

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	剛性の高さ方向分布が不均一な中低層鋼構造建物におけるエネルギー法による累積損傷分布予測
Title(English)	PREDICTION OF CUMULATIVE DAMAGE DISTRIBUTION BY ENERGY-BASED METHOD IN LOW- AND MIDDLE-RISE STEEL STRUCTURES WITH UNEVEN DISTRIBUTION OF STIFFNESS IN HEIGHT DIRECTION
著者(和文)	中村一哉, 佐藤大樹, 松田頼征, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 山口慎吾, 綿貫雄太
Authors(English)	Kazuya Nakamura, Daiki Sato, Yoriyuki MATSUDA, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA, Shingo YAMAGUCHI, Yuta WATANUKI
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 64B, , pp. 243-252
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 64B, , pp. 243-252
発行日 / Pub. date	2018, 3
権利情報	日本建築学会

剛性の高さ方向分布が不均一な中低層鋼構造建物における エネルギー法による累積損傷分布予測

PREDICTION OF CUMULATIVE DAMAGE DISTRIBUTION BY ENERGY-BASED METHOD IN LOW- AND MIDDLE-RISE STEEL STRUCTURES WITH UNEVEN DISTRIBUTION OF STIFFNESS IN HEIGHT DIRECTION

中村 一哉^{*1}, 佐藤 大樹^{*2}, 松田 頼征^{*3}, 北村 春幸^{*4}
山口 路夫^{*5}, 脇田 直弥^{*6}, 山口 慎吾^{*6}, 綿貫 雄太^{*6}

*Kazuya NAKAMURA, Daiki SATO, Yoriyuki MATSUDA, Haruyuki KITAMURA,
Michio YAMAGUCHI, Naoya WAKITA, Shingo YAMAGUCHI and Yuta WATANUKI*

In recent years, demand for large logistics facilities is rising under the influence of expansion of retail chain development and online market. Most of these facilities are low- and middle-rise steel structures, and it is vital that these structures are earthquake resistant. An energy-based method for earthquake-induced response of a building is very useful for the evaluation of the cumulative damage of structures. However, this method is not applied to structures with uneven stiffness distribution in the height direction like large logistics facilities.

In this paper, we analyze whether this method can be expanded to such structures by comparing cumulative damage distribution predicted using this method and calculated by time-history analysis. Moreover, the effect of difference in strength calculation on cumulative damage distribution prediction is examined.

Keywords : *Steel Structure, Stiffness Distribution, Energy-based method, Cumulative Damage Distribution, Strength Calculation*

鋼構造建物, 剛性分布, エネルギー法, 累積損傷分布, 耐力算定法

1. はじめに

構造物の耐震性を合理的かつ的確に評価できる手法¹⁾として、エネルギーの釣合に基づく応答評価法²⁾(以後、エネルギー法)があり、従来の許容応力度や保有耐力による評価ではなく、地震によるエネルギー入力と建物の有するエネルギー吸収能力の対比により評価する。そのため早期に降伏してエネルギー吸収を行う部材の設計にも適しており、時刻歴応答解析を用いることなく制振・免震構造物を設計することができる。また、エネルギー法は2005年に告示化され、通常の耐震構造物と同様に大臣認定が不要となり、申請期間や手間を軽減することができるため非常に有用な設計法・評価法であるといえる³⁾。

エネルギー法は等価せん断モデルで提唱されており、また主架構の高さ方向の層剛性の分布が均一という仮定条件がある。しかし、例えば近年需要の高まっている大型物流施設は、各階の積載荷重や階高が不規則となることで高さ方向の層質量と層剛性が不均一となるケースも存在する。その場合、従来のエネルギー法における仮定条件と異なるため適用性は不明確であり、エネルギー法の更なる実設計への適用を促すため知見の充実が望まれる。

実施・研究例が少ない中^{4),5)}、脇田ら³⁾はエネルギー法を用いて4階建物流施設を制振構造建物として設計し、耐震性能の向上や申請期間の短縮を実現したが、高さ方向の層剛性は均一な建物を対象としている。渋谷ら⁶⁾は物流施設を想定した高さ方向の層剛性が不均一な建物の損傷分布について、エネルギー法と時刻歴応答解析により検討を行った。そこでは特定の層の質量、剛性、耐力をパラメータとし、エネルギー法を扱う際の耐力算定法の重要性を示したが、特定の1つの層の不均一さしか考慮されていない。文献7)においては高さ方向の層剛性が不均一な制振構造建物を用いて、エネルギー法によるダンパーの損傷配分式の拡張について示されているが、高さ方向の層剛性が不均一な耐震構造建物における累積損傷分布をエネルギー法で捉えられるかという研究は行われていない。

以上のように、エネルギー法は部材レベルでの累積損傷評価が未整備であり、高さ方向の層剛性の分布が不均一な建物への適用性が不明確である。本論文の目的は、累積損傷評価に大きく影響を与える建物の耐力を4つの算定法で算出し、各算定法での累積損傷評価と時刻歴応答解析による累積損傷を比較してそれぞれの妥当性を検討することである。

*1 東京工業大学大学院環境・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 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*4 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

*5 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 博士(工学)

*6 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 修士(工学)

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD., Dr. Eng

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., LTD., M. Eng

2. 入力地震動および検討対象建物概要

2.1 入力地震動の概要

本節では、時刻歴応答解析に用いる入力地震動について述べる。入力地震動には、コーナー周期 $T_c = 0.64$ s 以降で擬似速度応答スペクトル ${}_p S_V = 1.0$ m/s ($h = 0.05$) となる模擬波 2 波を用いる。位相特性は、海溝型地震に分類される 1968 年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分と、直下型地震に分類される 1995 年の兵庫県南部地震における JMA KOBE NS 成分を採用する。以後、この模擬波を ART HACHI, ART KOBE と呼ぶ。図 1 に入力地震動の加速度の時刻歴波形、図 2 に擬似速度応答スペクトル ${}_p S_V$ およびエネルギースペクトル V_E (固有周期 $T = 0 \sim 3$ s) を示す。図 1 中には最大加速度 A_{CCmax} も併せて示す。

2.2 検討対象建物の概要

検討対象建物には、物流施設を想定した 5 階建て鋼構造建物を用いる。図 3 に軸組図、図 4 に基準階伏図を示す。階高は 1 階 7.5 m, 2~5 階 6.5 m を基準に、高さ方向に剛性が不均一な建物とするため、図 3 に示すように 1 つないし 2 つの階高を 4.0 m とする。各階の固定荷重および積載荷重は、表 1 に示すように階高ごとに異なる。表 2 に部材断面一覧、表 3 に建物全重量 W と 1 次固有周期 ${}_1 T_1$ を示す。柱および大梁の鋼材種にはそれぞれ BCP325, SN490 を使用する。床スラブによる合成効果は、梁の曲げ剛性のみを考慮し、剛性増大率 ϕ を片側、両側共に 1.5 とする。構造減衰は各モデルの 1 次固有周期に対して減衰定数 $h = 0.02$ となる初期剛性比例型とする。各階には剛床を仮定し、X 方向について検討する。各モデルの呼称は、各階の剛性が概ね均一なモデルとして L0 モデル、高さ方向に剛性が不均一な建物を想定したモデルを階高の低い階からそれぞれ L1, L3, L13, L35 モデルとする。図 5 に第 i 層の層質量 m_i と層剛性 ${}_i k_i$ の高さ方向分布を示す。層質量 m_i は階高の低い層の直下で他層の半分程度となっている。層剛性 ${}_i k_i$ では、L0 モデルの剛性が高さ方向で概ね均一となっており、他のモデルは階高を低くした層の剛性が上下層と比べ 2 ~ 4 倍と極端に高くなっている。

表 1 固定荷重および積載荷重

用途(階高)	固定 (N/m ²)	積載 (N/m ²)
屋上	5500	3000
倉庫(6.5m)	4800	4000
倉庫(4.0m)	3000	2000

表 2 部材断面一覧

柱	□-500×500×19 ~□-600×600×32
大梁	H-588×300×12×20 ~HY-750×350×14×28

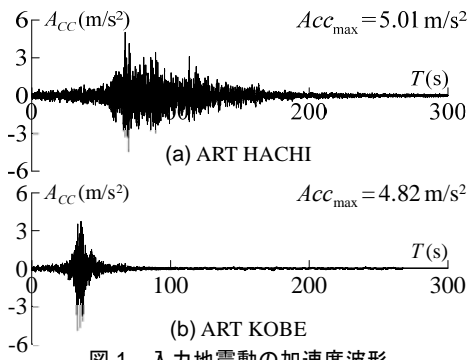


図 1 入力地震動の加速度波形

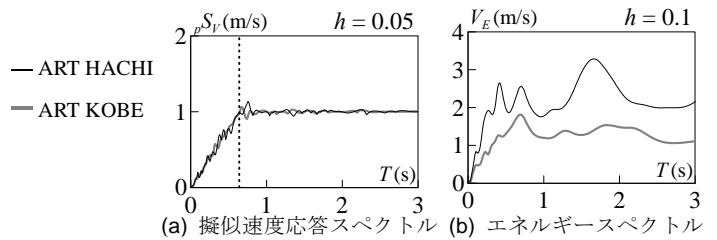


図 2 擬似速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトル

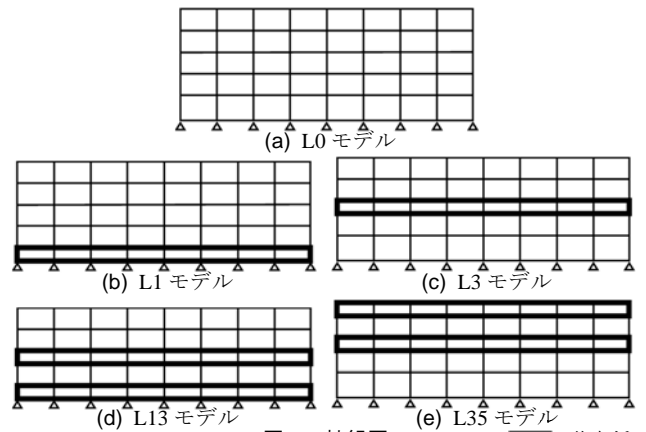


図 3 軸組図

表 3 全重量 W と 1 次固有周期 ${}_1 T_1$

	W (kN)	${}_1 T_1$ (s)
L0	143358	2.01
L1	143053	1.74
L3	131417	1.81
L13	131112	1.53
L35	119469	1.67

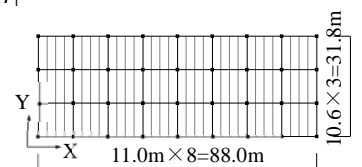


図 4 基準階伏図

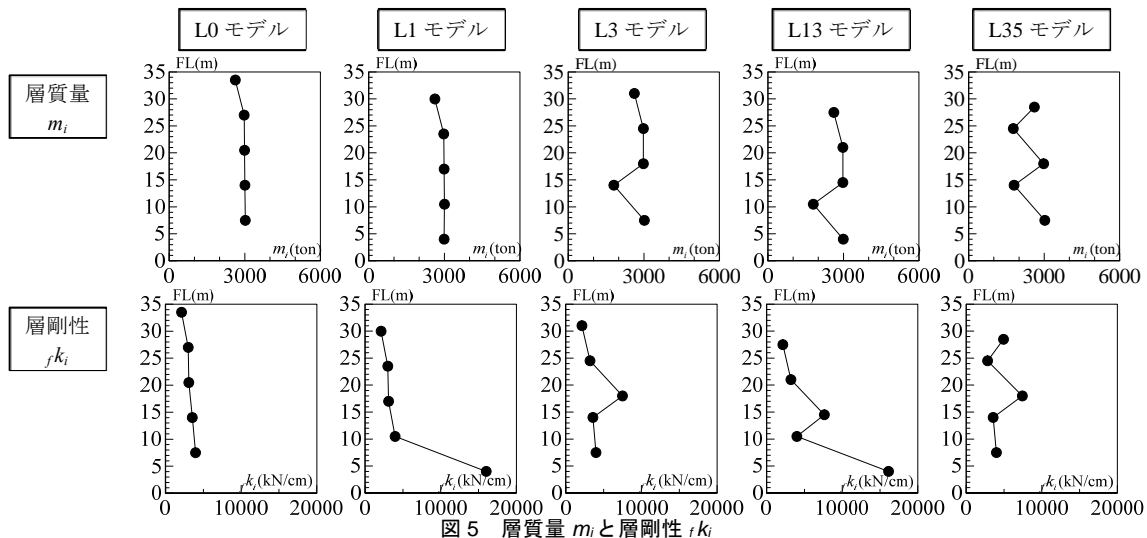


図 5 層質量 m_i と層剛性 ${}_i k_i$

3. 地震応答性状

本章では、各最大応答値と累積損傷分布より検討を行う。

3.1 最大応答の検討

第 i 層における絶対加速度、層せん断力、層間変形の最大値を A_{CCmaxi} , fQ_{maxi} , δ_{maxi} としこれらを図 6 に示す。 A_{CCmaxi} は床の重心位置における絶対加速度、 fQ_{maxi} は第 i 層の柱に生じるせん断力の和、 δ_{maxi} はその下階との床の重心位置の層変位差を示す。図 6 より、 A_{CCmaxi} はいずれの建物モデルにおいても下層より上層の方が大きい傾向にあり、最上階で最も大きい。本検討結果において、モデルの違いによる A_{CCmaxi} の大きな違いは確認できない。 fQ_{maxi} はいずれの建物モデルにおいても下層より上層の方が小さく、建物モデルの特性による影響が少なく高さ方向に概ね線形な分布となっている。 δ_{maxi} は L0 モデルにおいて高さ方向分布が概ね線形となった一方で、他のモデルでは高さ方向に不均一となっている。また、層剛性が高い層ほど小さい値を示している。

3.2 層剛性分布と累積損傷分布との関係

本節では層の損傷配分方法を 3 通り示し、層剛性分布との関係を検討する。図 7 に梁の歪エネルギーの配分方法を示す。(a) に上下の梁の歪エネルギーを 1/2 ずつ配分し層の累積損傷とする方法、(b) に直上の梁の歪エネルギーを層の累積損傷とする方法の概略図を示す。また、図には示さないが、(c) として層せん断力 - 層間変形図の履歴曲線で囲まれた面積を層の累積損傷とする方法を検討する。図 6 に各モデルにおける ART HACHI による累積損傷の高さ方向分布

fW_{pi}/fW_p を示し、凡例のように(a) ~ (c) の 3 通りの損傷配分方法を比較する。ここに、 fW_{pi} : 第 i 層の塑性歪エネルギー、 fW_p : 全層の塑性歪エネルギーである。いずれのモデルを見ても、第 4, 5 層の損傷はほとんど見られず、下層の方に損傷が集中している。(a) の分布に着目すると、均一な剛性分布を有する L0 モデルと同様に、いずれのモデルにおいても概ね第 2 層に損傷が集中している。第 1 層の階高を低くした L1, L13 モデルでは第 1 層の損傷はほとんど見られないが、第 3 層の階高を低くした L3, L13, L35 モデルでは第 3 層での損傷が確認できる。(b) の分布に着目すると、L0 モデルの下層ほど損傷が集中するような分布を基準として、それぞれのモデルで層剛性の高い層の損傷がほとんど見られない分布となっている。つまり(b) は(a) よりも建物の構造特性を反映しているといえる。(c) の分布に着目すると、先ほどの 2 通りの分布の間に位置しており、1/2 ずつ配分する方法の分布と同じような概形を示している。なお、ART KOBE でも同様の結果となった。

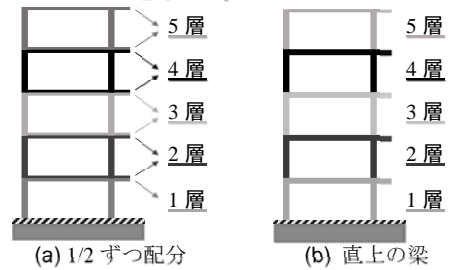


図 7 梁の歪エネルギーの配分方法

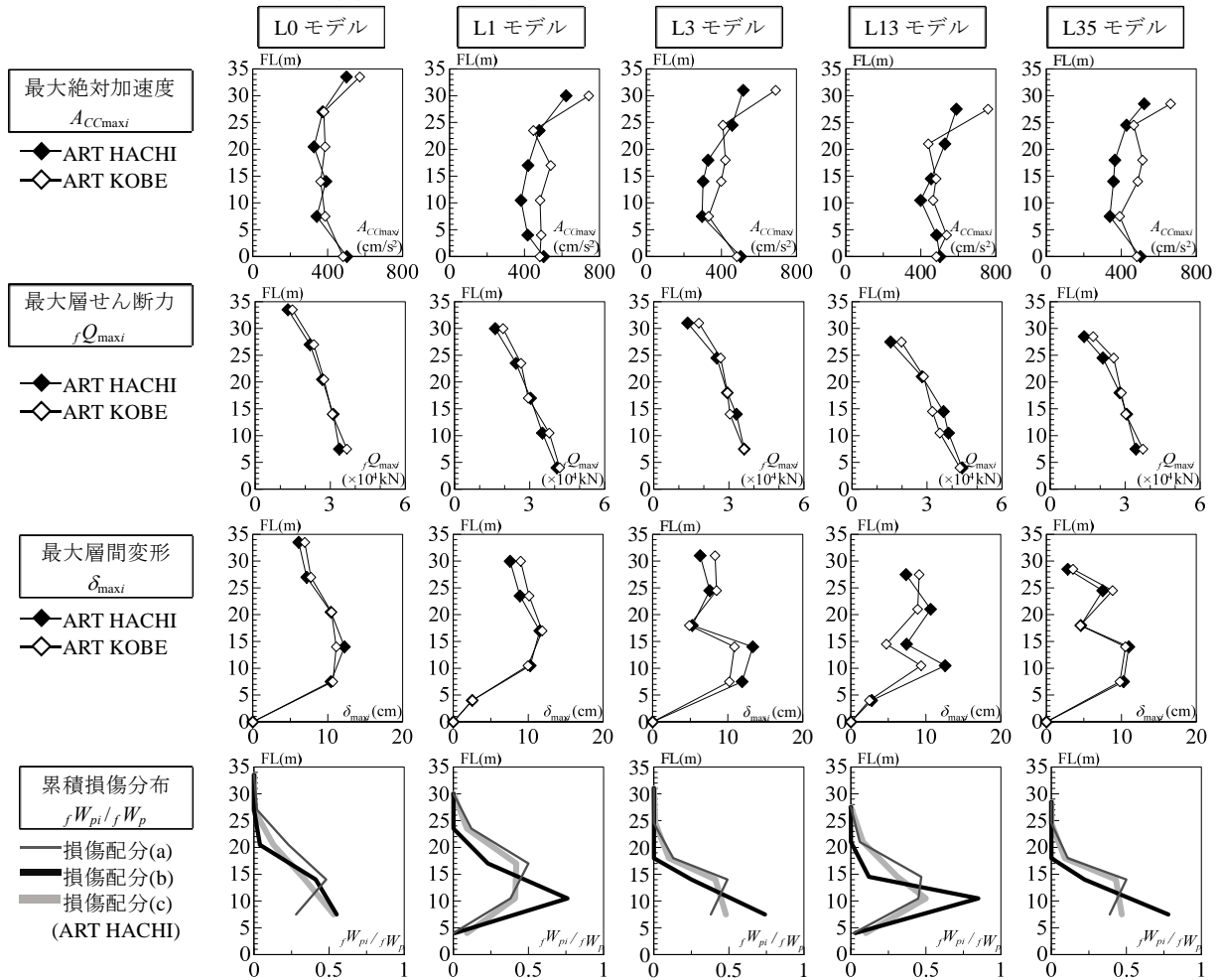


図 6 各最大応答値と累積損傷分布

4. エネルギー法および耐力算定法の概要

エネルギー法による損傷分布予測は耐力分布の影響を大きく受ける。本章では、エネルギー法の概要と、そこで用いる耐力の算定法を4通り示す。

4.1 耐震構造におけるエネルギー法の概要²⁾

耐震構造における第*i*層の損傷分布は式(1)で提案されている。

$$\frac{f W_{pi}}{f W_p} = \frac{s_i \cdot p_i^{-n}}{\sum_{j=1}^N s_j \cdot p_j^{-n}} \quad (1)$$

式(1)中の s_i, p_i は式(2), (3)で表される。

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{f k_1}{f k_i} \right) \quad (2)$$

$$p_i = \frac{f \alpha_{yi} / f \alpha_{y1}}{\alpha_i} \quad (3)$$

$$f \alpha_{yi} = \frac{f Q_{yi}}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot g} \quad (4)$$

ここに、 p_i : 理想的なせん断力分布とのずれ、 s_i : 弾性振動エネルギー分布、 N : 全層数、 M : 全層の質量、 $\bar{\alpha}_i$: 最適降伏層せん断力係数、 $f \alpha_{yi}$: 降伏層せん断力係数、 $f Q_{yi}$: 降伏層せん断力(耐力)である。損傷集中指数 n は構造形式により異なり、式(5)の値が提案されている。

- $n = 12$: 柱降伏型、筋違構造
- $n = 8$: 梁降伏型構造
- $n = 4$: 連層耐震壁付き架構

これを基に告示、制定されたエネルギーの釣合に基づく耐震計算法については、附録Aを参照されたい。式(1)は、 $p_i < 1.0$ となる相対的に強度の低い層に損傷が集中し、 $p_i > 1.0$ となる相対的に強度の高い層は損傷を受けないように評価できる式とされている。また n が大きいほど強度の低い層への損傷が集中する割合が極端に大きくなる。

4.2 耐力算定法の概要

以下に式(4)における $f Q_{yi}$ の算定法を4通り示す。

4.2.1 A_i 分布を用いた増分法による耐力の算定

静的増分解析による耐力算定法(以後、増分法)について以下に示す。外力は告示式による1次固有周期を用いた A_i 分布に従い²⁾、いずれかの層間変形角が1/25となるまで加力を行う。図8に完全弾塑性型の復元力特性への置換方法を示す。静的増分解析から得られる各層の履歴曲線の面積と、終局変形 $f \delta_{ui}$ 時の履歴面積が等しくなる ($S_1 = S_2$) 完全弾塑性型に置換し、第*i*層における降伏耐力 $f Q_{yi}$ および降伏層間変形 $f \delta_{yi}$ を算定する。以下に算定式を示す。

$$f \delta_{yi} = f \delta_{ui} - \sqrt{f \delta_{ui}^2 - \frac{2W_i'}{f k_i}} \quad (6)$$

$$f Q_{yi} = f k_i \cdot f \delta_{yi} \quad (7)$$

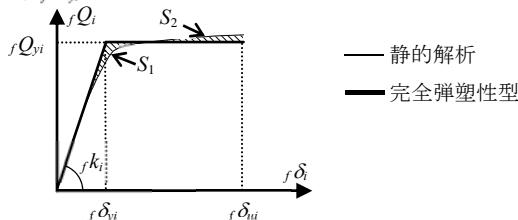


図8 完全弾塑性型の復元力特性への置換方法

ここに、 $f \delta_{yi}$: 主架構の降伏層間変形、 $f \delta_{ui}$: 主架構の終局層間変形、 $f k_i$: 主架構の弾性時における層剛性、 W_i' : 静的増分解析結果の履歴曲線の面積である。

4.2.2 時刻歴応答解析結果に基づくせん断力分布を用いた増分法による耐力の算定

4.2.1項では外力分布を A_i 分布としていたが、高さ方向の層剛性が不均一な建物においては外力分布も不均一となる場合が考えられる。そこで本論文では、外力分布を時刻歴応答解析結果に基づくせん断力分布としたことによる影響も確認する。2つの入力地震動による時刻歴応答解析の結果からせん断力分布を算出し、それを外力分布としてそれぞれ静的増分解析を行い、耐力分布を算定する。

4.2.3 節点振り分け法による耐力の算定⁸⁾

本節では略算法として知られる節点振り分け法(以後、節点法)について述べる。各節点で、柱材端部あるいは左右の梁材端部のどちらかに形成される塑性ヒンジから、柱材端部の全塑性モーメントを決定する。柱梁接合部の左右の梁材端部に塑性ヒンジが形成される場合には、両梁端における全塑性モーメントの和を上下柱端に1/2ずつ分割する。柱の全塑性モーメントから、その柱の降伏耐力を算定する。各階における柱の降伏耐力の総和が各層の降伏耐力となる。降伏層間変形 $f \delta_{yi}$ は、ここで求めた降伏耐力 $f Q_{yi}$ と静的増分解析から得た主架構の層剛性 $f k_i$ を用いて、式(7)から算定する。

4.2.4 層モーメント法による耐力の算定^{8)・10)}

節点振り分け法によって求めた保有水平耐力の分布は、必要な層せん断力分布とはかなり異なる場合が多いという欠点がある。この欠点を補うため、与えられた層せん断力分布に近似するように節点ごとではなく層全体として曲げモーメントを分割するのが層モーメント法である。外力分布は告示式による1次固有周期を用いた A_i 分布に従い、各層の A_i と第1層の層せん断力で基準化した層せん断力 $\alpha_i A_i$ を求める。それらを用いて、層モーメントを分配する際に用いる係数 ρ_i を式(8)で求める。

$$\rho_i = \frac{\alpha_{i+1} A_{i+1}}{\alpha_{i+1} A_{i+1} + \alpha_i A_i} \quad (8)$$

図9のようにモーメントを定義すると、以下が成り立つ。

$$M_{\text{下}} = \rho_{i-1} \cdot M_{Fi-1} \quad (9)$$

$$M_{\text{脚}} = \rho (M_{\text{上}} + M_{\text{下}} + M_{Fi}) - M_{\text{上}} \quad (10)$$

$$M_{\text{頭}} = M_{Fi} - M_{\text{脚}} \quad (11)$$

以上の計算を各層で行い、すべての層モーメントを分割する。なお、保有水平耐力は層の上下に分配された層モーメントの和を階高で除して求める。

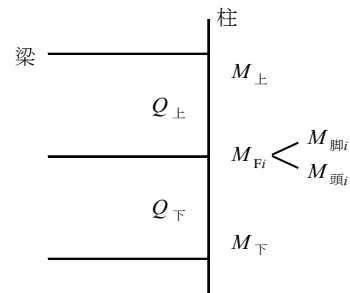


図9 層モーメントの上下層への分配

5. エネルギー法による累積損傷分布予測の対応の評価

本章では耐力算定法の違いがエネルギー法による累積損傷分布予測に及ぼす影響を検討し、3通りの累積損傷分布と比較する。

5.1 層剛性分布と耐力算定法との関係

図10の1段目に各モデルの耐力分布を示す。図10の1段目より、増分法における A_i 分布と時刻歴応答解析結果に基づくせん断力分布の違いが、耐力分布へ与える影響はほとんど見られないことが確認できる。以下、増分法は A_i 分布での結果を用いる。

増分法と節点法では異なる耐力分布が得られた。増分法ではいずれのモデルでも同じような分布形状となっており、L0モデルでは増分法と節点法の差が比較的小さい。他のモデルでは、増分法では高さ方向に概ね均一な分布となっているが、節点法では不均一な分布となっており、階高を低くして層剛性が高くなっている層の耐力が他の層より極端に大きくなっている。節点法による耐力の不均一な分布は、図5の層剛性 k_i の分布と概ね同様の概形を成している。

層モーメント法による耐力分布は増分法による分布よりも高さ方向に不均一な分布となっている。わずかがだが層モーメント法による分布の方が節点法による分布よりも均一であり、曲げモーメントを必要保有層せん断力に近似させるように分割した影響が見られる。

5.2 耐力算定法が累積損傷分布予測に与える影響

架構は梁崩壊型であるため式(5)より損傷集中指数 n は8とする。他の n については付録Bを参照されたい。式(1)より累積損傷分布は

s_i, p_i による影響を受けることから、図10の2~4段目に5つのモデルにおける s_i 分布(式(2))、 p_i 分布(式(3))、累積損傷分布(式(1))をそれぞれ示し、耐力算定法の違いによる影響を検討する。

s_i 分布についてはいずれの耐力算定法でも同じ分布が得られた。式(2)を見ても s_i は層質量 m_i と層剛性 k_i の影響を受けるのみで、耐力には依存しないことがわかる。特徴として階高が低く層剛性が他の層より高い層では s_i は小さく、エネルギー吸収量が小さい。増分法における p_i 分布はいずれのモデルにおいても、外力分布に依らず概ね1.0程度となっており、損傷集中が大きく生じない評価となっている。一方、節点法と層モーメント法における p_i 分布は高さ方向に不均一である。階高の低い層の p_i は相対的に大きく、その他の層に損傷が集中する評価となっている。

累積損傷分布予測については、いずれのモデルにおいても増分法では異なる外力分布でも大きな差は見られないが、増分法と節点法、層モーメント法で大きく異なる結果が得られた。増分法では特定の層に損傷が大きく集中しないような分布となっているが、節点法ではいずれのモデルにおいても第2層の損傷集中が極端に大きく、階高を低くした階の損傷集中は見られない。層モーメント法では第1層の階高が低くなければ第1層に、低ければその他の低くない層に損傷が集中するような結果となった。以上から、累積損傷分布予測においては増分法よりも節点法や層モーメント法で耐力を求めた方が建物の構造特性を反映する。

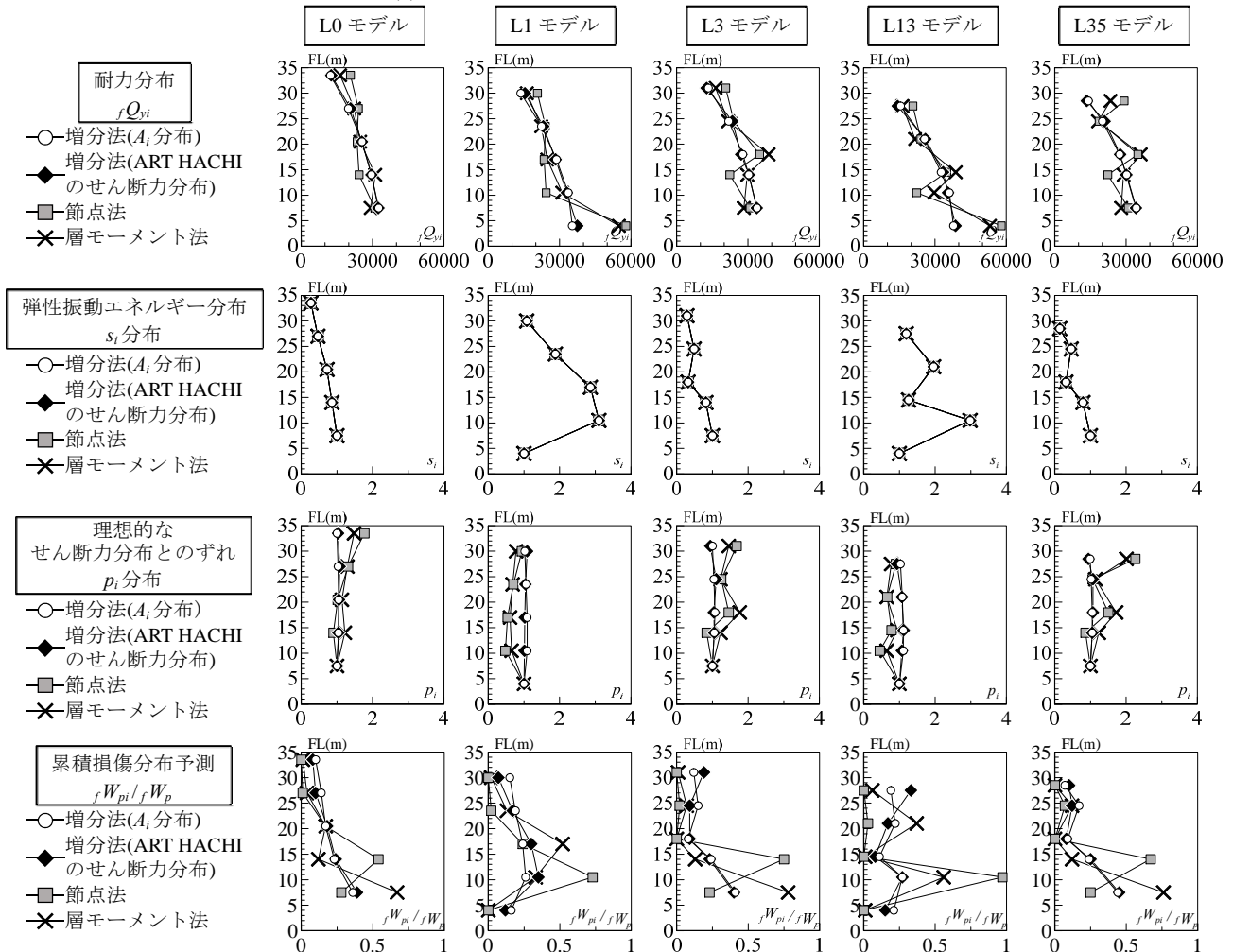


図10 耐力分布と累積損傷分布予測

5.3 時刻歴応答解析との比較

本節では、3.2 節で時刻歴応答解析により求めた 3 つの累積損傷分布と、5.1 節で求めた 4 つの累積損傷分布予測を比較する。時刻歴応答解析による累積損傷分布は ART HACHI による結果を示す。ART KOBE の結果については附録 C を参照されたい。図 11、12 に各耐力算定法による累積損傷分布の予測と時刻歴応答解析の比較を、表 4~7 にそれらの評価結果を示す。

図 11(a)と表 4 より、外力分布を A_i 分布とした増分法による損傷分布予測では、いずれの建物モデル・損傷配分方法においても時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていない。時刻歴応答解析による損傷集中層で損傷分布予測の方が損傷を小さく予測しているので危険側の評価となり、良い対応を示しているとは言えない。

図 11(b)と表 5 より、外力分布に ART HACHI によるせん断力分布を用いても、損傷分布予測の概形は A_i 分布とほぼ変わらず、いずれの組み合わせにおいても良い対応を示しているとは言えない。

図 12(a)と表 6 より、耐力算定法に節点法を用いると、損傷分布予測はいずれの建物モデルにおいても第 2 層に損傷が集中する分布となっている。時刻歴応答解析による損傷分布と比較すると、L0, L3, L35 モデルにおいては損傷配分(a)と非常に良い対応を示した。損傷集中層である第 2 層の損傷を時刻歴応答解析よりも大きく予測しており、安全側に評価している。損傷配分(b), (c)では第 1 層が損傷集中層であるが、それを捉えることはできていない。L1, L13 モデルにおいては損傷配分(b)と非常に良い対応を示した。損傷集中層である第 2 層の損傷を時刻歴応答解析よりも大きく評価しているうえに、

分布の概形まで捉えることができていない。損傷配分(a), (c)では第 2 層と第 3 層に損傷が同程度集中しているが、第 2 層の損傷を極端に大きく予測しているため第 3 層の損傷を捉えることができていない。しかしこの損傷分布予測に基づいて設計を行う場合、第 2 層での損傷に耐えられるように設計を行うため、第 3 層にある程度の損傷が集中したとしても建物の安全性は必然的に確保される。

図 12(b)と表 7 より、耐力算定法に層モーメント法を用いると、L0 モデルにおいては第 1 層に損傷が集中すると予測しており、いずれの損傷配分の損傷集中層よりも大きく予測できているため安全側の評価である。しかし第 2 層に多くの損傷が集中しているのに対して、大幅に小さく予測しているため良い対応を示しているとは言えない。L1 モデルにおいては損傷配分(a)と分布の概形まで一致し、非常に良い対応を示した。損傷配分(b)とは損傷集中層が異なるうえに大きさも予測できていない。損傷配分(c)と比較すると第 2 層の損傷を大きく予測することはできていないが、同程度の損傷が集中している第 3 層では大きく予測できている。L3, L35 モデルにおいては損傷配分(b)と非常に良い対応を示しており、損傷集中層である第 1 層の損傷を捉えられているうえに、分布の概形までほぼ一致している。損傷配分(a), (c)では第 2 層の損傷を捉えることはできていないが、第 1 層では大きく予測できている。L13 モデルにおいては第 4 層の損傷を非常に大きく予測しており、いずれの損傷配分とも一致しないが、損傷配分(a), (c)では損傷集中層である第 2 層の損傷を捉えられている。なお ART KOBE では外力分布に実際のせん断力分布を用いた増分法による損傷分布予測で、ART HACHI よりも良い対応を示した。

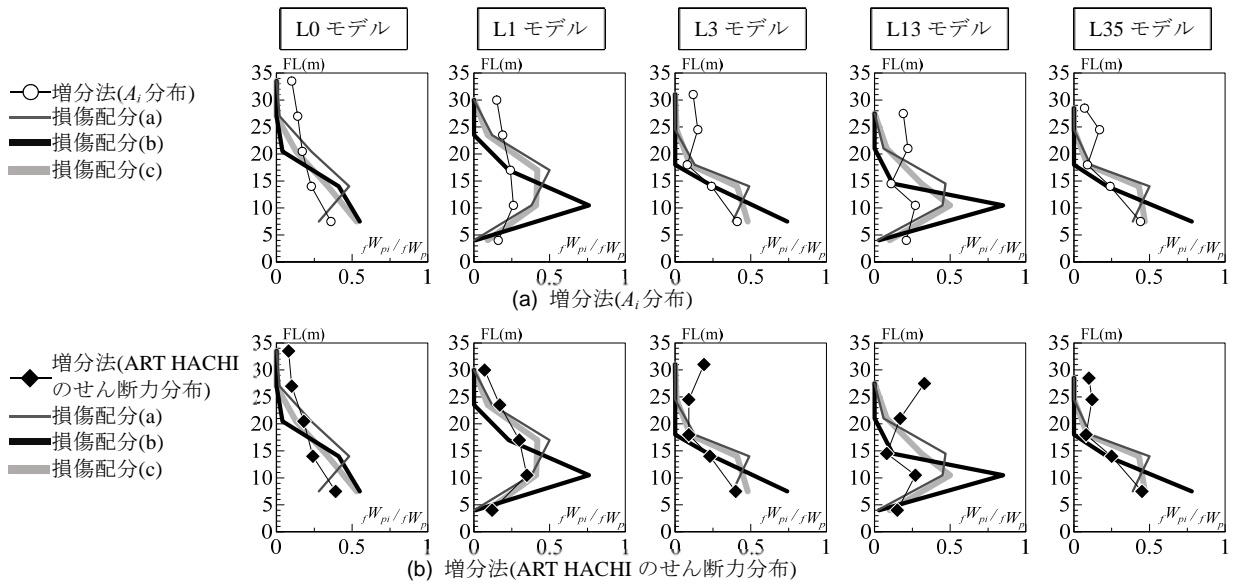


図 11 累積損傷分布の比較①

表 4 増分法(A_i 分布)による評価結果

増分法 (A_i 分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	×	×	×	×

表 5 増分法(ART HACHI のせん断力分布)による評価結果

増分法 (せん断力分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	×	×	×	×

○ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えており、分布の概形も同等
 △ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていないが、安全側に評価している
 × : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていない

6. まとめ

本論文では、高さ方向に剛性が不均一な建物に対する、エネルギー法での累積損傷分布予測の適用性について分析を行った。限られた検討ではあるが、以下に得られた知見を示す。

- (1)静的増分解析による耐力分布を用いると、外力分布を実際のせん断力分布としても建物の剛性分布に依らず同じような概形となった。節点振り分け法では建物の剛性分布の特徴が反映された。
- (2)耐力を静的増分解析で求めると損傷配分の方法に依らず、時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられないことを確認した。高さ方向に剛性が概ね均一な建物においても捉えられなかった。外力分布に実際のせん断力分布を用いてもそれは変わらなかった。
- (3)高さ方向に剛性が均一な建物の損傷集中層は、上下の梁の歪エネルギーを1/2ずつ配分し層の累積損傷とすると(損傷配分(a))、節点振り分け法を用いた損傷分布予測と良い対応を示した。
- (4)高さ方向に剛性が不均一な建物の損傷集中層は、以下の耐力算定法と損傷配分方法の組み合わせにおいて予測できた。

- ・第1層の剛性が高い場合
節点振り分け法—損傷配分(b)、層モーメント法—損傷配分(a)
 - ・他の層のみ剛性が高い場合
節点振り分け法—損傷配分(a)、層モーメント法—損傷配分(b)
- ※損傷配分(b)：直上の梁の歪エネルギーを層の累積損傷とする
- 以上からエネルギー法で累積損傷分布を検討する際には、耐力算定法や歪エネルギーの配分方法に注意する必要がある。今後は複合施設などを想定して検討を行い、更なる知見の充実を図りたい。

参考文献

- 1)独立行政法人 建築研究所：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル—平成17年度国土交通省告示第631号「エネルギーの釣合に基づく耐震計算法」に準拠して、技報堂出版、2008.9
- 2)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、1999.1
- 3)脇田直弥、松蔭和明、樋口公平、中村秀司：エネルギー法による建物の構造設計—優れた耐震性と経済性を両立した設計手法の確立—、新日鉄エンジニアリング技報、vol3,2012
- 4)北村春幸、財津和廉、馬谷原伴恵：主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価、日本建築学会構造系論文集、第599号、pp.71-78、2006.1
- 5)岩森貴寿、佐藤大樹、北村春幸、山口路夫、脇田直弥、綿貫雄太：履歴ダンパーを有する制振構造における累積損傷分布の予測精度、構造工学論文集、Vol.63B、pp.295-301、2017.3
- 6)渋谷政斗、佐藤大樹、松澤祐介、北村春幸、山口路夫、脇田直弥、松蔭和明：構造特性の高さ方向分布が不均一な中低層鋼構造建物のエネルギー配分に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集 83(I)、2013.3
- 7)渋谷政斗、佐藤大樹、佐藤利昭、北村春幸、山口路夫、脇田直弥、綿貫雄太：ダンパーの損傷配分式の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.773-774、2015.9
- 8)石山祐二：建築基準法の耐震—構造規定と構造力学(第2版)、三和書籍、2016.4
- 9)日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能、1990
- 10)井上一郎、吹田啓一郎：建築鋼構造—その理論と設計—、鹿島出版会、2007.12
- 11)中村一哉、佐藤大樹、松田頼征、北村春幸、山口路夫、脇田直弥、山口慎吾、綿貫雄太：高さ方向に剛性が不均一な鋼構造建物の耐力算定とエネルギー法の適用、日本建築学会関東支部研究報告集 85(I)、pp.269-272、2015.3
- 12)中村一哉、佐藤大樹、松田頼征、北村春幸、山口路夫、脇田直弥、山口慎吾、綿貫雄太：高さ方向の剛性分布が不均一な中低層鋼構造建物へのエネルギー法の適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.43-44、2017.8

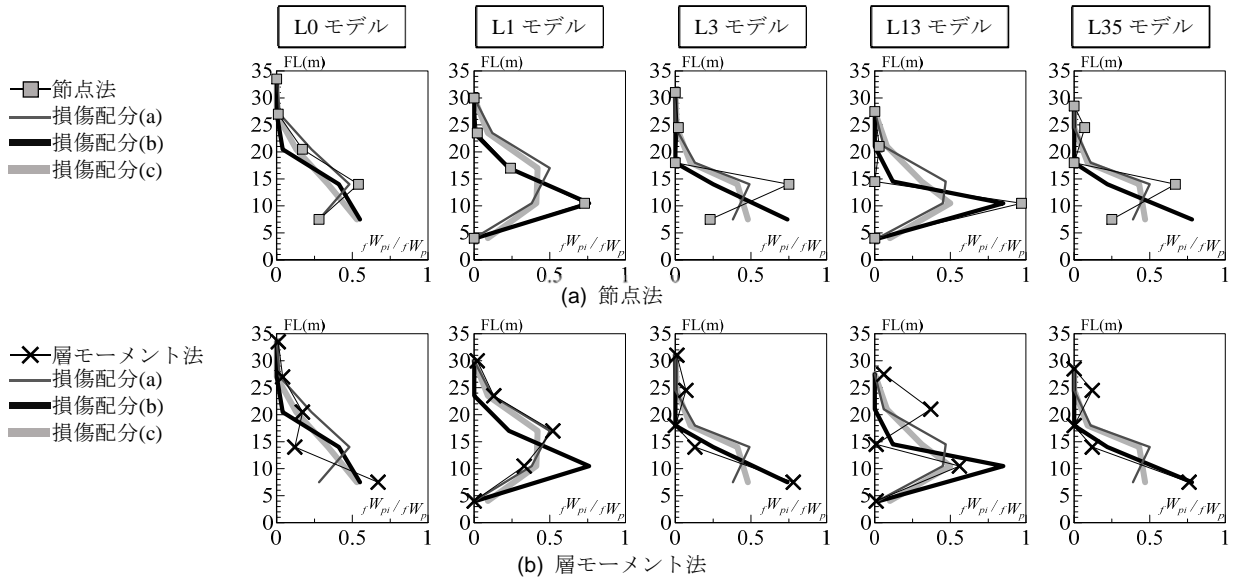


図12 累積損傷分布の比較②

表6 節点法による評価結果

節点法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	○	△	○	△	○
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	○	△	○	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	△	△	△	△	△

表7 層モーメント法による評価結果

層モーメント法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	△	○	△	△	△
損傷配分(b) (直上の層に配分)	△	×	○	×	○
損傷配分(c) (履歴ループ)	△	△	△	△	△

○：損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えており、分布の概形も同等
 △：損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていないが、安全側に評価している
 ×：損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていない

附録 A 告示式によるエネルギー法

エネルギー法における耐震構造の損傷分布の算定式として、秋山が提唱するエネルギーの釣合に基づく応答予測法を基に 2005 年に告示、制定されたエネルギーの釣合に基づく耐震計算法¹⁾(以後、告示式)の算定式を示し、秋山式との相違点について述べる。また ART HACHI による累積損傷分布と、告示式による累積損傷分布予測を比較する。告示式の損傷分布は式(b1)で表される。

$$\frac{E_{ui}}{E_s} = \frac{s_i (p_i \cdot p_u)^n}{\sum_{j=1}^N s_j (p_j \cdot p_u)^n} \quad (b1)$$

ここに、 E_{ui} : 各階の必要エネルギー吸収量($\Leftrightarrow_j W_{pi}$)、 E_s : 建物の必要エネルギー吸収量($\Leftrightarrow_j W_p$)、 s_i : 各階の必要エネルギー吸収量の比を表す基準値、 p_i : 各階の保有水平層せん断力係数の A_i 分布とのずれの程度を表す数値、 p_u : 各階の偏心による保有水平層せん断力係数の低減係数、 n : 損傷集中指数、通常、架構が梁崩壊型の全体崩壊メカニズムが形成される場合 $n=4$ 、それ以外は $n=8$ 、 N : 層数である。 s_i は式(b2)で表される。

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot A_i^2 \cdot \frac{Q_{ui} \cdot \delta_{fui}}{Q_{ui} \cdot \delta_{fui}} \quad (b2)$$

ここに、 Q_{ui} : 各層の保有水平耐力($\Leftrightarrow_j Q_{yi}$)、 δ_{fui} : 各層の降伏変位($\Leftrightarrow_j \delta_{yi}$)である。 p_i は式(b3)で表される。

$$p_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 \cdot A_i} \quad (b3)$$

ここに、 α_i : 各階の保有水平せん断係数($\Leftrightarrow_j \alpha_{yi}$)である。 α_i は式(b4)で表される。

$$\alpha_i = Q_{ui} / \sum_{j=1}^N m_j \cdot g \quad (b4)$$

ここに、 m_i : 質量、 M : 全質量、 g : 重力加速度である。 p_u は式(b5)で表される。

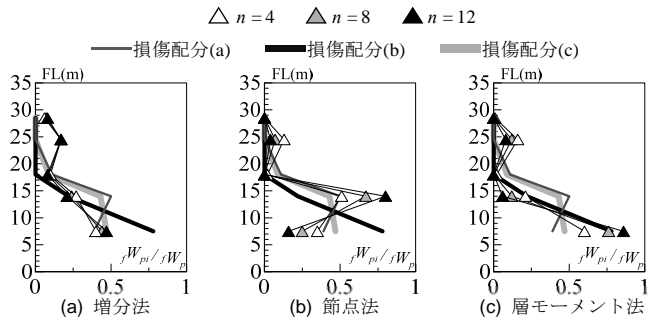
$$\left. \begin{aligned} R_{ei} \leq 0.15 & : p_u = 1 \\ 0.15 < R_{ei} < 0.3 & : p_u = 1.15 - R_{ei} \\ R_{ei} \geq 0.3 & : p_u = 0.85 \end{aligned} \right\} \quad (b5)$$

ここに、 R_{ei} : 各階の偏心率である。

附図 A1, A2 に各耐力算定法による累積損傷分布の予測と時刻歴応答解析の比較を、附表 A1~A4 にそれらの評価結果を示す。附図 A1(a), (b)と附表 A1,2 より、評価結果は秋山式と変わらず、良い対応を示しているとは言えない。附図 A2(a)と附表 A3 より、損傷配分(a)での評価は秋山式と変わらないが、損傷配分(b), (c)においては安全側に評価できないモデルが増えている。損傷集中層での損傷が、秋山式よりも告示式の方が小さいためだと考えられる。附図 A2(b)と附表 A4 より、層モーメント法で最も影響が出ており、損傷集中の度合いが秋山式より非常に小さくなっている。評価結果を見ても、いずれの損傷配分でも安全側に評価できないモデルが増えている。

附録 B 損傷集中指数 n の検討

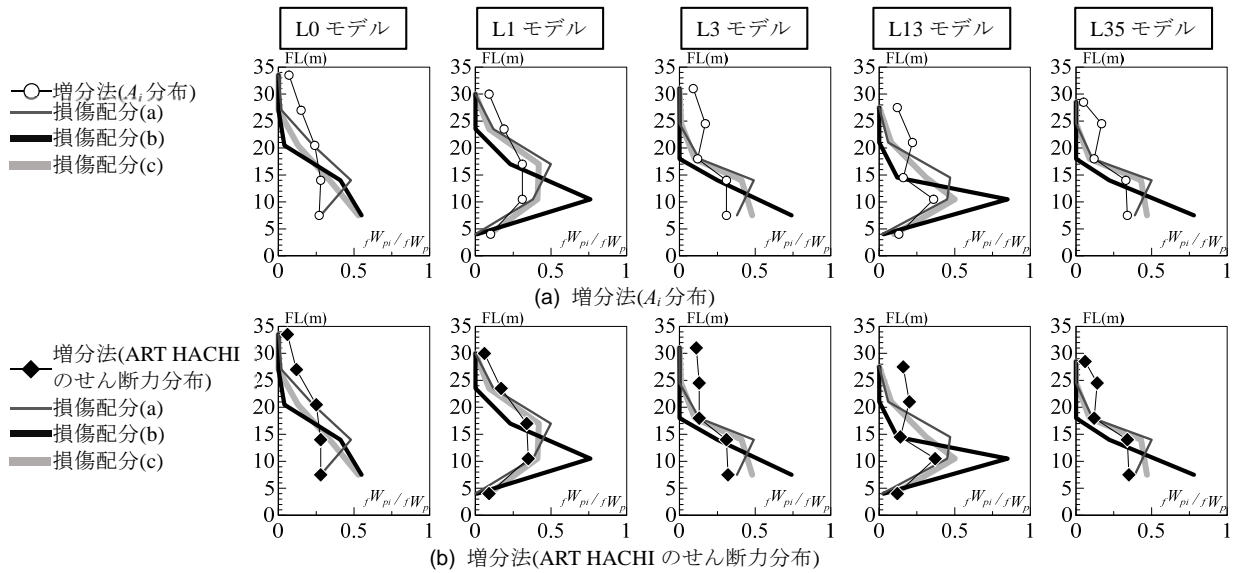
式(5)について、損傷集中指数 n の妥当性について検討を行う。用いる地震波は ART HACHI、累積損傷分布予測は秋山式によるエネルギー法で算出する。いずれのモデルでも n を変化させたことによる影響は同等のものとなったので、代表として L35 モデルの結果を附図 B に示す。また増分法において、外力分布を A_i 分布としたものと、実際のせん断力分布としたものでは大きな差は見られなかったため、 A_i 分布による結果のみを示す。附図 B より、増分法では損傷集中が少ないため、 n による影響はほぼ見られない。節点法と層モーメント法では、損傷集中層の損傷は n が大きいほど大きくなり、そこ以外は n が大きいほど小さくなった。附図 B(b)より、節点法による損傷分布予測は損傷配分(a), (c)と良い対応を示しており、 $n=4$ とすることで概形は最も近くなる。しかし損傷集中層の異なる損傷配分(b)と比較すると、 $n=12$ とすることで損傷配分の絶対値を大きく予測できるので安全側に評価できる。附図 B(c)より、層モーメント法による損傷分布予測は損傷配分(b)と良い対応を示しており、 $n=8$ とすることで概形は最も近くなる。しかし損傷集中層の異なる損傷配分(a), (c)と比較すると、 n がいずれの値でも損傷配分の絶対値を大きく予測できているので安全側に評価している。



附図 B 損傷集中指数 n による検討

附録 C ART KOBE による検討

5.2 と同様に、ART KOBE による累積損傷分布と、エネルギー法による累積損傷分布予測を比較する。附図 C1, C2 に各耐力算定法による累積損傷分布の予測と時刻歴応答解析の比較を、附表 C1~C4 にそれらの評価結果を示す。附図 C1(a)と附表 C1 より、評価結果は ART HACHI と変わらず、良い対応を示しているとは言えない。附図 C1(b)と附表 C2 より、4 つのモデルで安全側に評価することができており、外力分布をせん断力分布としたことによる影響が確認できる。附図 C2(a), (b)と附表 C3,4 より、評価結果は ART HACHI とほぼ変化は見られない。



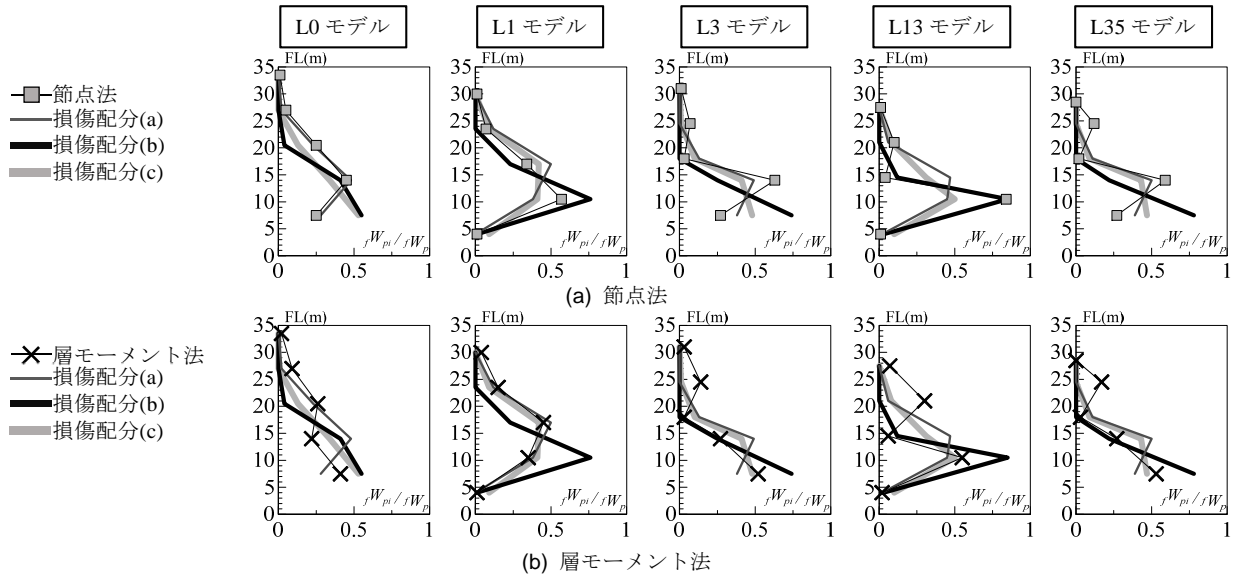
附図 A1 告示式による累積損傷分布の比較①

附表 A1 増分法(A_i 分布)による評価結果

増分法 (A_i 分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	×	×	×	×

附表 A2 増分法(ART HACHIのせん断力分布)による評価結果

増分法 (せん断力分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	×	×	×	×



附図 A2 告示式による累積損傷分布の比較②

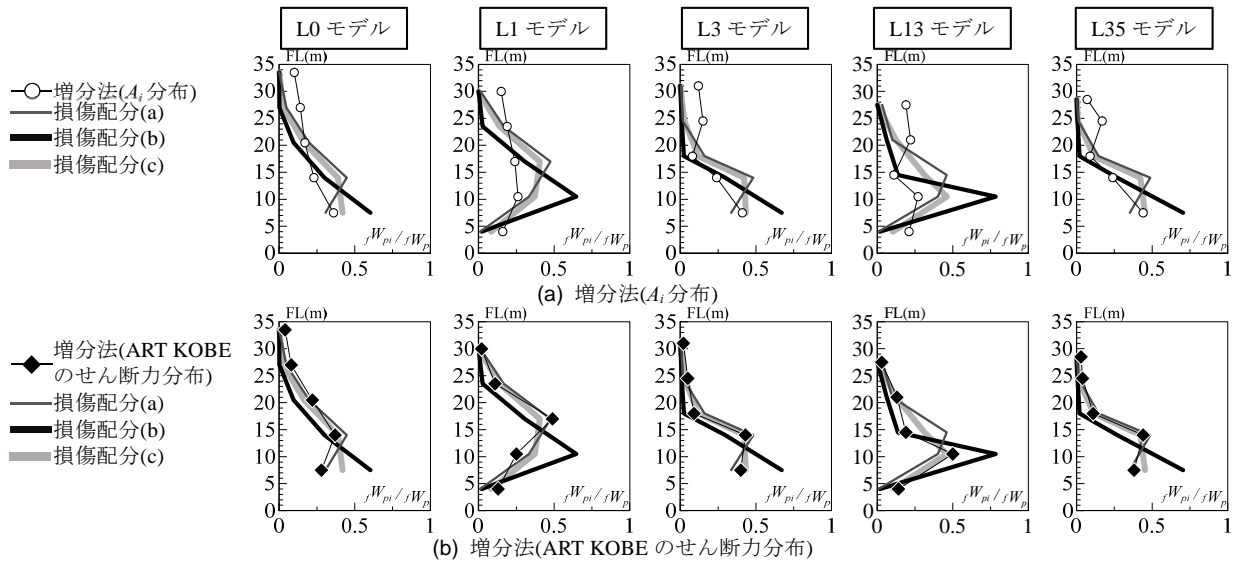
附表 A3 節点法による評価結果

節点法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	○	△	○	△	○
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	○	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	△	△	△	△

附表 A4 層モーメント法による評価結果

層モーメント法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	△	△	△
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	○	○	△	△

○ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えており、分布の概形も同等
 △ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていないが、安全側に評価している
 × : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていない



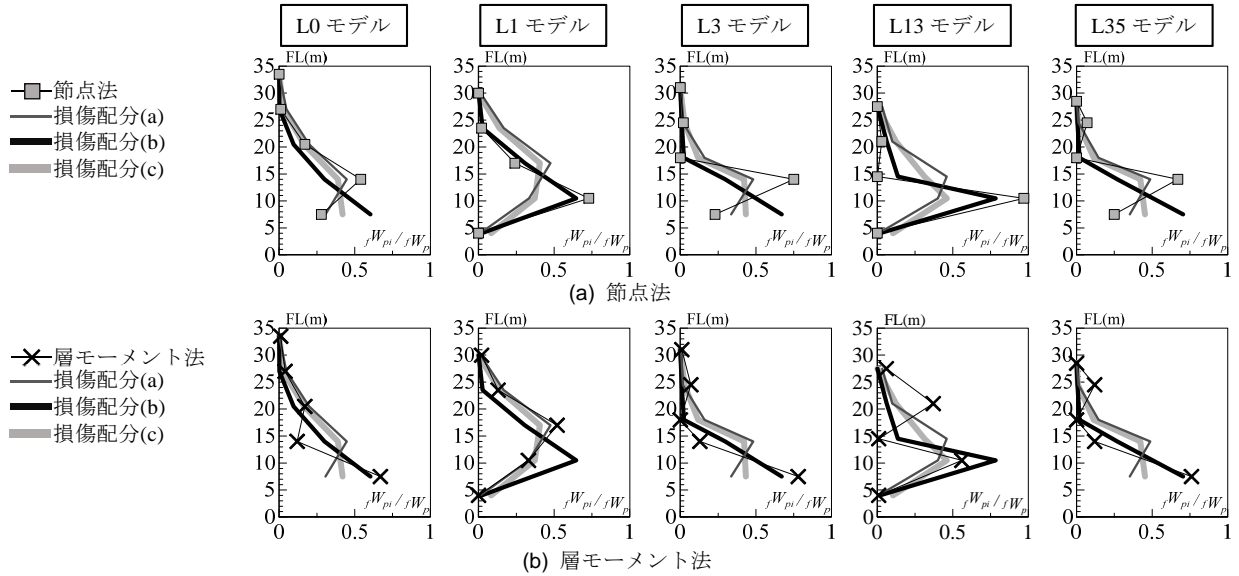
附図 C1 ART KOBE による累積損傷分布の比較①

附表 C1 増分法(A_i分布)による評価結果

増分法 (A _i 分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	×	×	×	×

附表 C2 増分法(ART KOBE のせん断力分布)による評価結果

増分法 (せん断力分布)	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	×	○	△	△	△
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	×	×	×	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	×	△	○	○	○



附図 C2 ART KOBE による累積損傷分布の比較②

附表 C3 節点法による評価結果

節点法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	○	△	○	△	○
損傷配分(b) (直上の層に配分)	×	○	△	○	×
損傷配分(c) (履歴ループ)	△	△	○	△	△

附表 C4 層モーメント法による評価結果

層モーメント法	L0	L1	L3	L13	L35
損傷配分(a) (1/2ずつ上下に配分)	△	○	△	△	△
損傷配分(b) (直上の層に配分)	○	×	○	×	○
損傷配分(c) (履歴ループ)	△	△	△	△	△

○ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えており、分布の概形も同等
 △ : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていないが、安全側に評価している
 × : 損傷分布予測で時刻歴応答解析による損傷集中層を捉えられていない