T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	層モーメント法による耐力算定とエネルギー法による累積損傷分布の関係
Title(English)	
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, Yuta WATANUKI
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ｉ, , pp. 269-272
Citation(English)	, Ｉ, , pp. 269-272
発行日 / Pub. date	2018, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2017年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2018年3月

層モーメント法による耐力算定とエネルギー法による累積損傷分布の関係

構造ー振動　正会員 ○ 中村一哉[*1]　〃 佐藤大樹[*1]　〃 松田頼征[*2]
鋼構造建物　エネルギーの釣合　エネルギー配分　〃 北村春幸[*2]　〃 山口路夫[*3]　〃 脇田直弥[*3]
応答予測法　層モーメント法　時刻歴解析　〃 山口慎吾[*3]　〃 綿貫雄太[*3]

1. はじめに

構造物の耐震性を合理的で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）がある。これは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構造物の耐震性を評価するための手法である。

エネルギー法は等価せん断モデルを基本に構築されているため，部材レベルでの累積損傷評価が未整備である。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。例えば近年需要の高まっている大型物流施設[3)]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が，このような建物への適用性が不明確である。

既報[4)]ではエネルギー法による損傷評価に大きく影響する耐力を荷重増分法と節点振り分け法で算定し，部材レベルでの時刻歴解析による累積損傷分布との対応関係を調べた。本報では耐力を層モーメント法で算定し，耐力算定法とエネルギー法による累積損傷分布の関係を分析する。

2. 検討建物概要

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 1 に基準階伏図，図 2 に軸組図を示す。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 1 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 ${}_fT_1$ を示す。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 3 に第 i 層の層質量 m_i と層剛性 ${}_fk_i$ 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である。層剛性 ${}_fk_i$ では，L0 モデルの剛性が高さ方向で概ね均一であり，階高を低くした層の剛性は上下層と比べ 2 ～ 4 倍と極端に高くなっている。

図 1　基準階伏図

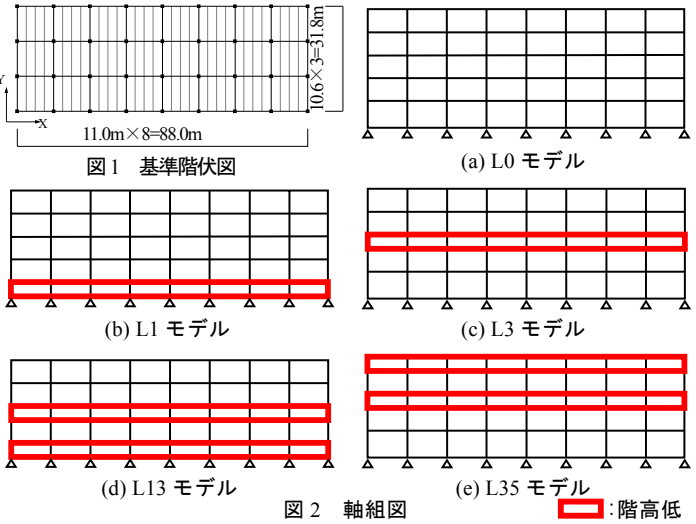


図 2　軸組図

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

※鋼材種：BCP325, SN490

表 3　全重量 W と 1 次固有周期 ${}_fT_1$

	W (kN)	${}_fT_1$ (s)
L0	143358	2.01
L1	143053	1.74
L3	131417	1.81
L13	131112	1.53
L35	119469	1.67

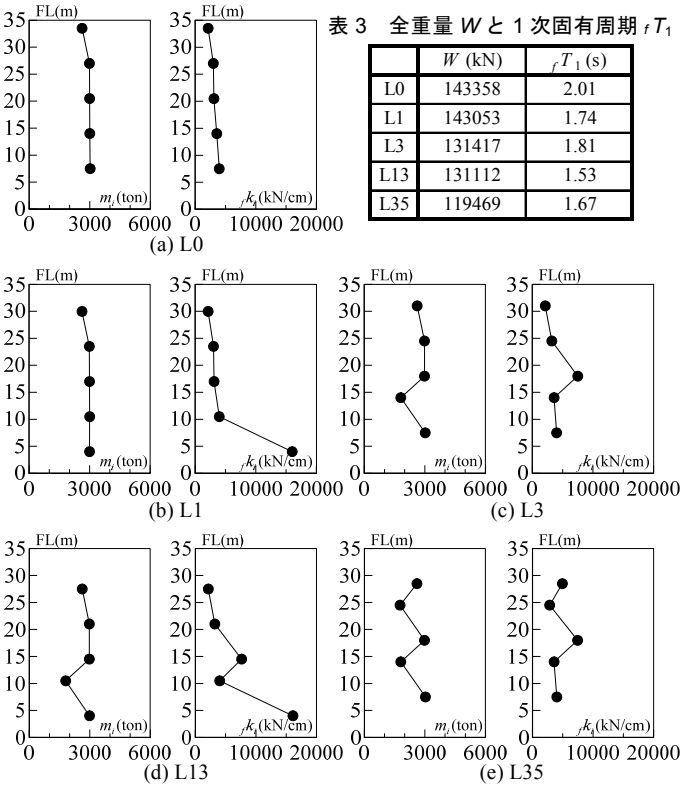


図 3　層質量 m_i と層剛性 ${}_fk_i$

3. 地震応答性状

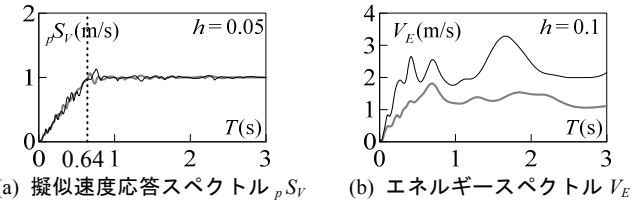
本章は，最大応答値の高さ方向分布より検討を行う。入力地震動には 1968 年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分と, 1995 年の兵庫県南部地震における JMA KOBE NS 成分（以後，ART HACHI，ART KOBE）を採用し、図 4 に擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$ およびエネルギースペクトル V_E を示す。図 5 に梁の歪エネルギーの配分方法を示す。(a) に上下の梁の歪エネルギーを 1/2 ずつ配分し層の累積損傷とする方法，(b) に直上の梁の歪エネルギーを層の累積損傷とする方法の概略図を示す。また図には示さないが，(c) として層せん断力 - 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。なお，本報では紙面の都合上 ART HACHI の結果のみを示す。

図 6 に各モデルにおける最大層間変形角 $R_{\max i}$ と累積損傷の高さ方向分布 ${}_fW_{pi}/{}_fW_p$ の高さ方向分布を示す。図 6 より $R_{\max i}$ は L0 モデルを基準とすると，階高の低い層で小さい。${}_fW_{pi}/{}_fW_p$ は配分方法によって以下のような特徴がある。

(a)：いずれのモデルでも第 2 層，第 3 層に損傷が集中。

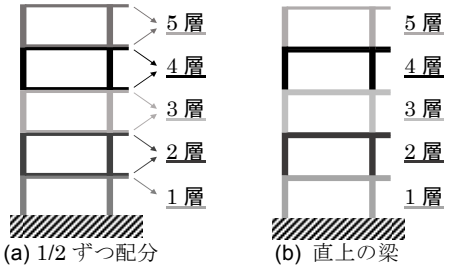
(b)：L0 モデルを基準に，階高の低い層の損傷が 0。

(c)：(a) と(b) の分布の間に位置する。



(a) 擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$　(b) エネルギースペクトル V_E

図 4　擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V$ とエネルギースペクトル V_E



(a) 1/2 ずつ配分　(b) 直上の梁

図 5　梁の歪エネルギーの配分方法

4. 耐力算定法の違いがエネルギー法に及ぼす影響

4.1 耐震構造におけるエネルギー法の概要

耐震構造における k 層の損傷分布は式(1)のように提案されている [2]。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。損傷集中の程度は n に支配され，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。

$$\frac{{}_fW_{pk}}{{}_fW_p}=\frac{s_k\cdot p_k^{-n}}{\sum_{i=1}^{N}s_i\cdot p_i^{-n}} \tag{1}$$

式(1)中の s_i，p_i は式(2)，(3)で表される。

$$s_i=\left(\sum_{j=i}^{N}\frac{m_i}{M}\right)^2\cdot\overline{\alpha}_i^{\,2}\cdot\left(\frac{{}_fk_1}{{}_fk_i}\right) \tag{2}$$

$$p_i=\frac{{}_f\alpha_{yi}\big/{}_f\alpha_{y1}}{\overline{\alpha}_i} \tag{3}$$

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，N：層数，m_i：第 i 層の質量，M：全層の質量，${}_fk_i$：層剛性，$\overline{\alpha}_i$：最適降伏層せん断力係数，${}_f\alpha_{yi}$：降伏層せん断力係数である。n は構造形式により異なり，式(4)の値が提案されている [2]。

$$\begin{aligned} n&=12：柱降伏型，筋違構造\\ n&=8\ \ ：梁降伏型構造\\ n&=4\ \ ：連層耐震壁付き架構 \end{aligned} \tag{4}$$

4.2 荷重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 [1]，いずれかの層間変形角が 1 / 25 となるまで行う。図 7 に完全弾塑性型の復元力特性への置換方法を示す。図 7 に示すように，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 ${}_fQ_{yi}$ および降伏変形 ${}_f\delta_{yi}$ を以下のように算定する。

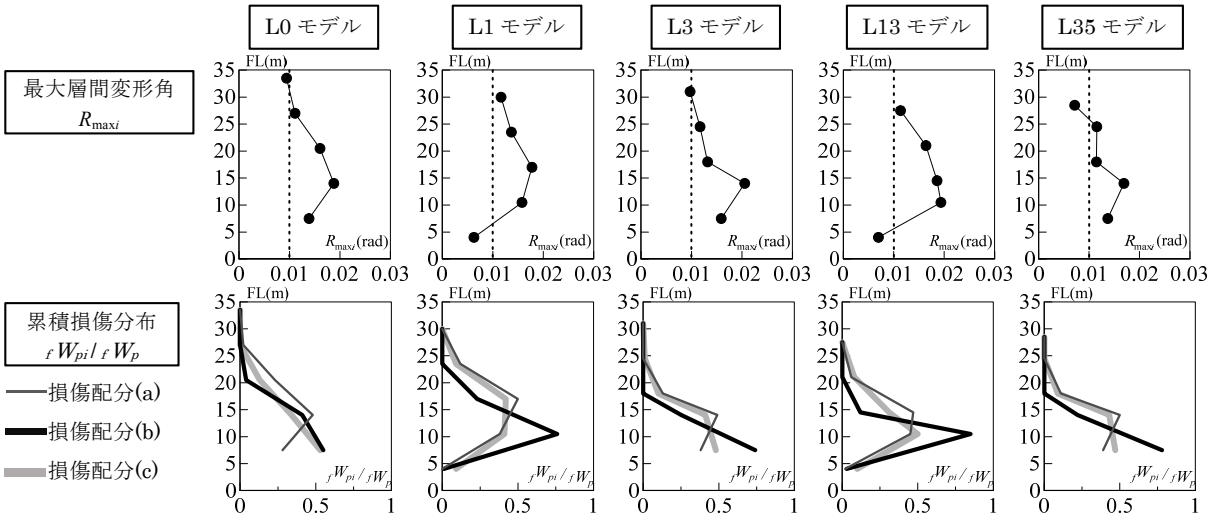


図 6　時刻歴解析による最大層間変形角と累積損傷分布 (ART HACHI)

$$ {}_f\delta_{yi} = {}_f\delta_{ui} - \sqrt{{}_f\delta^2_{ui} - \frac{2W_i}{{}_fk_i}} \tag{5} $$

$$ {}_fQ_{yi} = {}_fk_i \cdot {}_f\delta_{yi} \tag{6} $$

ここに，${}_f\delta_{yi}$：主架構の降伏変形，${}_f\delta_{ui}$：主架構の終局変形，${}_fk_i$：主架構の層剛性，W_i：静的増分解析結果の履歴曲線の面積，${}_fQ_{yi}$：主架構の降伏層せん断力である。

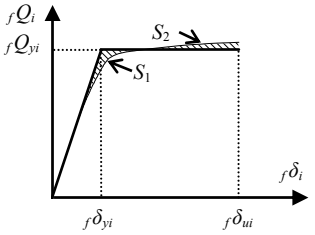


図 7　完全弾塑性型の復元力特性への置換方法

4.3 層モーメント法による耐力の算定[5)]

節点振り分け法によって求めた保有水平耐力の分布[4)]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α_iA_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。

$$ \rho_i = \frac{\alpha_{i+1}A_{i+1}}{\alpha_{i+1}A_{i+1} + \alpha_iA_i} \tag{8} $$

図 8 のようにモーメントを定義すると，以下が成り立つ。

$$ M_{下} = \rho_{i-1} \cdot M_{Fi-1} \tag{9} $$

$$ M_{脚i} = \rho\left(M_{上} + M_{下} + M_{Fi}\right) - M_{上} \tag{10} $$

$$ M_{頭i} = M_{Fi} - M_{脚i} \tag{11} $$

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。

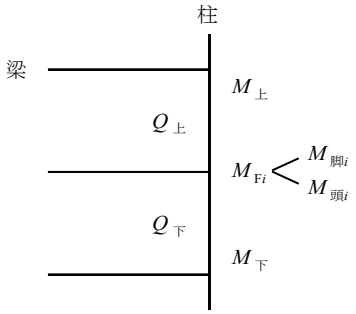


図 8　層モーメントの上下層への分配

4.4 累積損傷分布予測への影響

耐力算定法の違いがエネルギー法の累積損傷分布予測に及ぼす影響を検討するため，2 通りの耐力算定法による累積損傷分布予測を比較する。架構が梁崩壊型であるため式(4)より損傷集中指数 n は 8 とする。図 9 に 5 つのモデルにおける耐力分布と累積損傷分布予測を示し，それぞれで増分法と層モーメント法を比較する。耐力分布について，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，階高に関わらず低層部ほど耐力が大きい。層モーメント法では，L0 モデルでは増分法との差は小さい一方，他のモデルでは階高の低い層で耐力が大きい。累積損傷分布予測について，増分法では階高の低い層で多少小さくなるが，いずれのモデルでも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。層モーメント法では L0 モデルをはじめ，全てのモデルで極端に損傷が集中している。L0 モデルの分布を基準とすると，他のモデルでは階高の低い層で損傷が 0 となり他の層でその割合のまま負担する結果となった。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。

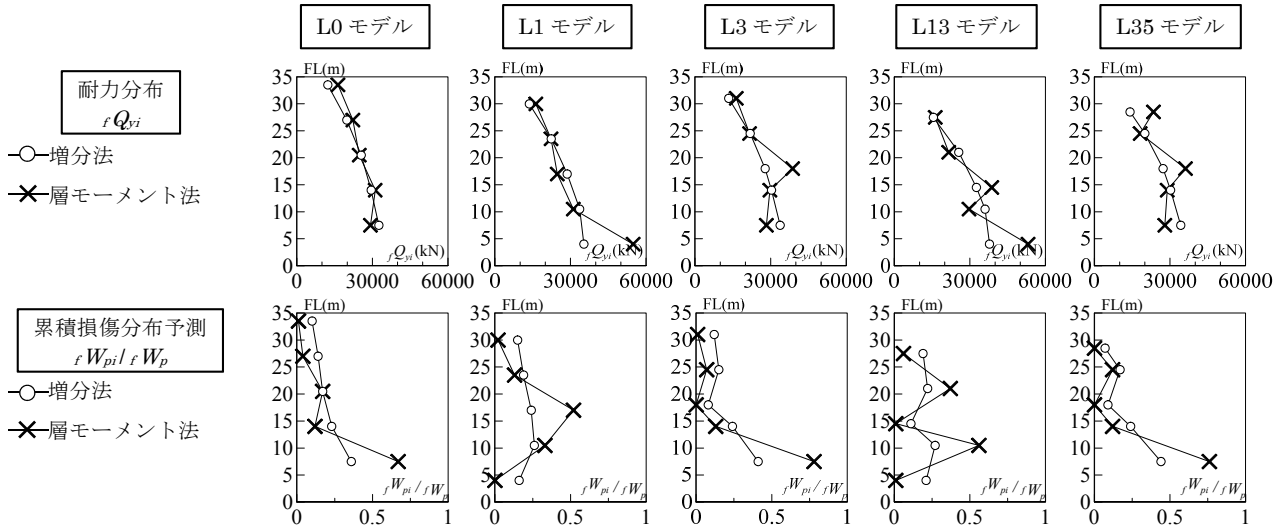


図 9　耐力分布と累積損傷分布予測

4.5 時刻歴応答解析との比較

エネルギー法で求めた損傷分布(式(1))と時刻歴応答解析の結果を比較する。損傷集中指数 n は前節と同様に 8 とする。図 10 に増分法と層モーメント法による損傷分布予測と時刻歴応答解析結果の比較を，表 4，5 にそれらの評価結果を示す。図 10(a) と表 4 より，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 10(b) と表 5 より層モーメント法を用いると，L0 モデルにおいては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(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)では第 2 層の損傷集中層を捉えられている。

5. まとめ

剛性の高さ方向分布により，エネルギー法で累積損傷分布を求めるための耐力算定法や損傷配分の方法が異なることを確認した。いかなる剛性の高さ方向分布でも耐力は荷重増分法よりも層モーメント法で求めた方が累積損傷分布を安全側に予測できることを確認した。

謝辞

本報は，新日鉄住金エンジニアリング株式会社，東京理科大学北村研究室，東京工業大学佐藤研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。ここに記して謝意を表します。

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，松蔭知明，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)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
5)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

*1　東京工業大学　　*2　東京理科大学
*3　新日鉄住金エンジニアリング株式会社

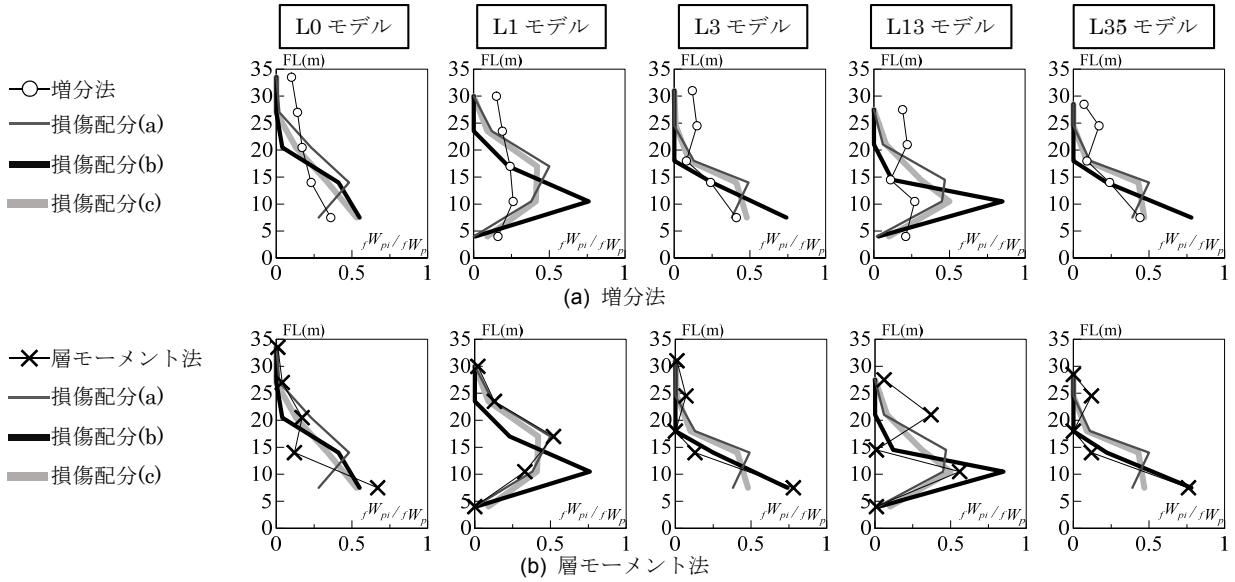


図 10　累積損傷分布の比較(ART HACHI)

表 4　増分法による評価結果

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　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，分布の概形も同等である
△：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