

履歴型ダンパーを用いた制振補強建物の耐震性評価 －エネルギー法に基づいたダンパー補強建物の換算 I_s 値－

小林正人（明治大学理工学部 准教授・博士（工学））

位田拓磨（松田平田設計 修士（工学））

五十棲雄高（明治大学大学院 大学院生）

1. はじめに

現在、構造耐震指標 I_s による耐震診断・耐震補強¹⁾が広く行われているが、制振部材による補強については、 I_s 値の計算方法が未整備な状況にある。本研究では、2005年に告示化されたエネルギー法²⁾を援用した構造耐震指標 I_s （以下、換算 I_s 値とする）の計算方法を提案する。本報では換算 I_s 値の計算手順および計算例を提示する。なお、本研究の詳細については文献3)を参照されたい。

2. 制振補強建物の換算 I_s 値

換算 I_s 値は(1)～(14)式を計算することによって求める。(2)式と(3)式を比較しそのうちの小さいほうを各層の換算 I_s 値とする。

$$I_{s,i}^{CON} = \min(I_{s,i}^{CON_s}, I_{s,i}^{CON_c}) \quad (1)$$

$$I_{s,i}^{CON_s} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{\gamma_i \cdot T_d \cdot g\sqrt{M}} \sqrt{\frac{E_{D,i}}{\sum_{j=1}^N S_j} \frac{S_i}{S_j}} \quad (2)$$

$$I_{s,i}^{CON_c} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{\gamma_i \cdot T_d \cdot g\sqrt{M}} \sqrt{\frac{E_{D,i}}{\sum_{j=1}^N S_j (p_j \cdot p_{ij})^{-n}} \frac{S_i (p_i \cdot p_{ii})^{-n}}{\sum_{j=1}^N S_j (p_j \cdot p_{ij})^{-n}}} \quad (3)$$

$$E_{D,i} = f a_{E,i} \cdot f E_{D,i} + d a_{E,i} \cdot d E_{D,i} \quad (4)$$

$$f E_{D,i} = W_{f,i} + E_{sf,i} \quad (5)$$

$$d E_{D,i} = W_{de,i} + W_{dp,i} + E_{sd,i} \quad (6)$$

$$W_{f,i} = Q_{fu,i} \cdot \delta_{fu,i} / 2 \quad (7)$$

$$W_{de,i} = Q_{du,i} \cdot \delta_{du,i} / 2 \quad (8)$$

$$W_{dp,i} = 2(\delta_{fu,i} - \delta_{du,i}) Q_{du,i} \cdot n_d' \quad (9)$$

$$E_{sf,i} = 2(\delta_{max,i} - \delta_{fu,i}) Q_{fu,i} \cdot n_f \quad (10)$$

$$E_{sd,i} = 2(\delta_{max,i} - \delta_{fu,i}) Q_{du,i} \cdot n_d \quad (11)$$

$$f a_{E,i} = \frac{2\mu_i^* - 1}{8\mu_i^* - 7} \quad (12)$$

$$d a_{E,i} = \begin{cases} 0.5 & (\mu_i^* < 1.25) \\ f a_{E,i} & (\mu_i^* \geq 1.25) \end{cases} \quad (13)$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1.1 & (p_i / ave(p_i) > 0.45) \\ 2 - 2(p_i / ave(p_i)) & (p_i / ave(p_i) \leq 0.45) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 T_d ：損傷限界時の1次固有周期、 g ：重力加速度、 M ：建物全質量、 $E_{D,i}$ ：架構全体の限界吸収エネルギー、 $f E_{D,i}$ ：主架構の限界吸収エネルギー、 $d E_{D,i}$ ：ダンパーの限界吸収エネルギー、 $W_{f,i}$ ：損傷限界状態で主架構部分で吸収できる弾性エネルギーの吸収量、 $W_{de,i}$ ：損傷限界状態でダンパー部分で吸収できる弾性エネルギー吸収量、 $W_{dp,i}$ ：損傷限界状態内でダンパー部分で吸収できる塑性エネルギー吸収量、 $E_{sf,i}$ ：許容変形状態内で主架構部分で吸収できる塑性エネルギー吸収量、 $E_{sd,i}$ ：許容変形状態内でダンパー部分で吸収できる塑性エネルギー吸収量、 n_d' ：主架構が弾性範囲内でのダンパー部分の塑性変形の累積の程度を表す数値(=5)、 n_f ：主架構の塑性変形の累積の程度を表す数値(=2)、 n_d ：主架構が塑性範囲内でのダンパー部分の塑性変形の累積の程度を表す数値(=2)、 μ_i^* ：降伏変位に対する許容変位の比、 $f a_{E,i}$ ： I_s 値換算のための主架構の限界吸収エネルギー $f E_{D,i}$ の調整係数、 $d a_{E,i}$ ： I_s 値換算のためのダンパーの限界吸収エネルギー $d E_{D,i}$ の調整係数、 γ_i ：多質点系の補正係数、 p_i ：各階の保有水平層せん断力係数の A_i 分布とのずれを表す数値とする。なお、添字の i は層の位置を示している。 S_i や P_i など上記以外の記号については文献3)を参照されたい。

3. 換算 I_s 値の解説と算定手順

3.1 架構全体の限界吸収エネルギー $E_{D,i}$ の算定

エネルギー一定則の概念（図1）から、弾塑性状態において許容できる最大変形 $\delta_{max,i}$ までに層が吸収するエネルギー（限界吸収エネルギー：図

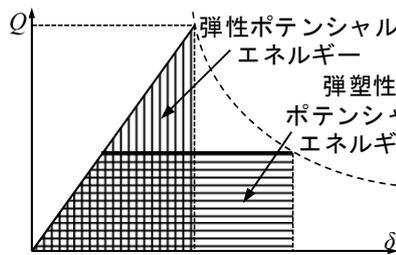


図1 エネルギー一定則

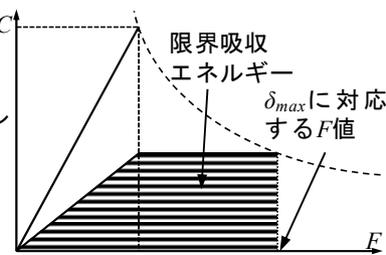


図2 限界吸収エネルギー

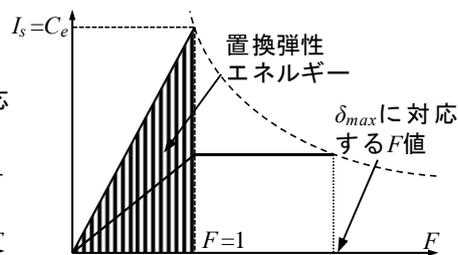
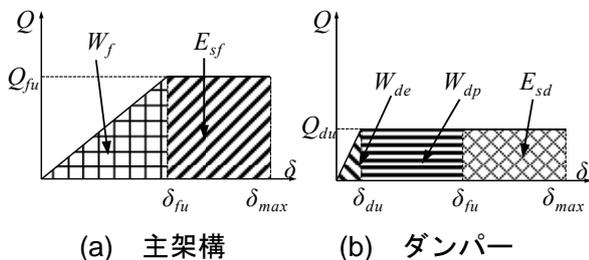


図3 弾性置換エネルギー

2) を等価な弾性エネルギー (図3) に置換したものが I_s 値であり, 制振部材を考慮して架構全体の限界吸収エネルギー E_{Di} を陽な形で表現したものが換算 I_s 値である。

限界吸収エネルギー E_{Di} は, 各層の主架構およびダンパーの復元力特性, エネルギー吸収性能を考慮し, (4)~(11)式を用いて算定する (図4)。



(a) 主架構 (b) ダンパー

図4 限界吸収エネルギー

3.2 I_s 値換算のための限界吸収エネルギーの調整係数 $f_{aE,i}$ と $d_{aE,i}$

主架構の限界吸収エネルギーの調整係数 $f_{aE,i}$ とダンパーの限界吸収エネルギーの調整係数 $d_{aE,i}$ は, エネルギー一定則とエネルギー法のエネルギー吸収量の評価の差を補正するため $f_{ED,i}$ と $d_{ED,i}$ の調整係数として(12)式および(13)のように定めている。

$d_{aE,i}$ は図5に示すように地震応答解析結果の

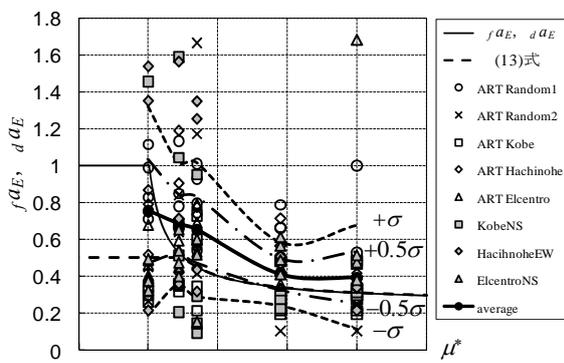


図5 調整係数 f_{aE} , d_{aE} と μ^* の関係

バラつきを考慮して定めており, 平均値 -0.5σ に相当するものとなっている。

3.3 損傷集中の考慮

換算 I_s 値では(3)式で表すように, 架構全体の限界吸収エネルギー量を各層に必要とされるエネルギー吸収量の割合で基準化して当該層の耐震性を表現する。これにより, 損傷集中の程度を I_s 値に反映させている (図6)。

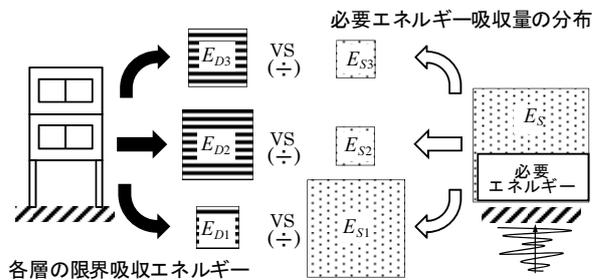


図6 損傷集中層の概念

3.4 多質点系の補正係数 γ_i

γ_i は1質点系の換算 I_s 値を多質点系に拡張する際に生じる差を補正する係数として定めている。

3, 5, 10 質点のモデルに対して損傷集中層を設け, 耐力・剛性を相対的に低下させたときの γ_i を図7に示す。図7から, 全体をほぼ包絡し安全側となるように(14)式を定めている。

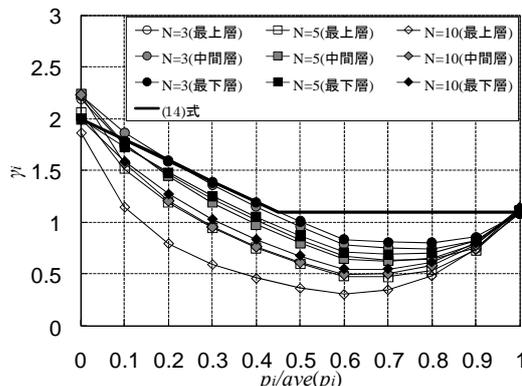


図7 補正係数 γ_i と $p_i / \text{ave}(p_i)$ の関係

4. 換算 I_s 値の計算例

ダンパー補強を施した鉄骨造建物に対してエネルギー法²⁴⁾による耐震計算を行い、換算 I_s 値を算定する。対象は 1981 年以前の旧基準で設計された事務所建物と体育館である。なお、本節の計算例の詳細は、文献 5) に掲載予定である。

4.1 履歴型ダンパーで補強した中低層 S 造建物

対象建物の一般階平面図、Y1 および Y4 通り軸組図をそれぞれ図 8、図 9 に、架構とダンパー部材断面を表 1、表 2 に、各層の荷重変形関係を図 10 に示す。表 3 のエネルギー法の計算結果では主架構が弾性限界までに架構全体が吸収できるエネルギー量が入力されるエネルギー量をわずかに上回る。表 4 に換算 I_s 値の算定結果を示す。1 層に損傷が集中する傾向を示すが、換算 I_s 値は全

層で $I_s = 0.7$ を上回るダンパー配置となっている。

4.2 履歴型ダンパーで補強した鉄骨造体育館

対象建物の梁間構面軸組図、桁行構面軸組図、屋根伏図をそれぞれ図 11~13 に示す。屋根を含めた各節点を図 11 のように層とみなす。部材断面を表 5 に示す。主架構の水平抵抗要素は引張ブレースであり復元力特性はスリップ型である。

1, 2 層の荷重変形関係を図 14 に示す。エネルギー法の計算結果を表 6 に示す。ダンパーでの補強により、エネルギー法で要求される建物性能の 1.5 倍のレベルを建物に持たせている。1, 2 層でほぼ全ての入力エネルギーを吸収する。表 7 に換算 I_s 値を示す。損傷が集中する 1, 2 層でも、換算 I_s 値が 0.9 以上となるダンパー配置となっており、全層で $I_s = 0.7$ を上回っている。

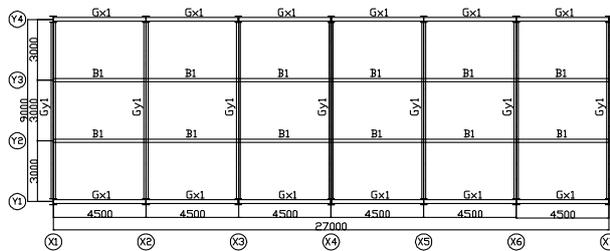


図 8 一般階平面図

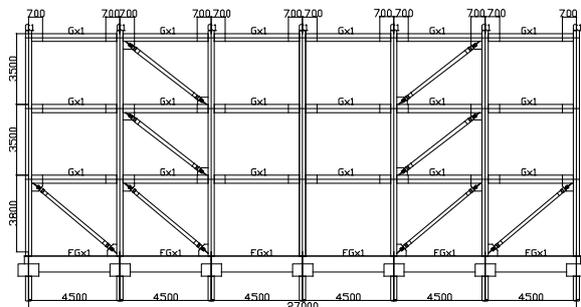


図 9 Y1, Y4 通り軸組図

表 1 主架構部材断面

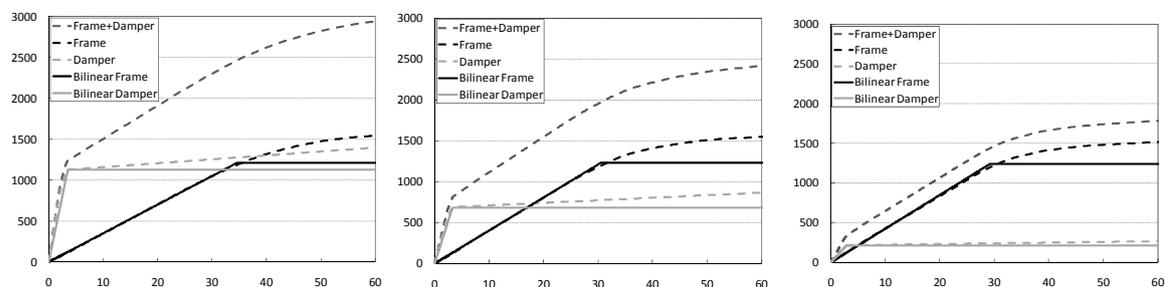
部位	部材断面	鋼種
柱	H-300 × 300 × 10 × 15	SS400
梁	H-600 × 200 × 11 × 17	SS400
小梁	H-300 × 150 × 6.5 × 9	SS400

表 2 ダンパー部材断面

層	塑性化部			鋼種
	幅(mm)	厚さ(mm)	長さ(mm)	
3	40	19	2850	LYP100
2	130	19	2850	LYP100
1	110	19	2945	LYP100

表 3 中低層 S 造建物のエネルギーの計算

有効周期 T_s (sec)	0.80
エネルギーの速度換算値 V_s (m/sec)	1.38
建物全体の質量 M (ton)	639.3
作用するエネルギー $(1/2)MV_s^2$ (kN·m)	605.0
主架構の弾性歪みエネルギー(kN·m)	50.7
ダンパーの弾塑性ひずみエネルギー(kN·m)	568.7
保有エネルギー吸収量 W_e (kN·m)	619.4
必要エネルギー吸収量 E_s (kN·m)	-14.4



(a) 第 1 層 (b) 第 2 層 (c) 第 3 層

図 10 各階の荷重増分解析結果および復元力特性のモデル化

表 4 中低層 S 造建物の換算 I_s 値

層	降伏変位 δ_{fui} (mm)	許容変位 $\delta_{max,i}$ (mm)	$f_{D,i}$ (kN·m)	$d_{D,i}$ (kN·m)	$r^a_{E,i}$	$d^a_{E,i}$	$E_{D,i}$ (kN·m)	$\frac{S_i}{\sum S_i}$	$\frac{S_i(p_i \cdot p_{ti})^{-n}}{\sum S_i(p_i \cdot p_{ti})^{-n}}$	γ_i	$I_{s,i}^{CON}$	$I_{s,i}^{CON}$	$I_{s,i}^{CON}$
3	29.2	35.0	46.7	61.7	0.54	0.50	56.1	0.18	0.05	1.1	1.32	0.71	0.71
2	30.6	35.0	40.8	200.8	0.60	0.50	124.7	0.35	0.39	1.1	0.71	0.76	0.71
1	34.6	38.0	37.5	366.7	0.67	0.50	208.4	0.48	0.55	1.1	0.77	0.83	0.77

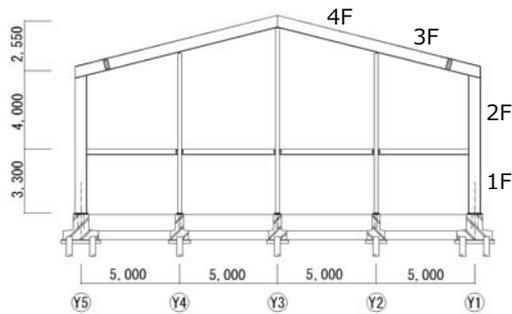


図 11 梁間構面軸組図

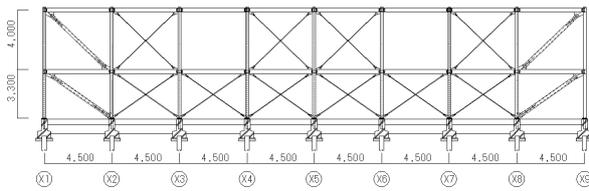


図 12 桁行構面軸組図

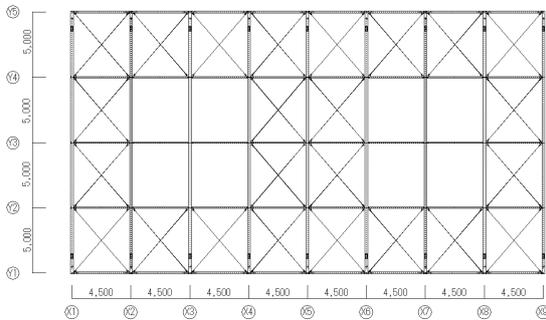


図 13 屋根伏図

表 5 主架構の部材断面

部位	部材断面	鋼種
T	H -600 × 200 × 11 × 17	SS400
G1, G2	H -300 × 150 × 6.5 × 9	SS400
C1	H -600 × 200 × 11 × 17	SS400
C2	H -400 × 200 × 8 × 13	SS400
B1	H -200 × 100 × 5.5 × 8	SS400
BR1	L -65 × 65 × 6	SS400
BR2	φ 22	SS400

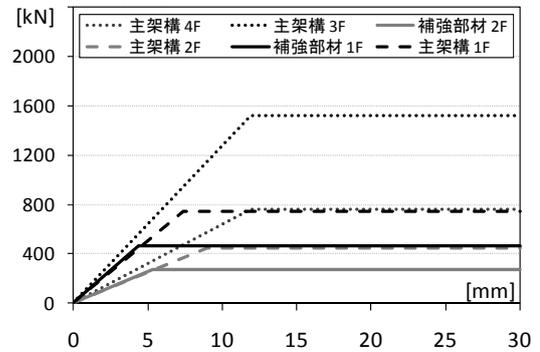


図 14 荷重変形関係

表 6 体育館のエネルギーの計算

有効周期 T_s (sec)	0.28
エネルギーの速度換算値 V_s (m/sec)	0.54
建物全体の質量 M (ton)	171.9
作用するエネルギー $(1/2)MV_s^2$ ($kN \cdot m$)	20.0
主架構の弾性歪みエネルギー ($kN \cdot m$)	4.8
ダンパーの弾塑性ひずみエネルギー ($kN \cdot m$)	25.3
保有エネルギー吸収量 W_e ($kN \cdot m$)	30.1
保有エネルギー余裕度 $W_e / ((1/2)MV_s^2)$	1.5

表 7 体育館の換算 I_s 値

層	降伏変位 δ_{fui} (mm)	許容変位 $\delta_{max,i}$ (cm)	$E_{D,i}$ ($kN \cdot m$)	$dE_{D,i}$ ($kN \cdot m$)	$r^a E_{D,i}$	$d^a E_{D,i}$	$E_{D,i}$ ($kN \cdot m$)	S_i	$S_i(p_i \cdot p_{ti})^{-n}$	γ_i	$c_{s,i}^{CON}$	$I_{s,i}^{CON}$	$I_{s,i}^{CON}$
								$\sum S_i$	$\sum S_i(p_i \cdot p_{ti})^{-n}$				
4	11.94	11.94	4.5	0.0	1.00	0.50	4.5	0.05	0.00	1.10	231.8	2.21	2.21
3	11.94	11.94	9.1	0.0	1.00	0.50	9.1	0.11	0.00	1.10	142.1	2.01	2.01
2	8.97	8.97	2.0	10.5	1.00	0.50	7.3	0.36	0.44	1.10	0.91	1.01	0.91
1	7.38	7.38	2.8	14.8	1.00	0.50	10.2	0.48	0.56	1.10	0.96	1.03	0.96

5. まとめ

- i) 履歴型ダンパーで補強した建物の耐震性評価法として、建築物の限界吸収エネルギーを陽な形で表現する(1)~(3)式の換算 I_s 値を提案した。
- ii) 旧基準で設計された鉄骨造建物を履歴型ダンパーにより補強し、その耐震性を換算 I_s 値により評価できることを確認した。

本研究の成果が、制振部材による建物の補強と耐震改修体の促進に寄与することを期待したい。なお、本研究の詳細については文献3), 5)を参照されたい。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説(1996), 1996.10
- 2) 日本建築センター：エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法の技術基準解説及び計算例とその解説, 2005.10
- 3) 小林正人, 位田拓磨, 五十棲雄高, 長谷川隆, 北村春幸：エネルギー法に基づいた制振補強建物の換算 I_s 値 -履歴型ダンパーを用いた制振補強建物の耐震性評価-, 日本建築学会構造系論文集, 第663号, pp. 881-890, 2011.5
- 4) 独立行政法人建築研究所など編：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル, 2008.9
- 5) 位田拓磨, 他：履歴型ダンパーで補強した既存鉄骨造建物の換算 I_s 値, (その1)~(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), (掲載予定)