

平成21年度
建築基準整備促進事業

12. 免震建築物の基準の整備に資する検討

鹿島建設株式会社

株式会社織本構造設計

株式会社松田平田設計

共同研究者：独立行政法人建築研究所

社団法人日本免震構造協会

テーマ概要

■ テーマ：

1 2 免震建築物の基準の整備に資する検討

■ 平成20年度から継続

■ 調査名：

小規模免震建築物の免震材料品質に関する調査ならびに
強風に対する免震材料特性評価

■ 調査の概要：

- (イ) **小規模建築物**に関して、構造方法や施工品質を含む免震材料の品質基準、ならびに安全性を確認する簡易的な応答評価方法について検討・検証する。
- (ロ) **強風**に対する免震材料のエネルギー吸収性能に関して、考慮すべき設計風速時刻歴、超高層免震建築物の風応答特性、風荷重を想定した免震材料の長時間加振実験により検討する。

実施体制

管理技術者		担当業務内容
鹿島建設(株)	竹中 康雄	調査業務全般担当 全体統括・とりまとめ
(株)織本構造設計	中澤 昭伸	
(株)松田平田設計	藤森 智	
担当技術者		主な担当業務内容
鹿島建設(株)	7名	強風に対する免震材料特性評価
(株)織本構造設計	1名	小規模免震建築物に関する品質検討
(株)松田平田設計	1名	小規模免震建築物に関する応答評価
共同研究者：(独) 建築研究所、(社) 日本免震構造協会		
(社) 日本免震構造協会内の専門委員会 (学識経験者・実務技術者により構成)		調査計画・結果の検討

専門委員会(本委員会)委員リスト

委員長
委員
共同研究委員
共同研究委員
共同研究委員
協力委員
協力委員

北村 春幸
井上 範夫
大熊 武司
田村 和夫
高山 峯夫
古橋 剛
松井 正宏
木林 長仁
長島 一郎
長谷川 豊
吉江 慶祐
竹中 康雄
中澤 昭伸
藤森 智
近藤 明洋
飯場 正紀
斎藤 大樹
可児 長英
小豆畑 達哉
井上 波彦

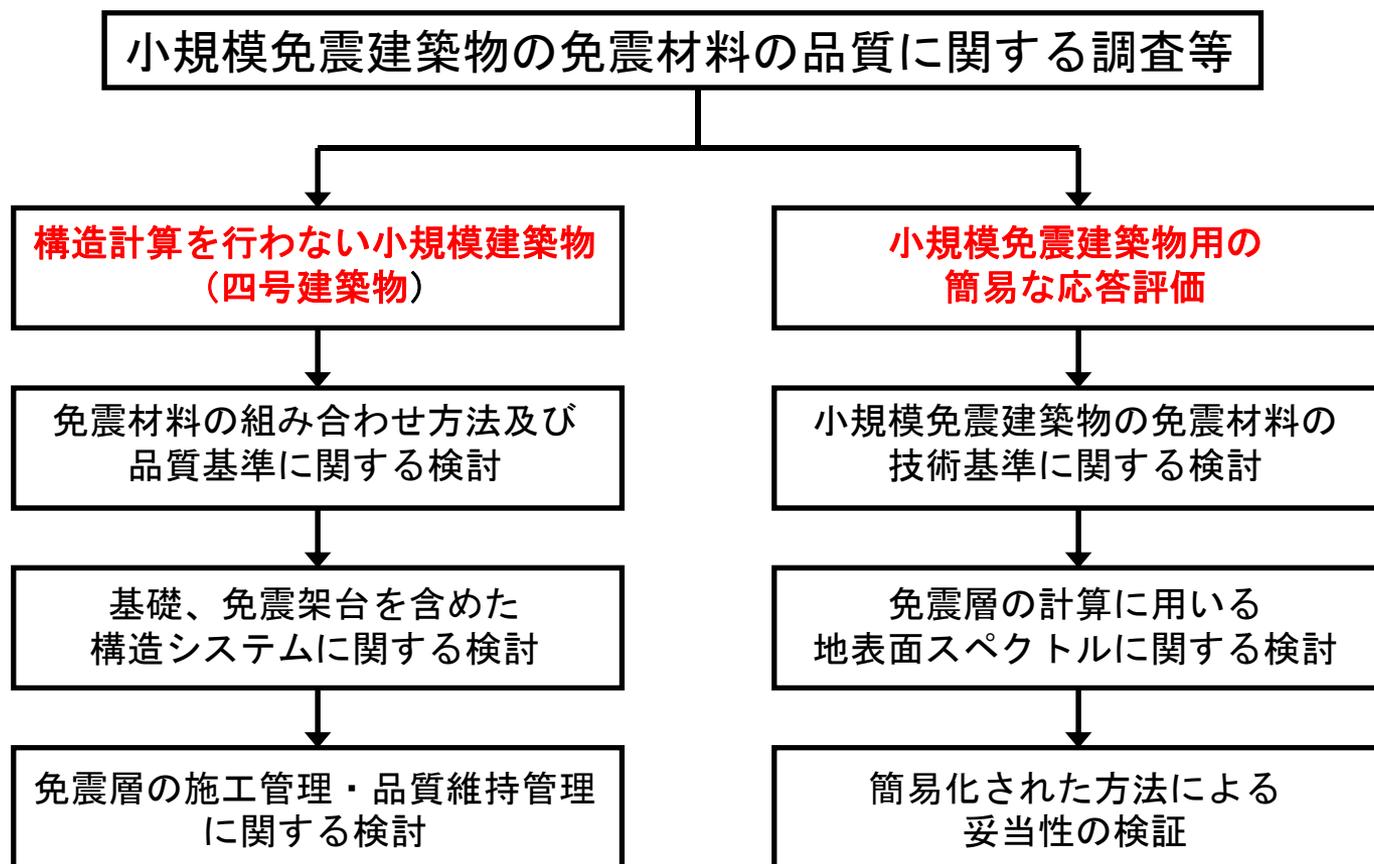
東京理科大学
東北大学
神奈川大学
清水建設
福岡大学
日本大学
東京工芸大学
日本建築センター
大成建設
オイレス工業
日建設計
鹿島建設
織本構造設計
松田平田設計
鹿島建設
建築研究所
建築研究所
日本免震構造協会
国土技術政策総合研究所
国土技術政策総合研究所

本委員会の下に
WG1(可児長英主査)
WG2(大熊武司主査)
+1SWG
を設置して活動

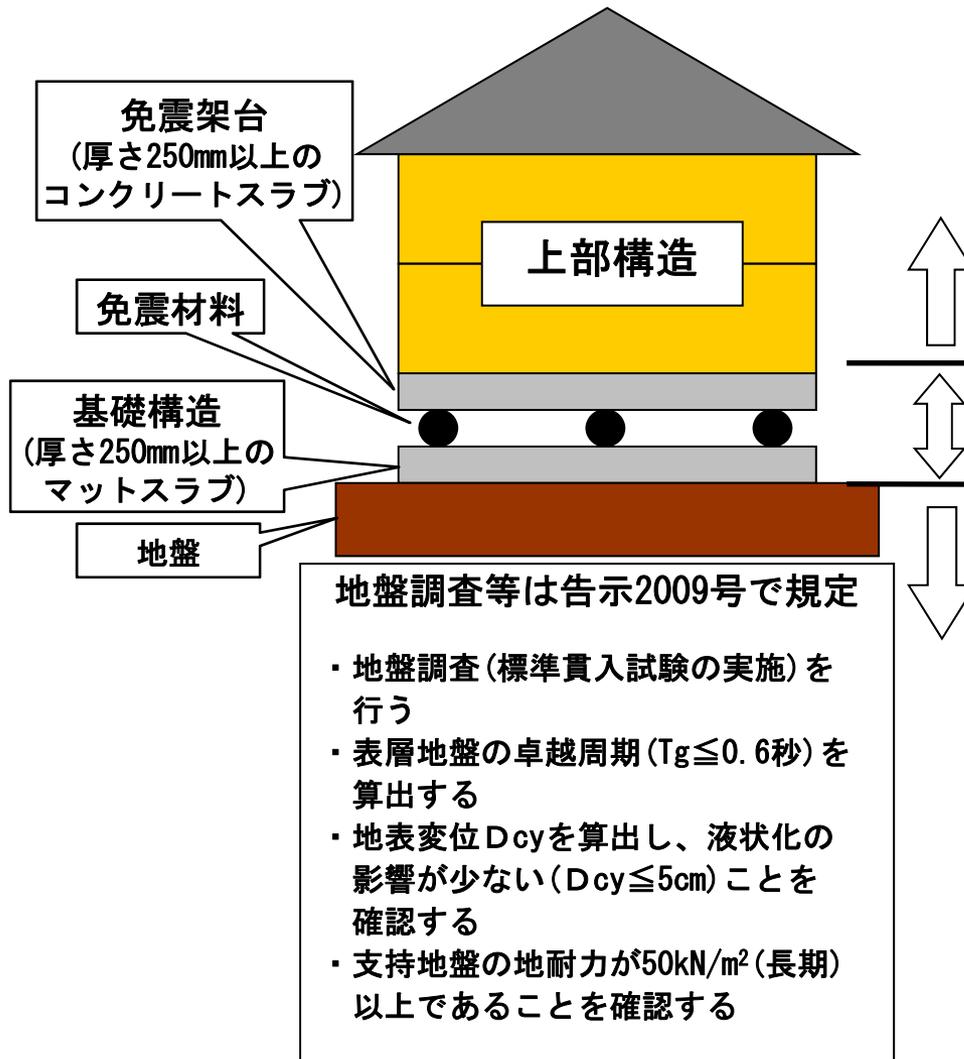
(イ) 小規模免震建築物用簡易な応答評価と免震材料に求められる品質に関する検討

全体概要

平成20, 21年度に実施した検討内容を踏まえ、小規模免震建築物用の免震材料に求められる品質に関する検討と簡易な応答評価



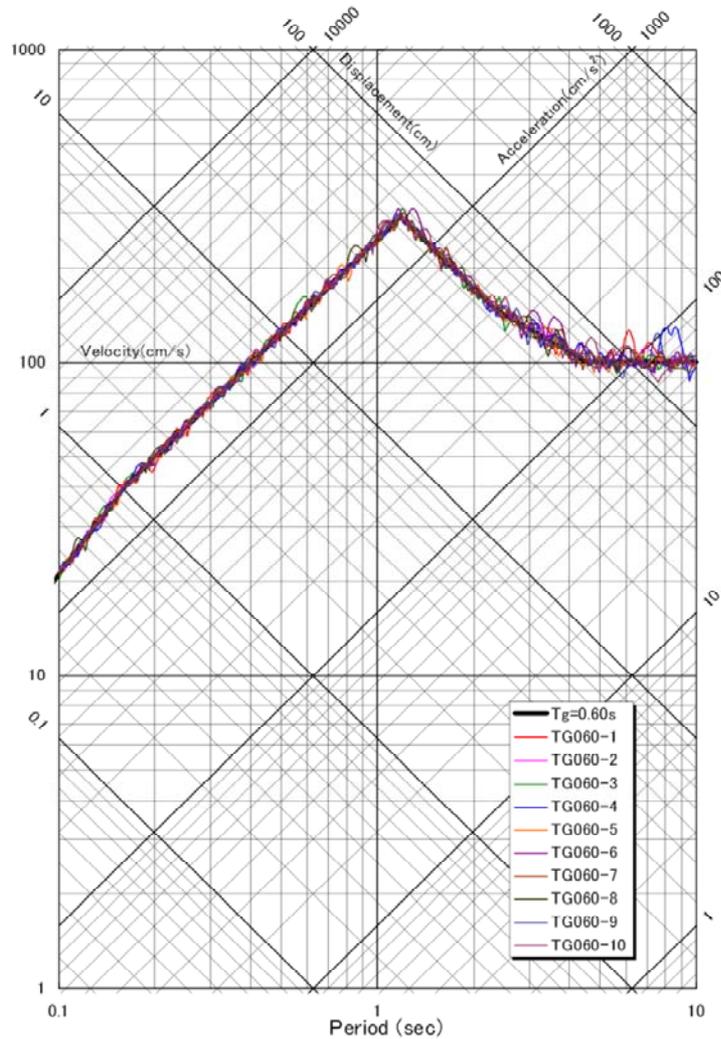
構造計算を行わない小規模建築物(四号免震建築物)



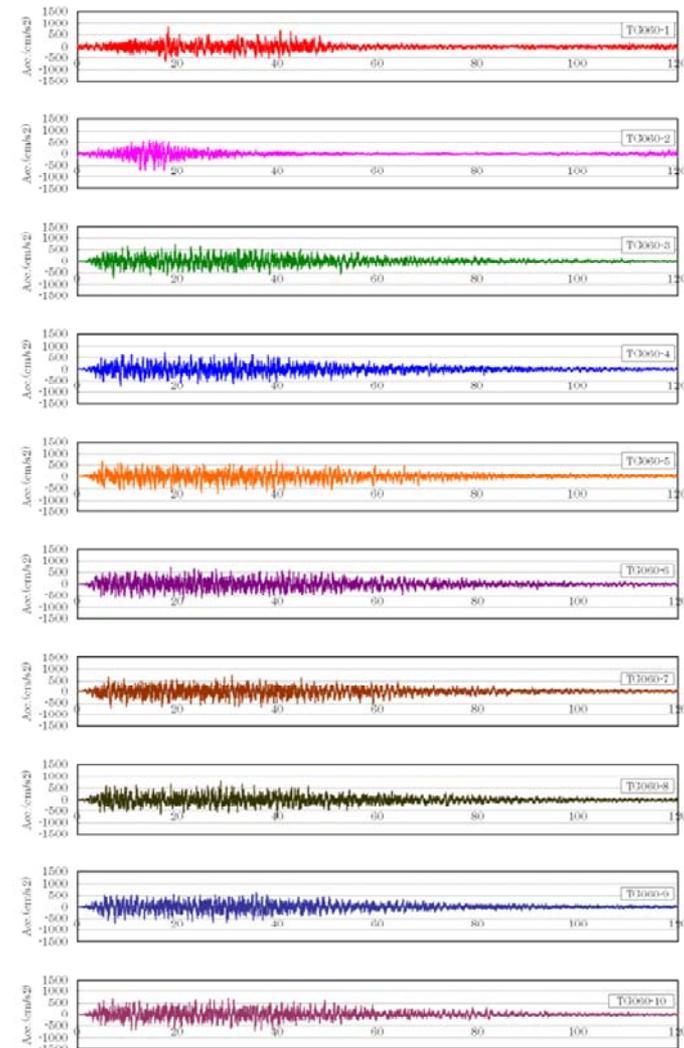
- 告示2009号で規定
- ・ 平屋および2階建ての木造住宅(四号建築物)とする
 - ・ 建築面積 250m^2 以下、延べ床面積 500m^2 以下とする
 - ・ 平面形状は、ほぼ矩形に近い平面形で、辺長比を2以下とする
 - ・ 立面形状は、アスペクト比(建物高さ/建物短辺方向長さ)を2以下とする
 - ・ 建物重量は、軽い建物仕様、重い建物仕様の2種類とする(告示1446号での確認事項)

- 材料認定で規定(告示1446号)
- ・ 免震架台、免震材料システム及び基礎構造を一体とした免震層の大臣認定の範囲とする
 - ・ 免震材料システムは大臣認定材料の組み合わせ又は単一材料による
 - ・ 免震材料システムの性能評価は時刻歴応答解析により、その最大応答値の平均値で評価する
 - ・ 使用する模擬地震動は表層地盤特性(T_g 毎)を想定した位相の異なった7波(本提案)とする
 - ・ 認定を受ける免震材料システムは、設計実績3件以上、施工実績1件以上とする
 - ・ 風荷重に対して、免震層が安全であること
 - ・ 建物周辺は落下防止、挟まれ防止に対する対策がとられていること
 - ・ 免震層の大臣認定には「設計施工要領書」及び「品質維持管理要綱」を付帯したものとする

四号免震建築物の応答評価用の模擬地震波



応答スペクトル ($T_g=0.60s$ $h=0.05$)



加速度時刻歴波形 ($T_g=0.60s$)

木造2階建住宅の応答解析(RC免震架台)

解析モデル

モデル図	階	重量 [kN]	階高 [m]	初期剛性 [kN/m]
	屋根	156 kN	—	—
	2階	263 kN	2.85	$k_c=42,000$
			2.85	$k_c=48,000$
	1階 (RC架台)	565 kN ($\Sigma W=984\text{kN}$)	0.60	—
	免震層	高減衰ゴム+転がり+減衰ごま		

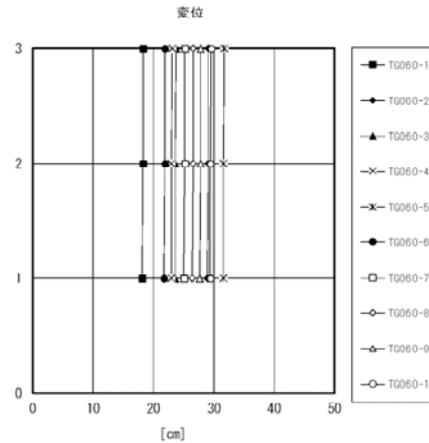
免震層の履歴特性

免震層	バイリニア型	バイリニア型	マルチリニア型
	高減衰ゴム支承	直動転がり支承	減衰ごま(RDT-2S)
	$\Sigma Q_y=29.2\text{kN}$ $\alpha y=0.030$ $\Sigma K1=1,088\text{ kN/m}$ $\Sigma K2=265\text{ kN/m}$	$\Sigma Q_y=8.58\text{kN}$ $\alpha y=0.009$ $\Sigma K1=42,900\text{ kN/m}$ $\Sigma K2=0.0\text{ kN/m}$	$\Sigma Q=35.8\text{ kN}(V=100\text{cm/s})$ $\alpha y=0.036$

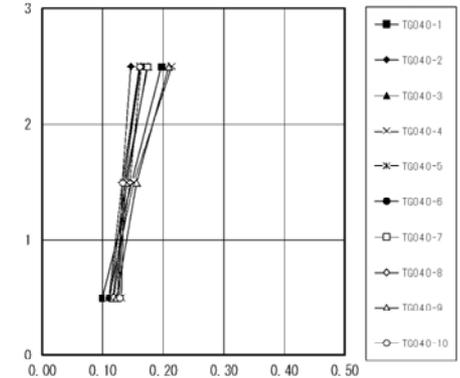
免震層の履歴特性

上部構造	履歴特性	固有周期	内部粘性減衰
		基礎固定時: $T=0.21\text{ 秒}$ $\delta=10\text{cm}$ 時: $T=2.64\text{ 秒}$ $\delta=20\text{cm}$ 時: $T=3.08\text{ 秒}$ $\delta=36\text{cm}$ 時: $T=3.37\text{ 秒}$	上部構造の1次固有周期に対して $\eta=5.0\%$
	リニア型		

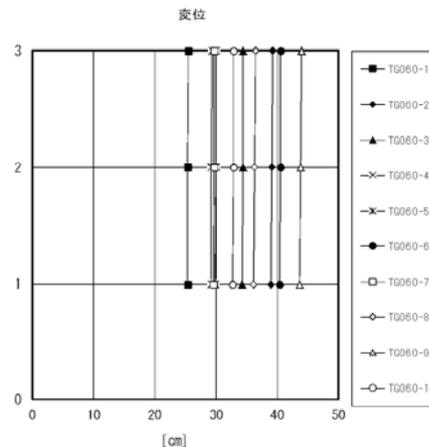
地盤周期 $T_g=0.40\text{ 秒}$



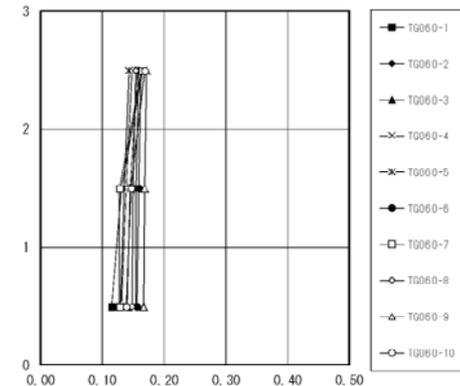
層せん断力係数



地盤周期 $T_g=0.60\text{ 秒}$



層せん断力係数



小規模免震建築物に関する基本事項

- ・ 構造計算は、建告第2009号の第6の計算方法を簡易化した応答評価とする。
- ・ 構造計算適合判定の対象外とし、建築主事の確認範囲とする。
- ・ 使用する免震材料は、大臣認定品とし、単一材料又はそれを組み合わせた複合免震材料（免震材料システム）とし、復元力を有するものとする。
- ・ 表層地盤卓越周期が0.6秒を超える比較的柔らかい地盤には適用しない。
- ・ 上部構造、免震架台、基礎構造は長期許容応力度及び短期許容応力度設計とする。

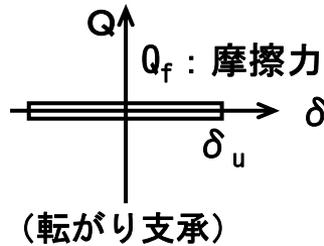
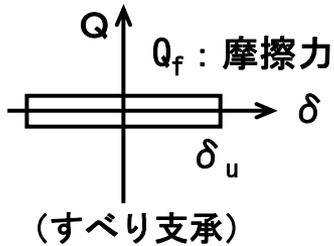
小規模免震建築物に関する適用範囲

- ・ 建築規模は、地上3階以下、地下階なしの軒高9m以下、建物高さ13m以下で、建築面積1,000m²以下、延べ面積2,000m²以下とする。
- ・ 建物の平面形状は、ほぼ矩形に近い平面形とし、短辺方向30m以下、長辺方向50m以下とし、辺長比2以下とする。
- ・ 建物の立面形状は、アスペクト比（建物高さ／建物の短辺方向長さ）を2.0以下とする。
- ・ 構造種別は鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造とする。
- ・ 構造計算は、許容応力度計算によることとし、地震力算定は施行例88条の規定（ $C_0 \geq 0.2$ 、 A_i 分布）により算出する。
- ・ 設計せん断力による層間変形角は1/300以下とし、剛性率6/10以上、偏心率15/100を超えないこと。
- ・ 鉄骨造又は鉄筋コンクリート造とする。
- ・ 上部構造からの各応力に対し、免震材料にスムーズに応力伝達し、鉛直曲げ剛性が回転角1/500以下、且つ、水平剛性がせん断変形角1/500以下とする。

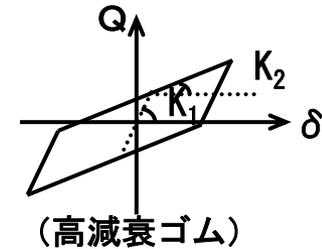
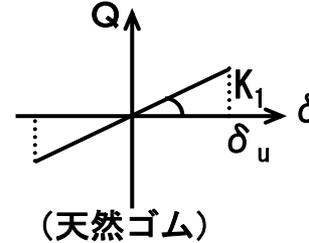
小規模建築物の免震材料の適用範囲

使用する免震材料は大臣認定品とし、以下に示す荷重～変形曲線の特性を有した材料を組み合わせた免震材料システム又は単一材料とする。

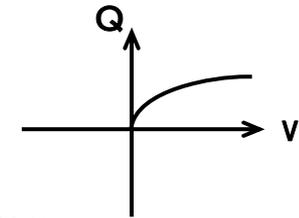
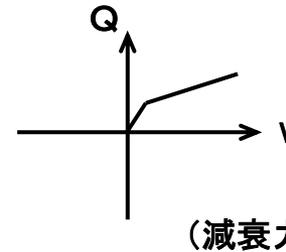
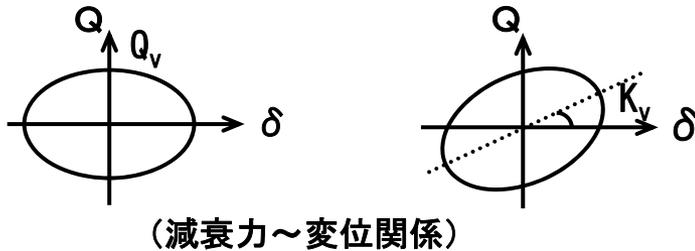
1) 支承材



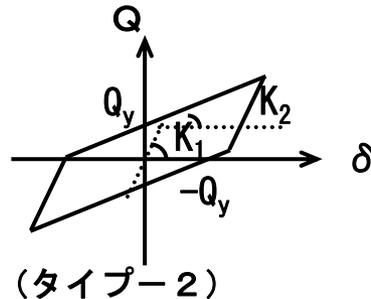
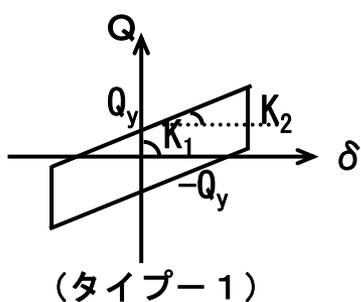
2) 復元材



3) 減衰材 (粘性ダンパー: 速度依存性)



4) 免震材料システムの復元力特性



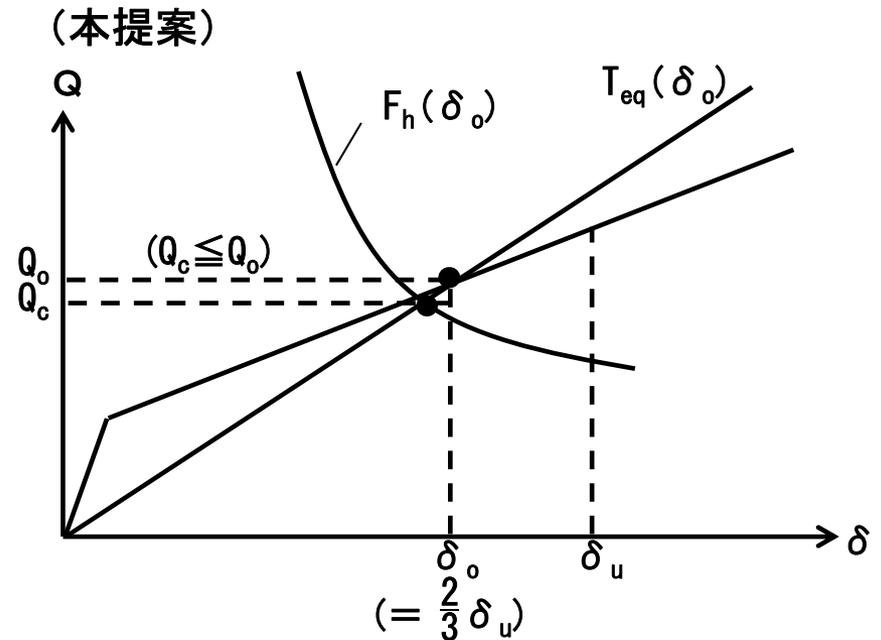
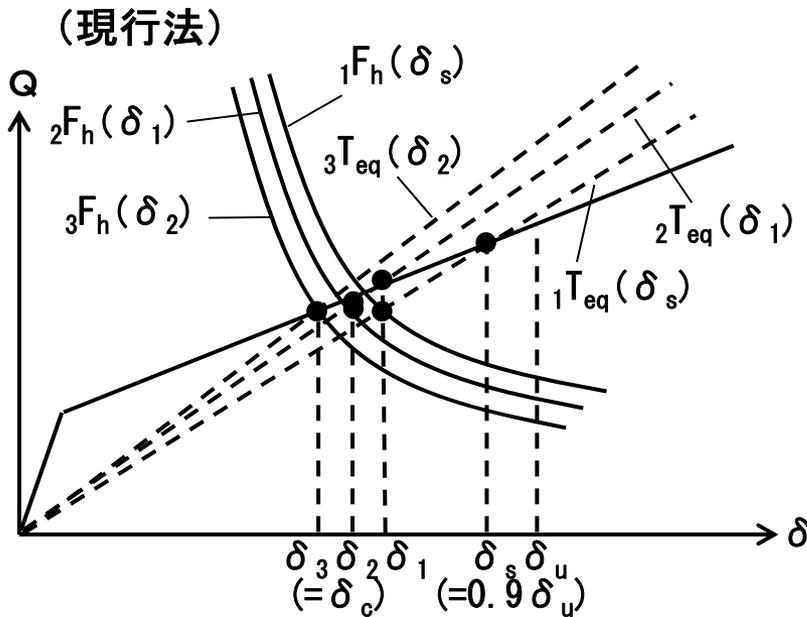
- ・ 免震層の減衰の範囲
 $0.2 \leq h d + h v \leq 0.3$

小規模免震建築用の簡易な応答評価

免震層の地震力 (Q_c) の算定

$$Q_c = \frac{5.12}{T_{eq}} \cdot M \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s \quad (\text{kN})$$

免震層の等価周期



$$\delta_r = 1.2 \times 1.1 \delta_c = 1.32 \delta_c \leq \delta_s (= \frac{1}{1.47} \delta_u)$$

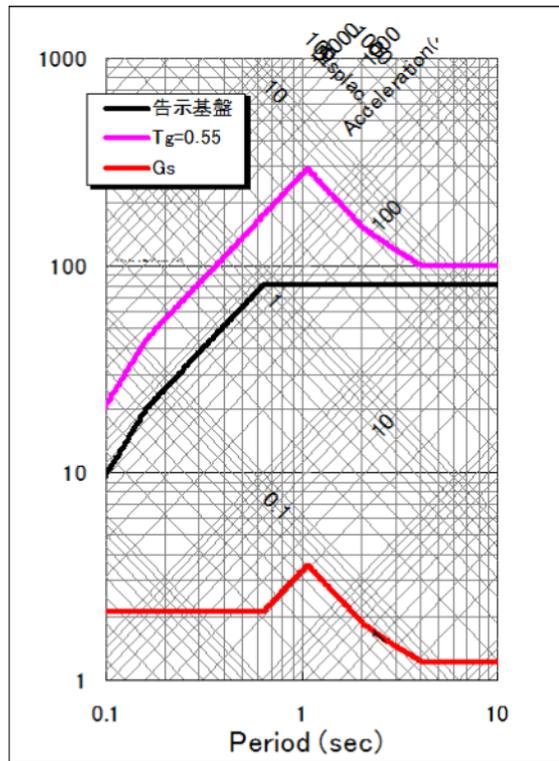
$$\delta_o = \frac{2}{3} \delta_u < \delta_r (= \frac{1}{1.47} \delta_u)$$

免震層の層せん断力 (Q_c) が $Q_c \leq Q_c0$ を確認
 $Q_c > Q_c0$ の場合、免震材料システムを再検討

小規模免震建築の地盤増幅特性係数 (Gs)

($T_g=0.55$ 秒)

例) 調査より求められた $T_g=0.52$ 秒 $\rightarrow T_g=0.55$ 秒
 地盤免震層の等価周期 $T_{eq}=3.34$ 秒 $\rightarrow T_{eq}=3.31$ 秒
 一覧表より $G_s=1.38$



免震層の等価周期 (T_{eq}) と地盤増幅特性係数 (G_s) の一覧表

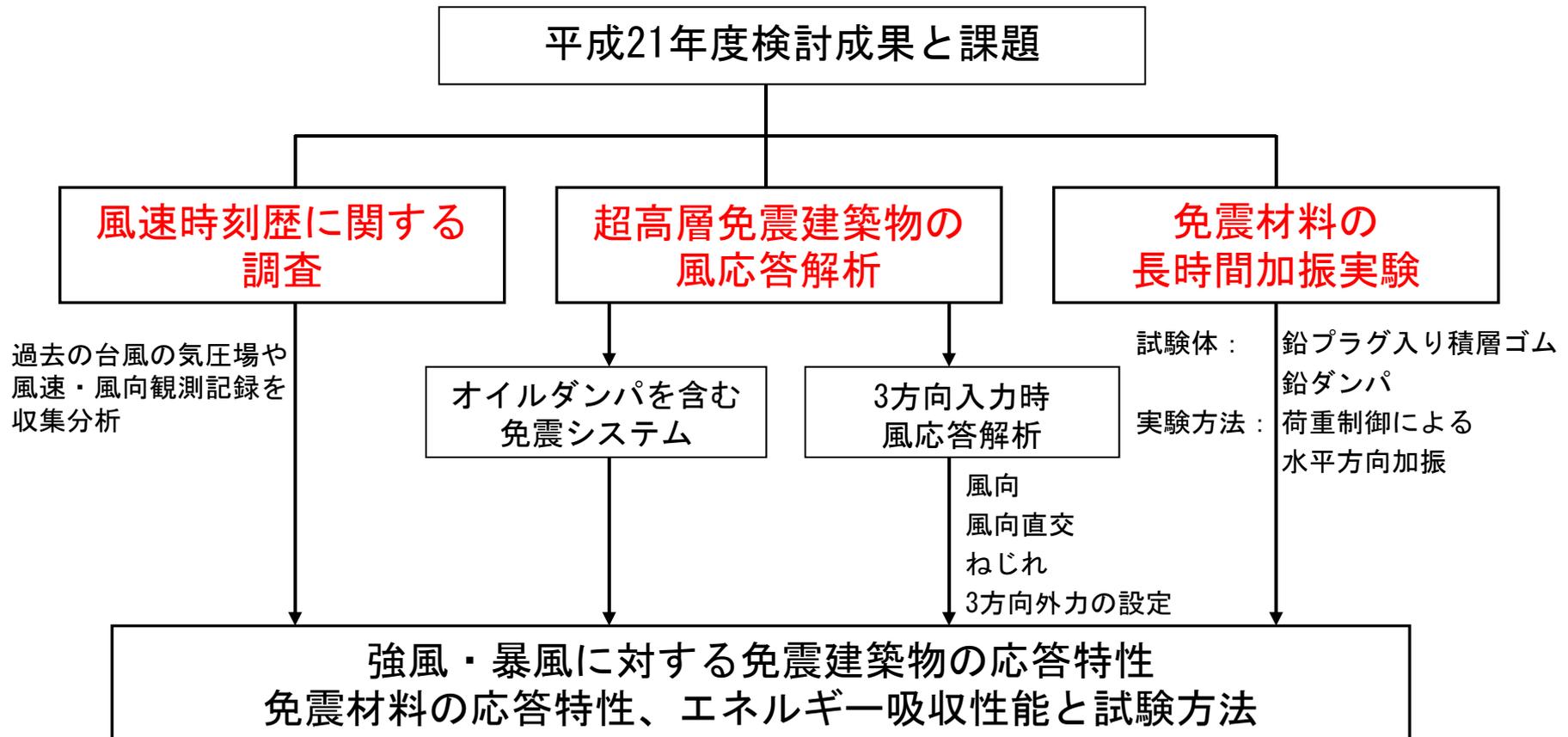
T_{eq}	G_s	T_{eq}	G_s	T_{eq}	G_s
2.51	1.63	3.55	1.33	5.01	1.23
2.55	1.62	3.60	1.32	5.08	1.23
2.58	1.61	3.65	1.31	5.15	1.23
2.62	1.59	3.70	1.30	5.22	1.23
2.65	1.58	3.75	1.29	5.30	1.23
2.69	1.56	3.80	1.28	5.37	1.23
2.73	1.55	3.85	1.27	5.45	1.23
2.77	1.54	3.91	1.26	5.52	1.23
2.81	1.52	3.96	1.25	5.60	1.23
2.84	1.51	4.02	1.24	5.68	1.23
2.88	1.50	4.07	1.23	5.75	1.23
2.92	1.49	4.13	1.23	5.83	1.23
2.96	1.47	4.19	1.23	5.92	1.23
3.01	1.46	4.25	1.23	6.00	1.23
3.05	1.45	4.31	1.23	6.08	1.23
3.09	1.44	4.37	1.23	6.17	1.23
3.13	1.43	4.43	1.23	6.25	1.23
3.18	1.41	4.49	1.23	6.34	1.23
3.22	1.40	4.55	1.23	6.43	1.23
3.27	1.39	4.61	1.23	6.52	1.23
3.31	1.38	4.68	1.23	6.61	1.23
3.36	1.37	4.74	1.23	6.70	1.23
3.40	1.36	4.81	1.23	6.79	1.23
3.45	1.35	4.88	1.23	6.89	1.23
3.50	1.34	4.94	1.23	6.98	1.23

入力地震波応答スペクトル図
($h=0.55$)

(口) 強風・暴風に対する免震材料の特性評価に関する検討

全体概要

平成21年度に実施した検討内容を踏まえ以下の強風・暴風に対する免震材料の特性評価に関する検討を実施する。

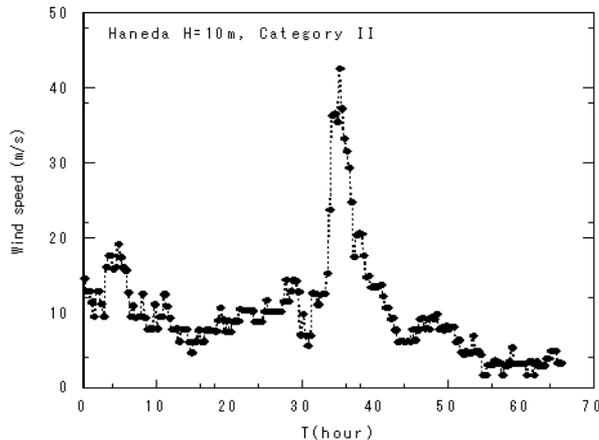
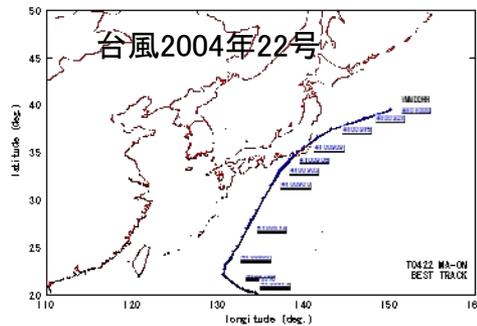


風速時刻歴に関する調査

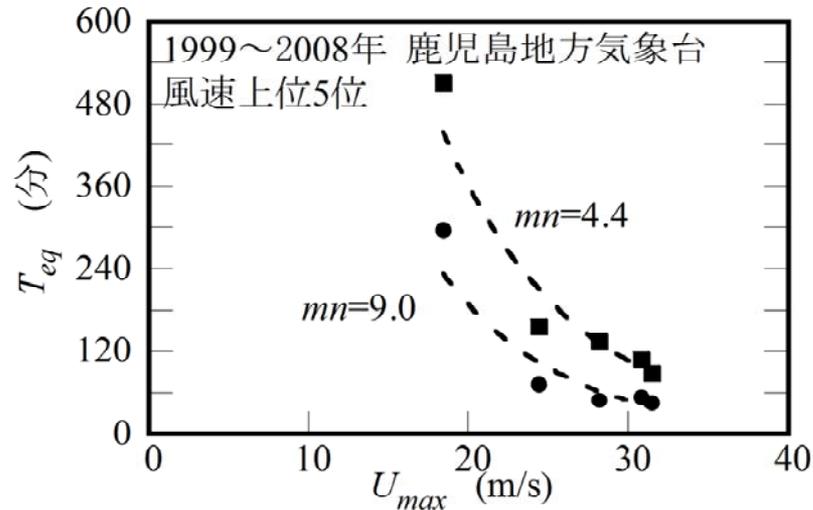
疲労など累積的な荷重効果の評価においては、風速の変化や継続時間が重要。

○実記録を基に、解析された台風気圧場と台風モデルに基づく現実的な設計用風速時刻歴を設定する方法と適用例を提示

○総エネルギー入力や累積疲労損傷度を等価とする等価継続時間に関する検討



羽田アメダス(台風0422号) 観測記録に基づく風速時刻歴の生成例



$$\text{等価継続時間 } T_{eq} = \frac{\text{風速が変化する強風イベントの累積疲労損傷度}}{\text{最大風速による単位時間の疲労損傷度}}$$

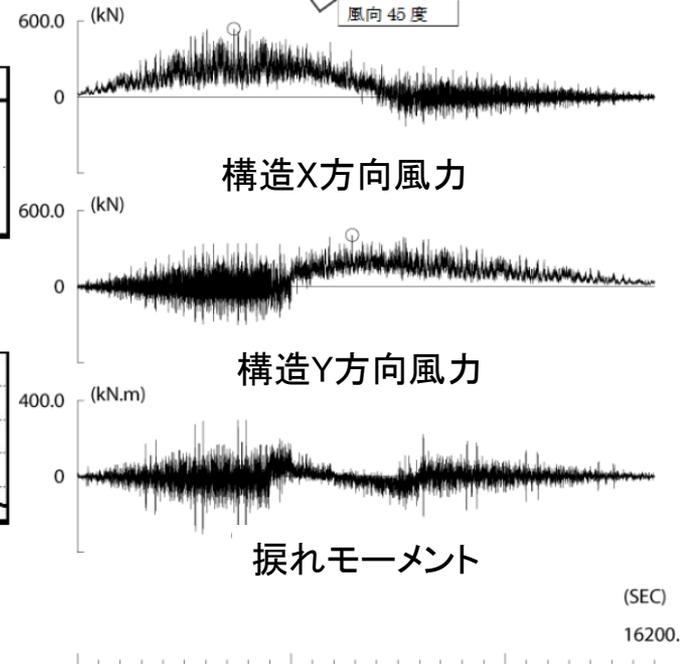
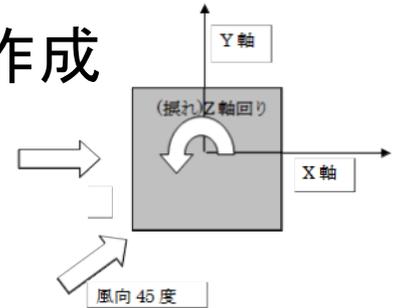
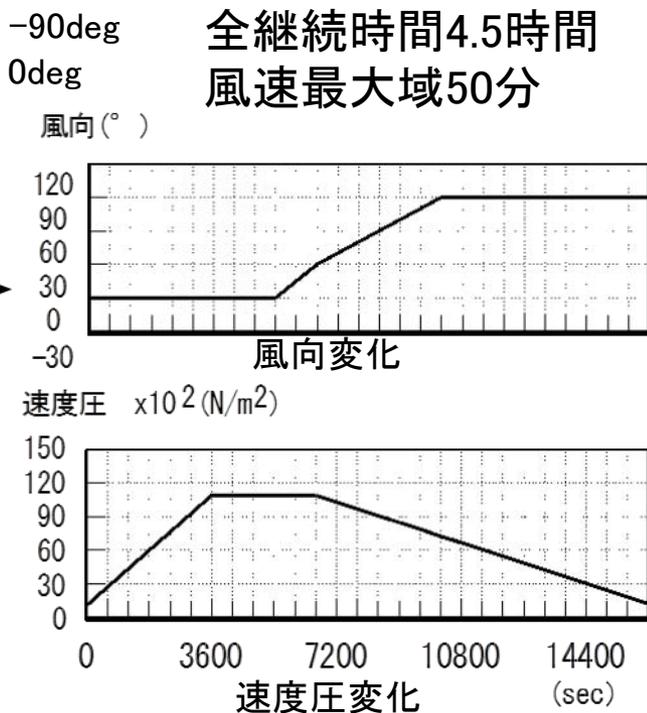
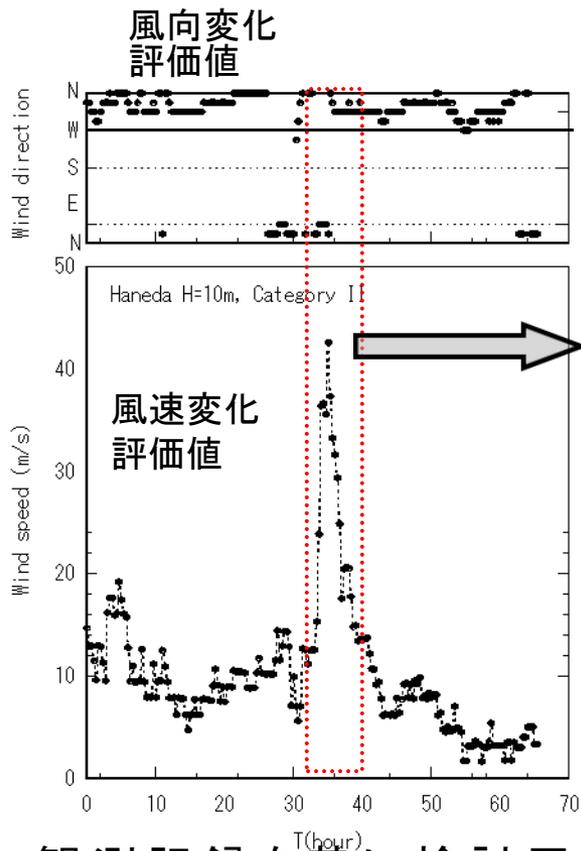
mn: 風速に対する累積荷重効果の敏感度の指標

最大風速 U_{max} と等価継続時間 T_{eq} との関係の例

超高層免震建築物の風応答解析

3方向風力波形の作成

160m級超高層免震建築物(正方形平面、塔状比5)モデルを対象
3方向(並進2方向+ねじれ方向)風力時刻歴波形の作成



観測記録を基に検討用風速・風向変化時刻歴を設定

速度圧・風向変化のモデル化

風洞実験結果を基に作成した風力時刻歴波形例 (風向の変化考慮時) 16

超高層免震建築物の風応答解析

3方向風力入力時刻歴応答解析

対象建物:

160m級建物: 塔状比5

上部構造固有周期

並進方向3.1秒、ねじれ方向2.8秒

免震システム:

鉛入り積層ゴム(LRB)

天然ゴム系積層ゴム+鋼材、鉛ダンパ

鉛入り積層ゴム+オイルダンパ

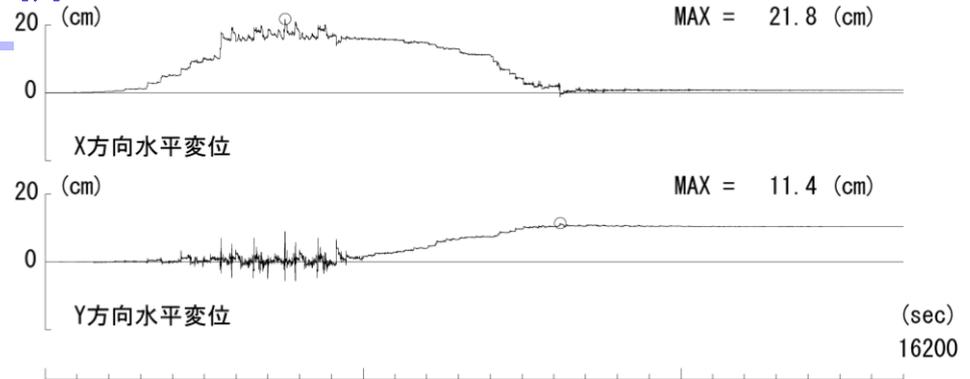
免震層特性

免震周期 $T_f = 5.5$ 秒

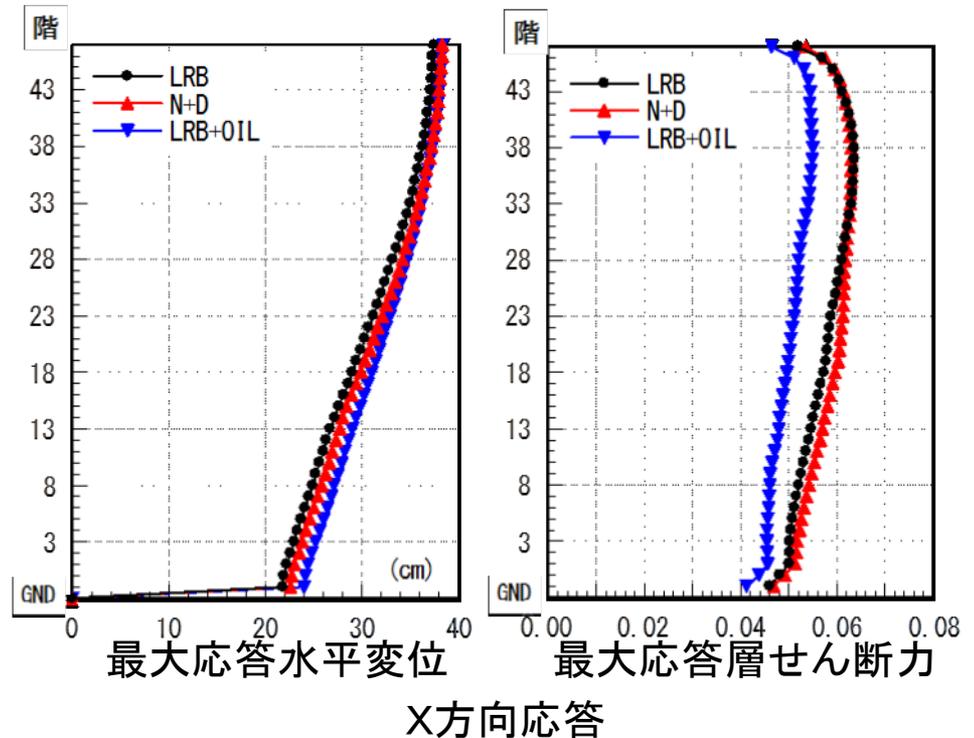
降伏せん断力係数 $\alpha_s = 0.024$

解析方法

鉛入り積層ゴム、鉛ダンパは小振幅弾塑性特性考慮、水平2軸非線形をMSSモデルで考慮、クリープ変形無視



免震層水平変形時刻歴波形(LRB)

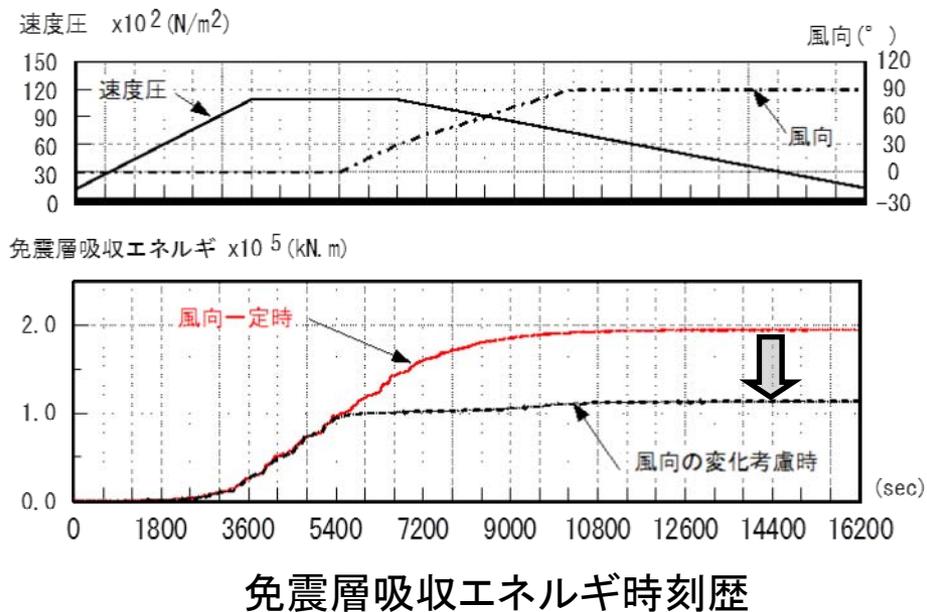
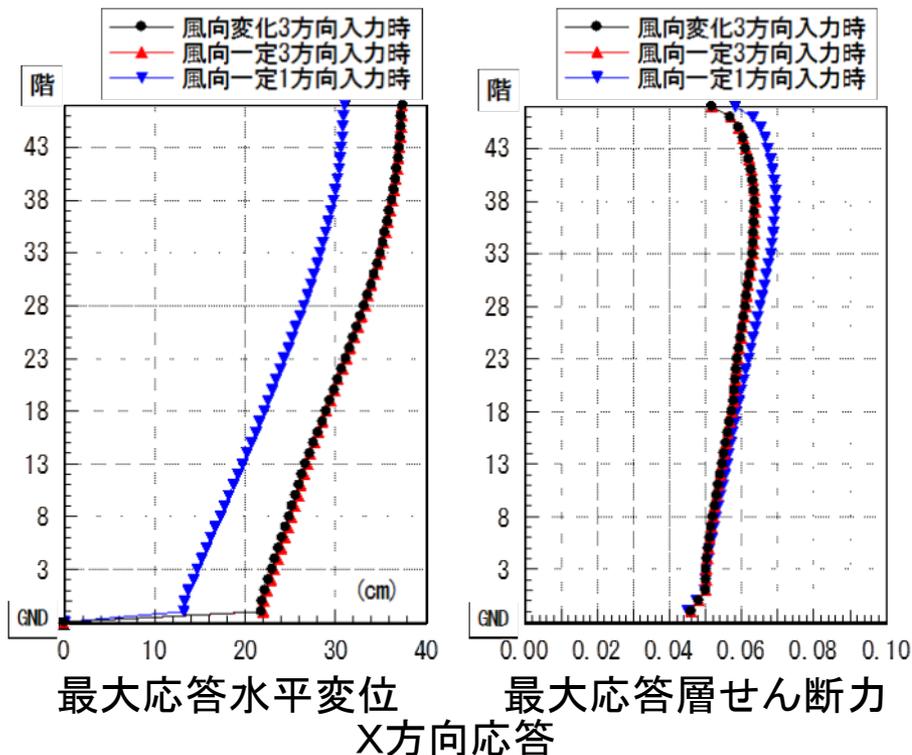


超高層免震建築物の風応答解析

3方向風力入力時刻歴応答解析（風向変化などの影響）

風外力: 3方向同時入力(風向の変化考慮, 風向一定), 1方向入力(風向一定)

免震システム: 鉛プラグ入り積層ゴム



上部構造の応答については各外力ケースにおける**応答の差は見られない**。

免震層の応答については3方向入力時の応答水平変形が大きい→**2軸非線形特性**の影響

免震層吸収エネルギーは風向の変化を考慮した場合に風向一定の場合の**60%程度**

免震材料の風荷重特性を考慮した長時間加振実験

目的：強風や暴風を想定した場合の免震材料の性能を確認することを
目的とした長時間加力実験を実施

試験体：鉛プラグ入り積層ゴム（直径500mm）×2体

鉛ダンパ（実大サイズ）×3体

実験方法：荷重制御による水平方向加振

正弦波加振 平均成分 $Q_y \pm$ 変動成分 αQ_y
加振周期3秒、継続時間2時間

応答波加振 免震建物モデルの風応答解析
から得られた免震層荷重波形

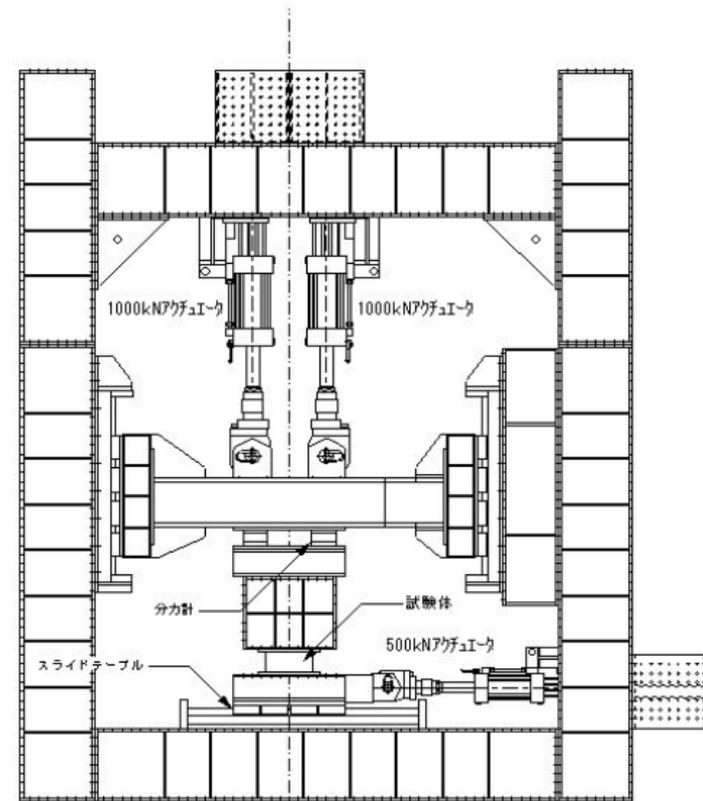
オンライン実験 LRBを対象に試行



鉛プラグ入り積層ゴム（LRB）



鉛ダンパ



加力装置（水平500kN、鉛直2000kN）

免震材料の風荷重特性を考慮した長時間加振実験 正弦波加振実験結果(鉛プラグ入り積層ゴム)

昨年度提案の「強風に対する免震材料の品質確保のための試験方法(案)」に基づく正弦波加振

実験条件

継続時間2時間、加振周期3s

荷重制御による平均+変動成分の加振3ケース、荷重振幅は以下のとおり。

- $0.5Q_y + 0.5\alpha Q_y \sin \omega t$
- $Q_y + \alpha Q_y \sin \omega t$
- $1.5\alpha Q_y \sin \omega t$ (風向直交を想定)

ここに Q_y :降伏荷重 $\alpha = 0.40$

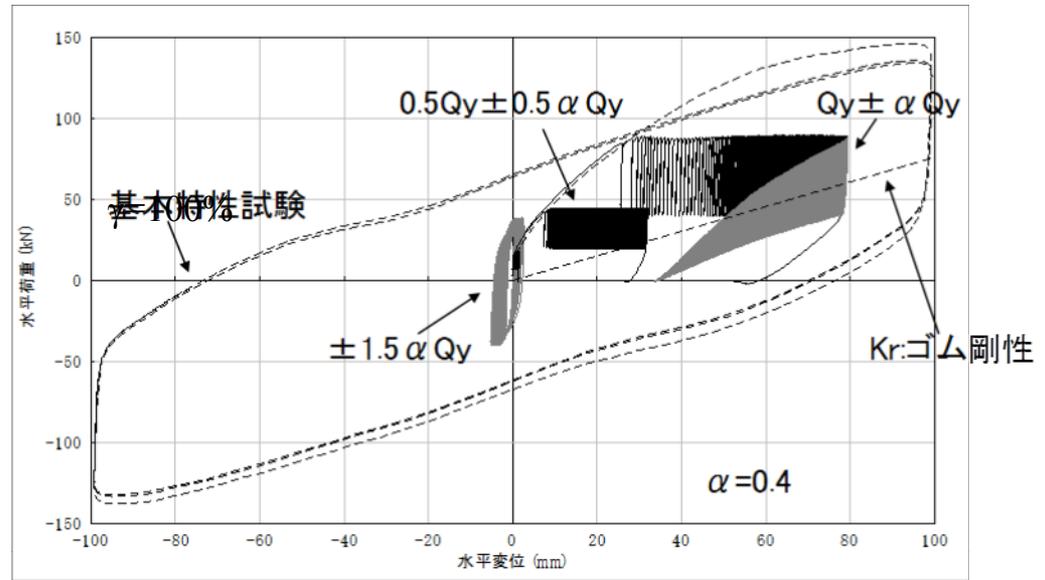
実験結果

・クリープ変形が明瞭に見られ、履歴ループ中心はゴム剛性と釣り合う点で収束
⇒風荷重平均成分に鉛プラグがクリープ性のため抵抗できない ⇒簡易評価法における仮定

・積層ゴムの温度上昇は小



φ500試験体と試験機
の間に断熱材を挿入



荷重変形関係(正弦波加振3ケースと基本特性
試験結果)

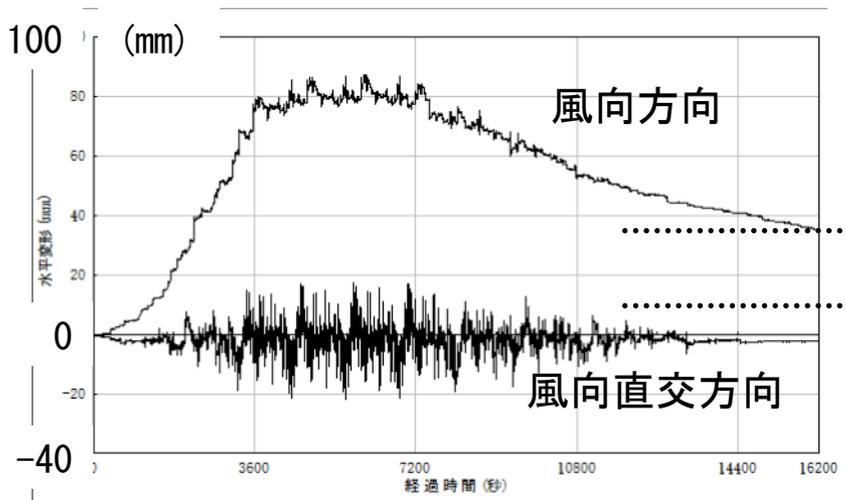
免震材料の風荷重特性を考慮した長時間加振実験 風応答波加振実験結果(鉛プラグ入り積層ゴム)

昨年度のモデル免震建物風応答解析結果(160m級、LRB、粗度区分Ⅱ)の風向および風向直交のLRBせん断力4.5時間波形にて加振

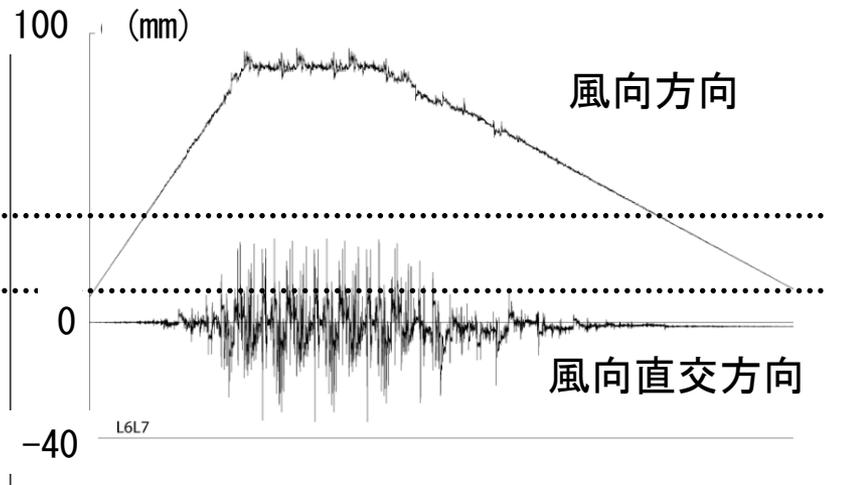
風向方向応答加振→荷重振幅の増大に伴い水平変形が大。その最大値は87mm。最大変形はゴム部のみが平均成分に抵抗するとした場合の値と一致。

加振終了時には33mmの残留変形。

風向直交方向応答加振→鉛内部の温度が最大で5°C上昇した。



実験結果



解析結果

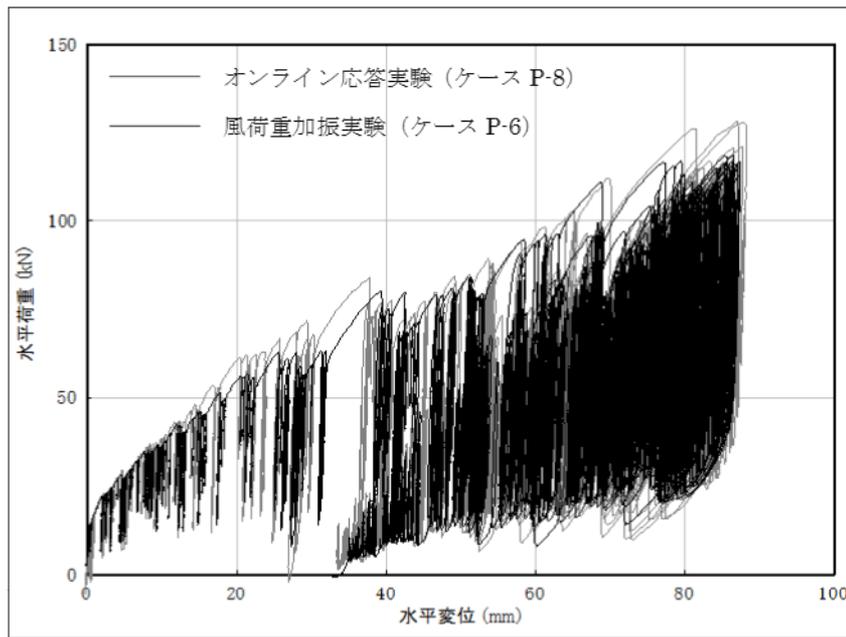
免震層水平変形時刻歴

免震材料の風荷重特性を考慮した長時間加振実験 オンライン実験結果(鉛プラグ入り積層ゴム)

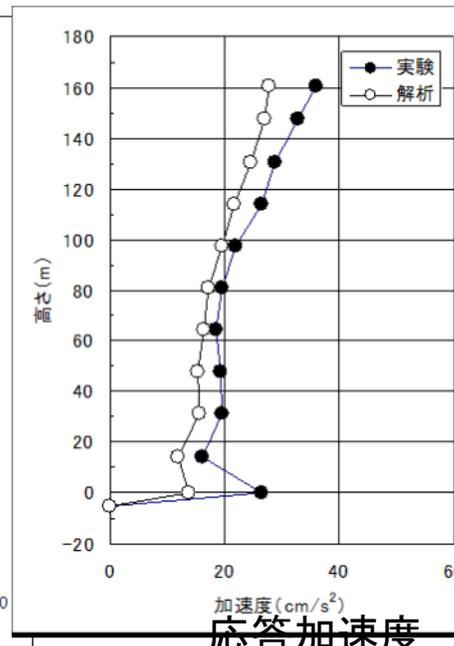
コンピュータ内における風応答時刻歴応答解析と部材の加力実験を並行して行ない、
部材の復元力特性を取り込みながら解析を進めていく実験

(上部構造は11質点に縮約、これに伴い風外力波形も集約した)

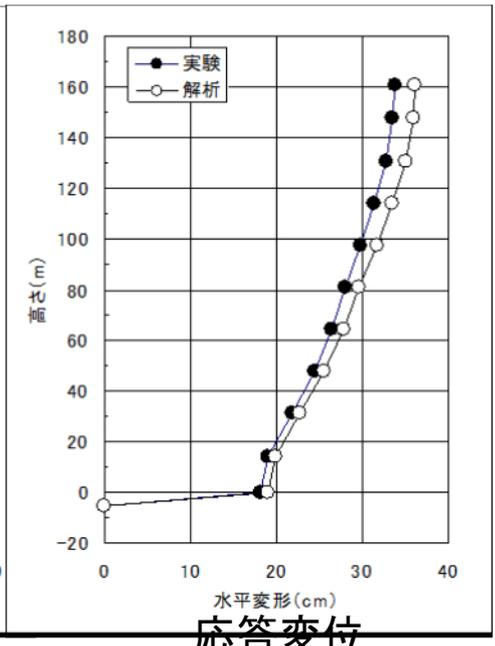
⇒ 免震層の応答は、先述の風応答波加振結果と上部構造応答は、これまで同様の
風応答時刻歴解析結果と良い対応を示した。



X(風向)方向荷重変形関係



応答加速度



応答変位

X(風向)方向応答値

今後の課題

(イ) 小規模免震建築物用簡易な応答評価と免震材料に求められる品質に関する検討

- ・ 四号免震建築物及び小規模免震建築物の地盤調査について、今後専門的識者により認められた低価格で実施できる簡易な地盤調査方法の確立が望まれる
- ・ 四号免震建築物用の免震材料システムの耐震性能の確認は時刻歴応答解析によることとしているが、使用する地震波が申込者ごとに異なることを避けるため、統一した地震波の採用が望まれる。

(ロ) 強風・暴風に対する免震材料の特性評価に関する検討

- ・ 台風の風速・風向の連続的な観測記録の蓄積
- ・ 水平2方向荷重を受ける免震材料クリーブ特性と残留変形
- ・ より荷重レベルの高い風荷重を受ける免震材料の挙動特性と安全限界
- ・ 強風・暴風に対する安全性の確保のために必要な技術基準の検討