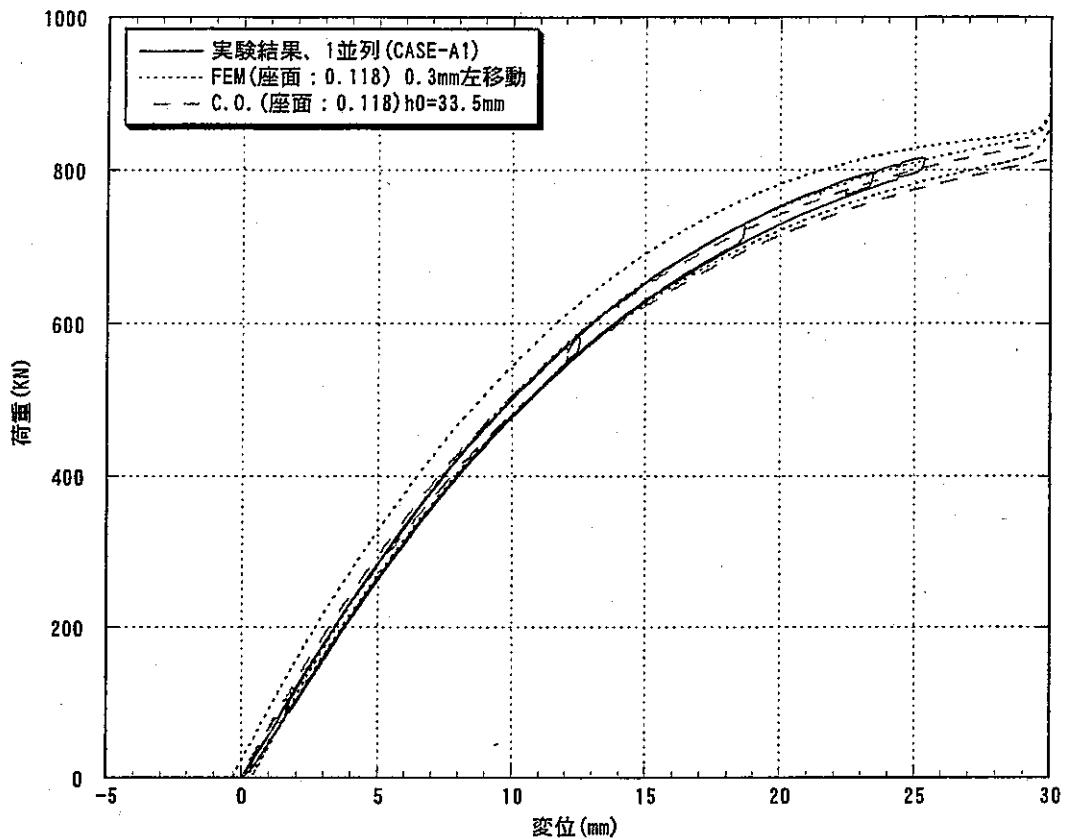


図 2.2-3 1並列1直列での試験結果と解析結果の比較

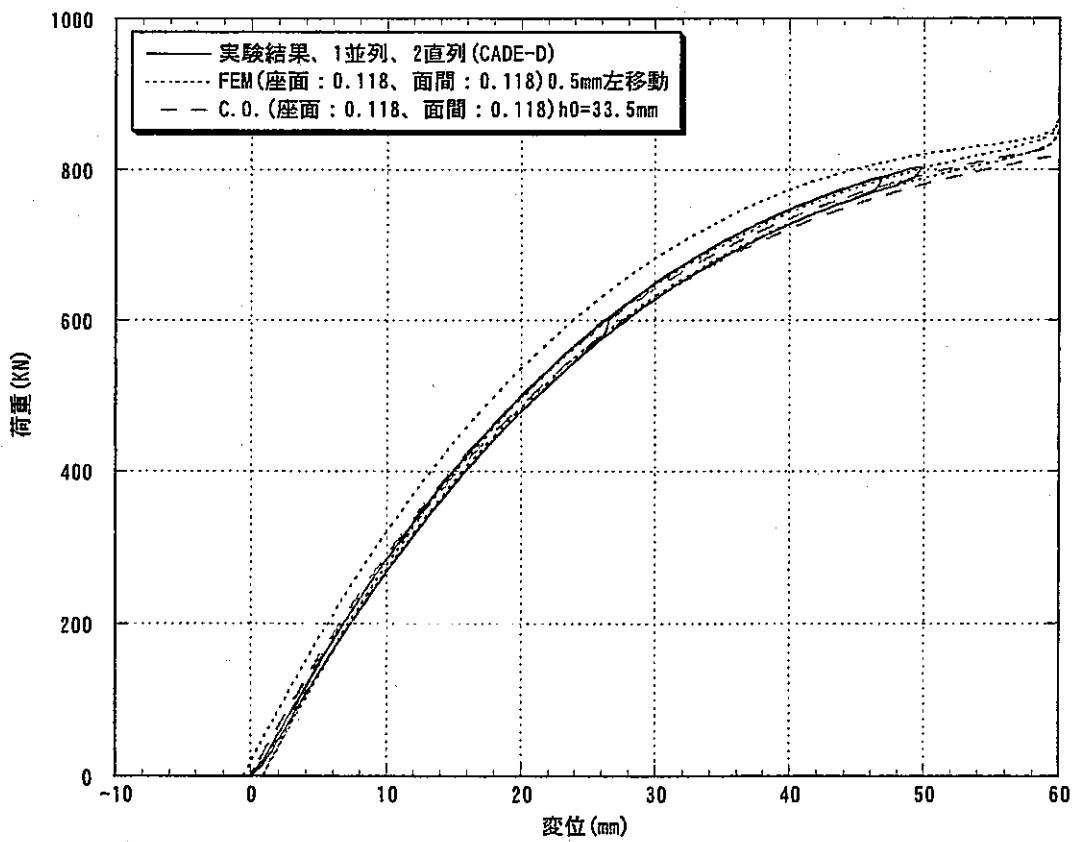


図 2.2-4 1並列2直列での試験結果と解析結果の比較

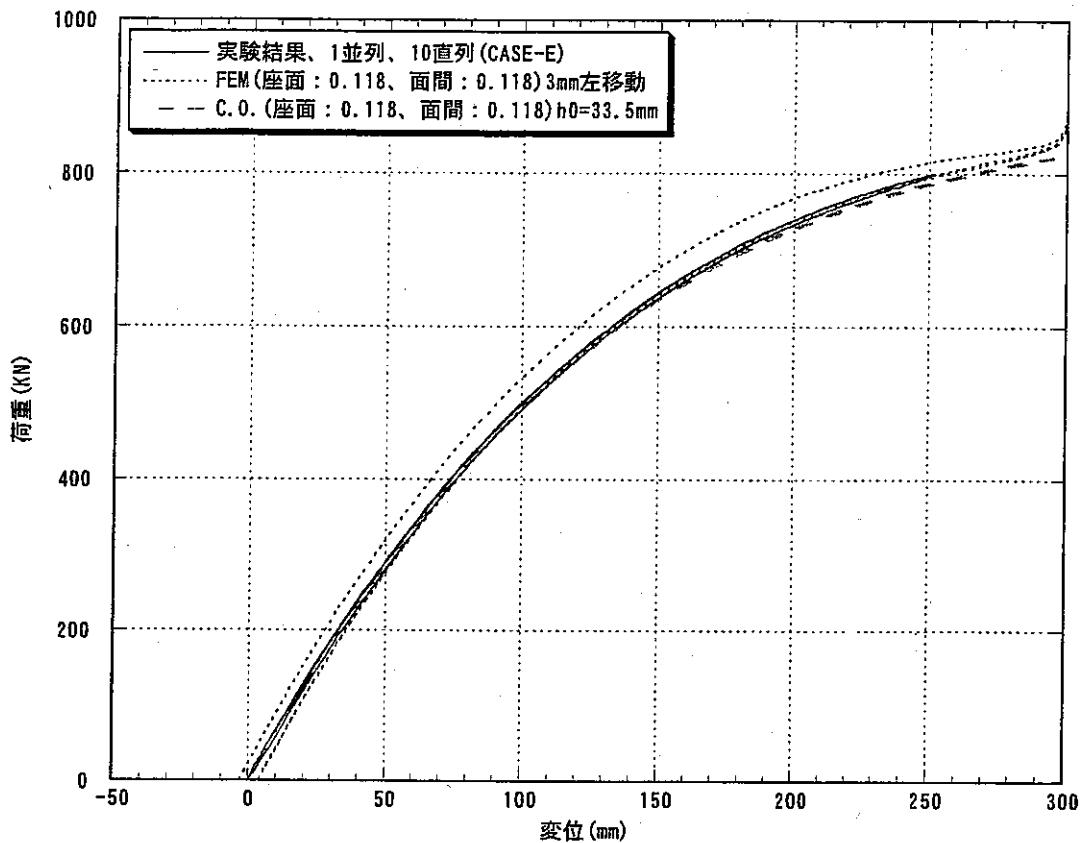


図 2.2-5 1 並列 10 直列での試験結果と解析結果の比較

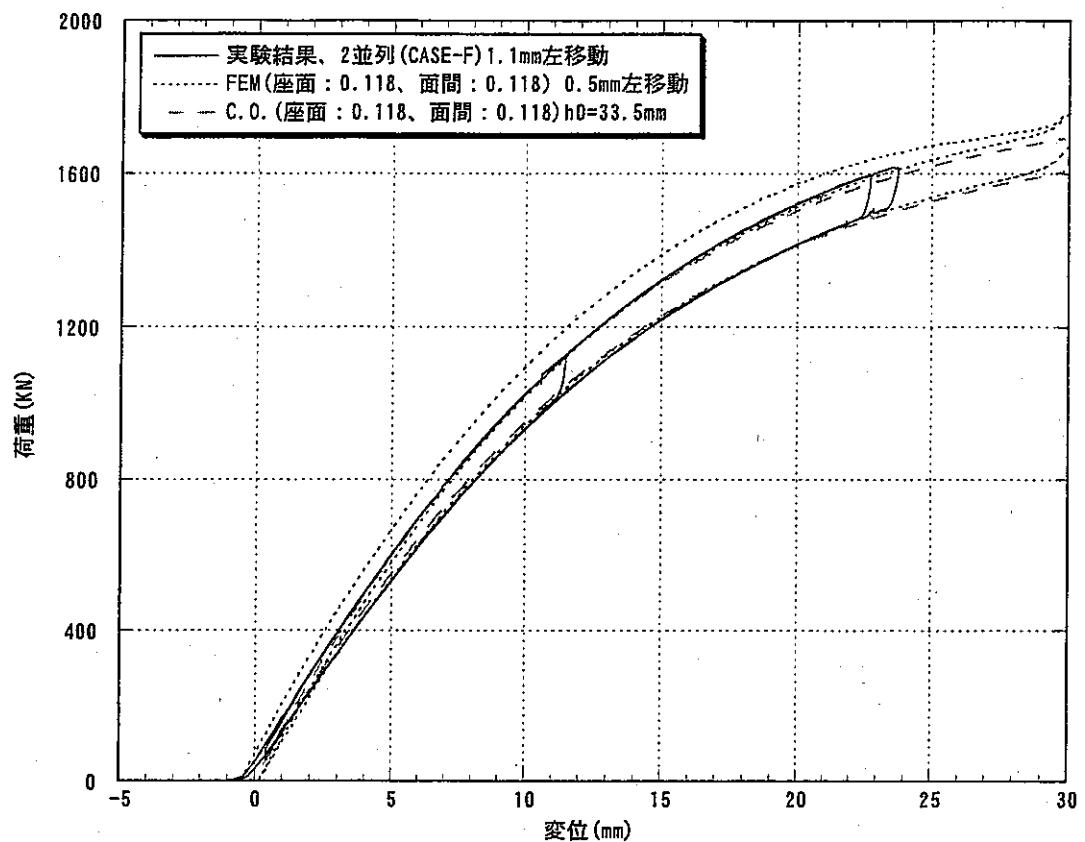


図 2.2-6 2 並列 1 直列での試験結果と解析結果の比較

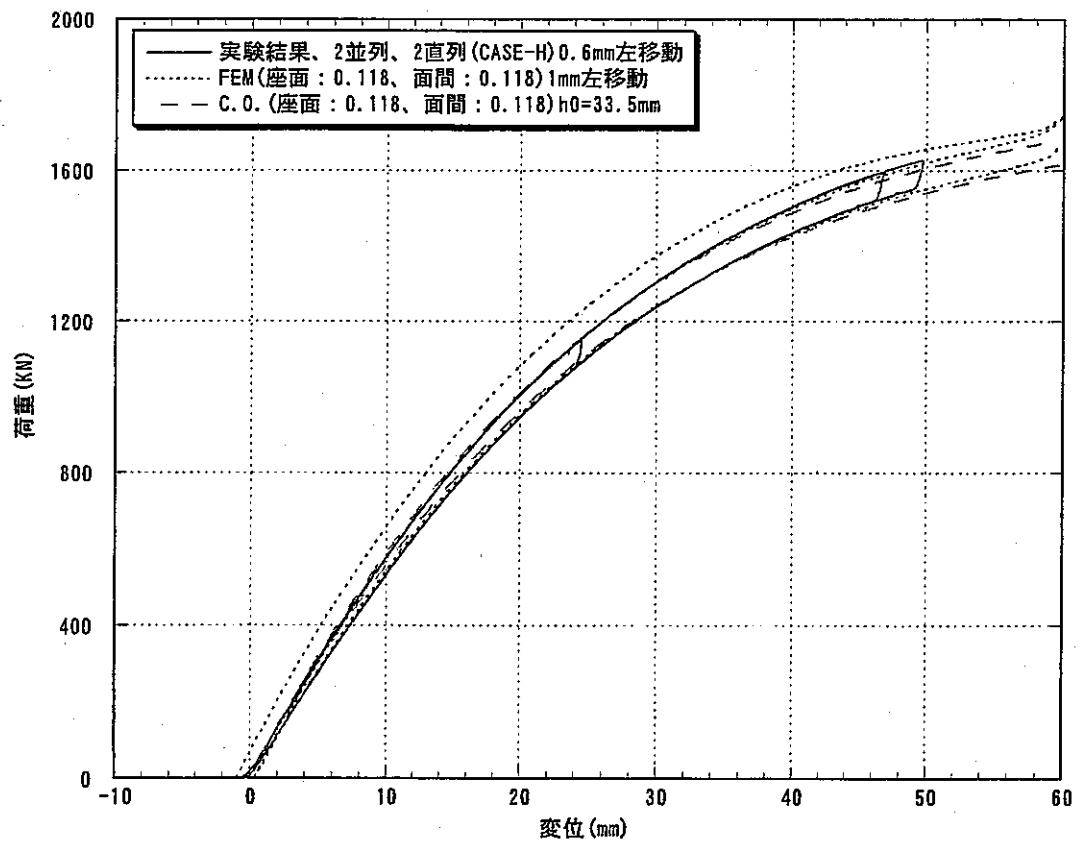


図 2.2-7 2 並列 2 直列での試験結果と解析結果の比較

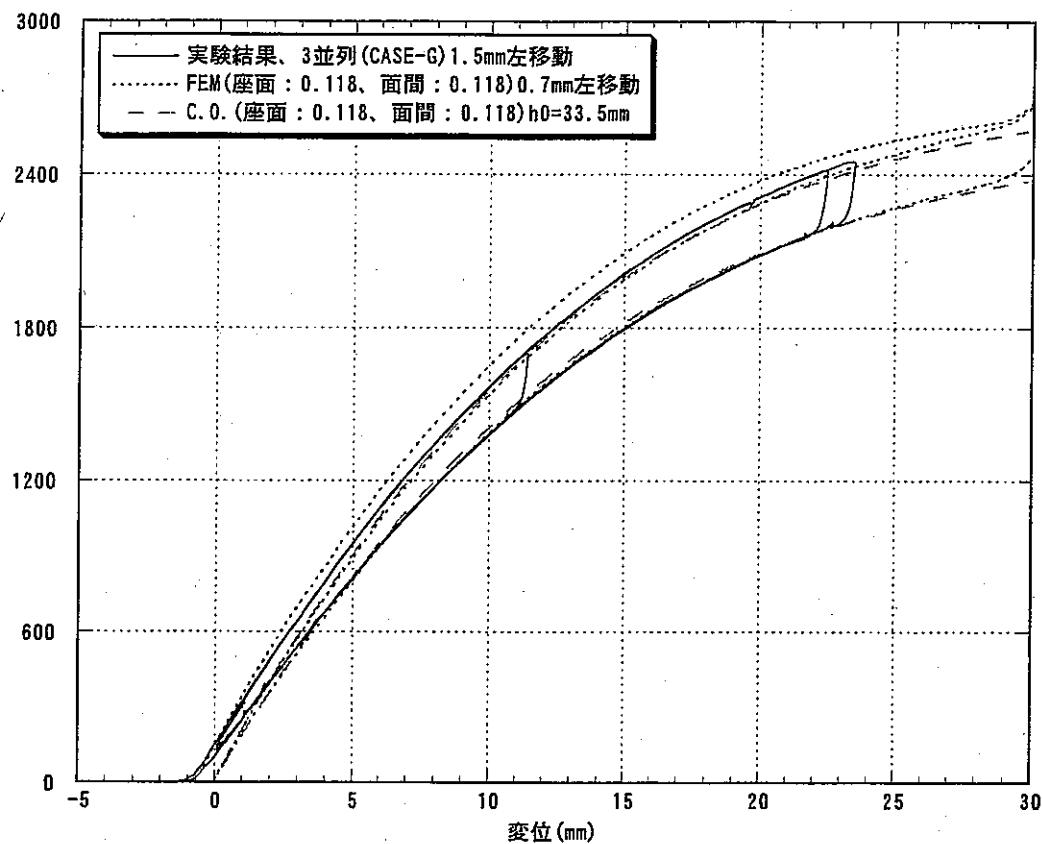


図 2.2-8 3 並列 1 直列での試験結果と解析結果の比較

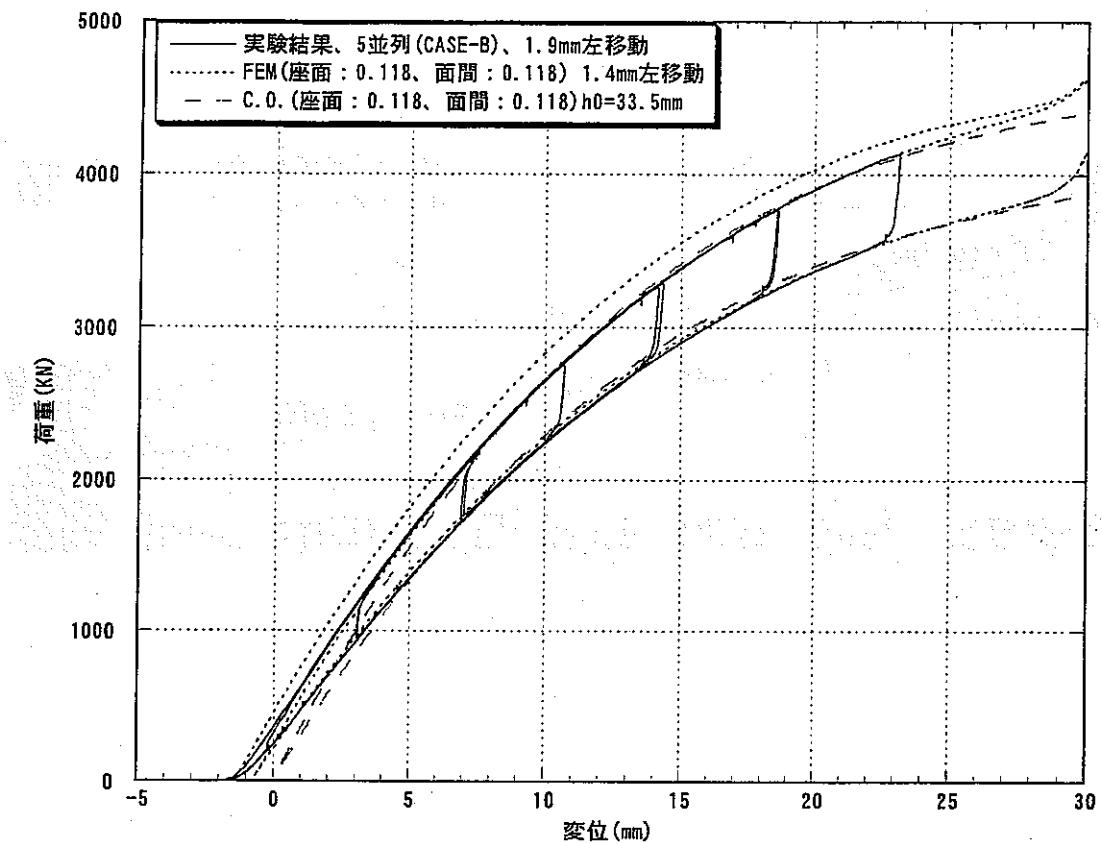


図 2.2-9 5 並列 1 直列での試験結果と解析結果の比較

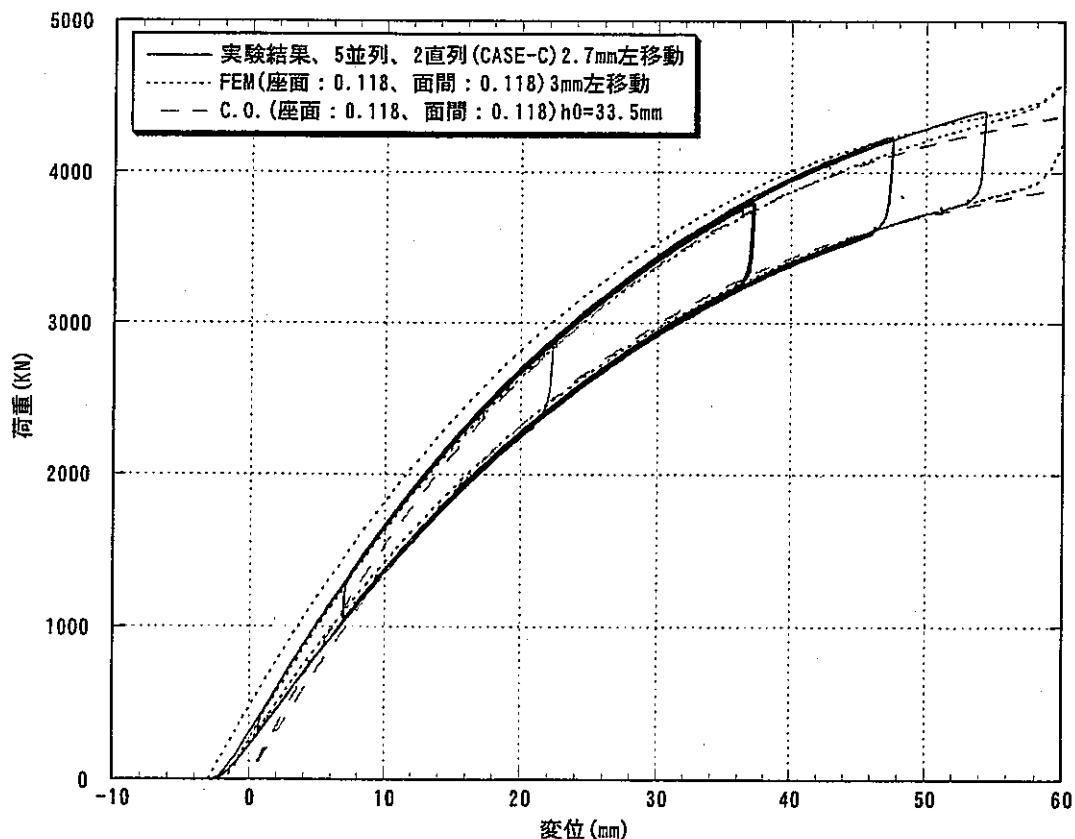


図 2.2-10 5 並列 2 直列での試験結果と解析結果の比較

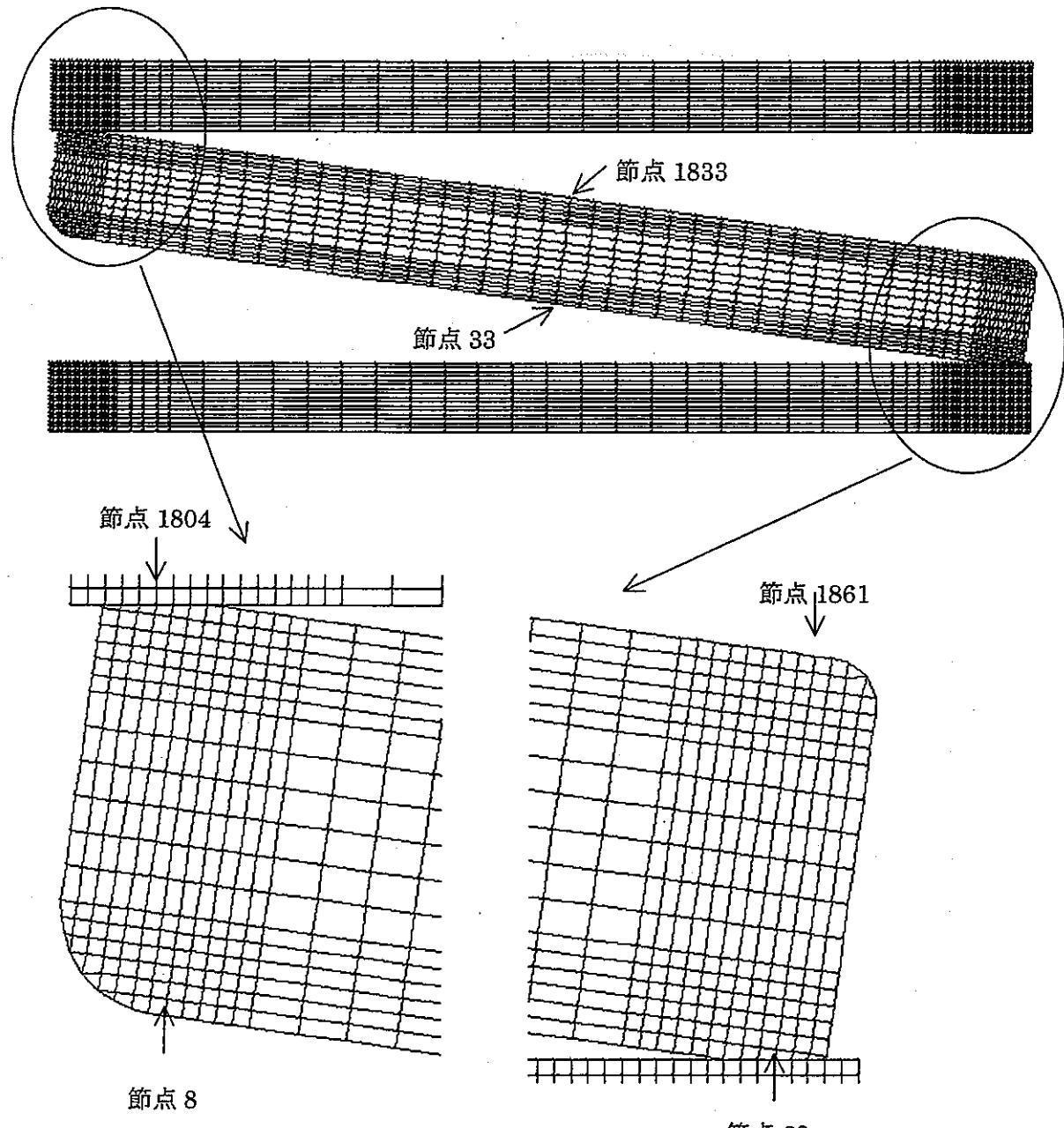


図 2.2-11 ハバネ FEM モデルでのひずみ評価位置

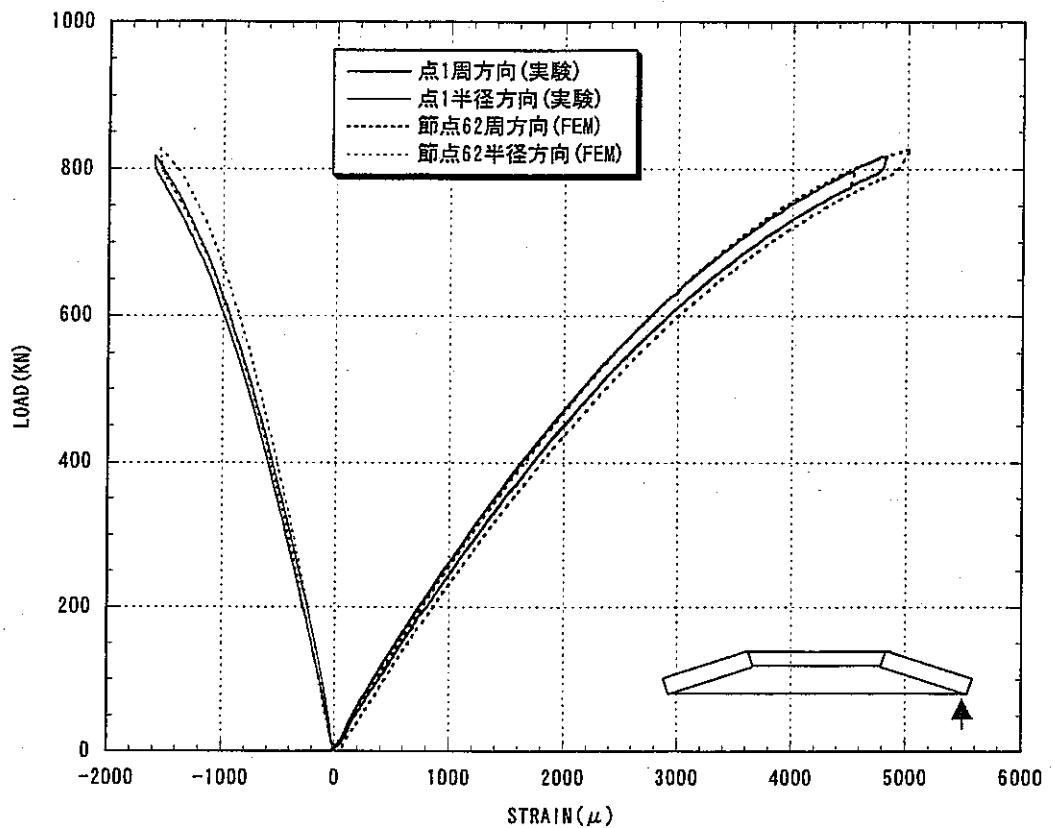


図 2.2-12 ひずみの比較 (ゲージ No.1)

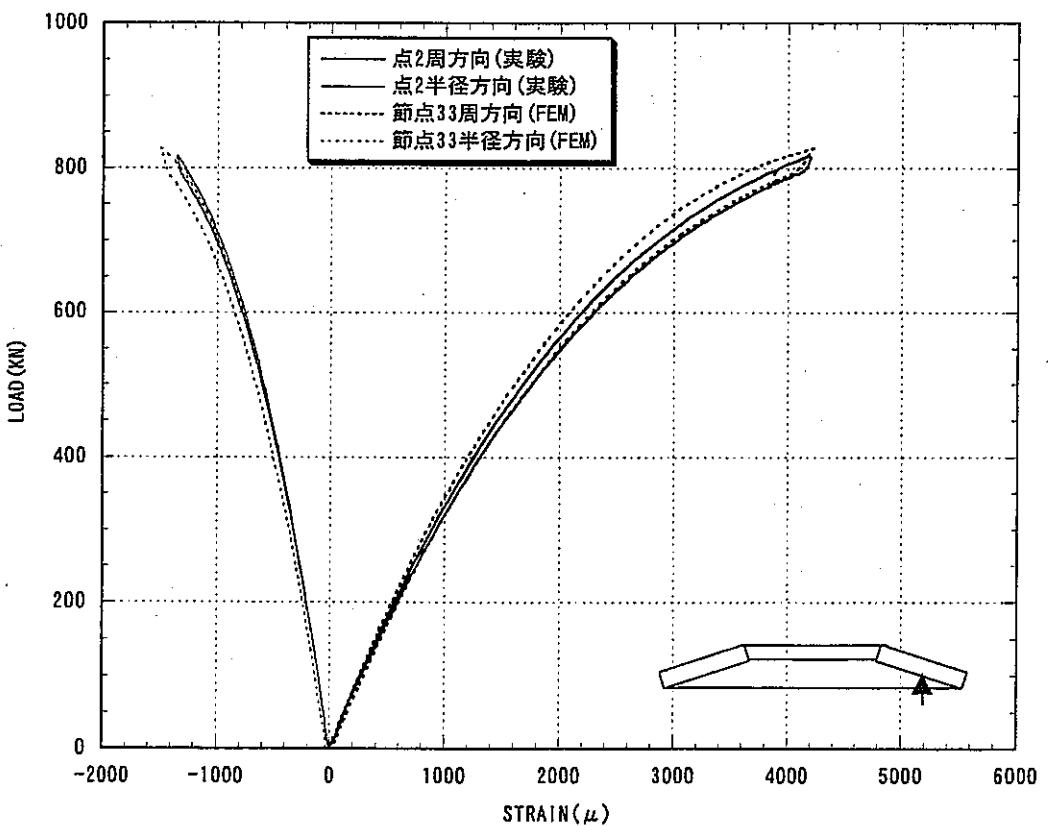


図 2.2-13 ひずみの比較 (ゲージ No.2)

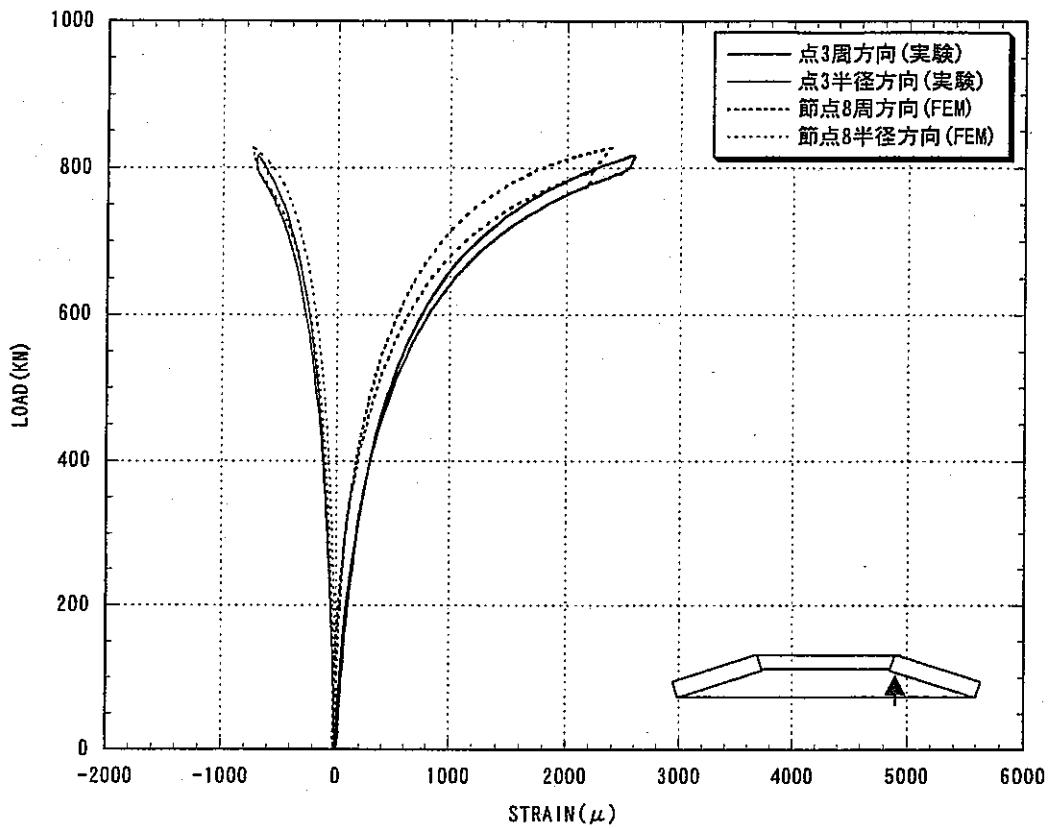


図 2.2-14 ひずみの比較 (ゲージ No.3)

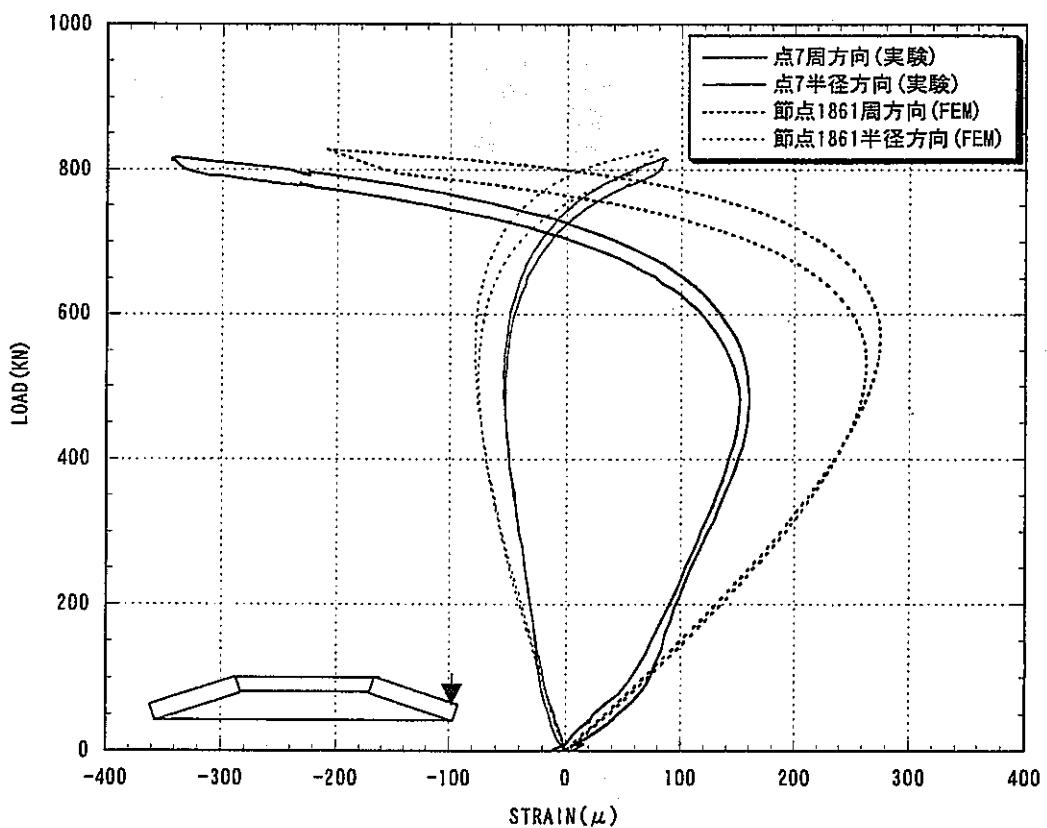


図 2.2-15 ひずみの比較 (ゲージ No.7)

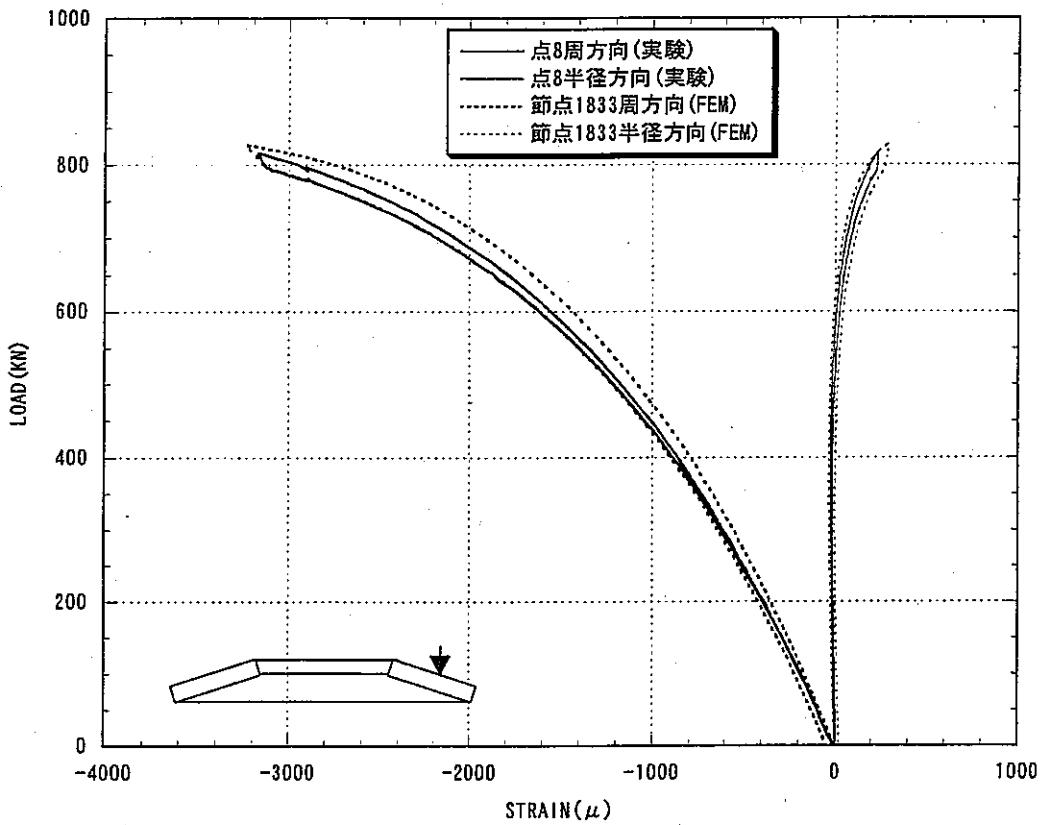


図 2.2-16 ひずみの比較（ゲージ No.8）

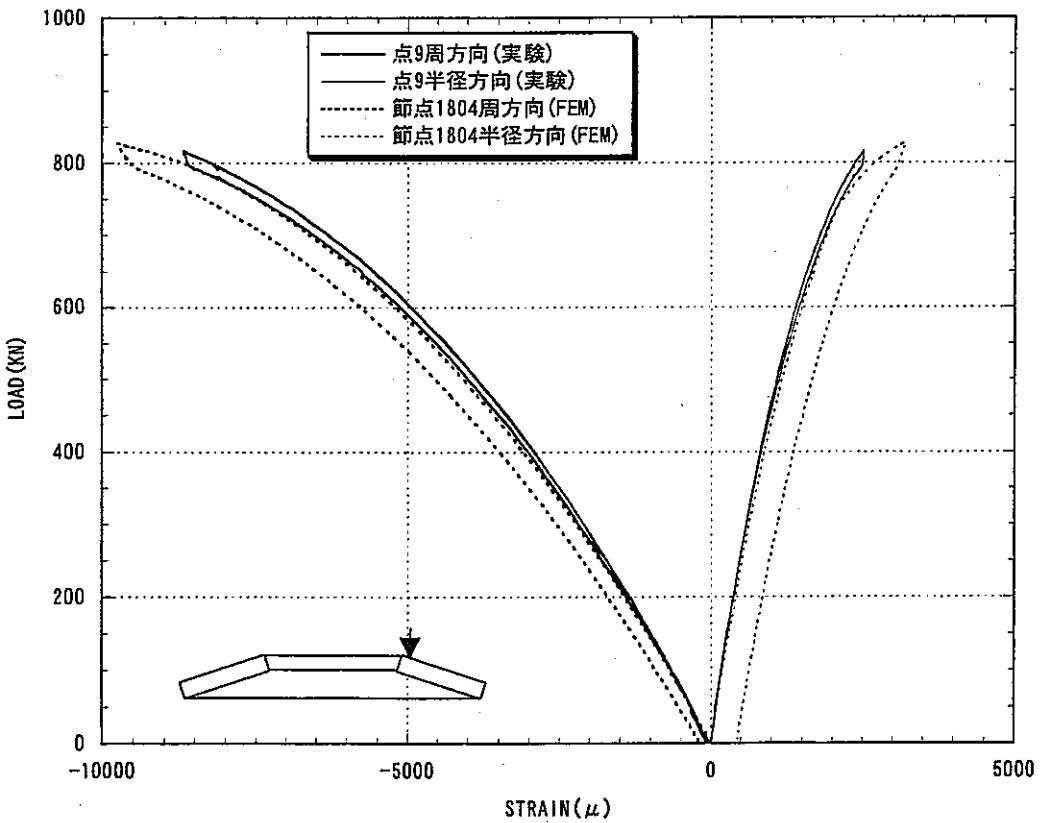


図 2.2-17 ひずみの比較（ゲージ No.9）

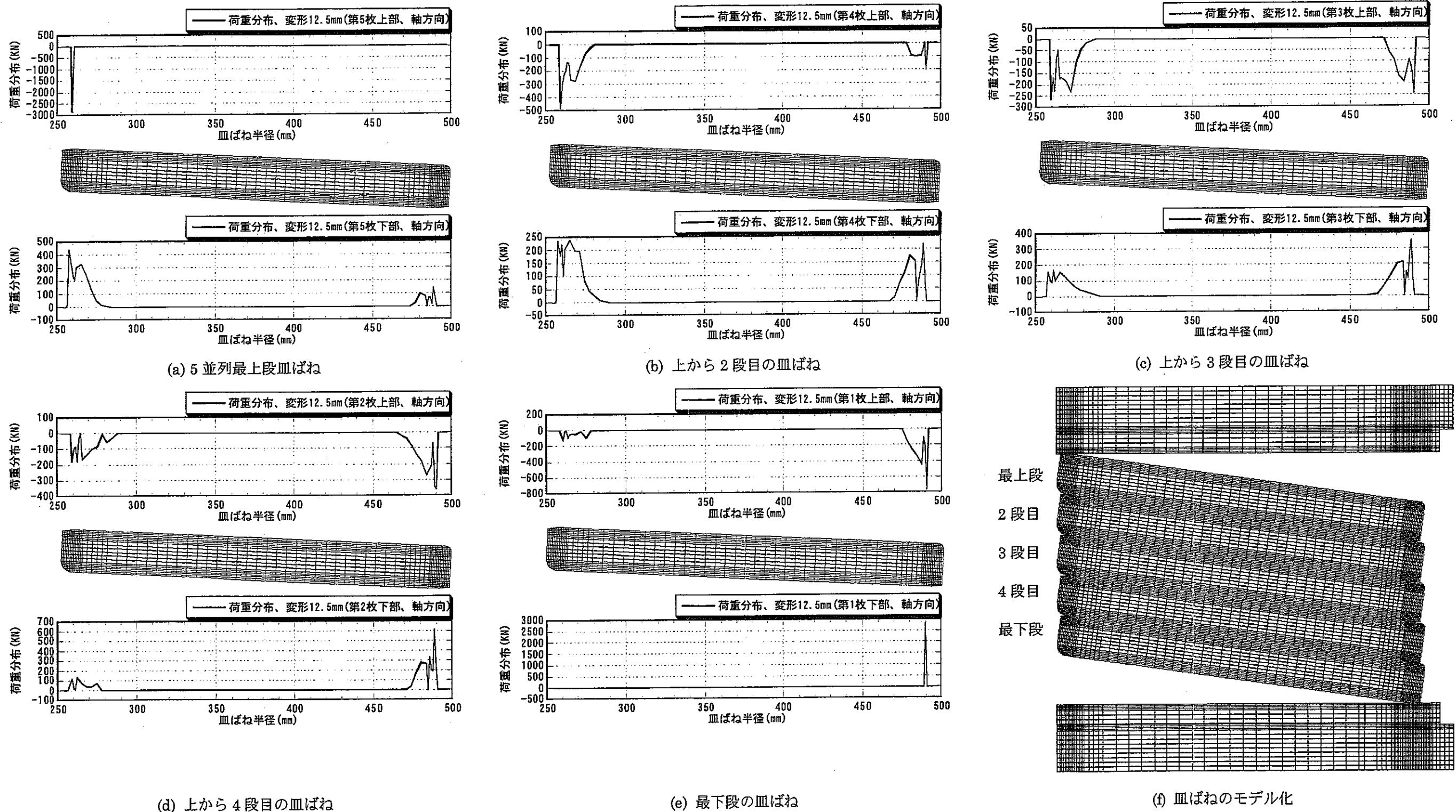
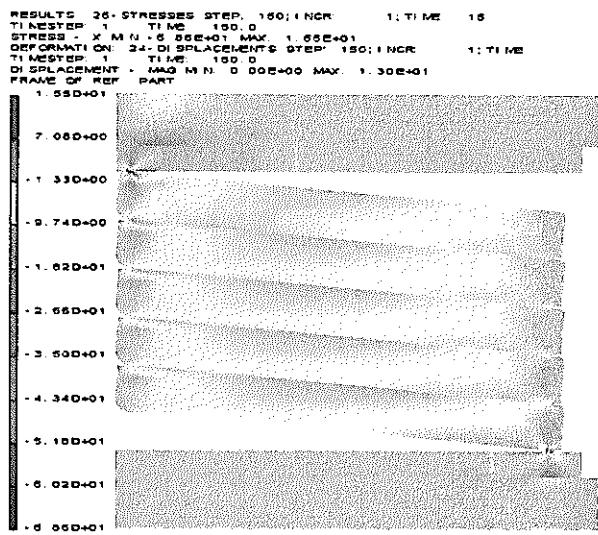
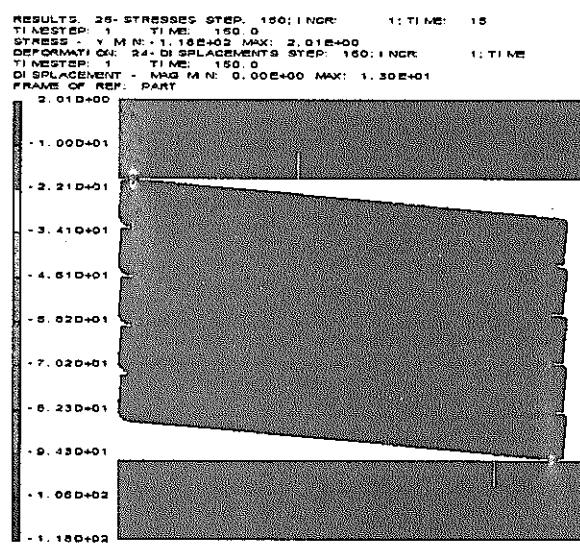


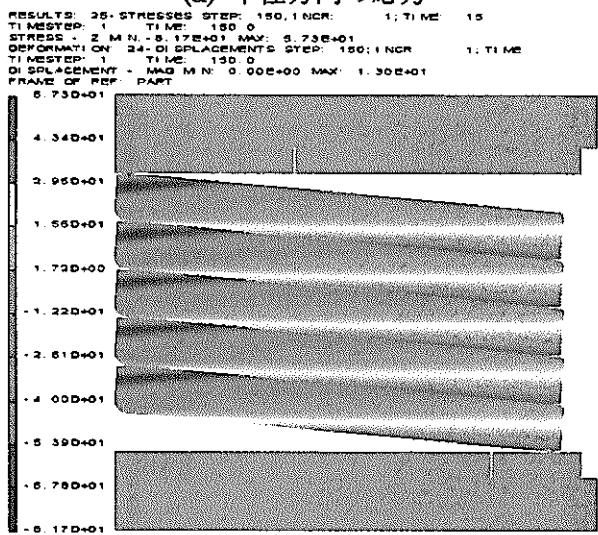
図 2.2-18 5並1直列（変形：12.5mm、荷重：2844KN）での荷重伝達



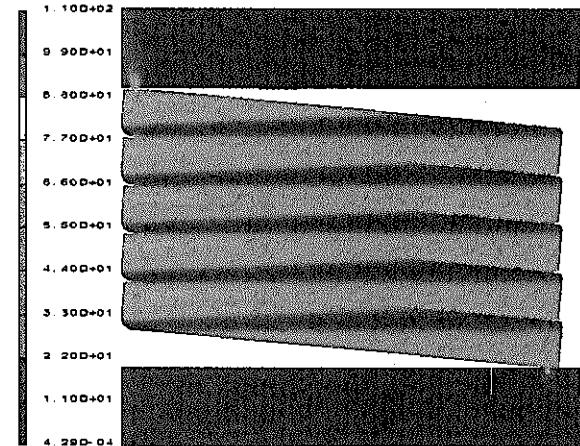
(a) 半径方向の応力



(b) Z 方向(軸方向)の応力

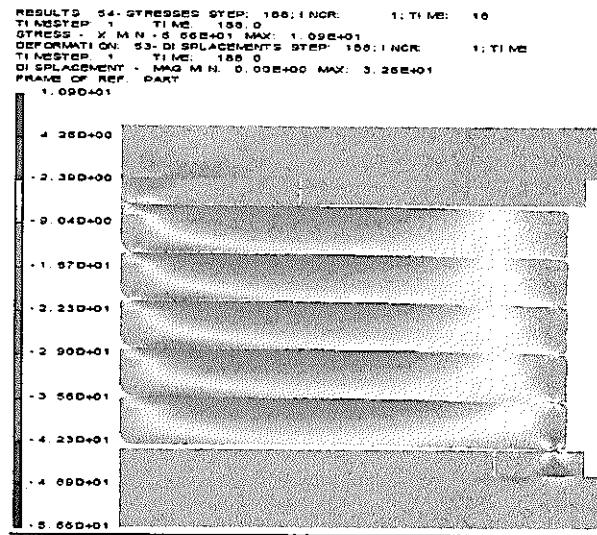


(c) 円周方向の応力

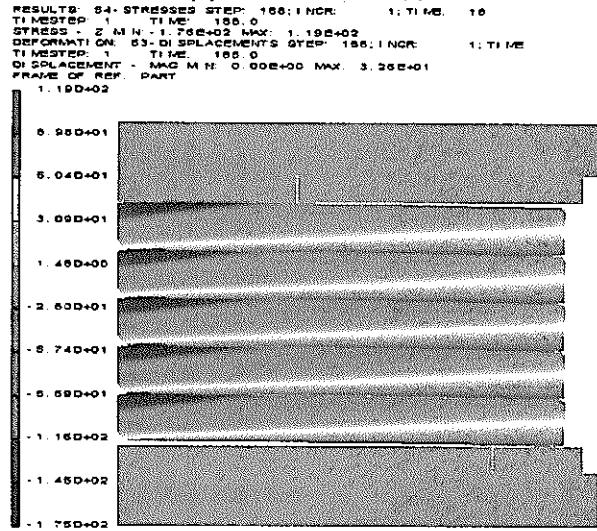


(d) Von Mises 応力

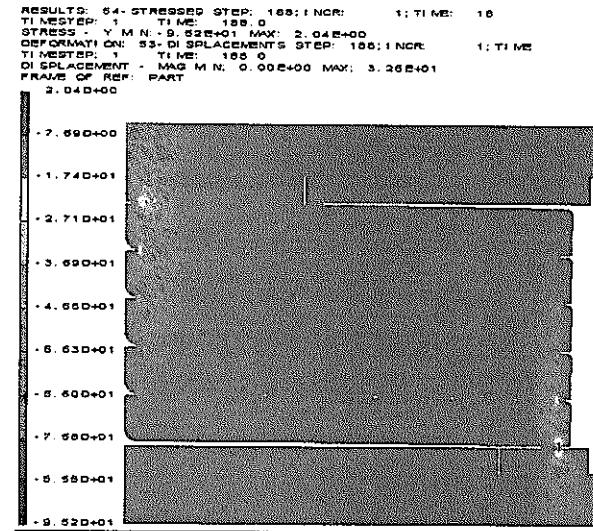
図 2.2-19 変形 12.5mm での 5 並列 1 直列の応力状態



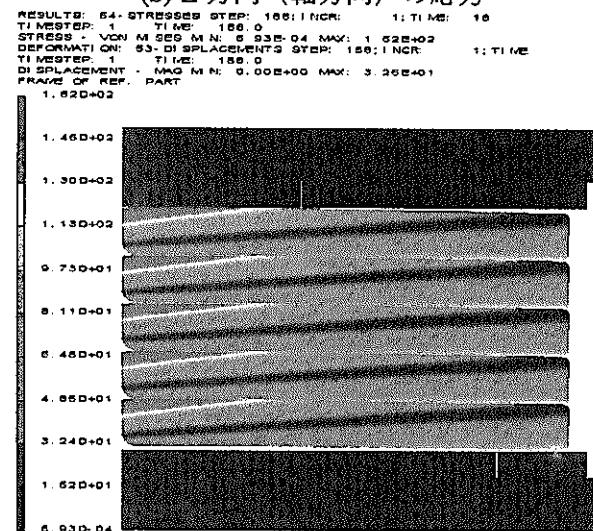
(a) 半径方向の応力



(c) 円周方向の応力



(b) Z 方向(軸方向)の応力



(d) Von Mises 応力

図 2.2-20 変形 31.5mm での 5 並列 1 直列の応力状態

2.3 クリープ試験結果に基づく皿ばね形状への影響評価

本検討では、平成 13 年度の実大皿ばねの試作において、試験体と同じ熱処理を受けた素材からクリープ試験片を製作し、2 回に亘ってクリープ試験を行った。

その結果に基づいて、FEM によるクリープ解析を行い、供用 60 年後のクリープ変形を考慮し、皿ばね形状へ反映した。

(1) クリープ試験結果

表 2.3-1 に、クリープ試験の試験ケースと試験パラメータを示す。試験パラメータは、温度 3 水準及び応力 3 水準である。

図 2.3-1 にクリープ試験結果を示す。第 1 回試験 (No.1～No.5) での試験時間は 2500 時間程度であるが、基本ケースとなる応力 1000MPa 及び温度 100℃ 条件の試験体 No.1 は 5000 時間まで引き続き継続した。

第 2 回 (No.6～No.9) 試験時間は 3000 時間程度である。しかし、試験データは凹凸が大きく、一定の傾向を示していない。クリープと時間の関係をどの時間に照準を合わせて評価するかによってクリープ評価に大きく影響をする恐れがあるので、結果の信頼性が乏しいと判断してデータとして採用しないこととした。従って、クリープ評価は、第 1 回試験データを基に検討することとする。

(2) クリープ評価式の検討

クリープ評価式は、係数 a、応力とひずみの累乗則 b、時間の累乗則 c、クリープと温度（絶対温度）の関係はアレニウス式の成立を仮定した係数 α より構成する。

$$\varepsilon = a \times \sigma^b \times t^c \times \exp(\alpha(1/T - 1/T_0))$$

ここで、係数 a 及び時間の累乗則 c はクリープと時間の関係にフィットするよう求め、応力とひずみの累乗則 b は同一温度条件での異なる応力にて、また、クリープと温度の関係は同一応力条件での異なる温度にて求めた。以下に、応力 1000MPa、温度 100℃ を基本としたクリープ式を示す。

$$\varepsilon = 4.3 \times 10^{-12} \times \sigma^{3.976} \times t^{0.04} \times \exp(-586.32(1/T - 1/T_0))$$

図 2.3-2 に、クリープ試験結果とクリープ式と比較を示す。応力が小さい試験ケース (400～700 MPa) を除き、若干保守評価ではあるが概ね試験結果を模擬している。なお、長期に亘る時間データが得られたことにより、時間累乗則は昨年度予備試験結果の 0.1 より小さい結果になっている。

ここで得られたクリープ式を時間にて微分し、クリープ速度を求め、FEM による皿

ばね構造体としてのクリープ変形量を算出する。

(3) 60 年後のクリープ予測解析

前節で得られたクリープ評価式を用いて、平成 14 年度 METI 研究での実大皿ばねを対象に、FEM による 60 年後（60 万時間）のクリープ予測解析を行った。

図 2.3-3~4 に、1 並列 1 直列及び 5 並列 1 直列の場合に対するクリープ変形解析結果を示す。解析条件は、前章と同様に製造時のセッティングを経験させた後、±150mm 相当の 1 回の繰返し載荷を与え、60 年間一定の支持荷重を載荷して保持し、60 年後に再度±150mm 相当の繰返しを行った。なお、この間の摩擦係数は一定とした。

60 年間のクリープ変形は、1 直列当たり 0.1mm にも満たない。1 並列の結果の方が 5 並列の結果よりも若干大きいが、5 並列では面間での摩擦があるため、クリープ変形をわずかながら抑える効果があるものと考えられる。

1 直列のクリープ変形を 14 直列倍して求めた結果、装置全体で 0.7mm 程度であり、1mm にもならないことが分かる。

(4) 皿ばね形状への影響評価

上記クリープ解析における 1 並列 1 直列及び 5 並列 1 直列における 60 年（60 万時間）前後での±150mm 相当の繰返しによる荷重特性の比較を、図 2.3-5~6 に示す。

60 年経過によるクリープ変形が、皿ばねの荷重特性に与える影響は非常に小さいと言える。

また、前節の結果より、供用 60 年での装置全体でのクリープ変形は高々 1mm であるので、クリープによる変形ストロークへの影響は小さいと判断して、皿ばね形状を見直す必要はない。

表 2.3-1 クリープ試験の試験パラメータ

応力	温度		
	60°C	100°C	150°C
1000MPa	No.5	No.1、No.6	No.4、No.7
700MPa		No.2、No.9	No.8
400MPa		No.3	

注) 第 1 回試験では 5 体 (No.1~No.5) を実施し、第 2 回試験では 4 体 (No.6~No.9) を実施した。なお、No.1 は、第 1 回～第 2 回を通して継続した。

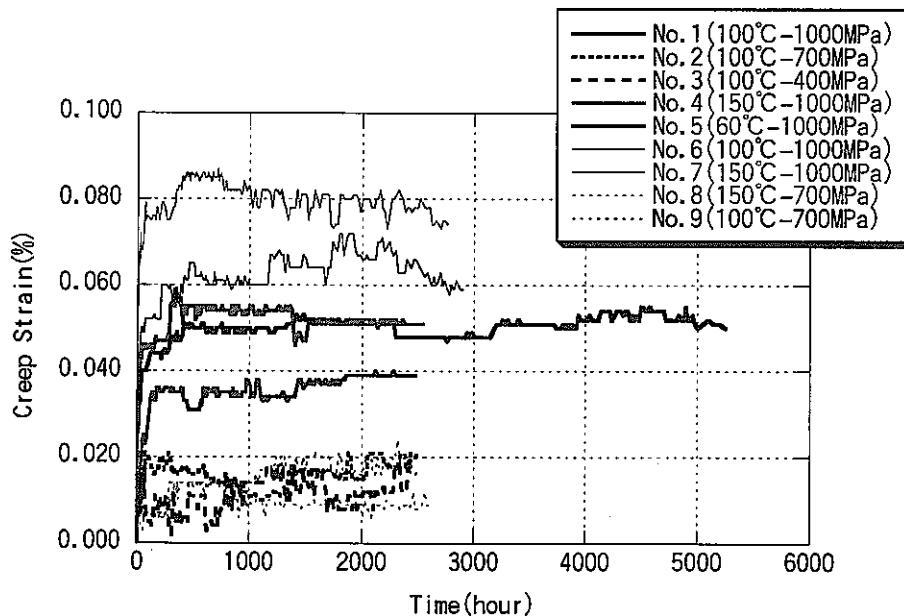


図 2.3-1 クリープ試験結果

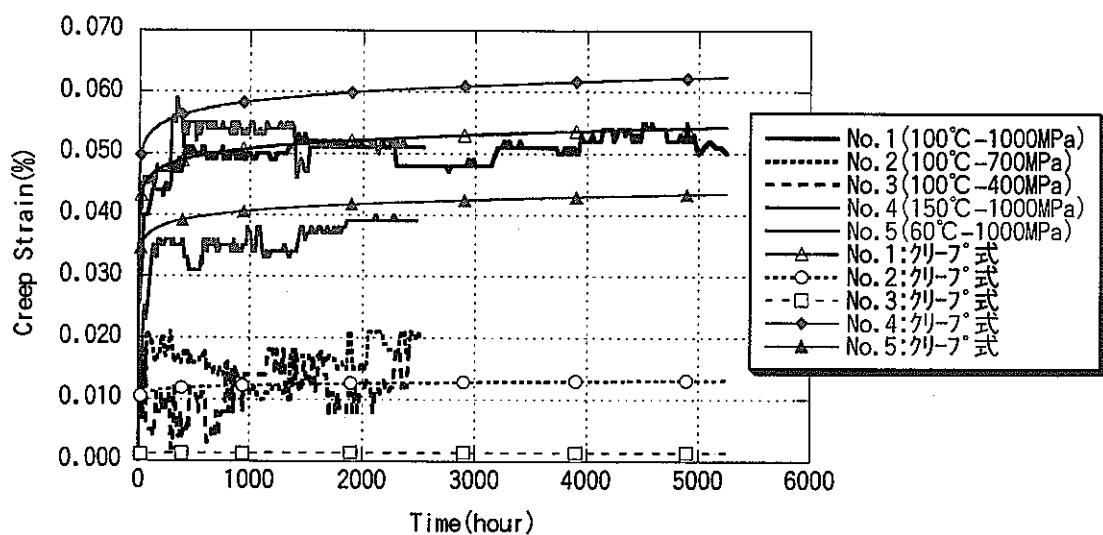


図 2.3-2 クリープ評価式との比較

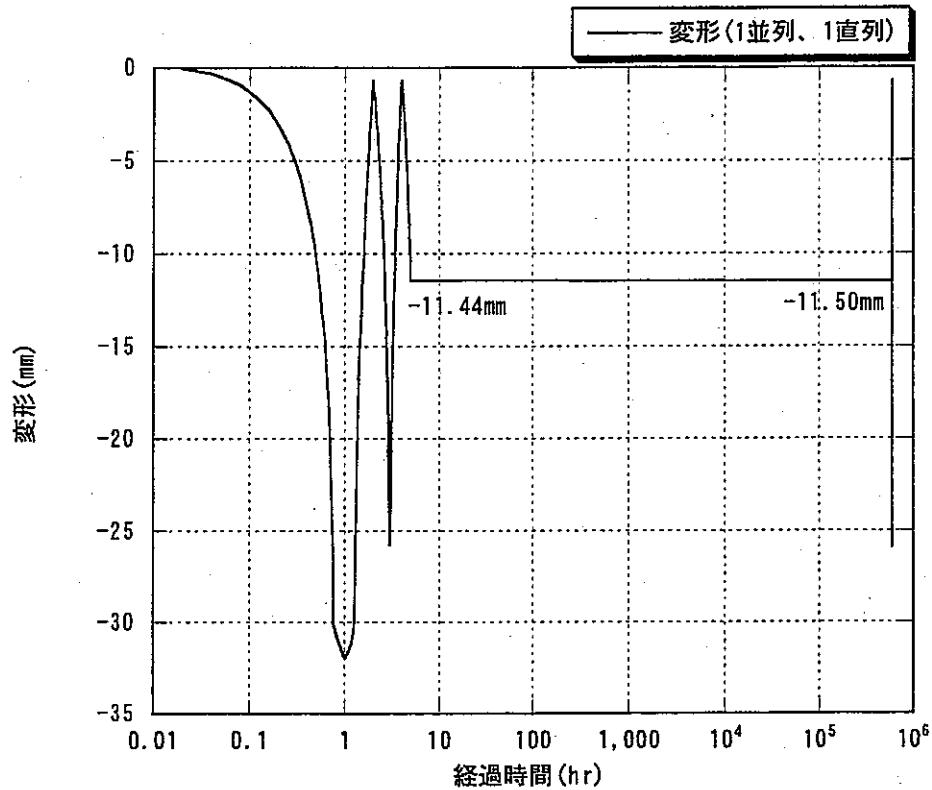


図 2.3-3 1 並列 1 直列でのクリープ変形解析

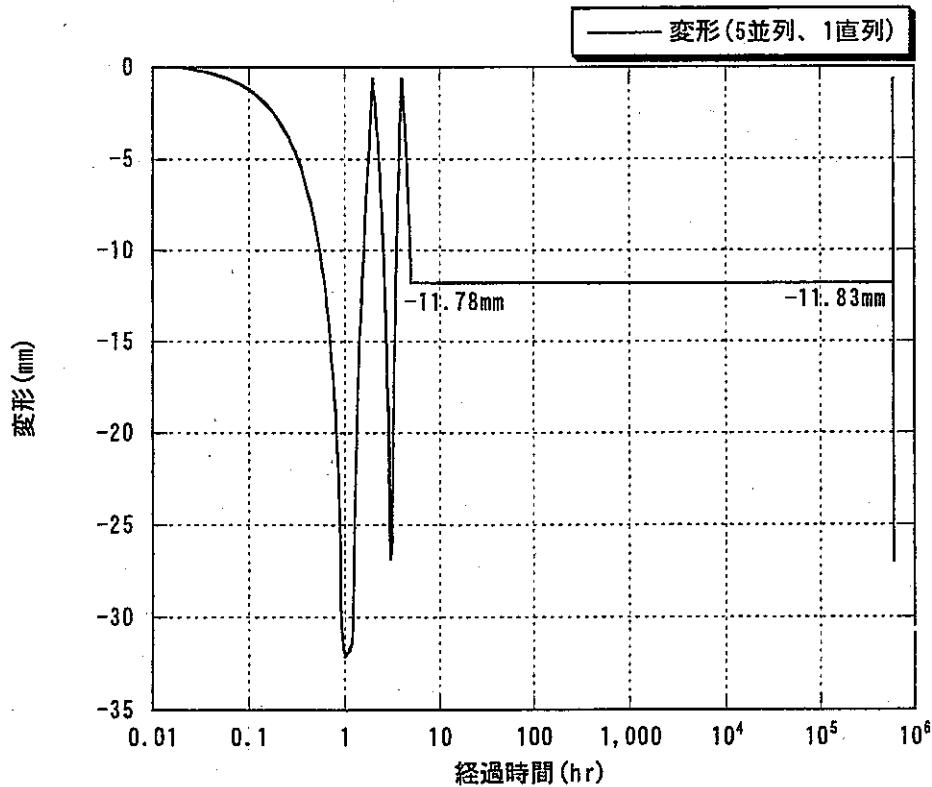


図 2.3-4 5 並列 1 直列でのクリープ変形解析

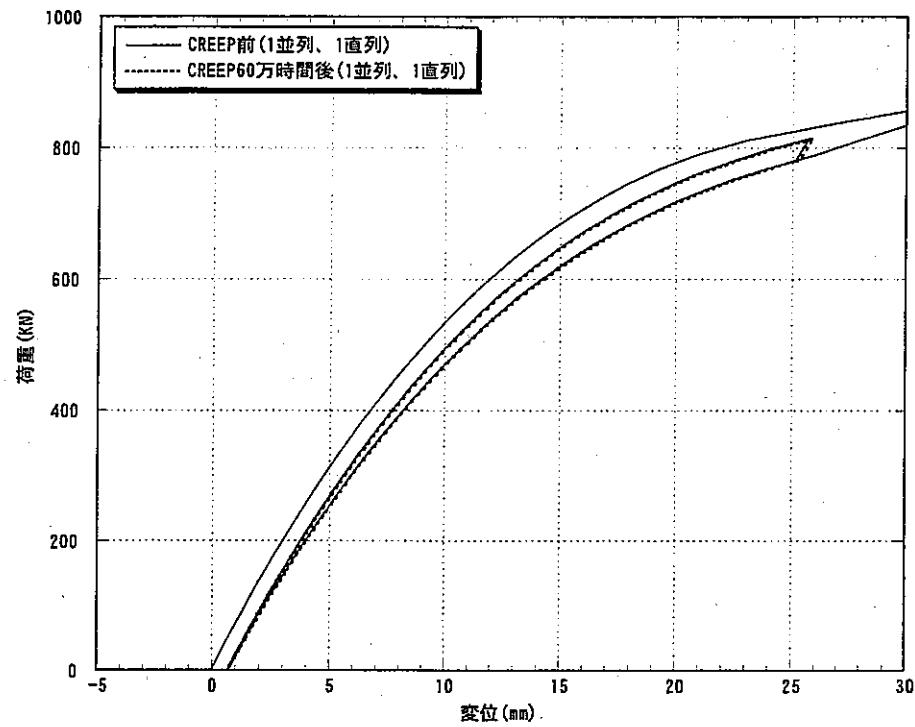


図 2.3-5 1 並列 1 直列：60 万時間経過後の荷重特性の比較

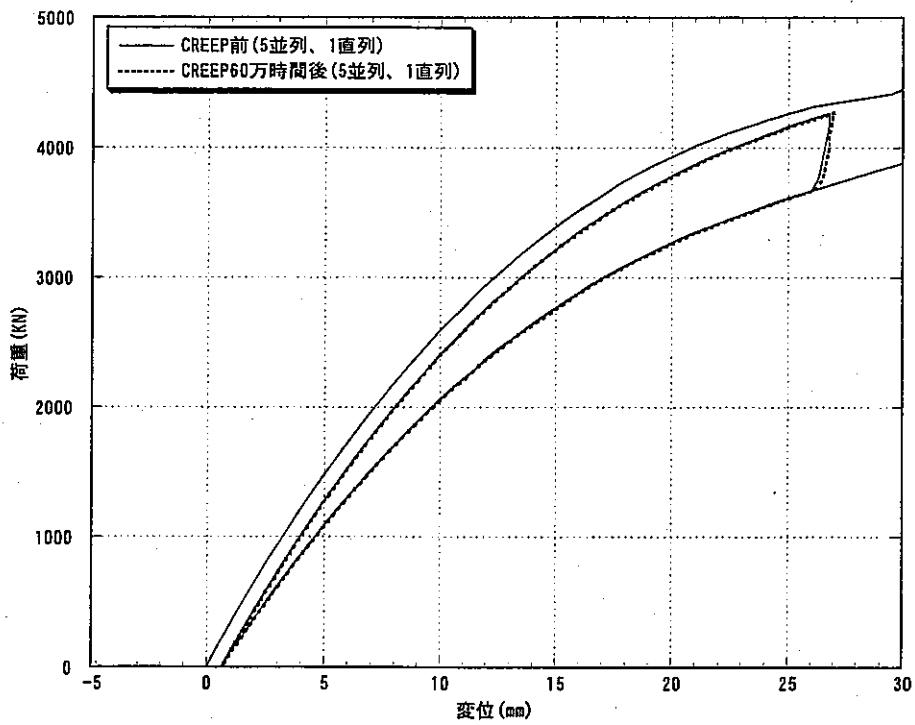


図 2.3-6 5 並列 1 直列：60 万時間経過後の荷重特性の比較

2.4 実機皿ばねユニット荷重特性評価と上下免震システムへの適用性検討

(1) 実機皿ばねユニットの荷重特性

平成 14 年度 METI にて実施した 5 並列 1 直列及び 1 並列 1 直列の試験結果より推定した実機の 5 並列 14 直列の荷重特性を、図 2.4-1 に示す。

実機相当の荷重特性は、以下の手順にて推定した。

①1 並列 1 直列及び 5 並列 1 直列の試験結果の変位を 14 倍し、14 直列時の荷重特性を評価する。

②変位を 14 倍した 1 並列 1 直列の荷重特性に対して荷重を 5 倍し、5 並列相当の座面における荷重特性を評価する。この場合、5 並列毎に座金が配置している状況を想定していることになる。

③実機での皿ばねは 14 直列であり、座面の影響を受ける部分は最上段（1 直列目の 1 座面）及び最下段（14 直列目の 1 座面）である。従って、座面で働くと考えられる 13 直列分の仮想的な荷重特性を求めるため、②で計算した荷重特性を 13/14 倍する。

④③で得られた荷重特性より同一変位における荷重差を算出し、①で求めた 5 並列 14 直列分の載荷時荷重特性から荷重差の半分を減じ、また、除荷時の荷重特性に残りの半分を加えることにより、実機の 5 並列 14 直列における荷重特性を評価した。

図 2.4-2 に、試験に基づく推定した実機荷重特性と、FEM 解析及び設計式による荷重特性の比較を示す。

このように得られた試験データに基づく荷重特性は、概ね FEM 解析結果及び設計式による評価結果に対応しており、実機の 5 並列 14 直列を推定する上で FEM 及び設計式は十分適用性があると判断されるとともに、実機での荷重特性が把握できた。

(2) 上下免震システムの適用性検討

上記にて推定した実機の上下免震特性による応答評価を行った。

図 2.4-3 に示す解析モデルを用いて、機器が成立する範囲を減衰装置の減衰力（容量）をパラメータに評価したものである。ここで、減衰装置の減衰力は、平成 14 年度の METI 研究にて試験実施した減衰装置（要素形状等の条件は、JNC 殿にて設定した）の結果を用いた。なお、機器設備等を含むデッキ重量は、98MN（36 基で支持）とし

た。

図 2.4-4～5 に、上下加速度応答及び上下変位について減衰力との関係をそれぞれ示す。今年度の結果は、皿ばねの荷重特性が少し変わったため、平成 13 年度の結果と比較して少し異なるが、R-O 系減衰装置は 36 基分の合計定格荷重が約 1000tonf(9.8MN) から約 3000tonf (29.4MN) の間で機器の成立することが判り、機器の成立範囲が広いと言う意味では概ね同じ結果を得ている。また、現在の計画においては、厚さ 66mm の減衰装置 36 基分の合計定格荷重が 1602 tonf であるが、この値を多少変動しても上下免震特性に大きな影響を及ぼさないことが判った。後で示す減衰装置特性の変動に対応でき、又、厚さを 78mm～58mm に変えることにより減衰特性の調整が可能であることも判った。

これより、簡易な質点系レベルの応答評価では、機器上下免震システムとして適用可能であると考える。

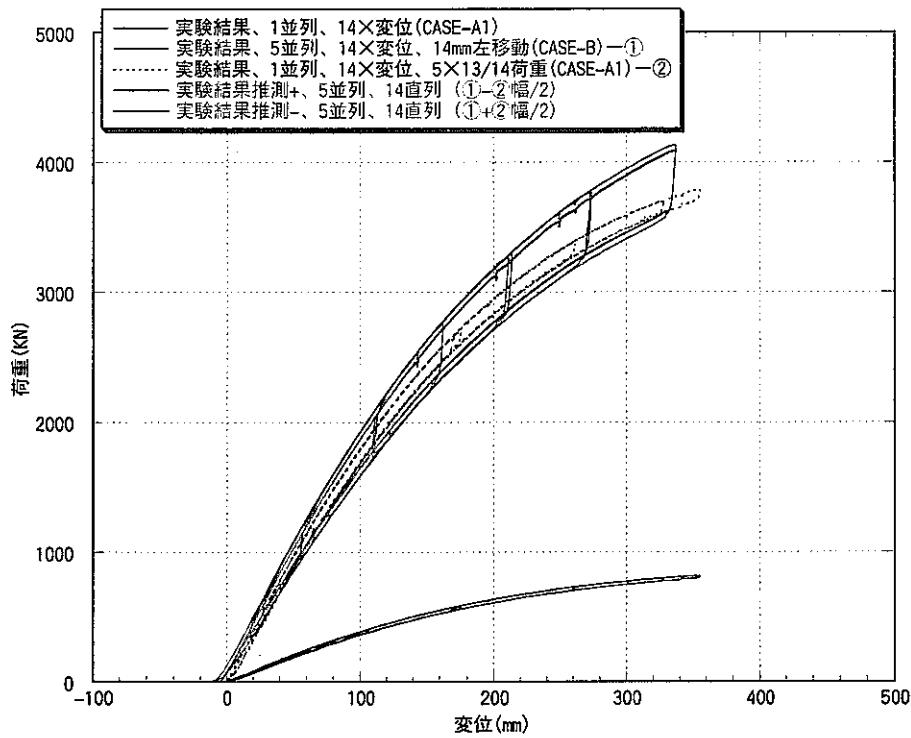


図 2.4-1 試験結果から推定した実機の荷重特性

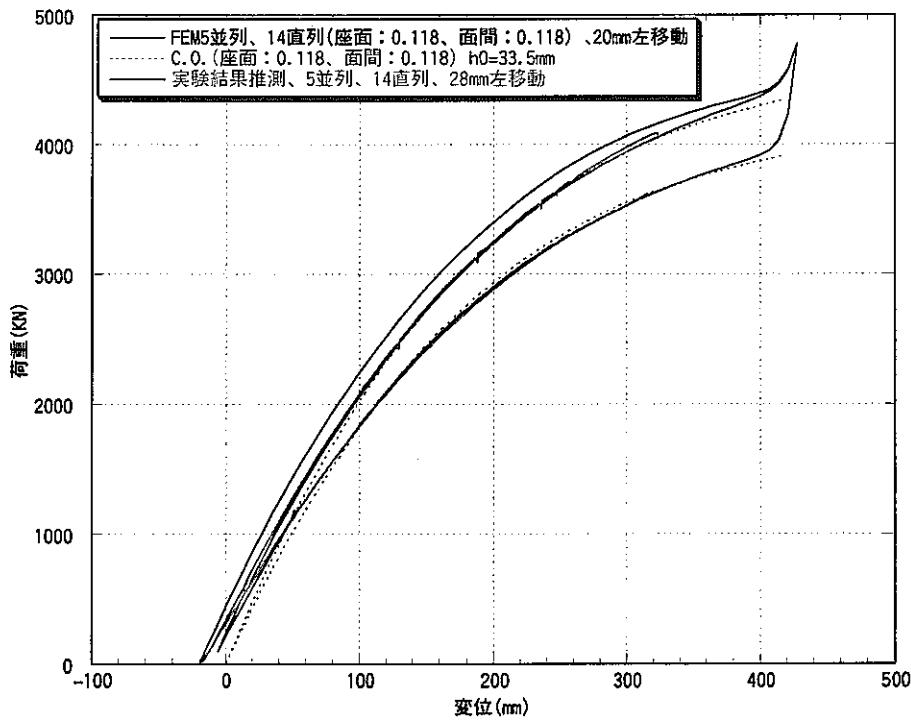


図 2.4-2 実機推定荷重特性と解析結果との比較

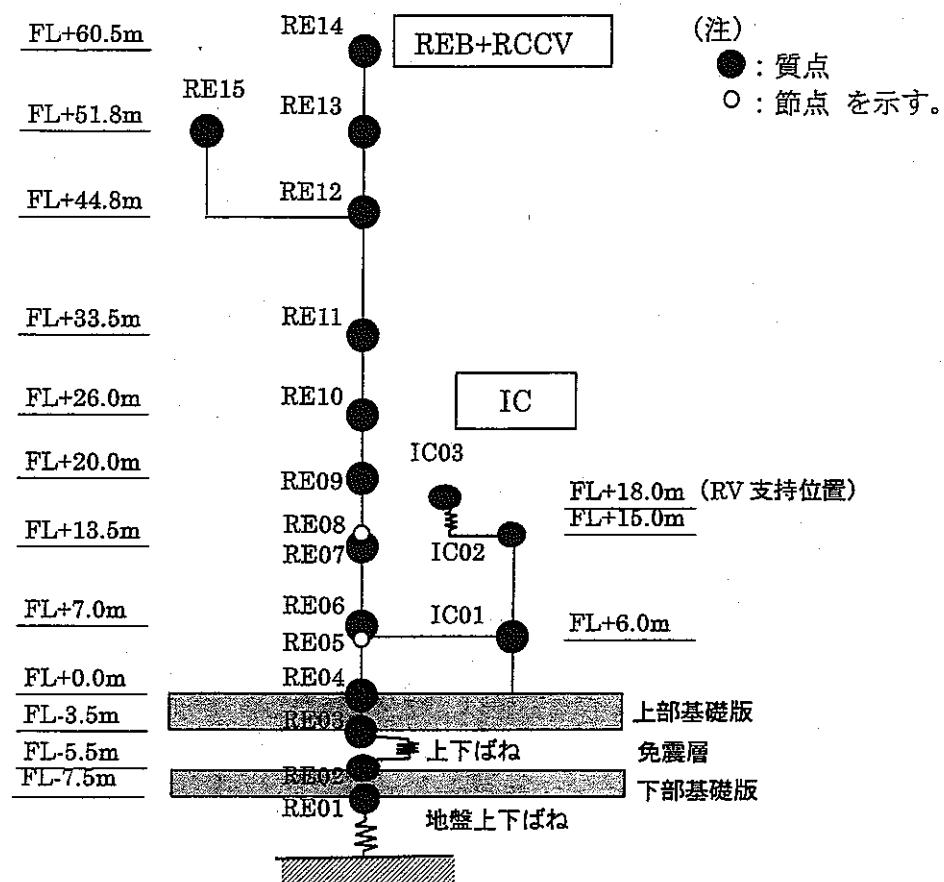


図 2.4-3 上下解析モデル

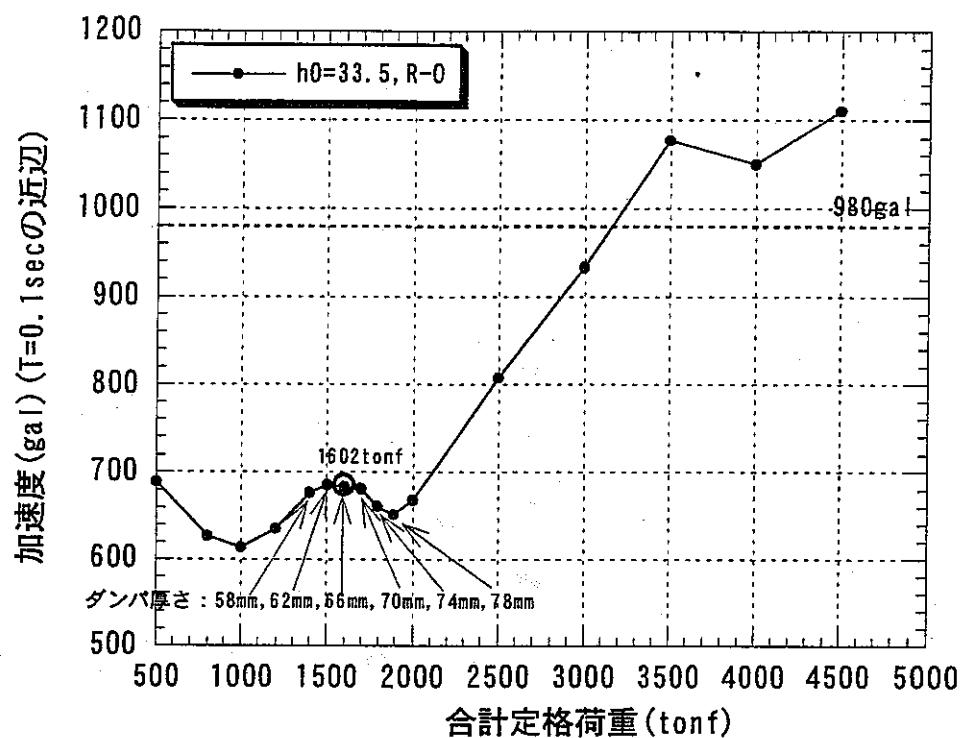


図 2.4-4 上下応答加速度と減衰力の関係

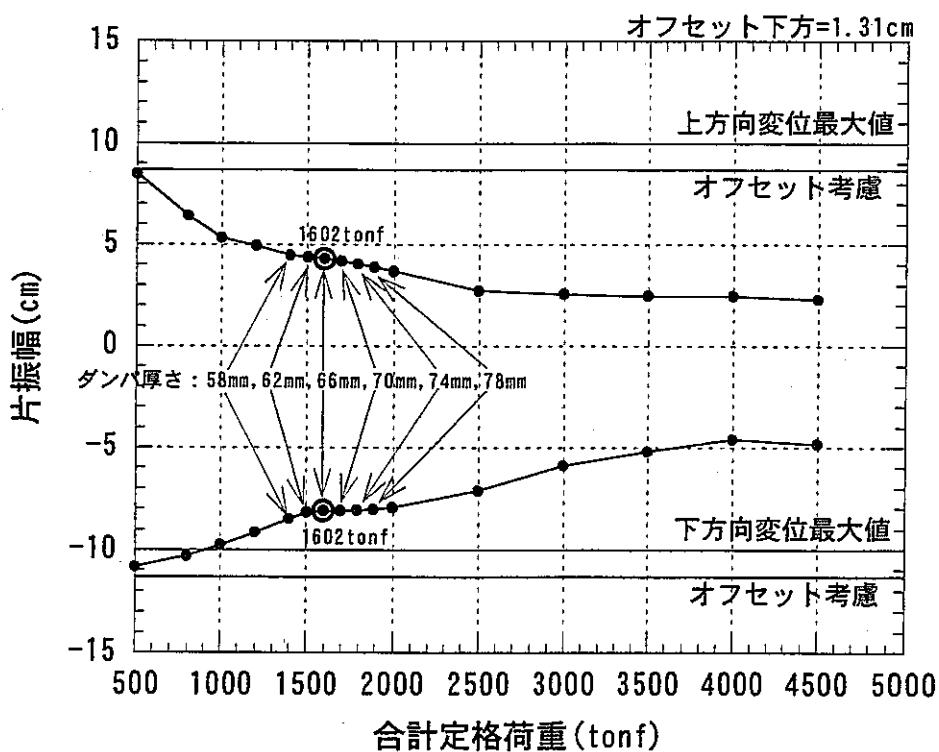


図 2.4-5 上下応答変位と減衰力の関係

2.5 コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合地震応答解析

2.5.1 FEM によるコモンデッキの固有値解析

(1) 検討概要

平成 14 年度の METI 研究では、FEM によるコモンデッキの固有値解析を行った。

本検討では、コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合地震応答解析を実施するに際して、FEM の固有値結果と比較して、総合地震応答解析モデルが妥当であることを確認する。

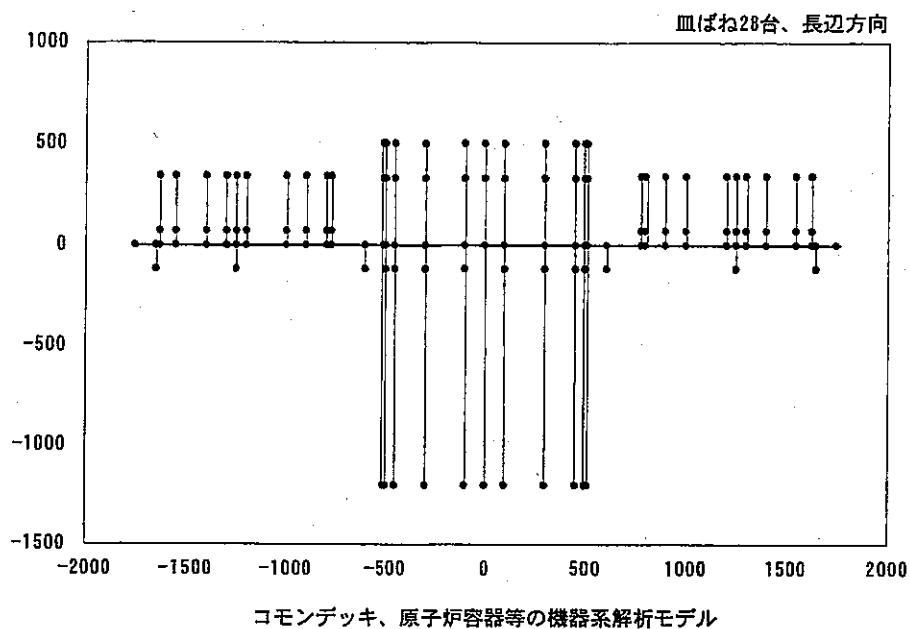
(2) FEM 解析モデルと総合地震応答解析モデルによる固有モードの比較

図 2.5.1-1～2 に、総合地震応答解析モデルを示す。また、図 2.5.1-3 に、FEM 解析モデルを示す。

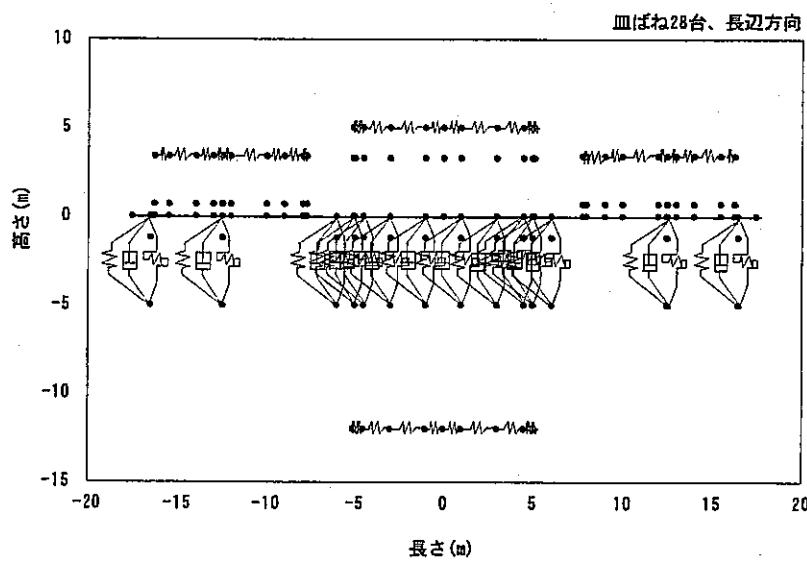
表 2.5.1-1 に固有値解析結果を、また、表 2.5.1-2 に FEM と総合地震応答解析モデルによるモードの比較を示す。

FEM では、コモンデッキの 2 次元（平面）的なモードや捩じれモード等が認められ、総合地震応答解析モデルでは表現できないモードもあり直接の比較は難しいが、代表的なモードにおいては概ね一致していると考えられる。なお、モードとして出てこない場合について、後で示す床応答には影響がないと思われる。

なお、図 2.5.1-4～5 に、総合地震応答解析モデルについてコモンデッキの短辺方向及び長辺方向のモード図を 30 次程度まで示す。なお、モード図が抜けている次数は、刺激関数及び刺激係数が 0 であるため、表示できなかった。

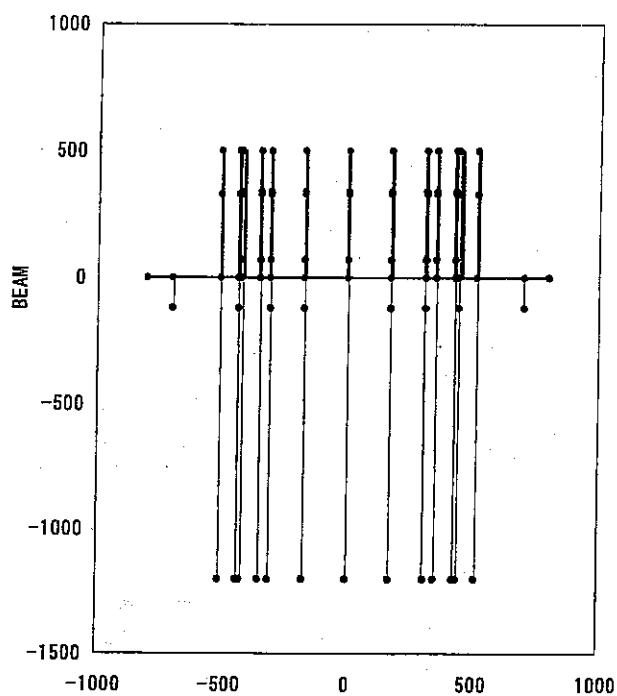


(a) コモンデッキ及び容器のモデル化

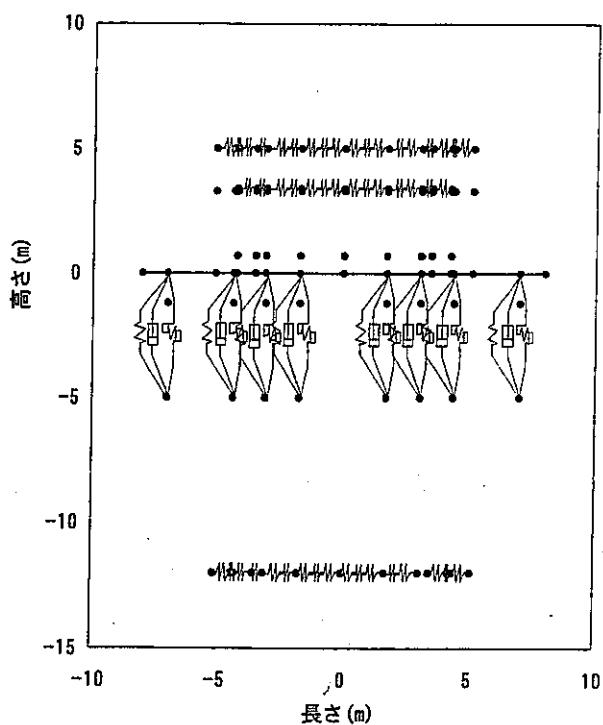


(b) ばね及び節点・質点の配置

図 2.5.1-1 コモンデッキ長辺方向の原子炉容器等の機器系解析モデル
(皿ばね : 28 台、長辺方向)

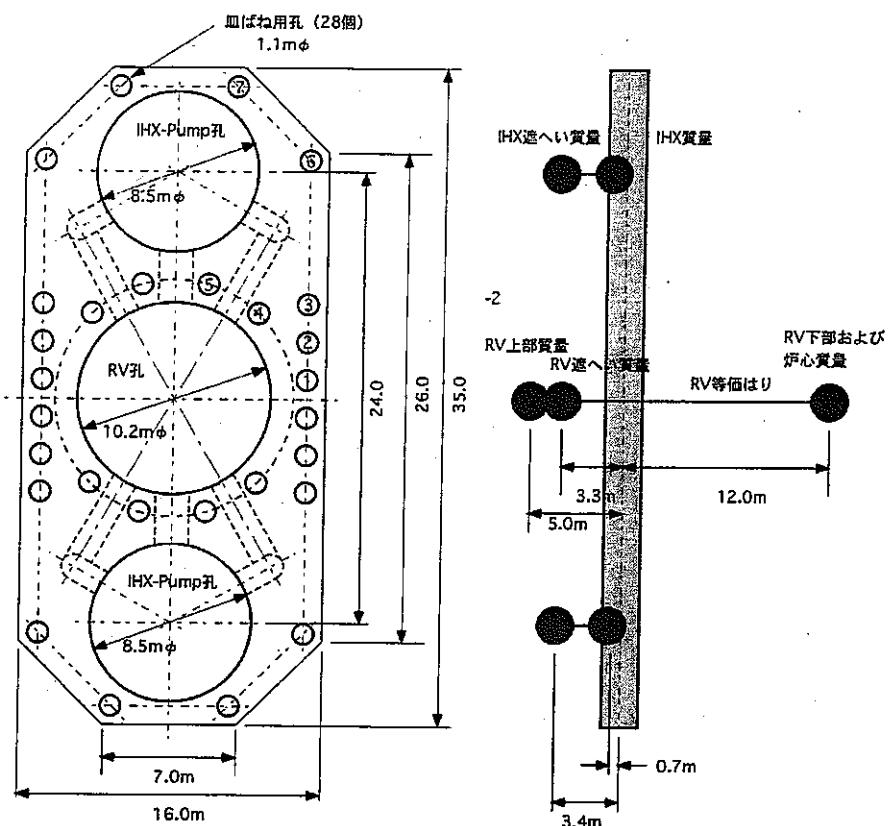


(a) コモンデッキ及び容器のモデル化



(b) ばね及び節点・質点の配置

図 2.5.1-2 コモンデッキ短辺方向の原子炉容器等の機器系解析モデル
(皿ばね: 28 台、短辺方向)



注1 1次冷却系配管は解析モデルには含んでいない。

注2 血ばね位置は下表の通り。

番号	X 座標 (中心より m)	Y 座標 (中心より m)
①	7.00	1.00
②	7.00	3.00
③	7.00	5.00
④	4.38	4.52
⑤	1.73	6.06
⑥	7.00	12.50
⑦	3.10	16.50

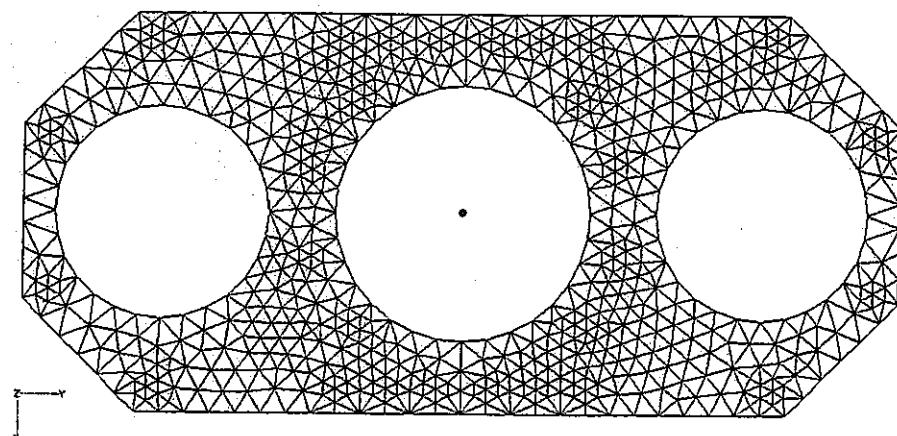


図 2.5.1-3 FEM 解析モデルとその諸元

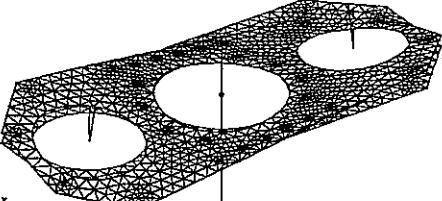
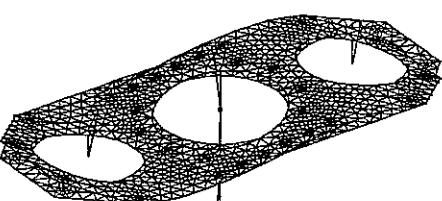
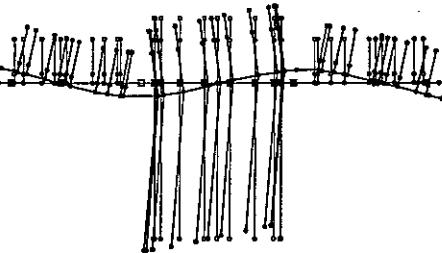
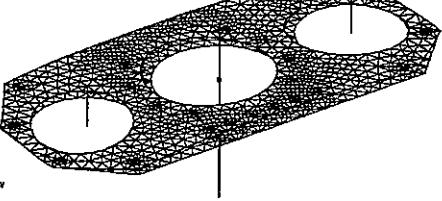
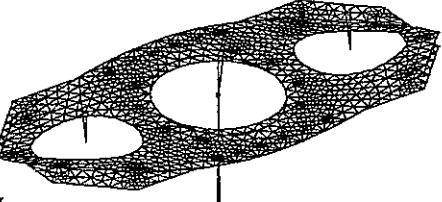
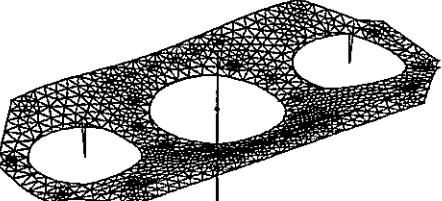
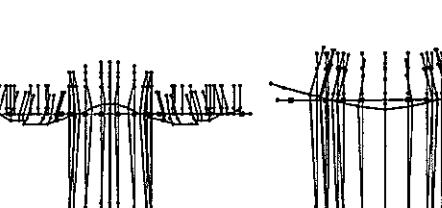
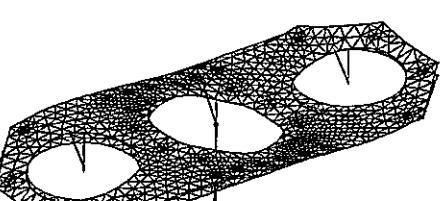
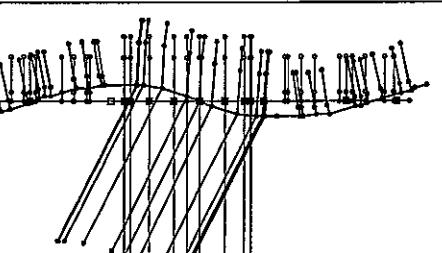
表 2.5.1-1 固有値解析結果

FEM モデル					総合地震応答解析モデル (短辺方向) (長辺方向)			
次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数			次数	固有振動数 (Hz)	次数	固有振動数 (Hz)
		短辺	長辺	上下				
1	1.43	0.0002	0.0389	0.0010	—	—	1	1.34
2	1.53	0.0569	0.0000	0.0023	1	1.33	—	—
3	1.60	0.0001	0.0000	1.7036	2	1.59	2	1.59
4	3.62	0.0004	0.0012	0.0086	—	—	4	5.28
5	4.15	0.0009	0.6536	0.0002	—	—	5	5.44
6	6.38	1.0351	0.0027	0.0001	4	8.49	—	—
7	7.26	0.0018	0.0037	0.0001	—	—	—	—
8	10.69	0.0001	0.2292	0.0001	—	—	6	9.84
9	12.57	0.7299	0.0002	0.0000	—	—	—	—
10	12.62	0.3806	0.0092	0.0001	—	—	—	—
11	15.59	0.0032	0.0654	0.0205	19	32.43	18	21.41
12	16.16	0.0060	1.1524	0.0016	—	—	17	15.77

表 2.5.1-2(1/2) 固有モードの比較

次数	三次元構造モデル	総合地震応答解析モデル
1		
2		
3		
4		
5		
6		

表 2.5.1-2(2/2) 固有モードの比較

次数	三次元構造モデル	総合地震応答解析モデル
7		—
8		
9		—
10		—
11		
12	 Output Err File:00003 F=11.16159 ComputationTime Total:0.000s	

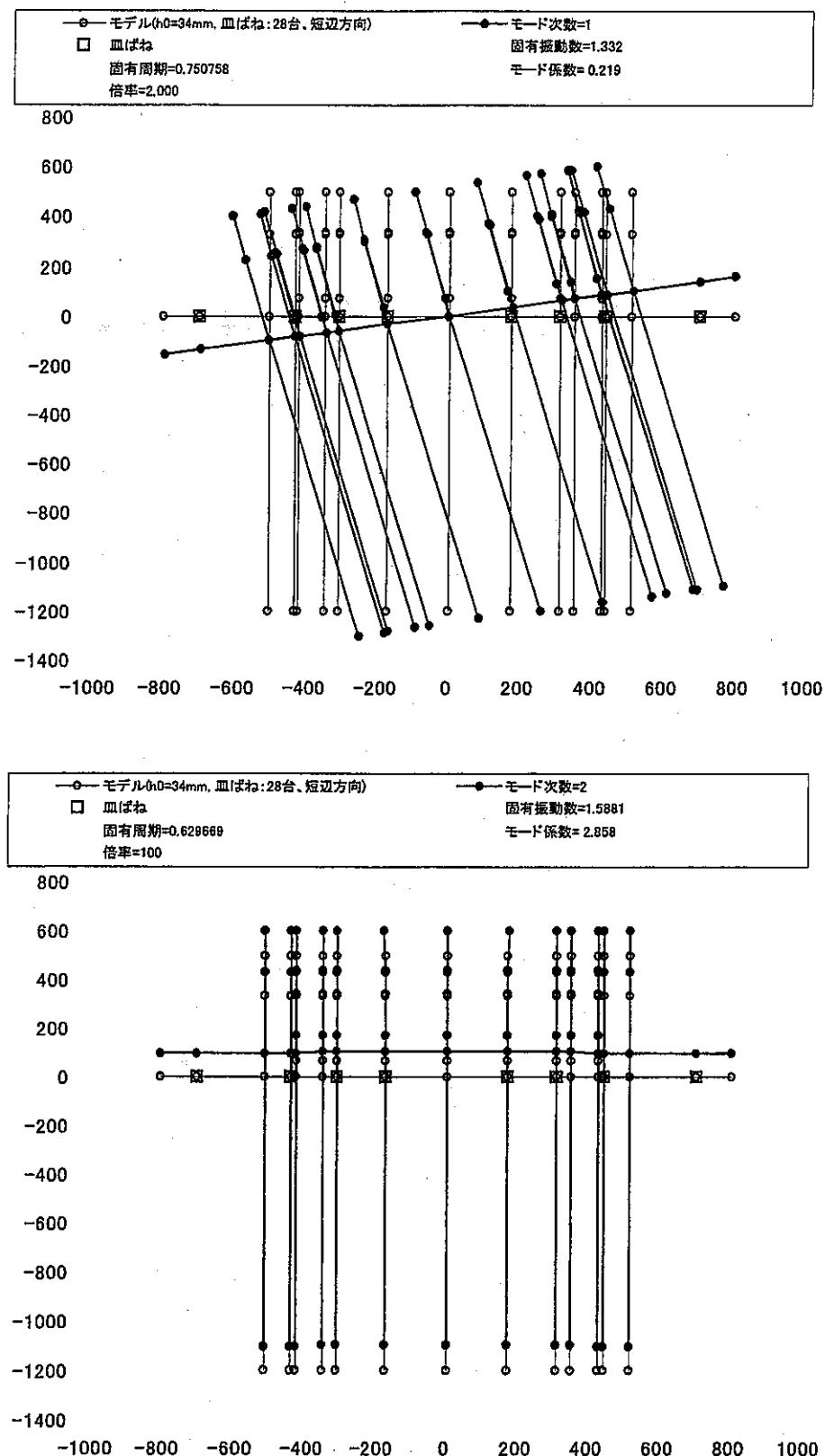


図 2.5.1-4(1/5) コモンデッキ短辺方向のモード図（1次、2次）

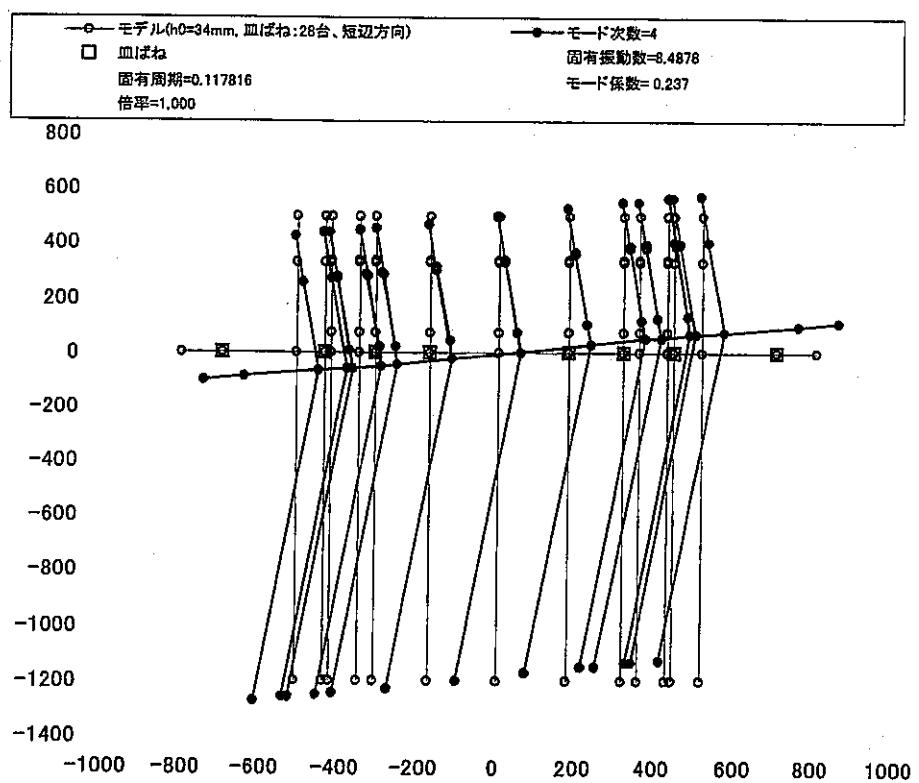
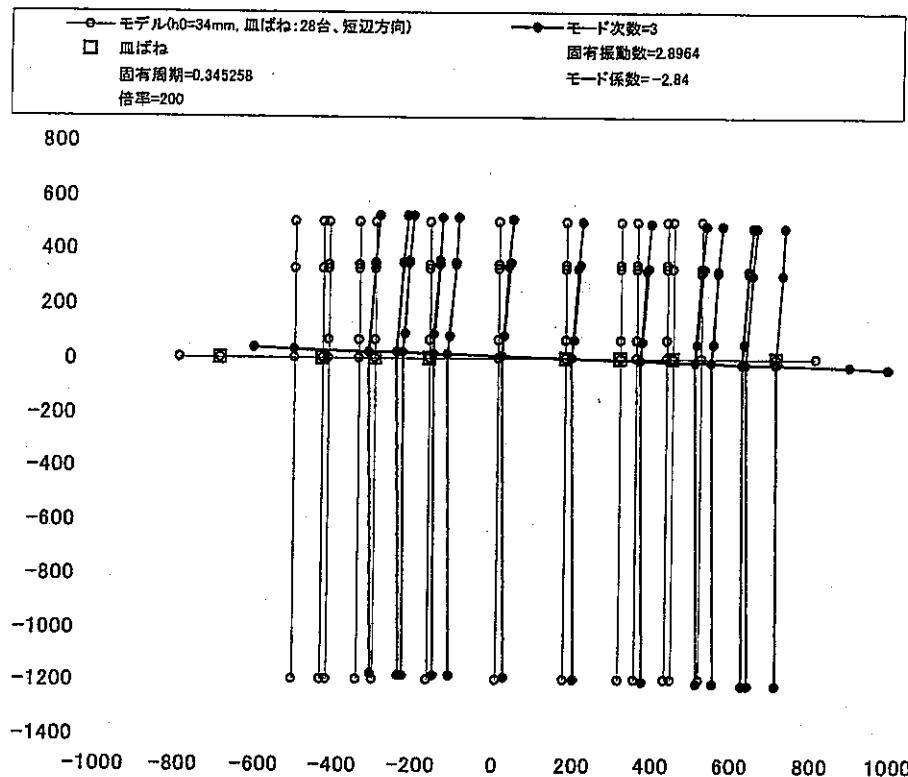


図 2.5.1-4(2/5) コモンデッキ短辺方向のモード図 (3次、4次)

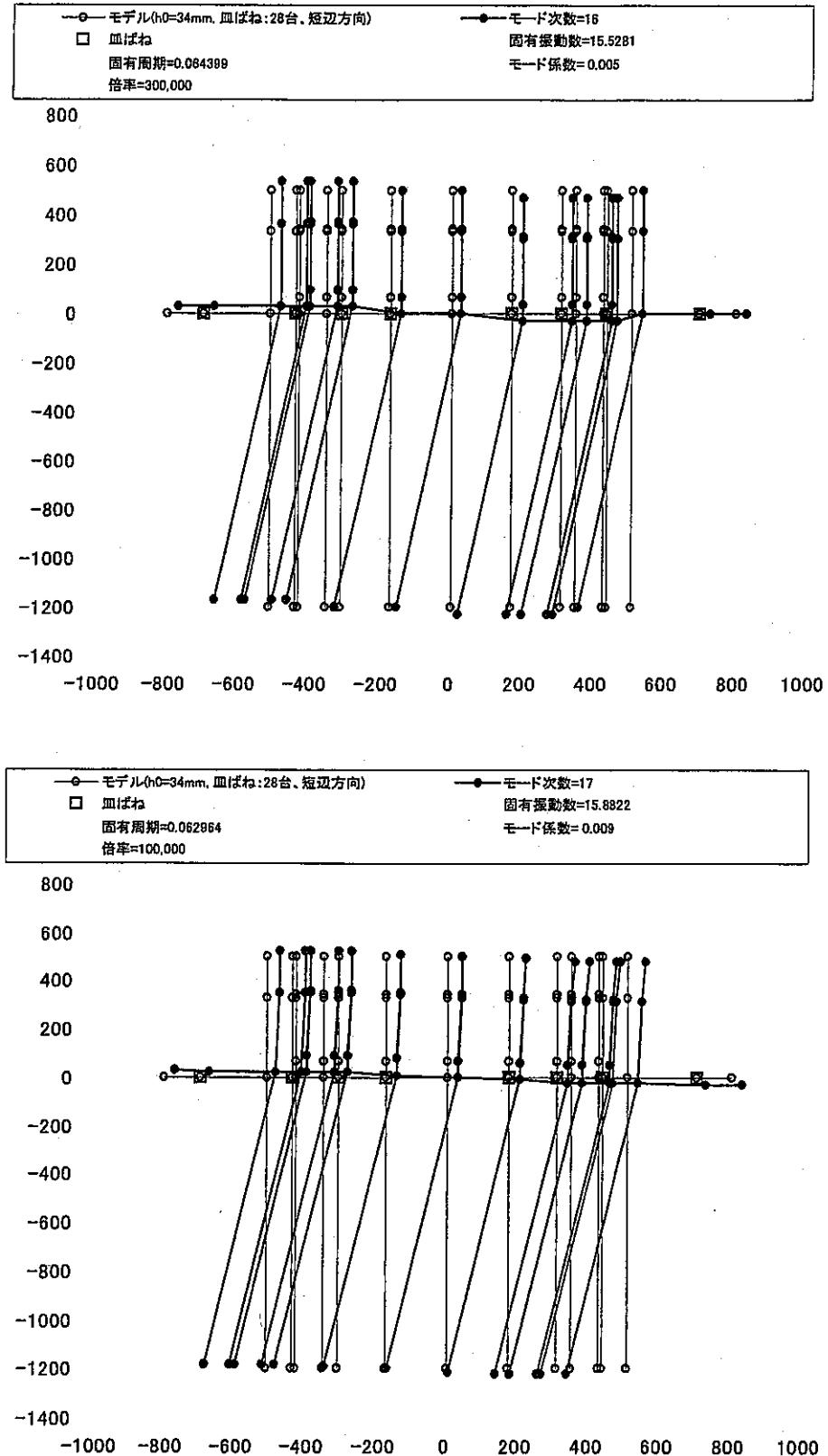


図 2.5.1-4(3/5) コモンデッキ短辺方向のモード図 (16 次、17 次)

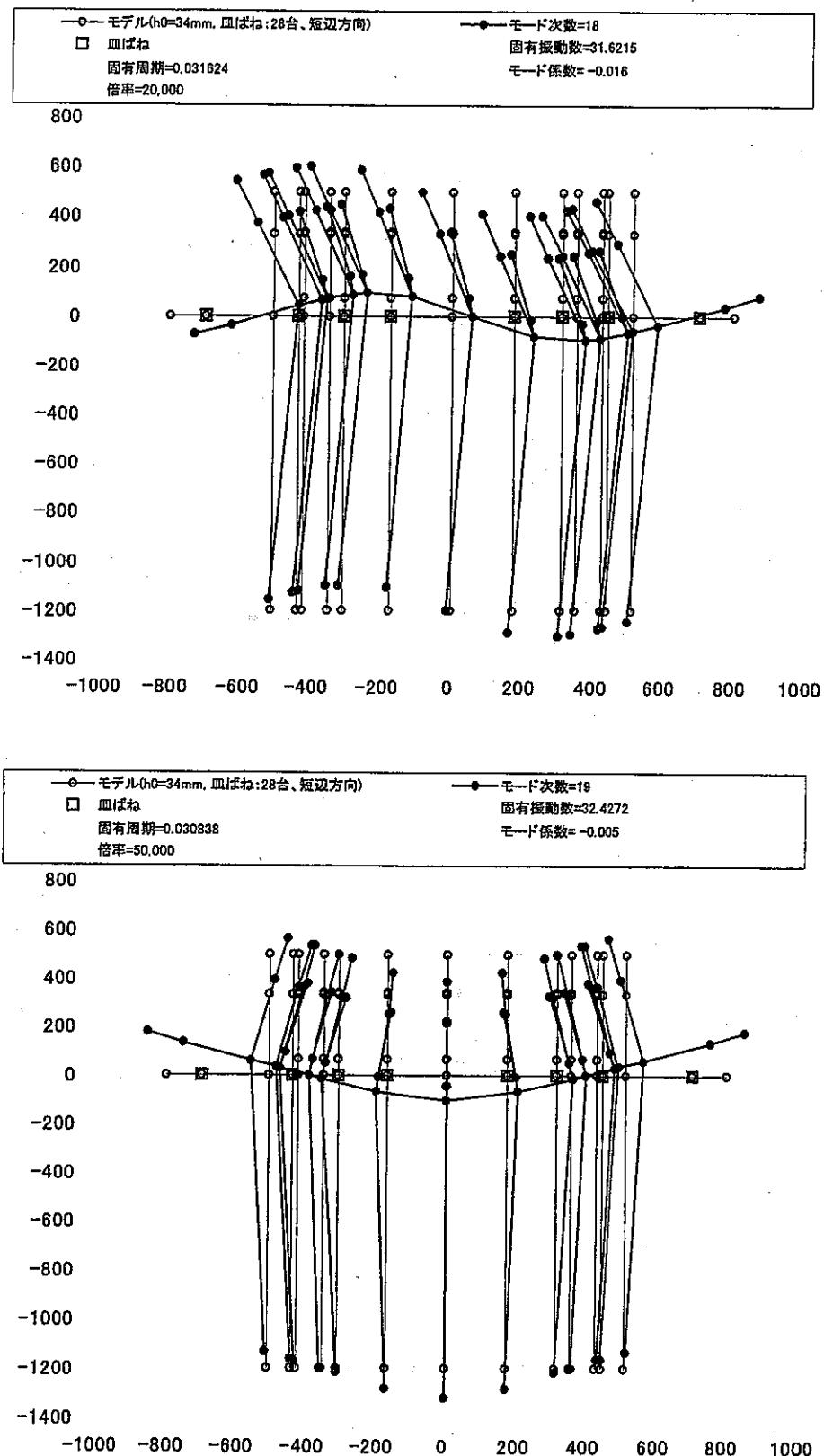


図 2.5.1-4(4/5) コモンデッキ短辺方向のモード図 (18 次、19 次)

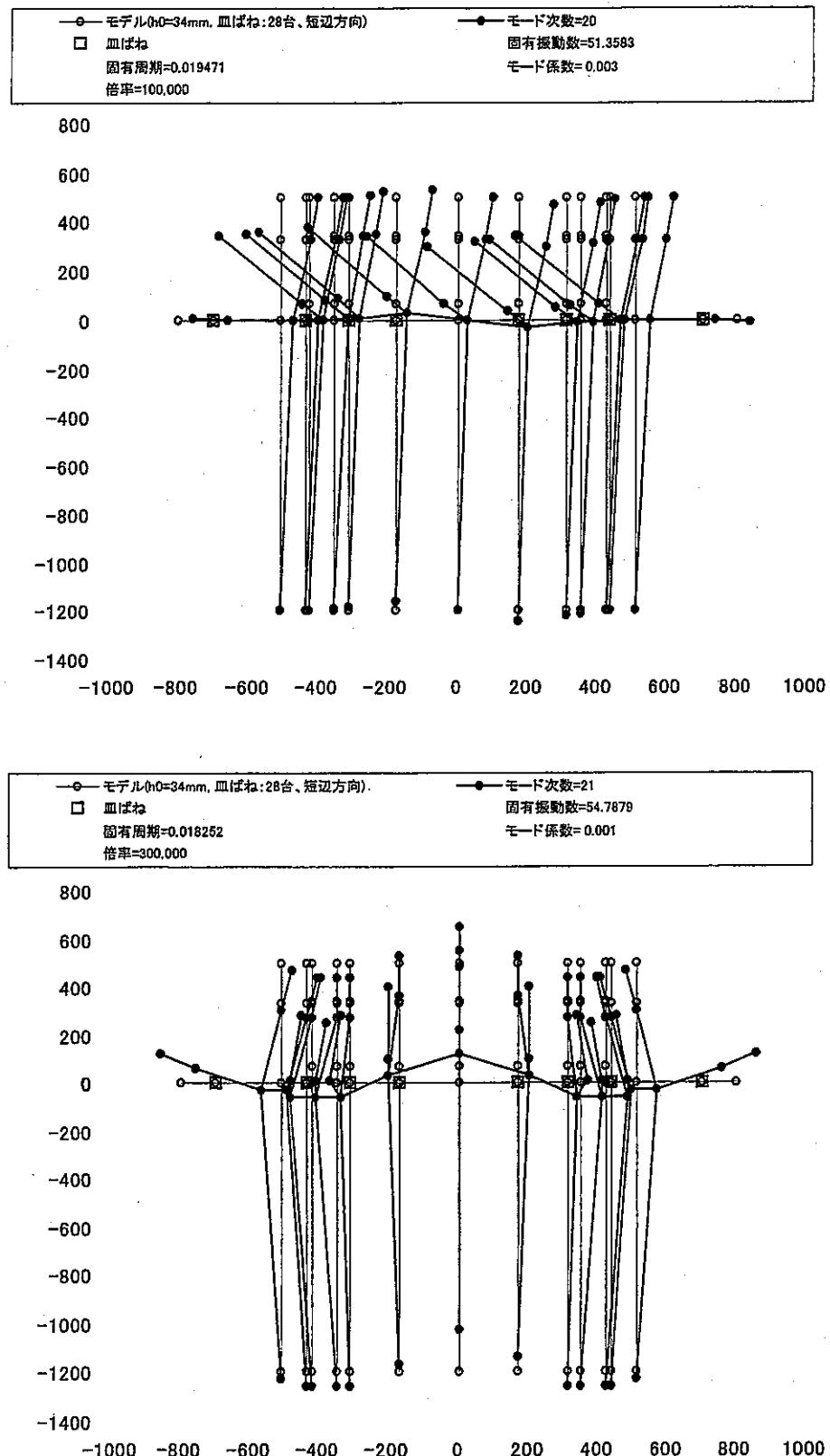
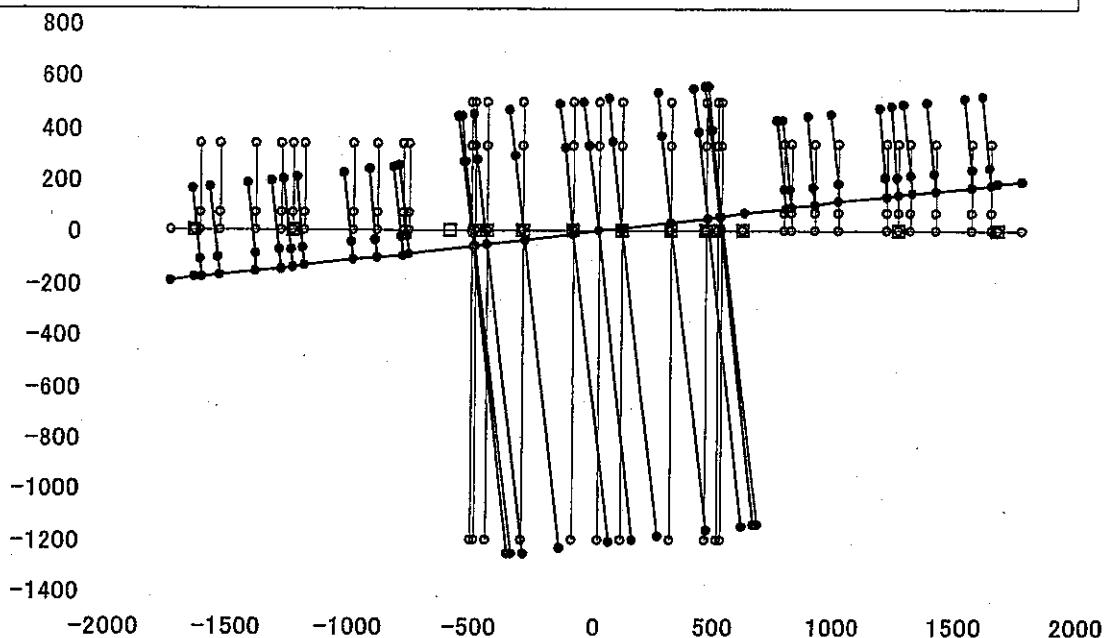


図 2.5.1-4(5/5) コモンデッキ短辺方向のモード図 (20 次、21 次)

● モデル($h_0=34\text{mm}$, 盤ばね: 28台、長辺方向) ● モード次数=0.0238
 □ 盤ばね 固有振動数=1.3427
 固有周期=0.744772 モード係数= 0.175
 倍率=2,000



● モデル($h_0=34\text{mm}$, 盤ばね: 28台、長辺方向) ● モード次数=2
 □ 盤ばね 固有振動数=1.5887
 固有周期=0.629436 モード係数= -2.859
 倍率=100

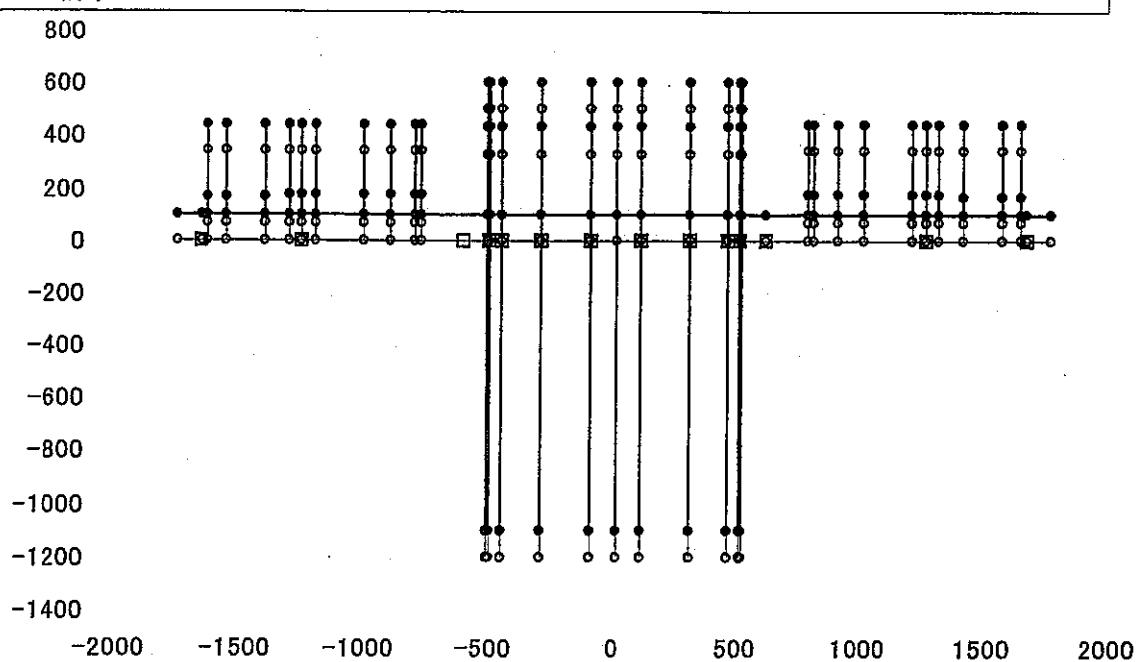


図 2.5.1-5(1/8) コモンデッキ長辺方向のモード図（1次、2次）

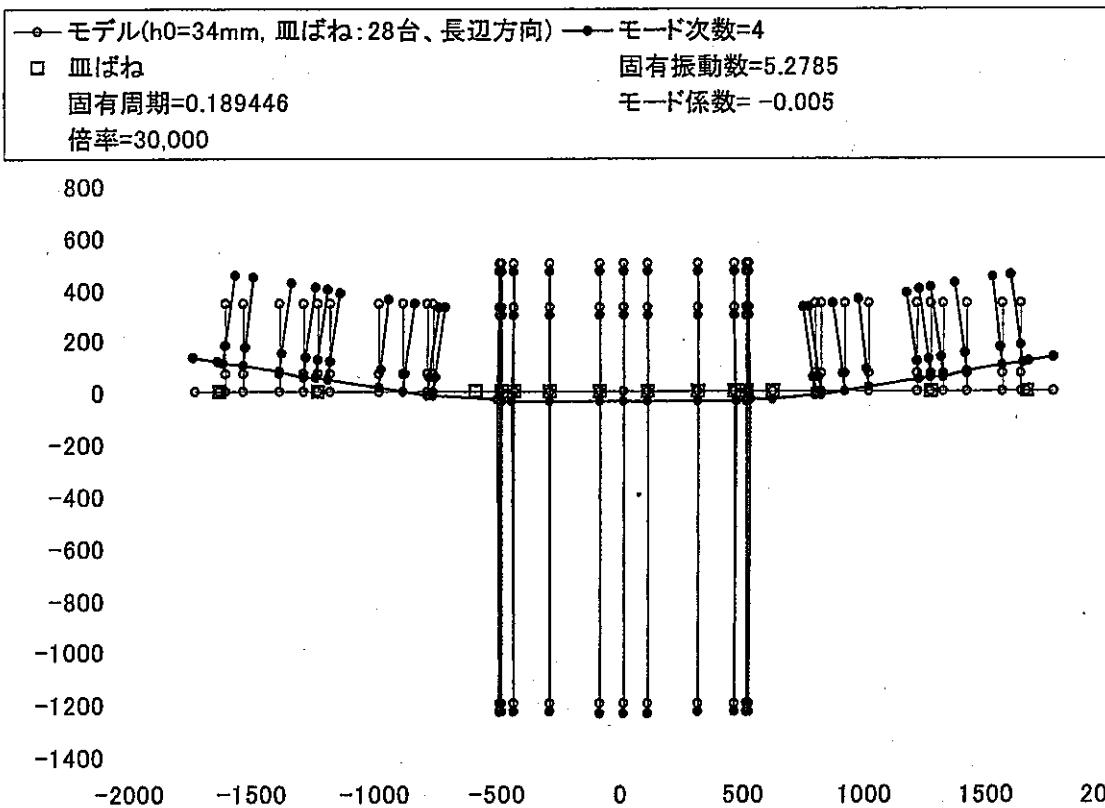
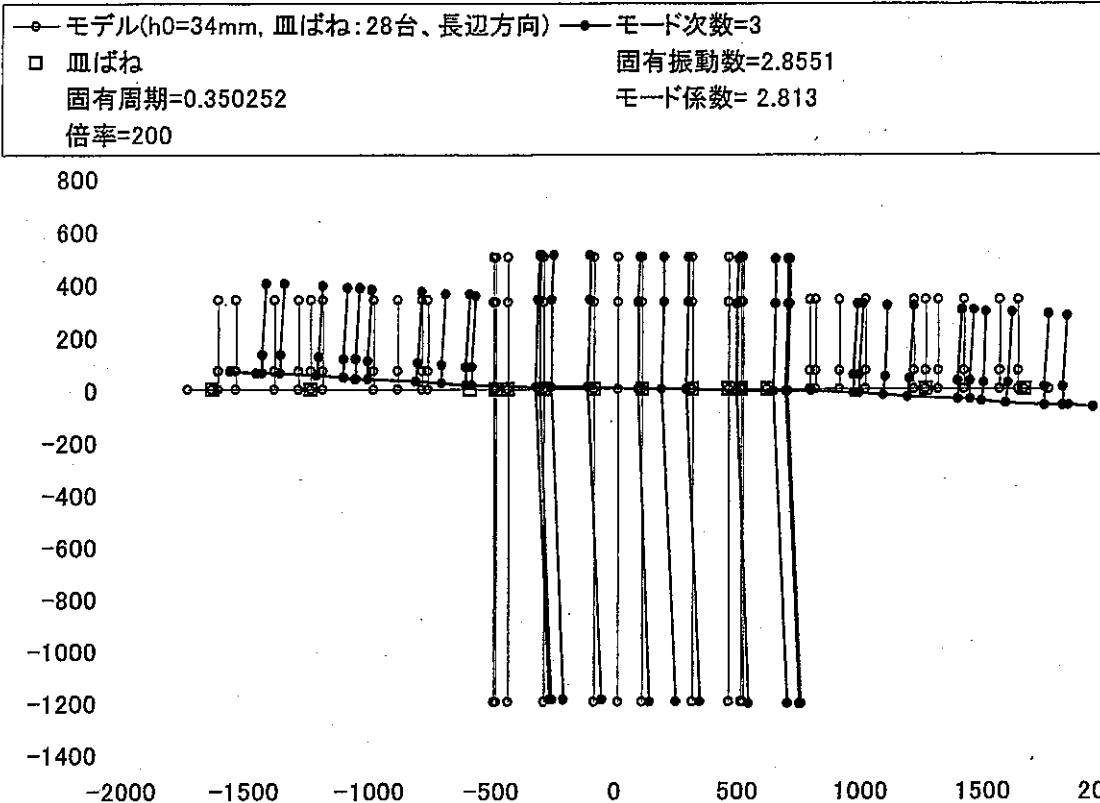


図 2.5.1-5(2/8) コモンデッキ長辺方向のモード図（3次、4次）

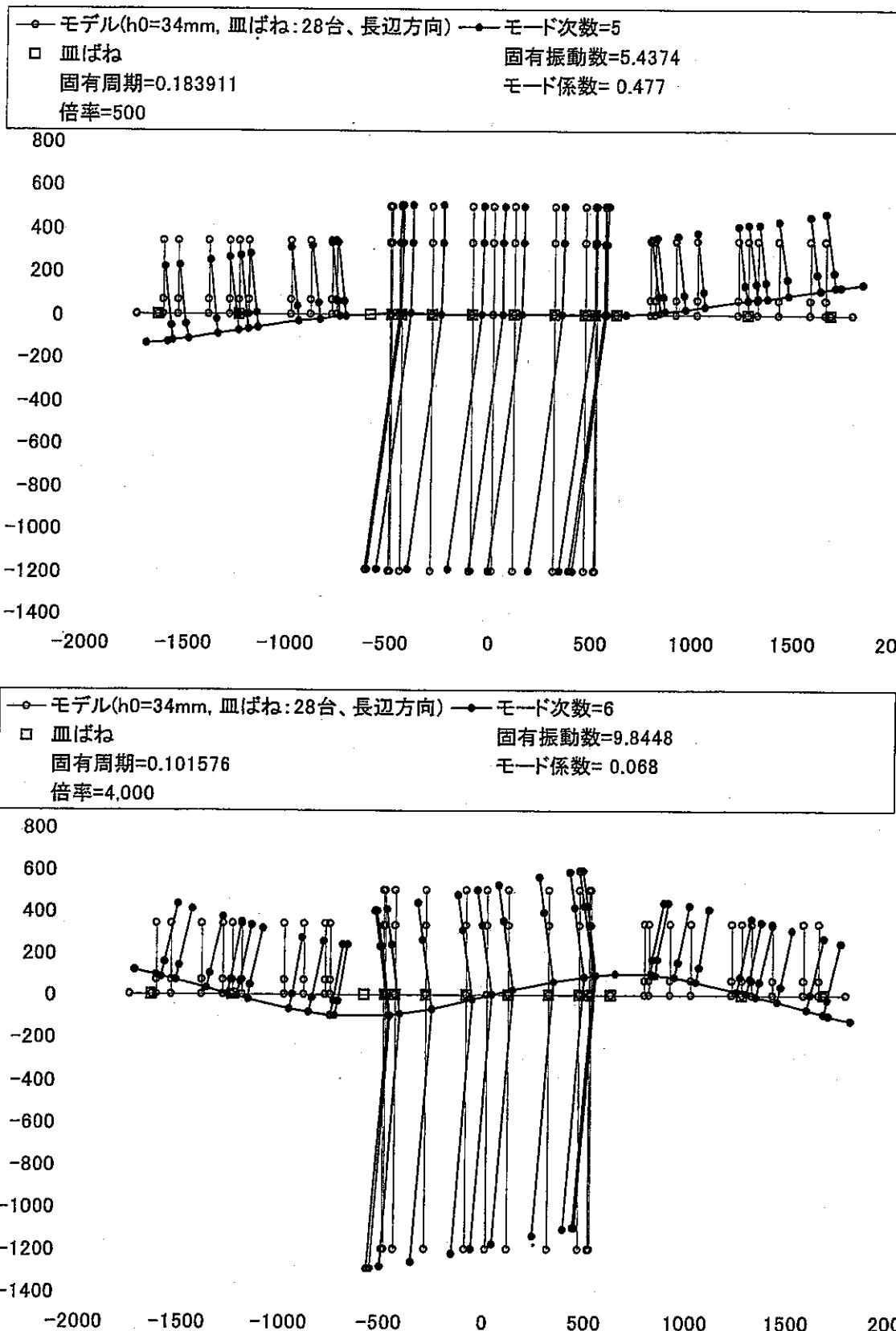


図 2.5.1-5(3/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (5 次、6 次)

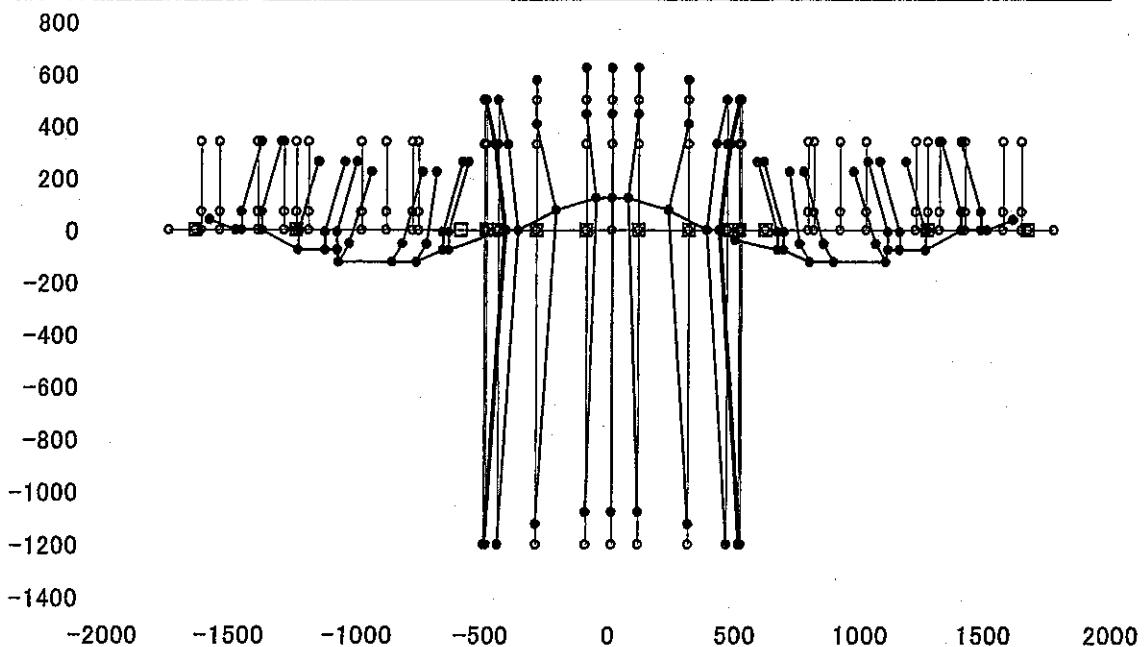
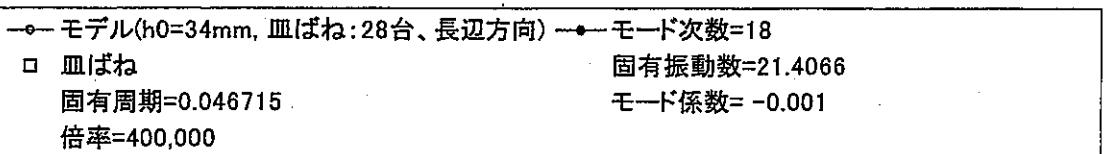
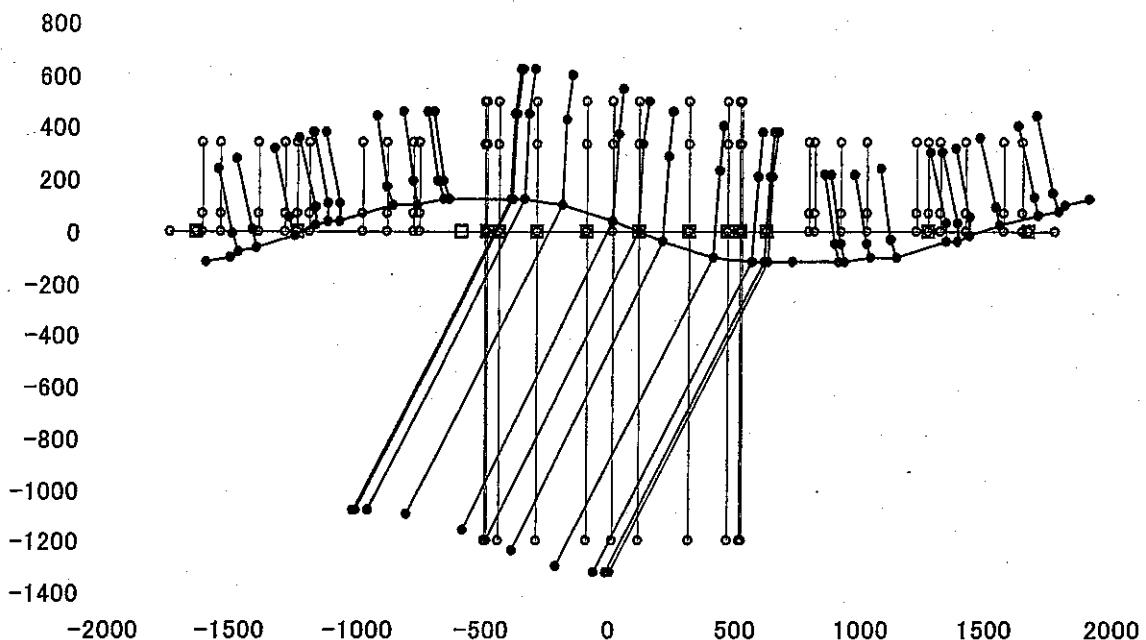
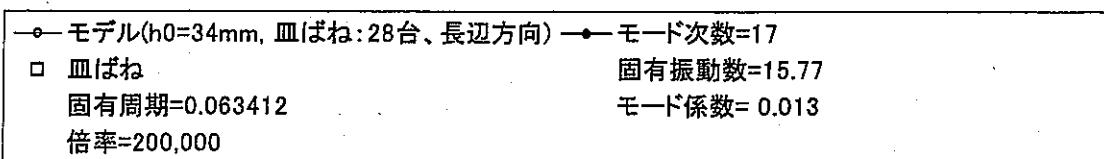


図 2.5.1-5(4/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (17 次、18 次)

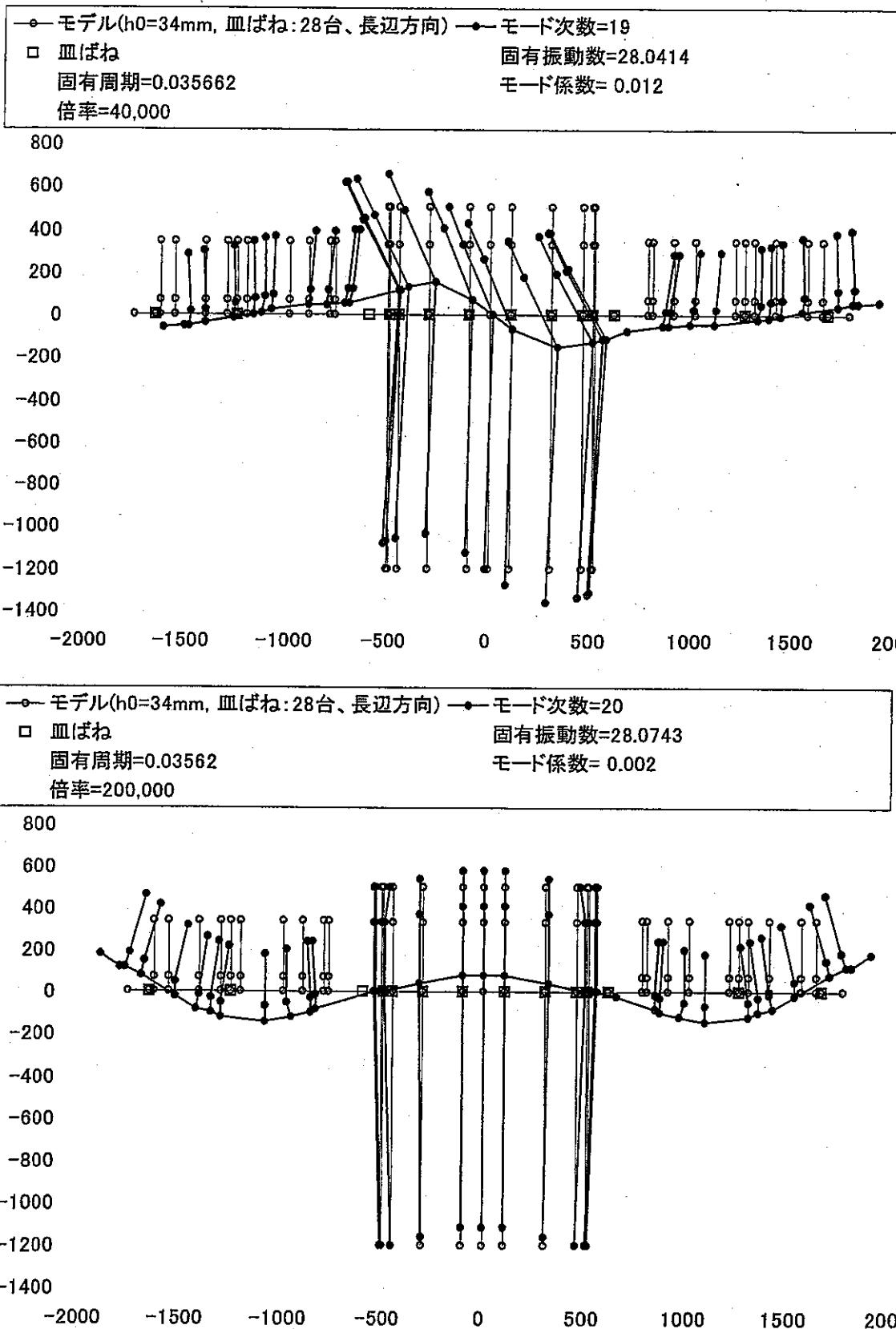


図 2.5.1-5(5/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (19 次、20 次)

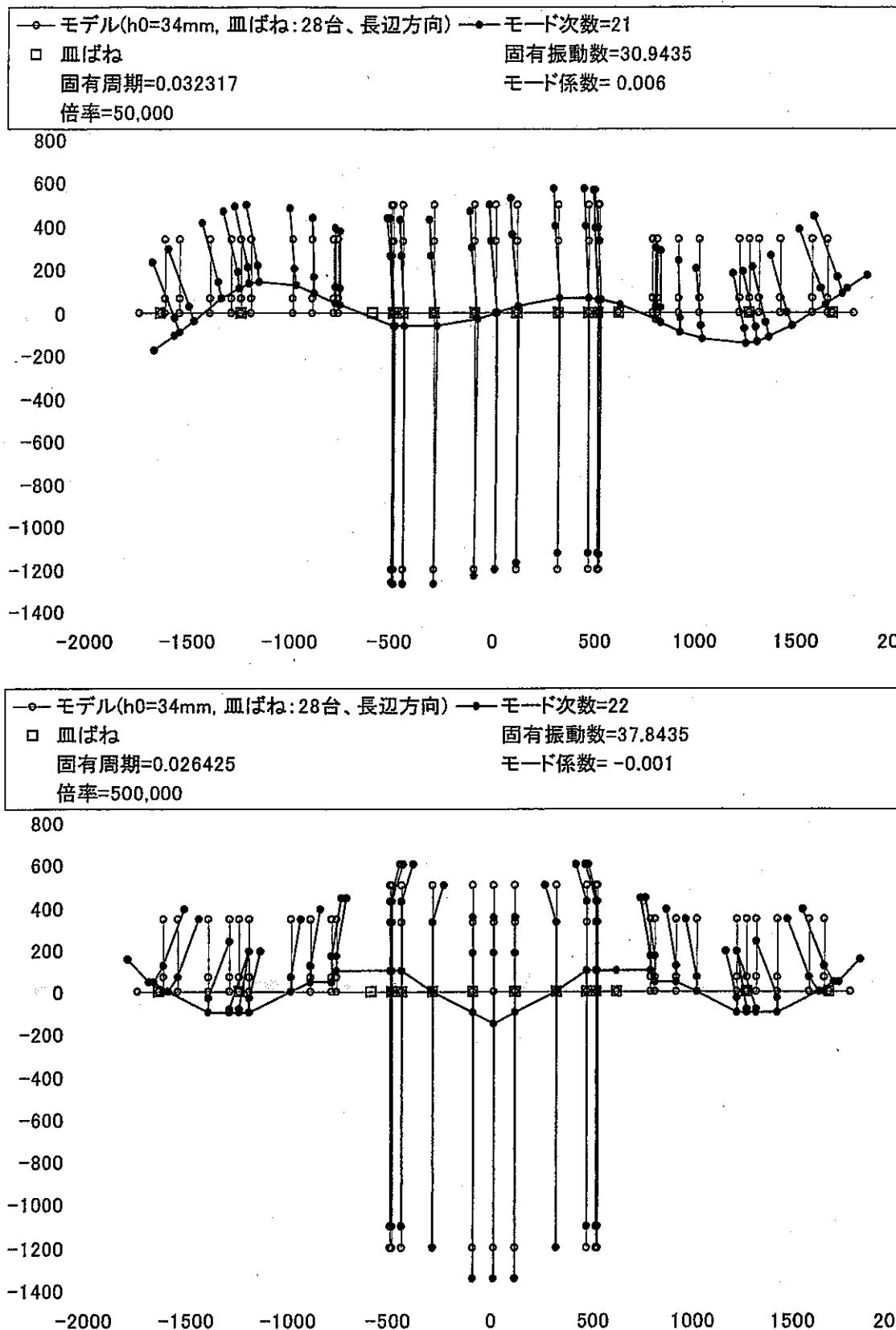


図 2.5.1-5(6/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (21 次、22 次)

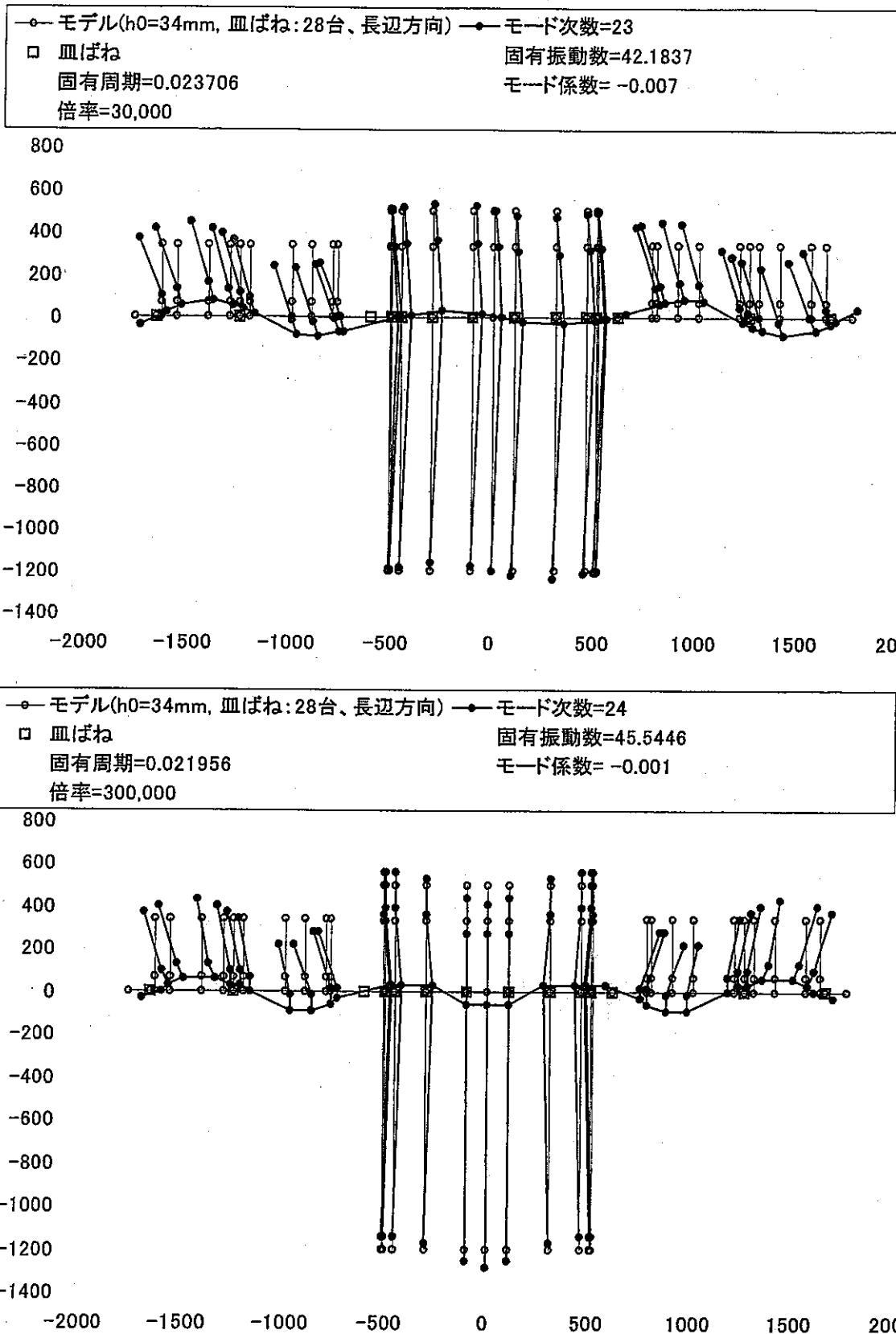


図 2.5.1-5(7/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (23 次、24 次)

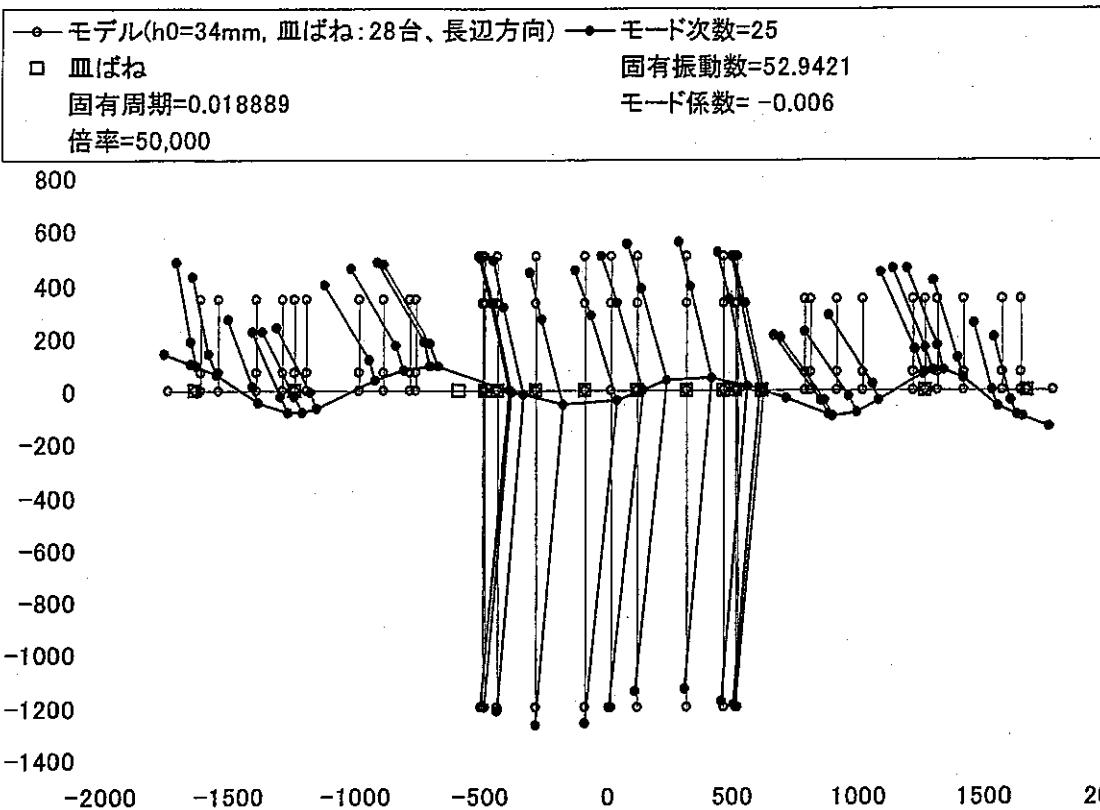


図 2.5.1-5(8/8) コモンデッキ長辺方向のモード図 (25 次)

2.5.2 コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合地震応答解析

(1) 検討概要

本検討では、コモンデッキに据えられる原子炉容器及び 2 つの IHX をモデル化し、容器による開口を考慮したコモンデッキの剛性とコモンデッキを支持する上下免震装置の配置位置を考慮した水平及び上下方向の地震応答解析を行い、コモンデッキを含む機器上下免震システムの総合評価を行う。

(2) 解析条件

解析対象はナトリウム大型炉とし、解析方向はコモンデッキ（総重量 78MN、上下免震装置重量の半分を考慮）の長辺及び短辺方向とする。

入力地震波はケーススタディ波 S2 であるが、まず、建屋の応答解析を実施して上下免震装置据付ける位置での加速度応答を評価し、その加速度応答の時刻歴波形を入力波として入力とする。解析は、水平 1 方向及び上下方向の同時入力による解析を実施する。

上下方向の解析では、上下免震装置の荷重特性が支持荷重による装置中立点まで載荷した状態を原点とするため、10 秒かけて重力加速度に達することにより、また、重力加速度を起点となるように応答解析時の入力波の原点をシフトした。これにより、水平応答解析においても、入力波の開始時間を 10 秒ずらした。

図 2.5.2-1～3 に、水平及び上下方向の入力波である加速度の時刻歴波形及び応答スペクトルをそれぞれ示す。

コモンデッキは厚さを 2m とし、コンクリート (fc30)、表面鋼板（片側 20mm）及びリブ補強の剛性を考慮して、等価ヤング係数を 28.6GPa、せん断剛性を 12.2GPa とした。容器の開口（断面欠損）を考慮して断面積及び断面 2 次モーメントを算出した。また、質量は支配面積より算出した。

機器は、原子炉容器上部構造 15.7MN、原子炉容器下部構造 13.7MN、IHX/基 6.37MN とし、追加遮蔽として原子炉容器に 6.92MN 及び IHX に 4.9MN の重量とその高さ位置を考慮した。なお、剛性は、一般鋼材のヤング係数及びせん断弾性係数を用いた。

上下免震装置のうち、皿ばねの荷重特性（摩擦係数）は平成 14 年度の METI 研究成果に基づき評価した実機の荷重特性（2.4 章参照）を用い、また、減衰要素は 2.6.3 章に示す減衰性能が最も優れた要素形状（板厚 66mm、のど首幅 60mm）の荷重特性

を用いた。なお、上下免震装置は、配置する場所に皿ばね及び減衰要素（皿ばね 1 基分の 3 体）を個々にモデル化した。

(3) 解析結果

コモンデッキ短辺方向の水平上下同時入力解析結果について、代表的な位置での皿ばね及び減衰装置の荷重・変位関係、応答時刻歴波形、コモンデッキの変形状態及び床応答曲線を、図 2.5.2-4～17 に示す。

また、コモンデッキ長辺方向の水平上下同時入力解析結果について、同様なアウトプットを、図 2.5.2-18～32 に示す。

変位について、地震時の最大応答変位（図 2.5.2-8 及び図 2.5.2-22 参照）は皿ばねの圧縮側に 80mm、浮上がり側に 60mm 程度の変位であり、許容変位 100mm 以下に十分納まっている。また、水平地震により励起されるロッキングの影響により、端部装置間での相対変位は短辺方向 14m（芯々距離）に対して最大 3mm、長辺方向 33m で 4mm 前後である（図 2.5.2-9 及び図 2.5.2-23 参照）。原子炉容器の軸長が 12m であるので、この程度のロッキングによる原子炉容器下部のロッキングによる水平変位は 2mm 程度として、水平応答変位 15mm（図 2.5.2-6 及び図 2.5.2-20 参照）を加えても 20mm 程度となることが判った。

加速度応答について、機器を直接モデル化しているため、機器の応答評価は応答時刻歴波形の最大値にて評価することとなる。水平及び上下における最大応答加速度は 5m/s² であり、増幅の傾向は認められない。

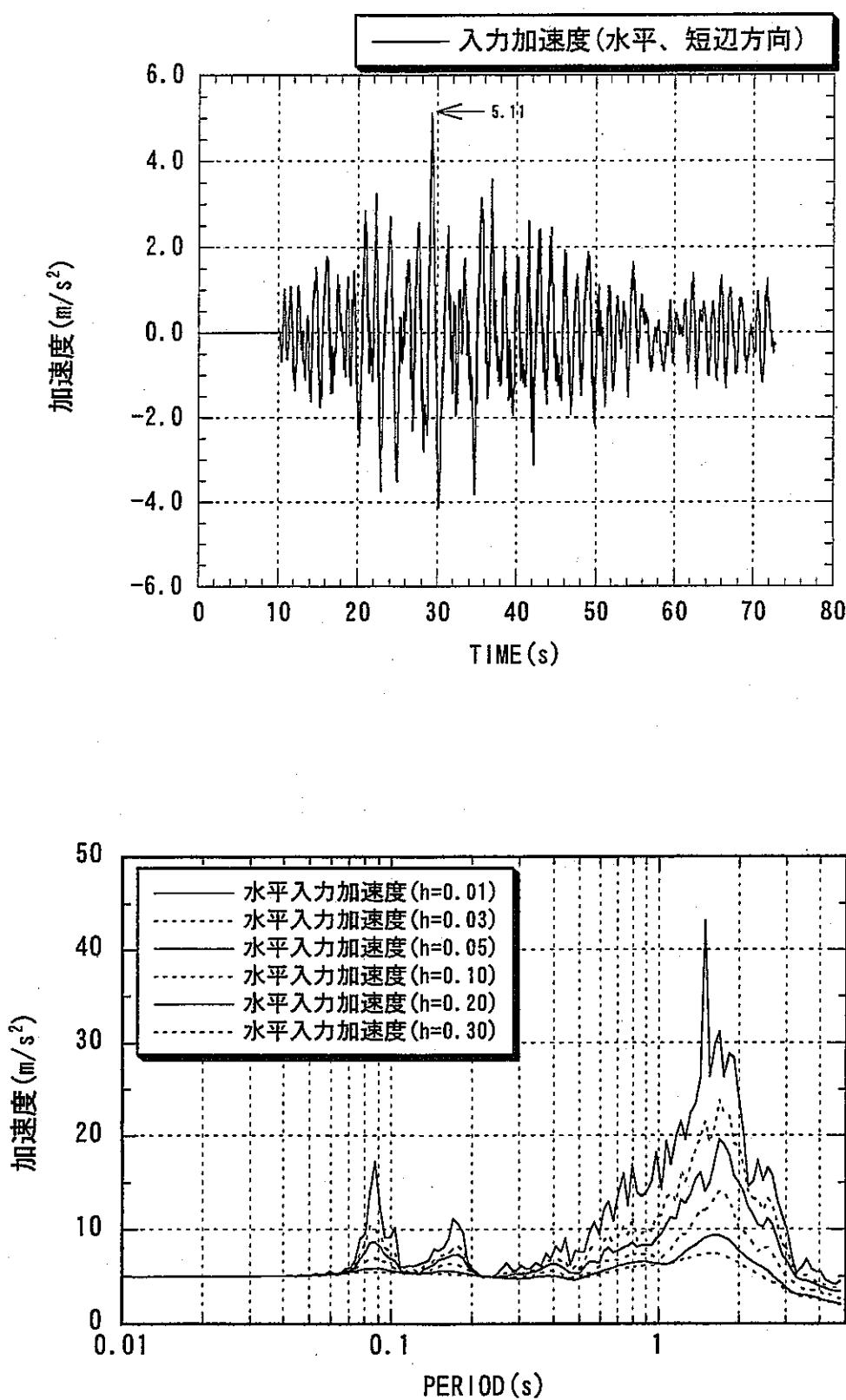


図 2.5.2-1 コモンデッキ短辺方向の水平入力応答時刻歴波形及び応答スペクトル

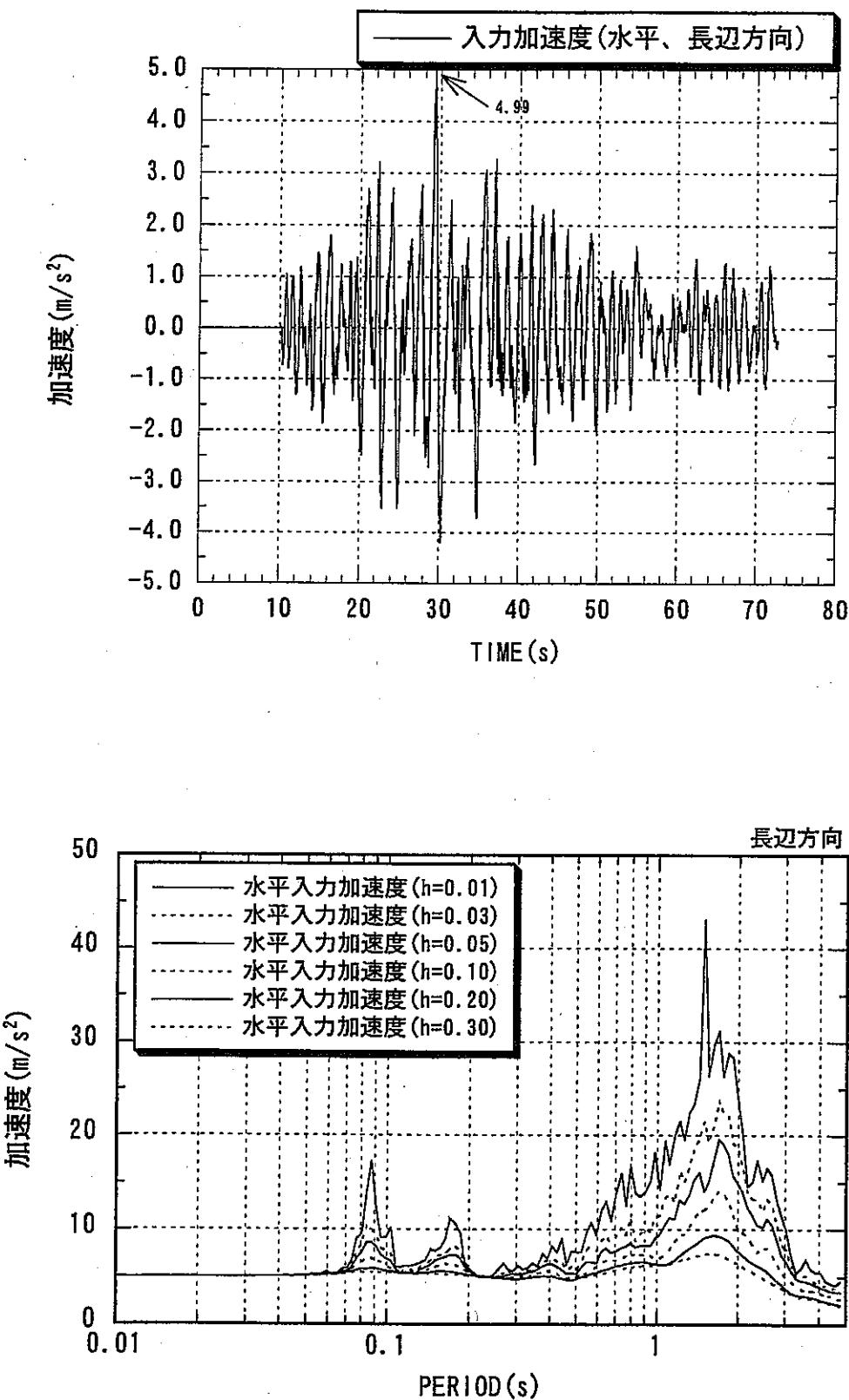


図 2.5.2-2 コモンデッキ長辺方向の水平入力応答時刻歴波形及び応答スペクトル

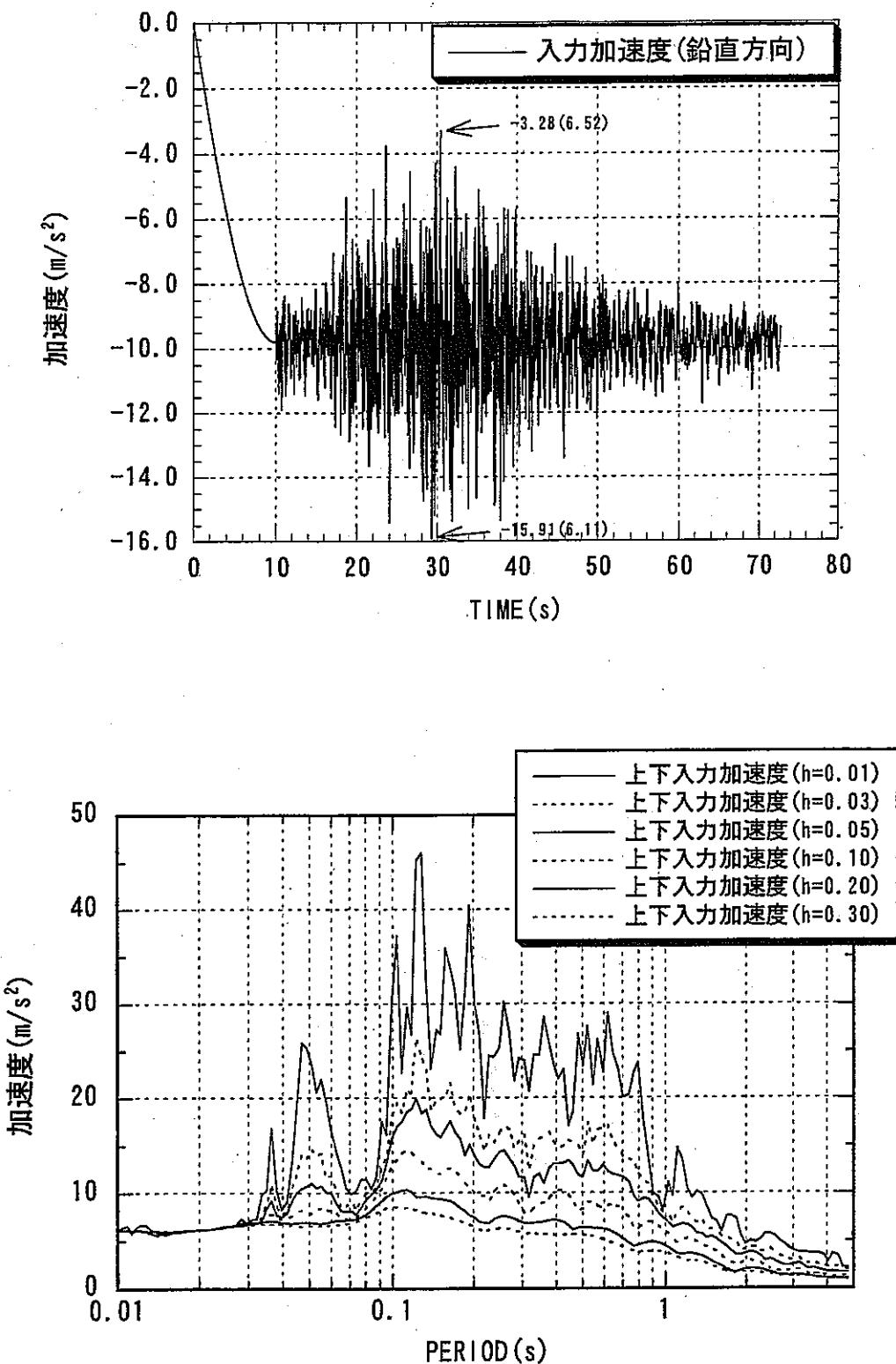


図 2.5.2-3 上下入力応答時刻歴波形及び応答スペクトル

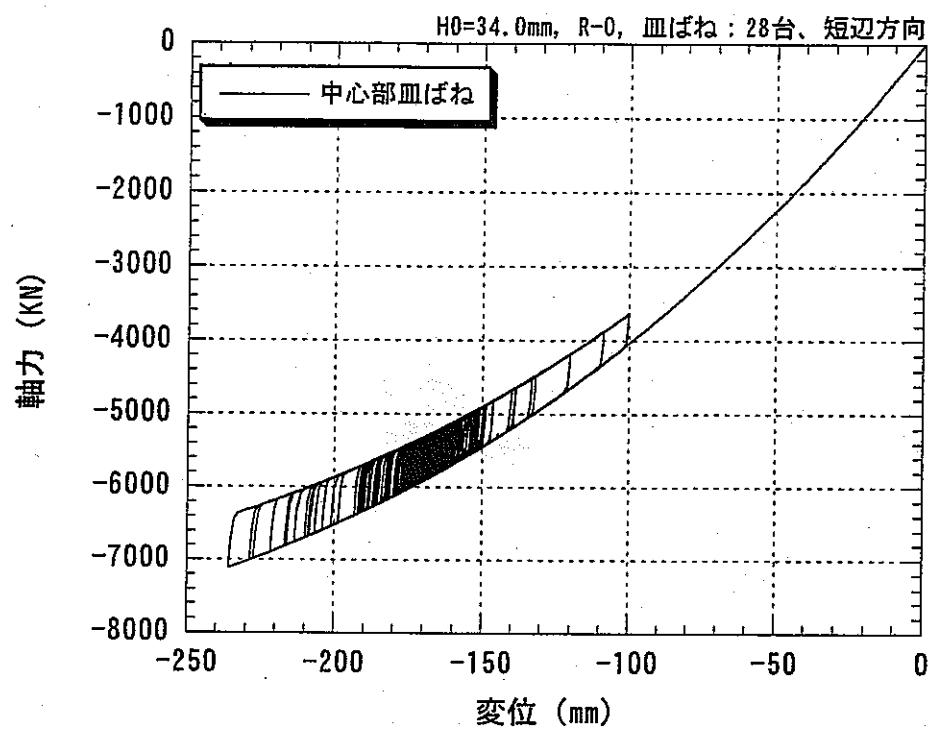


図 2.5.2-4 盤ばねの荷重一変位関係（短辺方向）

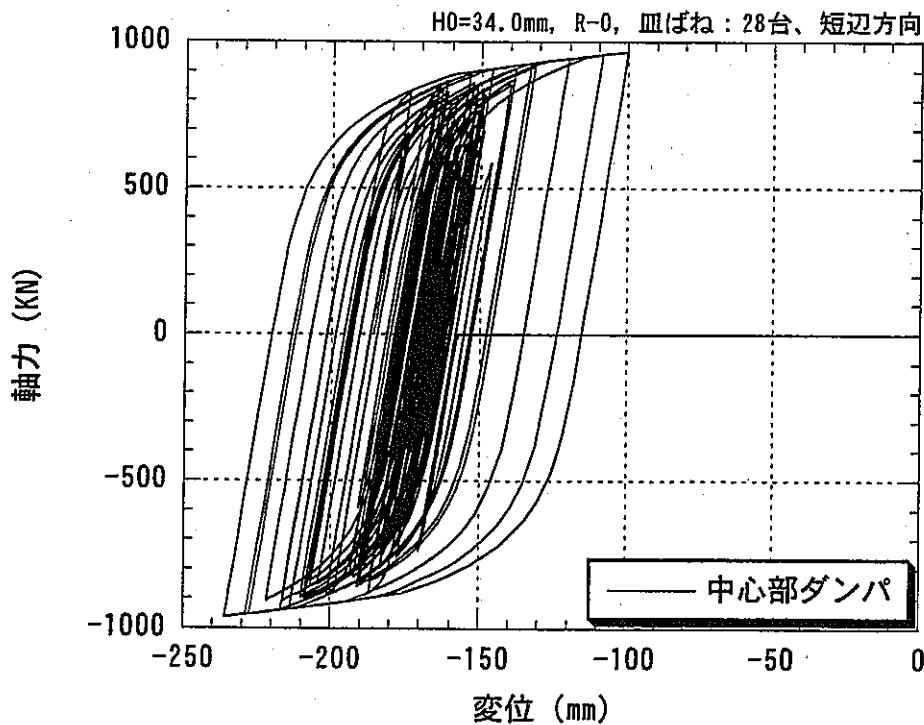


図 2.5.2-5 ダンバの荷重一変位関係（短辺方向）

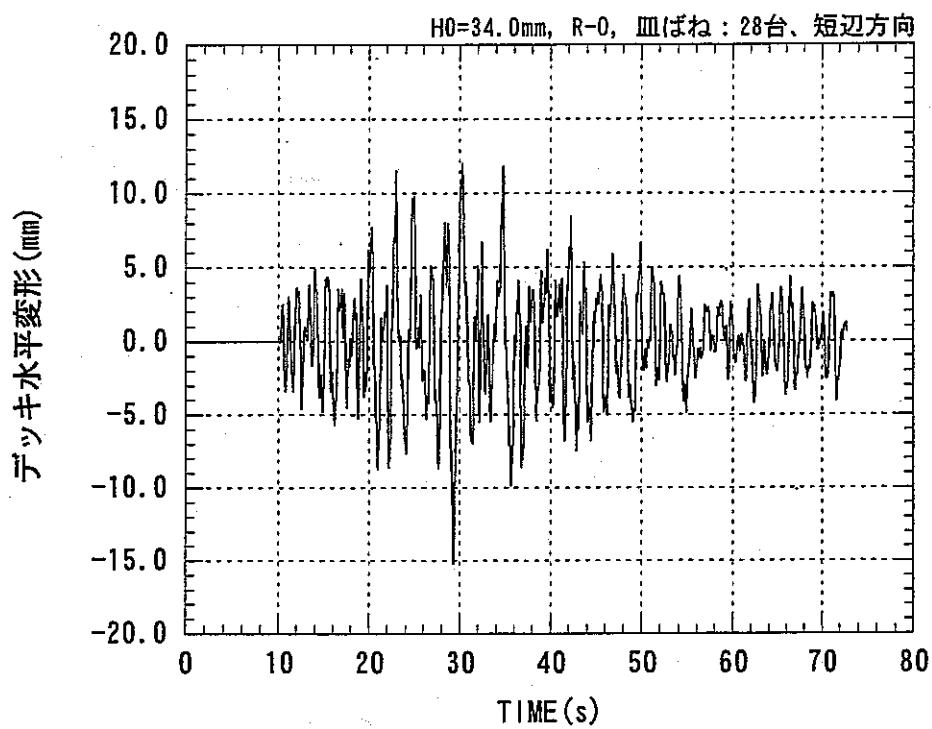


図 2.5.2-6 コモンデッキ水平応答変位波形（短辺方向）

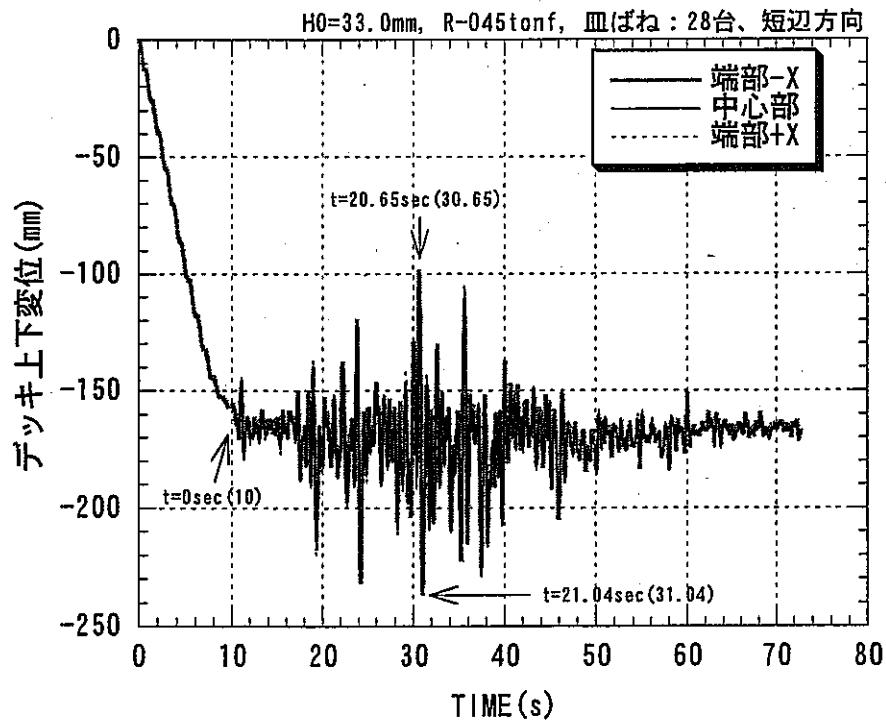


図 2.5.2-7 コモンデッキ上下応答変位波形の比較（短辺方向）

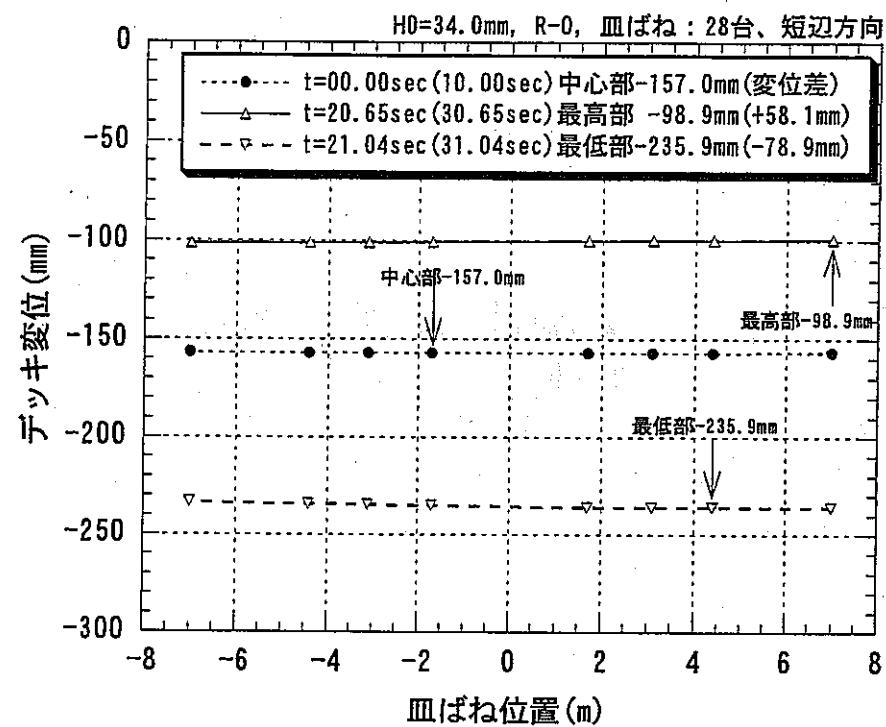


図 2.5.2-8 供用時コモンデッキの変形分布

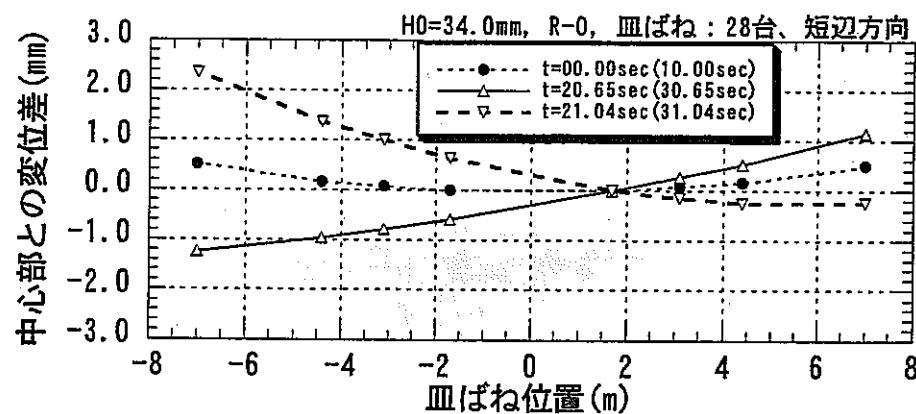


図 2.5.2-9 地震時コモンデッキの変形差分布（短辺方向）

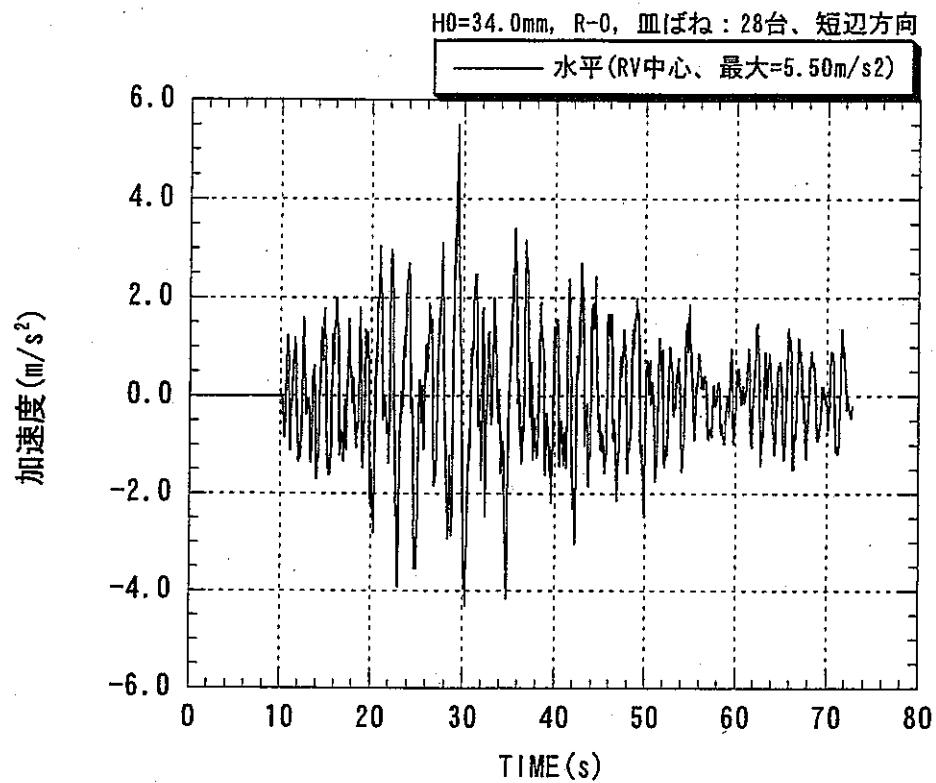


図 2.5.2-10 原子炉支持位置での水平応答加速度時刻暦波形（短辺方向）

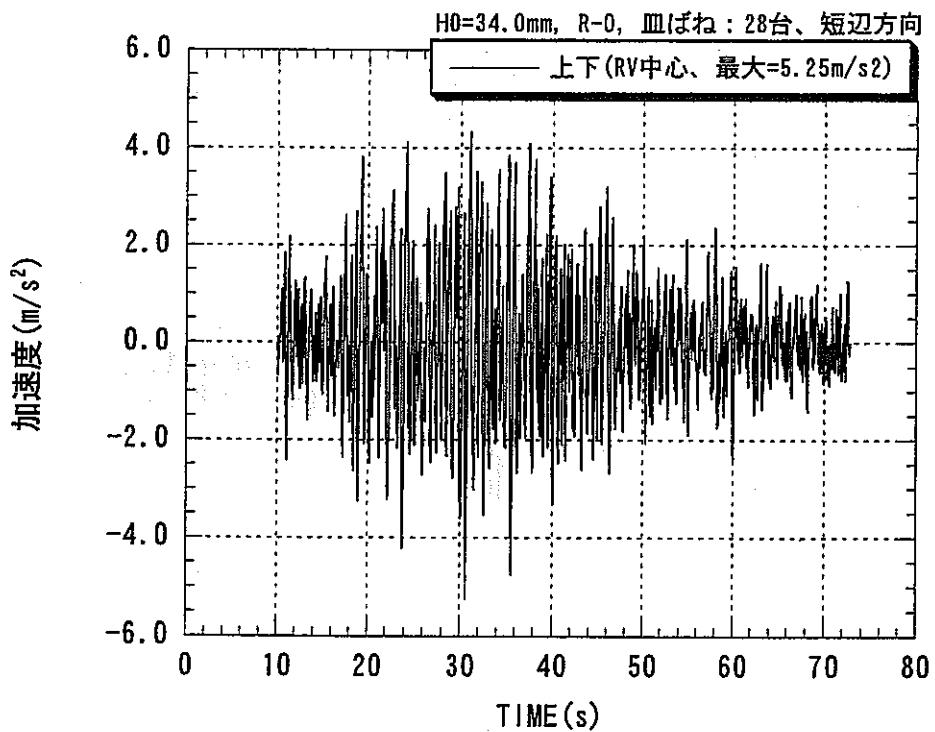


図 2.5.2-11 原子炉支持位置での上下応答加速度時刻暦波形（短辺方向）

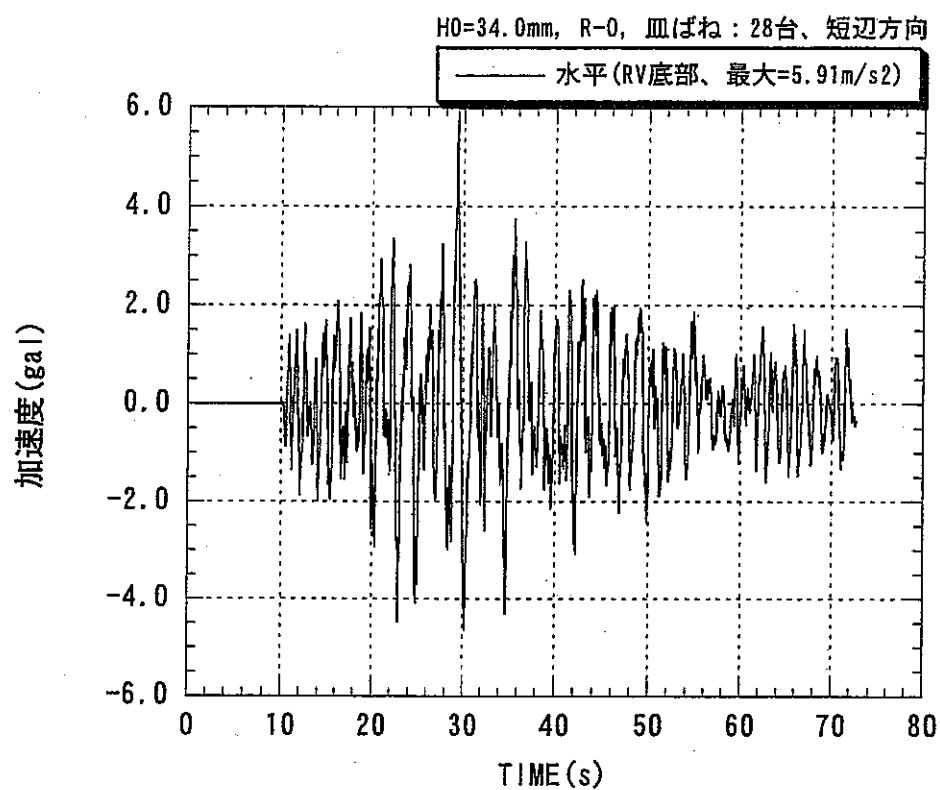


図 2.5.2-12 原子炉下部での水平応答加速度時刻暦波形（短辺方向）

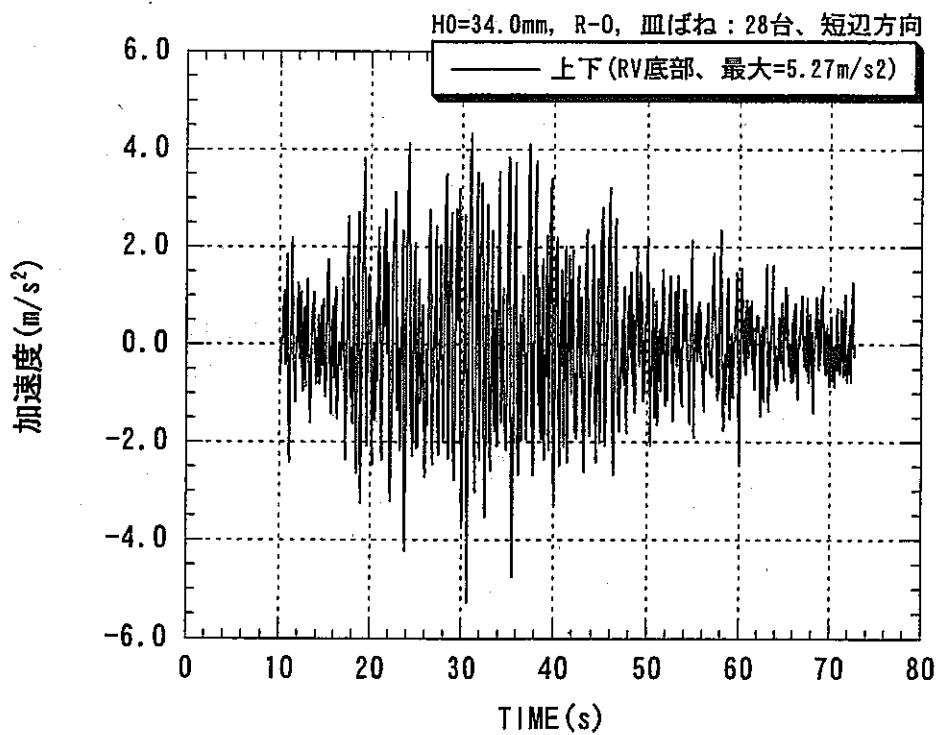


図 2.5.2-13 原子炉下部での上下応答加速度時刻暦波形（短辺方向）

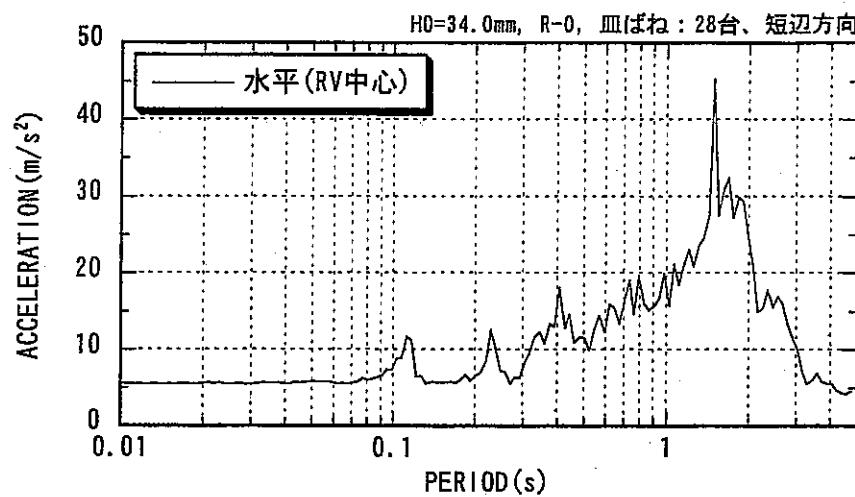


図 2.5.2-14 原子炉支持位置での水平床応答曲線（短辺方向）

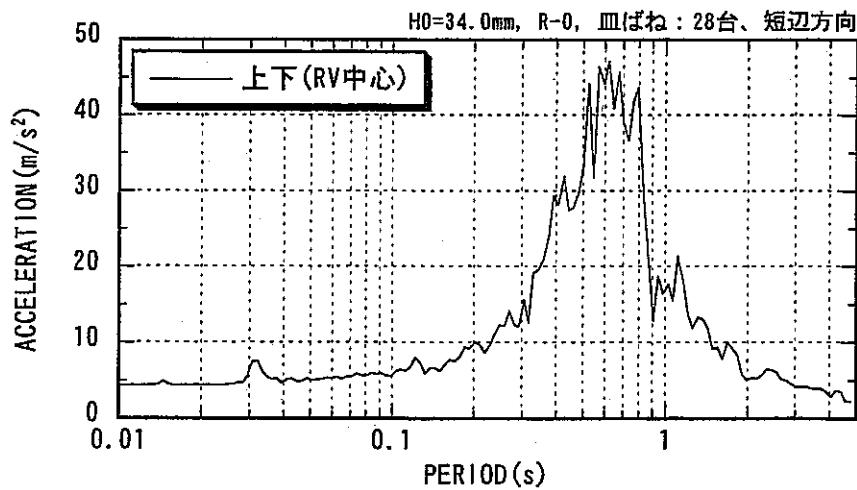


図 2.5.2-15 原子炉支持位置での上下床応答曲線（短辺方向）

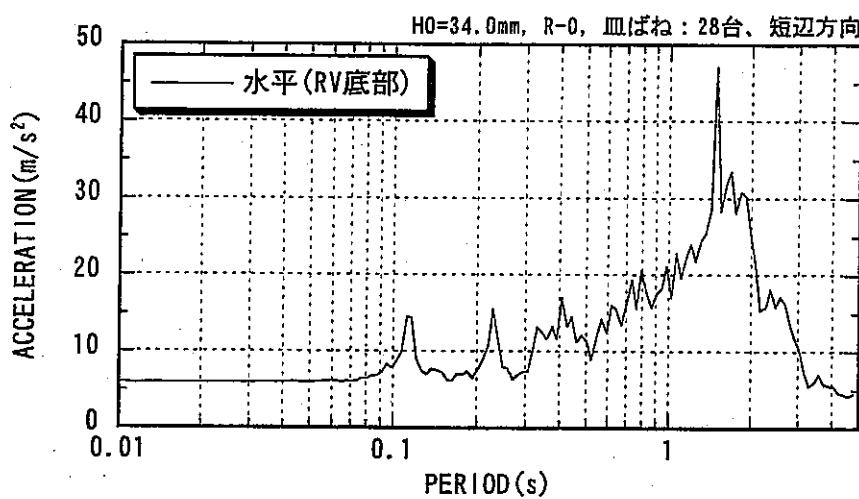


図 2.5.2-16 原子炉下部での水平床応答曲線（短辺方向）

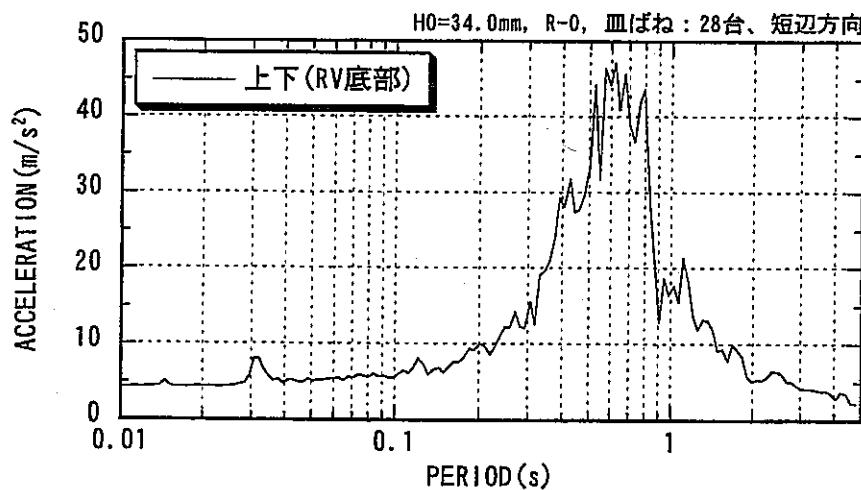


図 2.5.2-17 原子炉下部での上下床応答曲線（短辺方向）

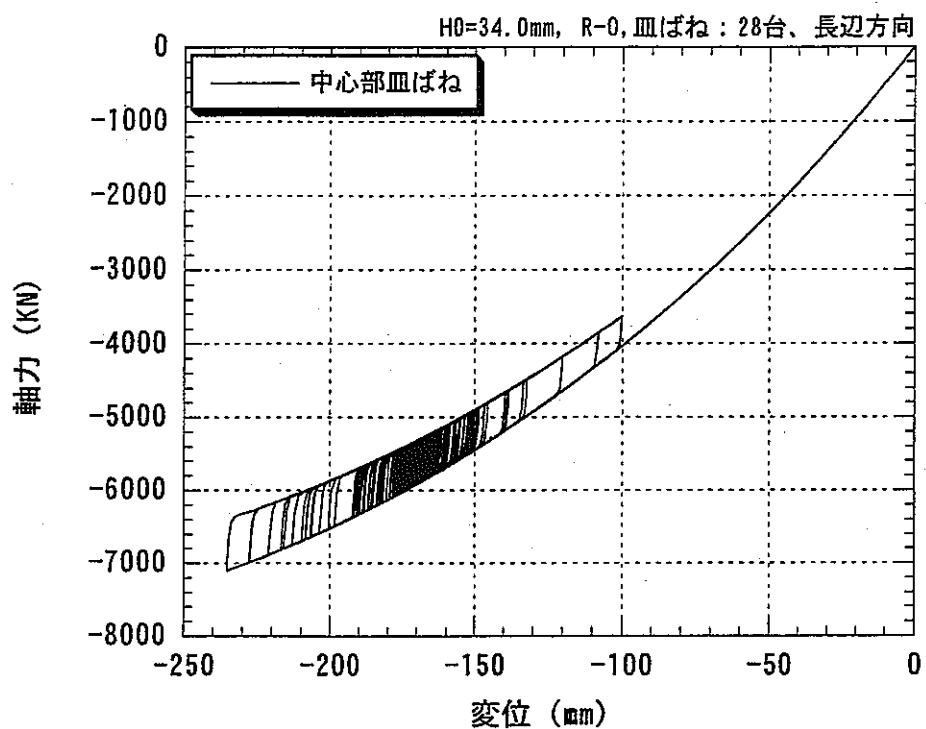


図 2.5.2-18 盤ばねの荷重一変位関係（長辺方向）

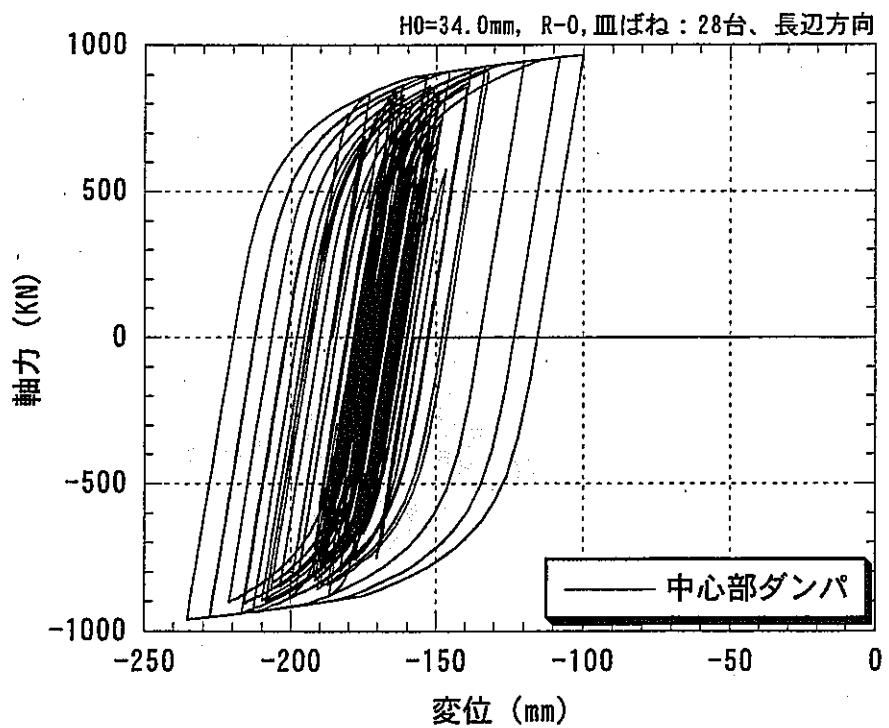


図 2.5.2-19 ダンパの荷重一変位関係（長辺方向）

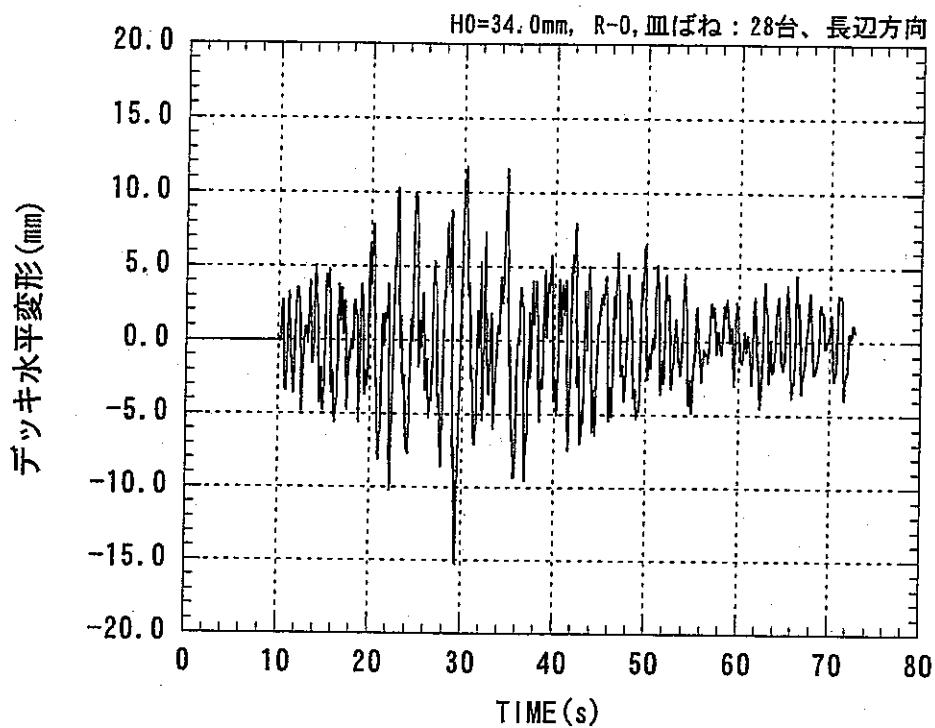


図 2.5.2-20 コモンデッキ水平応答変位波形（長辺方向）

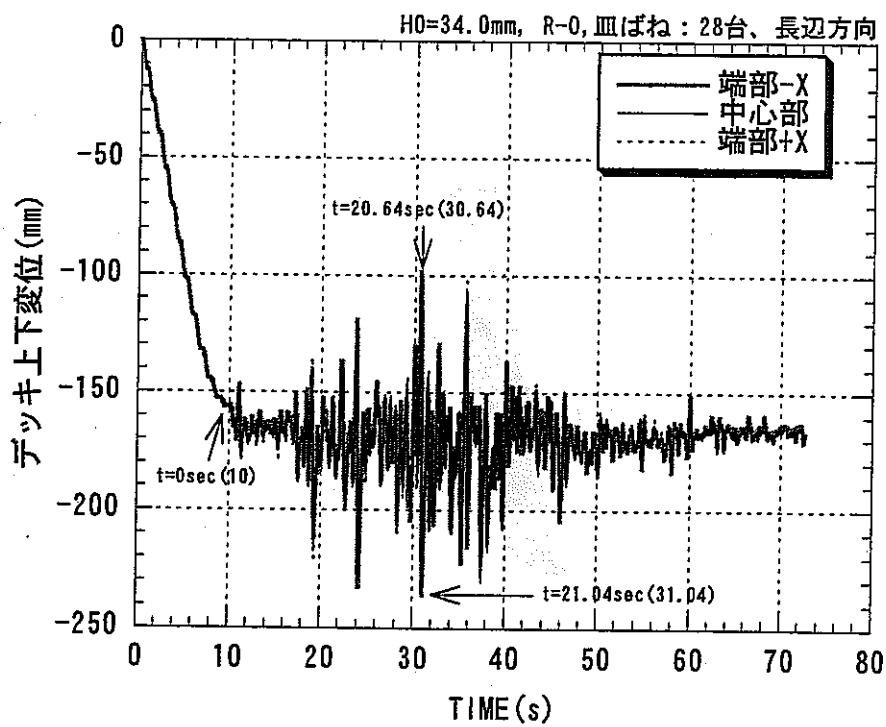


図 2.5.2-21 コモンデッキ上下応答変位波形の比較（長辺方向）

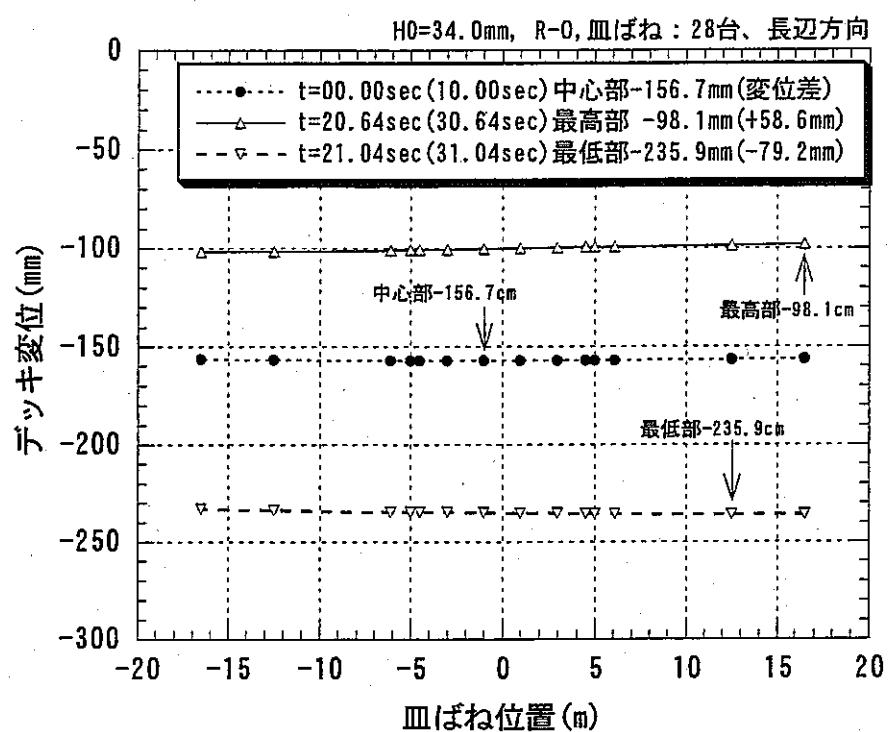


図 2.5.2-22 供用時コモンデッキの変形分布

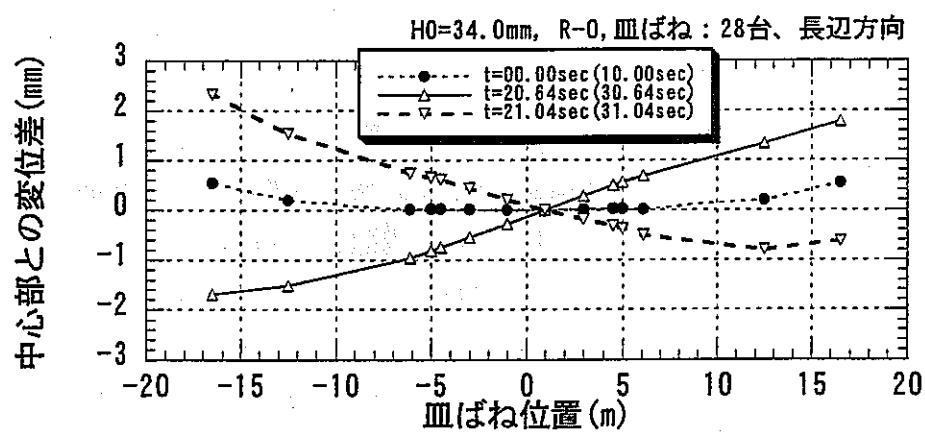


図 2.5.2-23 地震時コモンデッキの変形差分布（長辺方向）

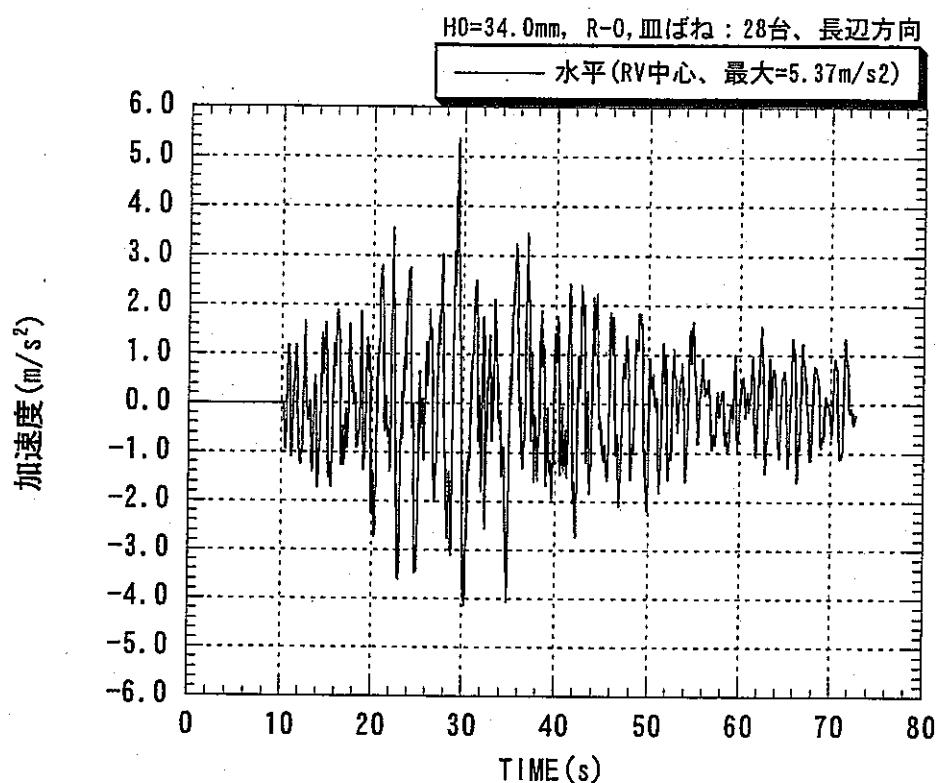


図 2.5.2-24 原子炉支持位置での水平応答加速度時刻暦波形（長辺方向）

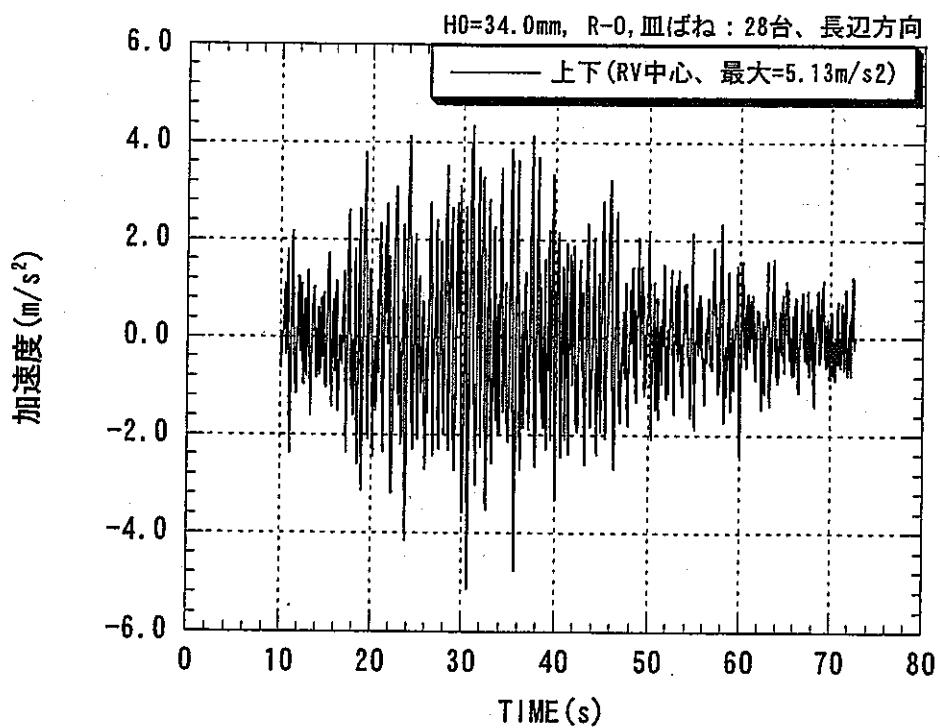


図 2.5.2-25 原子炉支持位置での上下応答加速度時刻暦波形（長辺方向）

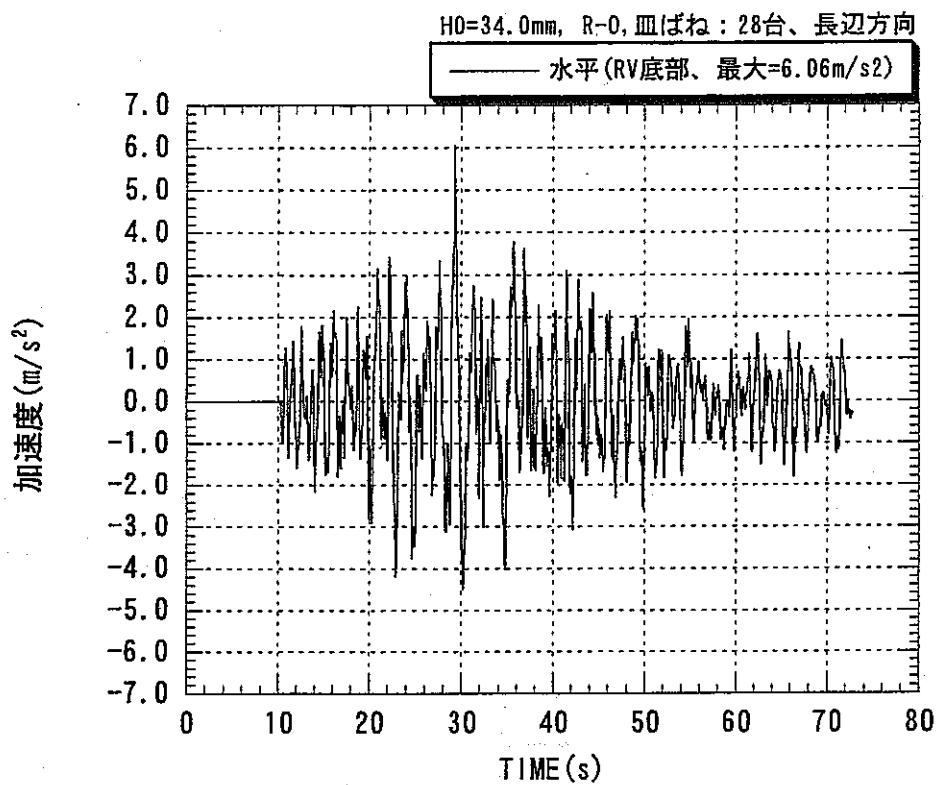


図 2.5.2-26 原子炉下部での水平応答加速度時刻暦波形（長辺方向）

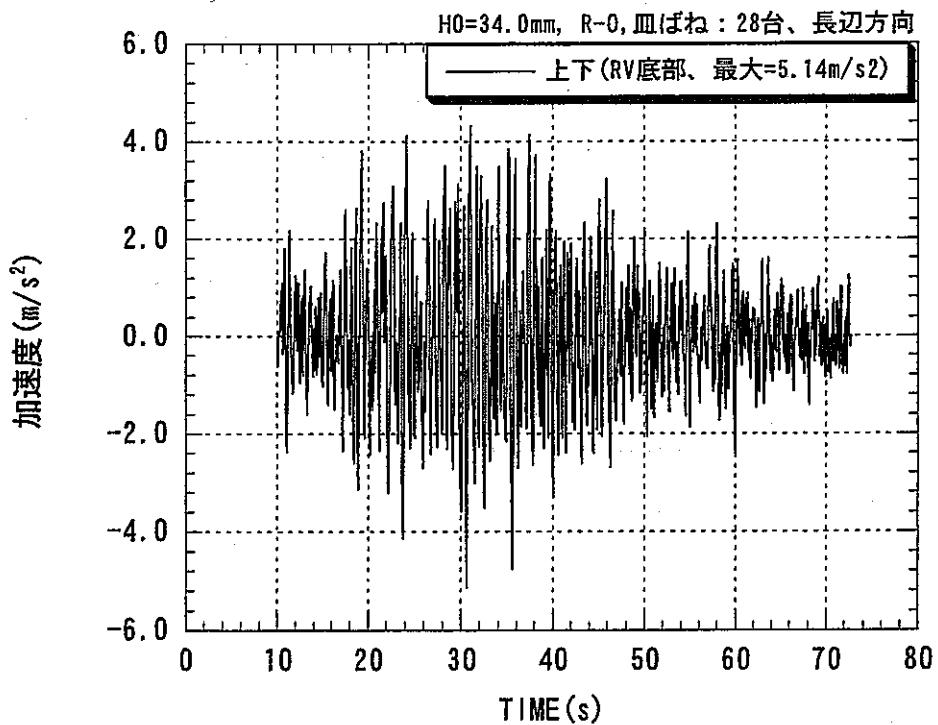


図 2.5.2-27 原子炉下部上下応答加速度時刻暦波形（長辺方向）

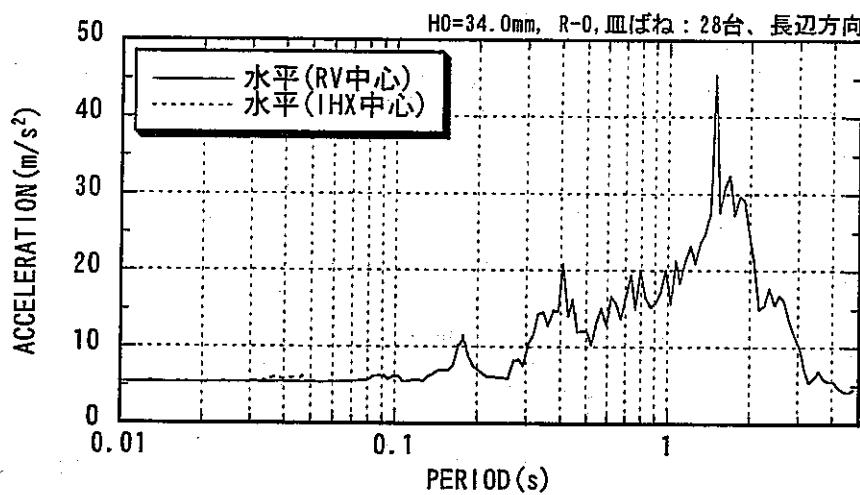


図 2.5.2-28 原子炉支持位置と IHX／ポンプ支持位置での水平床応答曲線の比較
(長辺方向)

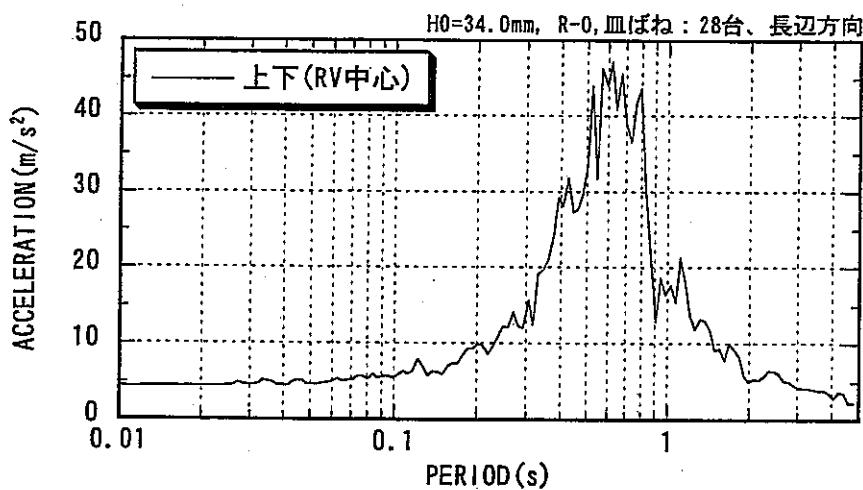


図 2.5.2-29 原子炉支持位置での上下床応答曲線（長辺方向）

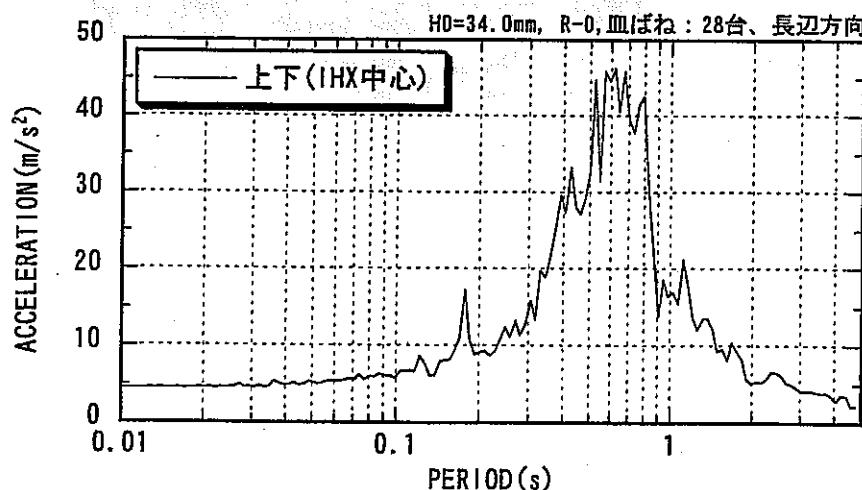


図 2.5.2-30 IHX／ポンプ支持位置での上下床応答曲線（長辺方向）

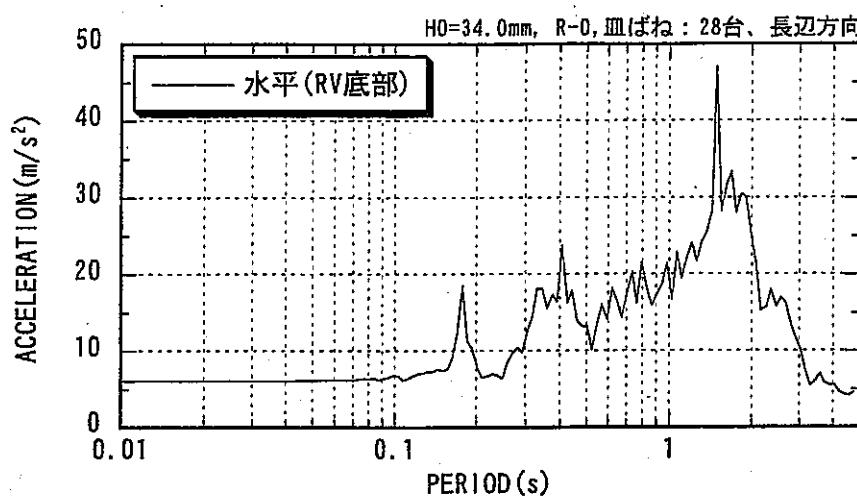


図 2.5.2-31 原子炉下部での水平床応答曲線（長辺方向）

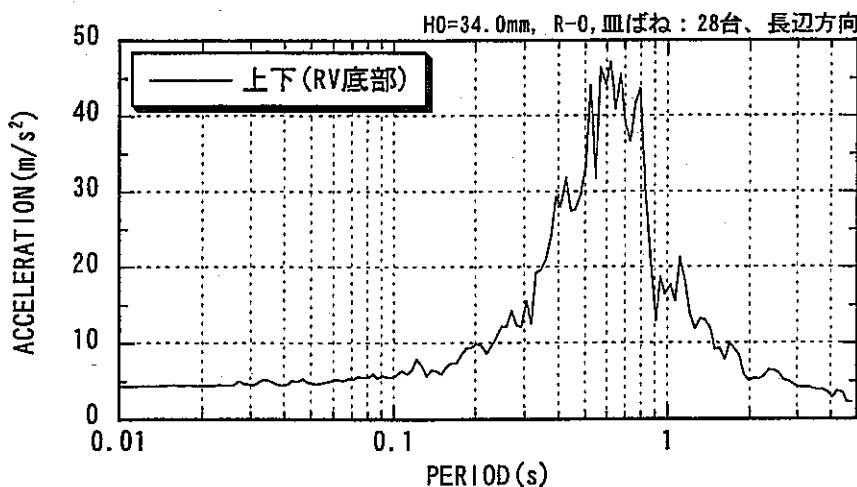


図 2.5.2-32 原子炉下部での上下床応答曲線（長辺方向）

2.6 機器上下免震装置の具体化検討

2.6.1 機器上下免震装置の設計方針及び各部構造の形状具体化

(1) 機器上下免震装置の設計方針

機器上下免震装置は、コモンデッキからの鉛直荷重を支持する主たる皿ばね（上下免震ユニット）と地震時の振動を抑える減衰装置より成る。以下に、設計方針を示す。

①上下免震ユニット近傍に、上下免震ユニット一基当たりに必要な減衰装置を一体化して配置することにより、機器上下免震構造のコンパクト化を図り、プラント配置への影響を極力小さくする。

②上下地震に対して、直並列に積み重ねた皿ばねユニット（集合体）が伸縮時の座屈（崩落）を防止し、かつ、滑らかな上下伸縮（摺動性）を誘導・実現する。

③水平地震に対しては、ガイド構造は強度抵抗型の構造とする。

④装置の取付時及び交換時には、一体吊込み・撤去が可能な構造とする。

(2) 各部構造の形状具体化について

機器上下免震装置を構成する各部構造は、主たる皿ばねの他に、ガイド構造及び減衰装置から成る。上記の設計方針に基づき、各部の構造形状の具体化を行った。

図 2.6.1-1 に、各部構造の形状具体化を示す。

a. ガイド構造

まず、皿ばねユニットの上下摺動時の座屈防止及び水平力に対する強度抵抗をガイド構造にて実現することを念頭に、皿ばねユニット用ガイド構造の基本的な構造について検討した。

皿ばねユニットの上下摺動時の座屈防止には、皿ばねの内径側にシャフトを通すこと、あるいは外径側での覆い（内部が見えなくなる）、部分的に皿ばねが接して内部が見えるフレーム形式が一般的に考えられる。しかし、納まりの寸法や皿ばねの検査性を考えると、皿ばねの検査が容易となる内径側のシャフトを通す方式が適当である。

一方、上下方向の摺動性確保の観点から、摺動部を皿ばねのユニット内、あるいは外（コモンデッキ側）に設けることが考えられが、摺動部は水平方向の荷重を受けると接触して荷重を伝達する部位であり、モーメントアームが長くなると変位制御及び強度抵抗が難しくなるので、皿ばねユニット中央部にて摺動を行うこととなる。

以上より、

- ①内径に納まるガイド構造の上下の摺動は、内筒（上側）及び外筒（下側）にて構成するピストン（嵌合構造）を考える。内外筒の摺動部分の隙間に、皿ばねがずれて摺動を阻害しない構造を考える。ガイド構造は、水平力に対して強度による荷重伝達が可能な部材断面厚と高張力の材料を用いる。摺動部において、内筒及び外筒の接触部をどのように処理するかが課題となる。
- ②ガイド構造と皿ばねユニットの隙間（クリアランス）は、皿ばねの座面の幅6.67mmを考慮して、3mm（=皿ばねの内径-ガイド構造の外径）とする。これは、他方の直列皿ばねが反対側に最大限ずれても、座面の範囲に納まり、構造的に安定（鉛直荷重の伝達）が確保できるとの考えによる。
- ③ガイド構造の内筒は、内筒胴部とコモンデッキ取付け用水平フランジと一体化してコモンデッキと緊結し、コモンデッキから外筒への水平荷重伝達とコモンデッキ全体の上下摺動を導く。
- ④外筒（内筒）は、内筒（外筒）を介して受けたコモンデッキからの水平荷重を下部構造へ伝達できる構造とする。また、外筒脚部を水平フランジと一体化させる。なお、内外筒の内部は空洞とすることにより、吊込み治具を外筒に固定し、皿ばねを含む装置の一体吊込み・撤去を可能にする構造とする。

b. 減衰装置

- ①減衰要素は、昨年度の検討結果を受けて、コモンデッキ側を固定点とする片持ち梁形式の構造とする。皿ばね1ユニット当たりに、必要な減衰力が確保できる本数を配置する。
- ②皿ばね1ユニットに配置する減衰装置全てが同じ動きを実現するため、荷重載荷点となる減衰要素の先端部を1箇所に集中取付が可能な配置及び構造とする。
- ③コモンデッキとの相対変位より生じる減衰装置の先端部への荷重は、上下免震装置の固定点（内部構造の円筒壁頂部）と繋ぎを介して伝達し、繋ぎの強度は皿ばね1ユニットに配置する複数の減衰装置の荷重に耐える構造とする。また、減衰要素が大きな変形を伴う場合に対して、要素材軸方向の長さの変化（減衰要素は円弧状に動くため、要素取付部は回転する）に追従可能な構造とする。なお、この構造は、吊り込み治具として兼用できる構造とする。

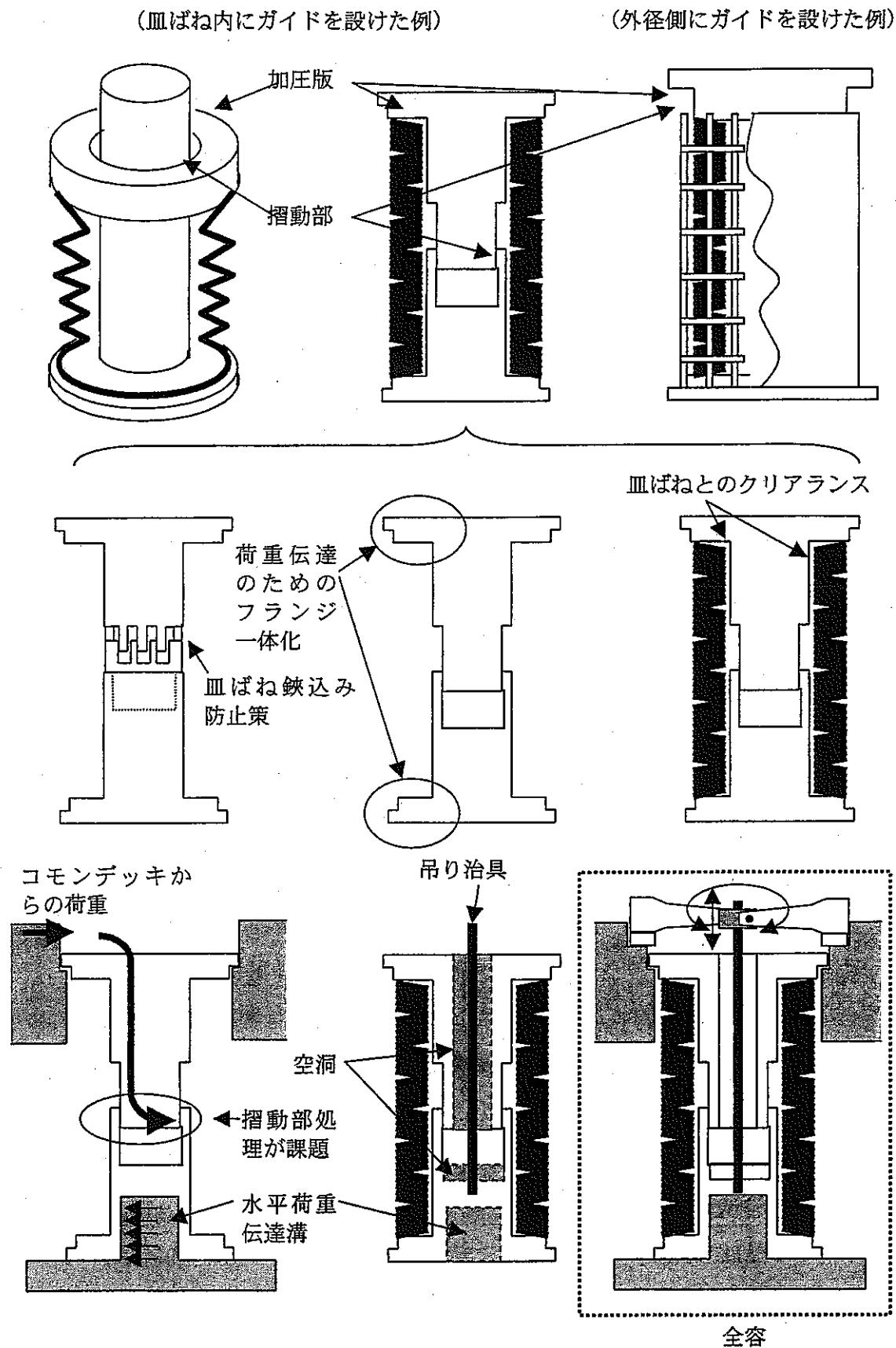


図 2.6.1-1 各部構造の形状具体化

2.6.2 ガイド構造の検討

(1) 構成部品の調査

2.6.1 章にて、ガイド構造の概略形状を具体化した。

本検討では、ガイド構造各部の構成部品及びその入手性を調査し、構成品の適用性について検討する。

ガイド構造は、内筒、外筒、内外筒をコモンデッキに取付けるフランジ、スライド部分から構成される。ここで、水平地震時にコモンデッキからの水平力はガイド構造を経由して下部構造へと伝達するため、その際のモーメントの反曲点を高さの半分とすると、フランジに取付く内外筒の脚部では応力が大きくなるので、一体構造であることが望ましい。そのため、ガイド構造は、フランジ付内筒及び外筒、スライド部分の3 パーツより構成されることに成る。

a. フランジ付内外筒

フランジと一体化した内外筒の形状は、内部の芯をくり貫いた釘のような形状となる。特注生産であるが、鋼塊から旋削加工により製作は可能である。

b. スライド部分

スライド部分は、水平力により内外筒にて力を伝達する必要があるので、摩擦係数が非常に小さいすべり支承のような構造となる。

摩擦係数が小さいすべり支承としては、以下が考えられる。

- ・テフロンシート（高分子化合物：動的摩擦係数=0.08～0.10）
- ・リニアガイド（通常、潤滑材としてグリースを用いる。オイルレスは、摩擦係数が高くなる）
- ・鋼球（乾式潤滑材として、二硫化モリブデンの焼き付け塗装：摩擦係数=0.005）

ここで、テフロンは熱膨張係数が金属と異なり、しわが寄り易いこと、また、使用環境・条件（温度、放射線管理区域、オイルレス）を考慮すると、乾式及び無機物のすべり支承である鋼球を適用することになる。市販されている鋼球の寸法は、使用を予定しているサイズ（20mm）近傍では1mm 単位で入手可能であり、1mm の間を補完するようにインチサイズの鋼球が入手できる。鋼球のサイズは、内筒及び外筒が構造的に成立する寸法（筒の肉厚）と鋼球の耐力から決まることとなる。

なお、以下に示す FEM 解析を行うに際して、断面厚等を設定するための事前検討を行った。

(2) FEM 解析によるガイド構造の強度検討

a. 解析方法及び条件

水平力に対するガイド構造の強度の検討を行った。ガイドは、ケーススタディ波 S2 上下動により最も伸び切った状態にて強度検討を行う。この際、減衰装置から受ける荷重についても考慮する。

ガイド構造は、基本的には軸対象回転体であるが、ガイド構造の下部には減衰装置からの荷重を受ける下部取付軸を固定するための断面欠損があるため、強軸（0 度方向）と弱軸（90 度方向：加力線上に断面欠損部有り）の方向性を有している。そこで、FEM 解析では、方向性を考慮して 2 方向（0 度方向、90 度方向）について行った。

図 2.6.2-1 に、解析モデル及び固定条件を示す。

内筒に接続するフランジ厚は、ボルト固定部で 100mm、内外筒と接続する部分で 150mm である。内筒の肉厚は、脚部 75mm、スライド部 50mm である。また、外筒に接続するフランジ厚は一律 90mm、外筒は脚部 45mm 及びスライド部 30mm である。鋼球のサイズは、7/8 インチ（22.225mm）である。

解析定数として、ガイド構造は鋼材（ヤング係数 206GPa、ポアソン比 0.3）を仮定して弾性とする。また、鋼球は、非線形ばね（機械工学便覧 A3-37,167 日本機械学会編 1987）で与えた。ガイド構造に加える水平力は、水平応答結果 0.5G（支持荷重：2.7MN）に対して約 1.5 倍の余裕を考慮して設定した。

b. 解析結果

図 2.6.2-2 より、ガイドに生じる最大応力はで 653N/mm^2 あり、高張力の鋼材を用いる必要がある。また、図 2.6.2-3 より、減衰装置下部取付け軸に発生する最大応力は 433N/mm^2 であり、同様に高強度の鋼材を用いる必要がある。

図 2.6.2-5 は、鋼球の荷重が最大となる 1 列の荷重分布（縦軸は下からの鋼球段数）を示す。強軸（0 度）及び弱軸（90 度）方向加力において、最大荷重となる最下段の鋼球が 1100kgf であるが、安全率を考慮した鋼球の許容値 1318kgf を満足している。なお、安全率には幅があるため、試験による作動の健全性確認が必要である。

図 2.6.2-6 より、ガイド構造の水平荷重時変形は、最上部及び最下部での回転変形であり、スライドする部分での変形はほとんど直線的である。

図 2.6.2-7 より、M33 の高力ボルトでは耐力的に健全であることを確認した。

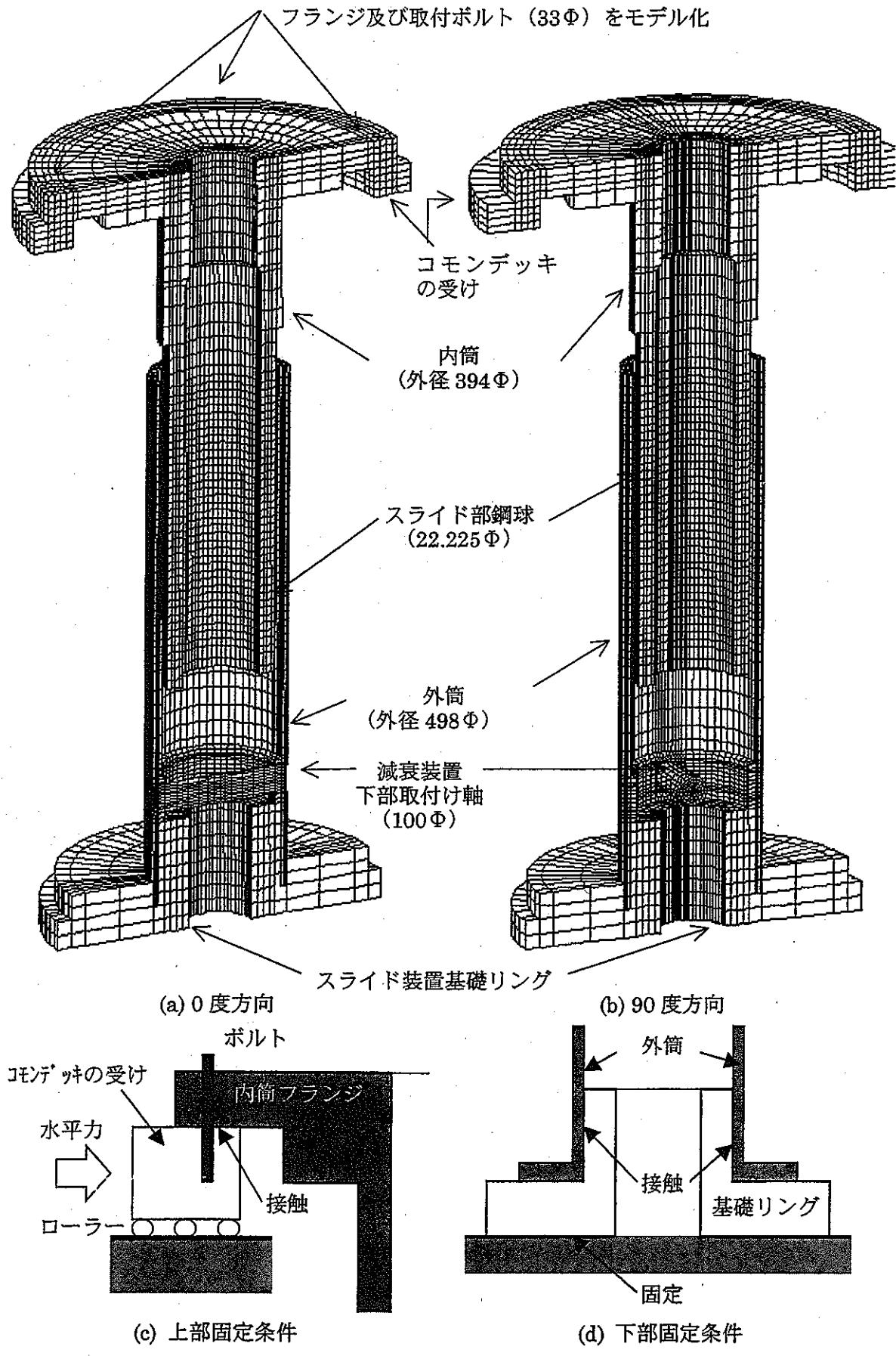


図 2.6.2-1 ガイド構造の FEM 解析モデルと固定条件

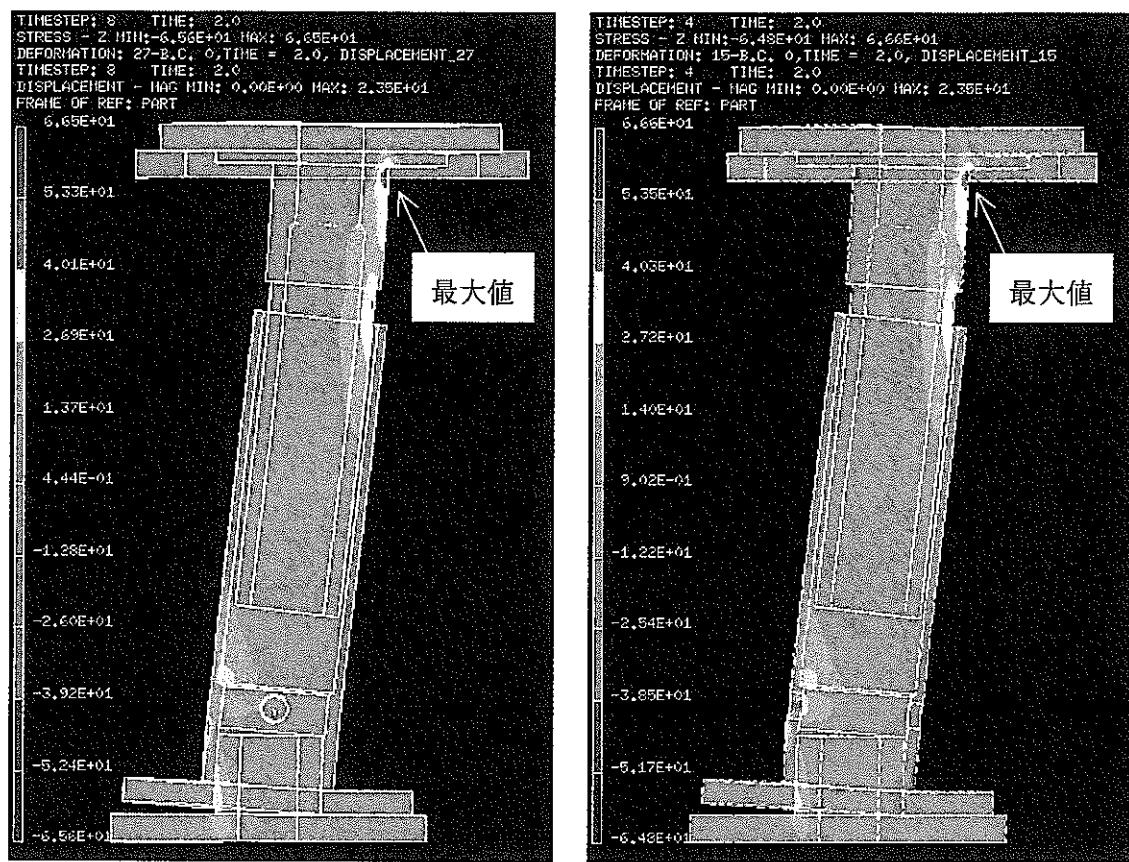


図 2.6.2-2 ガイド構造の FEM 解析結果
(水平変形 : 23.5mm、荷重 : 2MN、変形を 10 倍拡大)

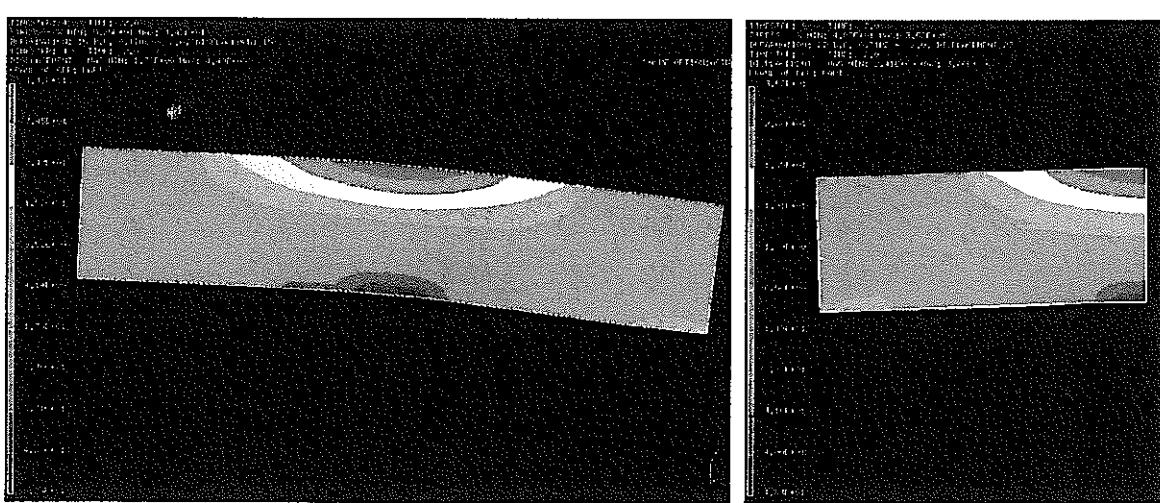


図 2.6.2-3 減衰装置下部取付け軸の FEM 解析結果
(水平変形 : 23.5mm、荷重 : 2MN、変形を 10 倍拡大)

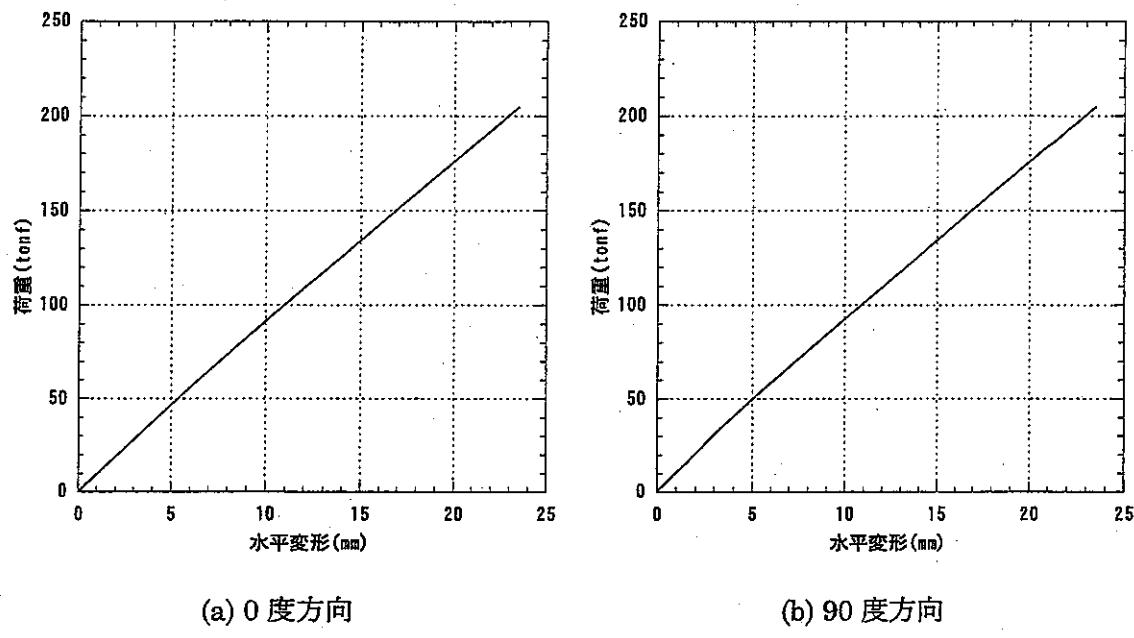


図 2.6.2-4 ガイド構造の水平方向荷重—変位関係

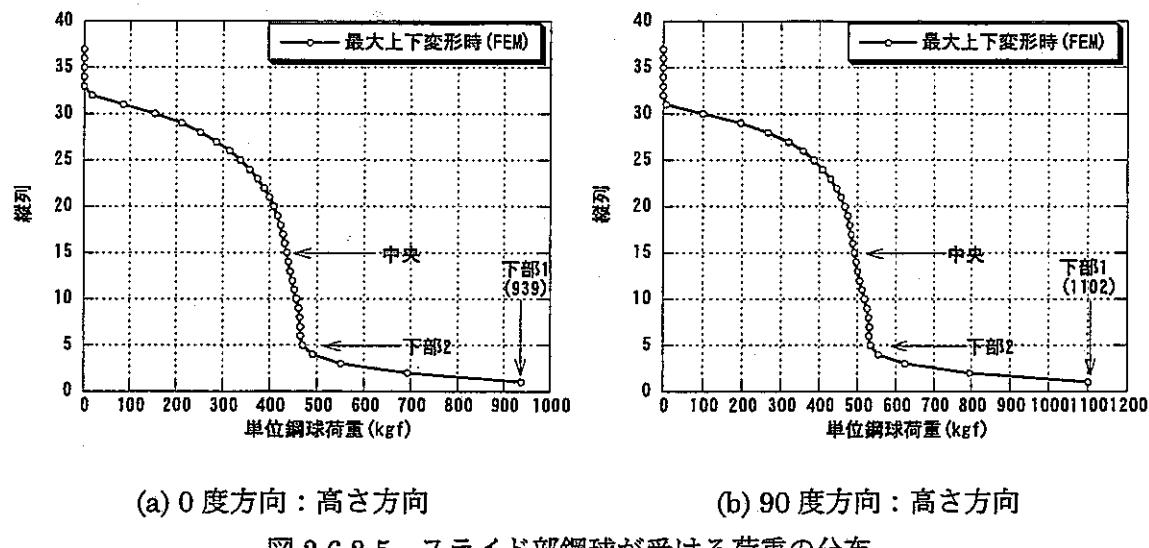


図 2.6.2-5 スライド部鋼球が受ける荷重の分布

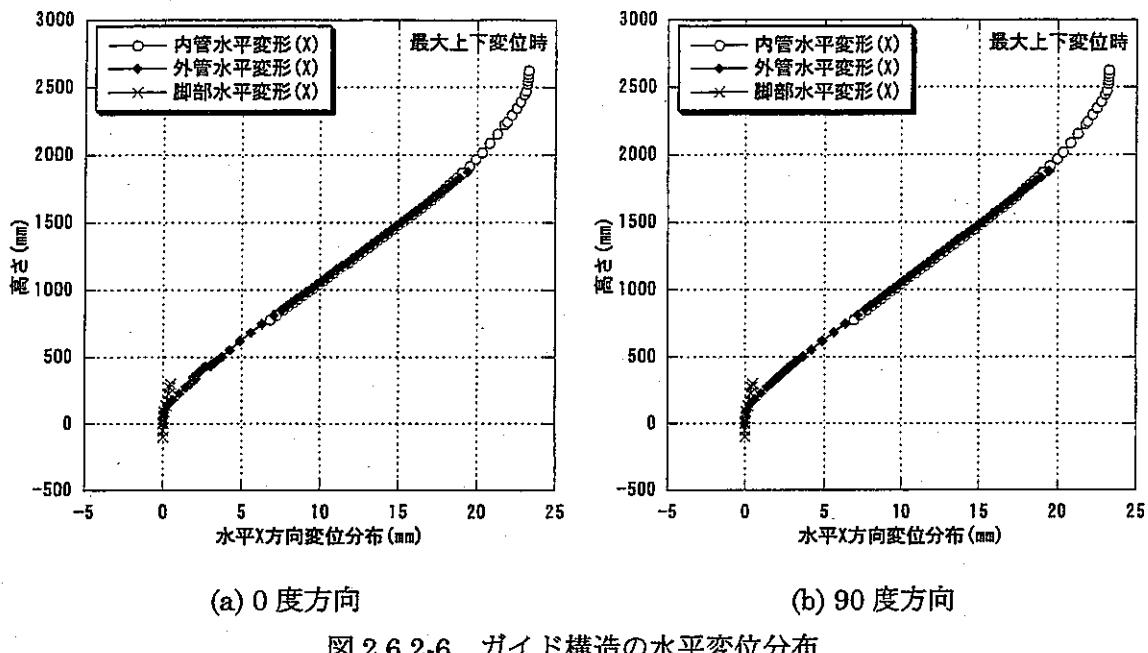


図 2.6.2-6 ガイド構造の水平変位分布

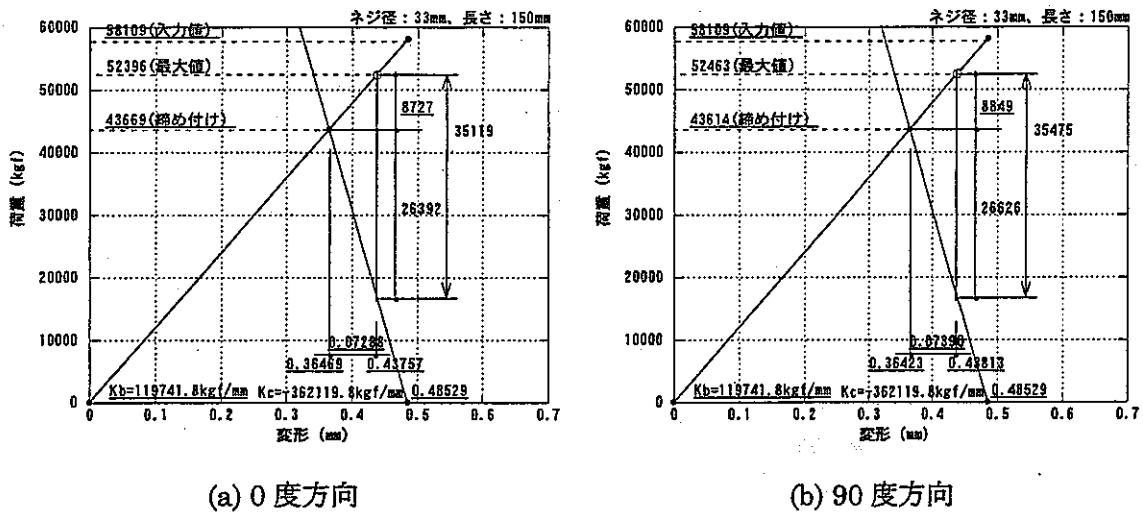


図 2.6.2-7 ポルトの検討

2.6.3 全体組立図及び各部詳細図

これまでの検討結果を踏まえ、機器上下免震構造を具体化した。

図 2.6.3-1～10 に、全体組立図及び各部詳細図を示す。

- 図 2.6.3-1 上下免震ユニット総合図(中立変位時の全体側面図)
- 図 2.6.3-2 上下免震ユニット総合図(中立変位時の全体側面図・断面平面図)
- 図 2.6.3-3 上下免震ユニット総合図(最高変位時の全体側面図)
- 図 2.6.3-4 上下免震ユニット総合図(最低変位時の全体側面図)
- 図 2.6.3-5 上下免震ユニット部分詳細図(3連リング平面・断面図)
- 図 2.6.3-6 上下免震ユニット部分詳細図(皿ばね水平拘束板最高変位時図)
- 図 2.6.3-7 上下免震ユニット部分詳細図(皿ばね水平拘束板最低変位時図)
- 図 2.6.3-8 上下免震ユニット部分詳細図(鋼球集合体組立平面・側面図)
- 図 2.6.3-9 上下免震ユニット部分詳細図(鋼球集合体組立平面・側面拡大図)
- 図 2.6.3-10 上下免震ユニット部分詳細図(下部軸周辺詳細図)

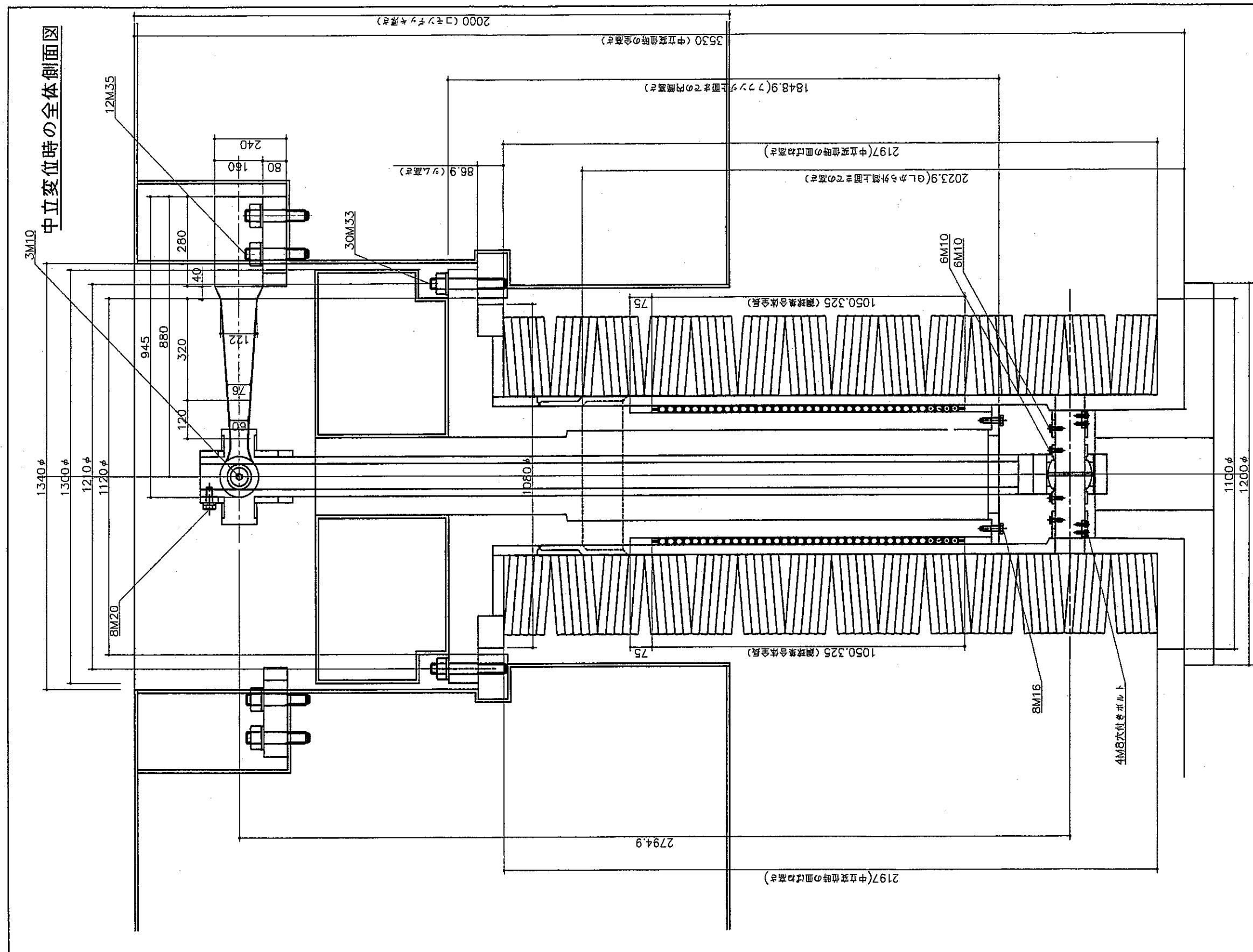


図 2.6.3-1 上下免震ユニット総合図（中立変位時の全体側面図）

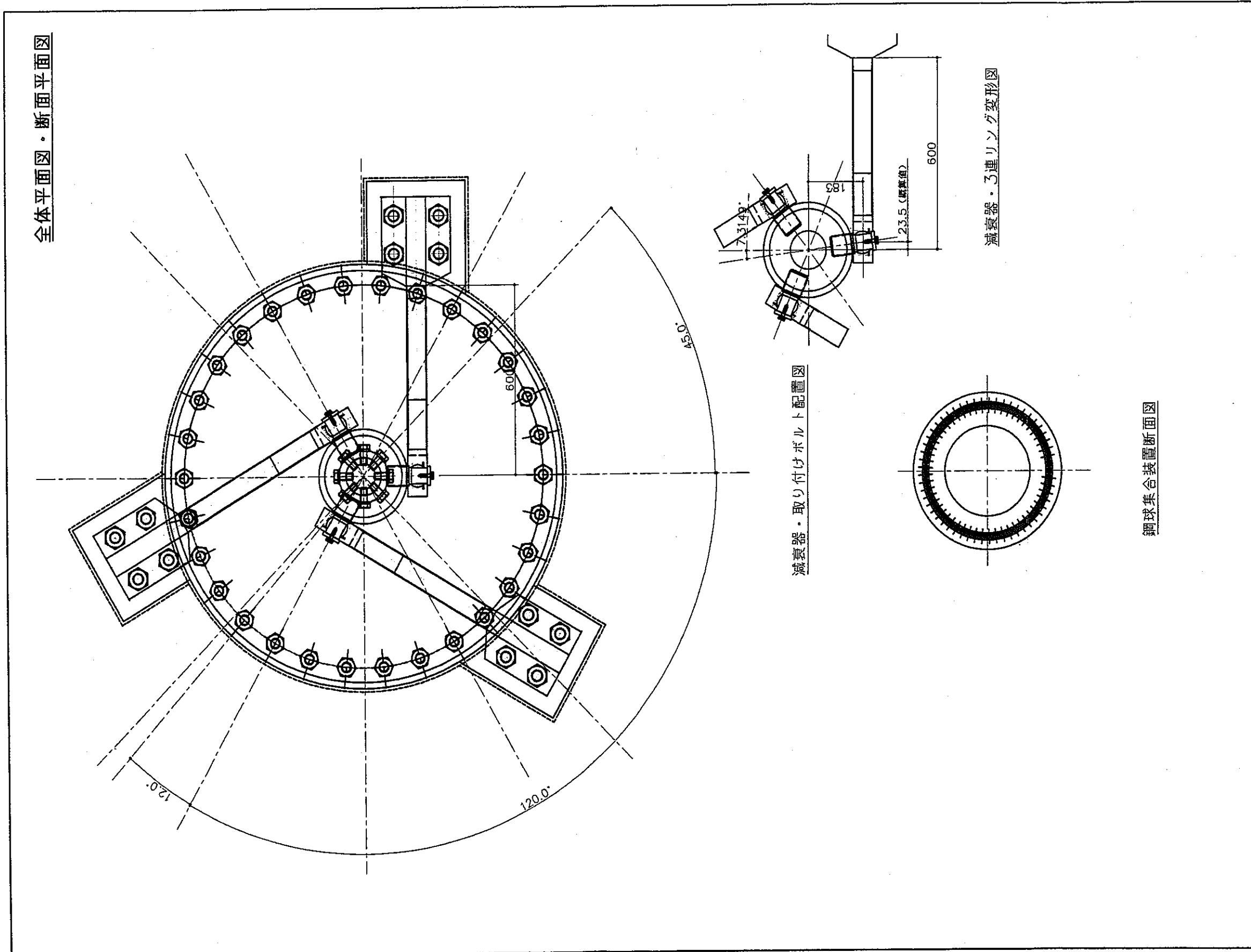


図 2.6.3-2 上下免震ユニット総合図（中立変位時の全体平面・断面平面図）

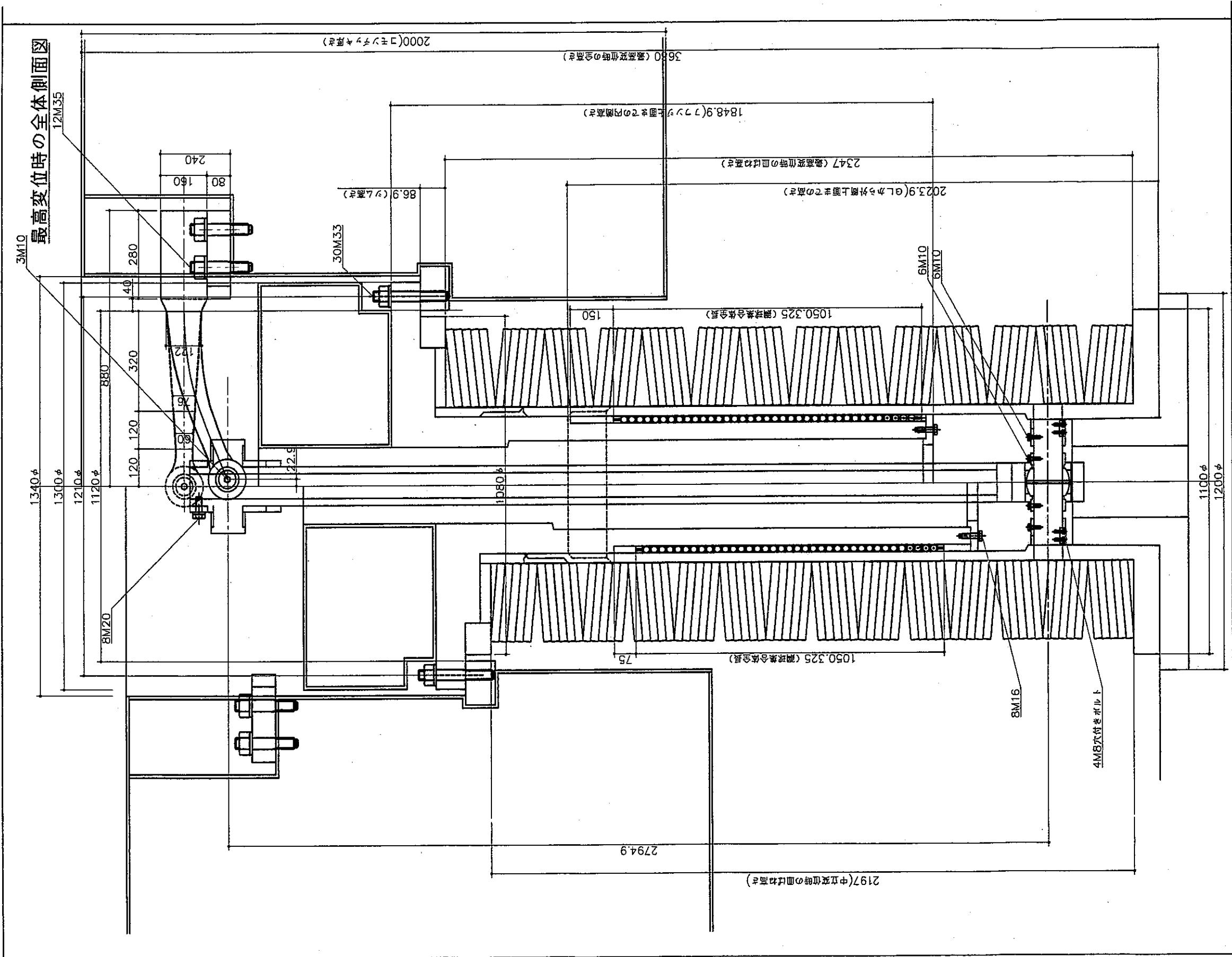


図 2.6.3-3 上下免震ユニット総合図（最高変位時の全体側面図）

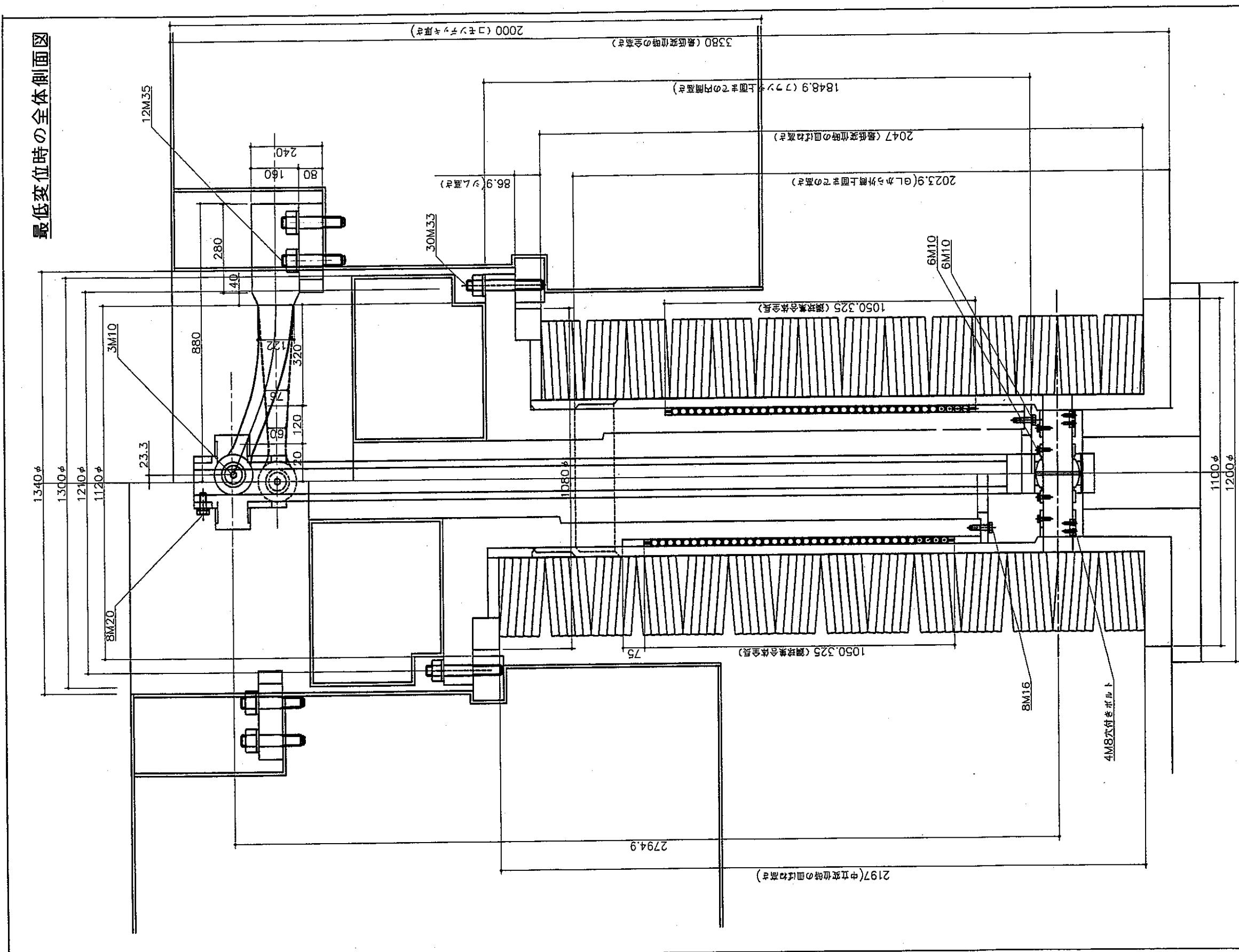


図 2.6.3-4 上下免震ユニット総合図（最低変位時の全体側面図）

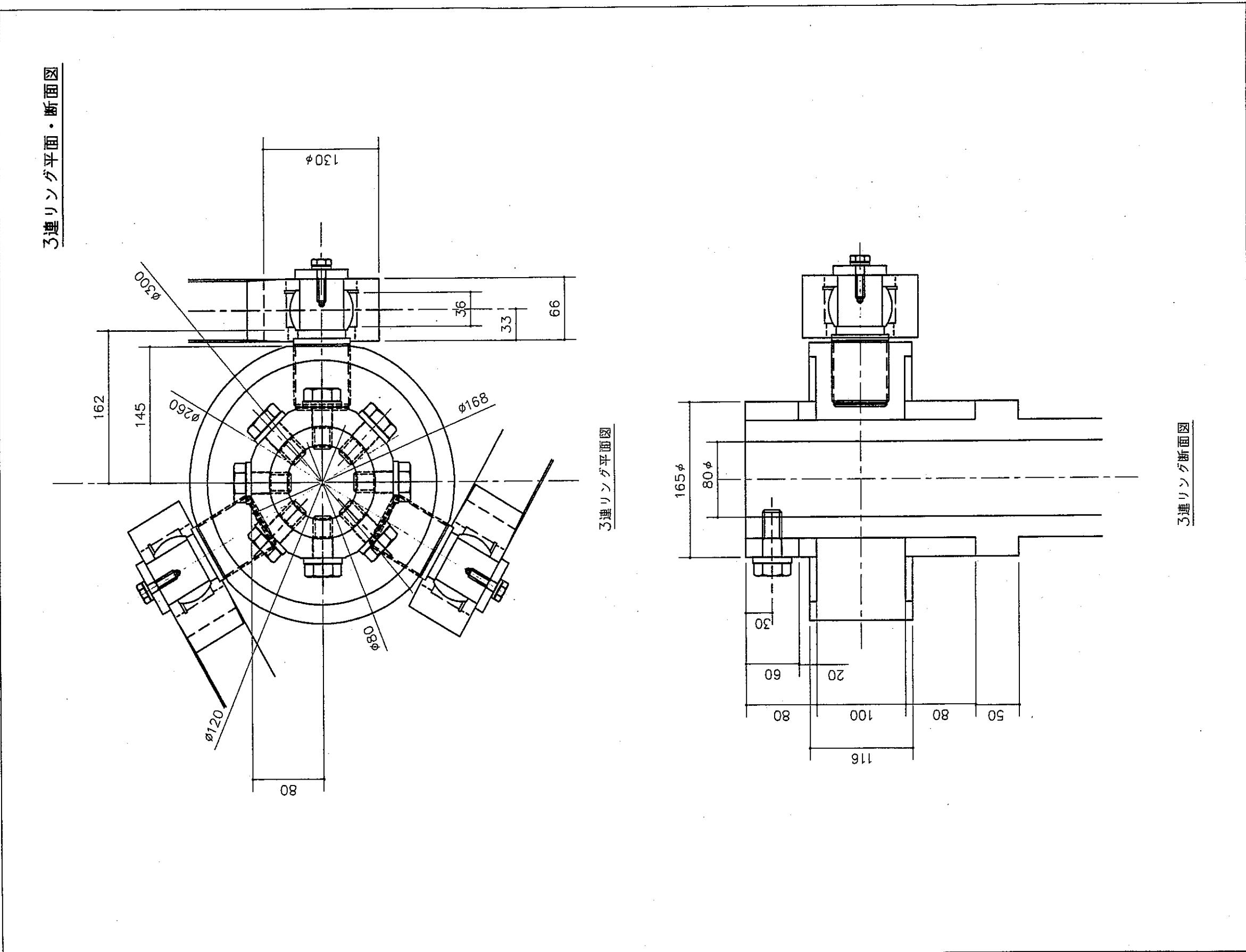


図 2.6.3-5 上下免震ユニット部分詳細図（3連リング平面・断面図）

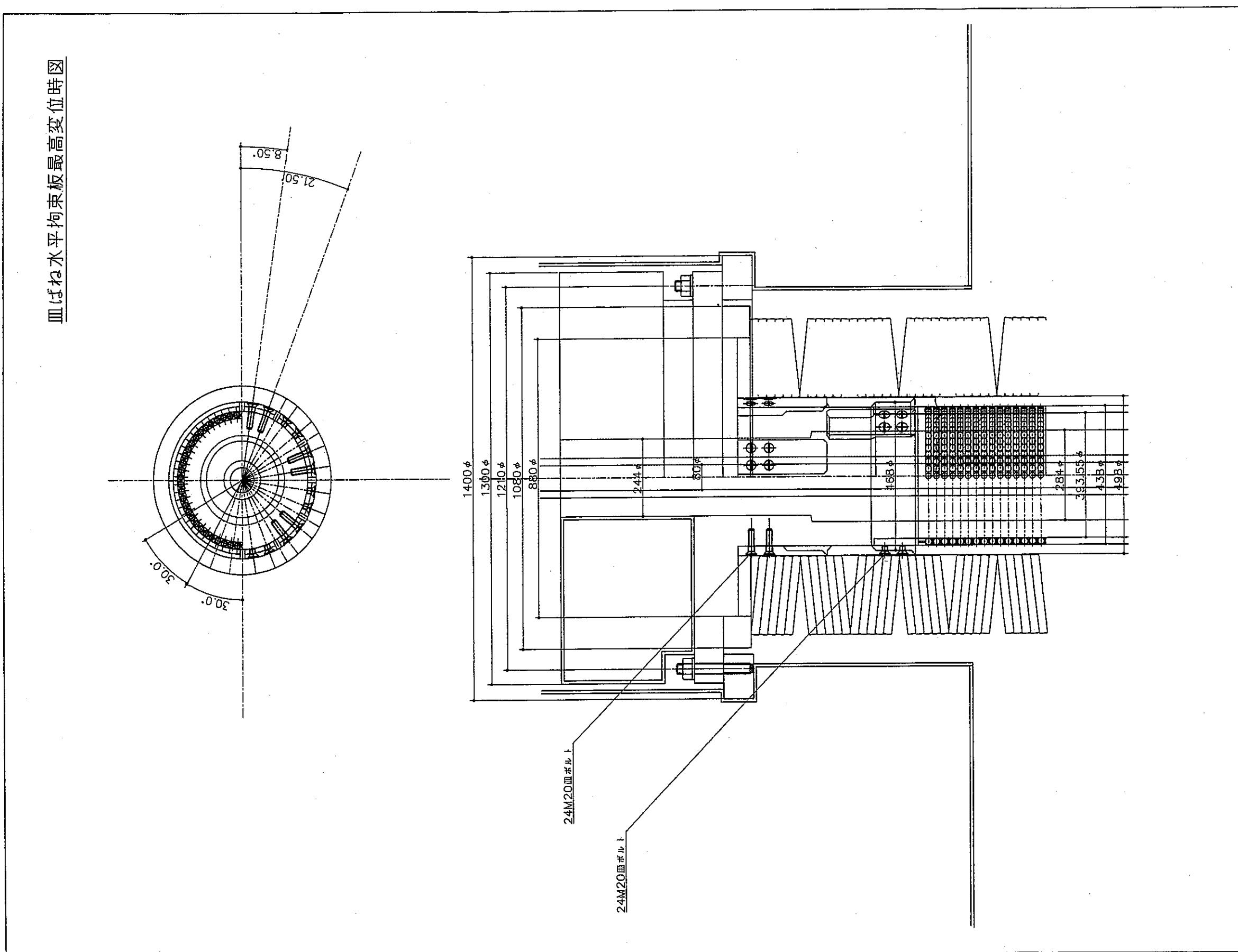


図 2.6.3-6 上下免震ユニット部分詳細図（皿ばね水平拘束板最高変位時図）

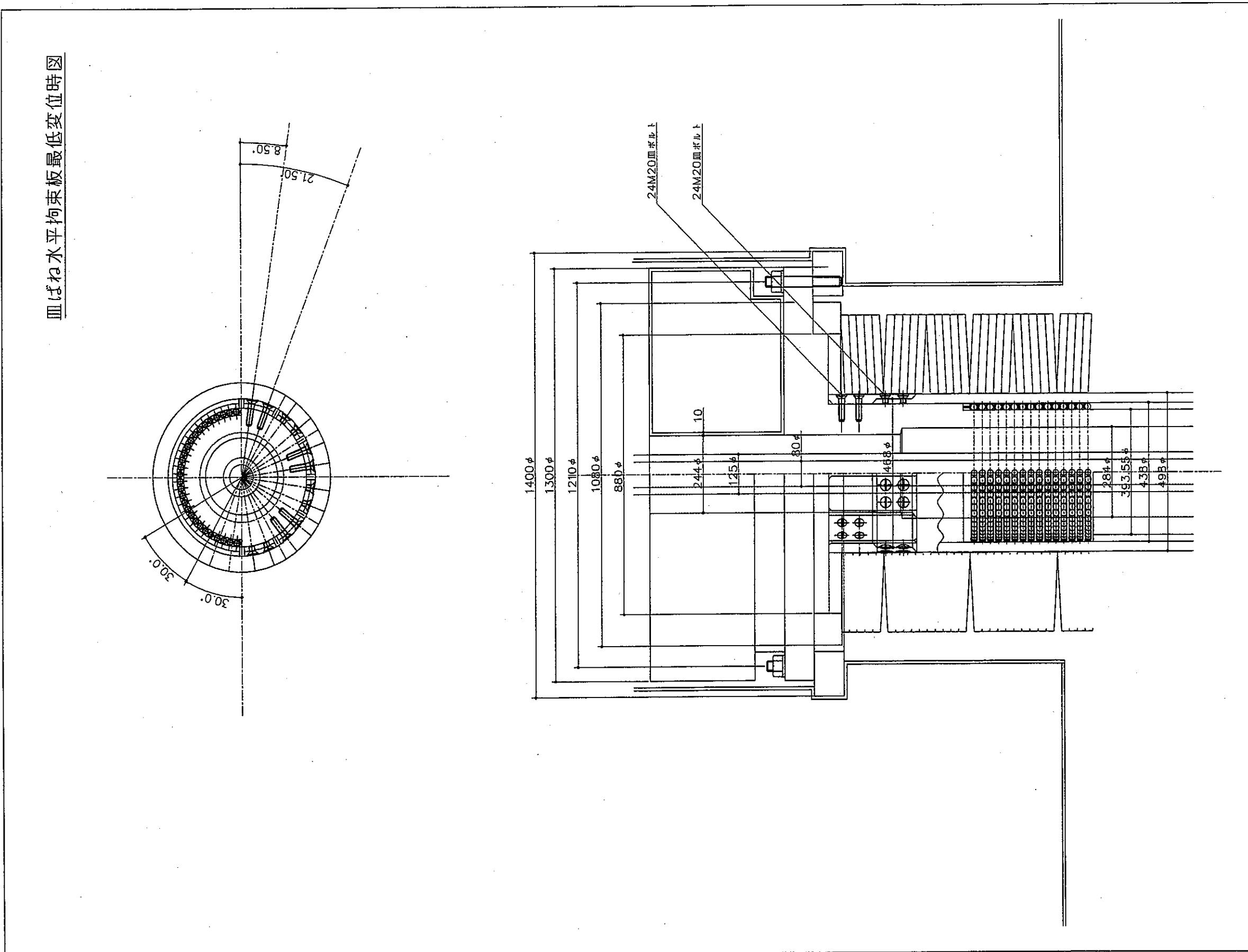
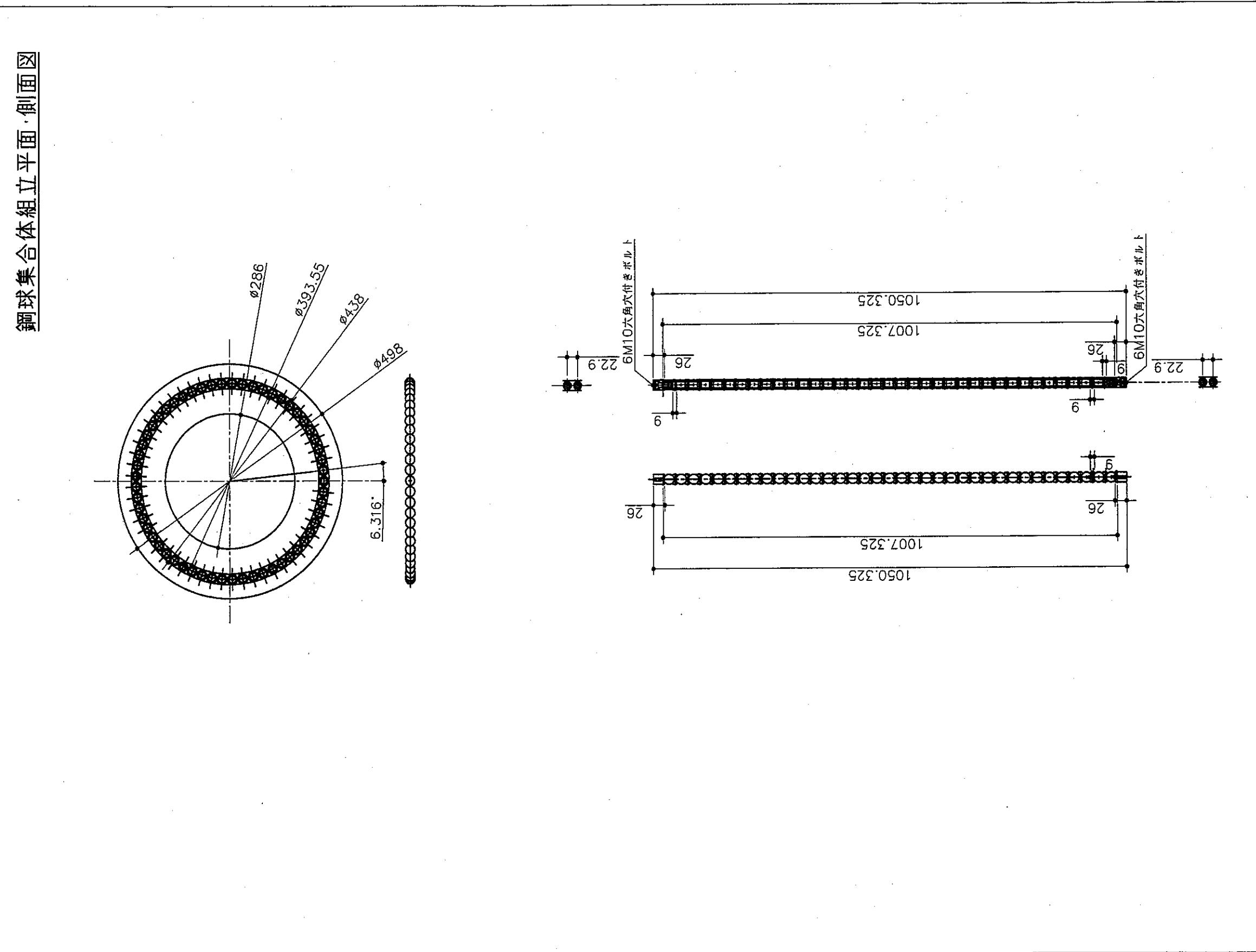
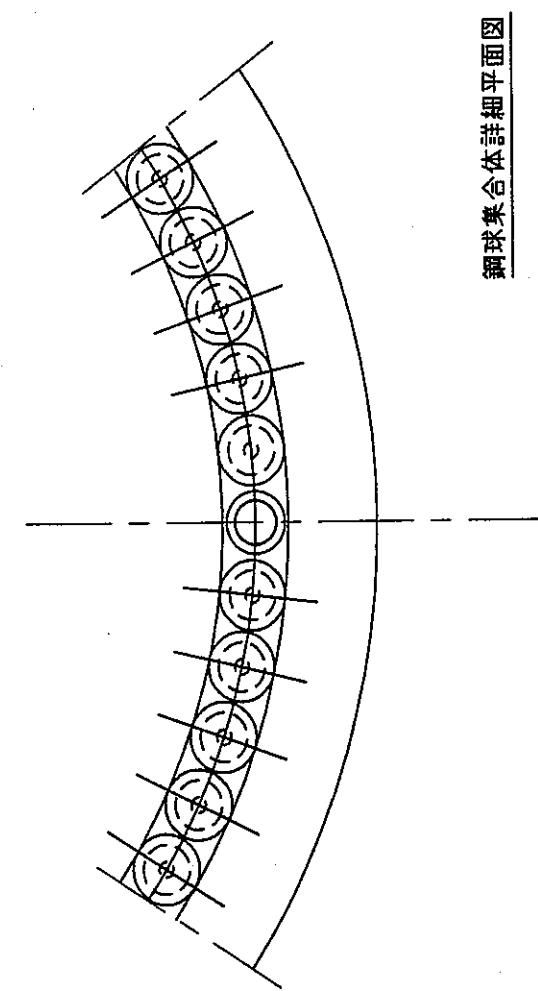


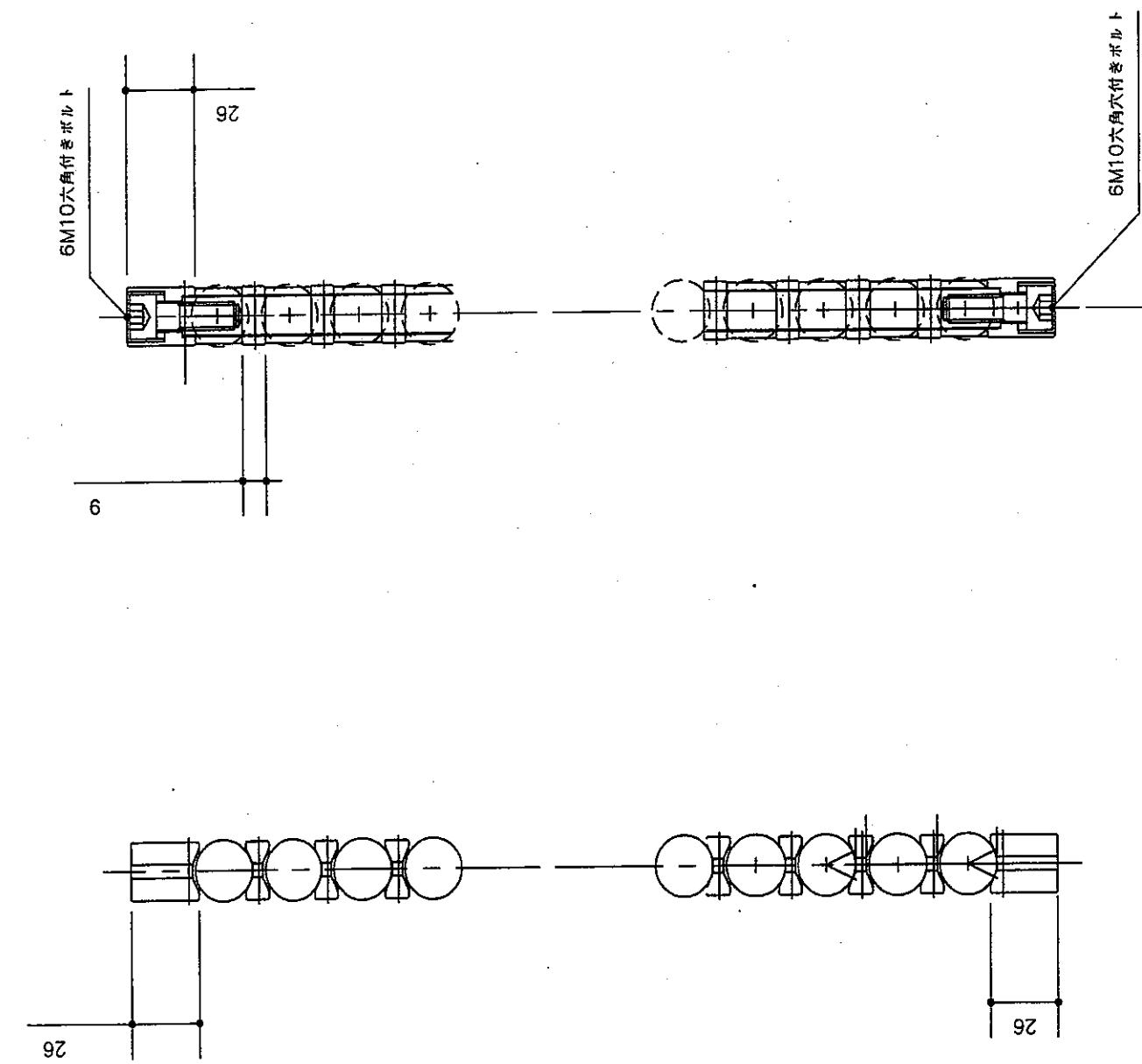
図 2.6.3-7 上下免震ユニット部分詳細図（皿ばね水平拘束板最低変位図）



鋼球集合体詳細部分図



鋼球集合体詳細平面図



鋼球リテーナ・固定棒側面図

鋼球集合体詳細側面図

図 2.6.3-9 上下免震ユニット部分詳細図（鋼球集合体組立平面・側面拡大図）

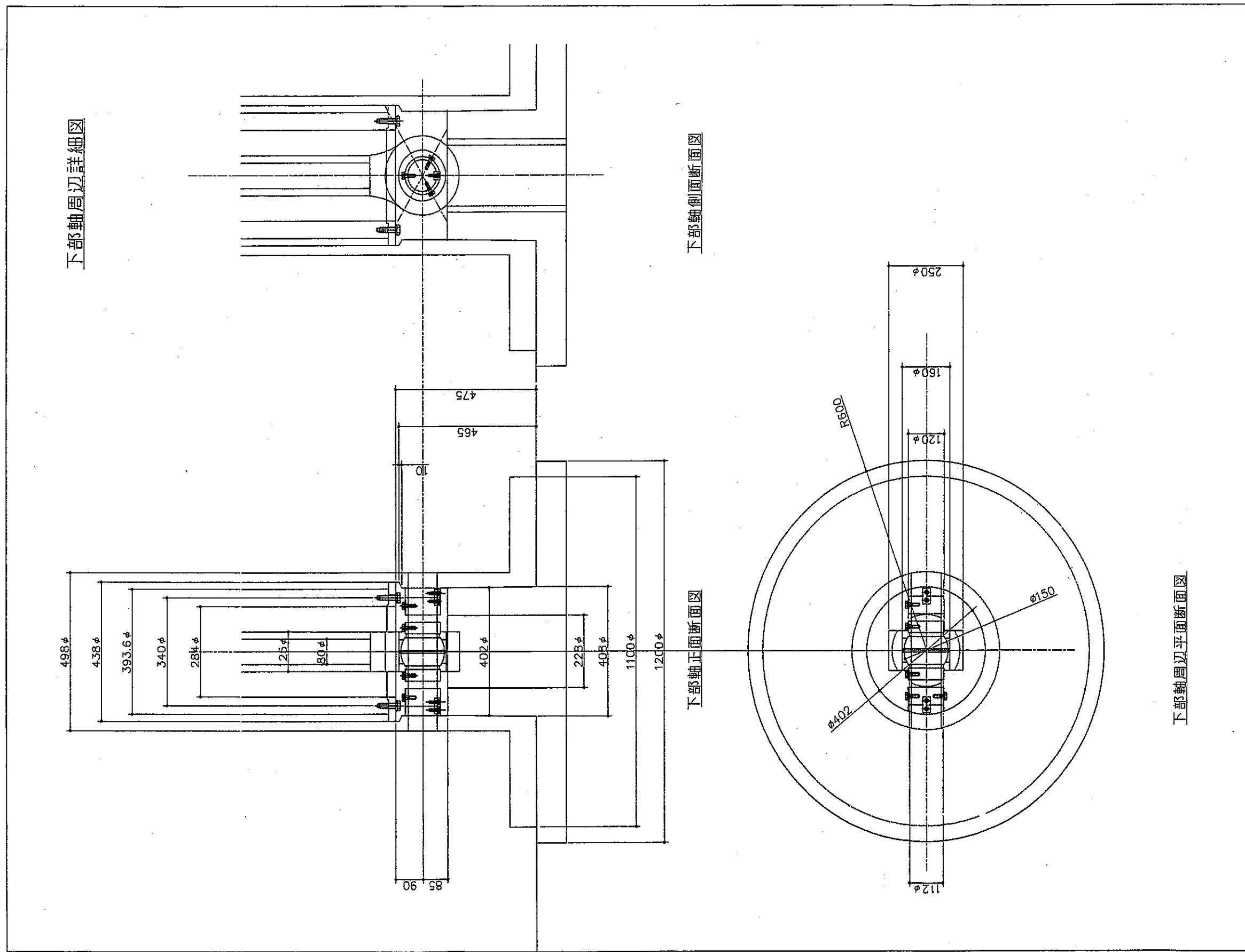


図 2.6.3-10 上下免震ユニット部分詳細図（下部軸周辺詳細図）

2.7 縮小試験体の検討

(1) 相似則

縮小試験体は、実機と同一の材料で製作する。そのため、表 2.7-1 に示す相似則を適用することとなる。表 2.7-1 に、供試模型の相似則を示す。

これより、縮尺率を $1/N$ とすると、長さと時間軸が $1/N$ 倍、力が $1/N^2$ 倍、重量が $1/N^3$ 倍、加速度が N 倍となる。

縮小試験体による試験は、作動性確認及び荷重特性把握のための試験に留まらず、振動台による確証試験に至るまで一貫していることが必要である。また、予め相似則に基づく縮小試験による試験を行う際には、縮小試験体と実機との関係及び課題を明確にした上で、条件をはっきりさせておく必要がある。

(2) 縮小試験体の検討

皿ばねによる機器上下免震装置の構成部品は、機械加工による削り出し製品が大半を占めているので、任意の縮尺率にて試験体は設計可能であると考えられる。しかし、一部の構成部品では商品化されて規格寸法が決まっているため、部品の入手性・製作性を考慮し、試験体縮尺率の設定が望ましい。本検討では、振動台の積載重量 400kN を上限とすると、皿ばねユニットの支持荷重が 2.7MN より最大縮尺の目安として $1/2$ が得られる。

表 2.7-2 に、相似則による試験体の振動特性及び構成部品の関係一覧を示す。同表では、まず、寸法が規格されている鋼球を基準にして縮尺率 9 パターンを候補として挙げた。各パターンにおける相似則から計算される寸法、振動特性及び荷重等を示す。更に、規格品を使用することとなる軸受けの該当品寸法も合わせて示す。

鋼球のサイズで設定した縮尺率 9 パターンから、軸受けのサイズより 6 パターンに絞られる。また、皿ばね寸法より、数字の切りのいい試験体を選ぶと、試験体 1（縮尺率 2.0）及び試験体 9（同 2.778）が選択できる。

表 2.7-3 に、試験体 1 及び 9 での振動特性の比較を示す。いずれの場合においても、周期が短くなり、支持重量（コモンデッキ）との釣り合いである中立時変位にて、応答振幅が決まってしまう。そこで、実機地震入力の相似則換算値以下に入力レベルを下げることによって応答変位を制限するか、皿ばねの板厚を薄くする、全たわみを小さくする、又は直列数を増やして皿ばねの全体の剛性を小さくしてストロークを確保するかの手段を選択することになる。なお、試験体の製作性、管理及びボルトの調達を考慮する

と、縮尺率 1/2 が望ましいと言える。

表 2.7-4～5 に、縮尺率 1/2 の場合に対する皿ばねの全たわみ・板厚を低減した場合及び直列数を増やした場合をそれぞれ示す。表 2.7-4 より、推定応答振幅が中立時変位を上回っているため、入力レベルを下げることとなる。しかし、皿ばね全たわみ及び厚さを多少減少させると、中立時変位とガイド高さの関係（納まりの面）を実機とあわせることができることが判った。また、表 2.7-5 より、中立時変位が推定応答を上回るためには、16 直列に増加させて全たわみを小さくすることで、入力レベルを変えずに試験できる解が得られた。

しかしながら、試験の位置付けと試験結果の有用性（PA）を踏まえ、縮尺は 1/2 とし、皿ばねの組合せは実機と合わせることとして、入力レベルなどの程度となるか今後検討することとした。

(3) 縮小試験体の設計

図 2.7-1～2 に、上記の検討結果を踏まえて作成した縮小試験体（5 並列 14 直列、板厚 13mm、全たわみ 16mm）の寸法図を示す。また、参考として、図 2.7-3 に、縮小試験体（5 並列 16 直列）の寸法図を示す。

表 2.7-1 供試模型の相似則

項目	実機	模型
縮尺	1	$1/N$
長さ	1	$1/N$
面積	1	$1/N^2$
密度*	1	1
ヤング率*	1	1
ひずみ	1	1
応力	1	1
変位	1	$1/N$
力	1	$1/N^2$
重量	1	$1/N^3$
振動数	1	N
加速度	1	N
時間	1	$1/N$

(注) * : 材料を同じとした場合を示す。

表 2.7-2 相似則による試験体の振動特性の推定

ユニット一体	実機	相似則	試験体1	試験体2	試験体3	試験体4	試験体5	試験体6	試験体7	試験体8	試験体9	単位
縮尺 1 / N	1	N	2.000	2.020	2.154	2.223	2.333	2.469	2.545	2.615	2.778	
鋼球呼び径 (inch)	7/8 (inch)	-	11/16 (inch)	11 (mm)	13/32 (inch)	10 (mm)	3/8 (inch)	9 (mm)	11/32 (inch)	8.5 (mm)	8 (mm)	
球径mm	22.225	1/N	11.113	11.000	10.319	10.000	9.525	9.000	8.731	8.500	8.000	mm
皿ばね外径	1000.0	1/N	500.0	494.9	464.3	449.9	428.6	404.9	392.9	382.5	360.0	mm
内径	500.0	1/N	250.0	247.5	232.1	225.0	214.3	202.5	196.4	191.2	180.0	mm
板厚	27.0	1/N	13.50	13.36	12.54	12.15	11.57	10.93	10.61	10.33	9.72	mm
全たわみ	34.0	1/N	17.0	16.8	15.8	15.3	14.6	13.8	13.4	13.0	12.2	mm
地震時片振幅												
・上下限度変位	15.0	1/N	7.5	7.4	7.0	6.7	6.4	6.1	5.9	5.7	5.4	cm
・上下設計変位	10.0	1/N	5.0	4.9	4.6	4.5	4.3	4.0	3.9	3.8	3.6	cm
・水平設計変位	2.0	1/N	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	cm
振動数	1.61	N	3.23	3.26	3.47	3.58	3.76	3.98	4.11	4.22	4.48	Hz
周期	0.62	1/N	0.310	0.307	0.288	0.279	0.266	0.251	0.244	0.237	0.223	sec
試験体全組立高	3680.0	1/N	1540.0	1821.4	1708.6	1655.8	1577.1	1490.2	1445.7	1407.4	1324.6	mm
皿ばね供用高さ												
・最大 約	2341.0	1/N	1170.5	1158.7	1086.9	1053.3	1003.3	948.0	919.7	895.3	842.7	mm
・中立 約	2191.0	1/N	1095.5	1084.4	1017.3	985.8	939.0	887.2	860.8	838.0	783.7	mm
・最小 約	2041.0	1/N	1020.5	1010.2	947.6	918.3	874.7	826.5	801.8	780.6	731.7	mm
上下応答加速度	557.0	N	1114.0	1125.4	1199.7	1237.9	1299.7	1375.5	1417.8	1456.4	1547.4	gal
水平応答加速度	524.0	N	1048.0	1058.7	1128.6	1164.6	1222.7	1294.0	1333.8	1370.1	1458.7	gal
搭載荷重	277.8	1/N ³	34.7	33.7	27.8	25.3	21.9	18.4	16.8	15.5	13.0	tonf
玉軸受け												
・上部軸受けSB	50	1/N	25.0	24.75	23.21	22.50	21.43	20.25	19.64	19.12	18.00	
・下部軸受けSB	100	1/N	50.0	49.49	46.43	44.99	42.86	40.49	39.29	38.25	36.00	

(参考)

近似品												
・上部軸SB	50	-	25	25		22		20	20		20	
・下部軸SB	100	-	50	50		45		40	40		35	
玉軸受け												
・上部軸発生荷重	20	1/N ²	5.0	4.9		4.0		3.3	3.1		2.6	tonf
・下部軸発生荷重	60	1/N ²	15.0	14.7		12.1		9.8	9.3		7.3	tonf
近似品												
・上部軸許容荷重	153	1/N ²	38	38		30		23	23		23	tonf
・下部軸許容荷重	662	1/N ²	153	153		113		90	90		77	tonf
裕度												
・上部軸許容荷重	7.65	1/N ²	7.62	7.78		7.43		7.01	7.45		8.88	
・下部軸許容荷重	11.03	1/N ²	10.26	10.41		9.30		9.15	9.72		9.84	

表 2.7-3 皿ばね荷重特性値からの試験体振動特性の推定

寸法	N	振動特性		高さ・変位 mm		参照
実機 (5並列14直列) 厚さ 27.0mm 全たわみ33.0mm (厚さとの比 1.222)	1	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 (床応答) 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	12.8 tonf/cm 0.62 sec 1.61 Hz 16.0tonf/cm 0.93 sec 28.8 tonf/cm	供用高さ S2 応答変位 中立時変位 (割合)	2197.0 10 16.2 1.62	表 2.7-6
試験体 (5並列14直列) 厚さ 13.5mm 全たわみ16.75mm (厚さとの比 1.222)	2	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	9.7 tonf/cm 0.25 sec 3.95 Hz 12.13tonf/cm 0.38 sec 21.83 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1146.5 2293.0 4.1 3.30 0.81	表 2.7-7
試験体 (5並列14直列) 厚さ 9.7mm 全たわみ 12.0mm (厚さとの比 1.222)	2.78	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	7.6 tonf/cm 0.17 sec 5.77 Hz 9.50tonf/cm 0.26 sec 17.10 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	832.2 2313.5 2.80 1.64 0.59	表 2.7-8

(注) * : 推定値を示す。

表 2.7-4 皿ばね高さ・厚さ寸法の変更による試験体振動特性の推定

寸法	N	振動特性		高さ・変位 mm		参照
試験体 (5並列14直列) 厚さ 13.5mm 全たわみ14.85mm (厚さとの比 1.10)	2	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 (床応答) 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	7.90 tonf/cm 0.28 sec 3.57 Hz 9.88tonf/cm 0.42 sec 17.78 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1113.8 2227.6 4.5 3.91 0.87	表 2.7-9
試験体 (5並列14直列) 厚さ 12.85mm 全たわみ16.5mm (厚さとの比 1.28)	2	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	8.20 tonf/cm 0.27 sec 3.66 Hz 10.25tonf/cm 0.41 sec 18.45 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1092.8 2185.6 4.4 3.79 0.86	表 2.7-10
試験体 (5並列14直列) 厚さ 13.00mm 全たわみ 16.0mm (厚さとの比 1.23)	2	皿ばね動剛性 (解析) ピーグ固有周期 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 皿ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	8.00 tonf/cm 0.28 sec 3.57 Hz 10.0tonf/cm 0.42 sec 18.00 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1095.3 2190.6 4.5 3.87 0.86	表 2.7-11

(注) * : 推定値を示す。

表 2.7-5 盤ばね直列数及び全たわみ変更による試験体振動特性の推定

寸法	N	振動特性		高さ・変位 mm		参照
実機 (5並列15直列) 厚さ 13.5mm 全たわみ14.85mm (厚さとの比 1.10)	2	盤ばね動剛性 (解析) ピ-ク固有周期 (床応答) 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 盤ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	7.40 tonf/cm 0.29 sec 3.49 Hz 9.25 tonf/cm 0.43 sec 16.65 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1193.3 2386.6 4.6 4.19 0.91	表 2.7-12
試験体 (5並列16直列) 厚さ 13.5mm 全たわみ12.15mm (厚さとの比 0.90)	2	盤ばね動剛性 (解析) ピ-ク固有周期 固有振動数 減衰器動剛性 (推定) 盤ばね固有周期(解析) 全体推定剛性	4.20 tonf/cm 0.34 sec 2.94 Hz 5.25 tonf/cm 0.51 sec 9.45 tonf/cm	供用高さ 実機換算値 S2 応答変位* 中立時変位 (割合)	1002.1 2004.2 5.5 5.63 1.03	表 2.7-13

(注) * : 推定値を示す。

表2.7-6 実機（5並列14直列）の振動特性

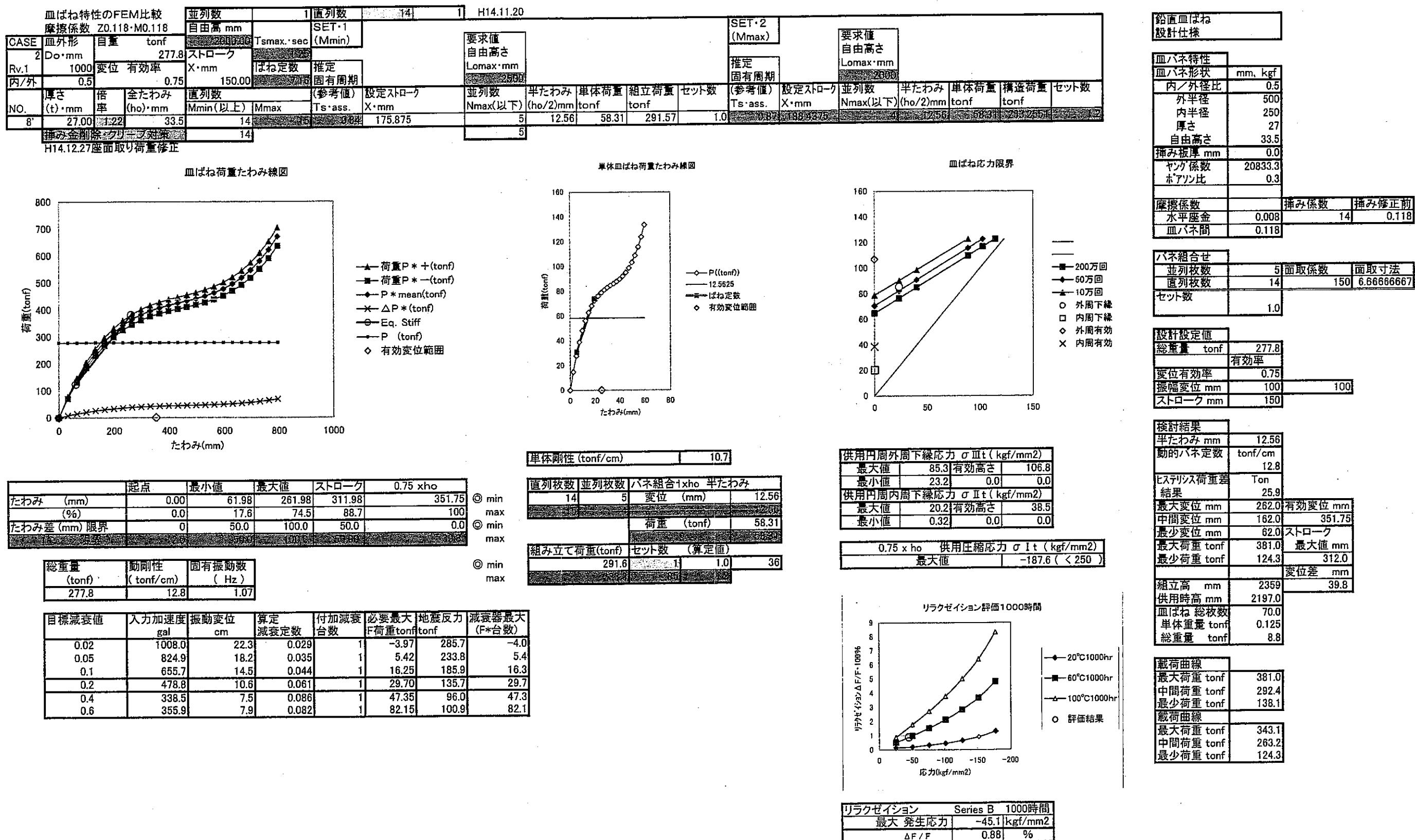


表2.7-7 縮尺1/2 (5並列14直列) の振動特性

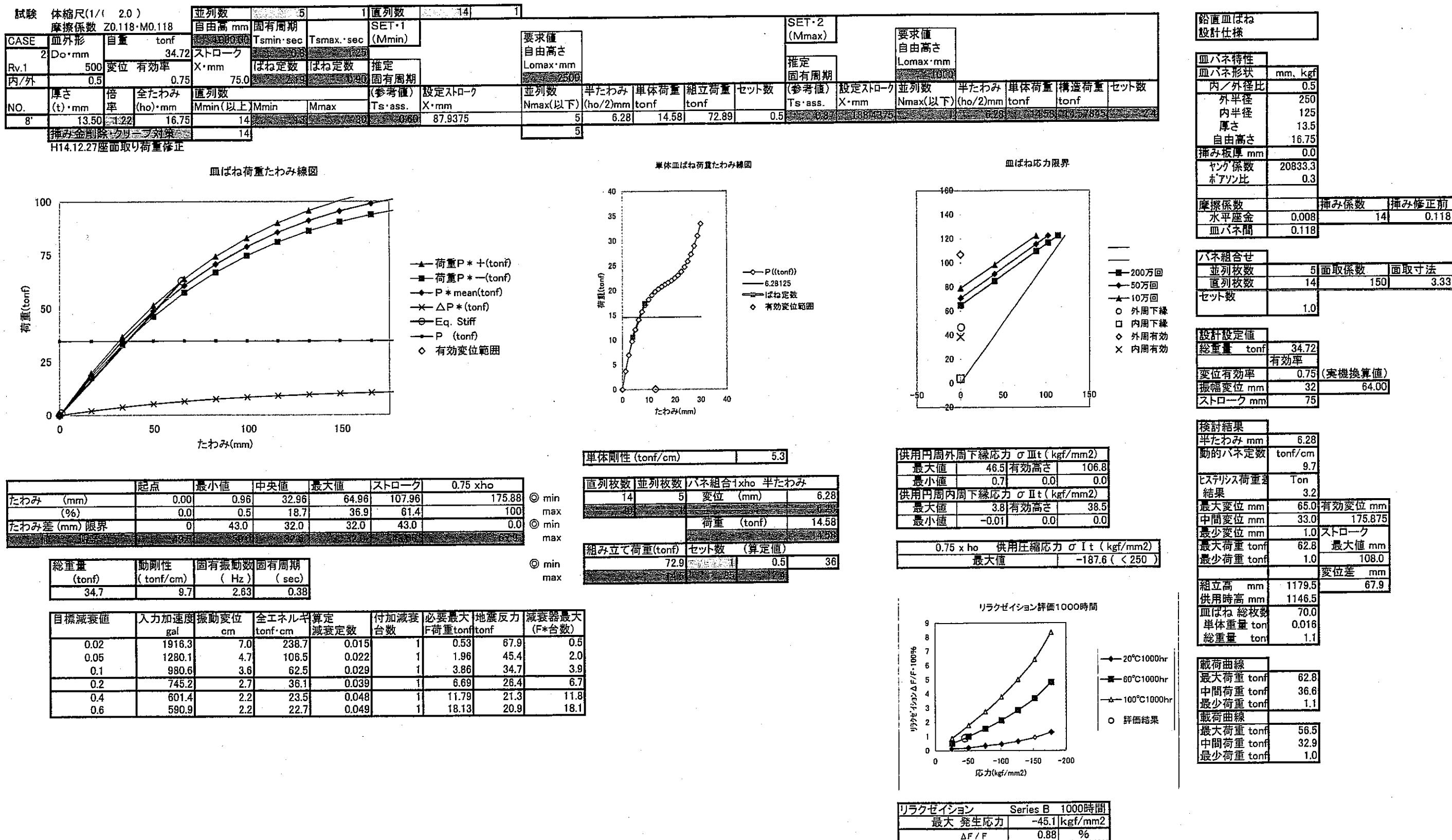
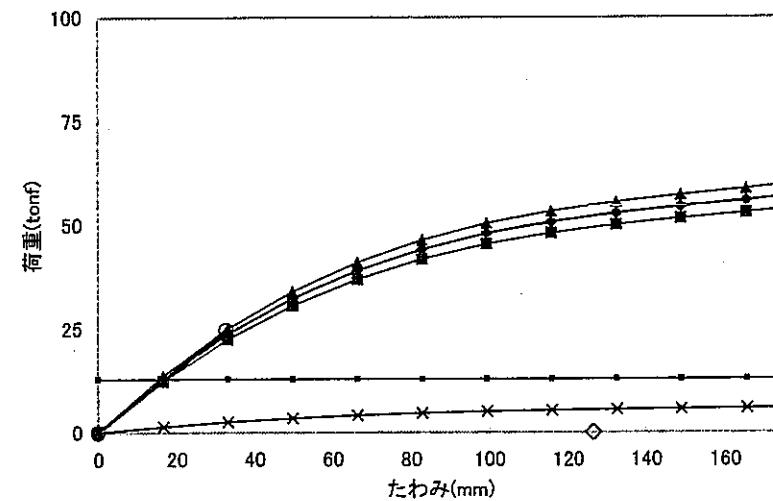


表2.7-8 縮尺1/2.78 (5並列14直列) の振動特性

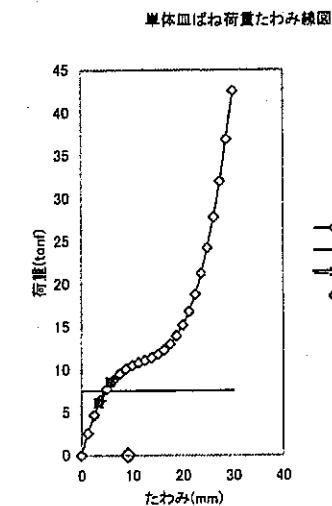
試験	体積尺(1/ 摩擦係数	並列数					1直列数					14					1				
		並列数	自由高 mm	固有周期 Tsmi·sec	Tsmax. sec (Mmin)	SET·1	並列数	自由高 mm	固有周期 Tsmi·sec	Tsmax. sec (Mmin)	SET·2 (Mmax.)	並列数	自由高 mm	固有周期 Tsmi·sec	Tsmax. sec (Mmin)	SET·3 (Mmax.)	並列数	自由高 mm	固有周期 Tsmi·sec	Tsmax. sec (Mmin)	
CASE	皿外形	自重 tonf	12.93	ストローク	0.8	1.0	5	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	SET·1	14	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	SET·2 (Mmax.)	1	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	
Rv.1	2 Do·mm	変位 有効率	12.93	X·mm	はね定数	はね定数	5	推定	1.0	1.0	1.0	14	推定	1.0	1.0	1.0	1	推定	1.0	1.0	
内/外	359.7122	0.5	0.75	54.0	54.0	54.0	14	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	SET·1	1	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	SET·2 (Mmax.)	1	要求値 自由高さ Lomax·mm	12.93	1.0	
NO.	厚さ (t) ·mm	倍率	全たわみ (ho) ·mm	直列数 Mmin (以上)	Mmin	Mmax	14	(参考値)	54.0	54.0	54.0	1	(参考値)	54.0	54.0	54.0	1	(参考値)	54.0	54.0	
8'	9.71	1.22	12.05	14	14	14	14	54.0	54.0	54.0	1	5	4.52	7.54	37.69	0.3	5	4.52	7.54	37.69	
	挿み金削除アクリル板第2段																				
	H14.12.27座面取り荷重修正																				
	14																				

H14.12.27座面取り荷重修正

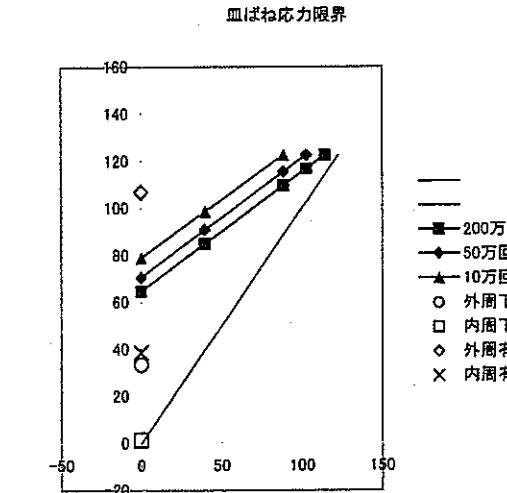
皿ばね荷重たわみ線図



- ▲ 荷重P * + (tonf)
- 荷重P * - (tonf)
- ◆ P * mean(tonf)
- ✖ ΔP * (tonf)
- Eq. Stiff
- P (tonf)
- ◇ 有効変位範囲



単体剛性 (tonf/cm) 3.7



皿ばね応力限界

	起点	最小値	中央値	最大値	ストローク	0.75 x ho
たわみ (mm)	0.00	0.06	16.36	32.66	70.32	126.53
(%)	0.0	0.0	12.9	25.8	55.6	100
たわみ差 (mm) 限界	0	37.7	16.3	16.3	37.7	0.0
たわみ差 (mm) 限界	0	37.7	16.3	16.3	37.7	0.0
総重量 (tonf)	12.9	7.6	3.81	0.26		

◎ min
max
◎ min
max
◎ min
max

直列枚数	並列枚数	バ不組合xho 半たわみ
14	5	変位 (mm) 4.52
		荷重 (tonf) 7.54
		組み立て荷重(tonf) 37.7
		セット数 (算定値) 36

目標減衰値	入力加速度 g/si	振動変位 cm	全エネルギー tonf·cm	算定減衰定数 0.014	付加減衰定数 1	必要最大荷重 tonf	地震反力 tonf	減衰器最大(F*台数) 0.3
0.02	2167.0	3.8	54.0	0.014	1	0.28	28.6	0.3
0.05	1401.5	2.4	22.6	0.021	1	0.83	18.5	0.8
0.1	1063.2	1.9	13.0	0.028	1	1.58	14.0	1.6
0.2	791.9	1.4	7.2	0.038	1	2.66	10.4	2.7
0.4	745.1	1.3	6.4	0.040	1	5.56	9.8	5.6
0.6	726.8	1.3	6.1	0.041	1	8.42	9.6	8.4

◎ min
max

供用円周外周下線応力 σ II t (kgf/mm2)	最大値	33.4 有効高さ 106.8
供用円周内周下線応力 σ II t (kgf/mm2)	最大値 1.4 有効高さ 38.6	0.00 0.0 0.0
供用円周外周下線応力 σ II t (kgf/mm2)	最大値 1.4 有効高さ 38.6	0.00 0.0 0.0
供用圧縮応力 σ I t (kgf/mm2)	最大値 -187.5 (< 250)	

0.75 x ho 供用圧縮応力 σ I t (kgf/mm2)

最大値 -187.5 (< 250)

最小値 0.0

変位差 mm 56.2

立上高 848.56115

供用時高 832.2

皿ばね 総重量 70.0

単体重量 0.006

総重量 0.4

載荷曲線

最大荷重 24.7

中間荷重 12.2

最少荷重 0.0

変位差 mm 56.2

立上高 848.56115

供用時高 832.2

皿ばね 総重量 70.0

単体重量 0.006

総重量 0.4

載荷曲線

最大荷重 24.7

中間荷重 12.2

最少荷重 0.0

変位差 mm 56.2

立上高 848.56115

供用時高 832.2

皿ばね 総重量 70.0

単体重量 0.006

総重量 0.4

載荷曲線

最大荷重 24.7

中間荷重 12.2

最少荷重 0.0

変位差 mm 56.2

立上高 848.56115

供用時高 832.2

皿ばね 総重量 70.0

単体重量 0.006

総重量 0.4

載荷曲線

最大荷重 24.7

中間荷重 12.2

最少荷重 0.0

変位差 mm 56.2

立上高 848.56115

供用時高 832.2

皿ばね 総重量 70.0

単体重量 0.006

総重量 0.4

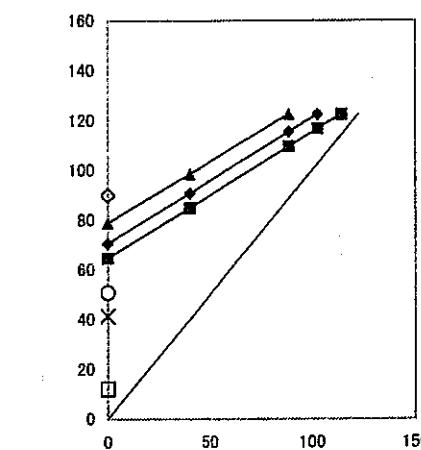
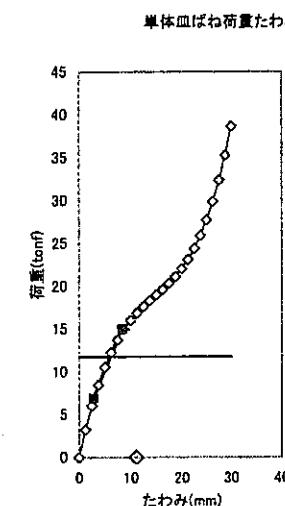
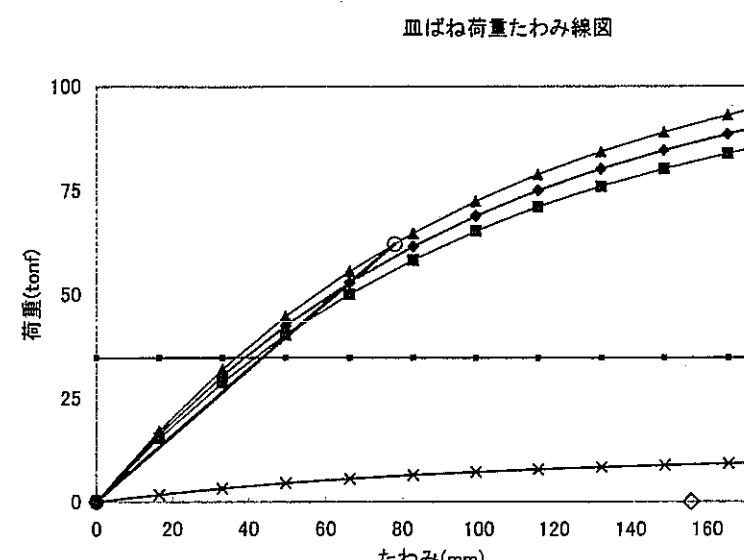
載荷曲線

最大荷重 24.7

中間荷重 12.2

最少荷重 0.0

表2.7-9 縮尺1/2 (5並列14直列：全たわみ減少) の振動特性

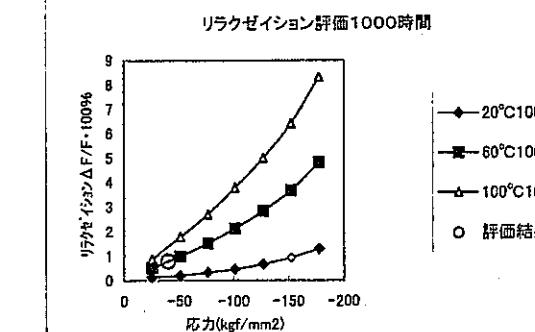


	起点	最小値	中央値	最大値	ストローク	0.75 xho
たわみ (mm)	0.00	0.11	39.11	78.11	114.11	155.
(%)	0.0	0.1	25.1	50.1	73.2	1
たわみ差 (mm) 限界	0	36.0	39.0	39.0	36.0	0

総重量 (tonf)	動剛性 (tonf/cm)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)
34.7	7.9	2.38	0.42

単体剛性 (tonf/cm)		5.2	
直列枚数		並列枚数	バネ組合せxho 半たわみ
④ min	14	5	変位 (mm) 5.5
max	31		
⑤ min			荷重 (tonf) 11.7
max			
⑥ min	組み立て荷重(tonf)		セット数 (算定値)
max	58.8		0.6 3

供用円周外周下縁応力 σ_{IIIt} (kgf/mm ²)		
最大値	50.8	有効高さ
最小値	0.1	0.0
供用円周内周下縁応力 σ_{IIIt} (kgf/mm ²)		
最大値	12.1	有効高さ
最小値	0.01	0.0

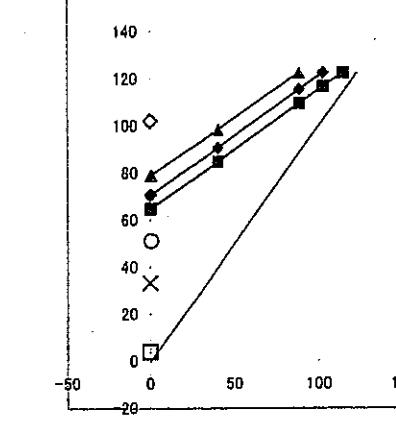
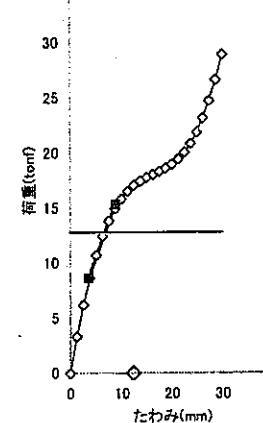
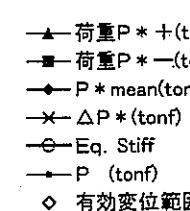
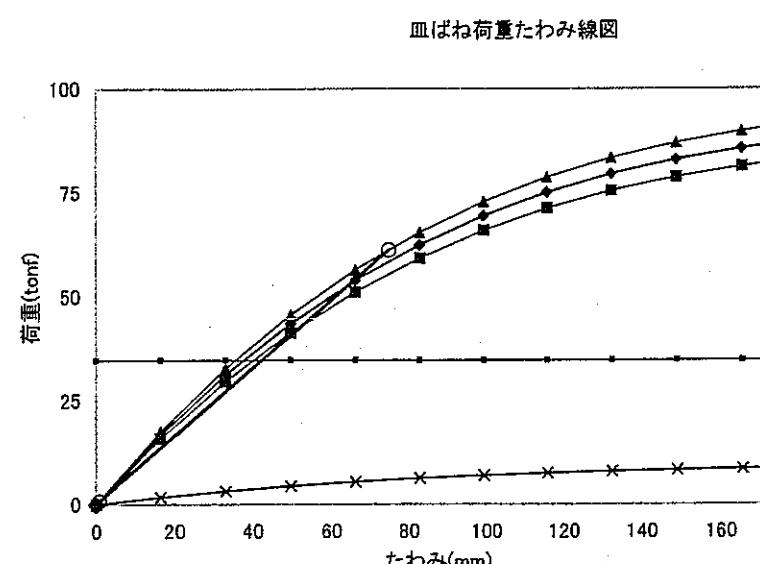


目標減衰値	入力加速度 gal	振動変位 cm	全工ネルギ tonf·cm	算定 減衰定数	付加減衰 台数	必要最大 F荷重tonf	地震反力 tonf	減衰器最大 (F+台数)
0.02	1639.6	7.3	212.3	0.017	1	0.27	58.1	0
0.05	1308.3	5.8	135.2	0.021	1	2.09	46.4	2
0.1	1011.9	4.5	80.9	0.028	1	4.08	35.9	4
0.2	704.2	3.1	39.2	0.040	1	6.29	25.0	6
0.4	608.0	2.7	29.2	0.046	1	11.98	21.5	12
0.6	570.5	2.5	25.7	0.049	1	17.50	20.2	17

リラクゼイション	Series B	1000時間
最大 発生応力	-40.0	kgf/mm ²
ΔF/F	0.78	%

鉛直皿ばね 設計仕様			
皿バネ特性			
皿バネ形状	mm, kgf		
内／外径比	0.5		
外半径	250		
内半径	125		
厚さ	13.5		
自由高さ	14.85		
挿み板厚 mm	0.0		
ヤング'係数	20833.3		
ホ'ゾン比	0.3		
摩擦係数		挿み係数	挿み修正前
水平座金	0.008	14	0.11
皿バネ間	0.118		
バネ組合せ			
並列枚数	5	面取係数	面取寸法
直列枚数	14	150	3.3
セット数	1.0		
設計設定値			
総重量 tonf	34.72		
	有効率		
変位有効率	0.75	(実機換算値)	
振幅変位 mm	39	78.00	
ストローク mm	75		
検討結果			
半たわみ mm	5.57		
動的バネ定数	tonf/cm		
	7.9		
ヒステリシス荷重率	Ton		
結果	3.1		
最大変位 mm	78.1	有効変位 mm	
中間変位 mm	39.1	155.925	
最少変位 mm	0.1	ストローク	
最大荷重 tonf	62.1	最大値 mm	
最少荷重 tonf	0.1	114.1	
		変位差 mm	
組立高 mm	1152.9	41.8	
供用時高 mm	1113.8		
皿ばね 総枚数	70.0		
単体重量 ton	0.016		
総重量 ton	1.1		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	62.1		
中間荷重 tonf	36.6		
最少荷重 tonf	0.1		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	55.9		
中間荷重 tonf	32.9		
最少荷重 tonf	0.1		

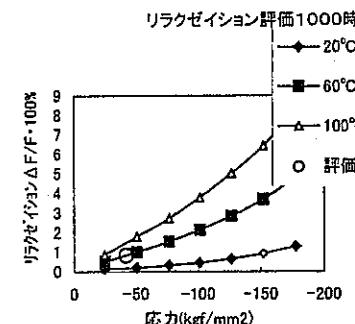
表2.7-10 縮尺1/2 (5並列14直列:厚さ減少) の振動特性



	起点	最小値	中央値	最大値	ストローク	0.
たわみ (mm)	0.00	0.87	37.87	74.87	112.87	
(%)	0.0	0.5	21.8	#VALUE!	43.2	65.1
たわみ差 (mm) 規界	0	38.0	37.0	37.0	38.0	
総重量 (tonf)	34.7	8.2	2.42	0.41		
動剛性 (tonf/cm)						
固有振動数 (Hz)						
固有周期 (sec)						

単体剛性 (tonf/cm)		4.5
xho	並列枚数	ハネ組合1xho 半たわみ
④ min	14	5 変位 (mm)
max		6.1
④ min		荷重 (tonf)
max		12.7
組み立て荷重(tonf)		セット数 (算定値)
④ min	63.9	0.5
max		3

供用円周外周下線応力 $\sigma_{III(t)}$ (kgf/mm ²)		
最大値	51.2	有効高さ
最小値	0.6	0.0
供用円周内周下線応力 $\sigma_{II(t)}$ (kgf/mm ²)		
最大値	3.9	有効高さ
最小値	-0.03	0.0



リラクゼイション	Series B	1000時間
最大 発生応力	-42.3	kgf/mm ²
ΔF / F	0.83	%

鉛直皿ばね 設計仕様			
皿バネ特性			
皿バネ形状	mm, kgf		
内／外径比	0.5		
外半径	250		
内半径	125		
厚さ	12.85		
自由高さ	16.51225		
挿み板厚 mm	0.0		
ヤング係数	20833.3		
ホアソン比	0.3		
摩擦係数		挿み係数	挿み修正前
水平座金	0.008	14	0.118
皿バネ間	0.118		
バネ組合せ			
並列枚数	5	面取係数	面取寸法
直列枚数	14	150	3.33
セット数	1.0		
設計設定値			
総重量 tonf	34.72		
	有効率		
変位有効率	0.75	(実機換算値)	
振幅変位 mm	37	74.00	
ストローク mm	75		
検討結果			
半たわみ mm	6.19		
動的バネ定数	tonf/cm		
	8.2		
ビステリシス荷重差 結果	Ton		
	3.0		
最大変位 mm	74.9	有効変位 mm	
中間変位 mm	37.9	173.3786	
最少変位 mm	0.9	ストローク	
最大荷重 tonf	61.2	最大値 mm	
最少荷重 tonf	0.8	112.9	
		変位差 mm	
組立高 mm	1130.672	60.5	
供用時高 mm	1092.8		
皿ばね 総枚数	70.0		
単体重量 ton	0.015		
総重量 ton	1.0		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	61.2		
中間荷重 tonf	36.5		
最少荷重 tonf	0.9		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	55.4		
中間荷重 tonf	33.0		
最少荷重 tonf	0.8		

表2.7-11 縮尺1/2 (5並列14直列: 全たわみ・厚さ減少) の振動特性

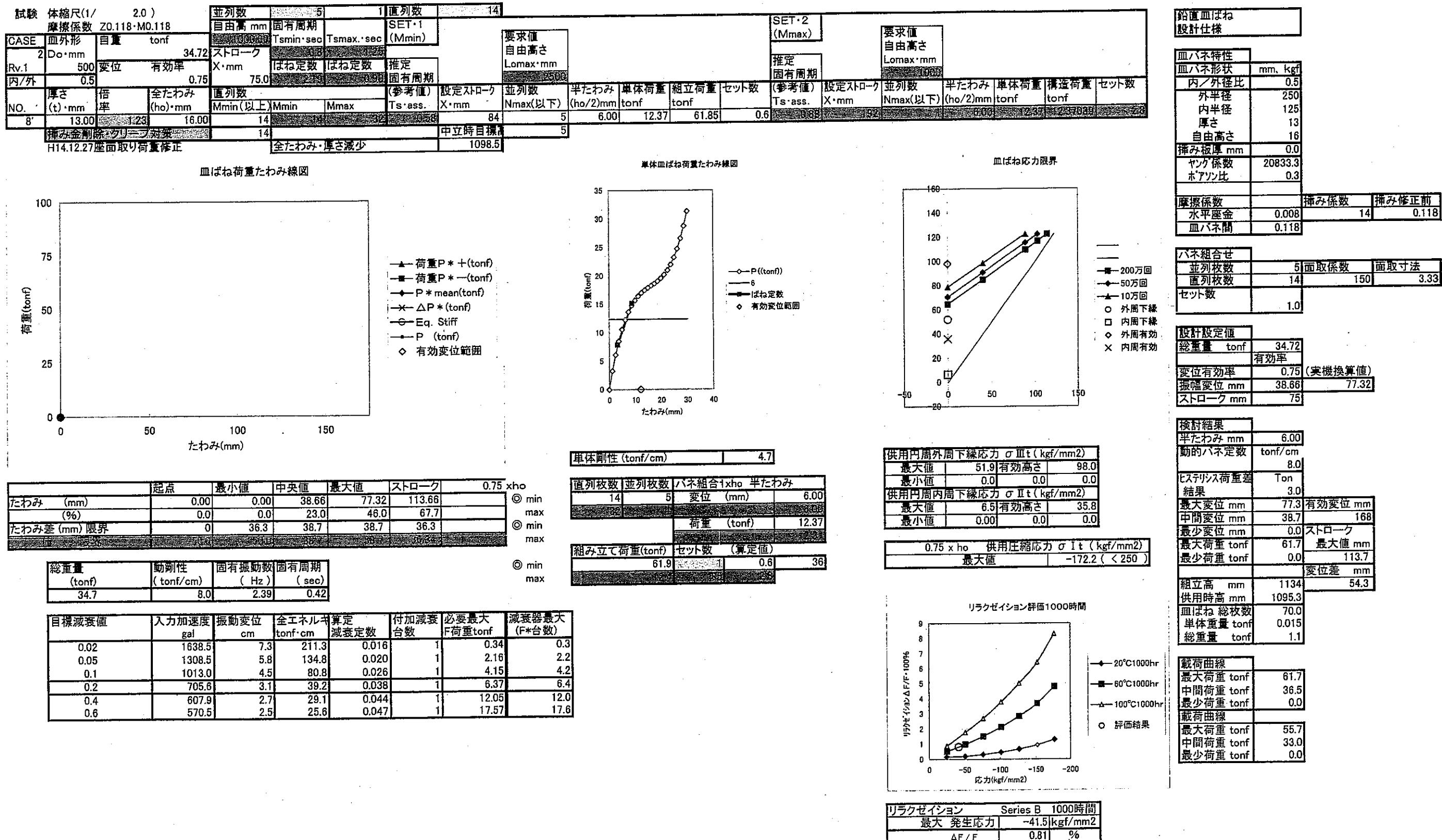


表2.7-12 縮尺1/2 (5並列15直列:全たわみ減少) の振動特性

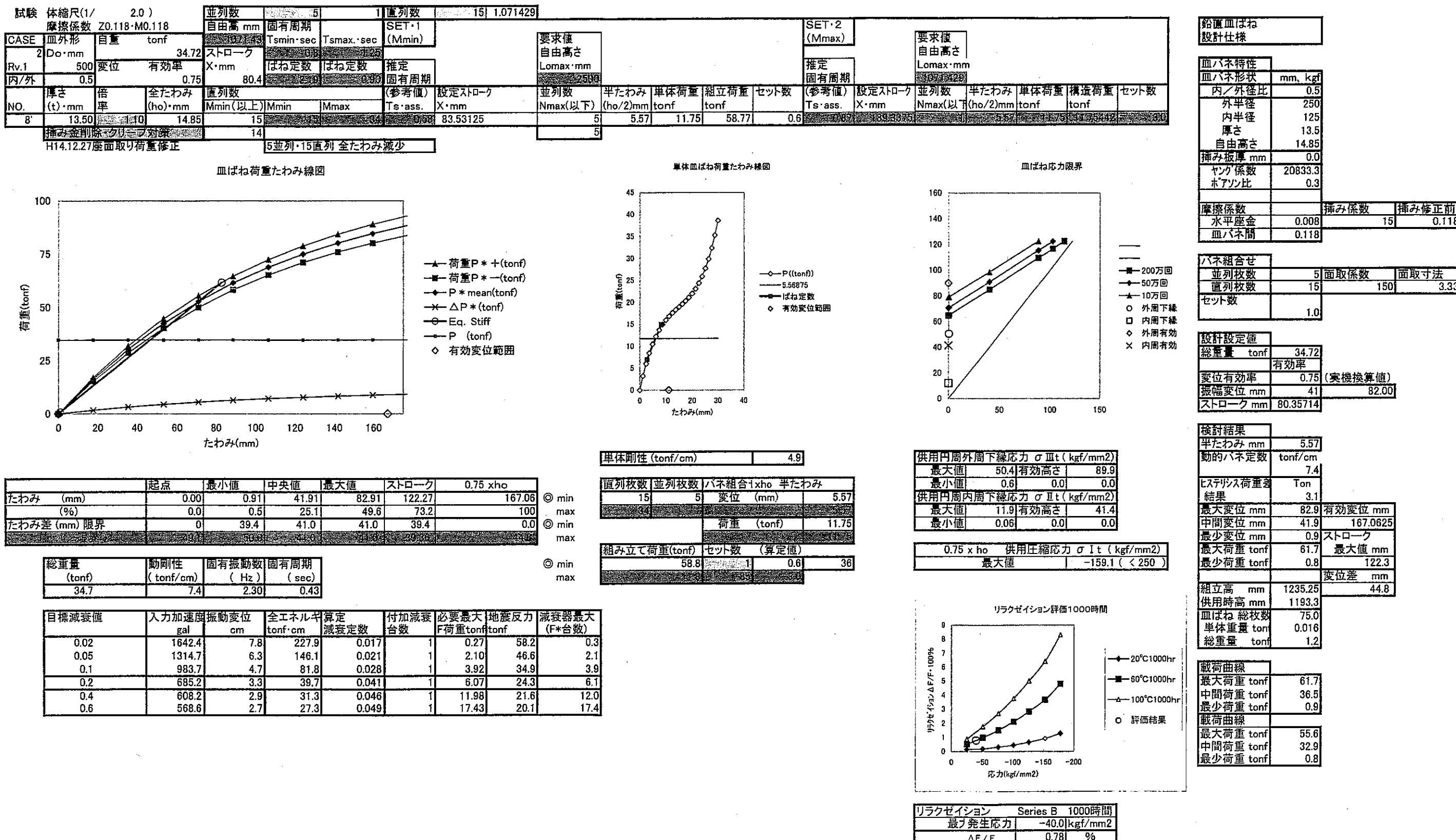
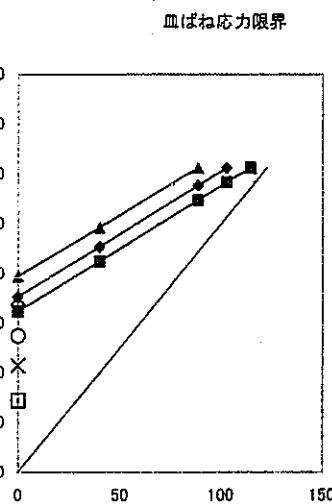
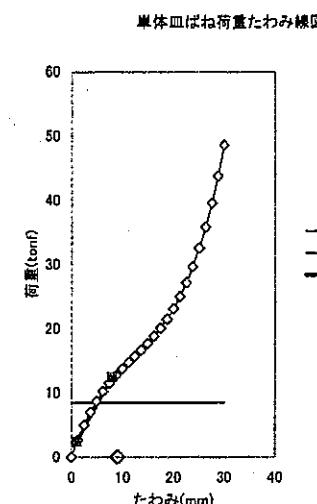
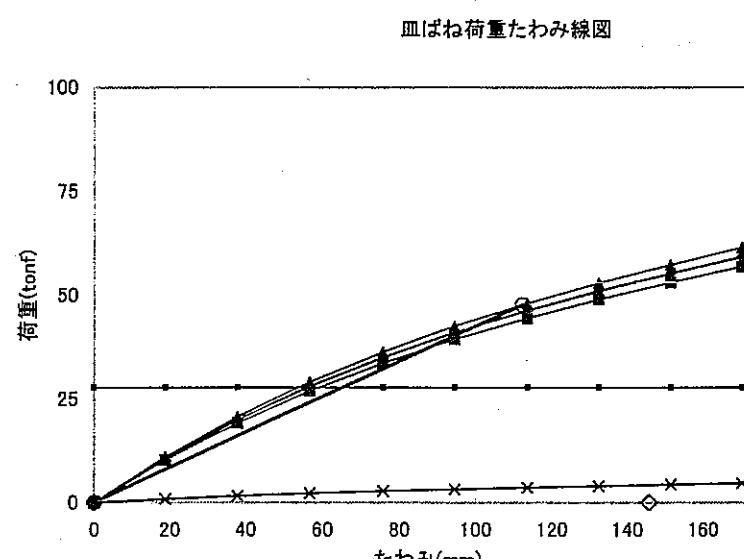


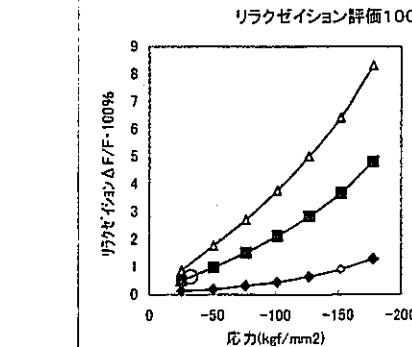
表2.7-13 縮尺1/2 (5並列15直列:全たわみ減少) の振動特性



	起点	最小値	中央値	最大値	ストローク	0.75 xho
たわみ (mm)	0.00	0.30	56.30	112.30	142.01	145.8
(%)	0.0	0.2	38.6	77.0	97.4	100
たわみ差 (mm) 限界	0	29.7	56.0	56.0	29.7	0

単体剛性 (tonf/cm)	3.6
直列枚数 並列枚数 バネ組合ixho 半たわみ	
16	4
変位 (mm)	4.5
荷重 (tonf)	8.4
組み立て荷重(tonf)	セット数 (算定値)
33.9	1 0.8 3

目標減衰値	入力加速度 gal	振動変位 cm	全工ネルギ tonf·cm	算定 減衰定数	付加減衰 台数	必要最大 F荷重tonf	地盤反力 tonf	減衰器最大 (F*台数)
0.02	1881.7	12.6	335.0	0.011	1	0.77	53.3	0.8
0.05	1282.8	8.6	155.7	0.016	1	1.95	36.4	2.0
0.1	923.0	6.2	80.6	0.022	1	3.20	26.2	3.3
0.2	701.3	4.7	46.5	0.029	1	5.34	19.9	5.0
0.4	587.0	3.9	32.6	0.035	1	9.55	16.6	9.0
0.6	550.9	3.7	28.7	0.037	1	13.81	15.6	13.0



リラクゼイション	Series B	1000時間
最大 発生応力	-32.7	kgf/mm ²
△F / F	0.65	%

鉛直皿はね 設計仕様			
皿バネ特性			
皿バネ形状	mm, kgf		
内／外径比	0.5		
外半径	250		
内半径	125		
厚さ	13.5		
自由高さ	12.15		
挿み板厚 mm	0.0		
ヤング係数	20833.3		
ホアソン比	0.3		
摩擦係数		挿み係数	挿み修正前
水平座金	0.007	16	0.118
皿バネ間	0.118		
バネ組合せ			
並列枚数	4	面取係数	面取寸法
直列枚数	16	150	3.33
セット数	1.0		
設計設定値			
総重量 tonf	27.78		
	有効率		
変位有効率	0.75	(実機換算値)	
振幅変位 mm	56	112.00	
ストローク mm	85.71429		
検討結果			
半たわみ mm	4.56		
動的バネ定数	tonf/cm		
	4.2		
ヒステリシス荷重差	Ton		
結果	1.8		
最大変位 mm	112.3	有効変位 mm	
中間変位 mm	56.3	145.8	
最少変位 mm	0.3	ストローク	
最大荷重 tonf	47.7	最大値 mm	
最少荷重 tonf	0.2	142.0	
		変位差 mm	
組立高 mm	1058.4	3.8	
供用時高 mm	1002.1		
皿はね 総枚数	64.0		
単体重量 tonf	0.016		
総重量 tonf	1.0		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	47.7		
中間荷重 tonf	28.9		
最少荷重 tonf	0.2		
載荷曲線			
最大荷重 tonf	44.1		
中間荷重 tonf	26.7		
最少荷重 tonf	0.2		

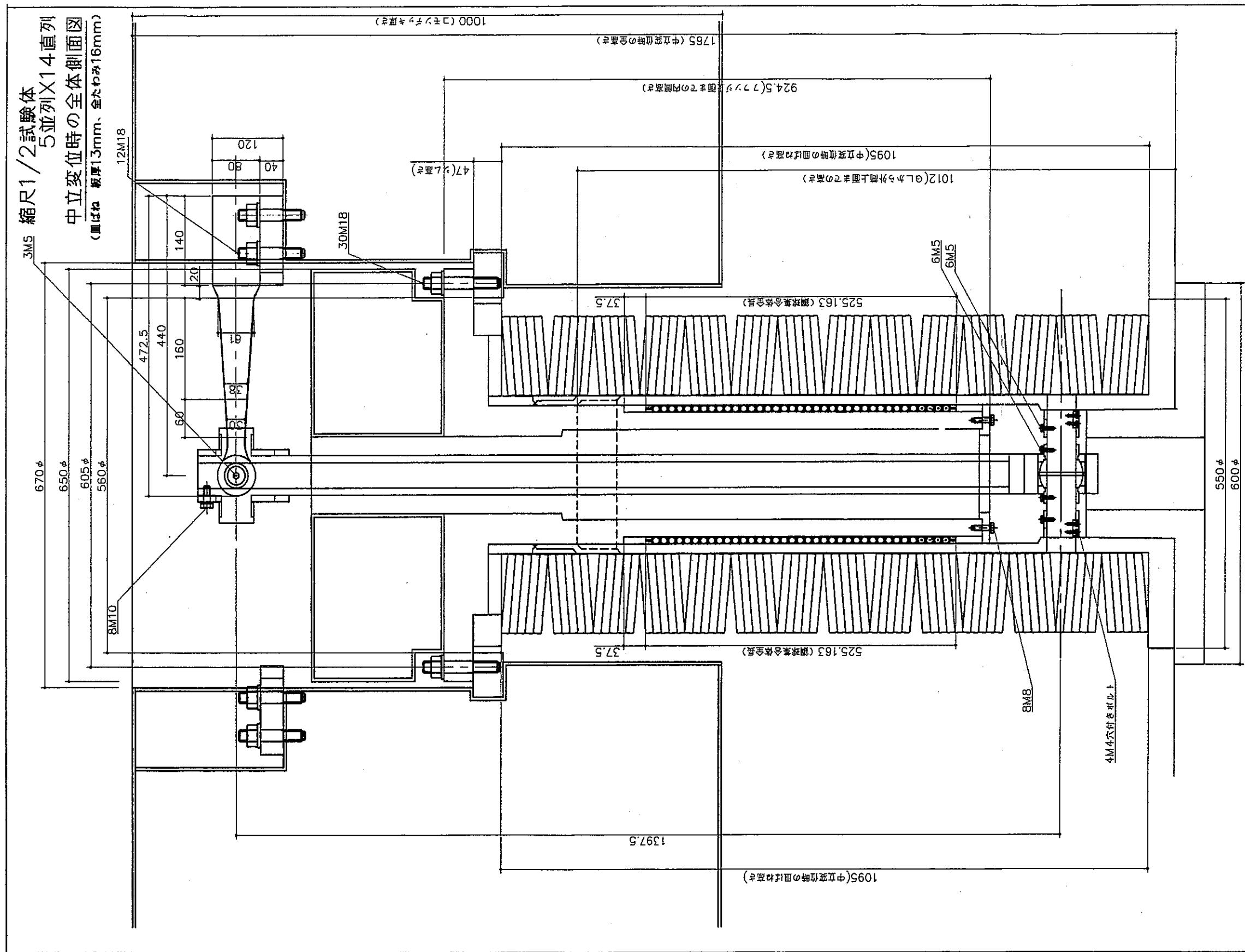


図 2.7-1 縮尺 1/2 試験体総合図（5 並列×14 直列（板厚 13mm、全たわみ 16mm）：中立変位時の全体側面図）

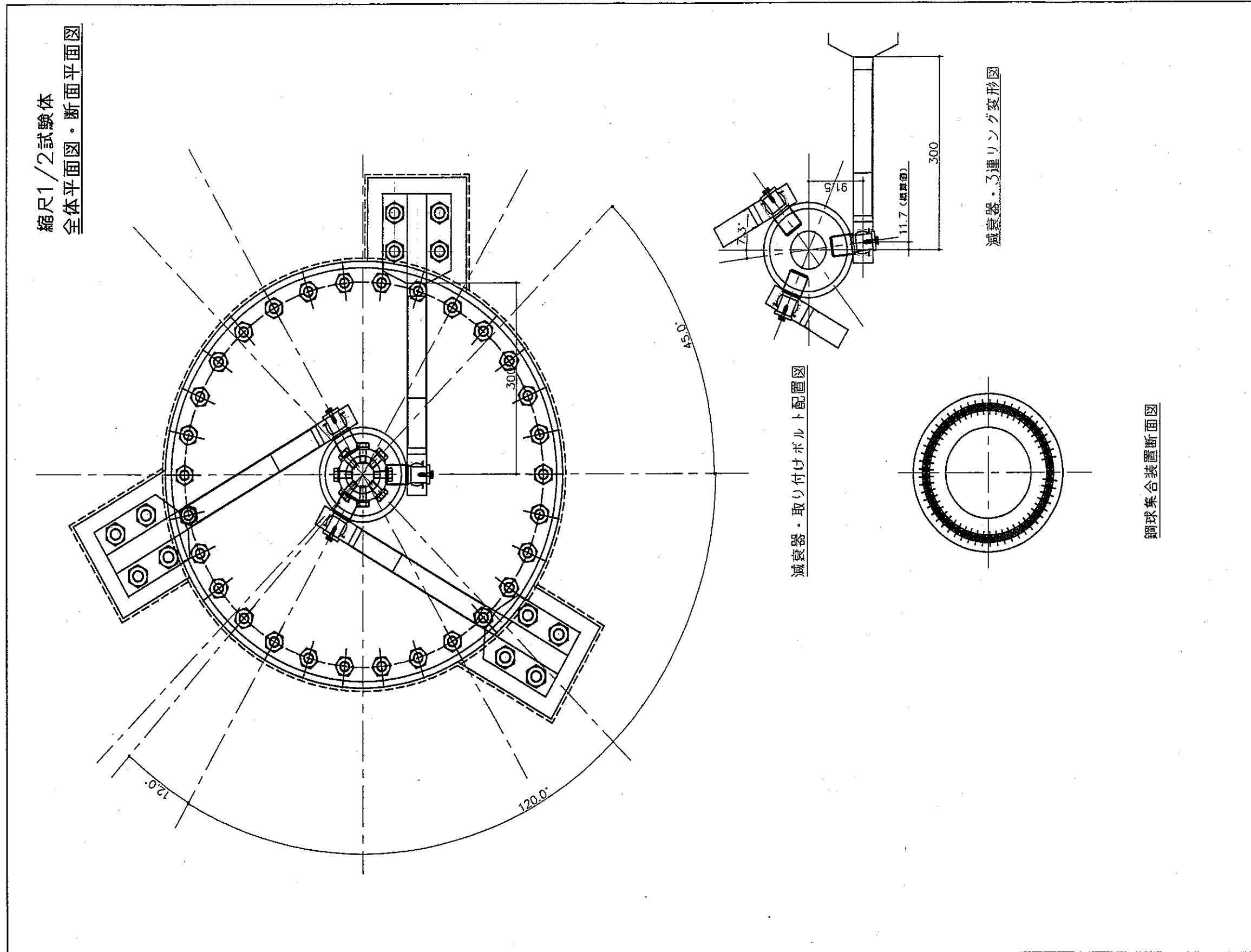


図 2.7-2 縮尺 1/2 試験体総合図（全體平面・断面図）

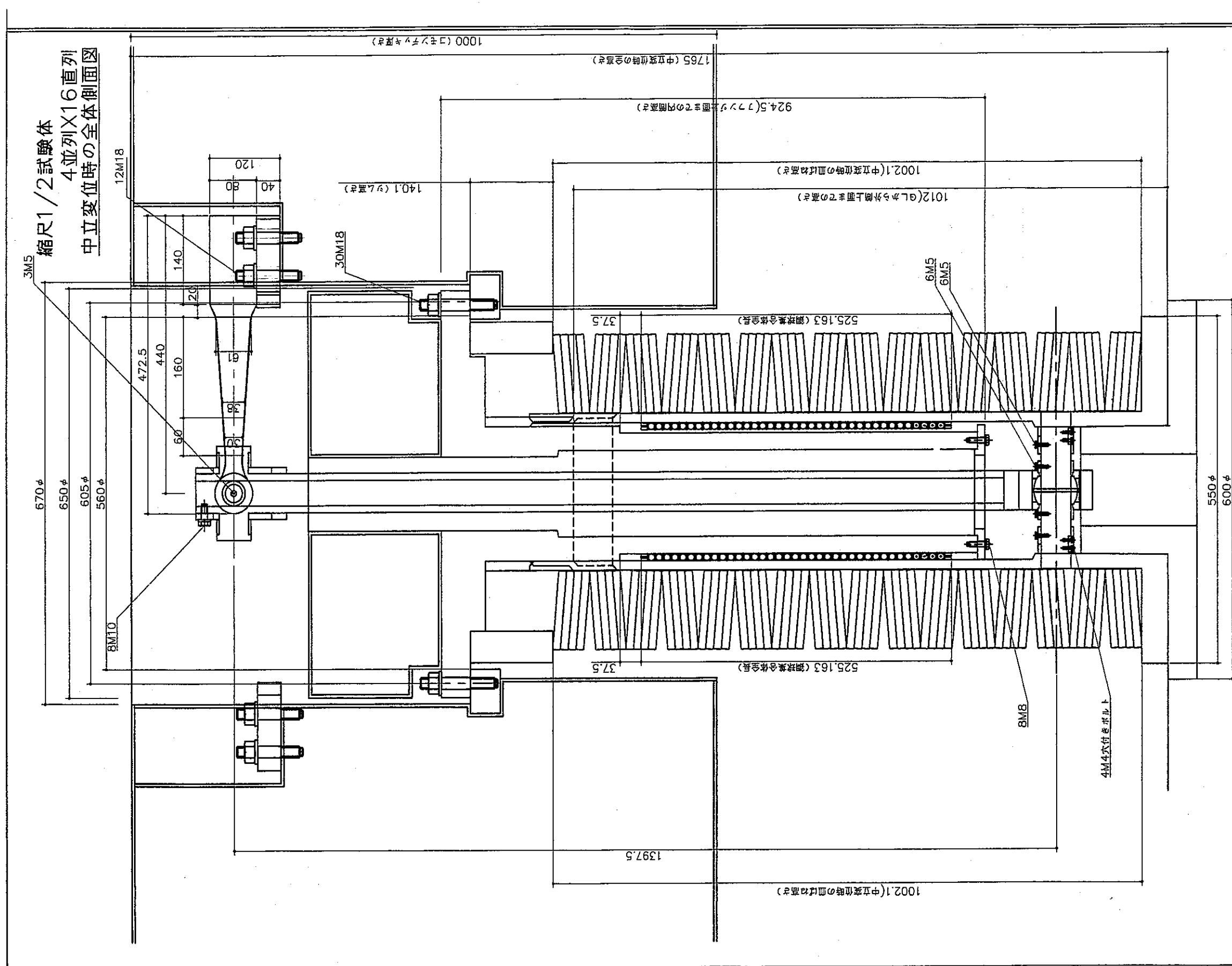


図 2.7-3 縮尺 1/2 試験体総合図 (5 並列×16 直列：中立変位時の全体側面図)

2.8 機器上下免震システム開発試験計画

(1) 概要

機器上下免震システムを構築するために、今後必要と考えられる開発全体の試験計画を立案する。

図 2.8.2-1 に、機器上下免震システム開発（指針作成）に向けた全体フローを示す。

フローは、皿ばね及び減衰要素等の免震要素及び構成部品を対象とした単体試験と、全てをアッセンブルした集合体試験より構成する。これらは、機器上下免震構造の成立性を確証するための構造試験であると位置付けられる。

実大寸法による試験の方が望ましいが、試験装置等の制約のため、集合体試験では縮小試験体を用いる。なお、可能な限り実大に近い縮尺率の選択と試験体製作性を勘案して、試験体の大きさを 1/2 としている。

以下に、試験計画の概略を示す。

(2) 縮小皿ばねの荷重特性試験

a. 試験目的

上下免震ユニット用に製作した皿ばね 70 枚に対して、

①まず、皿ばねユニット最小単位となる 5 並列を組合せるために 1 枚毎の荷重特性を把握する。

②次に、5 並列を 14 直列に組上げるために 5 並列毎の荷重特性を把握する。その際、摩擦係数を取得し、実大皿ばねとの違いがあれば、それを明確にしておく。

③実大規模では実施できなかった摩擦係数に対する動的載荷の影響を把握するとともに、繰返し載荷による荷重特性及び摩擦係数の安定性を把握する。

b. 試験方法

1 並列及び 5 並列の荷重特性を把握するための試験は、3000kN アムスラー静的試験機による。加力は、使用限界 0.75h0 に相当する変位振幅を 2 回程度繰り返す。

5 並列による動的載荷、繰り返し載荷による荷重特性及び摩擦係数の安定性を把握するため、動的アクチュエータによる載荷を行う。

図 2.8.2 に、試験のイメージと加力サイクルを示す。

c. 試験ケース

①静的試験：1 並列 × 70 ケース。5 並列 × 14 ケース。

②動的試験：5 並列に対して、動的載荷 N 回繰返し 1~2 ケース（振動数）。

③耐久試験：5 並列に対して、100 回程度の繰返し 1 ケース

(3) 減衰システムの実大要素試験及び縮小モデル試験

a. 試験目的

平成 14 年度 METI にて試験実施した減衰要素の形状に対して、配置を改善すような要素形状を検討し、実大要素の構造試験を行う。

また、減衰システムを構成する構成部品について、S2 地震時の荷重を対象とする実大規模での構造健全性試験を実施する。

一方、縮小モデルを用いた減衰システム全体（減衰要素 3 体及び構成品）を対象とするシステム確認試験を行い、荷重特性を把握するとともにシステムの成立性を確認する。なお、ここで得られた成果は、システム集合体試験を実施する際のデータに資する。

b. 試験方法

実大要素の構造試験では、平成 14 年度 METI での試験と同様に、振動台による変位強制加力・加振を行う。

構成部品の構造健全性試験では、実機と同じディテール・寸法を有する試験体を作成し、減衰要素 3 本に相当する荷重を静的に載荷する。

縮小モデルでのシステム確認試験では、減衰システム、振動台による動的加振を行う。

c. 試験ケース

①実大規模の要素試験

②構成部品に対して、減衰要素 3 本相当の静的荷重を載荷した状態で、軸受け部の変形性能及び健全性を確認する 1 ケース。

③縮小試験体 3 体 1 組と構成品を組合せたに減衰システムに対して、動的加振 1 ケース。

(4) ガイド構造の上下摺動性確認試験

a. 試験目的

実機では皿ばねを約 70 枚積上げてユニットを構成し、皿ばね 5 並列を 1 群として 1 群が最上段の内周面若しくは最下段の外周面を介して 14 段（直列）積上げられる。このように、70 枚の皿ばねを積上げた状態で安定的に荷重を支持するためには、皿ばね

内径側の空間を利用したガイドが必要となる。

ガイド構造は積上げた皿ばねユニットが上下振動時の座屈防止の機能を有するとともに、ガイド構造それ自身には上下方向には荷重を受けないが上下振動に対しては滑らかに摺動する必要がある。また、ガイド構造は、水平免震により低減された水平荷重に対して、強度抵抗により自立する必要がある。

これより、ガイド構造の水平無負荷の状態における上下摺動性を確認するとともに、地震時水平荷重を受けた状態での上下摺動性を確認することを、本試験の目的とする。

b. 試験方法

試験体は、縮尺率 1/2 とする。

図 2.8-3 に、試験方法を示す。試験方法は静的 2 軸試験機を用い、鉛直アクチュエータにより任意の強制変位 δv を与えて、上下方向の摺動性の試験を行う。また、水平方向のアクチュエータにより水平地震時の荷重を試験体下部の固定基礎に載荷し、ガイド構造の強度確認及び水平荷重時の上下摺動性を確認する。

c. 試験ケース

- ①上下摺動性確認静的鉛直載荷 : $\delta v = \pm 50\text{mm}$ ($\pm 100\text{mm}/2$) 又は $\pm 75\text{mm}$ ($\pm 150\text{mm}/2$)、N 回繰返し。
- ②水平荷重時上下摺動性確認静的鉛直載荷 : $\delta v = \pm 50\text{mm}$ 又は $\pm 75\text{mm}$ 、N 回繰返し。

(5) ガイド構造の限界状態確認試験

a. 試験目的

本試験は、ガイド構造の水平荷重時限界状態及び限界耐力を把握する。

b. 試験方法

試験体は、縮尺率 1/2 とする。

試験方法（図 2.8-3 参照）は、静的 2 軸試験機を用い、水平地震時の水平荷重を起点としてステップ毎に荷重を漸増させ、上下摺動特性及び水平特性（剛性、荷重特性）を把握する。なお、任意の水平荷重における上下摺動は、1 回とする。

上下摺動性が失われた時点を使用限界と位置付け、更に水平荷重を大きくしてガイドが破壊するまで載荷し、上下免震装置の終局限界状態を探る。なお、限界状態の定義（水平耐力の低下時点とする等）を、試験前に明確にしておく必要がある。

c. 試験ケース

- ①水平地震時の水平荷重から ΔP 増分毎に上下摺動性を確保できなくなる荷重を確認する : $\delta v = \pm 50\text{mm}$ 又は $\pm 75\text{mm}$ 。
- ②①後、限界耐力までの水平載荷を行い、荷重低下が生じるまでの荷重を確認する。

(6) 直並列に重ねた皿ばね集合体確認試験

a. 試験目的

ガイド構造の上下摺動性確認試験では皿ばねが無い状態での試験であるが、実機では70枚の皿ばねが組込まれる。実機を模擬した皿ばねユニットとガイド構造と組合せた集合体による試験を行い、ガイド構造の摺動部に皿ばねを噛まずに滑らかな上下摺動性を確認するとともに、皿ばね並列群の内周面とガイド構造との接触した場合に対する荷重特性への影響を調査する。

b. 試験方法

ガイド構造及び直並列に重ねた皿ばねに対する試験方法は、図2.8-4に示す静的2軸試験機を用いる。皿ばねユニットの積上げ方は、縮小皿ばねの荷重特性試験の結果に基づいて設定する。試験の内容は、ガイド構造の上下摺動性確認試験と同じとする。

c. 試験ケース

- ①皿ばね集合体に対する静的鉛直載荷によるスムーズな上下摺動性を確認するケース。
- ②皿ばねとガイド構造を接触させた場合の荷重特性への影響を把握するケース。
- ③静的水平載荷による荷重特性を把握するケース。

(7) 3次元振動台による性能・健全性確認試験

a. 試験目的

皿ばね集合体を用いて、3次元振動台による免震性能確認試験を行い、免震性能を確認するとともに、装置の健全性確認、設計手法及び解析手法の妥当性を確認する。

b. 試験方法

試験方法を、図2.8-5に示す。皿ばね集合体の下部を3次元振動台に固定し、集合体上部を固定用フレームに取付ける。固定用フレームには、錘を積載して所定の支持荷重を与える。なお、試験体の皿ばね集合体は1体であるので、転倒モーメントにより転

倒し易い。そこで、ケーブル式等の転倒防止装置を取付ける。実際のプラントでは、上下免震ユニット複数体によりコモンデッキが支持され、皿ばねユニットが同時に上下方向に作動するため、転倒モーメントは小さくなる。なお、転倒防止装置は、水平及び上下方向についてはフリー（無拘束）の状態である。

c. 試験ケース

- ①振動特性（共振曲線）を把握するための正弦波加振（水平、上下）。
- ②ケーススタディ波 S2 応答波入力による性能・健全性確認のための応答波加振。

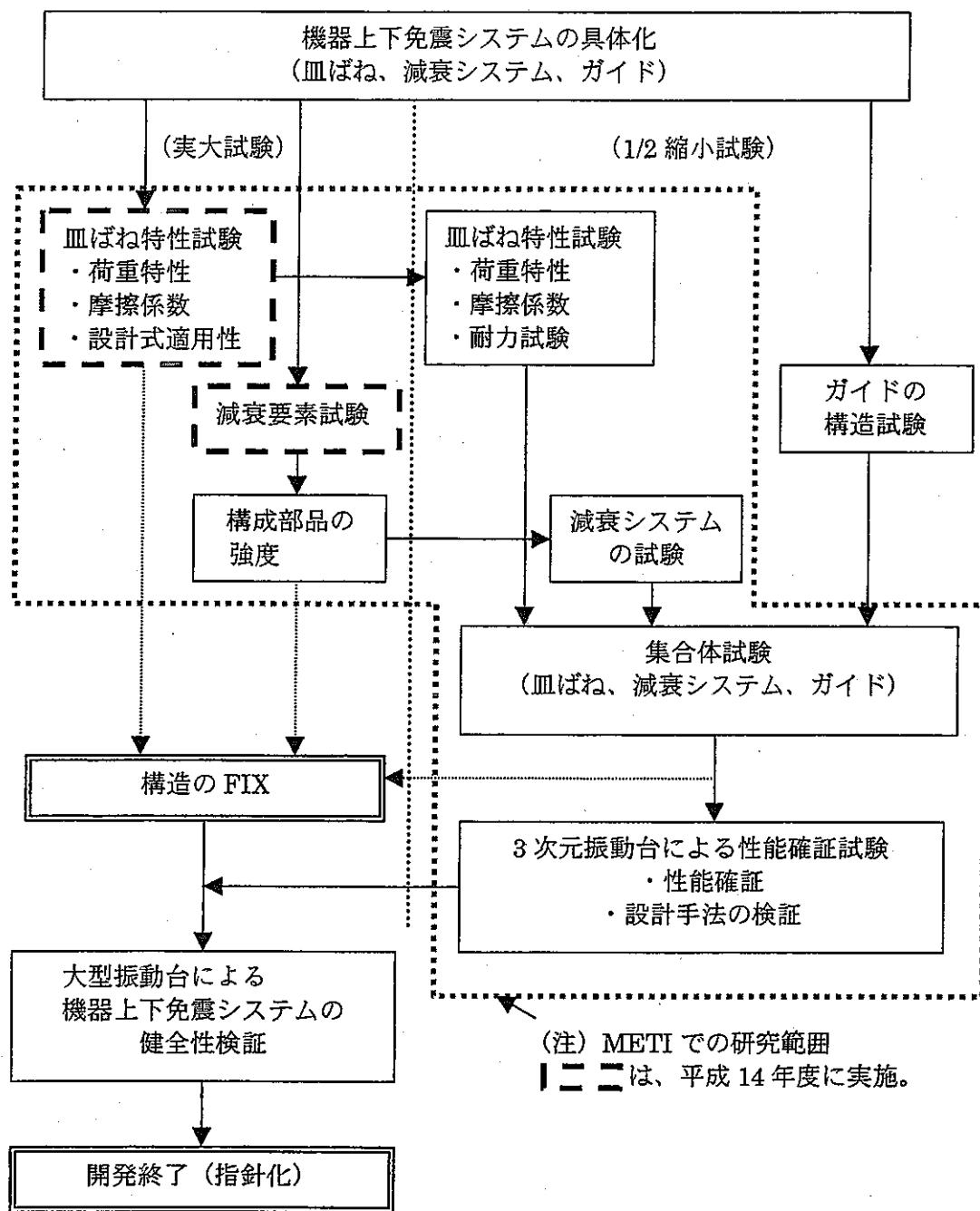


図 2.8-1 機器上下免震システム開発の全体フロー

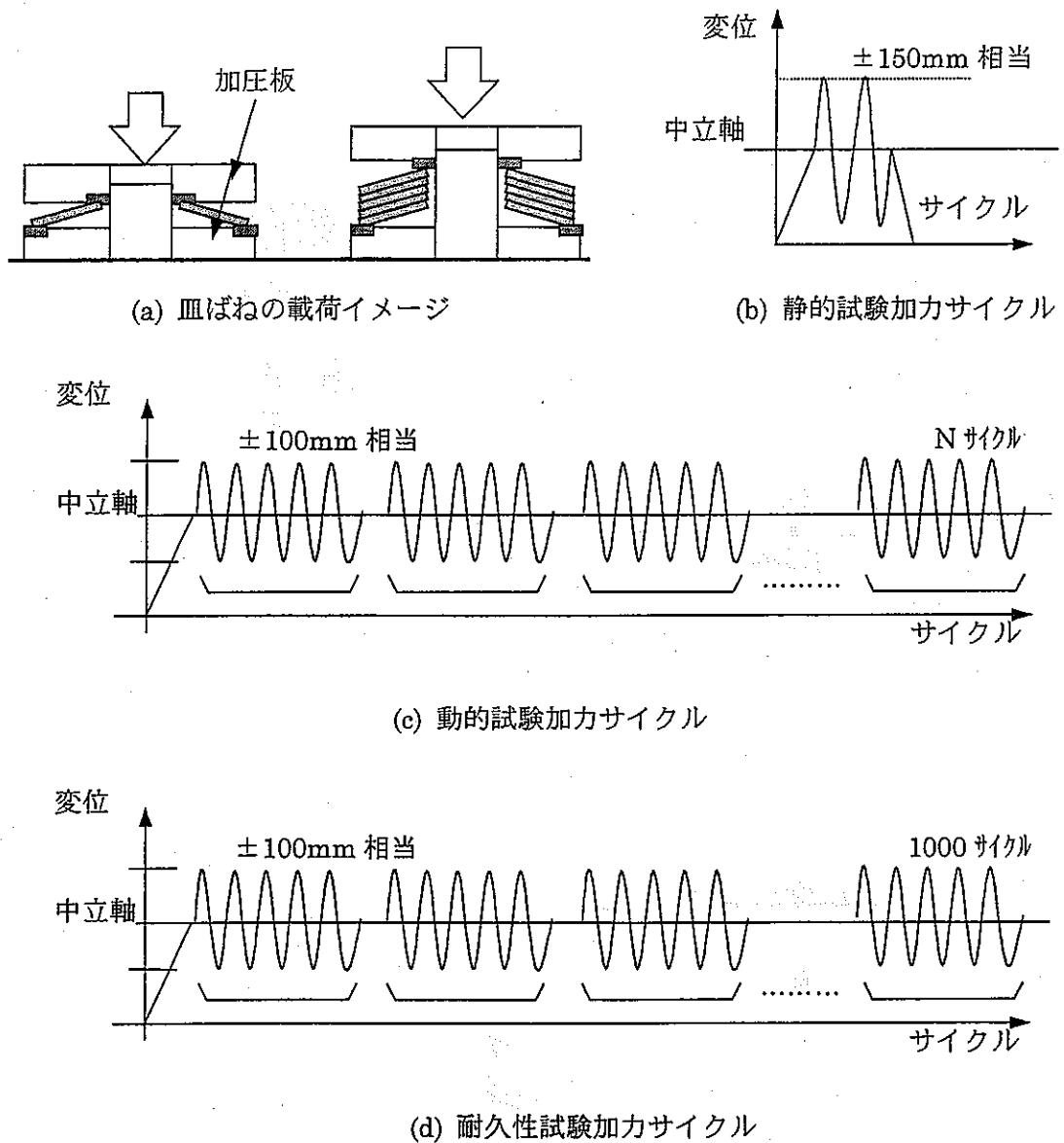


図 2.8-2 縮小盤ばねの静的・動的加力試験のイメージ

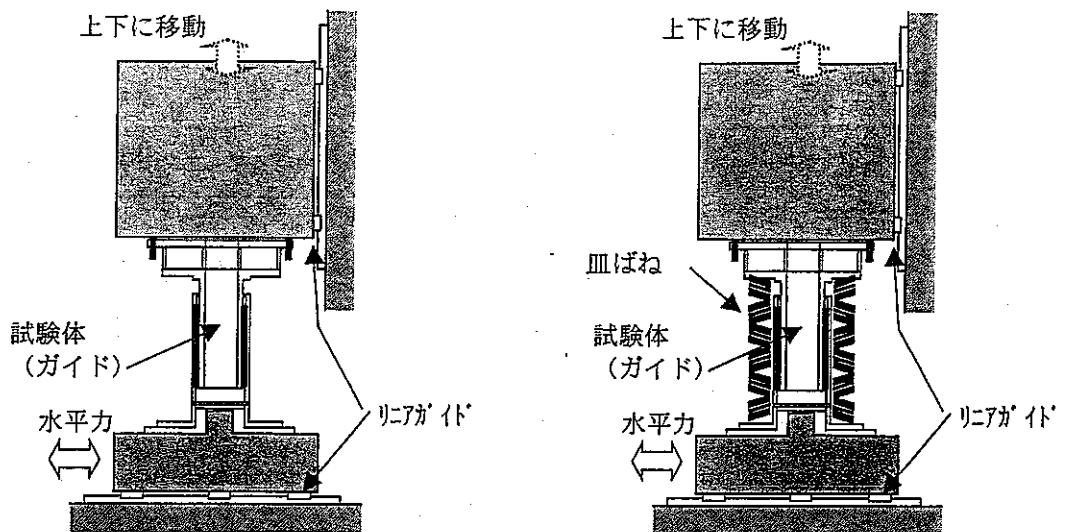


図 2.8-3 ガイド構造の上下摺動性確認試験
験・限界状態確認試験

図 2.8-4 直並列に重ねた皿ばね集合体確認
試験

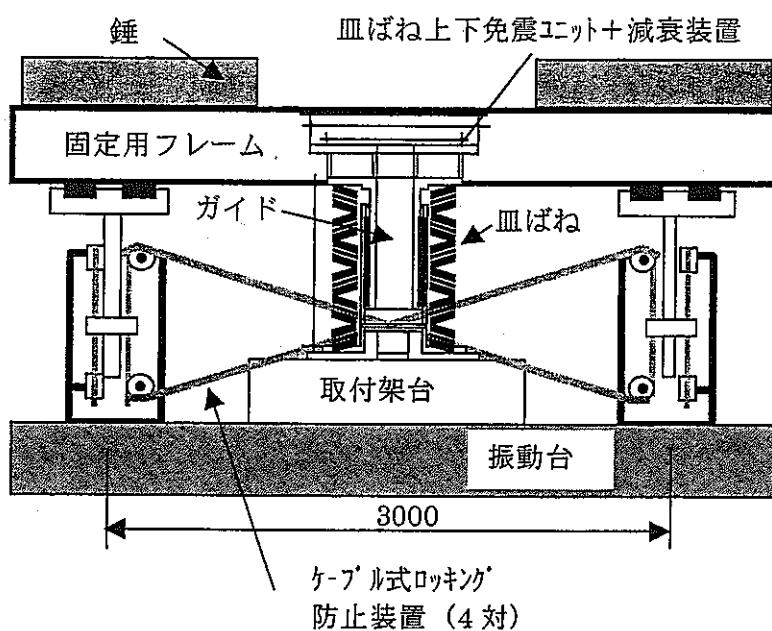


図 2.8-5 3次元振動台による性能・健全性確認試験

3. おわりに

本研究においては、機器上下免震要素の構造計画の具体化を行うとともに、構造成立性を確認するための試験計画を立案した。また、免震要素と組み合わせて用いる減衰要素の構造についても調査検討を行い、機器免震構造全体の具体化を図った。

主な成果は、以下の通りである。

- ・ 平成 13 年度実大皿ばねの試作結果を踏まえ、10 枚の皿ばね(平成 14 年度 METI 研究)について設計、製作及び品質管理を実施した。試作時と同程度の製作精度が確保されており、荷重特性におけるバラツキも認められなかつた。この際、品質管理上の新たな知見は得られなかつた。
- ・ 平成 14 年度 METI 研究の試験結果を対象とする FEM 解析を行い、荷重特性及びひずみの比較より、FEM 解析の妥当性を確認した。これに基づき、皿ばねを並列に重ねた場合の荷重伝達及び応力状態を把握した。
- ・ 平成 13 年度に試作した実大皿ばねと同一の材料及び同一の熱処理を受けた供試体から、クリープ試験片を製作し、皿ばねが設置される温度条件を考慮して、低温のクリープ試験が JNC 殿にて実施された。長期に亘る時間データが得られたことにより、時間累乗則 0.04 については、平成 13 年度の予備試験結果 0.1 より小さい結果が得られた。このデータを基に供用 60 年間のクリープ変形を FEM 解析より算出した結果、クリープ変形は 5 並列 14 直列で 0.7mm 程度であり、荷重特性は供用 60 年において殆ど変化しないことが分かつた。
- ・ 平成 14 年度 METI 研究での試験結果、設計式及び FEM 解析を用いて、実機皿ばね 5 並列 14 直列を推定した。3 者による評価は概ね一致しており、実機を推定する上で設計式及び FEM は、設計手法として妥当であることが示された。
- ・ コモンデッキを含む機器上下免震システムについて、水平及び上下方向の地震動を同時に考慮した総合地震応答解析を行い、上下免震装置の上下変位及び機器の応答加速度が制限値以下であることを確認した。なお、水平動によるコモンデッキの水平変位は最大 2cm 程度となることが分かつた。
- ・ 機器上下免震装置を構成するガイド構造及び減衰システムについて構造検討(FEM 解析)等を実施した上で全体像を具体化し、装置詳細図を作成した。
- ・ 次年度以降行う試験体について、試験体の縮尺率について検討を行つた。検討に際して、3 次元振動台による機器上下免震システム性能確証試験を

考慮した可能な限り大きな試験体とし、また、構成品の調達(作り易さ)の観点から、実機の1/2の縮尺で試験体を製作することとし、図面を作成した。

- 皿ばねを用いた機器上下免震システムの性能確認を最終段階にて行う3次元振動台試験、及びそこまでに必要な試験計画(皿ばね、減衰、ガイド、集合体)を立案した。