

E-Simulatorによる免震支承の 地震時動的挙動の 詳細有限要素解析

大崎 純(広島大学)

宮村倫司(日本大学)

小檜山雅之(慶應大学)

山下拓三(防災科学技術研究所)

山本雅史, 中村尚弘(竹中工務店)

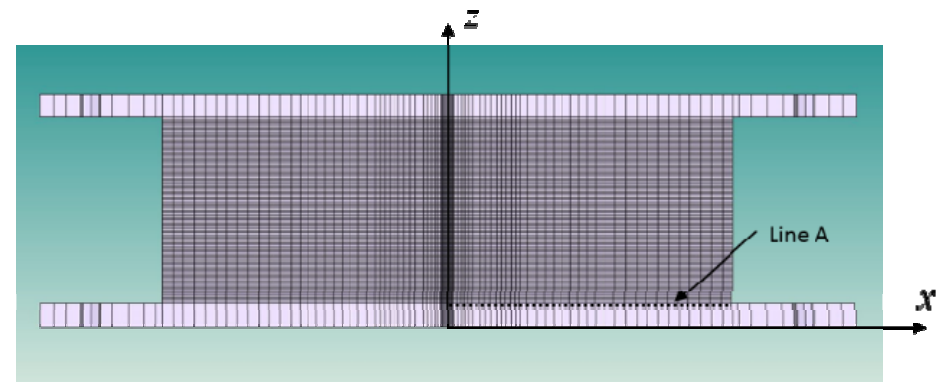
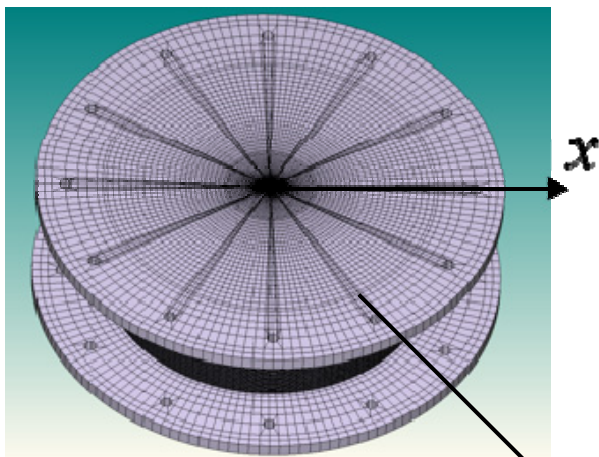
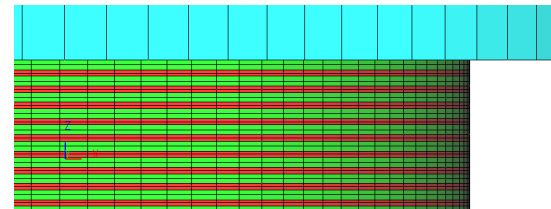
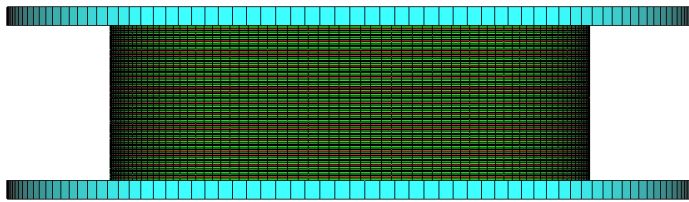
研究の背景

- 積層ゴム免震支承の有限要素解析:
 - 解析法が確立されているとはいえない。
 - 非圧縮性を有するゴム材料の解析は困難
 - 超弾性モデル, 粘弾性モデル,
Mooney-Rivlin, Ogden モデル
- 積層構造の有限要素解析:
 - Numerical reduction model
- マクロモデル:
 - 1自由度, 2自由度, バイリニア, 非線形
 - 大域的応答量の評価

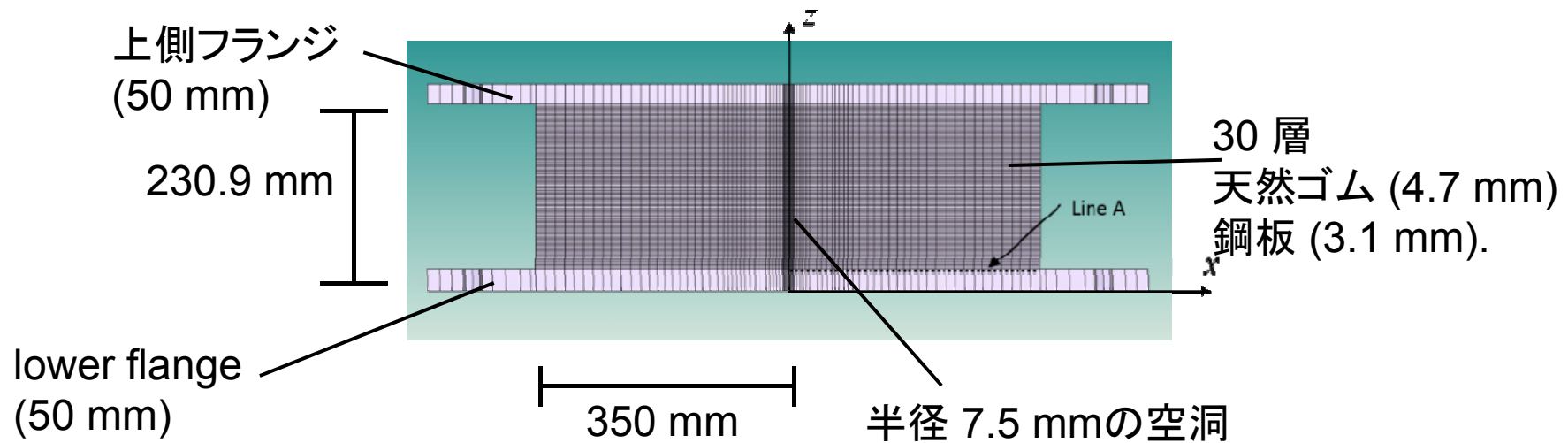
数値震動台プロジェクト

- 材料の構成則とメッシュ分割による高精度崩壊解析
 - 局所応答(座屈)と全体応答(倒壊)を同時にシミュレート
 - ヒンジモデル, 合成梁モデル, 柱脚ばねモデルなどが不要
 - 構造の物理実験が不要になる
(材料レベルの実験は必要)
- 部材・接合部などの崩壊挙動の解明
 - 新しい制振デバイス・制振機構の開発
- 数値実験プラットフォームの開発
 - ADVENTURECluster
 - 実験の代替となるようなシステム
 - 製品開発のための最適化プラットフォーム

免震支承のモデル



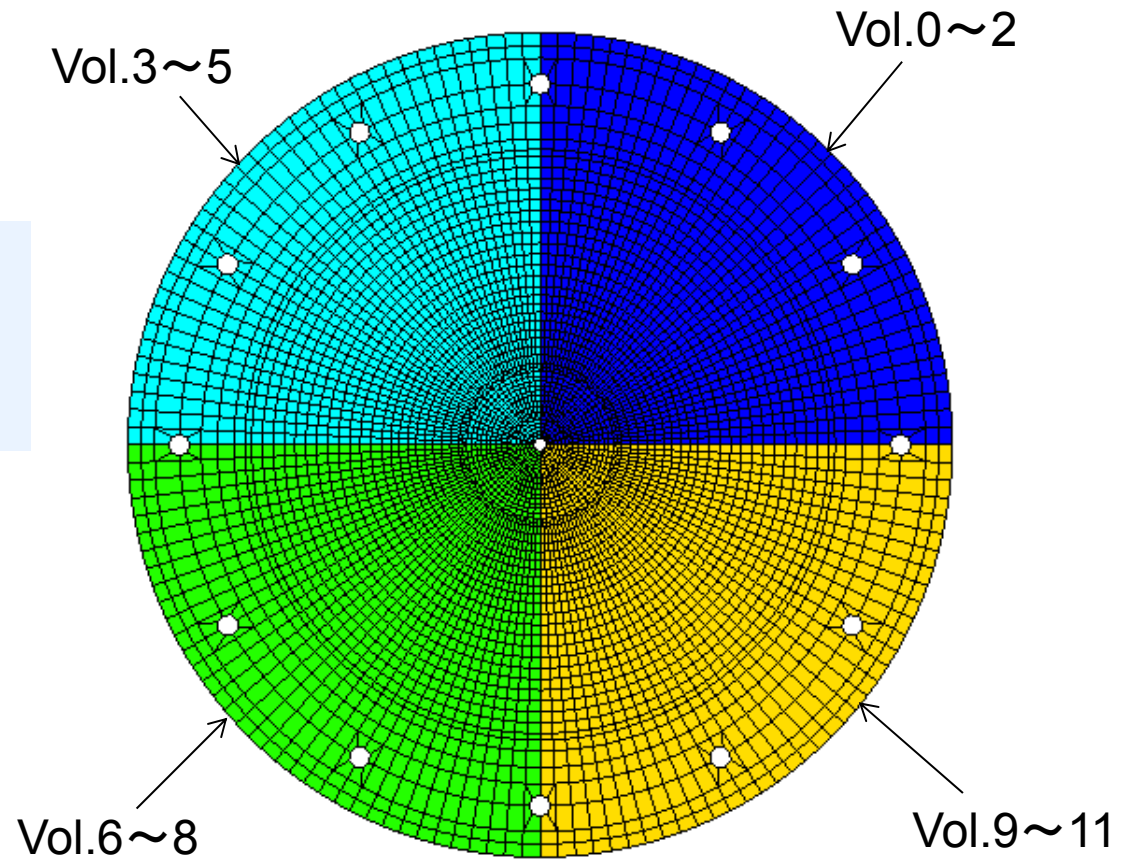
MPC (剛体梁)



- 被覆ゴムは考慮しない
- ゴムと鋼板を2層のソリッド要素
 - 線形, 8節点完全積分
- 上面の節点を MPC (剛体梁) で連結
- 免震支承モデルのサイズ
 節点数: 502,980, 要素数: 486,240
 自由度数: 1,525,002

積層ゴムのモデル

12 volume



| Vol. | 名称 | Vol. | 名称 | Vol. | 名称 | Vol. | 名称 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0 | フランジ1 | 3 | フランジ2 | 6 | フランジ3 | 9 | フランジ4 |
| 1 | 内部ゴム1 | 4 | 内部ゴム2 | 7 | 内部ゴム3 | 10 | 内部ゴム4 |
| 2 | 鋼板1 | 5 | 鋼板2 | 8 | 鋼板3 | 11 | 鋼板4 |

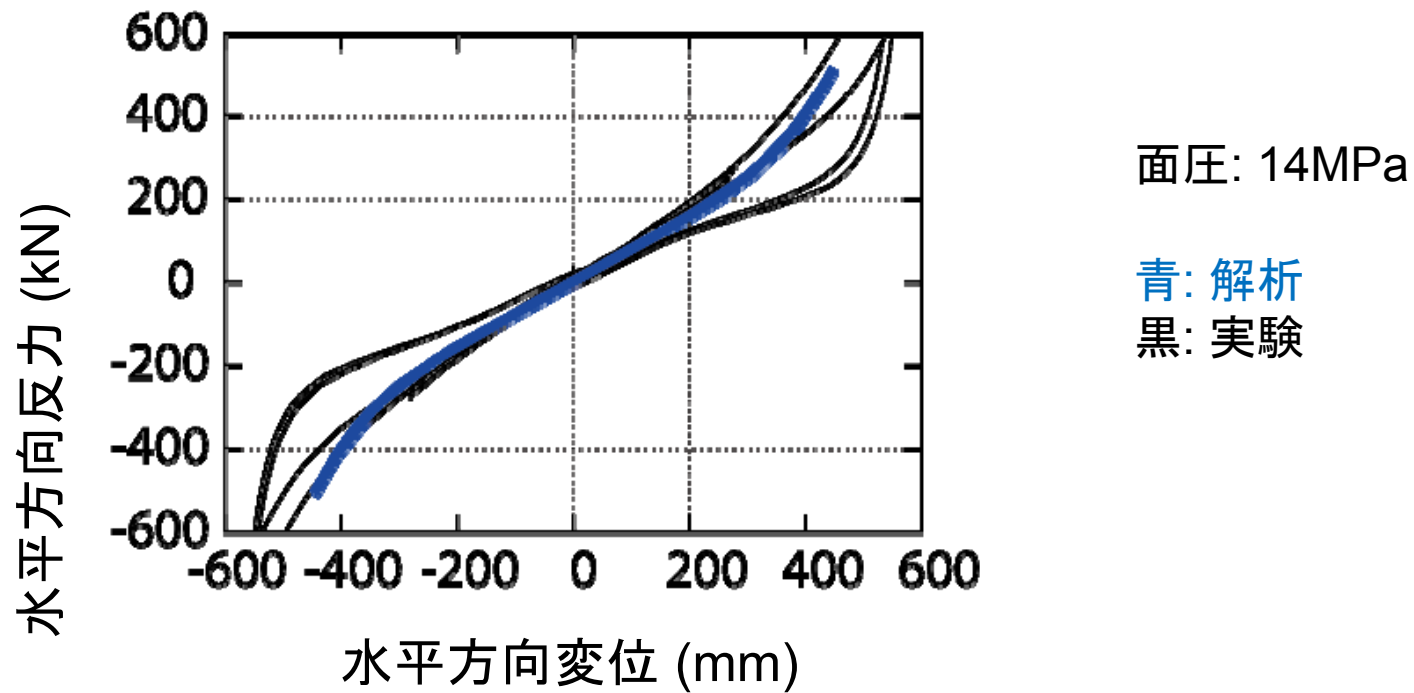
材料パラメータ

Ogden モデル

$$U = \sum_{n=1}^2 \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_n} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_n} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_n} - 3) + 4.5K(J^{1/3} - 1)^2$$

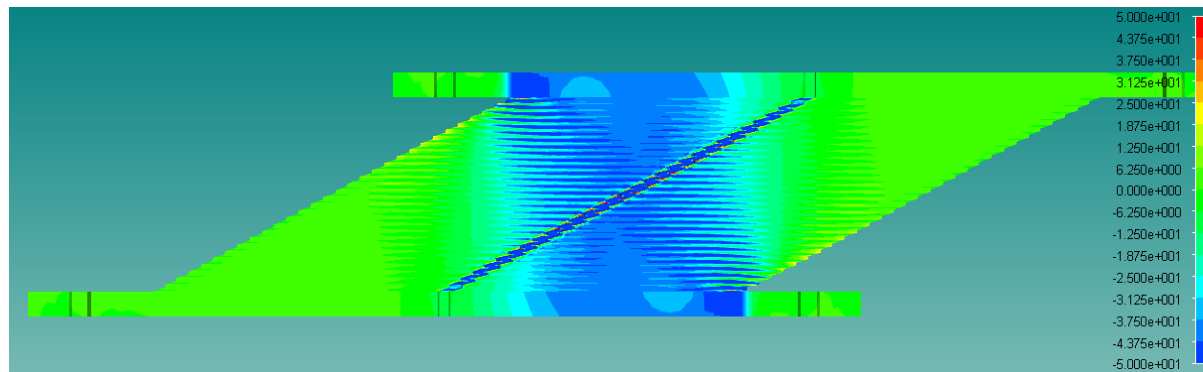
- 体積弾性係数 $K = 1000 \text{ MPa}$
 $\alpha_1 = 1.6, \alpha_2 = 6.2, \mu_1 = 0.41, \mu_2 = 0.0012$
- ゴムの密度: $2.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- 鋼材の降伏応力: 235 MPa

静的載荷



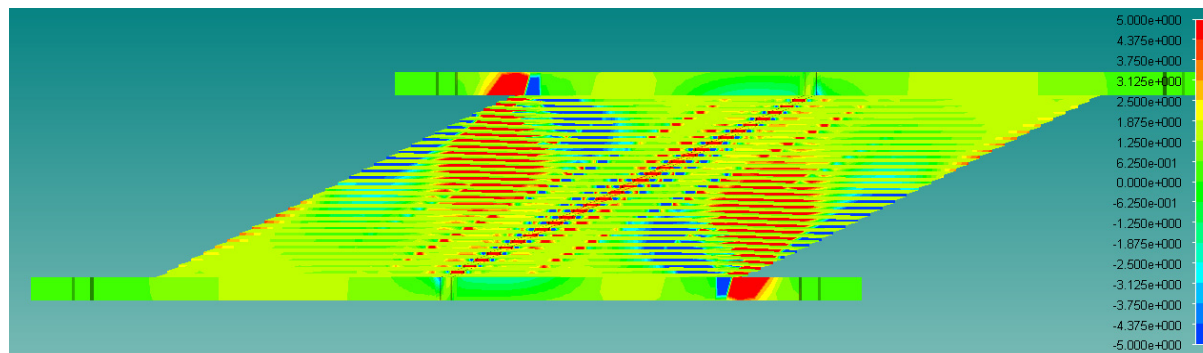
水平方向の力・変位関係を高精度で再現

最大変形時の応力



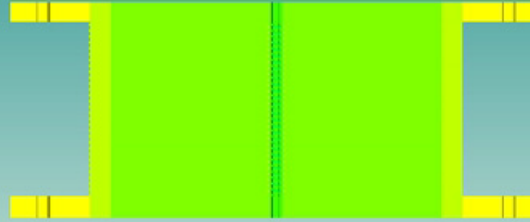
鉛直力を
限定された
領域で支持

鉛直方向応力



せん断応力

Analysis: Static, Results: Step, Solver: ADVCSolver 4.9.1
Model size: 502981 nodes, 491592 elements
Variable: Stress[zz], Time step: 4/32
Process Name = Process_1 Process Number = 1
Time = 1.5750000e+000
Deformation factor = 1.0000000e+000



Z
X

Rainbow[16]

2.000e+001
1.563e+001
1.125e+001
6.875e+000
2.500e+000
-1.875e+000
-6.250e+000
-1.063e+001
-1.500e+001
-1.938e+001
-2.375e+001
-2.813e+001
-3.250e+001
-3.688e+001

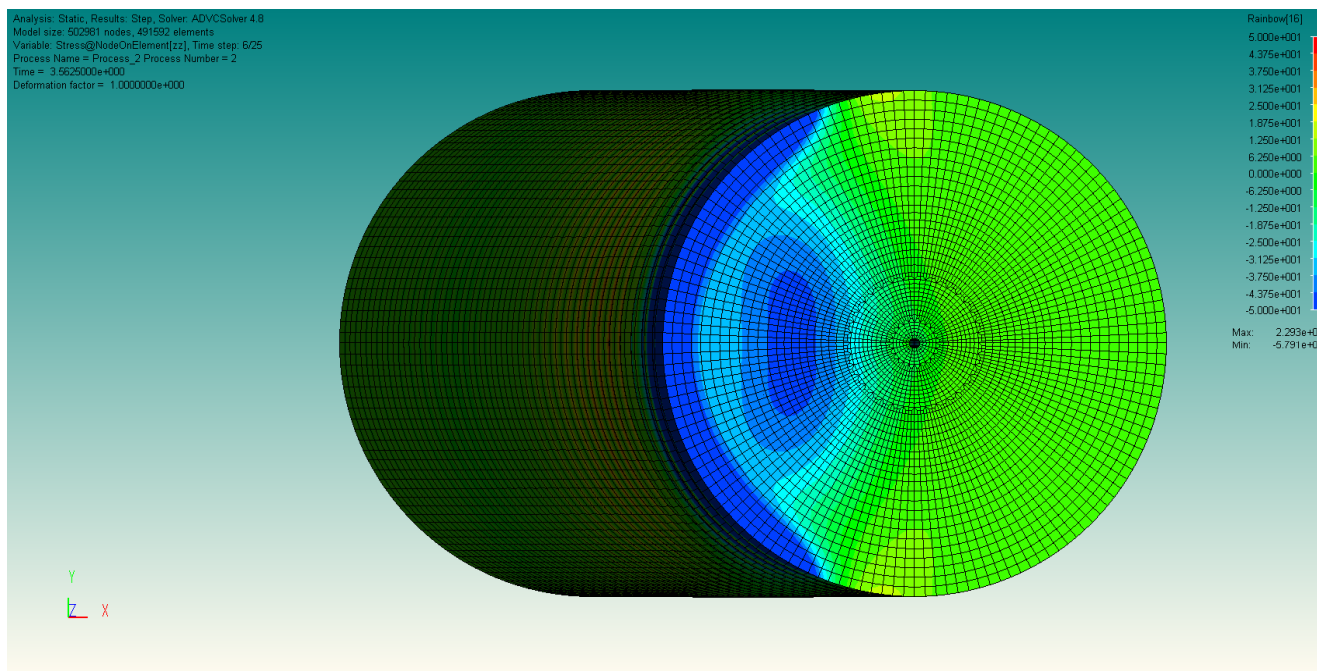
Analysis: Static, Results: Step, Solver: ADVCSolver 4.9.1
Model size: 502981 nodes, 491592 elements
Variable: Stress[zz], Time step: 4/32
Process Name = Process_1 Process Number = 1
Time = 1.5750000e+000
Deformation factor = 1.0000000e+000

Z
X

Rainbow[16]

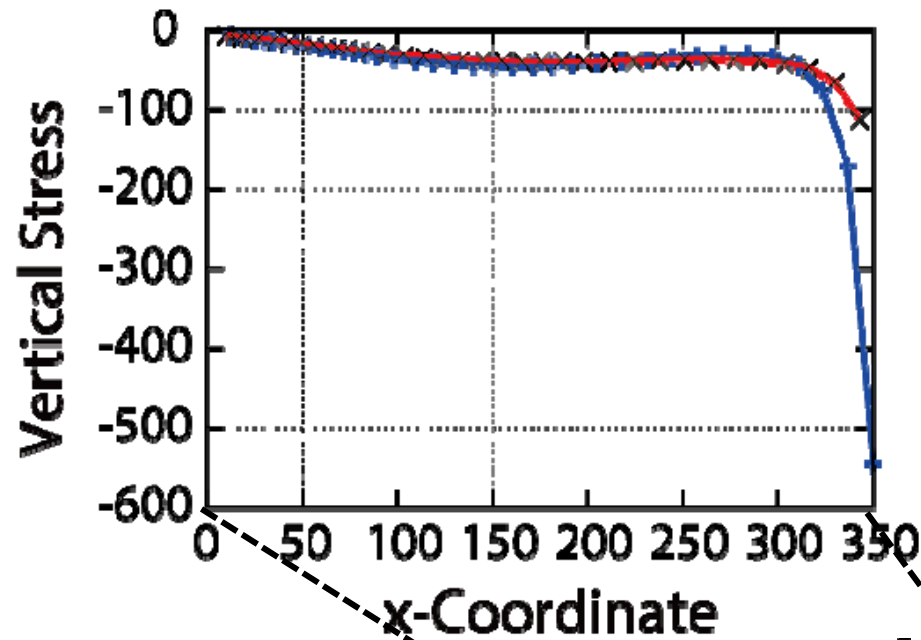
2.000e+001
1.563e+001
1.125e+001
6.875e+000
2.500e+000
-1.875e+000
-6.250e+000
-1.063e+001
-1.500e+001
-1.938e+001
-2.375e+001
-2.813e+001
-3.250e+001
-3.688e+001
-4.125e+001
-4.563e+001
-5.000e+001

鉛直方向接触応力

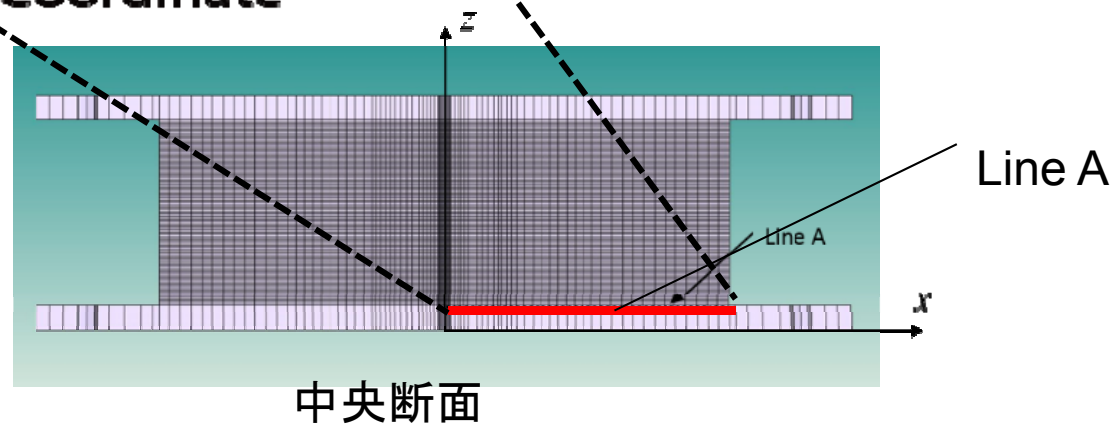


接触応力は不均一

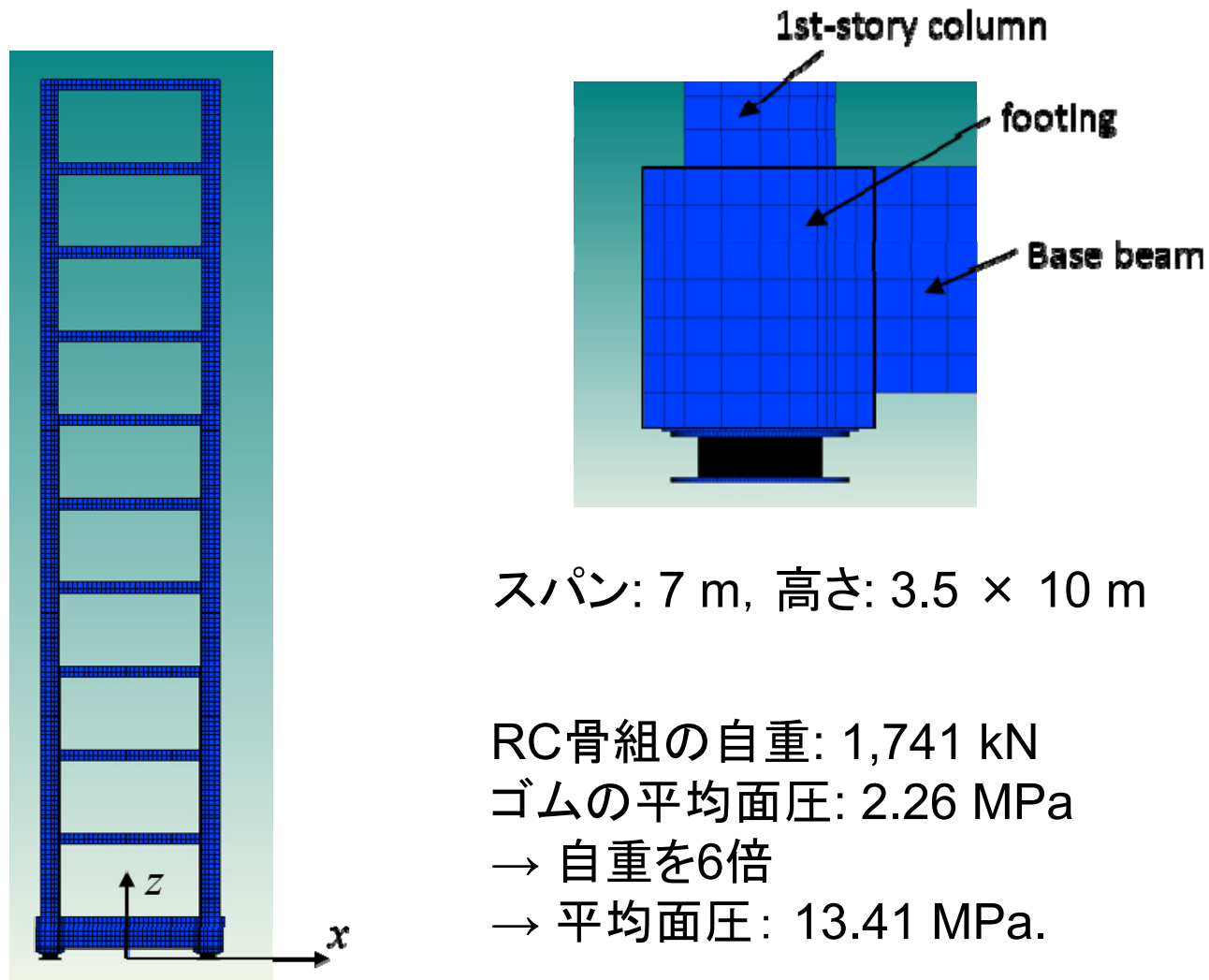
鉛直方向応力分布



赤: 積分点での応力
青: 節点での応力



骨組モデル



スパン: 7 m, 高さ: 3.5 × 10 m

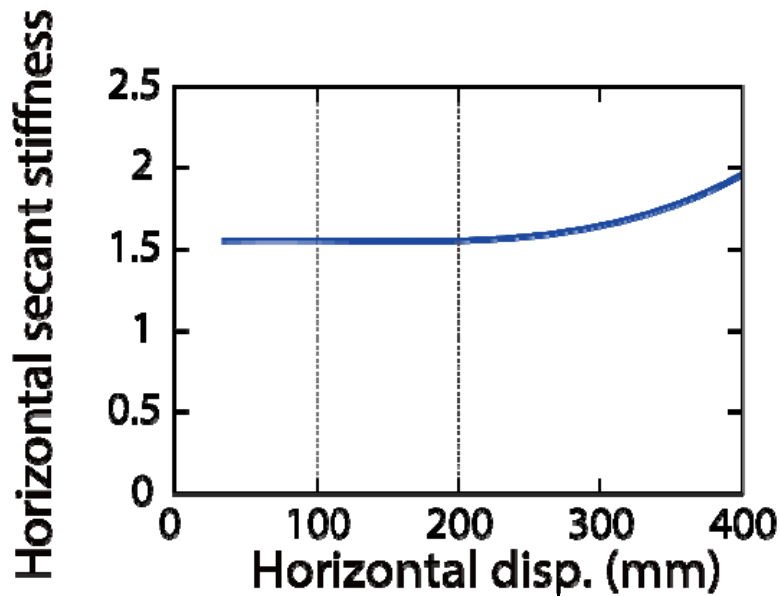
RC骨組の自重: 1,741 kN

ゴムの平均面圧: 2.26 MPa

→ 自重を6倍

→ 平均面圧: 13.41 MPa.

骨組モデルの水平方向剛性

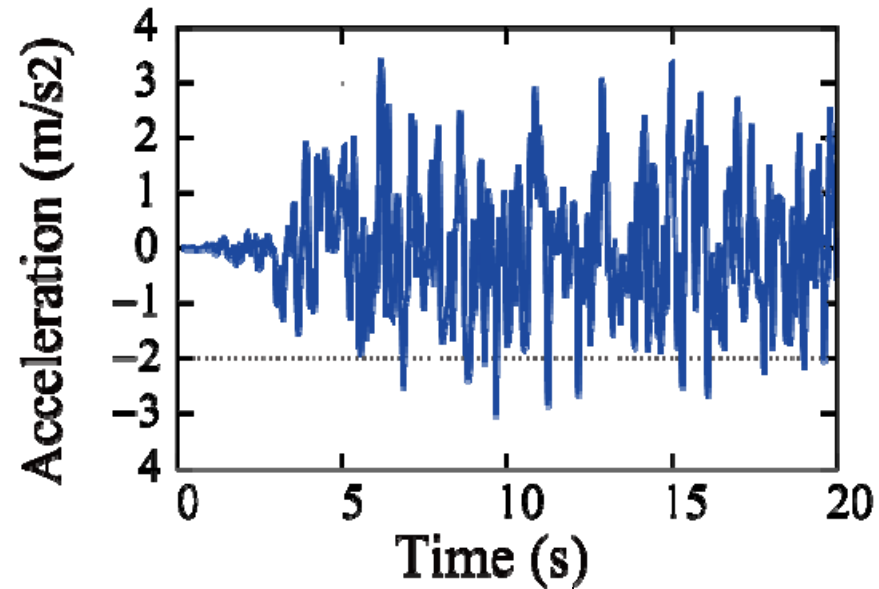


- 割線剛性:
水平変位 350 mm で1.77 kN/mm
- 基礎梁の中央と地面との間に粘性ダンパーを設置
- 上部骨組は剛体
→ 1次固有周期 = 4.784 s
→ 粘性定数 15 %に対応する
粘性係数 = 412.1 kN s/mm
- 上部骨組は, 剛性比例減衰(3%)

静的解析で得られた割線剛性

地震応答解析

BCJ-L2波



積分ステップ: 初期値 0.01 sec, 自動的に修正
CPU 時間

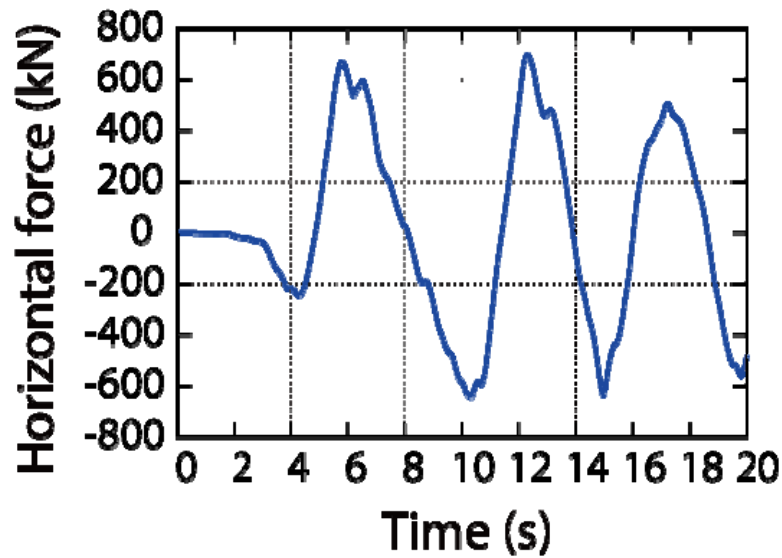
Intel Xeon E5-2687W 3.10GHz × 2 (16 cores):

1.5811×10^6 秒 (18日 7.19時間)

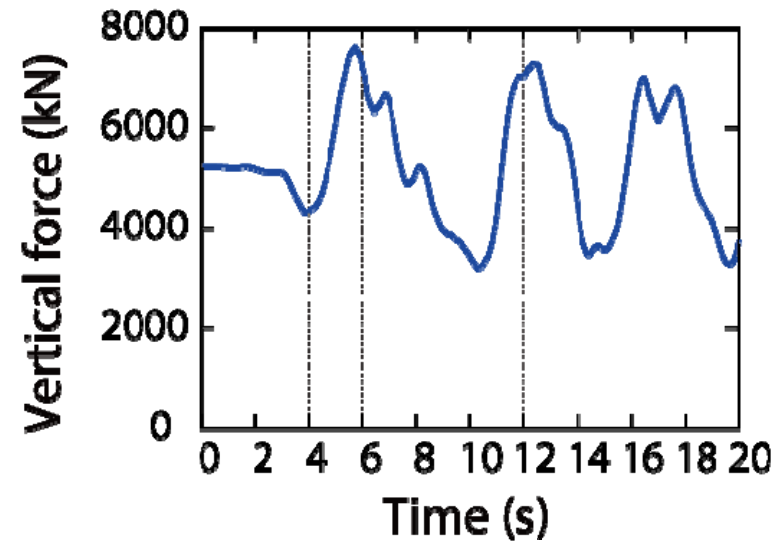
自重解析を含む2,020 ステップの平均CPU時間:

783 秒 (約13分)

反力応答



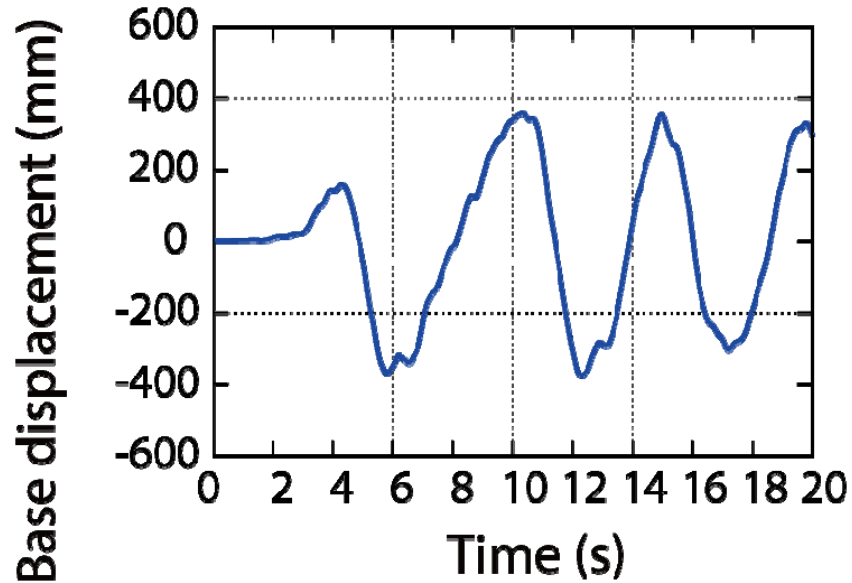
水平方向



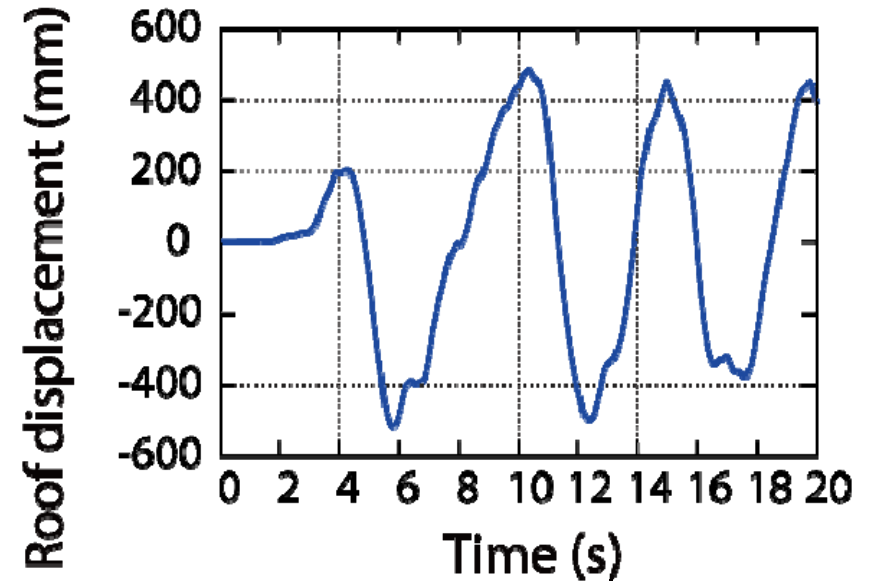
鉛直方向

| | 水平方向 | 鉛直方向 (左) | 鉛直方向 (右) |
|----|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 最大 | 6.9685×10^5 | 7.6069×10^6 | 7.2730×10^6 |
| 最小 | -6.4324×10^5 | 3.1955×10^6 | 2.8629×10^6 |

変位応答



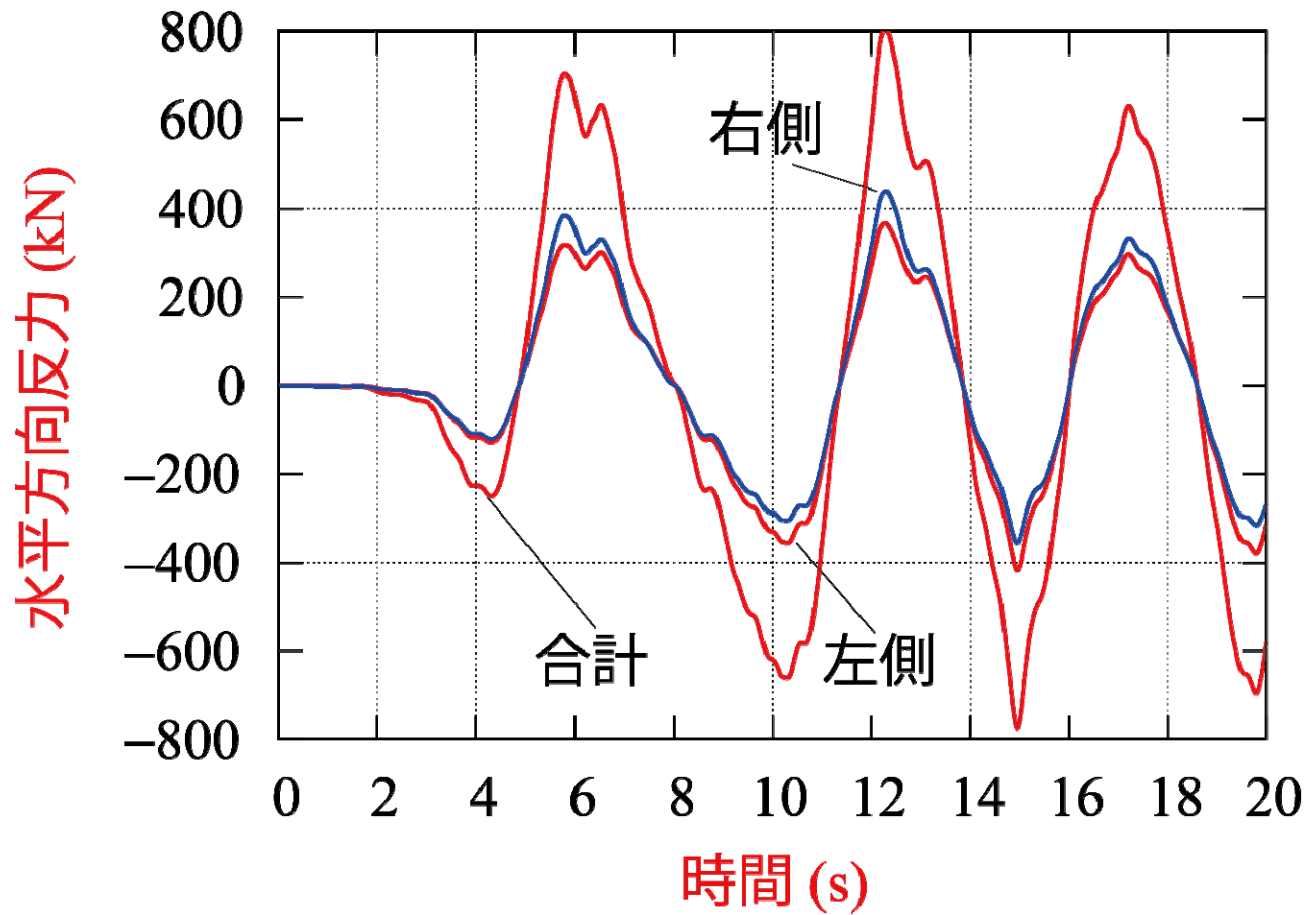
基礎(1階床)



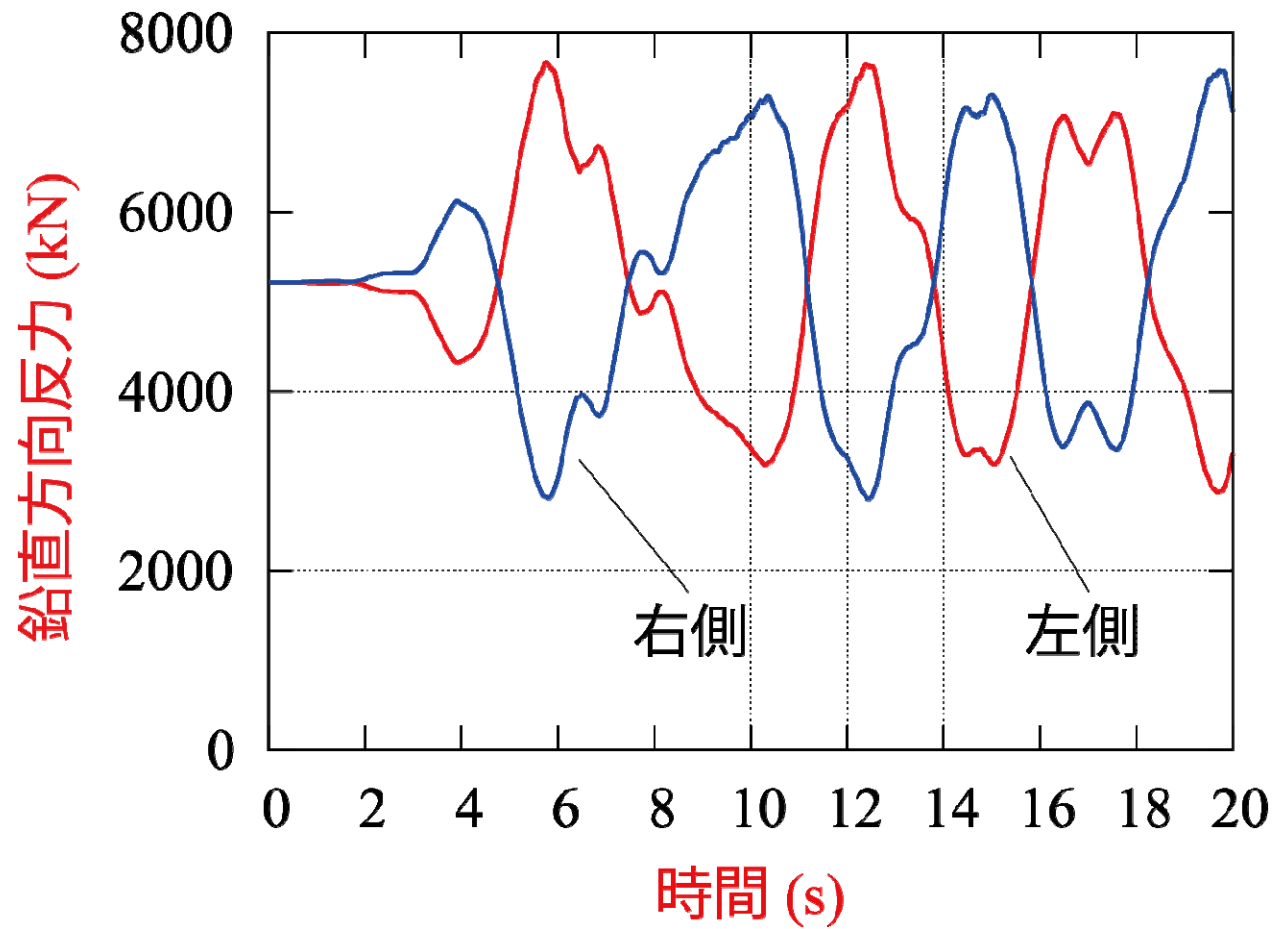
屋根

| | 免震支承上部 | 屋根 |
|----|---------|---------|
| 最大 | 359.51 | 482.95 |
| 最小 | -375.84 | -517.62 |

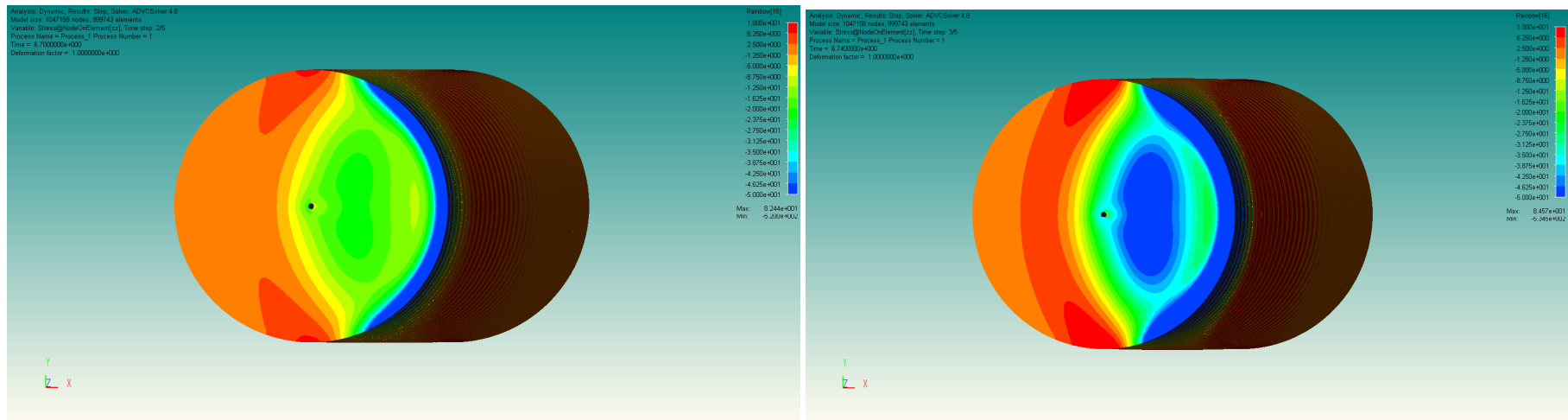
水平方向反力



鉛直方向反力



左右の支承の鉛直方向応力

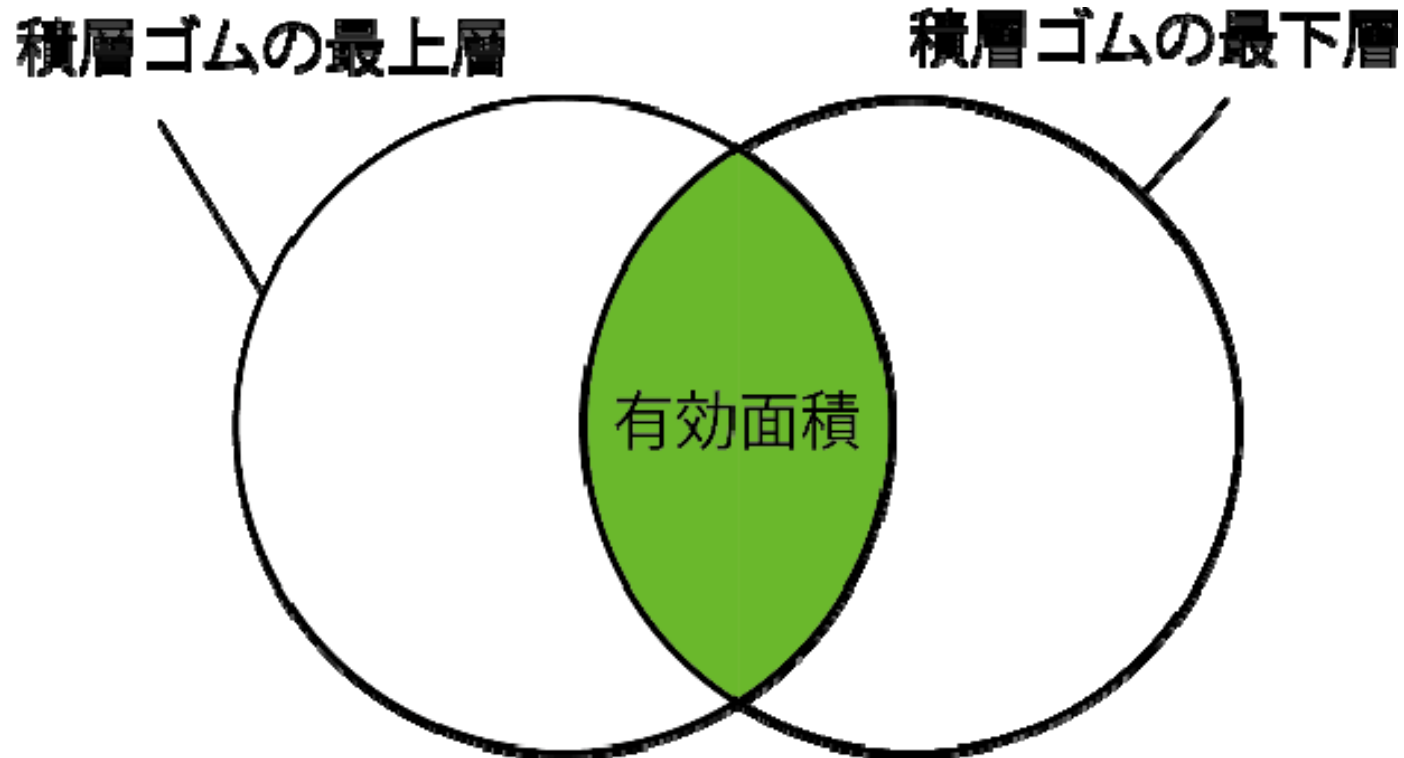


右側 ($t = 12.28$ s)

左側 ($t = 5.74$ s)

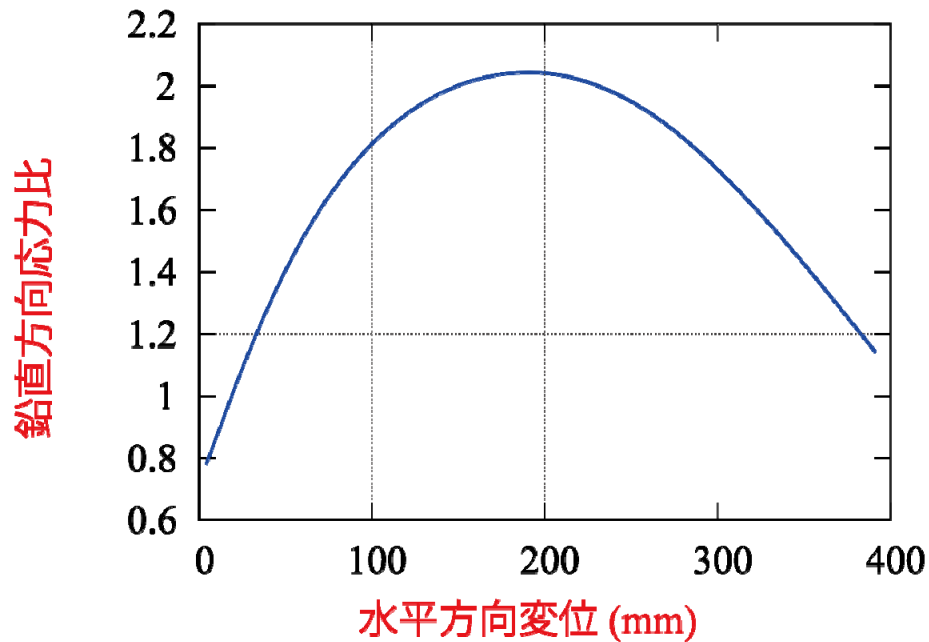
転倒モーメントのため非対称

有効面積の定義

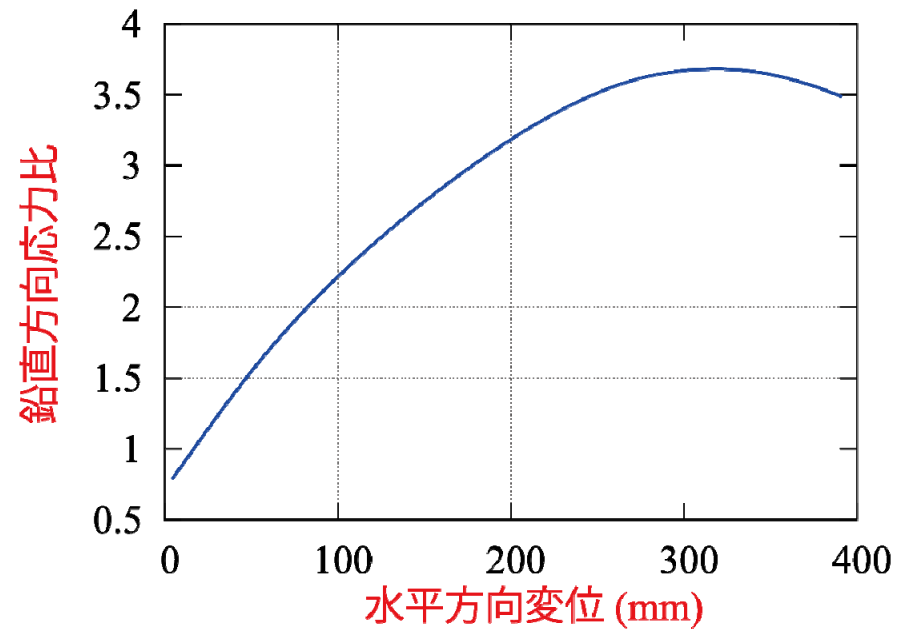


水平方向に変形した状態

鉛直方向応力比 (平均応力に対する比)



有効面積を用いた場合



全面積を用いた場合

結論

- 天然ゴム免震支承の荷重変位関係は、Ogden体を用いて精度良く表現できる。
- 非圧縮特性を有する超弾性体を含む300万自由度のモデルの地震応答を、16コアのPCを用いて現実的な時間で解析可能である。
- 支承全体のグローバルな特性(荷重変位関係)と、積層ゴム内部のローカルな特性(応力分布)を、同時にシミュレート可能である。

結論

- 鉛直方向応力は、全断面積を用いた平均応力ではなく、変形状態での上面と下面の共通集合である有効面積を用いることにより、高精度に推定できる。
- 水平方向反力は、鉛直方向の圧力に大きく依存するため、転倒モーメントにより、各支承が負担する水平力は大きく異なる。
- 免震支承の大変形時の応力分布は一様ではなく、鉛直方向力が圧縮であっても、局所的に引張になる場合がある。