

鋼製ラーメン橋脚はりの繰り返しせん断挙動に関する 実験的検討

西岡勉¹・長沼敏彦²・平野敏彦³・園田恵一郎⁴・吉川紀⁵・松田泰英⁶

¹正会員 阪神高速道路（株）湾岸管理部（〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1900）

²正会員 阪神高速道路管理技術センター（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

³正会員 阪神高速道路（株）技術管理室（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

⁴正会員 大阪市立大学名誉教授

⁵正会員 大阪工業大学八幡工学実験場（〒614-8289 八幡市美濃山一ノ谷4）

⁶正会員 石川島播磨重工業（株）（〒541-0053 大阪市中央区本町4-2-12）

1. はじめに

鋼製ラーメン橋脚の面内方向の地震時の挙動として、ラーメンはりにせん断力が卓越する場合があります。兵庫県南部地震において、写真-1, 2に示すように鋼製ラーメン橋脚のはりウェブにせん断座屈が生じた事例がある。しかし、鋼製ラーメン橋脚のはりウェブのせん断非線形挙動は、はり部材の急激な耐力低下を伴わず、上部構造の支持機能に対して致命的な損傷でなく、大規模地震に対するエネルギー吸収部材として利用する考え方がある。阪神高速道路では、上記の考え方をもとに鋼製ラーメン橋脚のはりウェブのせん断非線形挙動を面内方向の耐震設計に取り入れ、はり部材の断面設計を実施している。

鋼製ラーメン橋脚はりウェブのせん断非線形挙動に関しては、葛西ら¹⁾の繰り返しせん断力を受ける補剛板の強度と変形性能の解析的検討、森下ら²⁾の繰り返しせん断力に対する鋼製箱断面はりの非線形挙動の実験的検討、上記実験に対応したPraweenら³⁾の解析的検討などが行われ、耐震設計に用いる鋼製ラーメン橋脚はりのウェブのせん断変形に関する非線形特性のモデル化も行われている。⁴⁾

本文では、鋼製ラーメン橋脚のはりを対象に高さ0.9m、幅0.8m、厚さ9mmのウェブパネルをもつ箱形断面の供試体の繰り返しせん断力載荷を行い、はりウェブのせん断変形に関する耐力、変形性能、履歴特性を確認することを目的として実施した実験について報告する。

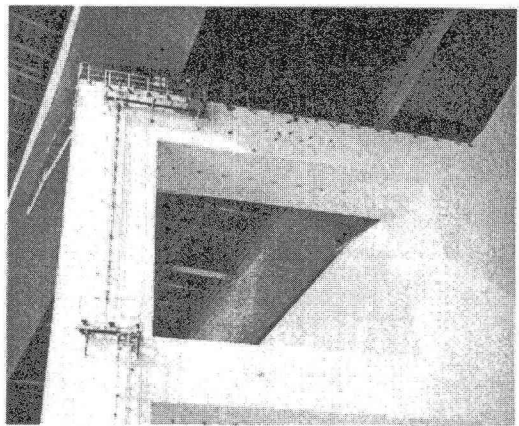


写真-1 鋼製橋脚の上段はりウェブのせん断座屈の例

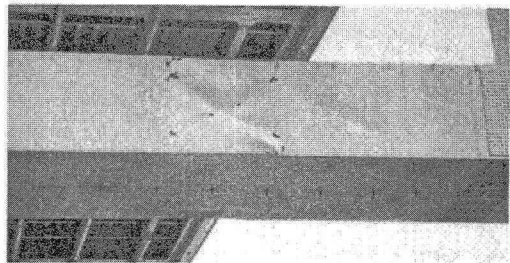


写真-2 鋼製橋脚の中間はりウェブのせん断座屈の例

2. 鋼製ラーメン橋脚はりの繰り返しせん断実験

(1) 実験の目的

大規模地震に対する鋼製ラーメン橋脚はりウェブ

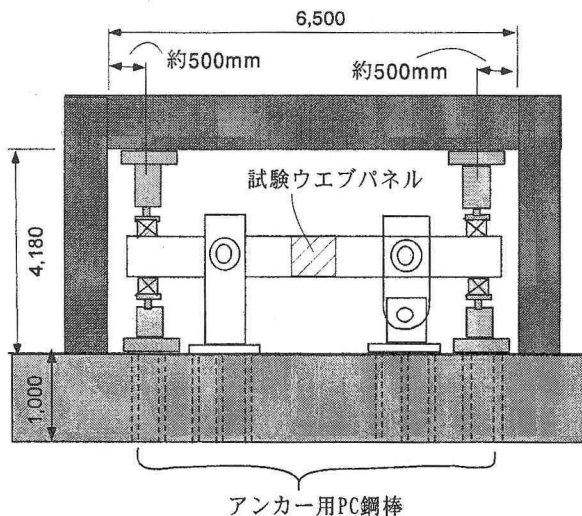


図-1 載荷装置の概要図 (単位: mm)

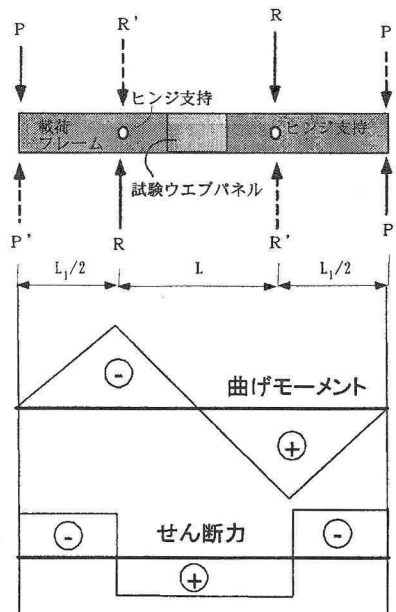


図-2 載荷装置による荷重と供試体に作用する曲げモーメント・せん断力の関係

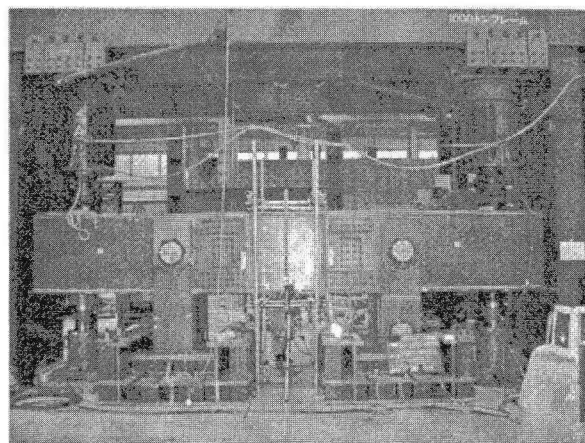


写真-3 載荷装置の全景

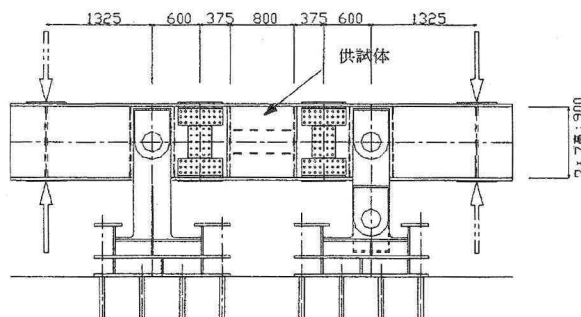


図-3 載荷装置の構造図 (単位: mm)

表-1 供試体の種類

供試体 No.	補剛材段数(R_t)	補剛材剛比 $\gamma_{l,req}$
①	0 段 ($R_t = 1.097$)	$1.0 \times \gamma_s^*$
②	1 段 ($R_t = 0.700$)	
③	2 段 ($R_t = 0.494$)	$0.5 \times \gamma_s^*$
④		$2.0 \times \gamma_s^*$
⑤		

のせん断非線形挙動を調べるために、鋼製ラーメン橋脚のはり部材をモデル化した供試体に繰り返しのせん断力を作用させ、はりウェブパネルのせん断変形に関する耐力、変形性能、履歴特性を確認することを目的とする。

実験では、はりウェブパネルのせん断幅厚比パラメータ R_t 、補剛材剛比 $\gamma_{l,req}$ に着目し、これらのパラメータがはりウェブパネルのせん断変形に関する耐力、変形性能、履歴特性に及ぼす影響を調べる。

(2) せん断力載荷方法と供試体

鋼製ラーメン橋脚のはりに対して地震時にせん断

力が卓越する載荷状態を模擬するために、図-1 に示すように、中央部に試験ウェブパネルを設けた張り出しばりの両端に上下方向に油圧ジャッキを据付け、門形フレームと反力床を利用して交番荷重を与える載荷方法を採用した。油圧ジャッキの容量は5,000kNである。載荷装置による荷重と供試体に作用する曲げモーメント・せん断力の関係を図-2 に示す。試験ウェブパネルにおいてせん断力が一定となり、曲げモーメントが小さくなる載荷方法である。載荷装置の全景と構造をそれぞれ、写真-3、図-3 に示す。

供試体は、鋼製ラーメン橋脚のはりをモデル化し

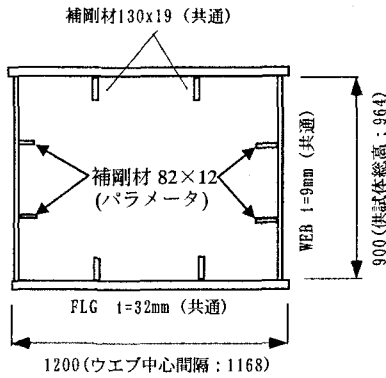


図-4 供試体の断面図の例(供試体③, 単位: mm)

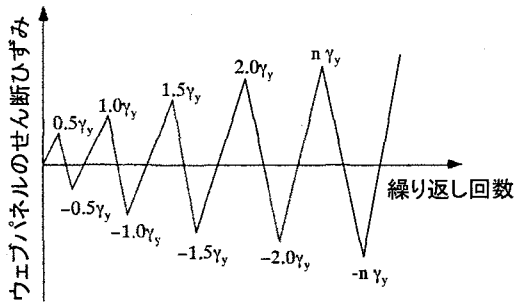


図-5 荷重サイクル

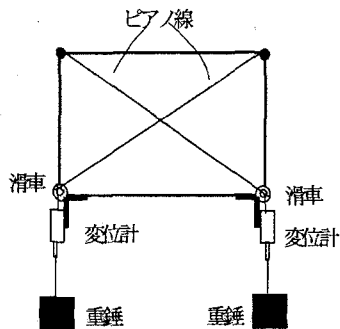


図-6 試験ウェブパネルの対角線変位の計測方法

た箱形断面で荷重治具から取り外し可能な構造としている。着目したパラメータは、試験ウェブパネルのせん断幅厚比パラメータ R_τ と補剛材剛比 $\gamma_{l,req}$ である。供試体は合計 5 体で、外形寸法、板厚、鋼材材質(SM490Y)は同じであるが、補剛材段数と補剛材寸法を変えることにより R_τ と $\gamma_{l,req}$ を変化させている。各供試体の補剛材段数、 R_τ 、 $\gamma_{l,req}$ を表-1 に示す。 R_τ は式(1)により算定した。

$$R_\tau = \frac{B}{nt} \sqrt{\frac{\tau_y \cdot 12(1-\nu^2)}{E \pi^2 k_F}} \quad (1)$$

ここに、 R_τ : せん断幅厚比パラメータ、 B : 試験ウェブパネルの高さ(=0.9m)、 t : 試験ウェブパネルの板厚(=9mm)、 n : 補剛材によって区切られるパネル数、 τ_y : 鋼材のせん断降伏点 (N/mm^2)、 E : ヤング係数 (N/mm^2)、 ν : ポアソン比 (=0.3)、 k_F : 座屈係数で、 $k_F = 5.34 + 4.0/\alpha^2$ ($\alpha \leq 1$)、 $k_F = 4.0 + 5.34/\alpha^2$ ($\alpha > 1$)、 α : 補剛材で区切られるパネルのアスペクト比 (横辺/縦辺) である。補剛材段数を 0, 1, 2 段とし、 $R_\tau = 1.097 \sim 0.494$ まで変化させている。

$\gamma_{l,req}$ は、せん断に関する必要剛比 γ_s^* の 0.5, 1.0, 2.0 倍と変化させた。せん断に関する必要剛比 γ_s^* は式(2)により算定した。

$$\gamma_s^* = 5.4\alpha^2(2\alpha + 2.5\alpha^2 - \alpha^3 - 1) \quad (2)$$

($n = 2, 0.5 \leq \alpha \leq 2.0$)

ここに、 α : 補剛材で区切られるパネルのアスペクト比、 n : パネル数である。供試体③の断面の例を図-4に示す。

荷重は、式(3)で算出する試験ウェブパネルの降伏せん断ひずみ γ_y に対して図-5に示すような繰り返し荷重を行った。

$$\gamma_y = \frac{\tau_y}{G} \quad (3)$$

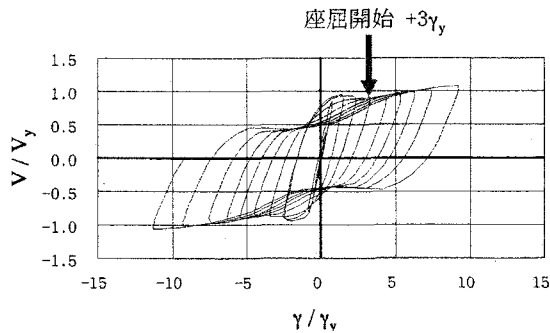
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

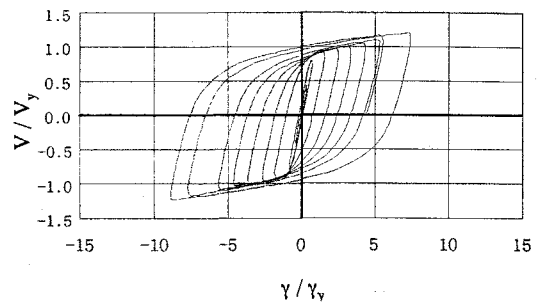
ここに、 τ_y : 鋼材のせん断降伏点 (N/mm^2)、 G : せん断弾性係数 (N/mm^2)、 E : ヤング係数 (N/mm^2)、 ν : ポアソン比 (=0.3)、 σ_y : 鋼材の引張降伏点 (N/mm^2) である。なお、鋼材の引張試験より $\sigma_y = 411 N/mm^2$ 、 $E = 2.028 \times 10^5 N/mm^2$ である。

(3) せん断力-せん断ひずみの関係

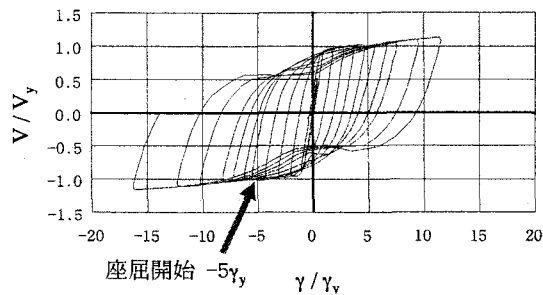
試験ウェブパネルに作用するせん断力 V は、ロードセルにより計測するジャッキ荷重 P から算定した。試験ウェブパネルのせん断ひずみは図-6に示す方法により対角線変位を計測し、対角線の伸縮量の差をもとに式(6)により算定した。



(a) 供試体① ($R_r=1.097, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s^*$)



(c) 供試体③ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s^*$)



(b) 供試体② ($R_r=0.700, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s^*$)

図-7.1 せん断力比-せん断ひずみ比の関係

$$\gamma = \frac{d_2 - d_1}{2ab} \sqrt{a^2 + b^2} \quad (6)$$

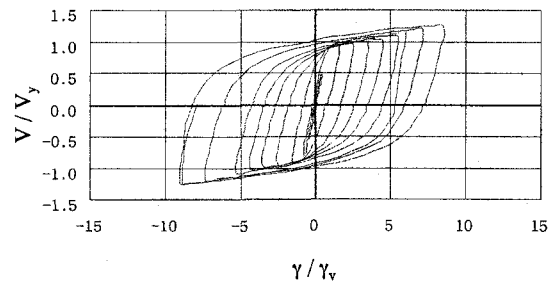
ここに、 d_1, d_2 : 試験ウェブパネルのそれぞれ、短い方、長い方の対角線長さ、 a : 試験ウェブパネルの幅(=0.8m)、 b : 試験ウェブパネルの高さ(=0.9m)である。

供試体①～⑤の試験ウェブパネルのせん断力比(V/V_y)とせん断ひずみ比(γ/γ_y)の関係を図-7.1, 7.2 に示す。 γ は、2枚の試験ウェブパネルのせん断ひずみの平均値である。 V_y は、式(7)で算定する試験ウェブパネル2枚分の降伏せん断力である。

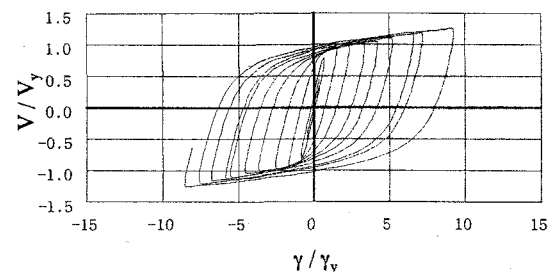
$$V_y = 2\tau_y Bt \quad (7)$$

ここに、 τ_y : 鋼材のせん断降伏点(N/mm^2)、 B : 試験ウェブパネルの高さ(=0.9m)、 t : 試験ウェブパネルの板厚(=9mm)である。

供試体①では、 $+3\gamma_y$ のサイクルで試験ウェブパネルに座屈が観察され、座屈前の紡錘形の履歴曲線が座屈後にスリップ形の履歴曲線に移行した。供試体②では $-5\gamma_y$ のサイクルで試験ウェブパネルに座屈が観察され、 $+7\gamma_y$ で紡錘形からスリップ形の履歴曲線



(d) 供試体④ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=0.5\gamma_s^*$)



(e) 供試体⑤ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=2.0\gamma_s^*$)

図-7.2 せん断力比-せん断ひずみ比の関係

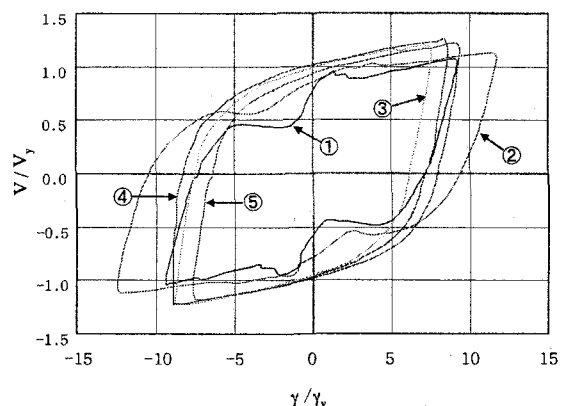


図-8 せん断力比-せん断ひずみ比の履歴の包絡線の比較 (図中の丸囲いの数字が供試体番号を示す。)

に移行した。供試体②の試験ウェブパネルの座屈からスリップ形の履歴曲線に移行するまでに少し間隔があるのは、1段水平補剛材による試験ウェブパネルの拘束が影響していると考えられる。一方、供試

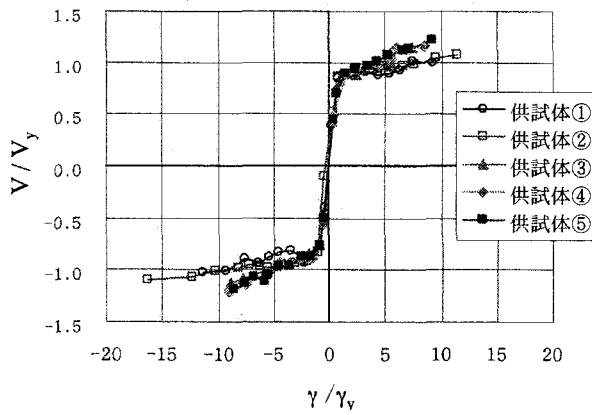


図-9 各载荷サイクルのウェブパネルの最大せん断力比と対応するせん断ひずみ比の関係

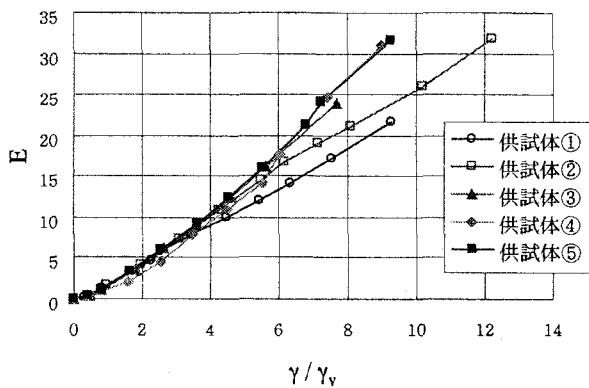
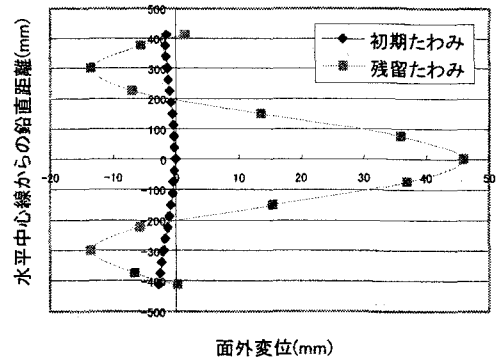


図-10 ウェブパネルの吸収エネルギー

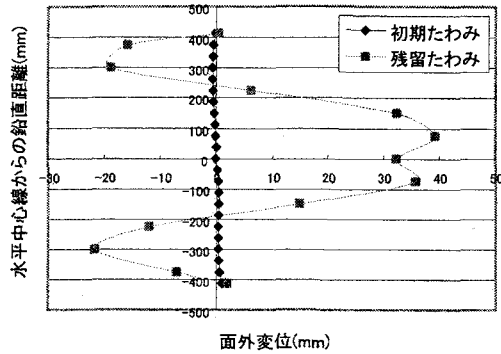
供試体③, ④, ⑤では座屈が観察されず, $10\gamma_y$ 付近まで紡錘形の履歴形状を維持した。

供試体①~⑤の試験ウェブパネルのせん断力比 (V/V_y) とせん断ひずみ比 (γ/γ_y) の履歴の包絡線の比較を図-8に示す。供試体③, ④, ⑤では, 安定した紡錘形であるが, 供試体①, ②では, 試験ウェブパネルの座屈の影響のためスリップ形であることが確認できる。

各载荷サイクルの試験ウェブパネルの最大せん断力比と対応するせん断ひずみ比の関係を図-9に示す。座屈時のせん断力比 (せん断座屈耐力比) は, 供試体①で $V/V_y=0.928$ 供試体②で $V/V_y=1.016$ である。一方, 供試体③, ④, ⑤では座屈が確認できなかったため, せん断座屈耐力は载荷荷重の最大値以上 ($V/V_y=1.2$ 以上) になっている。また, 座屈を起こした供試体①の最大せん断力比は, 座屈後少し低下 (軟化) し, 再度上昇した。これは, 試験ウェブパネルの斜引張場の形成後の鋼材のひずみ硬化によるものと考えられる。供試体②では, 座屈後の軟化現象が見られず, 最大せん断力比は単調に増加した。



(a) 供試体① ($R_T=1.097, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s$)



(b) 供試体② ($R_T=0.700, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s$)

図-11.1 ウェブパネルの初期たわみと残留たわみの比較

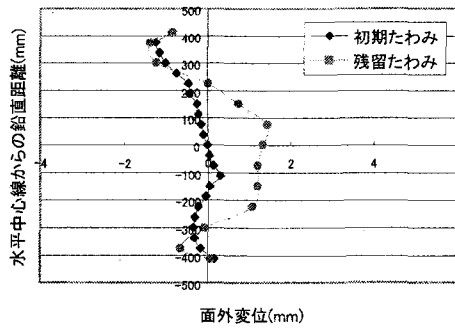
载荷装置の能力の制限により各供試体の最大せん断耐力は明確にならなかったが, $10\gamma_y (=3\%)$ 程度のせん断変形した状態での試験ウェブパネルの保有せん断耐力は, 供試体③, ④, ⑤がほぼ同等で, 供試体①, ②よりも大きかった。これは, 供試体①, ②の試験ウェブパネルの座屈が影響していると考えられる。

(4) 試験ウェブパネルの吸収エネルギー

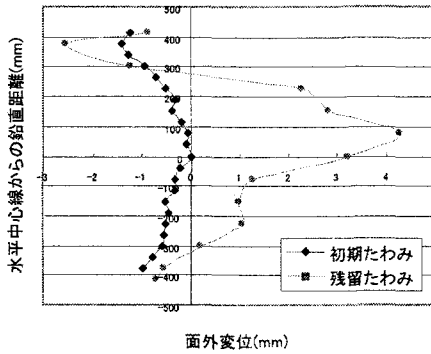
各载荷サイクルでの試験ウェブパネルの吸収エネルギー E (せん断力比とせん断ひずみ比の履歴が描く面積) を図-11に示す。 $5\gamma_y$ よりも大きい範囲の吸収エネルギーは, 供試体①が最小, 次に供試体②が小さく, 供試体③, ④, ⑤がほぼ同等である。座屈の発生による履歴特性のスリップ形への移行が吸収エネルギーの低下に影響していると推測できる。

(5) 試験ウェブパネルの初期たわみと残留たわみ

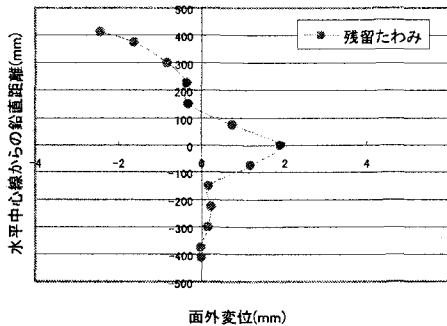
供試体①~⑤の片側(東面)のウェブパネルの中央(鉛直方向の中心線)上の初期たわみと実験終了後の残留たわみの比較を図-11.1, 11.2に示す。供試体①~④の初期たわみは最大で 2mm 程度である(供試体⑤の初期たわみは未計測)。座屈が観察された供試



(c) 供試体③ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=1.0\gamma_s^*$)



(d) 供試体④ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=0.5\gamma_s^*$)



(e) 供試体⑤ ($R_r=0.494, \gamma_{l, req}=2.0\gamma_s^*$)

図-11.2 試験ウェブパネル中央(鉛直方向の中心線)の初期たわみと残留たわみの比較

体①, ②の残留たわみは, それぞれ, 最大で 45mm, 40mm 生じている. 一方, 供試体③, ④, ⑤の残留たわみは, 供試体①, ②に比べてかなり小さい. 供試体③, ④, ⑤の残留たわみを比較すると, $\gamma_{l, req}$ が γ_s^* の 0.5 倍である供試体④の最大残留たわみは 4mm 程度で供試体③, ⑤の最大残留たわみ 1.5~2mm に比べて大きい. 補剛材剛比 $\gamma_{l, req}$ がせん断に関する必要剛比 γ_s^* よりも小さいため残留たわみが大きくなったと考えられる.

3. まとめ

鋼製ラーメン橋脚のはり箱断面の繰り返しせん断載荷を行い, はりウェブのせん断変形に関する耐力, 変形性能, 履歴特性に関する実験を行った. 本実験で得られた主な知見を以下に示す.

- 1) 無補剛の供試体①($R_r=1.097$)および 1 段水平補剛材の供試体②($R_r=0.700$)は, 今回の実験の載荷範囲 ($10\gamma_y \approx 3\%$) で保有せん断耐力の低下は見られなかったが, 試験ウェブパネルのせん断座屈が発生し, 繰り返しせん断力に対する履歴特性は紡錘形からスリップ形に移行した. 一方, 2 段水平補剛材の供試体③, ④, ⑤($R_r=0.494$) は, $10\gamma_y$ の載荷範囲で試験ウェブパネルの座屈が観察されず, 保有せん断耐力が低下せず, 紡錘形の履歴特性を維持した.
- 2) 水平補剛材の剛比を必要剛比の 0.5, 1.0, 2.0 倍の範囲で変化させた供試体③, ④, ⑤ ($R_r=0.494$) の試験ウェブパネルのせん断力-せん断ひずみの履歴特性は, 今回の実験の載荷範囲 ($10\gamma_y$) では, 大きな差がなかった. しかし, 必要剛比よりも小さい水平補剛材を有する供試体④では, 供試体③, ⑤に比べて残留たわみが大きくなる傾向があった.

謝辞: 本実験の実施に当たっては, 阪神高速道路鋼構造検討委員会 (委員長: 渡邊英一京都大学名誉教授) の委員から貴重なご意見をいただいた. また, 同委員会の大久保宣人氏, 田中常夫氏, 木曾収一郎氏には, 供試体および治具の設計, 製作などでご助力をいただいた. ここに感謝の意を表する.

参考文献

- 1) 葛西昭, 渡辺智彦, 天野麻衣, 宇佐美勉: 繰り返しせん断力を受ける補剛板の強度と変形性能評価, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.761-770, 2001.
- 2) 森下宣明, 前野裕文, 岡本隆, 中村信秀, 青木徹彦, 宇佐美勉: 鋼製箱形断面はりのせん断耐力実験: 第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.171-176, 2001.
- 3) Praween Chusilp, 葛漢彬, 宇佐美勉, 森下宣明, 青木徹彦: 鋼製箱形断面はりの繰り返しせん断特性に関する非線形数値解析, 第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.177-184, 2001.
- 4) 森下宣明, 森久芳, 前野裕文, 岡本隆, 野中哲也, 宇佐美勉: 鋼製ラーメン橋脚の梁部せん断座屈を評価した耐震設計, 第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-6, 2003.