

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	中低層免震建物における実効変形比に基づくブレース配置の検討 その1 ブレースの降伏と座屈および免震支承の引抜きの判定手法
Title(English)	A study on brace placements for low to mid-rise base-isolated buildings based on brace effective deformation ratio Part 1 Evaluation on yielding and buckling of braces, and uplift of rubber bearings
著者(和文)	新井雄大, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介
Authors(English)	Yudai Arai, Daiki Sato, Alex Shegay, Ryota Tobari, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, 1, , pp. 517-520
Citation(English)	, 1, , pp. 517-520
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

中低層免震建物における実効変形比に基づくブレース配置の検討

その1 ブレースの降伏と座屈および免震支承の引抜き判定手法

2. 構造—2. 振動

免震構造 中低層建物 ブレース配置
免震支承の引抜き 降伏耐力 座屈耐力

正会員 ○ 新井雄大^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 Alex Shegay^{*3} 〃 戸張涼太^{*4}
〃 安永隼平^{*5} 〃 植木卓也^{*5}
〃 金城陽介^{*5}

1. はじめに

近年、免震建物の多様化が進み、大型物流倉庫を筆頭に、ロングスパンの鉄骨造にも免震構造が採用される事例が増えている。ロングスパンの鉄骨造では、主架構のみでは剛性が低く、免震層に対して相対的に剛体とみなせないため、免震構造による応答低減効果が十分に期待できないケースがある。これを避けるために、鉛直ブレースを設置し、上部構造に十分な水平剛性を確保する必要がある。

しかしながら、ブレース配置によっては、ブレース軸力により免震支承に大きな変動軸力が生じ、引抜きが発生する場合(図1(a))や、ブレース断面積が小さくなりブレースに降伏あるいは全体座屈が生じる場合(図1(b))があり、設計時にはこれらを生じさせない適切なブレースの配置と剛性の組み合わせを選択する必要がある¹⁾。

ブレースとその周辺架構の関係に目を向けると、ブレースは架構せん断変形には有効に作用するが、柱や免震支承の軸伸縮に由来する架構曲げ変形によりブレースに変形ロスが生じる(図2)。架構の層間変形に対するブレースの水平変形(= 実効変形)の比率は実効変形比と呼ばれ^{例えば2)}、筆者らは免震支承直上のブレースの実効変形比が低いときに引抜きが生じることに着目し、実効変形比

により引抜きを判定できることを既報³⁾で示した。また、実効変形比が大きい場合にはブレースの変形効率が高くなり、目標層剛性を満足するときのブレース断面積が小さくなるため、降伏や座屈の危険性が高まる。

そこで本報では、免震支承の引抜きやブレースの降伏・座屈が実効変形比により評価できることに着目し、実効変形比に基づいて降伏、座屈および引抜きを判定する手法を提示し(その1)、適切なブレース配置・剛性の組み合わせの設計手法と設計例を示す(その2)。

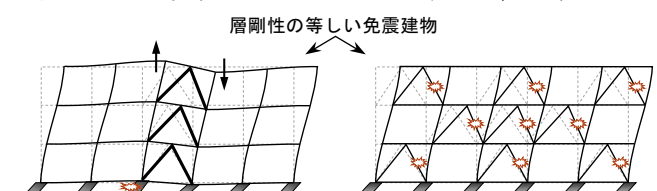
2. 実効変形比に基づく降伏、座屈、および引抜きの判定

以降では、柱や梁などの部材から構成される3次元解析モデルを「部材系」、各層の質点とせん断バネから構成される解析モデルを「バネ系」と呼ぶ。本章では、各層で剛床仮定の成立する部材系からブレースの実効変形を考慮したバネ系を作成し、バネ系の各諸元を用いることで、ブレースの降伏と全体座屈、および免震支承の引抜きを判定する手法を示す。

2.1 ブレースの実効変形を考慮したバネ系モデルの作成

部材系(図3(a))からバネ系(図3(b))の作成にあたり笠井ら⁴⁾、石井ら⁵⁾が制振建物を対象に提案した状態N, R解析を免震建物にも準用する。バネ系は各層3種のバネから構成されており、それぞれ主架構(= ブレース以外の上部構造)の剛性 K_{fs} 、ブレースの水平剛性 K_{ds} 、および柱や免震支承の軸変形に由来するブレース設置箇所の架構剛性 K_{bs} である。状態N, R解析によりブレースの配置と剛性が実効変形比に与える影響をそれぞれ定量的に評価できる。

状態N, R解析の概要を図4に示す。状態N, R解析は、免震支承の水平変形を拘束し、鉛直変形のみが生じる状態で、ブレース部の剛性をそれぞれ0, ∞ にして静的外力を与えることで行える。以降では、バネ系の諸元には右下添え字sを付け、状態N, R解析時の諸元にはそれぞれ右下添え字N, Rを付けて表記する。



(a) 免震支承の引抜き (b) ブレースの降伏・座屈
図1 ブレース配置が引抜きや降伏・座屈に与える影響

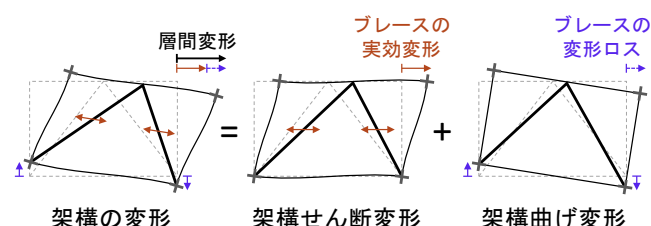


図2 ブレースの実効変形概念

A study on brace placements for low to mid-rise base-isolated buildings based on brace effective deformation ratio
Part 1 Evaluation on yielding and buckling of braces, and uplift of rubber bearings

ARAI Yudai, SATO Daiki, Alex SHEGAY, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, KANESHIRO Yosuke

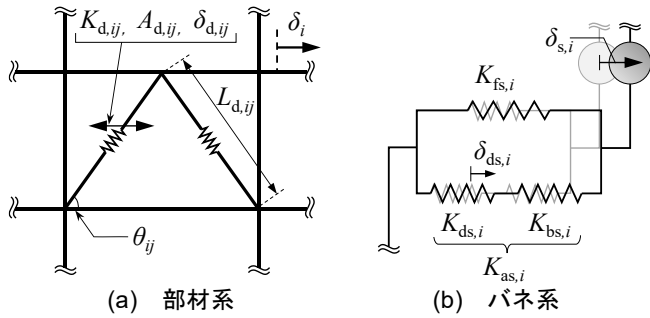


図3 部材系とバネ系の概要

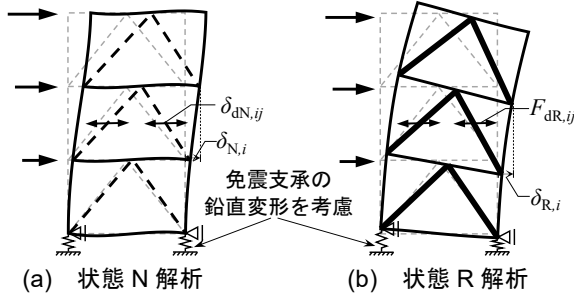


図4 状態 N, R 解析の概要

K_{fs} は状態 N 解析時の層せん断力 Q_N を層間変形 δ_N で除すことで得られる (式(1))。また、状態 N でのブレース設置箇所の実効変形比 α_N はブレースの水平変形 δ_{dN} を用いて式(2)により算出される。ここで右下添え字 ij は第 i 層 j 番目のブレース設置箇所を意味する。

$$K_{fs,ij} = Q_{N,ij} / \delta_{N,i}, \quad \alpha_{N,ij} = \delta_{dN,ij} / \delta_{N,i} \quad (1), (2)$$

K_{bs} は α_N と状態 R でのブレース軸力の水平成分 F_{dR} 、層間変形 δ_R を用いて式(3),(4)により得られる。

$$K_{bs,ij} = \alpha_{N,ij} F_{dR,ij} / \delta_{R,i}, \quad K_{bs,i} = \sum_j K_{bs,ij} \quad (3), (4)$$

K_{ds} は部材系のブレース断面積 A_d を決定することで得られる。 α_N 、鋼材のヤング係数 E 、ブレース 1 本の軸方向長さ L_d 、取付角度 θ ($0 < \theta < \pi/2$) を用いると式(5),(6)のように算出できる。

$$K_{ds,ij} = \alpha_{N,ij}^2 K_{d,ij} = \alpha_{N,ij}^2 \frac{E A_{d,ij}}{L_{d,ij}} \cos^2 \theta_{ij}, \quad K_{ds,i} = \sum_j K_{ds,ij} \quad (5), (6)$$

K_{ds} と K_{bs} の直列バネを付加系剛性 K_{as} と呼び、式(7)により得られる。また、層間変形に対するブレースの水平変形の比率 ($= \delta_d / \delta$) を意味する実効変形比 α_{es} は設置箇所ごとに式(8)のように K_{as} と K_{bs} を用いて表せる。

$$K_{as,i} = \frac{K_{ds,i} K_{bs,i}}{K_{ds,i} + K_{bs,i}}, \quad \alpha_{es,ij} = \alpha_{N,ij} \left(1 - \frac{K_{as,ij}}{K_{bs,ij}} \right) \quad (7), (8)$$

以降では、ここで示したバネ系の諸元を用いて、ブレースの降伏、座屈、および引抜きを判定する手法を示す。

2.2 実効変形比に基づくブレース降伏の判定

ここでは、ブレースをハの字型に設置したスパンの架構変形 (図 5) に着目して降伏の判定手法を示す。ブレースが弾性状態で降伏耐力 F_{dy} (水平方向) に達すると仮定すると、ブレースの水平方向の降伏変形 δ_{dy} は式(9)のように理論的に導出できる。なお、「 $\hat{}$ 」は軸方向の諸元を意味する。

$$\delta_{dy,ij} = \frac{\hat{\delta}_{dy,ij}}{\cos \theta_{ij}} = \frac{\hat{F}_{dy,ij}}{\hat{K}_{d,ij} \cos \theta_{ij}} = \frac{\sigma_y A_{d,ij} L_{d,ij}}{E A_{d,ij} \cos \theta_{ij}} = \frac{\sigma_y L_{d,ij}}{E \cos \theta_{ij}} \quad (9)$$

ブレースが降伏しないためには、ブレースの水平変形 δ_d が δ_{dy} を下回る必要がある (式(10))。

$$\delta_{d,ij} = \alpha_{es,ij} \delta_i < \delta_{dy,ij} \quad (10)$$

$\alpha_{es,dy}$ を式(11)のように算出すると、 $\alpha_{es,dy}$ は特定の変形時に降伏を生じさせないための α_{es} の上限値を意味する。

$$\alpha_{es,dy,ij} = \frac{\delta_{dy,ij}}{\delta_i} = \frac{\sigma_y L_{d,ij}}{R_i H_i E \cos \theta_{ij}} = \frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{2}{\sin 2\theta_{ij}} \cdot \frac{1}{R_i} \quad (11)$$

したがって、式(8)で算出する α_{es} が、 $\alpha_{es} < \alpha_{es,dy}$ を満たしていれば降伏が発生しないと判定できる。言い換えると、図 6(a)に示すように、目標クライテリアに応じて $\alpha_{es} < \alpha_{es,dy}$ を満足する α_{es} となるようにブレースの配置と剛性の組み合わせを選択すれば、ブレース降伏を免れる。また、ハの字型に設置されたブレースの実効変形比は 1.0 以下であることがほとんどであるため (例えば 6), $\alpha_{es,dy} = 1.0$ となる R (図 6(a)中■印) より小さい設計クライテリアを設定すれば、ブレース降伏の影響を無視できる。

2.3 実効変形比に基づくブレース座屈の判定

両端ピン接合であるブレースが、弾性状態で座屈荷重 F_{dcr} (水平方向) に達すると仮定したときの、ブレースの水平方向の座屈変形 δ_{dcr} は、断面 2 次モーメント I_d を用いて式(12)のように導出できる。

$$\begin{aligned} \delta_{dcr,ij} &= \frac{\hat{\delta}_{dcr,ij}}{\cos \theta_{ij}} = \frac{\hat{F}_{dcr,ij}}{\hat{K}_{d,ij} \cos \theta_{ij}} \\ &= \frac{\pi^2 E I_{d,ij}}{L_{d,ij}^2} \cdot \frac{L_{d,ij}}{E A_{d,ij} \cos \theta_{ij}} = \frac{I_{d,ij}}{A_{d,ij}} \cdot \frac{\pi^2}{L_{d,ij} \cos \theta_{ij}} \end{aligned} \quad (12)$$

したがって、断面 2 次半径 $i_d (= \sqrt{I_d/A_d})$ を用いた $\alpha_{es,dcr}$ (式(13)) が、ある層間変形角のときに座屈が生じる実効変形比を意味する。

$$\alpha_{es,dcr,ij} = \frac{\delta_{dcr,ij}}{\delta_i} = \frac{I_{d,ij}}{A_{d,ij}} \cdot \frac{\pi^2}{L_{d,ij} \cos \theta_{ij}} \cdot \frac{1}{R_i H_i} = \left(\frac{\pi i_{d,ij}}{H_i} \right)^2 \frac{\tan \theta_{ij}}{R_i} \quad (13)$$

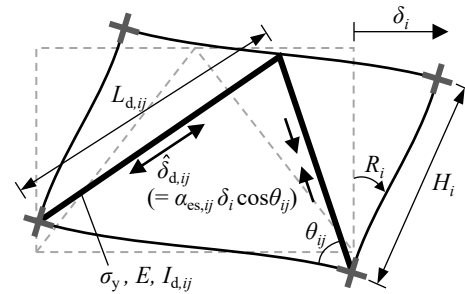


図5 第 i 層目 j 番目スパンの架構変形

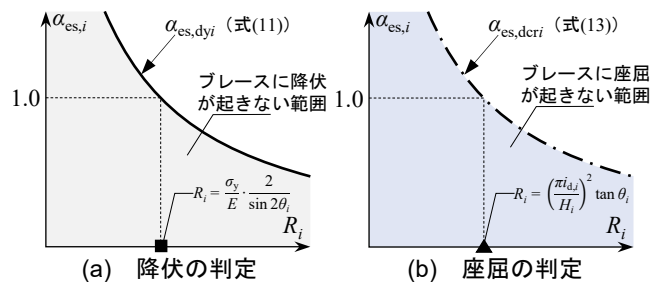


図6 α_{es} に基づく降伏・座屈の判定

ブレースが座屈しないためには、 δ_d が δ_{dcr} を下回る必要がある。そこで、 $\alpha_{es,dy}$ と同様に $\alpha_{es} < \alpha_{es,dcr}$ となることでブレースの全体座屈を判定できる（図 6(b)）。したがって、 $\alpha_{es,dy}$ と $\alpha_{es,dcr}$ の小さい方が、降伏・座屈を生じさせないための設計可能な α_{es} の範囲の決定において、支配的な要素となる。また、図 6(a)■印と同様に、座屈においても i_d に応じて式(13)で $\alpha_{es,dcr} = 1.0$ となるような R （図 6(b)▲印）以内に目標クライテリアを設ければ座屈の影響を無視できる。

式(13)の i_d を左辺に移項すると、任意の α_{es} に対して、ある変形時に座屈を生じさせないための i_d の下限値 i_{dcr} が算出でき（式(14)）、 $i_d > i_{dcr}$ となることでも座屈しないという判定が可能である。

$$i_{dcr,ij} = \frac{H_i}{\pi} \sqrt{\alpha_{es,ij} \frac{R_i}{\tan \theta_{ij}}} \quad (14)$$

2.4 実効変形比に基づく免震支承の引抜きの判定

ここでは、既報³⁾において、第1層目で $\alpha_N = 1.0$ が成立する中低層免震建物を対象に提案した、免震支承の引抜き判定手法の概要を述べる。図 7 に長期荷重および水平地震時の変動軸力が作用した時の免震支承材の鉛直変形を示す。ここで、 σ_0 ：長期荷重時面圧、 σ_{vt} ：水平地震時の面圧（ σ_0 、 σ_{vt} いずれも引張側を正とする）、 A_H 、 K_{vc} ：支承材 1 基あたりの断面積、鉛直剛性、 $\Delta\delta_{vt}$ ：水平地震による長期荷重時からの鉛直変形（上向き正）である。図 7 より、X 方向に k 番目の免震支承において、長期面圧からの変動面圧 $\Delta\sigma_{vt}$ を用いて式(15)が成り立つ。

$$\Delta\delta_{vt,k} = (\sigma_{vt,k} - \sigma_{0,k}) \frac{A_{H,k}}{K_{vc,k}} = \Delta\sigma_{vt,k} \frac{A_{H,k}}{K_{vc,k}} \quad (15)$$

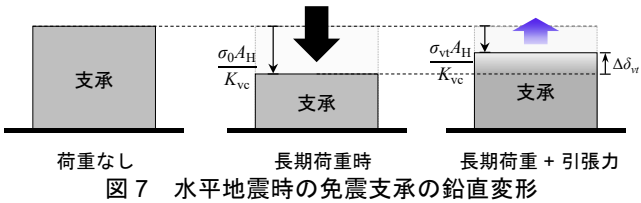


図 7 水平地震時の免震支承の鉛直変形

一方、ブレース設置箇所の架構変形に着目すると、図 8 に示す水平地震時の架構変形より、1 階大梁の傾斜角 θ_g が、第 1 層の層間変形 δ_1 、階高 H_1 、および層間変形角 R_1 を用いて式(16)のように得られる。

$$\theta_{g,j} = \frac{(1 - \alpha_{es,1j})\delta_1}{H_1} = (1 - \alpha_{es,1j})R_1 \quad (16)$$

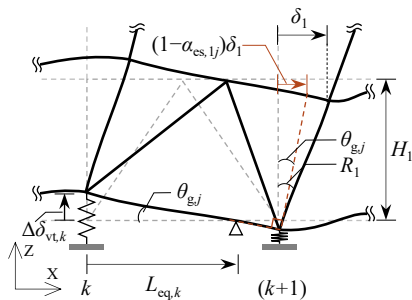


図 8 j 番目のブレース設置箇所の架構変形

また、同図より式(17)の関係が成り立つ。

$$\Delta\delta_{vt,k} = L_{eq,k} \theta_{g,j} \quad (17)$$

ここで、 L_{eq} は、対象としている免震支承箇所から変形前の 1 階大梁内における回転中心までの水平長さであり、ブレース剛性に依存しないと仮定し、ブレース配置を決めることで得られる計算値を用いる。ハの字型にブレースを設置した時の L_{eq} は、状態 R 解析の結果を用いて式(18)のように算出できる。

$$L_{eq,k} = \frac{\Delta\delta_{vtR,k}}{\theta_{gR,j}} = \frac{\Delta\delta_{vtR,k}}{R_{R,1}} \quad (18)$$

α_{es} や θ_g はスパンごと、 L_{eq} や $\Delta\delta_{vt}$ は支承ごとに算出され、引張側と圧縮側で、 j と k の対応が異なる。 k 番目の免震支承において、図 9(a)のように状態 R 解析時の鉛直変形 $\Delta\delta_{vtR}$ が正または 0 のとき、すなわち引張側のときは $j = k$ となり、図 9(b)のように $\Delta\delta_{vtR}$ が負のとき、すなわち圧縮側のときは $j = k - 1$ となるように対応させる（式(19)）。

$$j = \begin{cases} k & (\Delta\delta_{vtR,k} \geq 0 \text{ となる } k: \text{引張側の免震支承}) \\ k-1 & (\Delta\delta_{vtR,k} < 0 \text{ となる } k: \text{圧縮側の免震支承}) \end{cases} \quad (19)$$

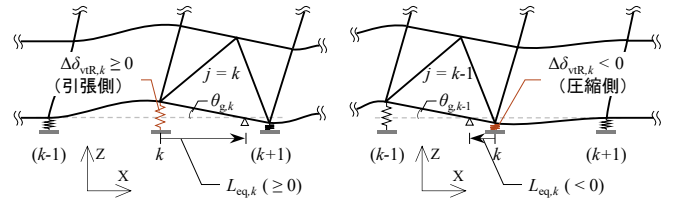


図 9 j と k の対応関係

以上より、式(15)～(19)を用いて、 R_1 と変動面圧 $\Delta\sigma_{vt}$ の関係が、式(20)のように定式化できる。

$$\Delta\sigma_{vt,k} = \Delta\delta_{vt,k} \frac{K_{vc,k}}{A_{H,k}} = (1 - \alpha_{es,1j}) L_{eq,k} \frac{K_{vc,k}}{A_{H,k}} R_1 \quad (20)$$

長期軸力に対する上下地震動時に生じる変動軸力の比率 C_v を上下方向の静的震度として考慮すると、変動面圧 $\Delta\sigma_{vt}$ から水平地震時の面圧 σ_{vt} を求める際には、式(21)のように表せる。

$$\sigma_{vt,k} = (1 - C_v)\sigma_{0,k} + (1 - \alpha_{es,1j}) L_{eq,k} \frac{K_{vc,k}}{A_{H,k}} R_1 \quad (21)$$

式(21)の α_{es} を左辺に移項することで、ある層間変形時に引抜きが生じる第 1 層の実効変形比 $\alpha_{es,u1}$ が式(22)のように表せる。 $\alpha_{es,u1}$ が引抜きを生じさせないための、第 1 層の実効変形比の下限値となる（図 10）。

$$\alpha_{es,u1} = 1 + \frac{(1 - C_v)\sigma_{0,k}}{L_{eq,k} R_1} \cdot \frac{A_{H,k}}{K_{vc,k}} \quad (22)$$

$\alpha_{es,1} > \alpha_{es,u1}$ であれば引抜きが発生しない。

また、図 10 中の●印以内の変形では、長期荷重による沈み込み量に変動軸力による $\Delta\delta_{vt}$ を上回るため、引抜きの影響が無視できる。

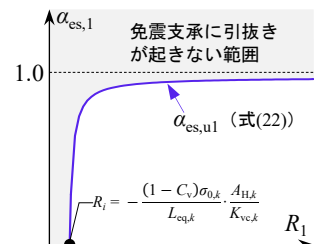


図 10 α_{es} に基づく引抜きの判定

3. 降伏、座屈および引抜きを考慮した設計可能 α_{es} の範囲

第2章では、実効変形比に基づいたブレース降伏の判定(式(11))、ブレース全体座屈の判定(式(13))、免震支承の引抜き判定(式(22))の手法を定式化した。設計時には目標クライテリア内で、ブレースの降伏・座屈、支承の引抜きが発生しないブレース配置を選択することが必要条件である。式(11),(13),(22)より、 $\alpha_{es,dyij}$ 、 $\alpha_{es,dcirj}$ および $\alpha_{es,ul}$ は、図11のように i_d や L_{eq} に応じて R との関係を図示することができる。なお、同図はその2で例題建物として採用した大型物流倉庫を想定し、スパン $L_s = 1000$ cm、階高 $H = 700$ cm と仮定し、使用するブレース鋼材はBCR295 ($\sigma_y = 29.5$ kN/cm²) を想定している。

式(11)から明らかのように、 $\alpha_{es,dy}$ (灰色線) はブレース配置や本数に依存せずに σ_y や θ などの情報のみで R との関係が導出できる。本例では配置によらず、 $1/333$ rad.程度以内の変形であれば、 $\alpha_{es,dy} > 1.0$ となるため、ブレースが降伏することは考えにくい。 $\alpha_{es,dcr}$ (黒破線) は i_d に依存しており、 i_d が大きいほど座屈の生じない $\alpha_{es,dcr}$ は大きくなる。したがって、 α_{es} が大きく座屈が生じやすいブレース配置・剛性を選択した場合は、目標クライテリアに応じて i_d を大きくすることで座屈を避けることができる。 $\alpha_{es,ul}$ (青線) の算出には、 $\phi 800$ のHDRを想定し、 $A_H = 5023$ kN/cm、 $K_{vc} = 35100$ kN/cm、長期荷重時の面圧 $\sigma_0 = -7.0$ N/mm² を代入し、上下方向の地震動を $0.3G$ ($C_v = 0.3$) として考慮している。 L_{eq} が小さいほど $\alpha_{es,ul}$ が小さいため、 α_{es} の取り得る範囲が広い。このように、 L_{eq} に応じて設計可能な α_{es} の範囲が異なり、特に小変形領域での差が顕著である。

また、本例では、 $1/333$ rad.程度を境に、 $1/333$ rad.程度以上の変形では $\alpha_{es,ul} > \alpha_{es,dy}$ となり、設計可能な α_{es} が存在しないことが図から読み取れる。これは、 $1/333$ rad.程度以上の変形では降伏あるいは引抜きのいずれかが生じることを意味しており、設計時にはクライテリア変形角を小さくするか、 σ_y 、免震支承、 H や θ などを変更するなどの対応が必要となる。一方、クライテリアを $1/333$ rad.以内に設定すると、ブレース降伏の影響は無視できる。したがって、 $R < 1/333$ rad.の範囲では、 $\alpha_{es} > \alpha_{es,ul}$ を満たすブレース剛性を選択し、 $\alpha_{es} < \alpha_{es,dcr}$ を満たす i_d を選択すれば設計可能と判定できる。このように、設計可能な α_{es} の有無に基づいて、目標クライテリアを調節できるのも本手法の利点である。

4. まとめ

本報その1では、ブレースの降伏と全体座屈、および免震支承の引抜きを実効変形比に基づいて判定する手法

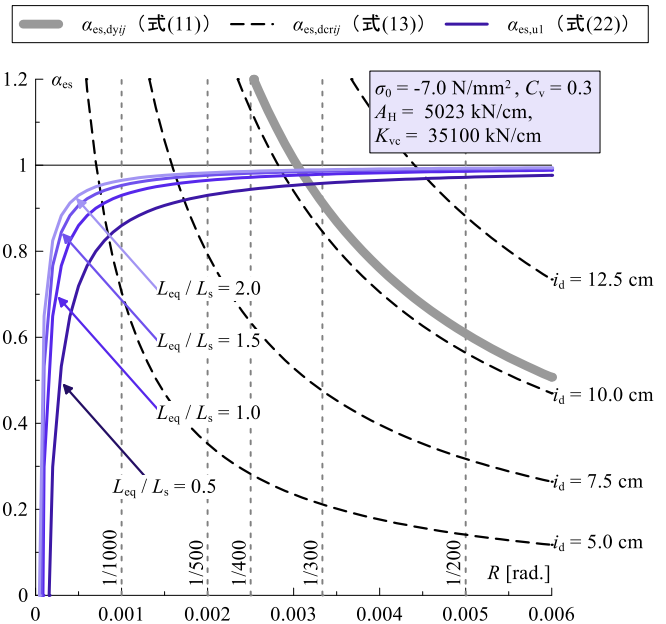


図11 α_{es} に基づく降伏・座屈および引抜きの評価
($E = 20500$ kN/cm², $\sigma_y = 29.5$ kN/cm²(BCR295),
 $L_s = 1000$ cm, $H_i = 700$ cm)

を定式化し、目標クライテリアとの関係例を提示した。本報その2では、設計フローの提案、および設計例を示す。

謝辞

本報告は、JFE シビル株式会社、JFE スチール株式会社、東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川理, 原田幸博: 鉄骨造免震建築物における座屈拘束ブレースの集中配置の有効性, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.52, pp.959-964, 2016.10
- 2) 石井正人, 北村春幸, 他 2 名: 粘弾性型制振部材付架橋のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.65, No.531, pp.55-62, 2000.3
- 3) 新井雄大, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介: ブレースを有する中低層免震建物における免震支承の引抜き判定手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.806, 2023.4 (掲載予定)
- 4) 笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, No.605, pp.37-46, 2006.7
- 5) 石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1
- 6) 新井雄大, 佐藤大樹, 他 5 名: 免震物流倉庫の地震応答に関する検討 その 3 異なる剛性・配置のブレースを有する上部構造の骨組特性値の比較, 日本建築学会関東支部研究発表会, pp.349-352, 2022.3
- 7) 笠井和彦, シムアンパン・サラン, 松田和浩: 免震建物の上部構造周期を考慮した免震性能曲線の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.720, pp.239-249, 2016.2
- 8) Zhengle CHEN, Daiki SATO: Design for isolated building considering stiffness distribution for inhomogeneous mass, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure-II, pp.569-570, 2021.9

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D.

*4 JFE シビル株式会社

*5 JFE スチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology^{*1}

Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng^{*2}

Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.^{*3}

JFE Civil Engineering & Construction Corporation^{*4}

JFE Steel Corporation^{*5}