

低降伏点鋼を用いた制振部材に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DAMPING MEMBERS WITH LOW-YIELD-POINT STEEL

得能将紀^{*1}, 竹中啓之^{*2}, 桑素彦^{*3}, 太田行孝^{*3}, 西村英一郎^{*4}, 大月智弘^{*4}
Masaki TOKUNO, Hiroyuki TAKENAKA, Motohiko KUWA, Yukitaka OHTA,
Eiichirou NISHIMURA and Tomohiro OOTSUKI

- This paper is a report on an experimental study on damping members with high-strength low-yield-point steel panel. In Phase 1, structural tests were conducted on high-strength low-yield-point steel panels and their resilience and fatigue properties were investigated. In Phase 2, an evaluation equation for fatigue properties was developed and validated. In Phase 3, a design case study of the TODA BUILDING using high-strength low-yield-point steel panels was reported. The following results were obtained.
1. This low-yield-point steel panel can be modelled as a tri-linear shear spring to evaluate the experimental values safely.
 2. The Manson-Coffin type fatigue prediction equation can be used to evaluate the relationship between the fragment amplitude of the shear deformation angle at the point at which the peak load drops to 90% of the maximum bearing capacity and the number of service lives, from the experimental results of constant-amplitude loading specimens.
 3. The fatigue life of this low-yield-point steel panel can be properly evaluated using Miner's rule, which is based on the Manson-Coffin type fatigue prediction equation determined from the experimental results of constant-amplitude loading specimens.

Keywords: Low-yield-strength steel, Damping beams, Restoring force characteristics, Fatigue characteristics, Constant amplitude loading, Incremental loading

低降伏点鋼, 制振境界梁, 復元力特性, 疲労特性, 定振幅載荷, 漸増載荷

1. はじめに

TODA BUILDING ではダブル H 形コアウォールを用いた免震構造を採用しており, コアウォ間には低降伏点鋼を用いた制振パネル (以下, 低降伏点鋼パネルという) によって接続されている (図 1). これはコアウォール間に生じる変位差を利用し, 低降伏点鋼パネルに大地震時のエネルギーを吸収させ, 損傷制御することを目的としている (図 2).

筆者らは, 超高層鉄筋コンクリート造建物を対象に低降伏点鋼パネルによる制振部材の研究開発を行っている (例えば¹⁾). 本研究の特徴として, 低降伏点鋼パネルを鉄筋コンクリート部分に埋め込まずに (非埋め込み型として) 接合することにより, 高強度材料を用いなくともコンクリートの損傷を抑えることが可能となる (例えば²⁾).

本研究では, 既往の実験により確認されている低降伏点鋼パネルよりも 1 箇所あたりの最大せん断耐力を向上させるため, 下記 3 点の改良を行った.

- ①ウェブの板厚を厚くする
- ②ウェブの辺長比を変える
- ③フランジの板厚を厚くする

一方で, 高耐力の低降伏点鋼パネルに関する研究は少なく, 特に疲労特性に関する知見がない.

本稿では, 高耐力の低降伏点鋼パネルの構造実験により, 高耐力パネルの復元力特性および疲労特性について

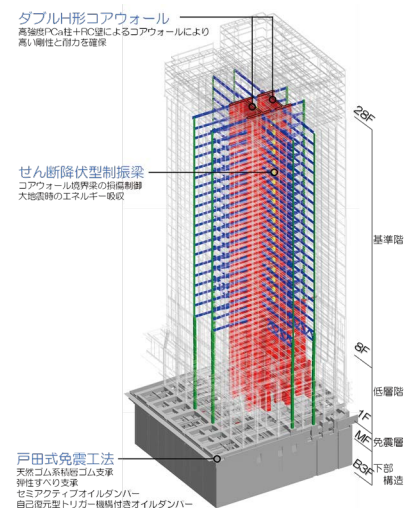


図 1 新 TODA ビルの採用技術

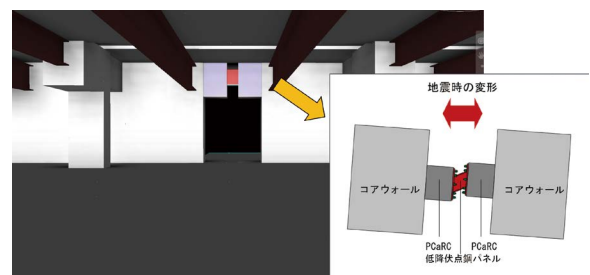


図 2 低降伏点鋼パネル

^{*1} 戸田建設(株)設計統轄部構造設計部 修士 (工学)

^{*2} 戸田建設(株)技術研究所 博士 (工学)

^{*3} 戸田建設(株)設計統轄部構造設計部 博士 (工学)

^{*4} 戸田建設(株)技術研究所 修士 (工学)

Structural Design Department, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, Dr.Eng.
Structural Design Department, TODA CORPORATION, Dr.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

表 1 試験体一覧

試験体	荷重方法	低降伏点鋼パネル 辺長比	フランジ PL		ウェブ PL (低降伏点鋼パネル)			ベース PL
			鋼種	幅厚比	鋼種	幅厚比	基準化幅厚比	
P-100	1/100rad 定振幅	$\frac{d}{h} = 1.33$	PL-25 (SN490B)	$b/t_f = 10.24$	PL-16 (LY225)	$h/t_w = 24.0$ $d/t_w = 32.0$	$\frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_s \cdot E}} = 0.211$	PL-25 (SN490B)
P-70	1/70rad 定振幅							
P-20	1/20rad 定振幅							
P-I	漸増荷重							

d : パネル幅, h : パネル高さ, t_w : 低降伏点鋼材パネル板厚, b : フランジ PL 幅, t_f : フランジ PL 板厚, τ_y : セン断降伏応力度, κ_s : 周辺単純支持板の板座屈係数, E : ヤング係数

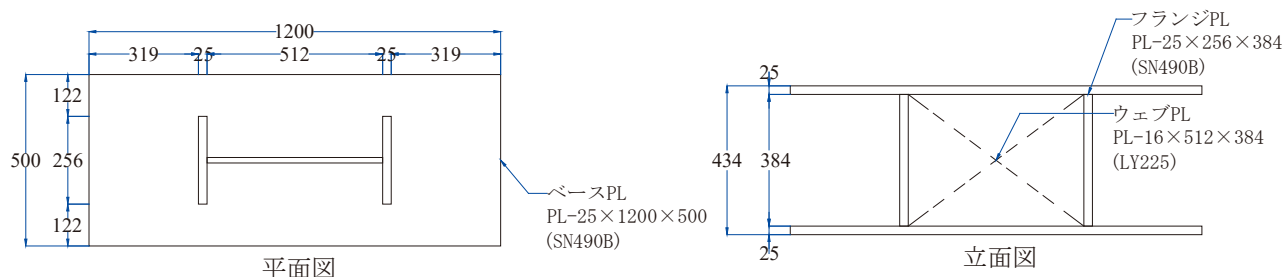


図 3 試験体図

検討する。続いて、疲労特性の評価式を構築し、その妥当性を確認する。最後に高耐力の低降伏点鋼パネルを用いた TODA BUILDING での設計事例について報告する。

2. 試験体計画

2.1 試験体概要

試験体一覧を表 1, 試験体図を図 3 に示す。また, 表 2 に鋼材の機械的性質 (ミルシート値) を示す。パネル試験体は荷重方法をパラメータとした全 4 体 (定振幅荷重試験体 3 体, 漸増荷重試験体 1 体) である。試験体形状, 使用鋼材は共通で, ウェブ PL には低降伏点鋼 LY225 材を使用した。縮尺は実大の 2/3 を想定している。

2.2 荷重方法と荷重スケジュール

加力装置を図 4 に示す。試験体は左右の鉄骨柱と上下の鉄骨梁をピン接合した加力フレームに, 高さ調整用の H 形鋼を介して高力ボルトで接合した。加力の制御は, 低降伏点鋼パネルのせん断変形角 γ による変位制御とした。

漸増荷重を行った試験体の加力スケジュールを図 5 に示す。1 サイクル目を 1/400rad, 2 サイクル目を 1/200rad として, 以降 1/200rad ずつ変形角を増加させ, 試験体耐力が最大耐力の 90% 以下になるまで加力した。定振幅疲労荷重は, 小振幅域における疲労特性を把握するための 1/100rad, レベル 2 相当の地震時に想定される最大応答せん断変形角の 1/70rad, 余裕度検討レベルとしてレベル 2 相当の 1.5 倍程度の地震時に想定される最大応答せん断変形角の 1/20rad の 3 水準とした。

3. 実験結果 (荷重-変形関係)

各試験体の荷重 (Q) - 変形 (γ) 関係を図 6 (a) ~ (d) に示す。定振幅荷重を行った試験体については, 1 サイクル目のループ (黒線), 最大耐力時のループ (青線),

表 2 鋼材の機械的性質

鋼材	部位	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	伸び (%)
PL-16 (LY225)	ウェブ PL	208	319	63
PL-25 (SN490B)	フランジ PL ベース PL	369	518	30

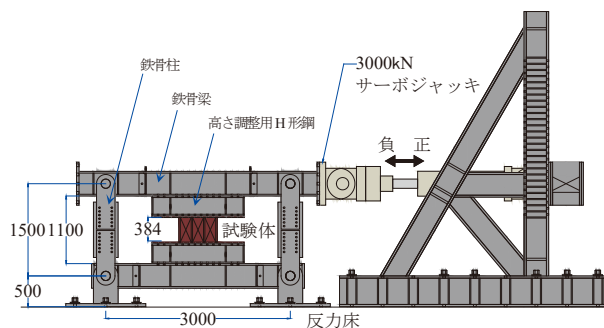


図 4 加力装置

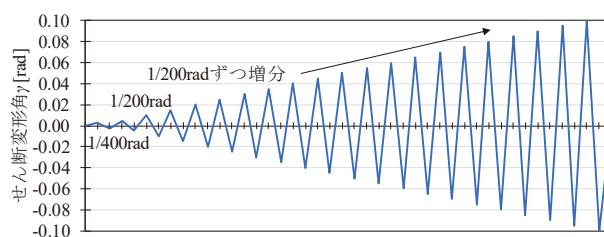


図 5 漸増荷重試験の加力スケジュール

試験体耐力が最大耐力の 90% まで耐力低下した時のループ (赤線), 最終サイクルのループ (緑線) を示している。図中 Q_y 計算値とは, フランジを考慮しない低降伏点鋼パネルのせん断降伏耐力である。定振幅荷重, 漸増

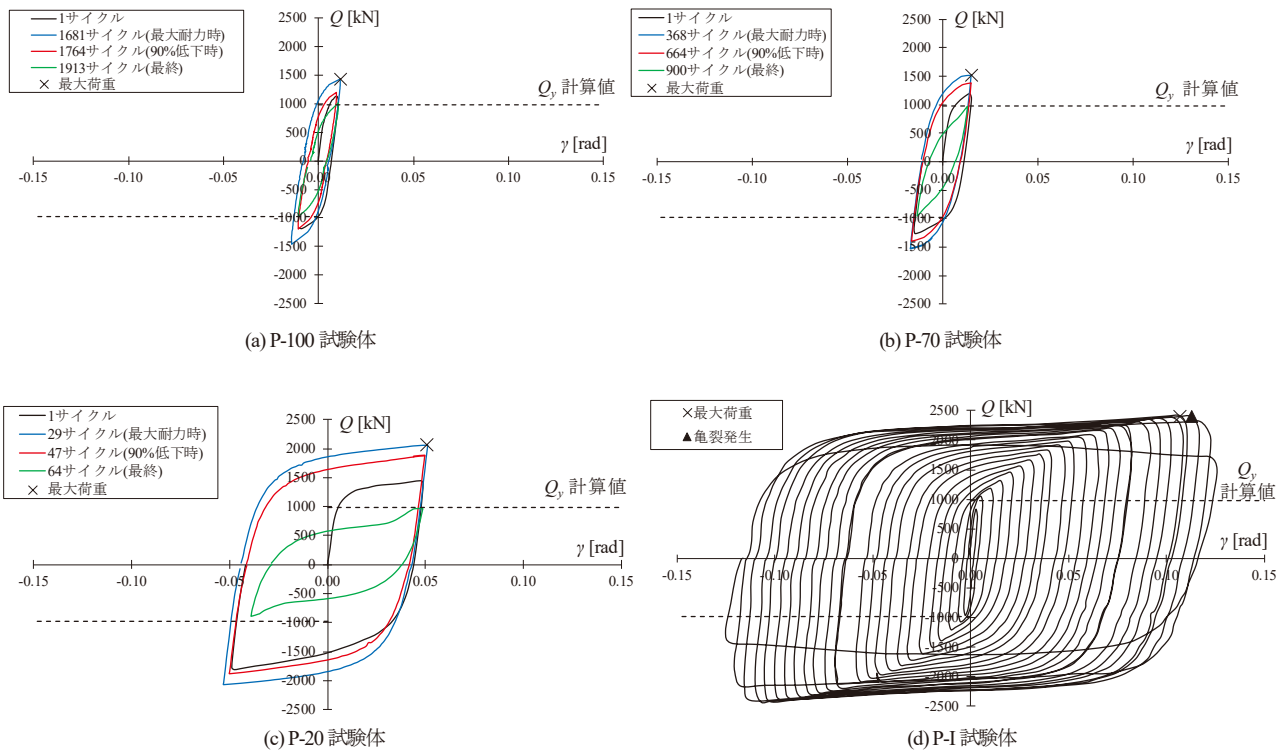


図6 荷重 (Q)－変形 (γ) 関係

載荷の試験体ともに、ウェブ PL－フランジ PL の溶接熱影響部に亀裂が発生するまでは紡錘形の安定した履歴ループを示した。定振幅載荷試験体は亀裂発生後、徐々に耐力低下を生じ、最終的にウェブ PL－フランジ PL の溶接熱影響部が破断した。漸増載荷を行った P-I 試験体では+23/200rad サイクル時に亀裂が発生し、その後の+24/200rad サイクル時には最大耐力の90%以下まで耐力低下している。

4. 最終破壊状況

各試験体の最終破壊状況を写真1 (a)～(d) に示す。定振幅載荷、漸増載荷の試験体ともに、繰り返しの緩やかなウェブの面外座屈が先行して生じた。ただし、初期の面外座屈が生じてから直ちに耐力低下には至っておらず、ウェブフランジの溶接熱影響部の亀裂・破断が発生した後にピーク時荷重が最大耐力の90%以下まで低下している。加力終了時まで、ウェブの中央付近に繰り返しの座屈波形の反転による亀裂は生じなかった。

5. 復元力特性のモデル化

低降伏点鋼パネルは弾塑性解析への適用が容易なように、マクロ的な解析モデルとしてせん断ばねとする。せん断バネの復元力特性は図7に示す Tri-Linear 型³⁾のモデルを用いた。これは弾性領域、歪硬化領域、終局領域の3つの領域を持つモデルで、終局領域では常に αK_1 の剛性を持つ直線 E-P、E'-P' 上に位置する。

スケルトンカーブの設定では、ウェブ PL のせん断降伏

点を基準として、第1折れ点のせん断強度 Q_y はウェブ PL の断面積にせん断降伏応力度を乗じた値として式 (1) より求めた。第1剛性 K_1 はウェブ PL のせん断剛性として式 (2) より求めた。第2剛性 K_2 は式 (3) に示すように第1剛性に低減係数を乗じて求めた。各係数は漸増載荷を行った P-I 試験体の実験結果を安全側に評価できるように設定し、 $\alpha=0.003$ 、 $\beta=0.025$ 、 $\theta=2.150$ とした。モデル化した復元力特性と実験値の比較を図8に示す。

$$Q_{y1} = \frac{\sigma_{wy}}{\sqrt{3}} \cdot t_w \cdot d \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{G \cdot t_w \cdot d}{h} \quad (2)$$

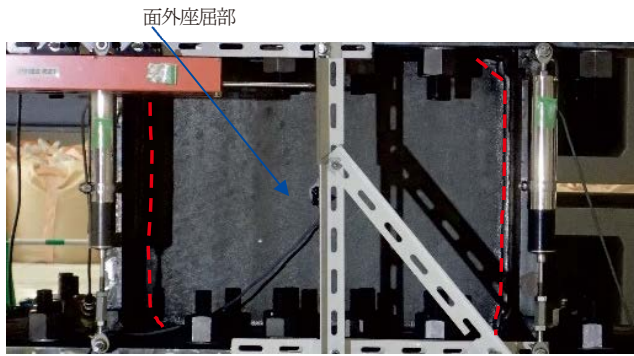
$$K_2 = \beta \cdot K_1 \quad (3)$$

Q_y ：ウェブ PL のせん断強度、 σ_{wy} ：ウェブ PL の降伏応力度、 t_w ：ウェブ PL の板厚、 d ：パネルの幅、 K_1 ：パネルの第1剛性、 G ：パネルのせん断弾性係数、 h ：パネルの高さ、 β ：剛性低下率

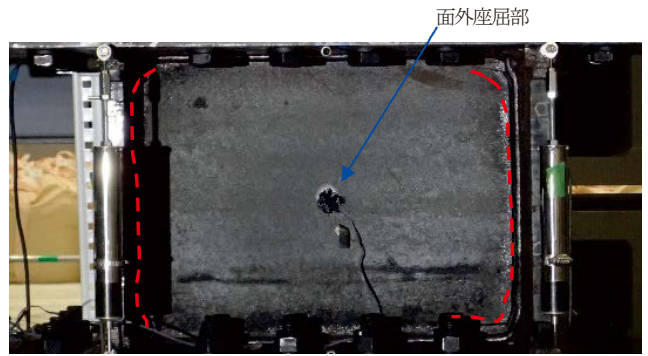
6. 低降伏点鋼パネルの疲労特性

定振幅載荷を行った各試験体について、ピーク時荷重が最大耐力の90%まで低下した時点低降伏点鋼パネルの疲労寿命、すなわち耐用回数 N_f とし、式 (4) に示す Manson-Coffin 型の疲労予測式⁴⁾の適用性を検討した。

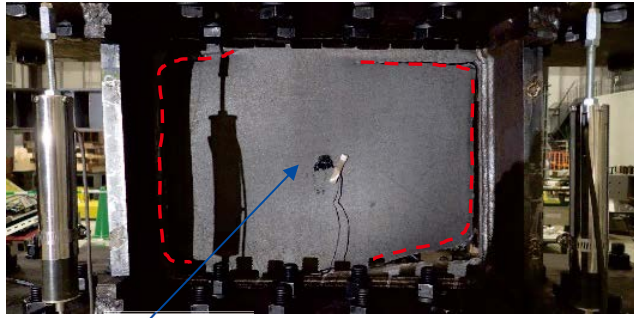
表3に示す定振幅載荷試験体の実験結果を用いて算定した実験定数の平均は $\gamma_f=0.522$ 、 $C=2.22$ であった。ピーク時荷重が最大耐力の90%まで低下した時のせん断変形角片振幅 γ_a と耐用回数 N_f の関係を、式 (4) より



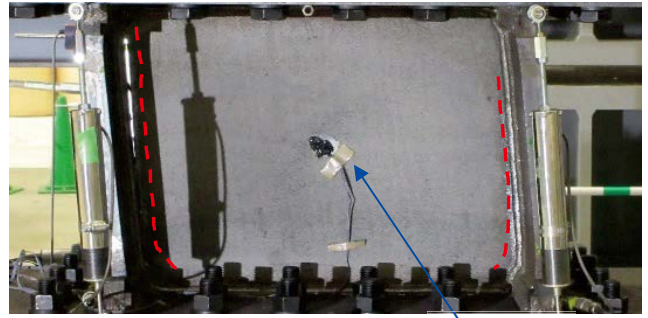
(a) P-100 試験体



(b) P-70 試験体



(c) P-20 試験体



(d) P-I 試験体

写真 1 最終破壊状況 (赤点線：亀裂発生位置)

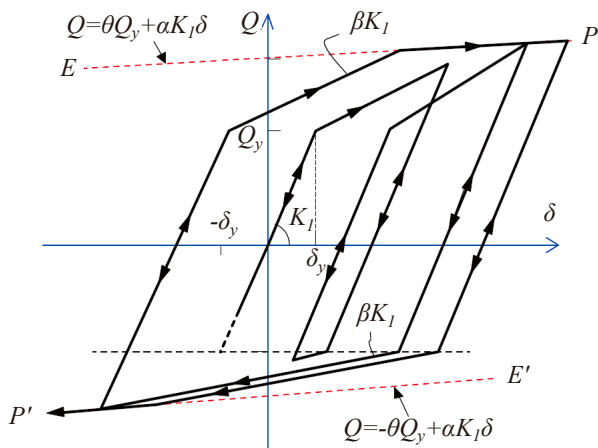


図 7 復元力特性 (Tri-Linear モデル)

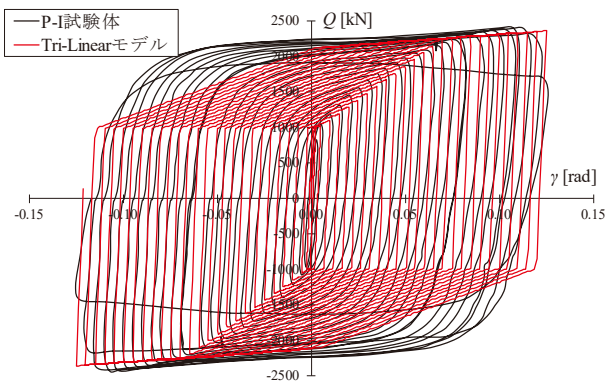


図 8 復元力モデルと実験値の比較

表 3 定振幅載荷試験体の実験結果一覧

試験体	N_f [回]	γ_a [rad]	γ_f [rad]	C
P-100	3528	0.010	0.541	2.22
P-70	1328	0.014	0.498	2.22
P-20	94	0.050	0.528	2.22
平均	—	—	0.522	2.22

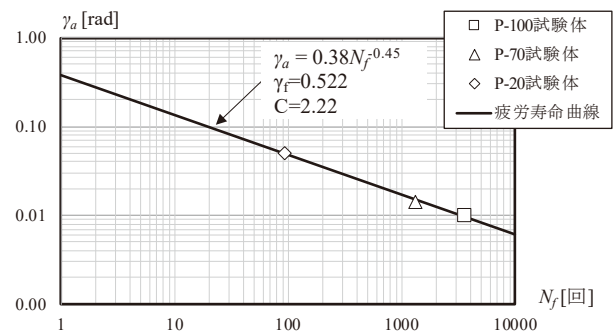


図 9 疲労寿命曲線

得られた疲労寿命曲線と合わせて図 9 に示す。

$$N_f = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\gamma_a}{\gamma_f} \right|^{-C} \quad (4)$$

γ_a ：せん断変形角片振幅, N_f ：低降伏点鋼パネルの耐用回数 (半サイクル数), γ_{fc} ：実験定数

次に、式 (5) に示す Miner の線形累積損傷則による本低降伏点鋼パネルの変動振幅下での疲労限界評価を行う。Miner 則では累積損傷度 D_f が 1 となった時点疲労寿命と仮定している。漸増載荷を行った P-I 試験体にお

いて、せん断変形角片振幅をレインフロー法^{5)~6)}により計数し、式(5)より累積損傷度 D_f を求めると、+23/200rad サイクル目に D_f が1を超える予測となった。実験では+24/200rad サイクル目にピーク時荷重が最大荷重の90%まで低下している。よって、本実験で定めた Manson-Coffin 型の疲労予測式をもとにした Miner 則によって、変動振幅下での本低降伏点鋼パネルの疲労寿命を適切、かつ安全側に評価できると考えられる。

$$D_f = \sum (n_i / N_{fi}) \quad (5)$$

D_f : 累積損傷度, n_i : ランダムなひずみ振幅のうち、振幅レベル i が生じた回数, N_{fi} : 振幅レベル i に対して式(4)より得られる耐力低下までの繰返し半サイクル数

7. TODA BUILDING での設計事例

前章までに定義した評価式を用いた TODA BUILDING における低降伏点鋼パネルの設計事例を示す。低降伏点鋼パネルは、風荷重時には損傷させず、地震時にのみ損傷を許容する設計とした(表4)。

建物モデルは柱梁等の構造部材を線要素に置換した立体フレームモデルとし、検討用地震動は大地震を想定したレベル2(L2)の告示波とした⁷⁾。

低降伏点鋼パネルのせん断応力-ひずみ関係を図10に示す。全層において低降伏点鋼パネルがせん断降伏し、14階では1.5%を超えるせん断ひずみが生じている。得られた履歴曲線からレインフロー法によるサイクル計数

表4 低降伏点鋼パネルの設計クライテリア

設計用外力	極めて稀に発生する風 (再現期間500年)	稀に発生する地震動 (L1)	極めて稀に発生する地震動 (L2)
累積損傷度の安全率	損傷させない	10以上	2以上

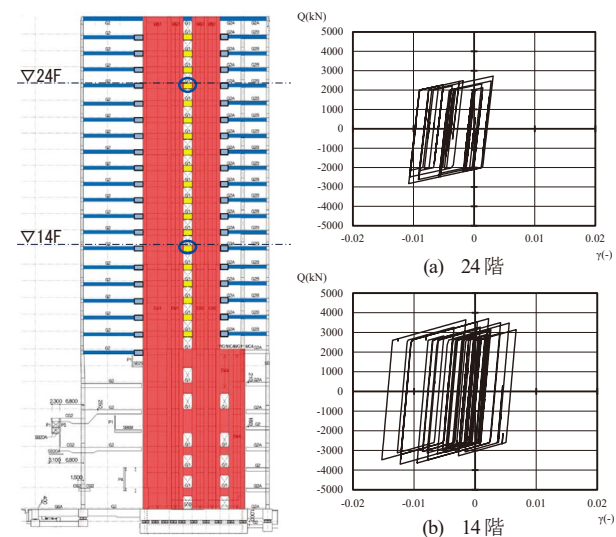


図10 低降伏点鋼パネルのせん断応力-ひずみ関係 (CODE-HA-L2 X方向)

法により累積損傷度を算出した結果を図11に示す。大きなせん断ひずみを生じる14階の方が累積損傷度は大きいですが、安全率は73程度であり設計クライテリアを満足することを確認している。

8. まとめ

本稿では、耐力向上のために改良した低降伏点鋼パネルの定振幅載荷、漸増載荷実験ならびに実施物件への設計事例を示し、以下の知見を得た。

- 1) 本低降伏点鋼パネルは Tri-Linear 型のせん断ばねとしてモデル化することができ、実験値を安全側に評価することができる。
- 2) ピーク時荷重が最大耐力の90%まで低下した時点のせん断変形角片振幅と耐用回数の関係は、定振幅載荷試験体の実験結果から Manson-Coffin 型の疲労予測式で評価することができる。
- 3) 定振幅載荷試験体の実験結果より定めた Manson-Coffin 型の疲労予測式を元にした Miner 則より、本低降伏点鋼パネルの疲労寿命を適切に評価できる。
- 4) 設計事例より極めて稀に発生する地震動に対しても十分な累積損傷度の安全率を確保できる。

謝辞

本稿は、TODA BUILDING 対応技術の開発 PJ および超高層 RCPJ の成果の一部をまとめたものである。構造実験においては、当該 PJ メンバーにはご助言とご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

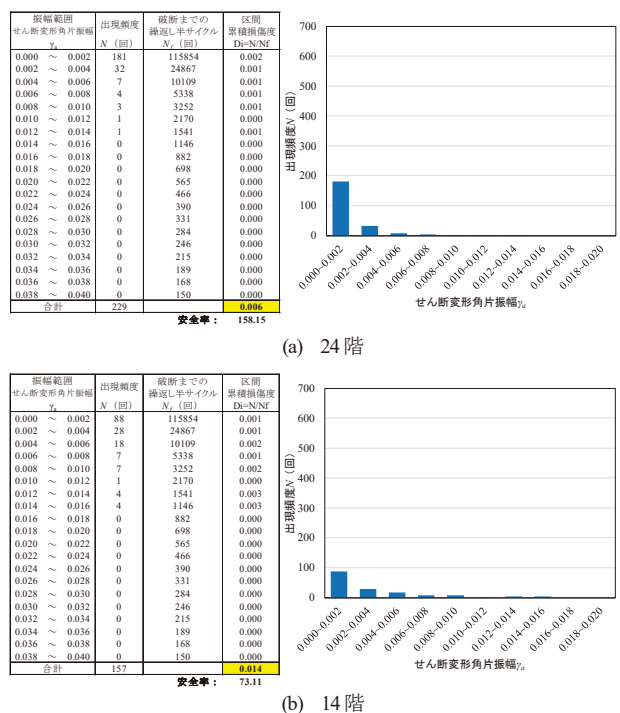


図11 低降伏点鋼パネルの累積損傷度 (CODE-HA-L2 X方向)

参考文献

- 1) 山内他：低降伏点鋼を用いた制震部材に関する実験的研究
(その1) 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集,
pp.785-786, 1998.9
- 2) 竹中他：低降伏点鋼を用いた非埋込み型 RC・S 造複合梁の
耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.60B,
pp.81-88, 2014.3
- 3) 構造システム：SNAP Ver.7 テクニカルマニュアル, pp.5-
44, 2019.4
- 4) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針, 2014.11
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説,
pp.261-264, 技報堂, 1993
- 6) 遠藤他：レインフロー法の考え方とその応用, 日本造船学
会誌, 第706号, pp.2-11, 1988.4
- 7) 清水他：TODA BUILDING, 鉄構技術, VOL.37, No.430, pp.34-
11, 2024.3