

鉛プラグ入り積層ゴムの大地震時における熱・力学連成挙動の解明

～エネルギーの釣合に基づく応答予測式の提案～

東京理科大学 本間友規

1. はじめに

減衰能力を有する免震部材は、長周期地震動により大振幅多数回繰返し変形を受け発熱・温度上昇することにより減衰特性が低下し、それに伴う免震建物の揺れの増大や免震部材の損傷が懸念されている。動的加振実験(図1)により、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)は加振を受ける際に降伏後剛性(K_d)は安定した性状を保つが、降伏荷重(Q_d)は鉛部の温度上昇に伴い低下することが明らかになっている。既往の研究により、LRBの熱影響を考慮した地震応答解析法¹⁾が開発されている。本報では、上述の地震応答解析法を適用してパラメータスタディを行い、熱・力学連成挙動を考慮したエネルギーの釣合に基づく応答予測式を提案する。

2. 熱影響を考慮した地震応答解析

2.1 解析概要

上記解析法により時刻歴応答解析を行った。解析対象建物は、16質点せん断振動系とする。上部構造は日本建築学会東海地震等巨大災害への対応特別委員会の第3期免震モデル²⁾とする。免震層は表1に示す解析諸元とし、LRBと積層ゴム、LRBと弾性すべり支承の組み合わせによりパラメータを実現している。積層ゴム、弾性すべり支承の復元力特性をそれぞれ図1(a), (b)に示す。熱影響を考慮する場合は図2, 3のように鉛温度に応じて降伏荷重 Q_d を変化させている。解析に用いたLRBの諸元を表2に示す。表3に入力地震動の一覧を示す。

2.3 LRB降伏荷重-履歴吸収エネルギー関係

LRBの降伏荷重特性値 Q_d を鉛プラグ温度上昇の要因である履歴吸収エネルギー W_p に着目し定式化する。 Q_d は設計値で除した低下率 ${}_{LRB}k$ で評価し、 ${}_{LRB}k$ は地震動継続時間中における最小値 ${}_{LRB}k_{min}$ を代表値とする。また、式に普遍性を持たせるためLRB履歴吸収エネルギー ${}_{LRB}W_p$ は鉛プラグ体積 V_p で除し単位体積当たりの値 ${}_{LRB}W_p/V_p$ として評価する。図6に ${}_{LRB}W_p/V_p$ と ${}_{LRB}k_{min}$ の関係を示す。実験結果および解析結果より ${}_{LRB}k_{min}$ と ${}_{LRB}W_p/V_p$ の関係式を(1)式のように提案する。

$${}_{LRB}k_{min} = -0.06 + 1.25 \times \exp(-{}_{LRB}W_p/V_p/360) \quad (1)$$

2.4 等価繰返し数 n_1 の評価

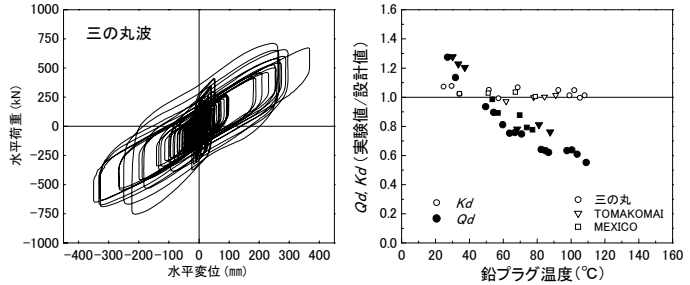
等価繰返し数 n_1 はダンパーのエネルギー吸収効率を表す数値で、熱影響非考慮時は(2)式で表される。ここで、熱影響考慮時における等価繰返し数 n_1' は Q_d 低下を考慮し(3)式で定義する。

$$n_1 = \frac{{}_sW_p}{4 \cdot {}_sQ_y \cdot \delta_{max}} \quad (2), \quad n_1' = \frac{{}_sW_p'}{4 \cdot k_{min} \cdot {}_sQ_y \cdot \delta_{max}} \quad (3)$$

${}_sW_p$: 剛要素履歴吸収エネルギー

${}_sQ_y$: 剛要素の降伏耐力

エネルギーの釣合に基づく応答予測式において、 n_1



a) 水平変位-水平荷重関係 b) Q_d/K_d -鉛プラグ温度関係

図1 φ1000LRB 動的加振実験結果

表1 免震層解析パラメータ

免震周期 $T_f = 2\pi \sqrt{M/K_f}$	2,3,4,5,6 sec
降伏せん断力係数 $\alpha_s = {}_sQ_y/Mg$	0.01,0.02,0.03,0.04,0.05, 0.06,0.07,0.08,0.09,0.10

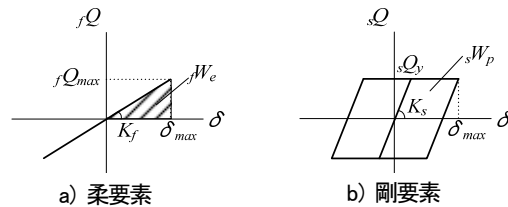
表2 LRB 諸元

ゴム外径 D_r (mm)	800	1000	1500
鉛径 D_p (mm)	140,160,180	180,200,220	250
ゴム総厚 H_r (mm)	200	203	203
鉛プラグせん断変形部高さ H_p (mm)	367.7	323.4	323.4

表3 入力地震動諸元

地震波名	maxAcc.(cm/s ²)	継続時間(s)	r値	備考
C-SAN-EW	185.9	113.5	3.25	東海・東南海 三の丸
BCJ L2	355.7	65.3	1.79	建築センター波 LV2
告示波(Toma NS)	459.1	132.2	2.81	2004十勝沖 K-net 苫小牧 NS位相
告示波(Hachinohe EW)	384.9	70.4	1.79	2004十勝沖 Hachinohe EW位相
告示波(Toma NS ×1.5)	688.7	132.2	2.81	告示波(Toma NS) 1.5倍

継続時間:地震波形の加速度パワーの5%と95%の間の時間
r値:標準地震動に対する反復数



a) 柔要素 b) 剛要素

図2 免震層復元力特性

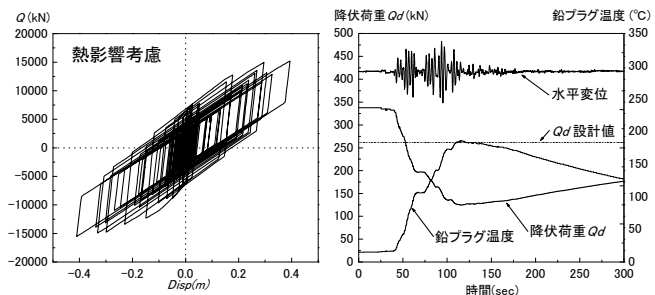


図3 水平変位-水平荷重関係

図4 Q_d の時刻歴

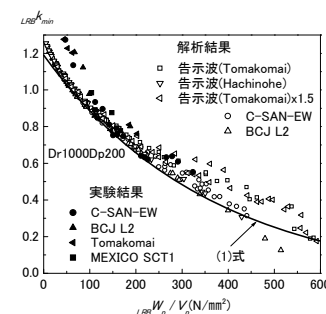


図5 ${}_{LRB}k_{min}$ - ${}_{LRB}W_p/V_p$ 関係

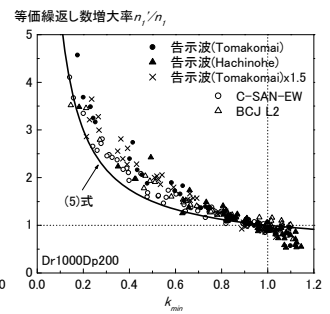


図6 等価繰返し数増大率

は下限値をとることで安全側に評価することができ、既往の研究^{3),4)}により熱影響非考慮時の下限値は柔要素と剛要素のせん断力比 $s r_q (= f Q_{max} / s Q_y)$ と標準地震動に対する地震動の反復数 f との関係により(4)式のように提案されている。

$$n_1 = 2f \quad (s r_q \geq 1.0), \quad n_1 = f \cdot (1.0 + s r_q) \quad (s r_q < 1.0) \quad (4)$$

ここで、(3)では Q_d を最大低下時の値で固定しており n_1' は n_1 に対して大きく評価される可能性があるため、 Q_d 低下が n_1' に及ぼす影響を検証する必要がある。図6に n_1'/n_1 と k_{min} の関係を示す。図6より(5)式のように関係式を設定する。(4)、(5)式より、 n_1' の下限値を(6)式のように提案する。

$$n_1'/n_1 = \left(\frac{1}{2k_{min}} + \frac{1}{2} \right) \quad (k_{min} \leq 1.0) \quad (5)$$

$$n_1' = f \left(\frac{1}{k_{min}} + 1 \right) \quad (s r_q \geq 1.0), \quad n_1' = f(1 + s r_q) \left(\frac{1}{2k_{min}} + \frac{1}{2} \right) \quad (s r_q < 1.0) \quad (6)$$

n_1' と(6)式の比較を図7に示す。図7より、(6)式は解析結果の下限値を包絡しており安全側の評価ができています。

3. エネルギーの釣合に基づく応答予測式の導出

熱影響考慮時における免震構造のエネルギー釣合式は、熱影響非考慮時と同様に(7)式のように表される。

$$f W_e' + s W_p' = E \quad (7)$$

ここで、 $f W_e'$ ：柔要素の弾性振動エネルギー

E ：地震動による総入力エネルギー

免震構造の諸元は柔要素の弾性ばね定数を K_f 、免震層の最大応答せん断力係数を $\alpha_1 (= Q_{max} / Mg)$ とする。基準となる応答量を、無減衰時における免震層最大応答せん断力係数 α_0 と最大応答変位 δ_0 とすると、免震層最大応答変位 δ_{max}' / δ_0 は(5)、(7)式より次式で表される。

$$\frac{\delta_{max}'}{\delta_0} = -2n_1(1 + k_{min}) \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0} \right) + \sqrt{\left(2n_1(1 + k_{min}) \frac{\alpha_s}{\alpha_0} \right)^2 + 1} \quad (8)$$

免震層最大応答せん断力 $1Q_{max}'$ は、柔要素負担分を最大変形時の値、剛要素負担分を設計値とし(9)式で定義する。

$$1Q_{max}' = s Q_y + K_f \cdot \delta_{max}' \quad (9)$$

免震層最大応答せん断力係数 α_1' / α_0 は、(9)式に(8)式を代入し(10)式で表される。

$$\frac{\alpha_1'}{\alpha_0} = (-2n_1(1 + k_{min}) + 1) \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_0} \right) + \sqrt{\left(2n_1(1 + k_{min}) \frac{\alpha_s}{\alpha_0} \right)^2 + 1} \quad (10)$$

4. 応答予測式の検証

時刻歴応答解析から求まる応答値との比較により、応答予測式(8)、(10)式の妥当性を検証する。図8(a)に δ_{max}' / δ_0 と α_s / α_0 の関係、図8(b)に α_1' / α_0 と α_s / α_0 の関係を示す。図8より応答予測式(8)、(10)は応答値と良い対応を示しており、また、安全側に評価できている。

5. 応答予測式に基づく免震層の応答評価

地震動入力エネルギーが全て免震層で吸収されると仮定すると、(1)式により α_s と $LRB k_{min}$ の関係は図9のように示される。 α_1' と δ_{max}' の関係を求め、 δ_{max}' で微分することにより、 α_1' が極小をとる最適値 α_{1min}' とそのときのダンパー量 $\alpha_s(\alpha_{1min}')$ が求まる。図10に最適値における免震層最大応答せん断力係数 α_{1min}' と最大応答変位 $\delta_{max}'(\alpha_{1min}')$ の関係を示す。

ここで、 $T_f=4.0$ sec、 $\alpha_s=0.03$ の免震建物に、設計用地震動レベル $V_f=200$ cm/sの地震波が入力すると仮定すると、図9

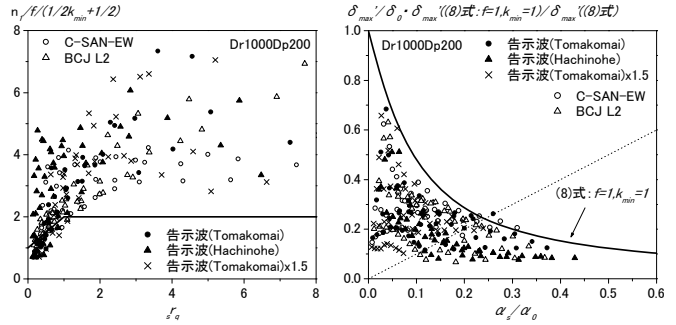


図7 等価繰返し数

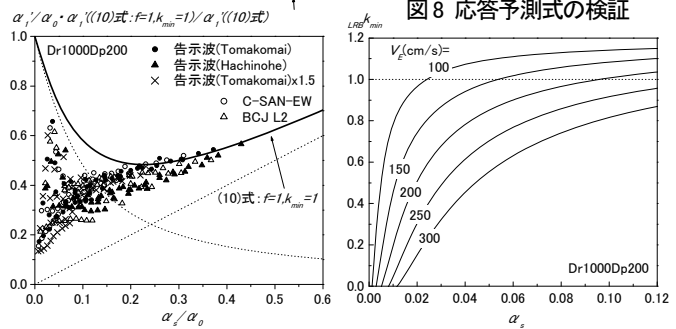


図8 応答予測式の検証

a) 最大応答変位

図8 応答予測式の検証

b) 最大応答せん断力

図9 α_s による $LRB k_{min}$ の予測

図8 応答予測式の検証

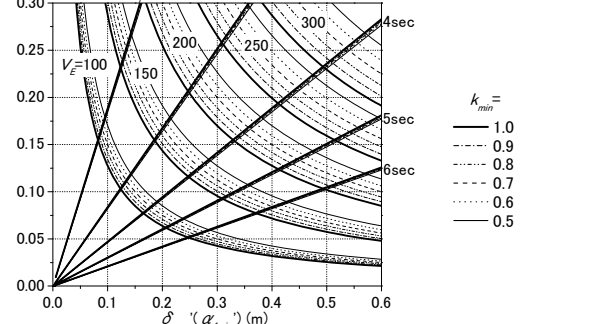


図10 最適値における α_{1min}' と $\delta_{max}'(\alpha_{1min}')$ の関係

よりその時の $LRB k_{min}$ は最大で設計値の7割まで低下する可能性がある。また、その際の最適値における応答は、図10より $\delta_{max}'(\alpha_{1min}')$ が32.5cmから36.0cm、 α_{1min}' が0.155から0.165まで増大する可能性がある。

5. まとめ

LRBの降伏荷重低下率と履歴吸収エネルギーの関係式を導き、免震層降伏荷重の低下が等価繰返し数に及ぼす影響を定式化した。これら関係式を用いLRBの熱・力学連成挙動を考慮したエネルギーの釣合に基づく応答予測式を導出し、降伏荷重の低下が免震層応答に及ぼす影響を検証した。

謝辞

本研究は平成18、19年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)課題番号:18360271, 研究代表者:竹中康雄)による研究成果を含む。また、解析には鹿島建設(株)開発の解析プログラムを使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹中他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学連成挙動に関する研究(その9~11), 日本建築学会大会梗概, 2008.9
- 2) 日本建築学会：2006年度日本建築学会大会研究協議会資料「巨大地震による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題」, 2006.9
- 3) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.11
- 4) 秋山他：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.37-43, 2006.10
- 5) 日本建築学会：免震構造設計指針第3版, 2001.9