

エネルギー法による RCS 構造の地震時ひずみエネルギーの評価方法の検討 Study on the Evaluation of Seismic Strain Energy in RCS Structures Using the Energy Method

○澤木琉偉¹, 石鍋雄一郎²

*Rui Sawaki¹, Yuichiro Ishinabe²

Abstract: This study examines RCS structures combining RC columns and steel beams, where research on seismic response is limited compared to connection behavior studies. Previous study using a fishbone model with hysteretic dampers showed that, under the Takeda restoring force model, the main frame absorbed less plastic strain energy, while dampers absorbed more, than in the perfectly elastic-plastic case. The present research investigates how column restoring characteristics affect required energy absorption, compares with time-history analysis results, and evaluates structural safety margins.

1. はじめに

ロングスパンかつ長期荷重の大きい建築物で採用されることのある RC 柱, S 梁の混合構造 (以下, RCS 構造) において, 異種構造の部材間での応力伝達となる柱梁接合部に関する研究は数多く報告されているが, 架構の地震応答特性の研究は少ない。

筆者らの既往研究では, RCS 構造のエネルギー法による耐震設計を念頭に置き, 履歴型ダンパー付きの倉庫建築を想定し, 魚骨モデルを用いて検討を行った^[1]。その結果, 柱の復元力特性が武田モデルの場合には, 完全弾塑性の場合と比べて, 主架構の塑性ひずみエネルギーが小さくなり, 一方で, ダンパーの塑性ひずみエネルギーは大きくなることを示した。

本研究では, 完全弾塑性の復元力特性を基準として柱の復元力特性が, エネルギー法による主架構およびダンパーの必要エネルギー吸収量の算定に及ぼす影響を把握し, 時刻歴応答解析の結果と比較する。

2. エネルギー法による必要エネルギー吸収量の算定

エネルギー法において, 主架構各層の Q-δ 関係を想定される最大変位までの面積と等価になるようにバイリニア化する^[2] (Figure 1)。バイリニア化の際の剛性は一般に S 造では初期剛性, RC 造では損傷限界時の割線剛性である。RCS 構造は柱のひび割れにより早期に剛性低下することで, バイリニア化における主架構の降伏変位 δ_{fui} に影響を与える。エネルギー法において, (1)式に示す建物に入力される塑性ひずみエネルギー E_s の算定では, 損傷に寄与するエネルギーから差し引かれるエネルギーのうち, 主架構降伏以前にダンパーが吸収するエネルギー W_{dpi} ((2)式) が大きい。 E_s は主として主架構の必要エネルギー吸収量 E_{Sfi} に配分され, 主架構最弱層降伏時層間変位 δ_{fui} が大きいほど E_{Sfi} は小さく, 一方でダンパーの必要エネルギー吸収量 E_{Sdi}

は主として W_{dpi} で構成され, δ_{fui} が大きいほど大きいという関係がある。

ここで, W_{fi} は主架構の弾性ひずみエネルギー, W_{di} はダンパーの弾性ひずみエネルギー, W_{dpi} は E_s の算定では $n_i=5$, E_{Sdi} の算定では $n_i=20$ である。

$$E_s = \frac{1}{2} M V_s^2 - \sum \{W_{fi} + W_{di} + W_{dpi}\} \quad (1)$$

$$W_{dpi} = 2(\delta_{fui}' - \delta_{dui}) Q_{dui} n_i \quad (2)$$

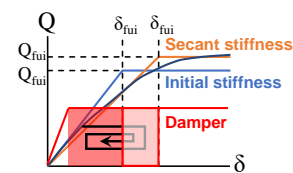


Figure 1. Bilinearization of the frame Q-δ relationship

3. 検討モデルおよび時刻歴応答解析の概要

解析モデルは倉庫建築を想定し, 文献[3]を参考に構築した 6 層の集約魚骨モデルである (Figure 1)。履歴型ダンパーが最上層を除く各層に配置されている。主架構に対するダンパーの剛性比 k は 0.5 で, ダンパーの耐力分担率は 0.13 である。ダンパーの復元力特性はバイリニアで, 二次剛性比 0.019, 複合硬化で等方硬化の割合は 0.6 である。最上層には最上層主架構と同一の耐力で, 降伏回転角が $1/300\text{rad}$ となる剛性を持つブレースを配置する (モデル化上は弾性)。

解析パラメータは柱の復元力特性, 柱梁耐力比である。柱は初期剛性および降伏耐力を同一として, bilinear および武田モデルに相当する曲げの復元力特性を与え

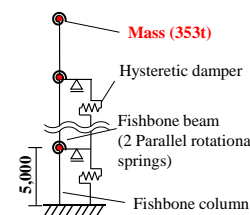


Figure 2. Model diagram

floor	R	6	5	4	3	2	1
2.0model	-	3.48	2.75	2.35	2.23	2.00	-
1.5model	-	1.60	1.67	1.52	1.46	1.50	-

Table 2 Input motion

Input motion	Abbr.	Year	Duration
El Centro NS	EL	1940	53.74sec
Hachinohe EW	HA	1968	35.99sec
JMA Kobe NS	KO	1995	39.98sec

1: 日大理工・院 (前)・建築 2: 日大短大・教員・建築

る。武田モデルにおいて、降伏時剛性低下率 α_y を 0.6, 0.25 とする (以降ではそれぞれ BL, 60, 25 と表記)。武田モデルでは、内側ループからの除荷剛性に乗じる係数は 0.7, 降伏後の除荷剛性に乗じる指数は 0.4 とする。魚骨柱および魚骨梁の降伏回転角はそれぞれ 1/100, 1/150rad であり、柱梁共に降伏後剛性は初期剛性の 1/1000 とし、劣化は考慮しない。柱梁耐力比は Table 1 に示す。第 1 層上部の柱梁耐力比が 2.0 の場合 (2.0 モデル) と 1.5 の場合 (1.5 モデル) を検証する。各層耐力のベースシアは 0.3, A_i 分布からのずれ程度 p_i は 2.0 モデルでは 1.49, 1.5 モデルでは 1.24 である ($p_2 \sim p_5$ は 1.0~1.1)。入力地震動は Table 2 に示す。時刻歴応答解析はひずみエネルギーの継続時間中の最大値がエネルギー法における極稀地震時に建築物に入力されるエネルギー (速度換算 1.65m/s) と同等 ($\pm 3\%$ 以内) になるように加速度に倍率を乗じる。地震動入力後に 20 秒間自由振動させ、弾性ひずみエネルギーを収束させ、解析終了とする。減衰は瞬間剛性比例型とし、ダンパーを除いて、柱と梁に共通で 1 次減衰定数 3%とした。解析には SNAP Ver.8 を用いる。

4. 算定値と応答値の比較

エネルギー法によるひずみエネルギーの算定を行い、応答値と比較する。 Es_{fi} および Es_{di} は層間変形角 1/50rad 時での面積等価として、初期剛性および損傷限界時の割線剛性のバイリニア化で算定し、 δ_{fui} に柱の復元力特性が及ぼす影響を把握する。損傷限界は A_i 分布で増分解析し、初めて梁にヒンジが生じた時点とする (A_i 分布算出時の固有周期は 1.125s とした)。Figure 3 に主架構およびダンパーのひずみエネルギーの応答値 (青) と算定値 (橙) の比較を示す。初期剛性による算定値は、主架構では 25 の場合に大きく、ダンパーでは 25 の場合に小さい。これは応答値とは異なる傾向である。割線剛性による算定値は、主架構は 25 の場合に小さく、応答値と同様の傾向であるが、柱梁耐力比が小さい場合 (1.5 モデル) には、柱の復元力特性間の差異が大きく、応答値を下回る場合もみられた。また、ダンパーでは 25 の場合に大きく、応答値と同様の傾向を示した。

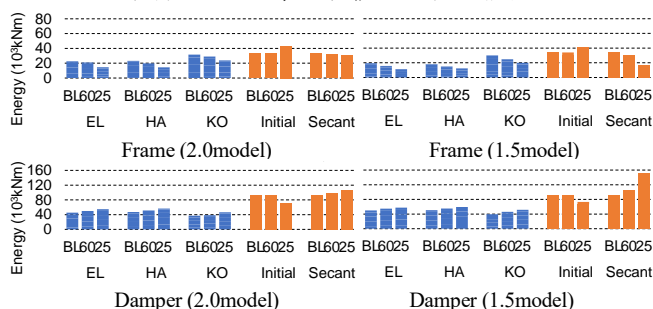


Figure 3. Strain energy

1.5 モデルのように柱梁耐力比が小さい場合、柱の復元力特性間の差異が大きい。

エネルギー法の算定値についてさらに検討を加える。

Figure 4 に 2.0 モデルの BL および 25 の第 2 層の Q- δ 関係, Table 3 に初期剛性でバイリニア化した場合の BL の δ_{fui} に対する 25 の δ_{fui} の割合を示す。 δ_{fui} は 25 の場合に小さい傾向がある。1.5 モデルのほうがわずかに BL に対する 25 の割合が小さい。

Figure 5 に BL に対する 25 の δ_{fui} の比率と初期剛性に対する割線剛性の比の関係を示す。割線剛性でバイリニア化する場合、割線剛性比が小さいほど δ_{fui} は大きくなる傾向がある。この傾向は柱梁耐力比が小さく、小さい変形から剛性低下する 1.5 モデルで強く表れる。

2.0 モデル, 1.5 モデルともに δ_{fui} の BL に対する 25 の割合は第 1 層が最も小さい。2.0 モデルでは 1.46, 1.5 モデルでは 1.83 である。

5. まとめ

本研究では、時刻歴応答解析とエネルギー法の算定値の比較により割線剛性でバイリニア化することで応答値と同様の傾向を捉えられることが把握された。割線剛性比が小さい場合に主架構において、算定値が応答値を下回るケースがあったが、魚骨モデルは部材数が少なく、一つの部材の剛性低下により層の剛性を大きく低下させることから損傷限界時の割線剛性比が実情より小さいことが考えられる。

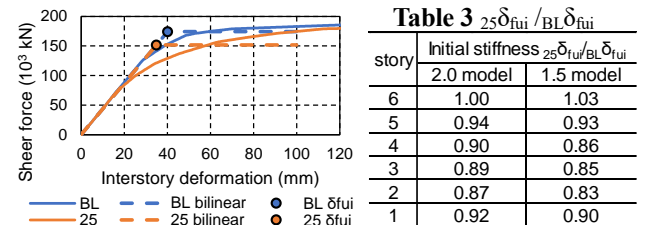


Figure 4. δ_{fui} in the bilinearization based on initial stiffness

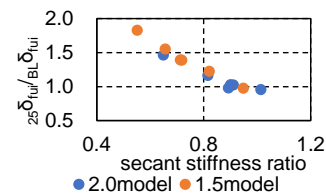


Figure 5. Relationship between δ_{fui} and secant stiffness

参考文献

[1] 澤木琉偉 石鍋雄一郎 ほか:「RCS 構造の柱の復元力特性が地震時のひずみエネルギー分布に与える影響」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2025 年 9 月
 [2] 独立行政法人 建築研究所監修: 鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル平成 17 年国土交通省告示第 631 号「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法」に準拠して一, 第 1 版, 技報堂出版, 2008.9
 [3] 小川厚治 加村久哉 ほか:「鋼構造ラーメン骨組の魚骨形地震応答解析モデル」, 日本建築学会構造系論文集, 第 521 号, pp.119-126, 1999 年 7 月