【3.3.2 風応答シミュレーション】成果③

スタディ 3:微小変形・クリープ特性を考慮した免震建物の風応答解析法

安井八紀[*1]，大熊武司[*2]
(*1:㈱泉創建エンジニアリング，*2:神奈川大学工学部建築学科)

1．はじめに

大地震時における建築物の安全性や機能保持に対する要求から急激に免震建物が普及してきている．また，従来上部構造として中低層RC造建物に主として適用されてきた免震構造は，軽量な住宅などの小規模なものから超高層建築物への適用例も見られるようになってきており，益々，多様化への傾向にある．

主として耐震性能向上を目的に研究・開発が進められてきた免震建物は，固有振動数が低く，並進方向と捩れの固有振動数が接近していること，偏心が小さいこと，振動モードが免震層において不連続となること，履歴型あるいは摩擦型のダンパーを有していることなどの特徴がある．しかしながら，免震建物が備わったこれらの特徴は，風外乱の特性と対比した場合には，必ずしも有益な特性ばかりとも言えない．

風外乱に対する免震建物の応答に関わる研究として，Henderson 他[1)]，Chen 他[2)]，Liang 他[3)]，竹中他[4)5)]，筆者[6)7)]等の研究が挙げられる．

Henderson他[1)]は，低層免震建物を対象に風方向風力による風方向の応答と捩れ応答について議論し，低振動数化に伴う風外力のスペクトルピークへの接近による応答変位の増大，空間的な不均一性や渦の発生による捩り力の発生を指摘している．

Chen 他[2)]は，天然ゴム系免震構造，高減衰ゴム系免震構造，すべり支承系免震構造についての簡易的なモデルを提案し，低層免震建物の強風下の応答について議論している．その結果，低層免震建物は風外乱に対して敏感ではないこと，その傾向はすべり支承系免震構造の場合には，天然ゴム系や高減衰ゴム系の免震構造より顕著であることを指摘している．しかしながら，すべり支承系免震構造の場合にはその摩擦係数の値により風外乱に対する鋭敏さが変わること，上部構造が剛体ではないことも同時に指摘しており，今後の課題であるとしている．

Liang他[3)]は，免震層をその弾性剛性と減衰定数によって勾配を可変とするBi-linearの復元力モデルを提案し，多質点モデルによる高さ42mの免震建物の居住性能に関する検討を行っている．その結果，一般の高層建物よりも高層免震建物の方が風に対し敏感であること，免震部材の導入により応答加速度は小さくなるものの，免震層の変位の低減は見込めないこと，高層免震建物においては風による居住性の問題が生じる可能性があることなどを指摘している．しかしながら，この研究での復元力モデルはどの程度の再現性があるかについては議論がなされていないこと，また1つの評価事例に過ぎないのが実状である．

竹中他[4)]は，LRB積層ゴムや高減衰積層ゴムの履歴復元力モデルとして，微小な振幅から弾塑性挙動を示す修正HDモデルを提案している．この修正HDモデルは，比較的簡易なモデルであるにもかかわらず，微小振幅域でも適用可能であること，従来良く用いられてきた修正Bi-linearモデルのように実際以上に高次モードの励起が生じないことなどの点で優れている．また，竹中他[5)]は，簡

易的なクリープ変形を考慮した計算法についても提案を行っている．この方法は，予め，風力の静的成分による変形をクリープ変形と見なし，解析上の原点を平均風力に釣り合う点に移動して計算する方法である．この方法の場合，クリープ変形を過大に評価する他に，クリープ変形の経時的な変化を捉えることはできない．

筆者らは，まず，神奈川大学23号館を対象とした動的風力天秤による風洞実験により風力特性を明らかにし，弾性を仮定してスペクトル法により再現期間1年の風速に対する応答加速度を予測した．また，同建物の風応答観測結果から，Henderson他[1]と同様に捩れ振動が無視し得ないこと，竹中他[4]と同様に微小振幅時においても鉛ダンパーの塑性変形により免震層が弾塑性的挙動を示すことを指摘した[8]．また，中層免震建物を対象に空力振動実験模型を開発し，風洞実験による弾塑性挙動の再現性を示した[9]．

このように，免震建物の風応答解析においては，免震部材の復元力特性を精度良く表現できるモデルが必要であり，加えて捩れ振動を表現できる解析モデルを用いることも同時に重要である．とりわけ，鉛をデバイスとして使用した免震建物の場合には，微小振幅時から示す弾塑性挙動やクリープ変形を表現できる復元力モデルあるいは解析法が必要である．

そこで，本研究では，鉛をデバイスとして使用した免震建物に着目し，微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力特性とクリープ変形を考慮した時刻歴風応答解析方法を提案し，その妥当性について議論する．なお，本研究においては，上部構造にはせん断モデルを，その挙動としては弾性を仮定する．

2．解析方法

2.1 微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力モデル

LRB積層ゴムや高減衰積層ゴムに対する微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力モデル（以降，振幅依存性を考慮した復元力モデルと呼ぶ）としては，竹中他[4]が提案する修正HDモデルあるいはポリリニア型モデルが挙げられる．ここでは，鉛ダンパーの振幅依存性を考慮した復元力モデルを提案する．

高山他[10]は，鉛ダンパーの種々の定変位振幅載荷試験を行い，変位振幅δと降伏せん断力Q_yには以下のような式で表されることを指摘している．

$$Q_y = A\delta^B \tag{1}$$

ここでのQ_yは1サイクル分の履歴面積をδの4倍で除したもので，エネルギーが等価となるように定義している．この場合，このQ_yは原点を通る弾性勾配の線と履歴線の交点で表されるせん断力と等価なものと解釈できる．また，図1に示す高山他[10]の漸増変位振幅試験結果に着目すると，降伏後の勾配は小変位振幅時においては大きく，変位振幅が増加するに従って緩やかになり，やがて一定となる特性がある．このような2つの特性を考慮して，次のような復元力モデルを提案する．

まず，復元力モデルはBi-linear型を基本とし，経験した最大水平変位X_mと降伏せん断力Q_yとの関係が高山他[10]による(2)式より表されるとする．

$$Q_y = AX_m^B \tag{2}$$

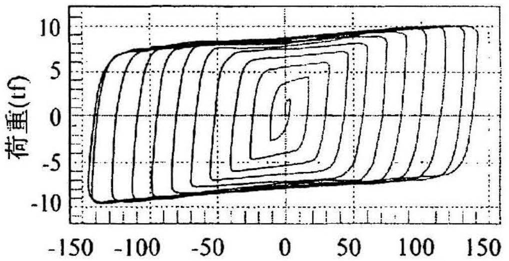


図1 U180鉛ダンパーの漸増変位振幅実験結果[8]

復元力特性の基本は図 2 に示すように勾配K_1，K_2，折れ点Q_1で定義する．初期的には原点を通る勾配K_1上を移動し，変位X_mで除荷が生じた際に逆方向へは勾配K_3で進む．なお，ここではその性格上K_3を弾性剛性と呼ぶ．さらに，除荷が進行した場合には，原点を通るK_3上の降伏せん断力Q_yと折れ点Q_1で決定される勾配K_1 上へ移行する．

次に，この復元力モデルをN本の要素バネを持つ MSS モデルへ拡張する．1 本のバネの最大水平変位x_mと降伏せん断力q_yの関係を(3)式とし，勾配K_1，K_2に対応する勾配をk_1，k_2，折れ点をq_1，弾性剛性k_3とすると，各パラメーターは1方向モデルのパラメーターから(4)，(5)式のように定まる．

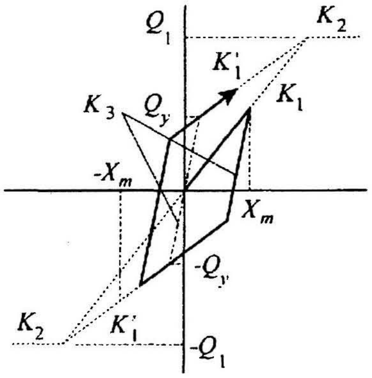


図 2 鉛ダンパーの復元力モデル

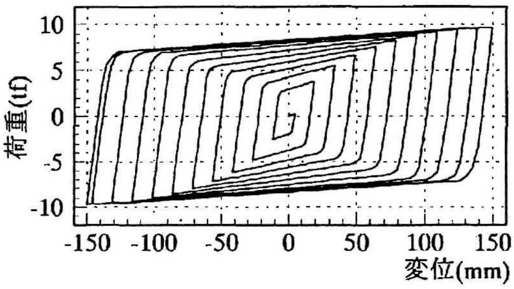


図 3 提案する鉛ダンパーの復元力モデルによる U180 鉛ダンパーの漸増変位振幅解析結果

$$q_y = a x_m^b \tag{3}$$

$$k = K \Big/ \sum_{i=1}^{N} \sin^2 \theta_i , \qquad q = Q \Big/ \sum_{i=1}^{N} \sin \theta_i \tag{4}$$

$$a = A \Big/ \sum_{i=1}^{N} \sin^{b+1} \theta_i , \qquad b = B \tag{5}$$

U180 鉛ダンパーを事例に，各パラメーターをK_1=0.65kN/mm，K_2=0，K_3=11.8kN/mm，Q_1=98kN，A=10.7，B=0.428 とした場合の漸増変位解析結果を図 3 に示す．なお，各要素バネの最大水平変位x_mが 100mm を超えてもx_m=100mm(一定)としている．図 1 と図 3 を比較すると明らかなように，解析結果は実験結果と良く一致している．

2.2 クリープ変形を考慮した解析法

ここでは，鉛ダンパー，LRB積層ゴム，高減衰積層ゴムなどのように，長時間の風外乱下において生ずると言われているクリープ変形[5)]の解析法を提案する．

一定の応力を受けている材料が時間と共に徐々に増加する変形，いわゆるクリープは，鉛やプラスチックでは常温でも起き，荷重をかけた瞬間に弾性ひずみを，つづく初期段階(遷移クリープと呼ぶ)には材料中の欠陥回りで塑性ひずみを起こす[11)]．風外乱の作用時間が数時間～48時間程度のものであることから，この遷移クリープを対象として以後の定式化を試みる．

時刻tにおける遷移クリープ歪$\varepsilon_c(t)$は，与えられた応力σ(=一定)のn乗に比例し(Norton則)，tのm乗に比例する(Bailey則)として(6)式のように書き表される[11)]．

$$\varepsilon_c(t) = \mathrm{sign}(C,\sigma)|\sigma|^n t^m \tag{6}$$

ここで，鉛ダンパーなどのクリープ性状をモデル化するため，$\varepsilon_c(t)$とσの関係がクリープ変形$u_c(t)$と初期せん断力$Q(0)$(=一定)の関係にそのまま適用できると仮定する．すなわち，$u_c(t)$と$Q(0)$とには，(6)式より以下のような関係があると仮定する．

$$u_c(t) = \mathrm{sign}\{C,Q(0)\}|Q(0)|^n t^m \tag{7}$$

さらに，風外乱のような変動する外力下ではせん断力一定を仮定することができないので，Sim[12]およびSpence[13]の考え方に準じて，変動するせん断力$Q(t)$下でのクリープ変形速度$\dot{u}_c(t)$を以下のように表すこととする．

$$\dot{u}_c(t) = \mathrm{sign}\{mC, Q(t)\}|Q(t)|^n t^{m-1} \tag{8}$$

変位法では，得られた変位の情報に基づいて内力を計算するため，時刻tの$\dot{u}_c(t)$は変位が得られただけでは求められない．そこで，時刻t-Δt～時刻t間のクリープ変形増分$\Delta u_c(t)$をせん断力$Q(t-\Delta t)$と時間増分Δtを考慮して(9)式のように近似し，クリープ変形$u_c(t)$を(10)式のように表す．

$$\Delta u_c(t) \approx \mathrm{sign}\{mC, Q(t-\Delta t)\}|Q(t-\Delta t)|^n (t-\Delta t/2)^{m-1}\Delta t \tag{9}$$

$$u_c(t) = u_c(t-\Delta t) + \Delta u_c(t) \tag{10}$$

時刻t=0において$u_c(t)$はゼロなので，時間増分毎に順じ$u_c(t)$は計算できる．また，風応答解析で用いられる時間増分とクリープ変形の速度を考えた場合に，(9)式で表すクリープ変形増分$\Delta u_c(t)$は十分な精度をもつ近似であると考えられる．

つづいて，内力とクリープ変形の関係を図示すると図4のように表すことができる．図中の$Q'(t)$はクリープ変形による内力$Q_c(t)$を含んだ見かけ上の内力であり，真の内力$Q(t)$とは接線剛性$K(t)$によって(11)式のように表すことができる．

以上で，時刻0から時刻tまで，クリープ変形を含めた変形が得

$$Q'(t) = Q(t) + Q_c(t) = Q(t) + K(t)u_c(t) \tag{11}$$

られれば，その変形からクリープ変形，内力が計算できる．また，静的解析においては(12)式，動的解析においては(13)式で表される増分型の方程式を解くことにより、逐次応答が求められる．

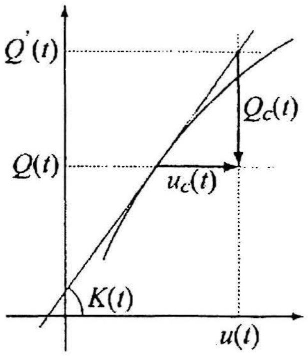


図4　内力とクリープ変形の関係

$$[K(t)]\{\Delta X(t)\} + \{Q(t-\Delta t)\} - \langle Q_c(t) - Q_c(t-\Delta t)\rangle = F(t) \tag{12}$$

$$\begin{aligned}[M]\{\Delta\ddot{X}(t)\} + [C]\{\Delta\dot{X}(t)\} + [K(t)]\{\Delta X(t)\} \\ + [M]\{\Delta\ddot{X}(t-\Delta t)\} + [C]\{\Delta\dot{X}(t-\Delta t)\} \\ + \{Q(t-\Delta t)\} - \langle Q_c(t) - Q_c(t-\Delta t)\rangle = F(t)\end{aligned} \tag{13}$$

3．応答解析による検証

3.1 小振幅時の応答解析

図5に神奈川大学23号館における地震観測結果と地震応答解析結果を比較して示す．上段の解析では，提案した鉛ダンパーの微小振幅時の弾塑性挙動を反映した復元力モデル（クリープ変形は考慮していない）を適用し，鉛ダンパーの弾性剛性および上部構造の剛性には文献8)おいて常時微動時の情報から推定した剛性を用いている．下段の解析では，通常のBi-linear型の復元力モデルを適用し，鉛ダンパーの弾性剛性および上部構造の剛性には設計時の剛性を用いている．両解析共に，免震部材は設計図書に基づいて平面的な配置を考慮し，上部構造については各層のそれぞれのフレーム剛性を擬似立体的に配置して捩れ振動を評価できるモデルとしている．なお，免震部材のモ

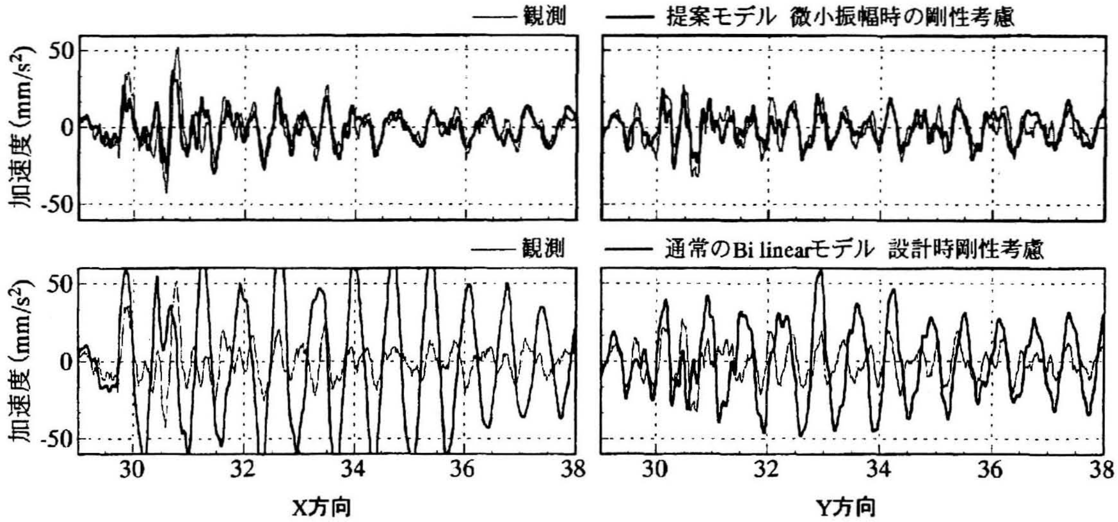


図5　地震観測結果[6]と地震応答解析結果の比較

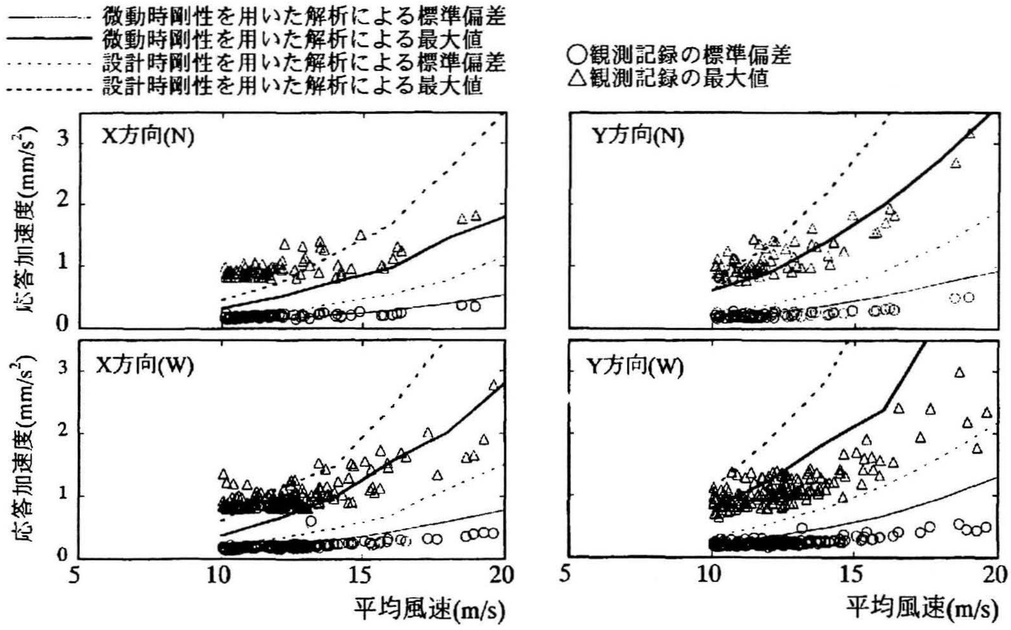


図6　風観測結果[6]と風応答解析結果の比較

デルにはMSSモデルを適用している.

図に示すように,提案した鉛ダンバーの微小振幅時の弾塑性挙動を反映した復元力モデルを用いた場合にはX方向およびY方向共に解析結果は観測結果を良く表している．一方，通常のBi-linear型の復元力モデルを適用し,設計時の剛性を用いた場合は,固有振動数は概ね捕らえているものの,応答加速度が過大に評価されていることがわかる.

図6に，平均風速10m/s～20m/sの領域での神奈川大学23号館風観測結果に対する風応答解析結果を比較して示す.風応答解析において与えた復元力モデルと剛性は地震応答解析と同条件である.また，解析に用いた風力は，風洞実験により得た層風力の確率統計的情報を元にモンテカルロ法ににより シミュレートした[14].

提案するモデルを持いた場合，風速12m/s以下における最大加速度を除き，良い対応を示している．一方，提案する復元力モデルを用いず，設計時の剛性を用いた場合には，過大に応答を評価する傾向にある．

以上，提案する微小振幅時の復元力モデルを用いた地震応答解析ならびに風応答解析を行い，解析結果が観測結果に良い対応を示すことが明らかになった．このことから，提案する微小振幅時の弾塑性挙動を考慮した復元力モデルが妥当であること，同時に文献8)で評価した初期剛性が妥当であることが示された．

3.2 クリープ変形を考慮した応答解析

1) 解析対象および解析概要

解析対象は，竹中他が文献5)において議論している軒高80m，アスペクト比3，辺長比1の地上25階地下1階の高層免震建物とする．この免震建物には，地下1階の下にϕ1000×46のLRBが想定されており，100%歪時の1次固有周期は3.6秒である．また，縮尺部材LRBϕ500を用いてクリープの基本特性を把握するため，一定水平力加力実験および一定荷重+正弦波荷重実験実験を行い，さらに，風応答時の挙動を模擬し風応答実験を行っている．

ここでは，まず，クリープ変形の基本特性に関する実験結果と提案する解析法による解析結果を比較しその妥当性を検証する．つづいて，風応答実験を模擬して，提案解析手法による解析事例を示す．

2) 一定水平力加力実験に対する検証

図7は縮尺部材LRBϕ500に対して竹中他[5]が行った一定水平力加力実験結果を筆者が図から読み取り，載荷荷重P_0および経過時間tの関数として整理したものである．この結果によれば，縮尺部材LRBϕ500の載荷荷重P_0(kN)および経過時間t(s)に対するクリープ変形$u_c(t)$(mm)は，概ね以下のような式で表される．

$$u_c(t) = 0.0254 P_0^{0.941}\, t^{0.276} \tag{14}$$

クリープ変形が鉛の性状によるものであり，ゴムにはクリープ変形は生じないものと考えれば，クリープ変形を表す(14)式は載荷荷重P_0ではなく，鉛に作用するせん断力で表すことがあるべき姿ではあるが，鉛に作用する力が不明であるため，ここでは(14)式を用いることとする．

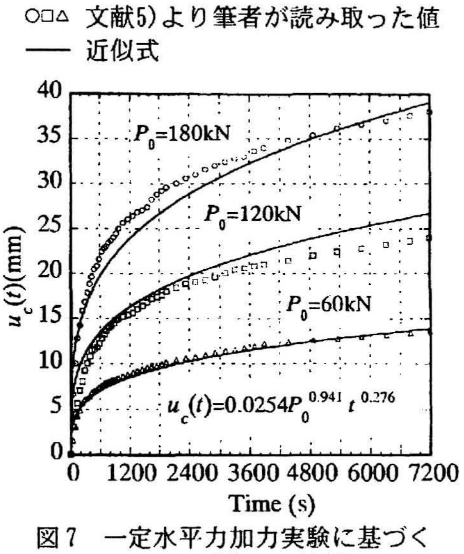
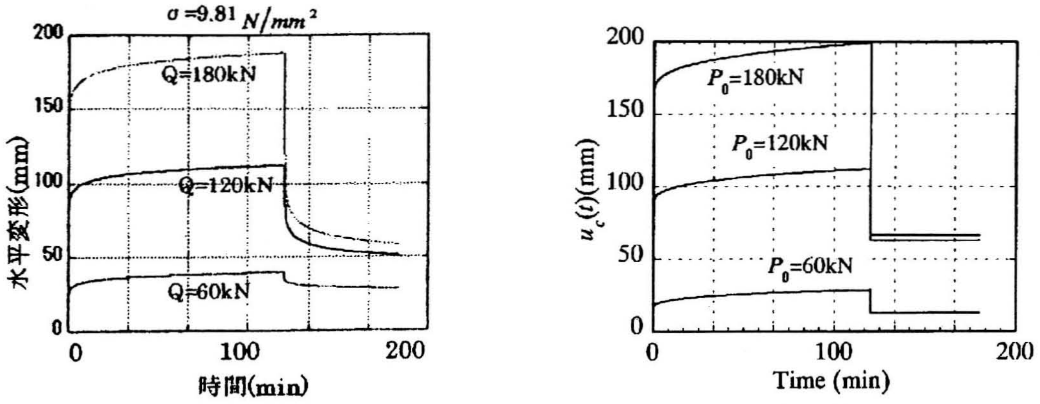


図7　一定水平力加力実験に基づくクリープ変形の性状

図8に一定水平力加力実験に対する実験結果[5]と解析結果を比較して示す．なお，解析ではLRBの荷重-変形関係を文献5)の縮尺LRBϕ500の繰り返し加力試験結果から筆者が読み取り，微小変形時においても非線形特性を示すようなポリリニア型の復元力特性に当てはめた．

同図に示すように，解析によるクリープ変形は実験結果と良い対応を示している．ただし，初期変形が過小であり，除荷以降のクリープ変形が表現されていない．初期変形が過小であるのはLRBの荷重-変形関係を文献5)より筆者が読み取った際の誤差によるものである．また，除荷以降のクリープ変形の不具合はクリープ変形を表す(14)式を載荷荷重ではなく，鉛に作用するせん断力で表すことができれば，この評価も可能になる．このようにクリープ変形を表す式を構築するための情



a) 実験結果[5)]　　b) 解析結果

図8　一定水平加力試験結果と解析結果の比較

報に不足しているものの，一定荷重に対しては提案する解析法は妥当であると考えられる.

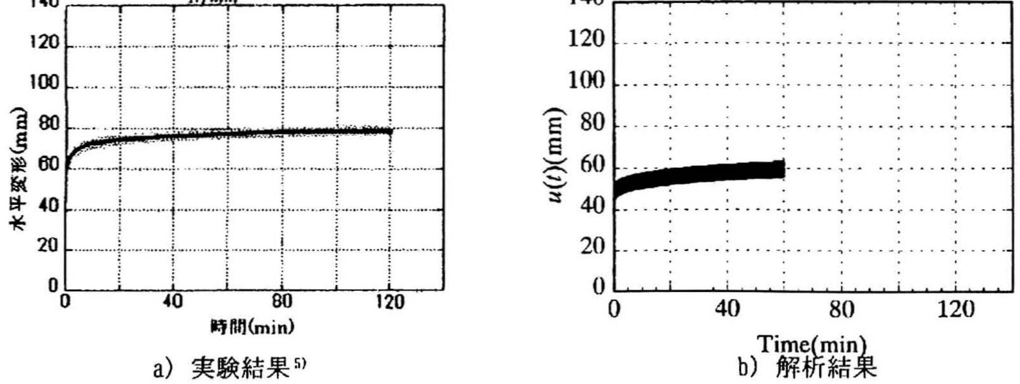
3) 一定荷重＋正弦波荷重実験に対する検証

図9に一定荷重(60kN)＋正弦波荷重(±30kN)試験の水平変形の時刻歴波形を，図10に同試験の荷重－変形関係を実験結果[5)]と解析結果を比較して示す．なお，解析モデルは一定水平力実験と同様である.

図9の変形の時刻歴に着目すると実験結果および解析結果共に，時間0分～20分間にクリープによる顕著な変形が認められる．初期変形の値は異なるものの，解析によるクリープ変形は，実験結果に良い対応を示している．なお，初期変形の相違は一定水平力実験と同様に，LRBの荷重－変形関係を文献5)より筆者が読み取った際の誤差によるものである.

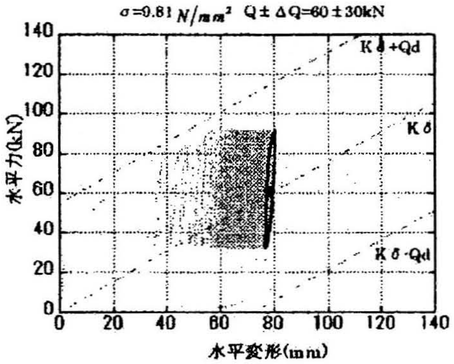
図10の荷重－変形関係に着目すると，時刻歴に認められる初期変形の差は見られるが，正弦波荷重による履歴の形状，勾配は良く対応している.

このように，解析結果は実験結果に良く対応しており，一定荷重と同様に変動荷重に対しても提案する解析法は妥当であると考えられる.

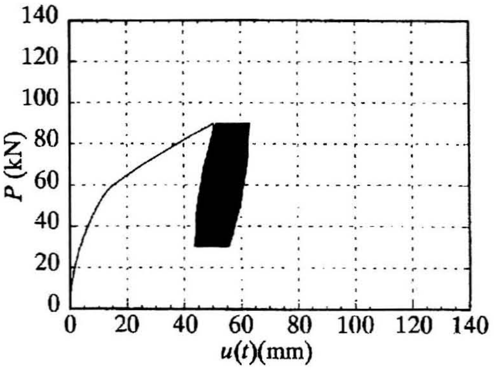


a) 実験結果[5)]　　b) 解析結果

図9　一定荷重(60kN)＋正弦波荷重(±30kN)試験による時間－変形関係の実験結果と解析結果の比較



a) 実験結果[5)]



b) 解析結果

図10　一定荷重(60kN)+正弦波荷重(±30kN)試験による荷重－変形関係の実験結果と解析結果の比較

4) 風応答実験に対する解析

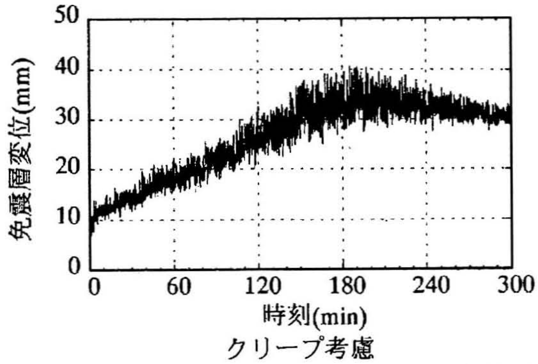
一定荷重に対する解析および変動荷重に対する解析をそれぞれ実験結果と比較することにより，提案するクリープ変形を考慮した解析法が妥当であることを示した．ここでは，風応答実験[5)]を模擬して，提案解析手法によるクリープを考慮した場合と無視した場合の解析結果を示す．

解析では，①建物の質量分布は一様である，②建物幅・階高・振動モードを図より読み取る，③質量密度を仮定し，階高・振動モードから層剛性を算定，④免震層の剛性がLRB100% 歪の接線剛性と一致するように質量密度を決定する，という手順で建物諸条件を定めた．その結果質量密度は340kg/m³となった．また，LRBの荷重－変形関係ならびにクリープ特性は，一定水平荷重実験と同様な条件である．なお、解析に用いた風力の時刻歴は，風洞実験[15)]から得られた層風力の情報を元にシミュレート[16)]した．

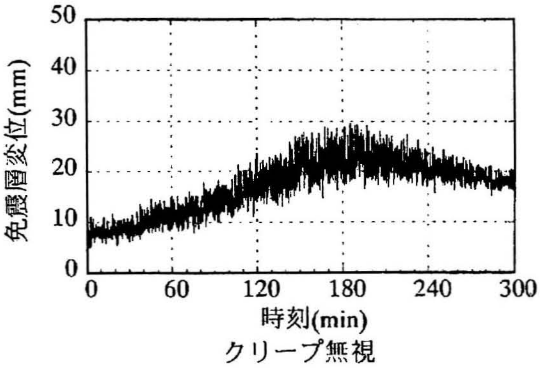
図11に変形の時刻歴波形を示す．クリープによる変形は，荷重の小さい初期には2mm程度のものであるものの，荷重の増加と時間の経過により15mm程度まで増加している．

図12にエネルギーの時刻歴を示す．なお，図中に示す減衰エネルギーは粘性減衰によるもので，部材の塑性化に伴う履歴減衰は歪エネルギーとして表現している．クリープ変形を考慮した場合と無視した場合のエネルギーの差はほとんど認められない．

図13にLRB積層ゴムのせん断力－変形関係をスケルトンカーブと比較して示す．なお，同図の解析結果は縮尺試験体に対応するものであり，図11の変形の1/2に対応する．クリープ変形により，LRB積層ゴムの履歴はスケルトンカーブから離れだし，見掛け上剛性が低下したような状態となることがわかる．

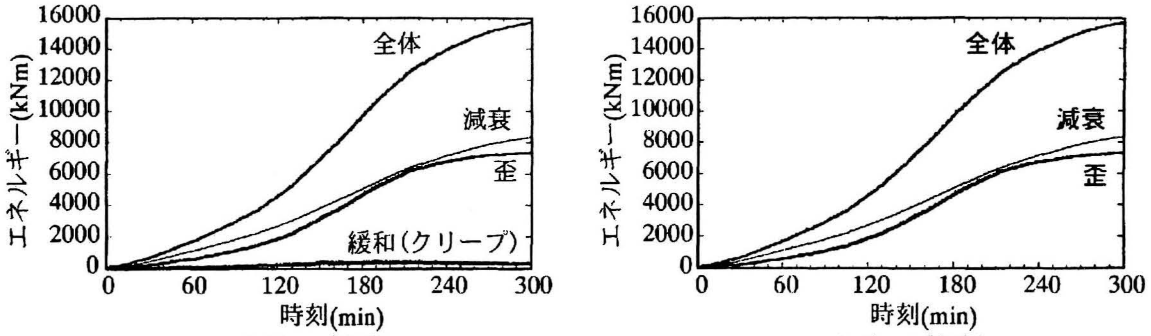


クリープ考慮



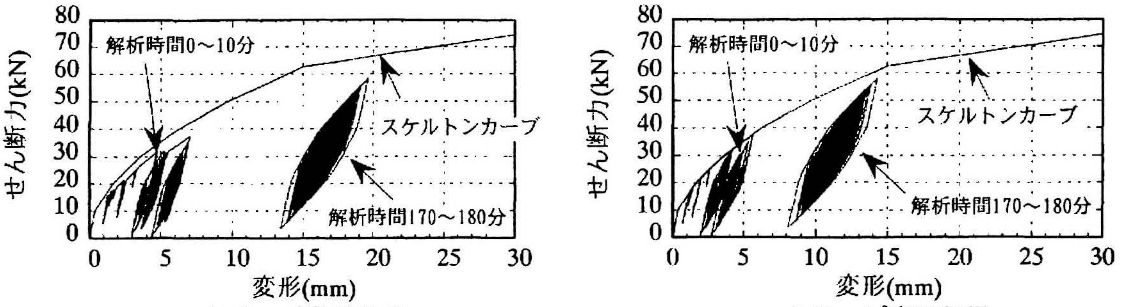
クリープ無視

図11　免震層の変位時刻歴波形



クリープ考慮　　　　クリープ無視

図12　エネルギーの時刻歴波形



クリープ変形考慮　　　　クリープ変形無視

図13　LRB積層ゴム(縮尺試験体)のせん断力－変形関係

4．おわりに

鉛をデバイスとして使用した免震建物に着目し，微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力特性モデルとクリープ変形を考慮した時刻歴風応答解析方法を提案した．

復元力特性の微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力特性モデルについては，解析結果を地震観測記録および風観測記録と比較し，その復元力モデルの妥当性を示した．

クリープ変形を考慮した解析法については，LRB積層ゴムの一定水平加力試験および一定+正弦波水平加力試験の実験結果と解析結果を比較し，解析方法の妥当性を示した．また，強風の継続時間が長い場合には，クリープ変形が無視し得ないこと，クリープ変形によって見かけ上剛性が低下したような状態となることを指摘した．加えて，LRB積層ゴムの場合には，クリープ変形の発生要因となる鉛部のクリープ変形特性を評価できれば，より精度の高い解析が可能であることを示唆した．同様に，鉛ダンパーについてもクリープ変形特性の情報が得られれば，微小な振幅から弾塑性挙動を示す復元力特性モデルと組合せてクリープ変形の評価は可能である．

参考文献

1)P. Henderson and M. Novak: Wind Effects on Base Isolated Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36(1990) 559-569

2)Y. Chen and G. Ahmadi: Wind Effects on Base-Isolated Structures, Journal of Engineering Mechanics, 118-8(1992) 1708-1727

3)B. Liang, X. Shishu and T. Jiaxiang: Wind Effects on Habitability of Base-Isolate Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(2002) 1951-1958

4)竹中康雄，山田和彦，吉川和秀：免震用積層ゴム支承の曲線型履歴復元力モデル:「修正HDモデル」，日本建築学会

技術報告集，第14号，87-92，2001.12
5)竹中康雄，飯塚真巨，鈴木雅靖，吉川和秀，山田和彦：鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した高層免震建物の風応答簡易評価法，日本建築学会構造系論文集，第561号，89-94，2002.11
6)伊藤純子，大熊武司，丸川比佐夫，岡田創，下村祥一，軽部英生：神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.197-198，2001.9
7)軽部英生，大熊武司，丸川比佐夫，片桐純治，岡田創，下村祥一：神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.199-200，2001.9
8)大熊武司，安井八紀，下村祥一，小賀伸一：23号館の強風時実挙動観測，地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム，pp.69-80，2002.3
9)安井八紀，大熊武司，丸川比佐夫，軽部英生，下村祥一：中低層免震建物の風洞実験模型の開発，2002
10)高山峯夫，森田慶子，安藤勝利：U型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察(1,2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.729-732，1985
11)鴨野佐一：工業材料便覧，1985
12)R. G. Sim: Reference stress concepts in the analysis of structures during creep, International Journal of Mechanical Science, Vo.12, pp. 561-573, 1970
13)J. Spence and J. Hult: Simple approximations for creep relaxation, International Journal of Mechanical Science, Vo.15, pp. 741-755, 1973
14)軽部英生，大熊武司，安井八紀，下村祥一：神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究，その5 弾塑性応答解析による応答予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.211-212，2002.8
15)安井八紀，大熊武司，丸川比佐夫：高層免震建物の等価静的風荷重に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.127-128，2004.8
16)星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会，pp.45-94