

構造用鋼材の繰り返しせん断特性に関する実験的研究

福山大学 正会員 上野谷 実 福山大学 正会員 中村 雅樹
日本鋼管(株) 山本 定弘 福山大学大学院 学生会員○石田 俊介

1.まえがき

構造用鋼材のせん断試験の載荷方法として、福山大学で張出しばり型のせん断試験装置を考案した。本装置により地震エネルギーの吸収ダンパーの材料として使用されている低降伏点鋼(LY鋼)および普通鋼(SM鋼)の繰返しせん断試験を行い、強度、塑性変形性能、エネルギー吸収性能について比較・検討する。

2. 試験片及び実験方法

せん断試験装置を図-1(a)に示す。荷重は精密万能試験機オートグラフにより載荷した。このオートグラフの容量は引張、圧縮ともに最大 250 kN(25t)である。また、3kN を載荷したときのせん断力図と曲げモーメント図を図-1(b)に示す。試験片の形状寸法を図-2 に示す。引張試験結果の材料特性と応力-ひずみ曲線をそれぞれ表-1 と図-3 に示す。低降伏点鋼は明確な降伏点およびひずみ勾配が現れないため、降伏応力は 0.2%オフセット耐力とし、ヤング率 E およびポアソン比 ν の値は公称値を示す。

変位計の設置位置が離れているため測定値には、せん断試験部分以外の部材の曲げ変形やせん断変形による変位が含まれるので、はり理論で弾性荷重法による補正を行う。曲げ補正変位を δ_m 、せん断補正変位を δ_s 、全補正変位を δ_h とし式(1),(2),(3)に定義する。

$$\delta_m = \frac{PL_1^2}{2EI_1} \left(\frac{1}{3}L_1 + L_2 + \frac{1}{6}L_3 \right) + \frac{PL_2(2L_1 + L_2)}{2EI_2} \left(\frac{3L_1 + L_2}{2L_1 + L_2} \cdot \frac{1}{3}L_2 + \frac{1}{6}L_3 \right) + \frac{PL_3^2}{216EI_3} \left(L_1 + L_2 - \frac{1}{6}L_3 \right) \quad (1)$$

$$\delta_s = \gamma_2 L_2 + \gamma_3 \frac{L_3}{6} \quad (2)$$

$$\delta_h = \delta_m + \delta_s \quad (3)$$

ここで、P:荷重,EI:曲げ剛性, γ_2 , γ_3 : L_2 , L_3 区間の平均せん断ひずみである。

図-4 はせん断パネルが純せん断を受ける場合の変形を示す。降伏せん断変位 δ_y を式(7)で定義する。

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} \quad (4) \quad G = E/2(1+\nu) \quad (5) \quad \gamma_y = \tau_y/G \quad (6) \quad \delta_y = \gamma_y \cdot b \quad (7)$$

ここで、 σ_y :降伏応力, τ_y :降伏せん断応力, G:せん断弾性係数, γ_y : 降伏せん断ひずみ E:ヤング率, ν :ポアソン比, b:ウェブ幅である。降伏せん断変位 δ_y に補正変位 δ_h を加えたものを基本変位 δ_{yh} とし式(8)に定義する。

$$\delta_{yh} = \delta_y + \delta_h \quad (8)$$

単調載荷は引張を正のせん断とし載荷を行った。それに対して繰り返し載荷では、図-5 に示すような繰り返し基本変位 δ_{yh} の整数倍の変位を片振幅とした両振り載荷を行った。

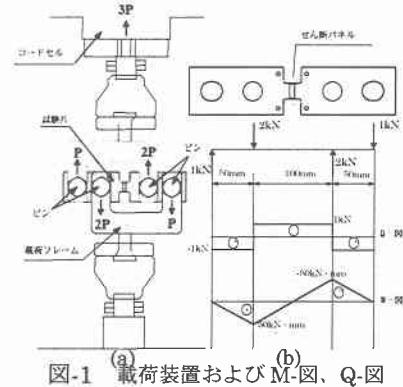


図-1 載荷装置およびM-図、Q-図

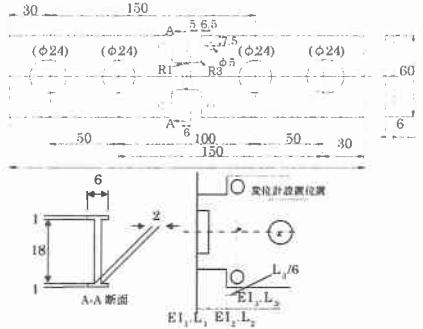


図-2 試験片

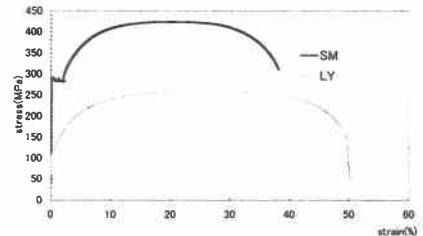
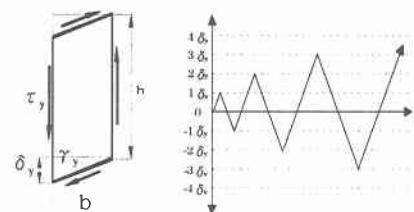


図-3 応力-ひずみ曲線

図-4 降伏せん断変位 図-5 載荷サイクル
表-1 材料特性

鋼種	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	伸び ϵ_u (%)
SM 400	206	0.28	280.2	418.7	38.1
LY 100	200	0.3	111.8	258.3	50.2

3.実験結果及び考察

試験片の名称において、鋼種の次に示す記号は M：単調載荷 C：繰返し載荷を意味する。図-6 に単調載荷実験による平均せん断応力－せん断ひずみ曲線を示す。SM 鋼および LY 鋼はともに、約 25rad%からピークまで直線的な強度上昇が見られる。SM-M と LY-M のピークを比較すると、最大平均せん断強さは SM-M が LY-M の 1.48 倍であり、引張強さ σ_u の比の 1.62 倍に比べやや小さくなる。破断時のせん断ひずみは LY-M が SM-M の 1.19 倍である。引張試験のひずみをせん断ひずみに換算して塑性変形を比較すると、せん断試験では引張試験の約 3 倍のひずみが生じている。これは、せん断試験では引張試験のようなくびれが生じないからである。単調載荷の破断は対角線方向に生じた。

図-7 に平均せん断応力－せん断ひずみ履歴曲線を示す。SM 鋼の最大せん断応力 $\tau_u = 422 \text{ MPa}$ は降伏応力の 2.76 倍、LY 鋼の最大せん断応力 $\tau_u = 342 \text{ MPa}$ は降伏応力の 6.58 倍であった。SM は LY の 1.23 倍であり、単調載荷の 1.48 倍に比べ差が小さい。これは LY 鋼の繰返しにおけるひずみ硬化が著しいことを示している。繰返し載荷時の破断はせん断パネルの右側境界線に沿って亀裂が生じ、その後、上フランジが破壊し完全に破断した。

図-8 に繰返し載荷の包絡線と単調載荷を示す。繰返し載荷はひずみ履歴が長いため、ひずみ硬化による強度上昇が見られる。また、塑性変形性能は SM 鋼および LY 鋼とともに単調載荷の約 1/4 に低下した。

図-9 にエネルギー吸収量を示す。せん断応力－せん断ひずみ履歴曲線において、各サイクルの履歴ループの面積が、そのサイクルにおける鋼材のエネルギー吸収量を示す。エネルギー吸収量は SM 鋼および LY 鋼とともにピークまで比例的に増加している。SM は LY に比べ強度に優れているのでエネルギー吸収率が大きい。LY は SM に比べエネルギー吸収率に劣るが、塑性変形性能に優れているので最大エネルギー吸収量は大きい。したがって、LY は SM の 1.35 倍のエネルギー吸収能力を有している。

4.まとめ

せん断試験における普通鋼および低降伏点鋼の強度、塑性変形性能、エネルギー吸収性能に関して以下の事が明らかになった。

- (1) 強度において、単調載荷では普通鋼が低降伏点鋼に対し 1.48 倍の強度を有する。繰返し載荷では低降伏点鋼と普通鋼ともに、ひずみ履歴が長くなりひずみ硬化による強度上昇が生じる。とくに、低降伏点鋼は繰返しにおけるひずみ硬化が著しい。
- (2) 塑性変形性能において、単調載荷は引張試験のようなくびれが生じないので約 3 倍の塑性変形を生じる。繰返し載荷の塑性変形性能は単調載荷の約 1/4 に低下する。
- (3) エネルギー吸収量において、普通鋼および低降伏点鋼とともにピークまで比例的に増加する。また、普通鋼は強度が大きいのでエネルギー吸収率に優れて、低降伏点鋼は塑性変形性能が大きいのでエネルギー吸収量に優れる。低降伏点鋼は普通鋼に比べ、1.35 倍のエネルギー吸収性能を有する。

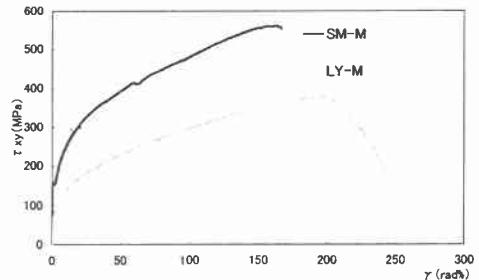


図-6 平均せん断応力－せん断ひずみ曲線

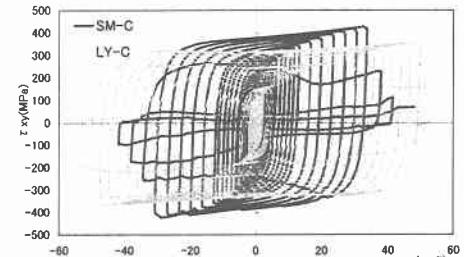


図-7 せん断応力－せん断ひずみ履歴曲線

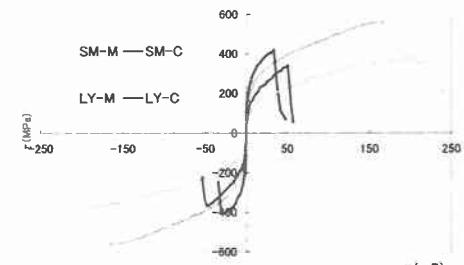


図-8 繰返し載荷の包絡線と単調載荷

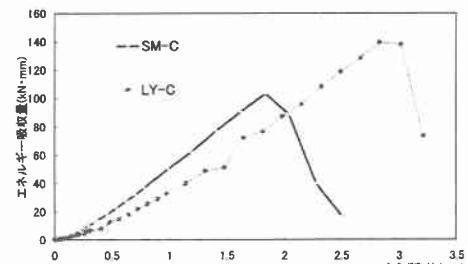


図-9 エネルギー吸収量