

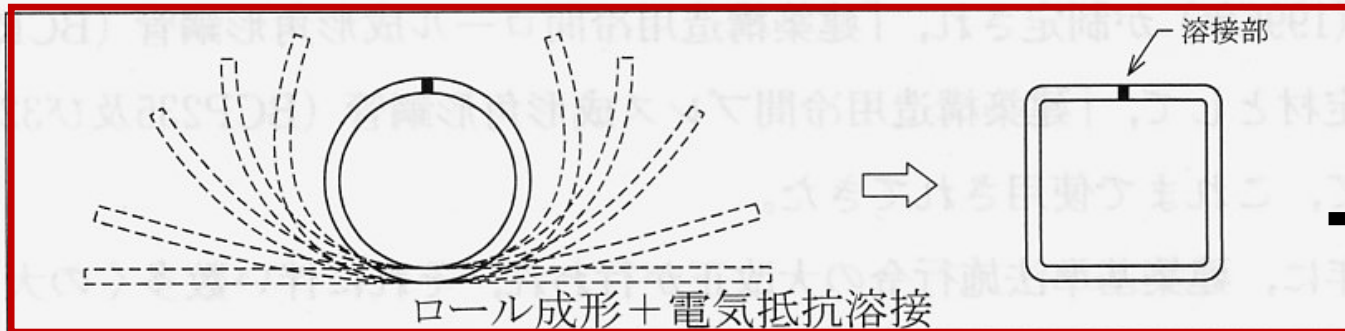
2025.11.7

「鉄骨技術に関わる改善・開発・人材育成のための助成制度」  
成果報告会

# 冷間成形角形鋼管柱一通しダイアフラムの適切な溶接施工法の提案

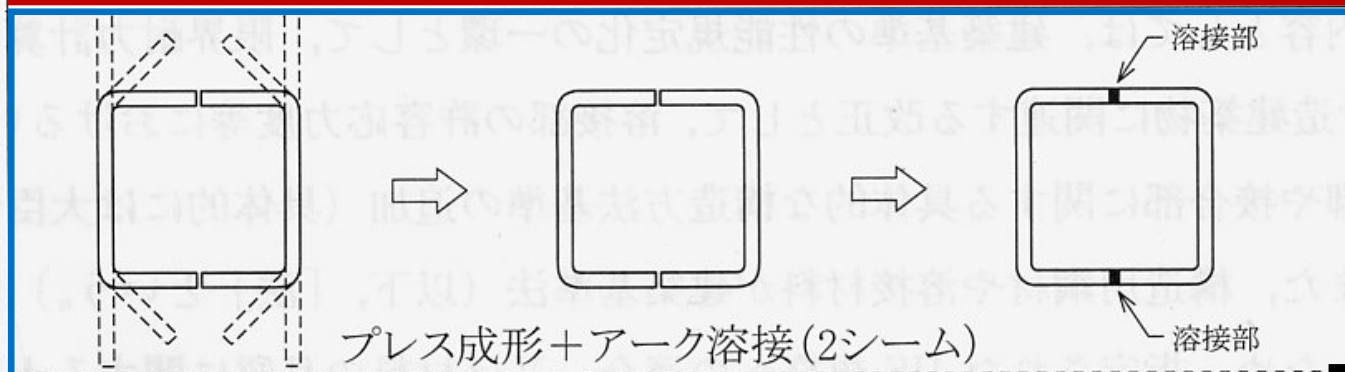
神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

田中 剛



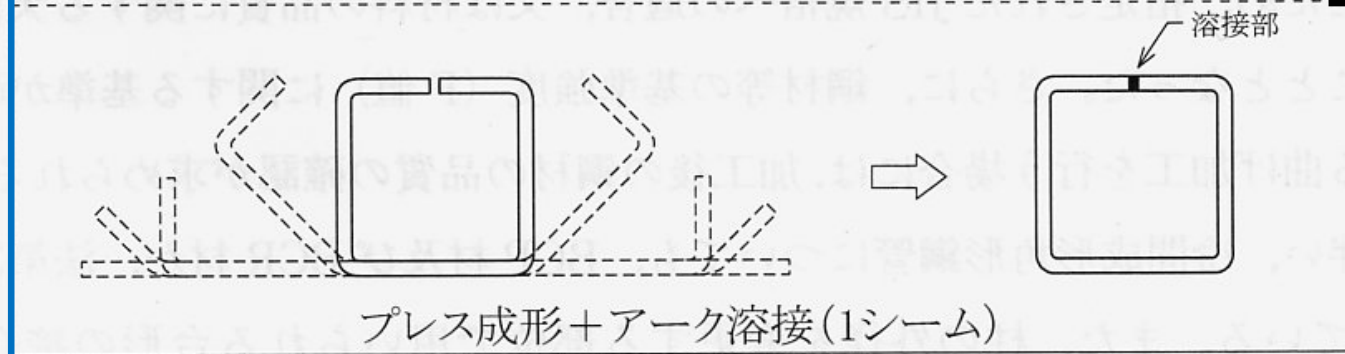
## 冷間ロール成形角形鋼管

建築構造用冷間  
ロール成形角形鋼管  
BCR  
(日本鉄鋼連盟製品規定)

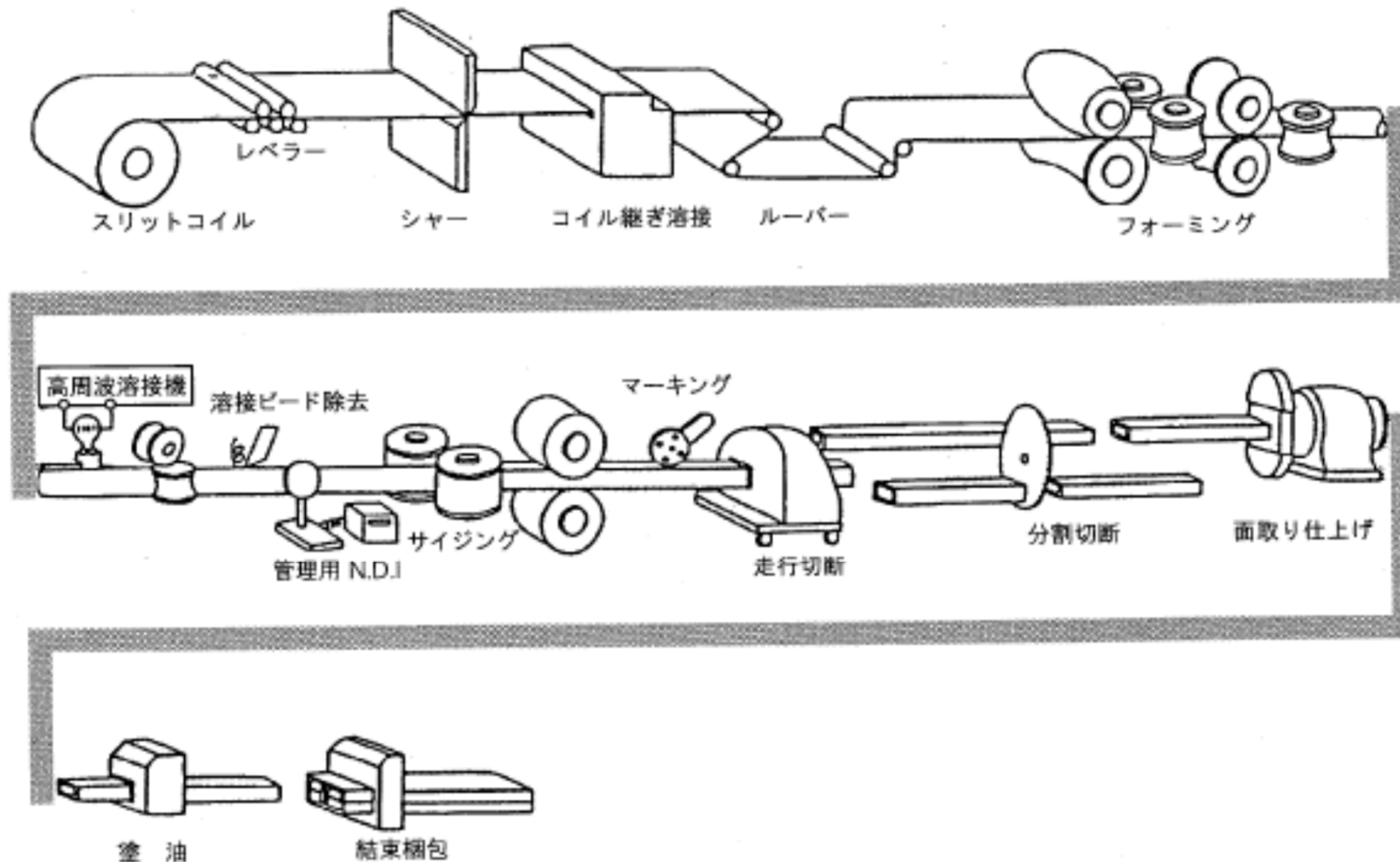


## 冷間プレス成形角形鋼管

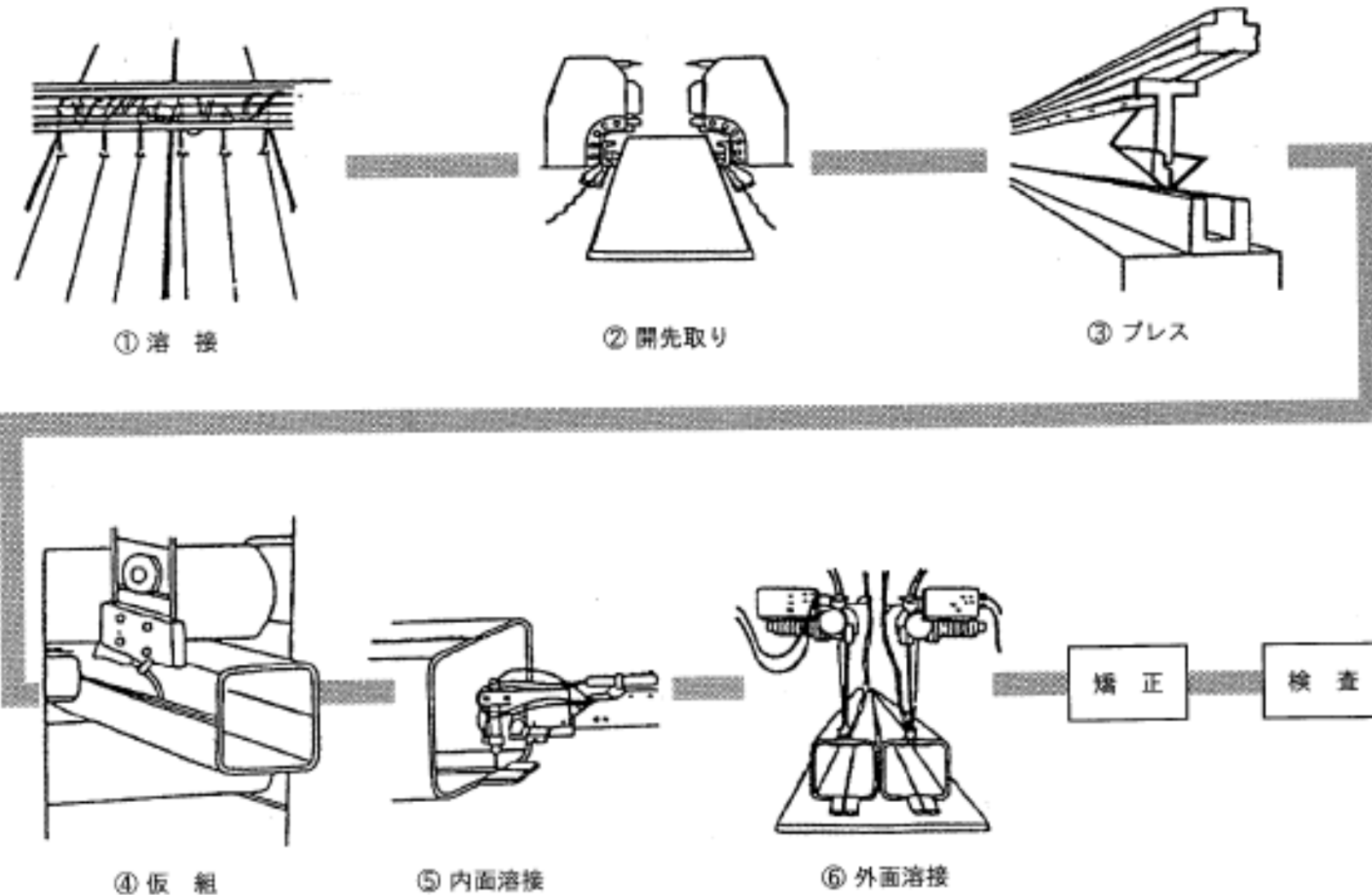
建築構造用冷間  
プレス成形角形鋼管  
BCP  
(日本鉄鋼連盟製品規定)







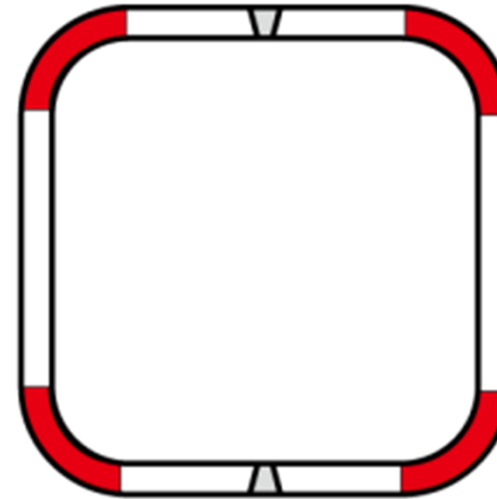
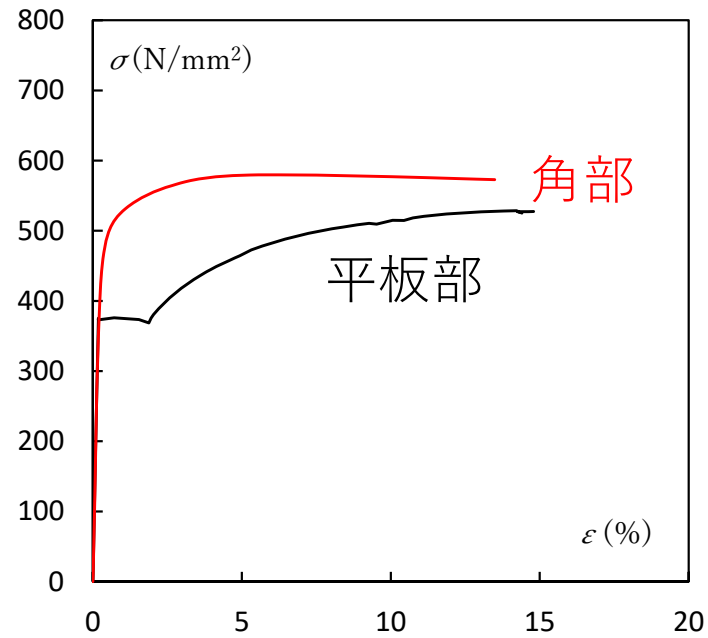
**BCR**の製造範囲 ⇒ 主に中低層建築の柱に使用されている。  
□-150x150x6 ~ □-550x550x25

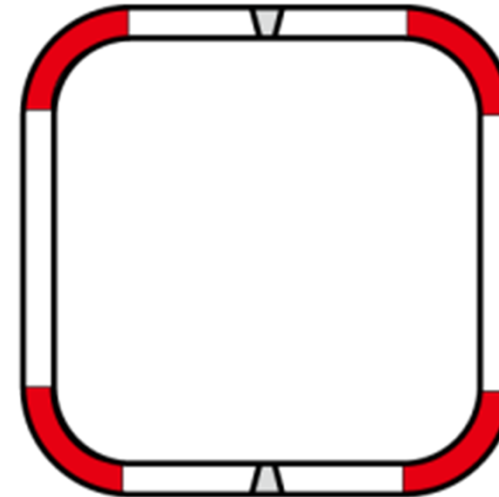
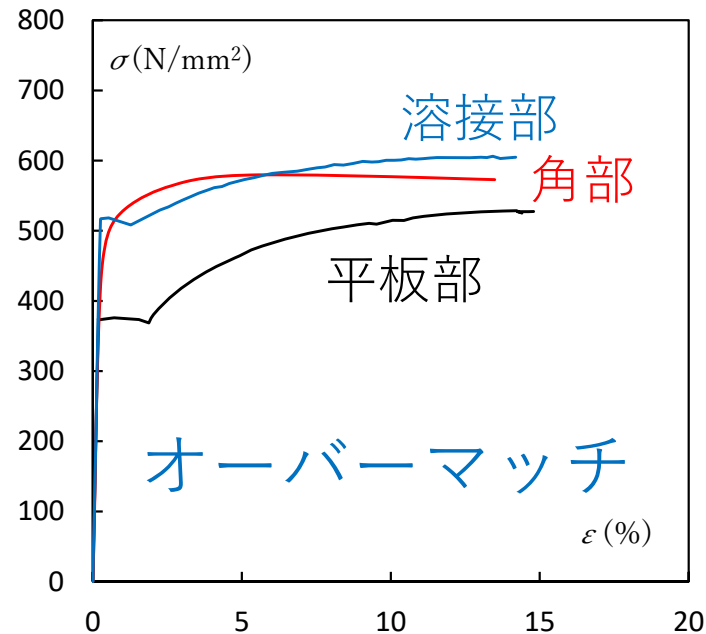


BCPの製造範囲

□-300x300x9 ~ □-1000x1000x40



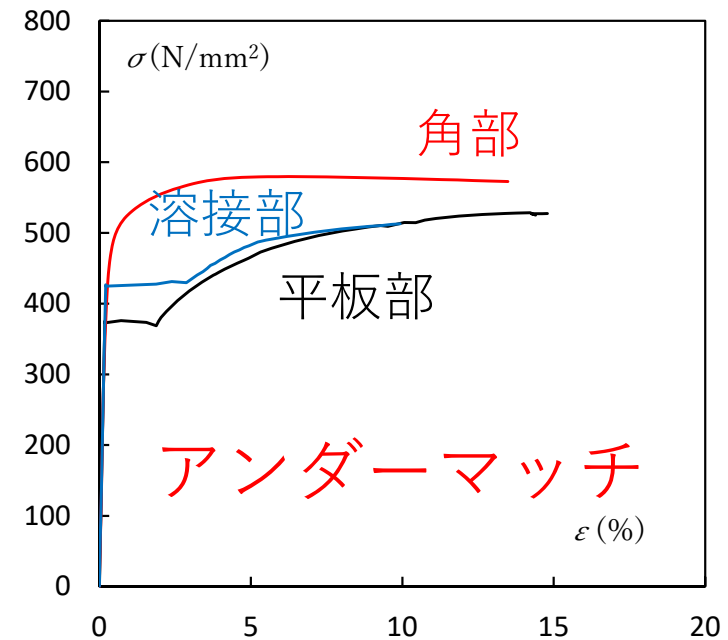
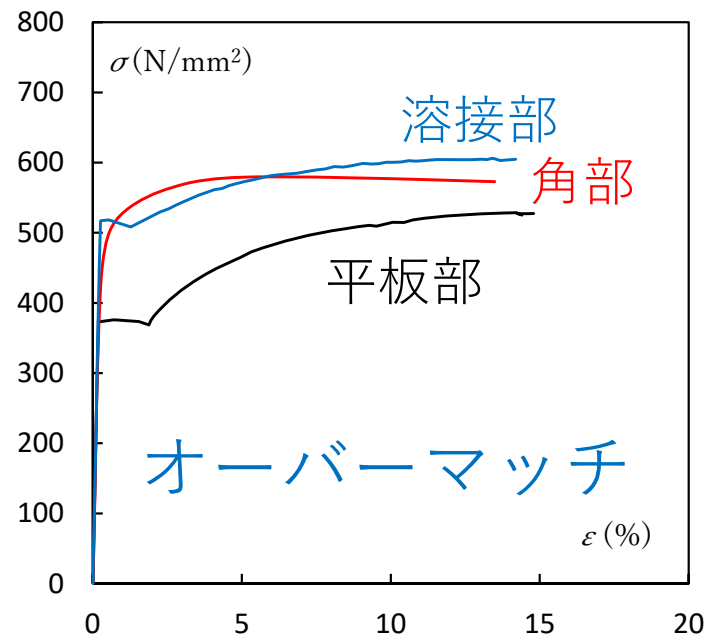




## 大臣認定工場の性能評価基準

鋼材	溶接材料	入熱量	パス間温度
400N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	450°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C
490N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	250°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C

コラム	溶接材料	入熱量	パス間温度
BCR295 400N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	250°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C
BCP325 490N/mm <sup>2</sup>	YGW18	30kJ/cm	250°C



## 大臣認定工場の性能評価基準

鋼材	溶接材料	入熱量	パス間温度
400N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	450°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C
490N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	250°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C

コラム	溶接材料	入熱量	パス間温度
BCR295 400N/mm <sup>2</sup>	YGW11	30kJ/cm	250°C
	YGW18	40kJ/cm	350°C
BCP325 490N/mm <sup>2</sup>	YGW18	30kJ/cm	250°C



## 冷間成形角形鋼管柱

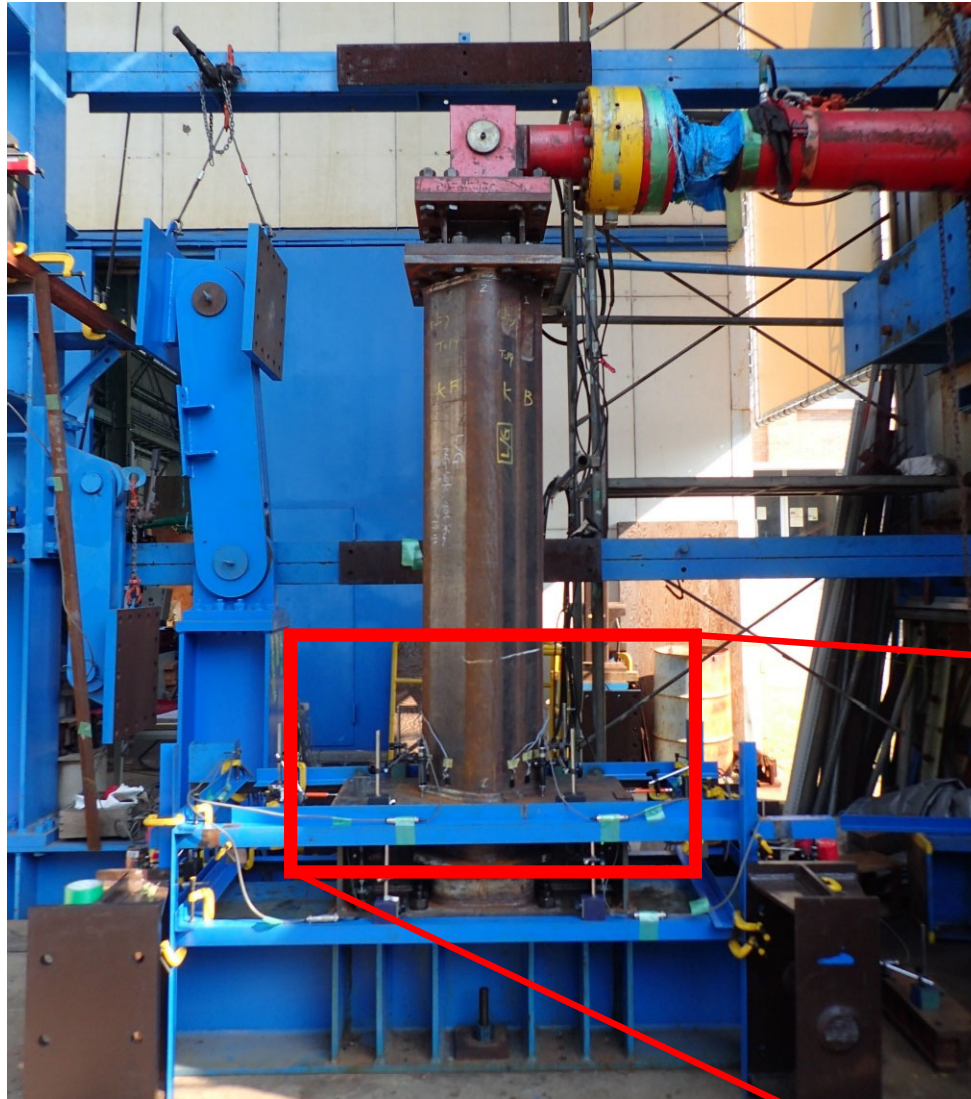
角部の強度 > 平板部の強度

- ① 溶接金属に要求される強度は？
- ② 塑性変形能力を決定する因子は？
- ③ 合理的な溶接施工法は？

実験Ⅰ：神戸大学＋JFEスチール＋藤木鉄工＋セイケイ

通しダイアフラム形式の  
片持ち柱

P45シリーズ：□-300×19  
(490N/mm<sup>2</sup>級プレスコラム)  
HP45シリーズ：□-250×19  
(550N/mm<sup>2</sup>級プレスコラム)



セッアップ図

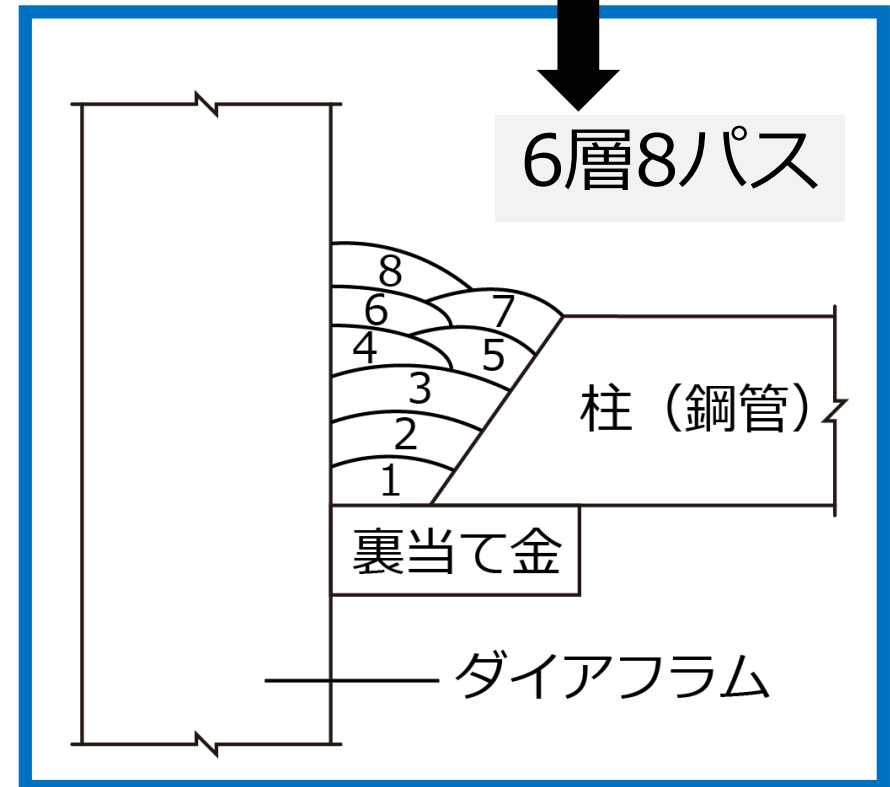
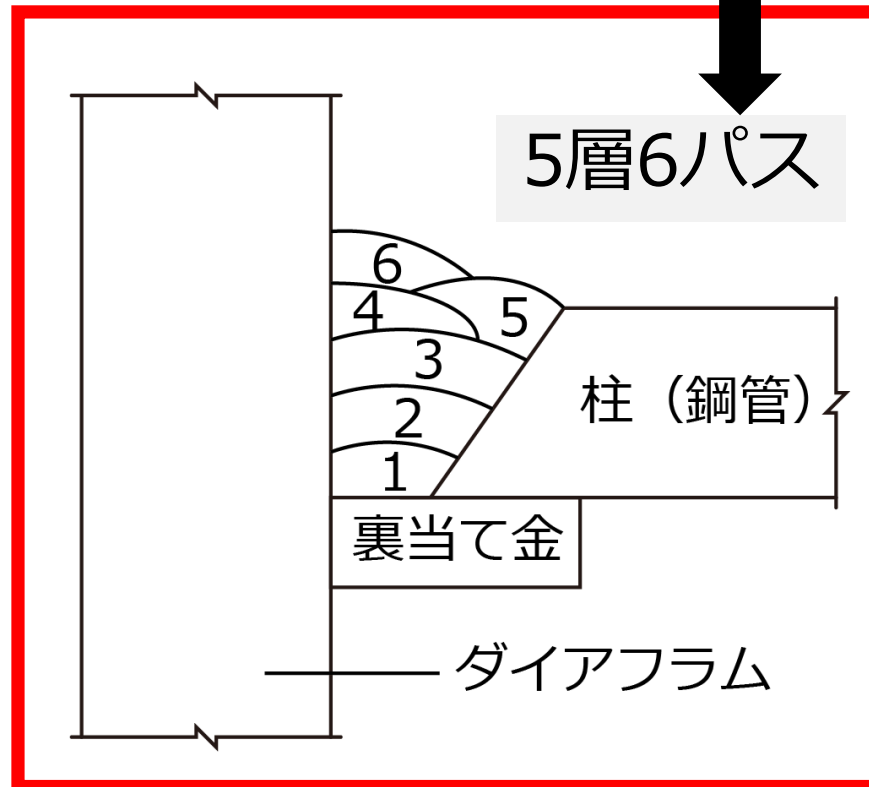


柱は45°回転させる

溶接金属 強度見込み	試験体 名称	柱	溶接 ワイヤ	入熱量 (管理値)	パス間温度 (管理値)
小	P45-L1	□-300×19 (490N/mm <sup>2</sup> 級)	YGW11	40kJ/cm	連続溶接
	P45-L2				
中	P45-M		YGW18	30kJ/cm	350℃
大	P45-H				250℃
小	HP45-L1	□-250×19 (550N/mm <sup>2</sup> 級)	YGW11	40kJ/cm	350℃
	HP45-L2				
中	HP45-M1		YGW18		
	HP45-M2				
大	HP45-H1		G59JA1 UC3MIT		
	HP45-H2				

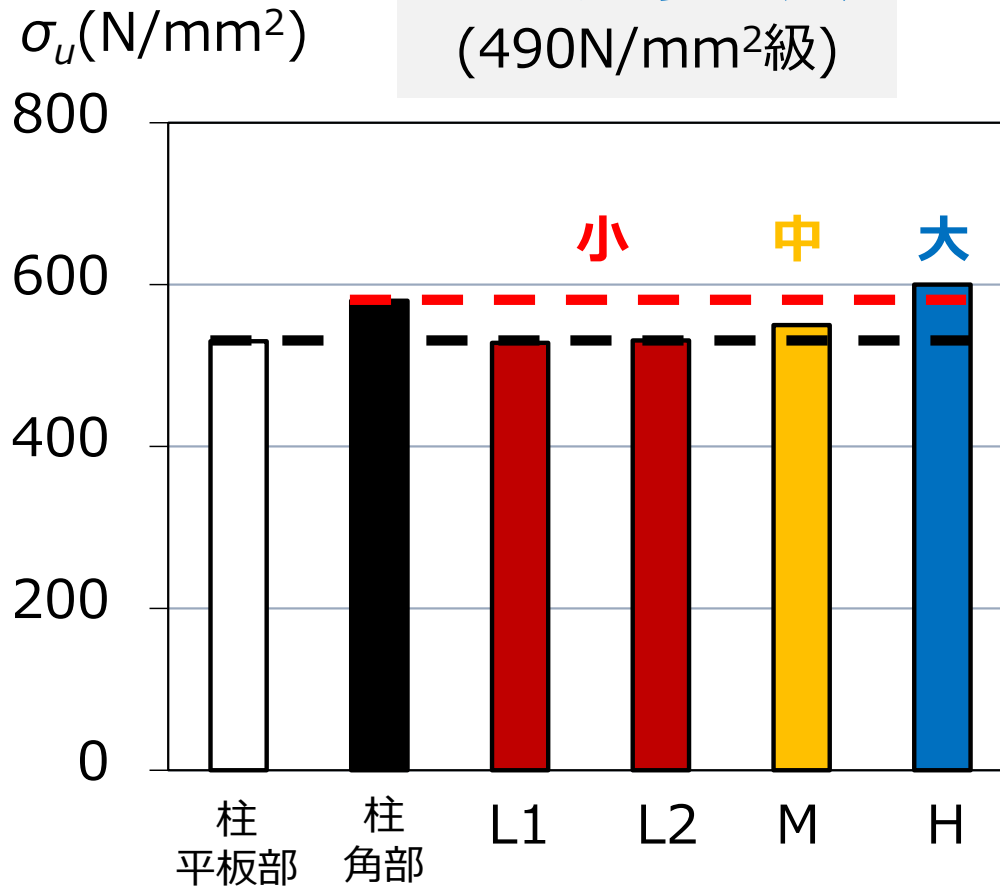


試験体名称	P45-L1	P45-L2	P45-M	P45-H
パス間温度(℃) (最大値)	290	305	241	239
入熱量(kJ/cm) (最大値)	38.3	39.7	29.3	29.8

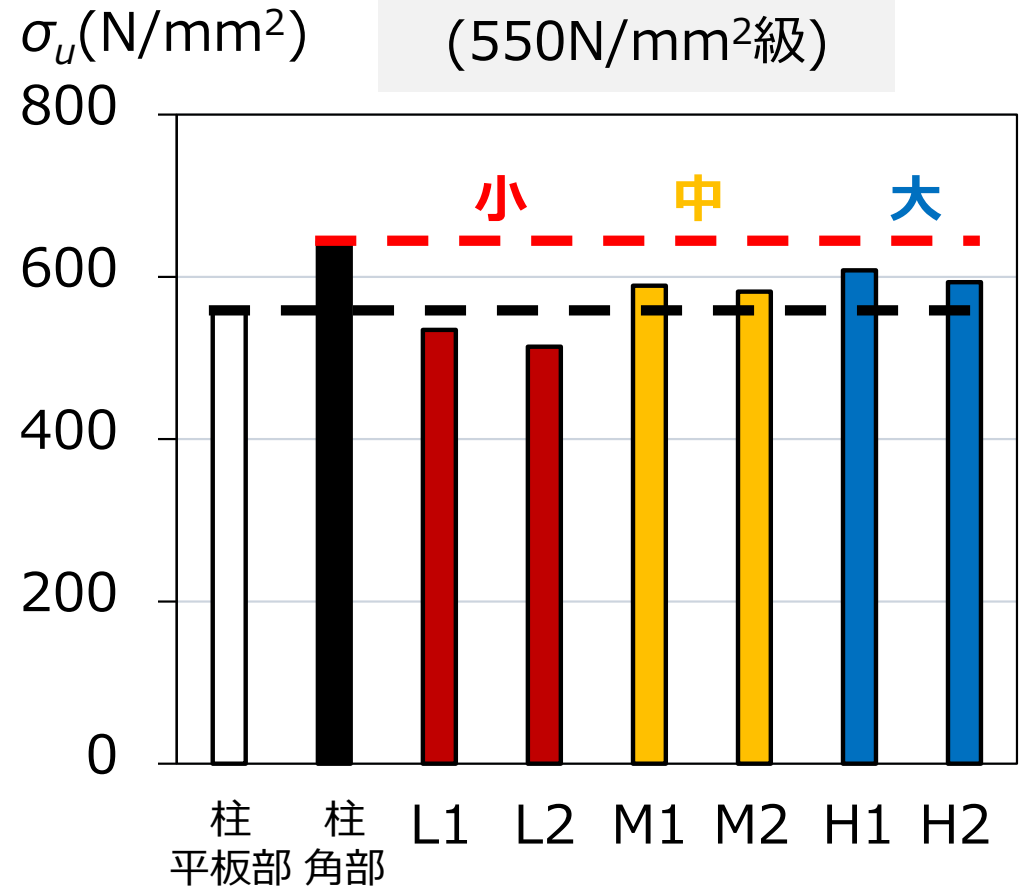




P45シリーズ  
(490N/mm<sup>2</sup>級)



HP45シリーズ  
(550N/mm<sup>2</sup>級)



P45シリーズ : P45-Hのみ、柱角部に対して  
オーバーマッチング

HP45シリーズ : 全試験体とも、柱角部に対して  
アンダーマッチング



試験体

□-250 × 250 × 16

$L_c=1960$

オイル  
ジャッキ

A

A'

A-A'断面

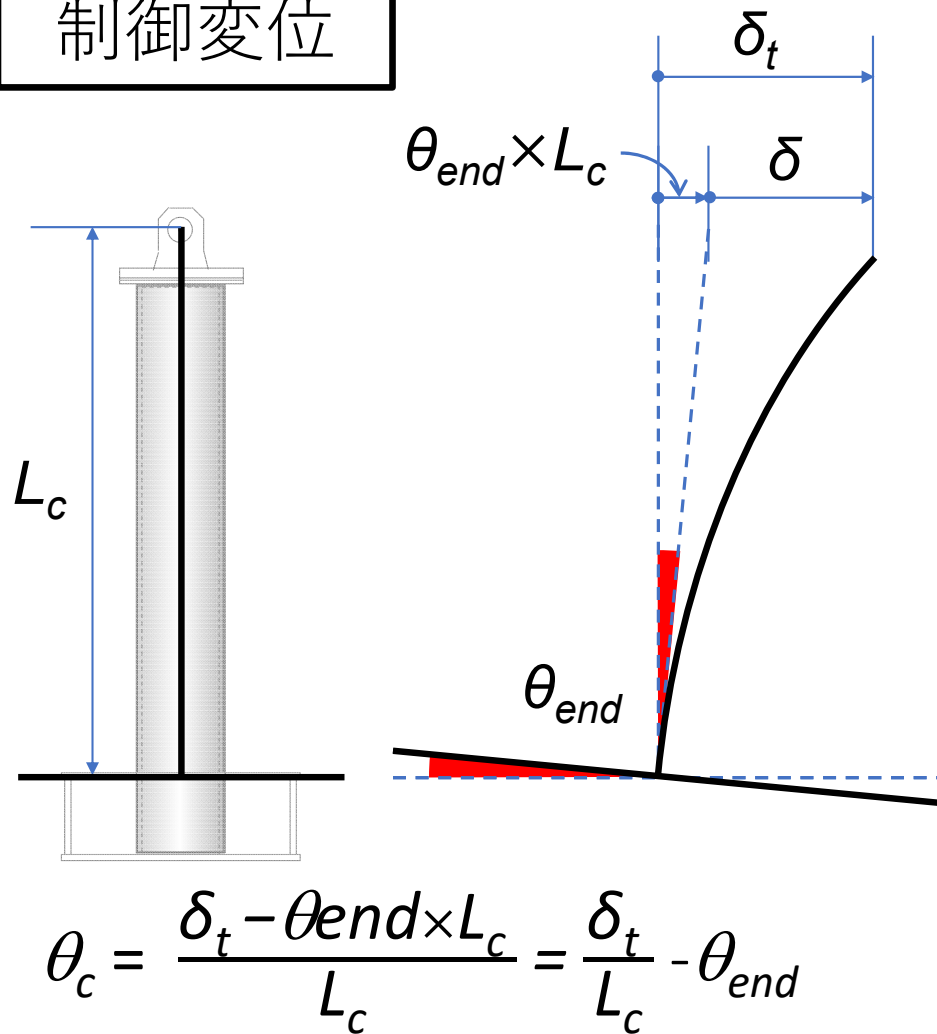
西側 東側

載荷方向

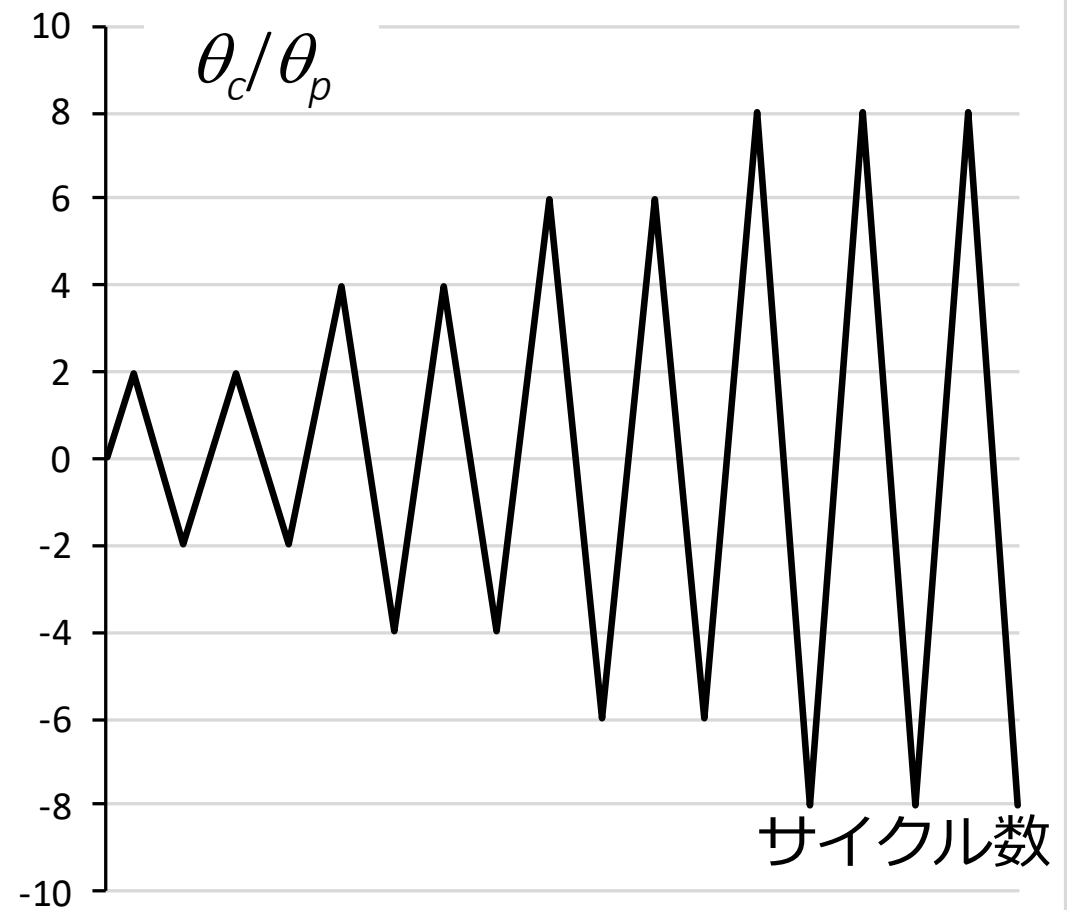
試験体形状およびセットアップ



## 制御変位



## 載荷履歴



$\theta_p$  : 柱の弾性回転角





(a) 延性き裂の発生



(b) 延性き裂の進展



(c-1) 最終状況



(c-2) 最終状況



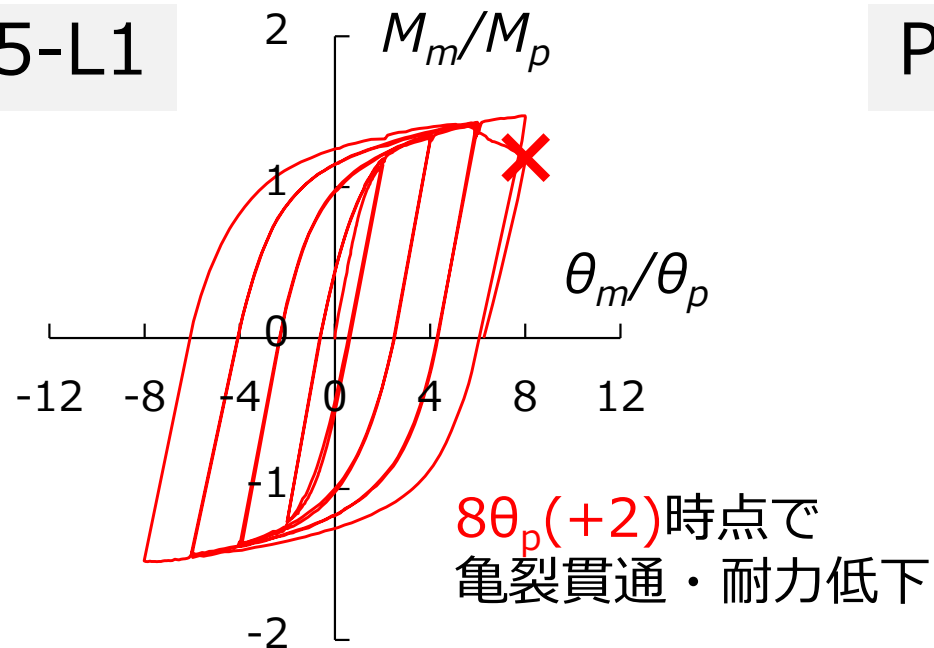
試験体名称		き裂発生	終局時期
P45 シリーズ (490N/mm <sup>2</sup> 級)	P45-L1	$6\theta_p(+1)$	$8\theta_p(+2)$
	P45-L2	$4\theta_p(+2)$	$8\theta_p(+1)$
	P45-M	$4\theta_p(+2)$	$8\theta_p(+1)$
	P45-H	$4\theta_p(+2)$	$8\theta_p(+1)$
HP45 シリーズ (550N/mm <sup>2</sup> 級)	HP45-L1	$4\theta_p(-2)$	$6\theta_p(-2)$
	HP45-L2	$4\theta_p(+1)$	$6\theta_p(+2)$
	HP45-M1	$4\theta_p(+2)$	$6\theta_p(+3)$
	HP45-M2	$4\theta_p(+1)$	$6\theta_p(+2)$
	HP45-H1	$4\theta_p(+1)$	$6\theta_p(+2)$
	HP45-H2	$4\theta_p(-1)$	$6\theta_p(-1)$

角部溶接止端に  
発生した  
延性き裂の  
貫通による  
耐力低下

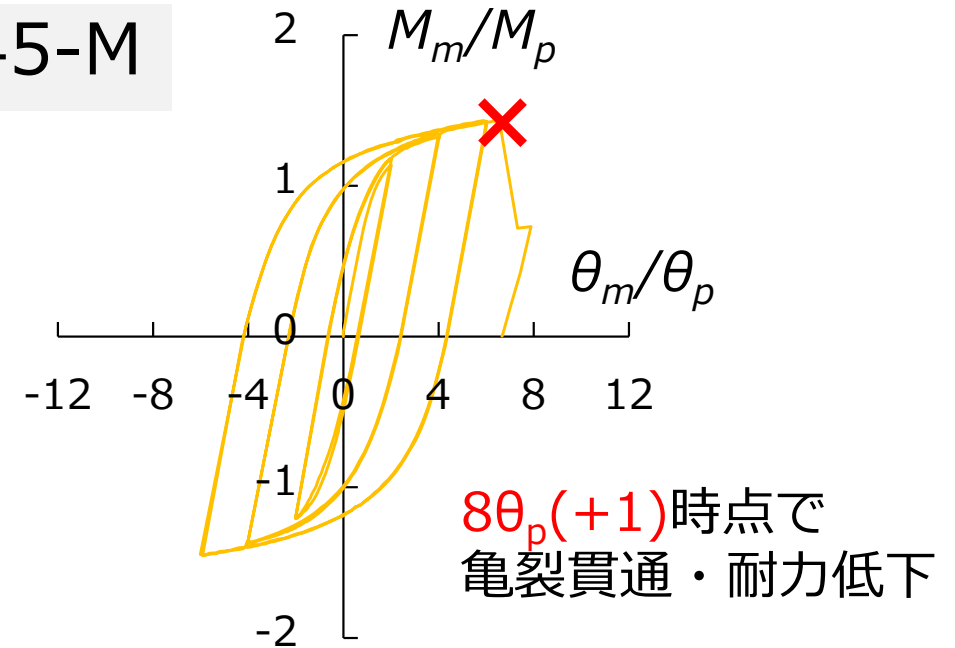


破断状況(P45-L1)

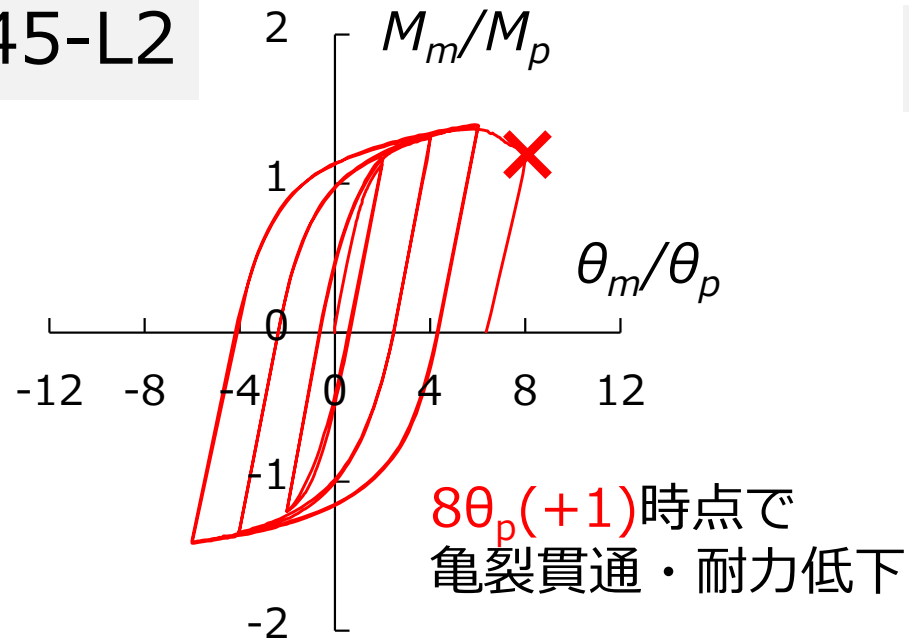
P45-L1



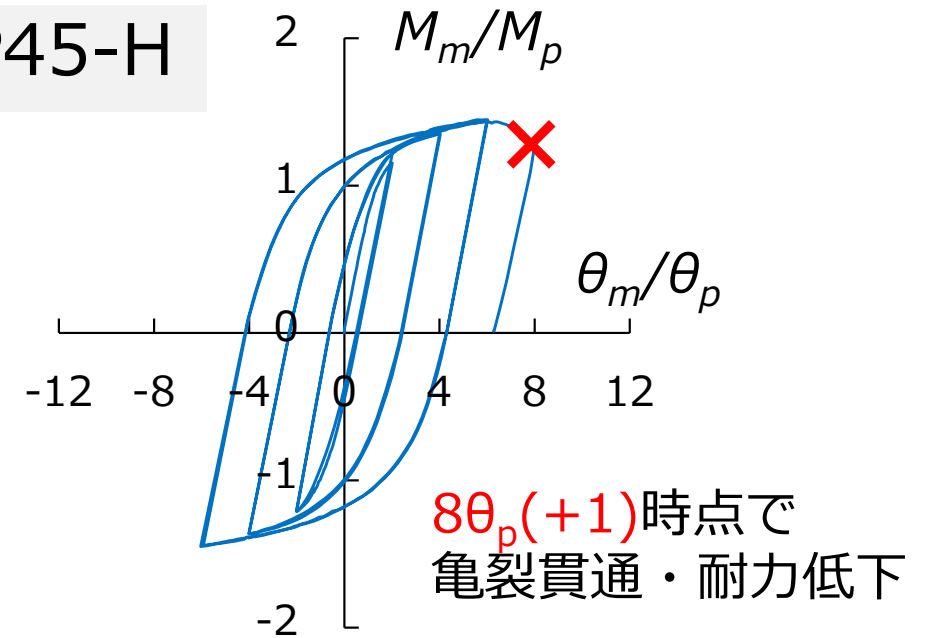
P45-M



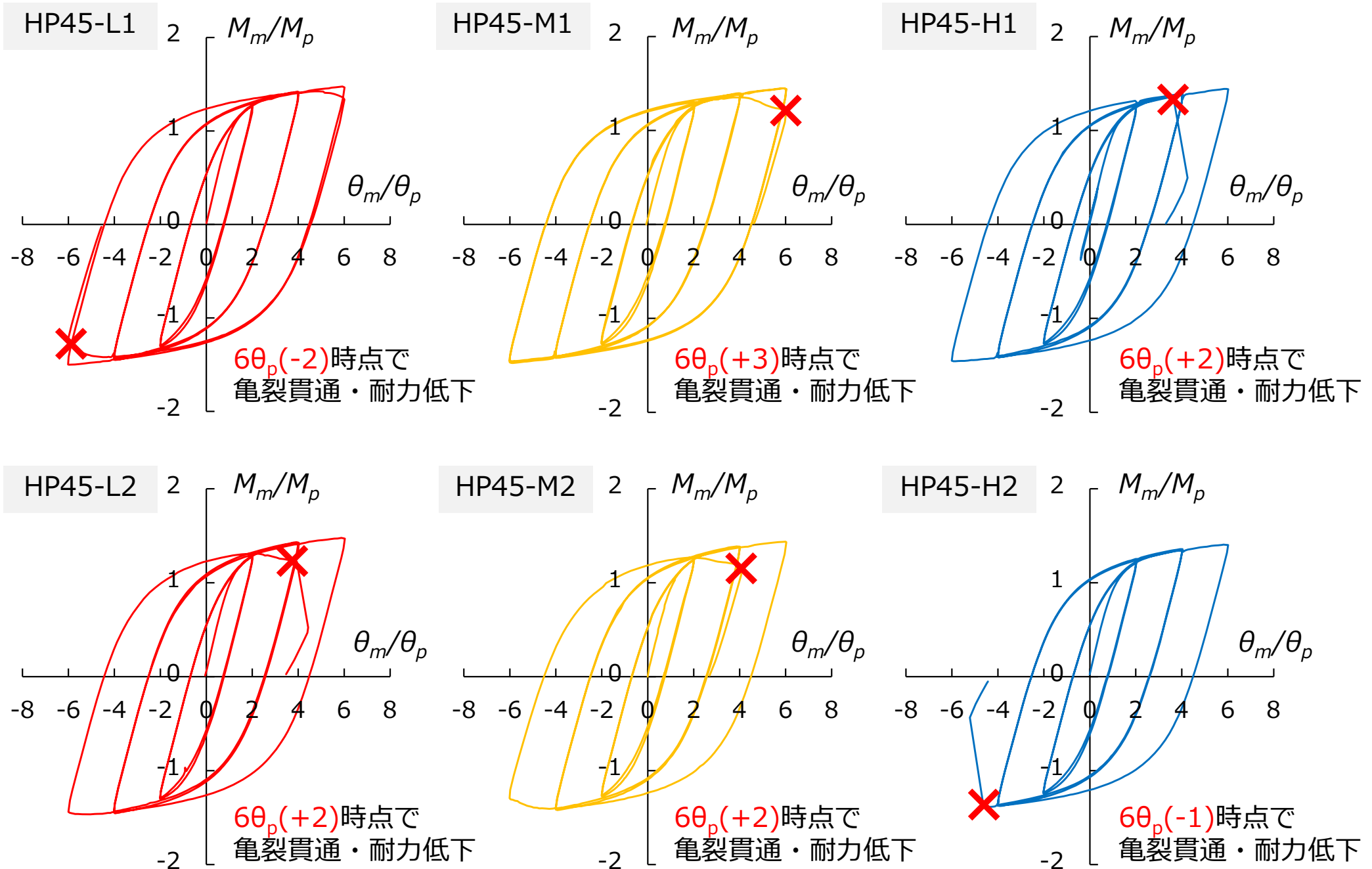
P45-L2

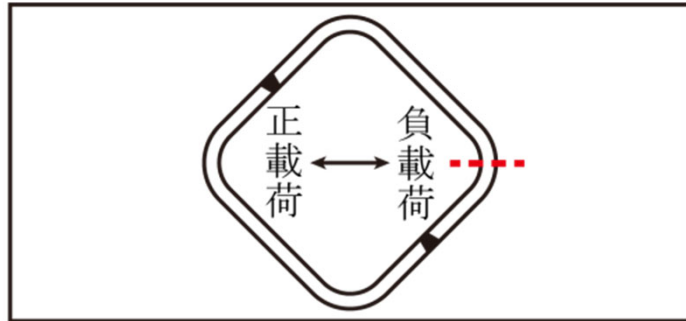


P45-H



# 荷重－変形関係（HPシリーズ）





----- 断面マクロ採取位置

試験体名称	破壊状況
P45-L1	水平方向に延性亀裂進展・貫通
P45-L2	水平方向に延性亀裂進展・貫通
P45-M	45°方向に亀裂進展・脆性的破断
P45-H	45°方向に延性亀裂進展・貫通



P45-L1



P45-L2

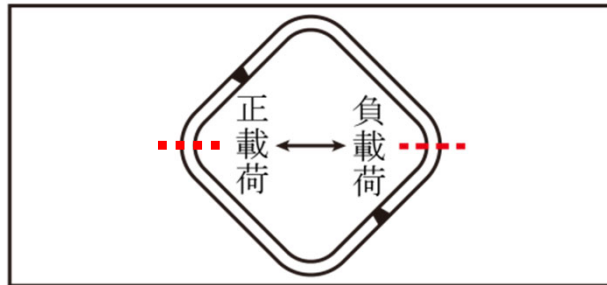


P45-M



P45-H





----- 断面マクロ採取位置

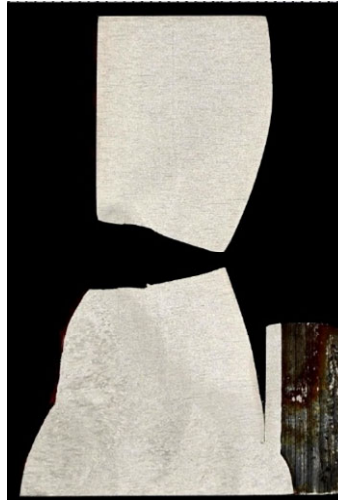
試験体名称	破壊状況
HP45-L1	水平方向に延性亀裂進展・貫通
HP45-L2	水平方向に延性亀裂進展・貫通
HP45-M1	水平方向に延性亀裂進展・貫通
HP45-M2	水平方向に延性亀裂進展・貫通
HP45-H1	水平方向に延性亀裂進展・脆性的破断
HP45-H2	水平方向に延性亀裂進展・脆性的破断



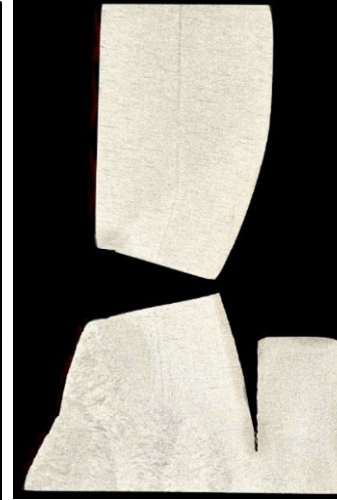
HP45-L1



HP45-L2



HP45-M1



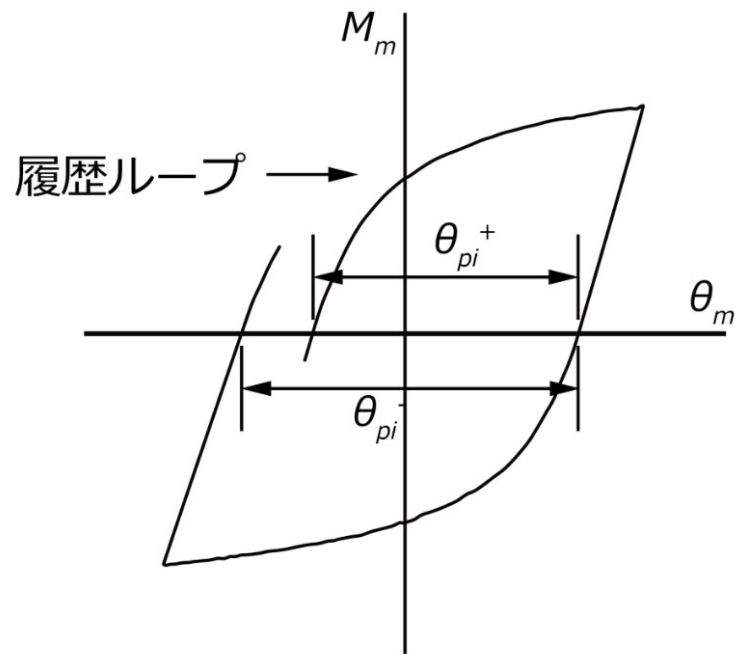
HP45-M2



HP45-H1



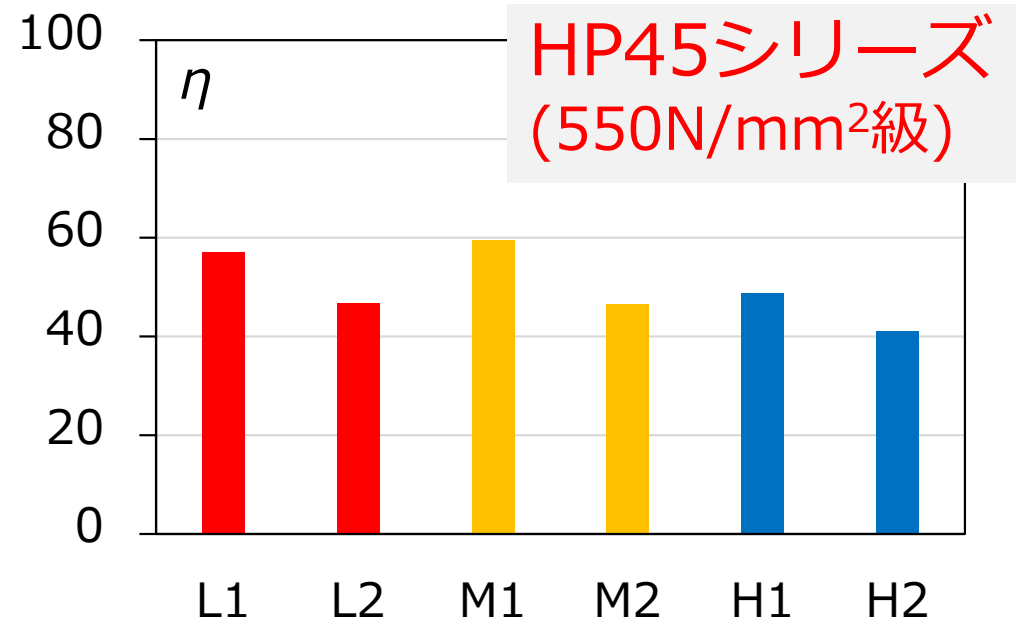
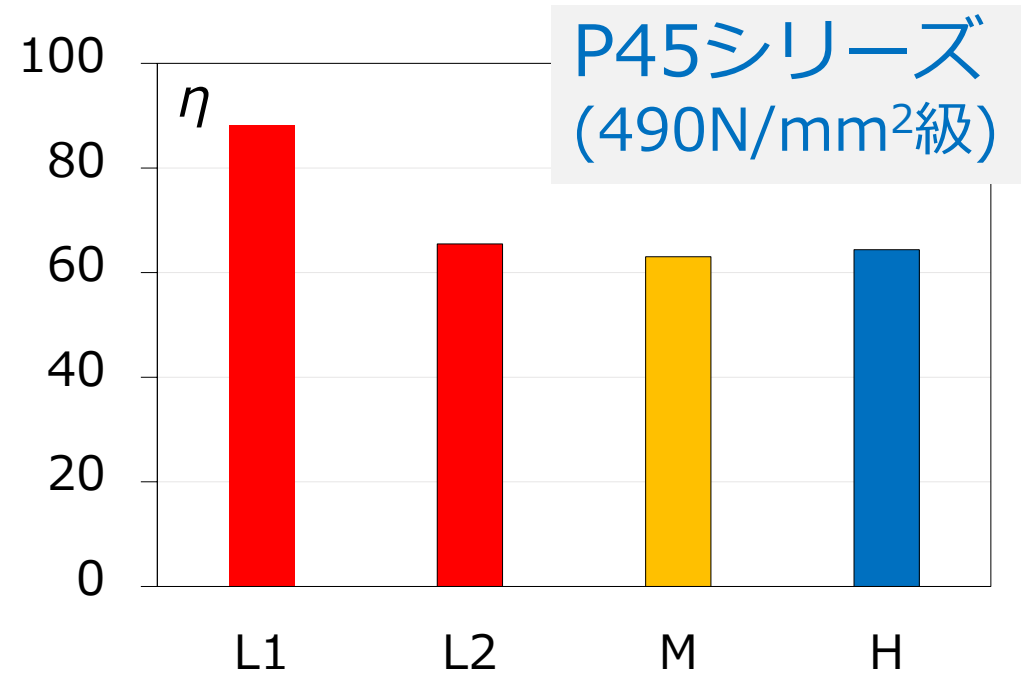
HP45-H2

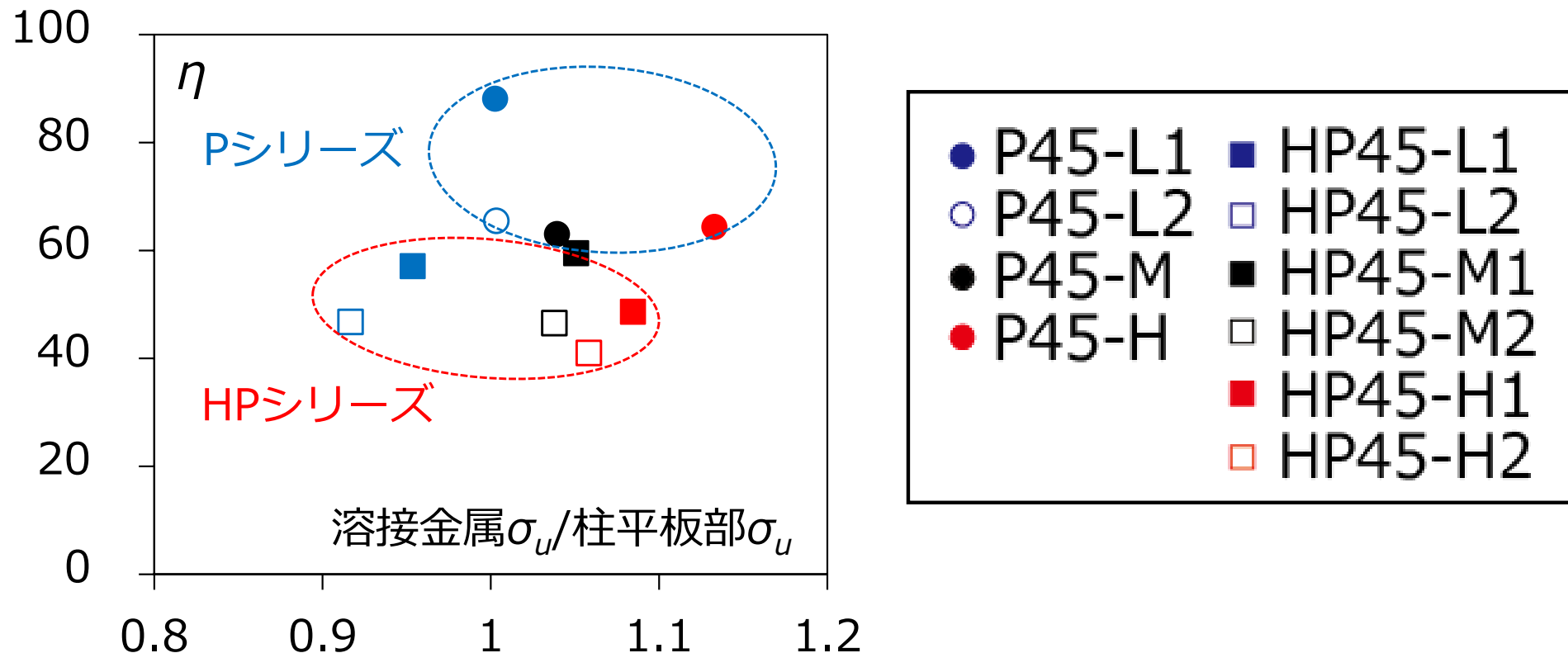


$$\sum \theta_{pi} = \sum \theta_{pi}^+ + \sum \theta_{pi}^-$$

$$\eta = \sum \theta_{pi} / \theta_p$$

累積塑性変形倍率の定義





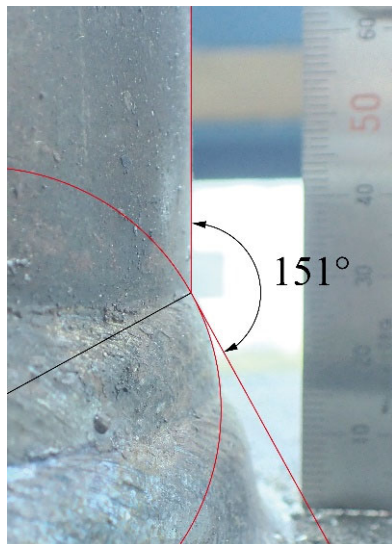
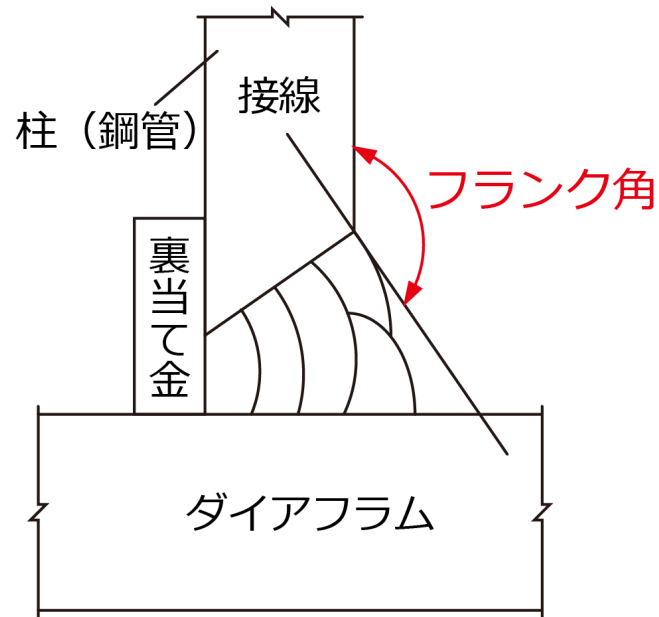
➤ 溶接金属強度は，柱の塑性変形能力に影響を与えない！

???

## ② 支配因子は何か？

溶接金属 強度見込み	試験体 名称	柱	溶接 ワイヤ	入熱量 (管理値)	パス間温度 (管理値)
小  中 大	P45-L1	□-300×19 (490N/mm <sup>2</sup> 級)	YGW11	40kJ/cm	連続溶接
	P45-L2				
	P45-M		YGW18	30kJ/cm	350℃
	P45-H				250℃
小  中  大	HP45-L1	□-250×19 (550N/mm <sup>2</sup> 級)	YGW11	40kJ/cm	350℃
	HP45-L2				
	HP45-M1		YGW18		
	HP45-M2				
	HP45-H1		G59JA1 UC3MIT		
	HP45-H2				





P45-L1

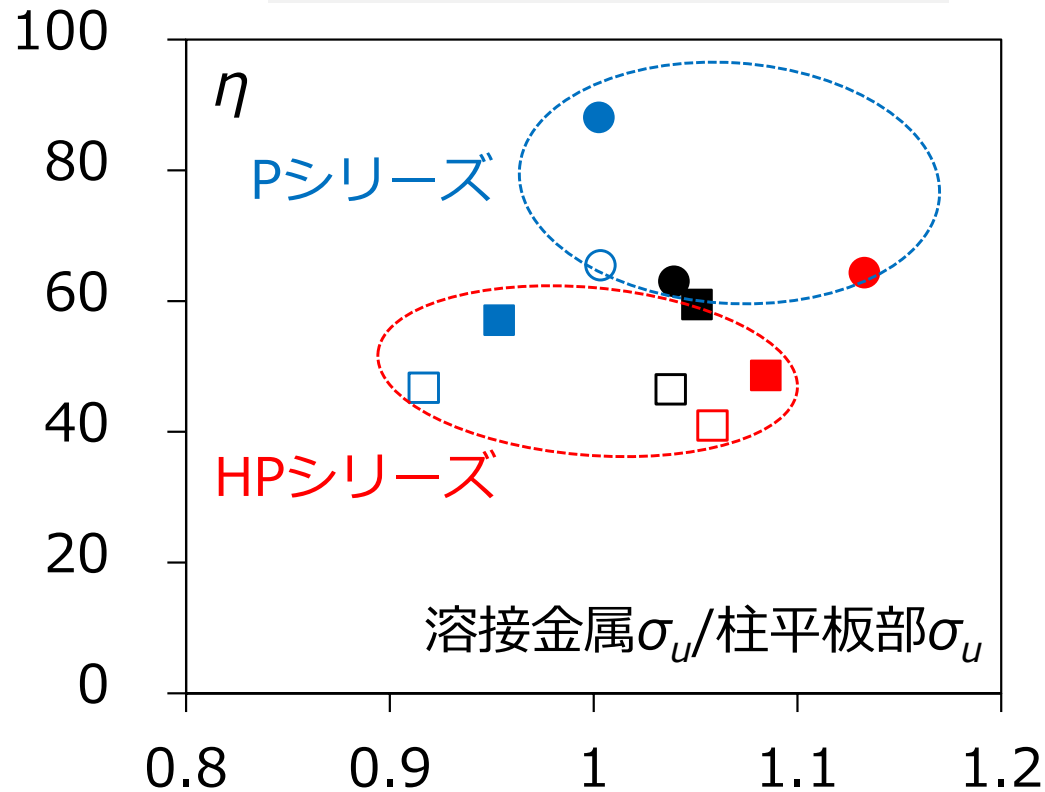


HP45-L1

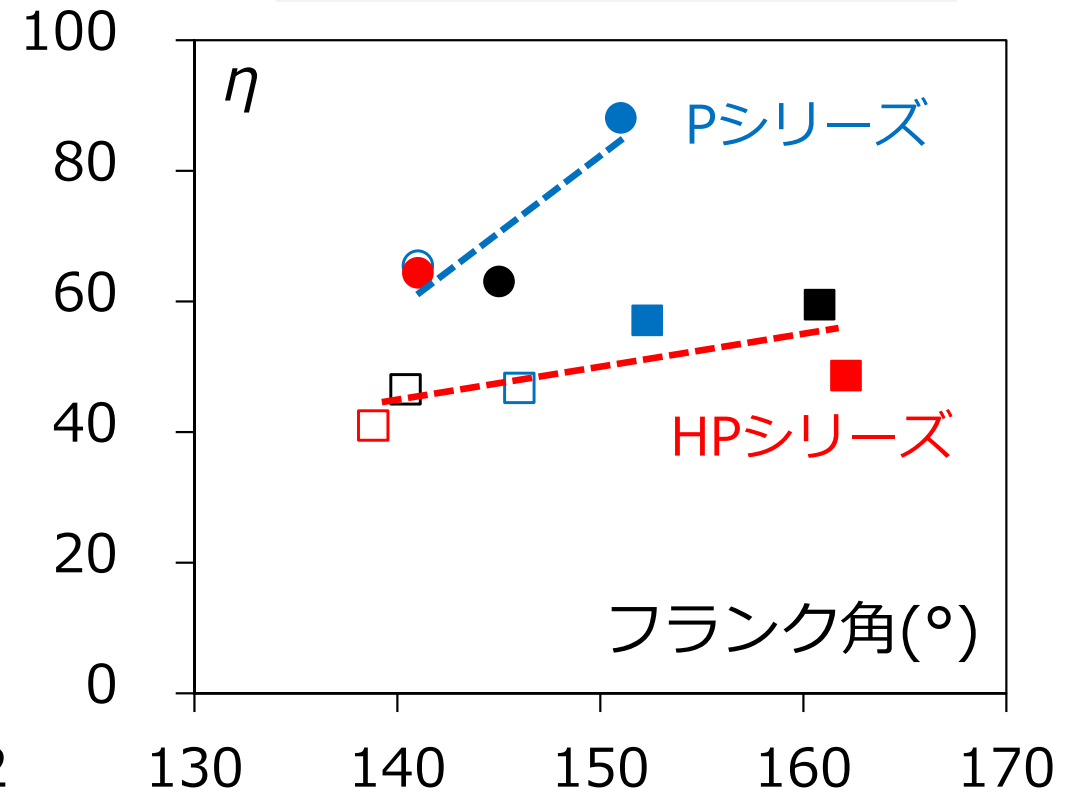
試験体名称		正載荷側	負載荷側
P45 シリーズ (490N/mm <sup>2</sup> 級)	P45-L1	151°	155°
	P45-L2	141°	148°
	P45-M	145°	147°
	P45-H	141°	146°
HP45 シリーズ (550N/mm <sup>2</sup> 級)	HP45-L1	161°	152°
	HP45-L2	146°	147°
	HP45-M1	161°	162°
	HP45-M2	140°	141°
	HP45-H1	162°	154°
	HP45-H2	137°	139°

は実験での破断箇所を示す

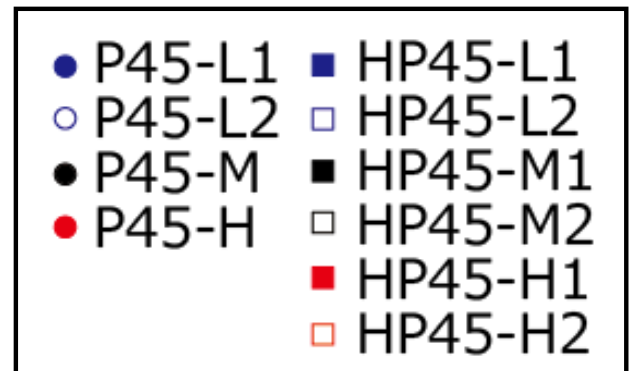
## 溶接金属強度の影響



## フランク角の影響



フランク角が小さくなると  
累積塑性変形倍率 $\eta$ は小さくなる  
↓  
実験結果の支配因子はフランク角



## 実験Ⅱ：神戸大学＋兵庫県鉄工建設業協同組合



ロボット溶接



半自動溶接

試験体名称	試験体寸法	溶接ワイヤ	積層	
			平板部	角部
1-LL	柱 □-250×250×16 (BCR295)	YGW11	4層4パス (溶接手順1)	
1-L				
1-M	ダイアフラム PL-25 (SN490B)		4層4パス   3層3パス (溶接手順2)	
2-SS				

大

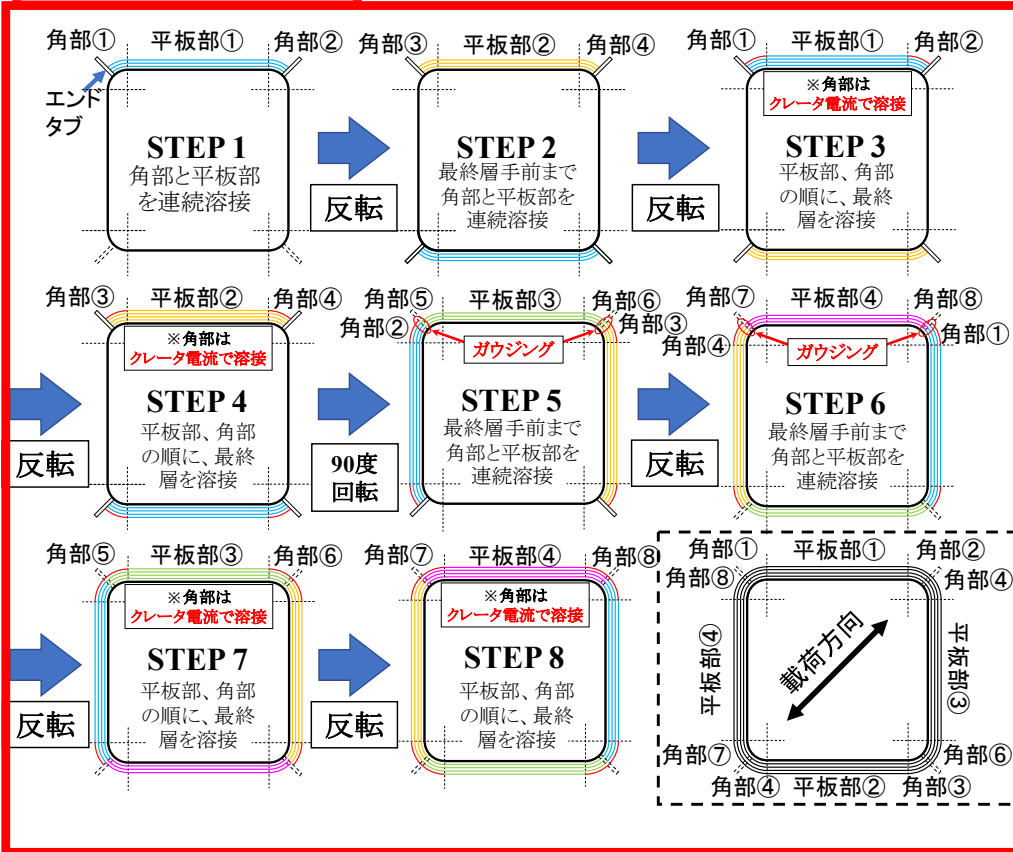
フランク角

小

ルートギャップ：7mm 入熱管理値：40kJ/cm  
ベベル角度：35° パス間温度管理値：350℃

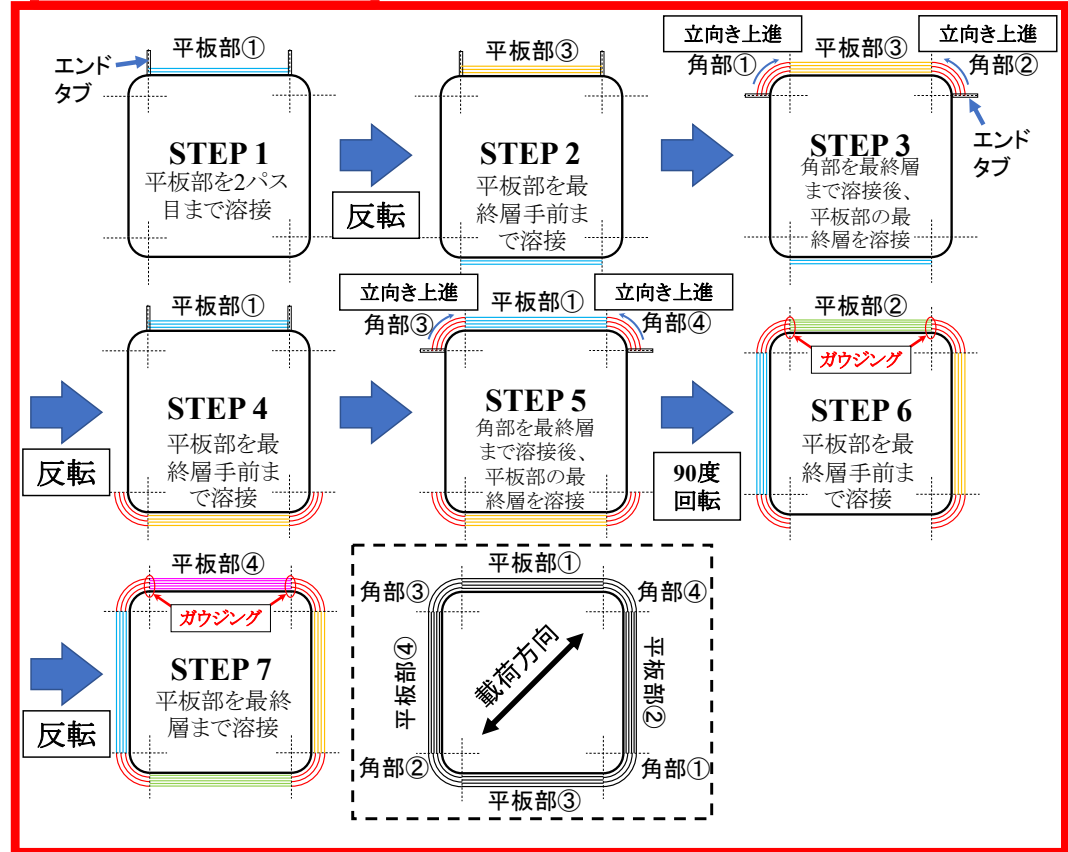


## 溶接手順 1

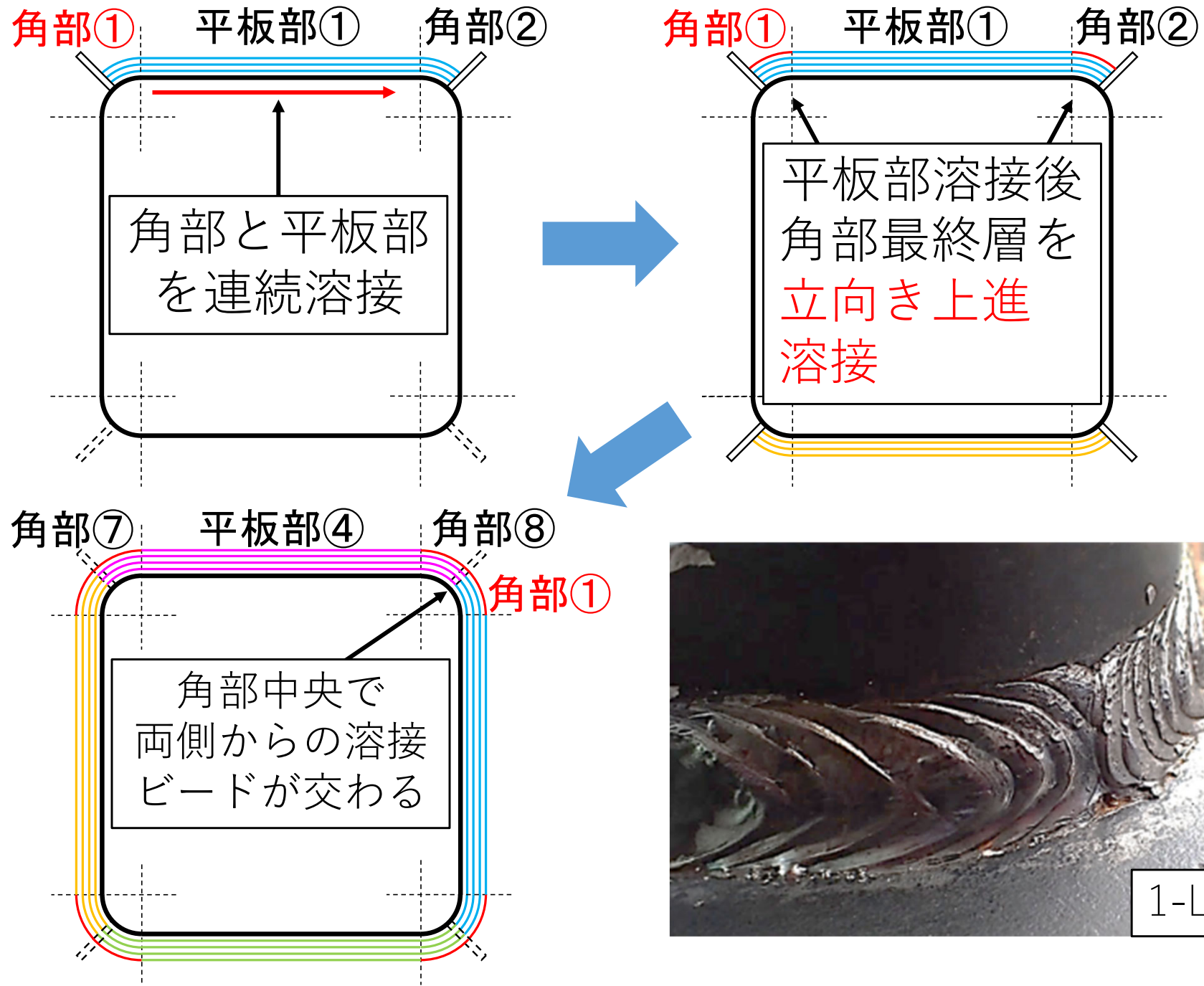


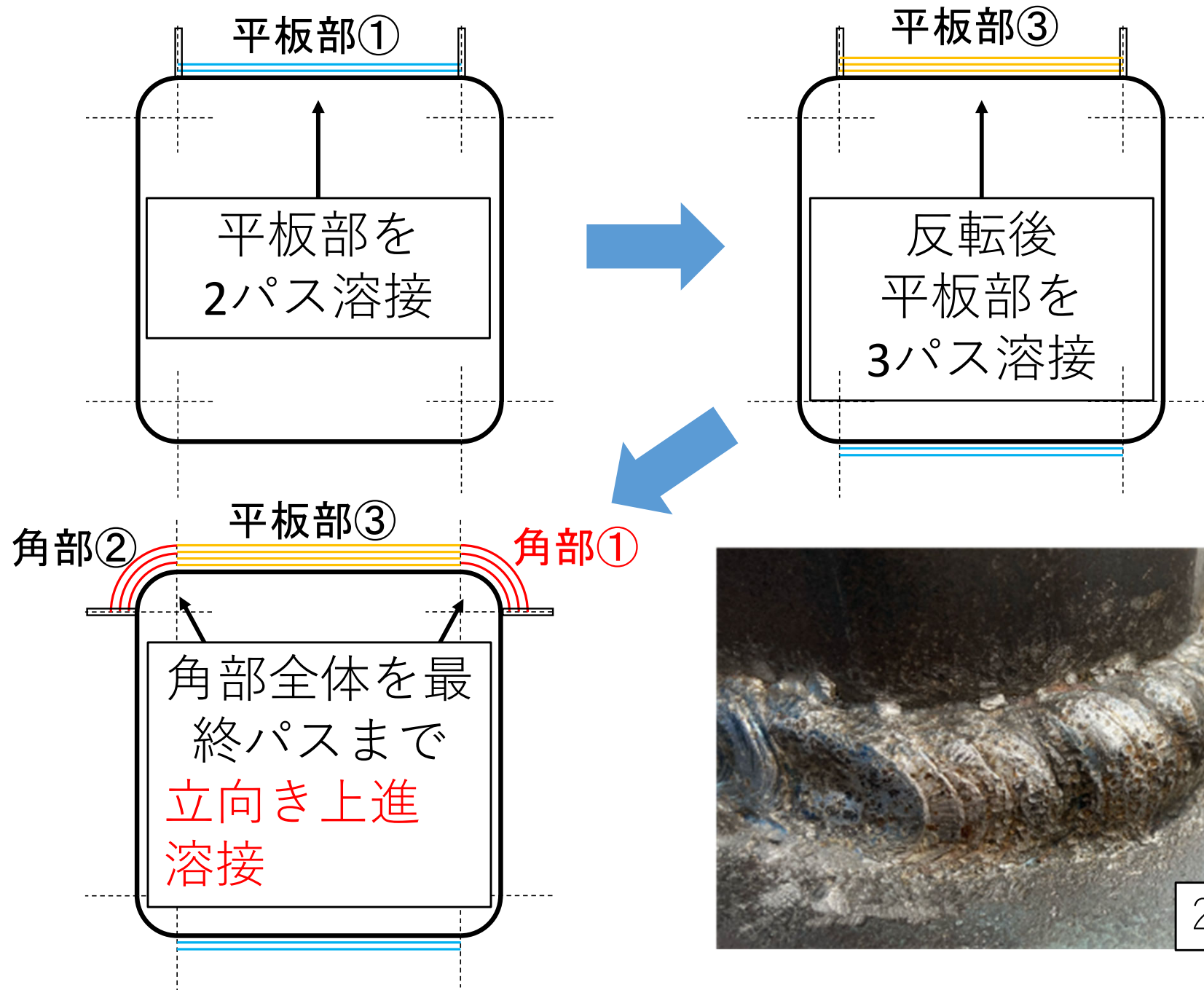
作成した試験体  
1-LL, 1-L, 1-M

## 溶接手順 2

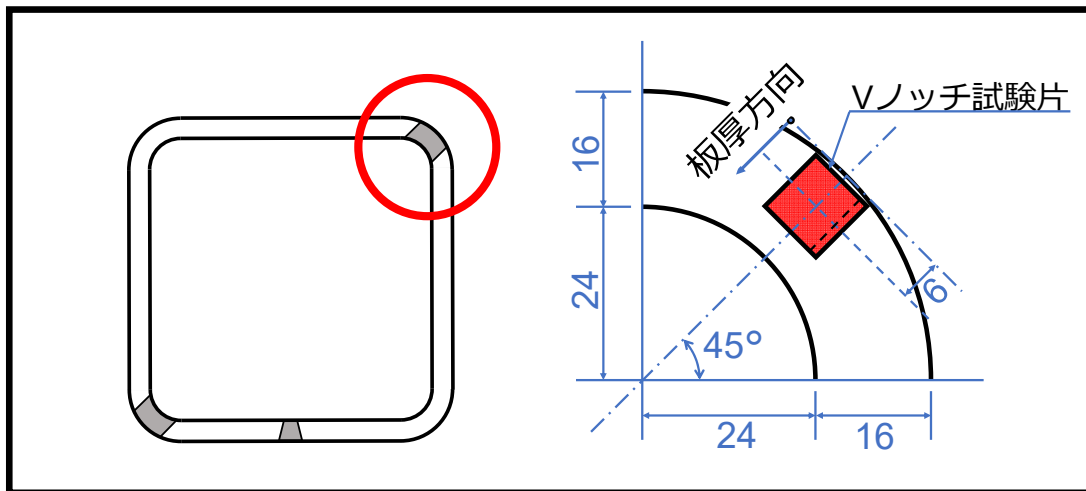


作成した試験体  
2-SS



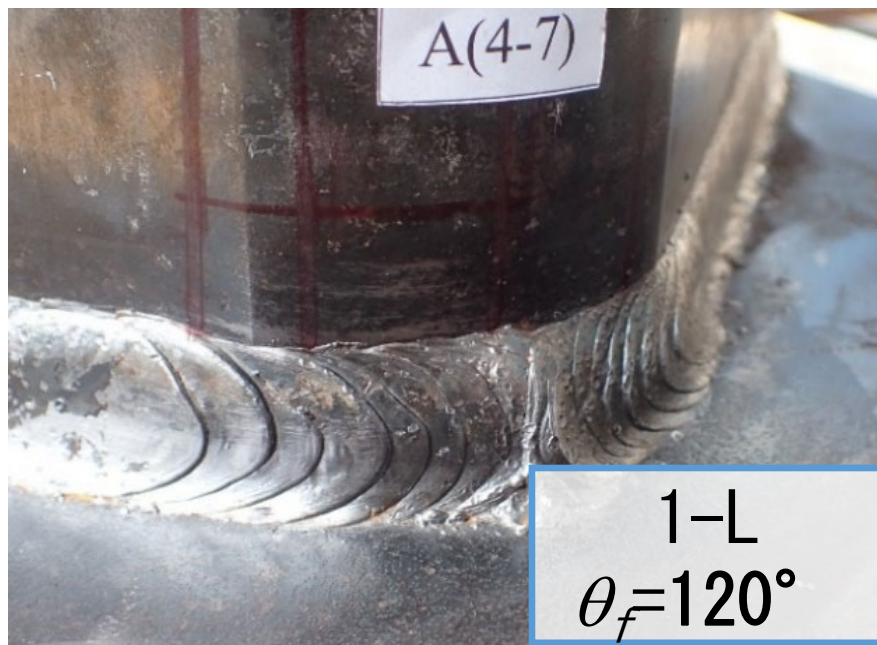
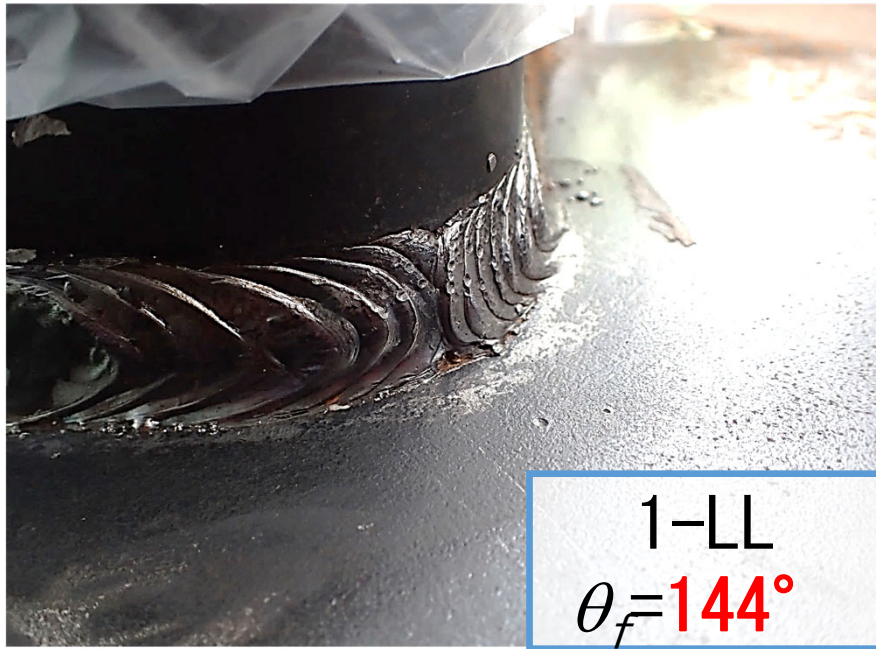


試験体名称	柱寸法	溶接ワイヤ	積層		入熱量 (管理値)	パス間温度 (管理値)	フランク角 $\theta_f$ (°)	
			平板部	角部			西側	東側
1-LL	□-250 ×250×16 (BCR295)	YGW-11	4層4パス		40kJ/cm	350℃	153	144
1-L							141	156
1-M							129	120
2-SS			4層4パス	3層3パス			112	115



シャルピー吸収エネルギー：  
291J  
脆性破面率：  
0%

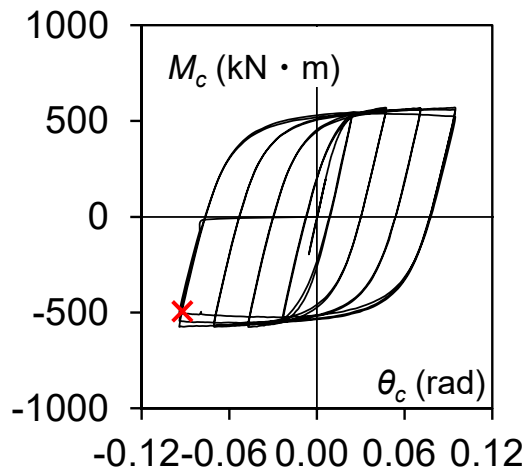






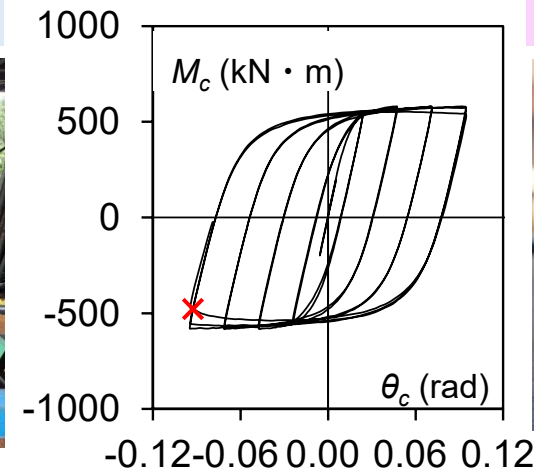
1-LL  
 $\theta_f = 144^\circ$

き裂の進行および  
局部座屈が顕著と  
なり耐力低下



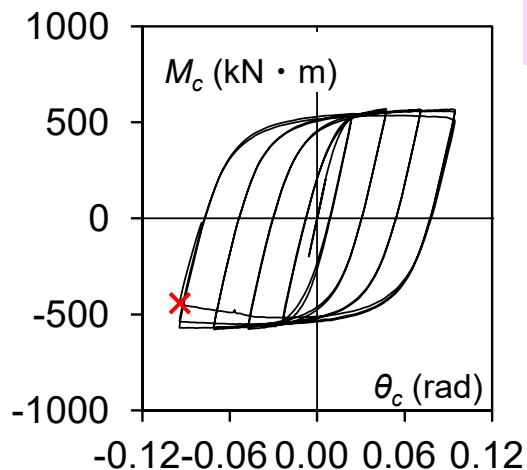
1-L  
 $\theta_f = 141^\circ$

き裂が板厚方向に  
貫通して耐力低下



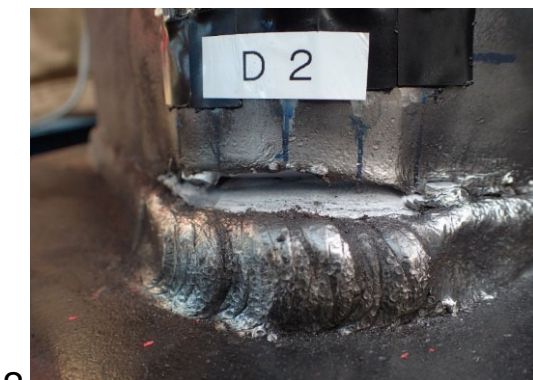
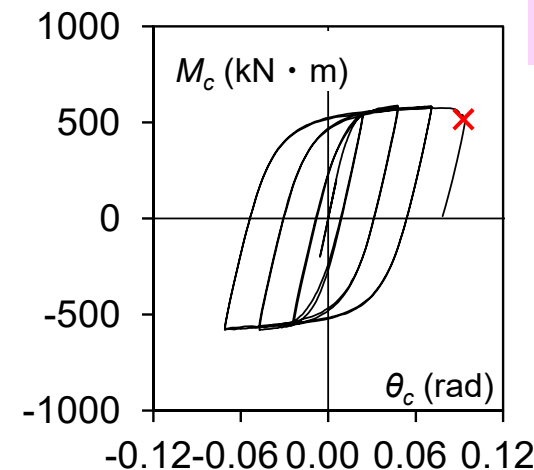
1-L  
 $\theta_f = 120^\circ$

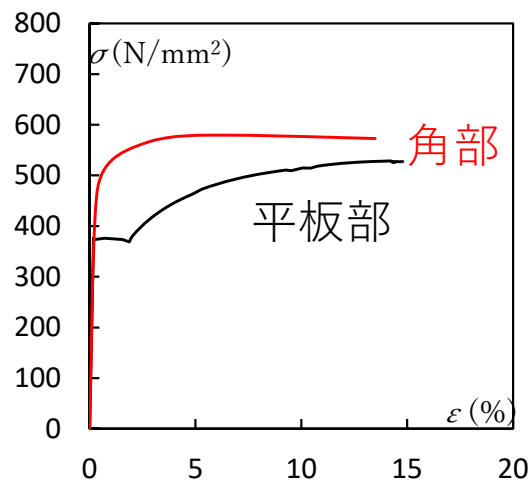
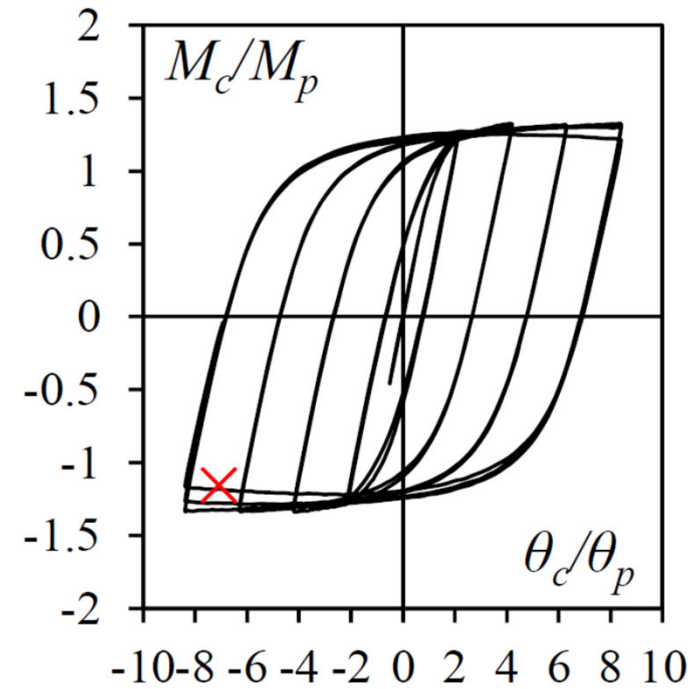
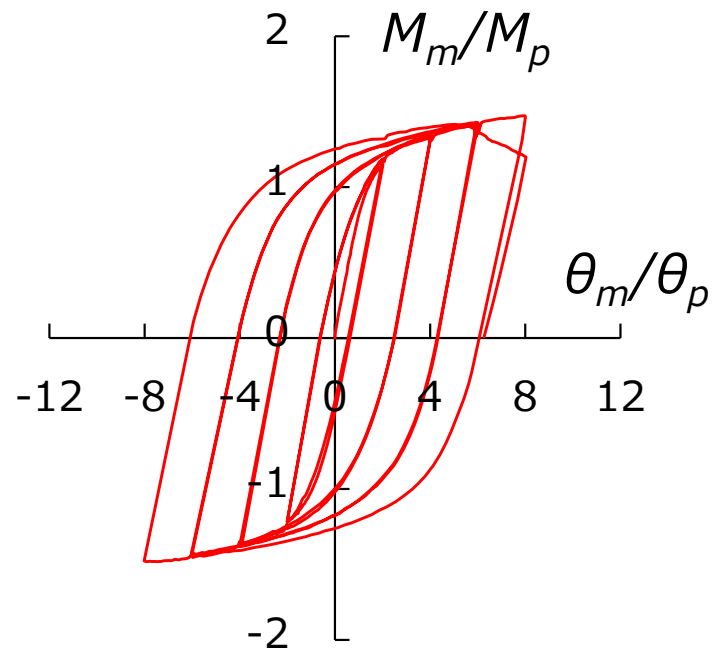
き裂が板厚方向に  
貫通して耐力低下



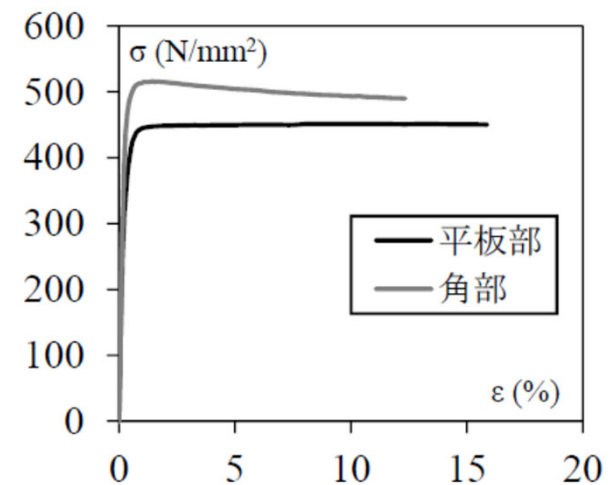
2-SS  
 $\theta_f = 112^\circ$

き裂が板厚方向に  
貫通して耐力低下

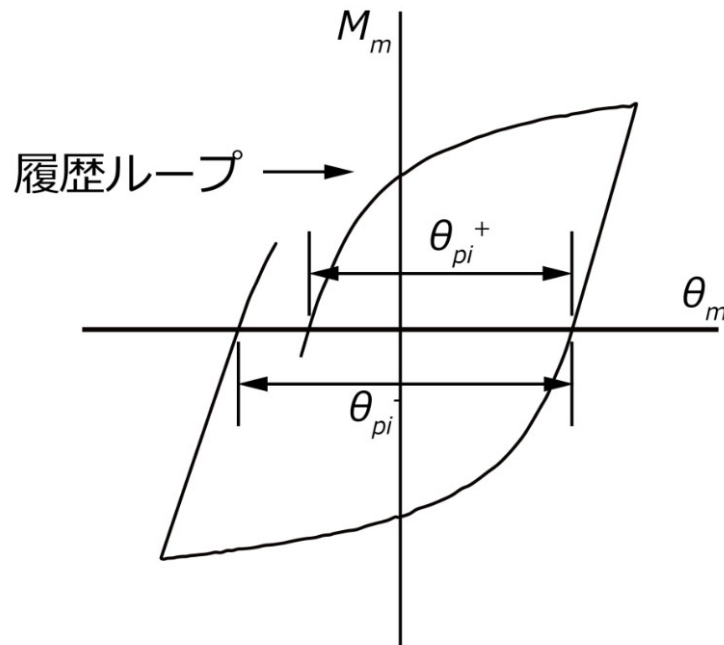




プレスコラム



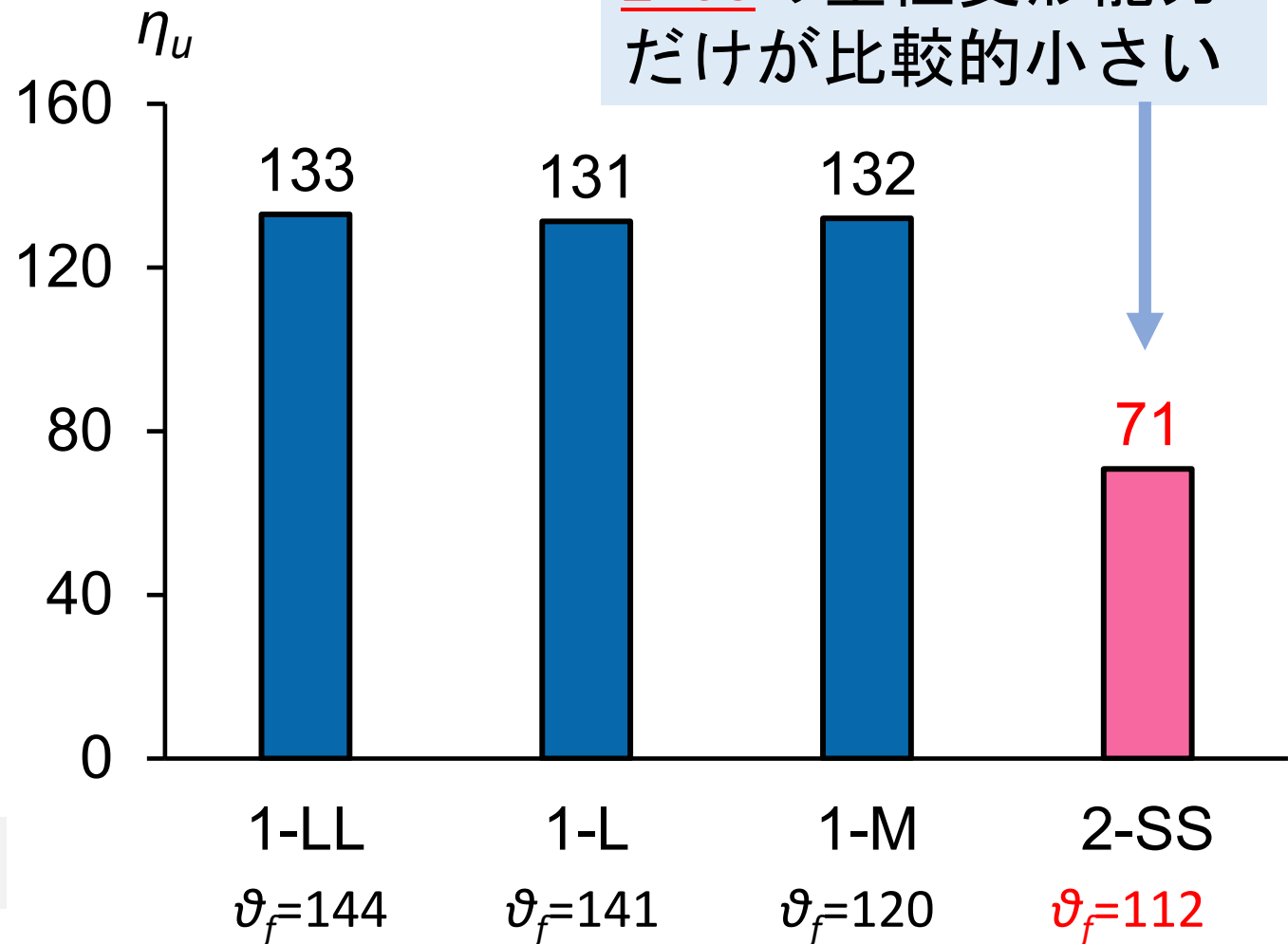
ロールコラム

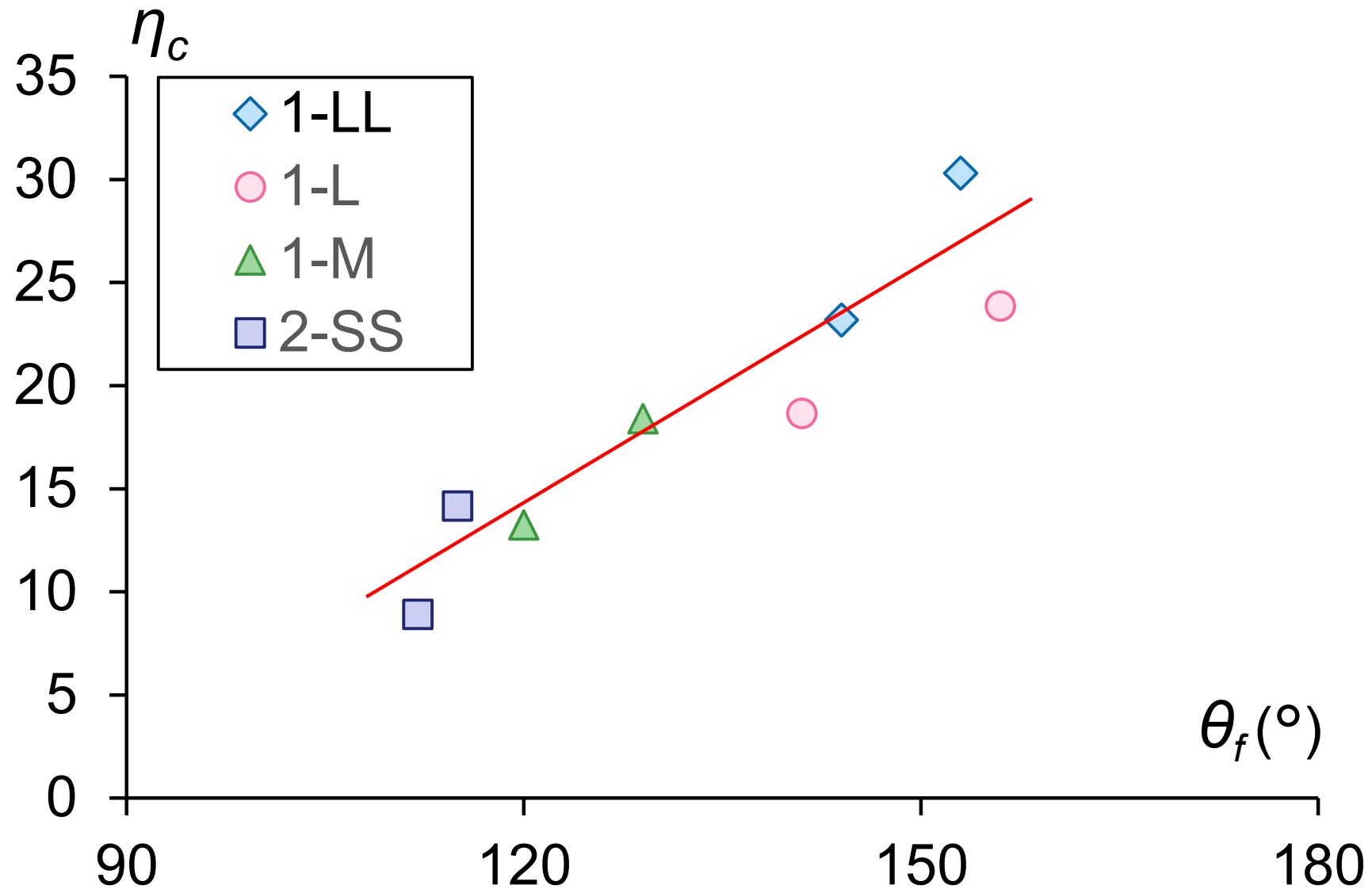


$$\sum \theta_{pi} = \sum \theta_{pi}^+ + \sum \theta_{pi}^-$$

$$\eta = \sum \theta_{pi} / \theta_p$$

累積塑性変形倍率の定義





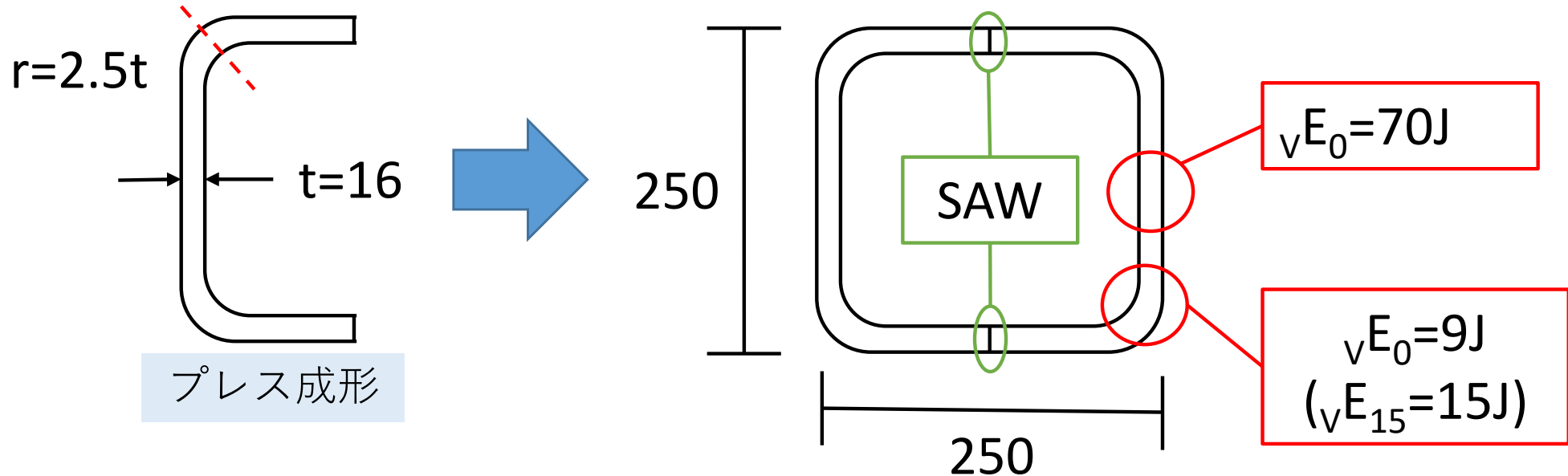
フランク角が小さいほど、**延性き裂が早期に発生する**

$\eta_c$ : 延性き裂発生までの累積塑性変形倍率



実験Ⅲ：神戸大学＋芝浦工業大学＋兵庫県鉄工建設業協同組合＋永井製作所

（全国鐵構工業協会の助成）



- ・ 市販のSS400材を使用
- ・ 角部靱性を低下させることを意図  
→ 角部母材の  $0^{\circ}C$  での  
シャルピー吸収エネルギー： **9J**
- ・ 溶接ワイヤ： YGW11
- ・ 平板部入熱管理値：  $40kJ/cm$
- ・ 平板部パス間温度管理値：  $350^{\circ}C$

# 実験Ⅲ：半自動溶接（プレス）

## 実験変数

試験体	試験 時期	柱寸法	溶接方法	溶接 ワイヤ	溶接 手順	溶接積層		フランク角 $\theta_f(^{\circ})$		
						平板部	角部	西側	東側	
L-1-SS	2	□-250× 250×16 (プレス コラム)	CO2ガスシール ド半自動アーク 溶接	YGW11	1	4層4パス		98	108	
L-1-LL								171	165	
L-2-SS					2	4層5パス	3層3パス	95	93	
L-2-M1	119							124		
L-2-M2	151							124		
L-2-L	151							152		
L-2-LL	159							157		
L-R1-L	2				ロボット溶接	—	4層4パス		144	160
L-R2-LL							5層6パス		154	155

角部の溶接方法：3種類（手順1、手順2、ロボット溶接）  
フランク角：2～5種類（大～小）

## 溶接手順 1

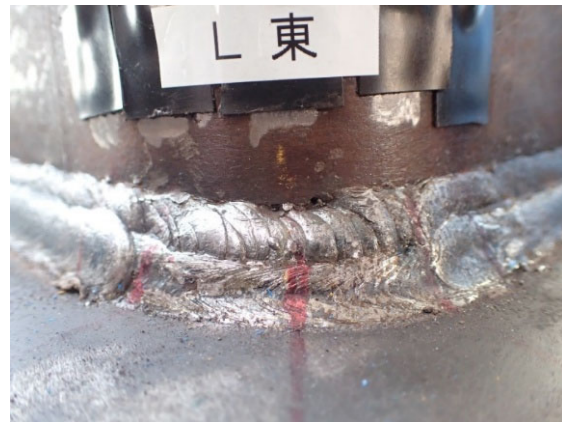


L-1-SS  $\theta_f=108$



L-1-LL  $\theta_f=171$

## 溶接手順 2

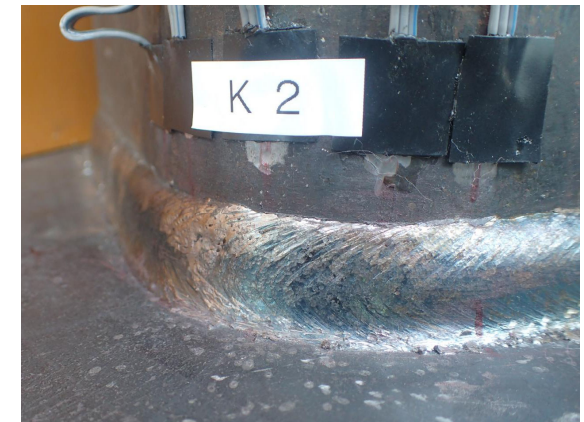


L-2-M1  $\theta_f=124$



L-2-LL  $\theta_f=157$

## ロボット溶接

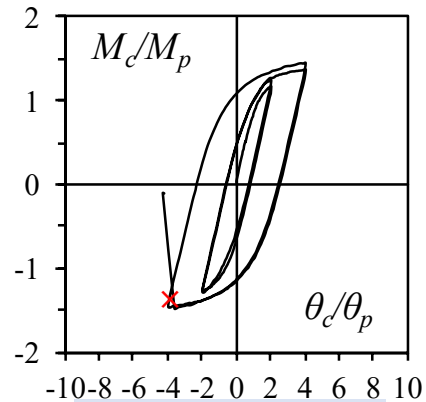


L-R1-L  $\theta_f=144$

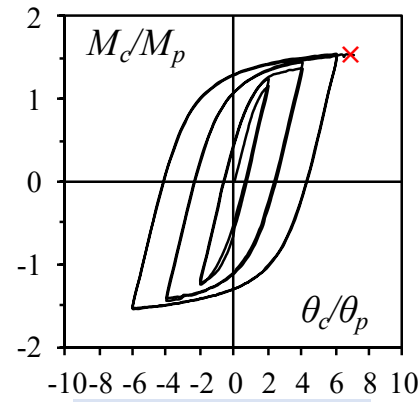


L-R2-LL  $\theta_f=155$

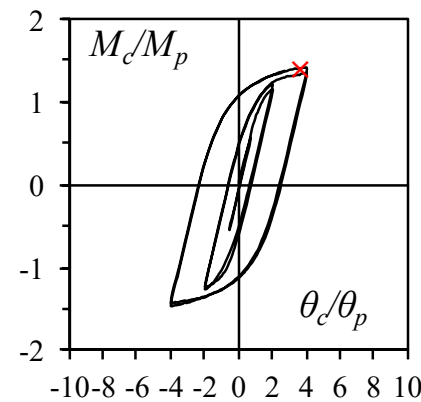
※フランク角  $\theta_f(^{\circ})$  は角部頂点での計測値



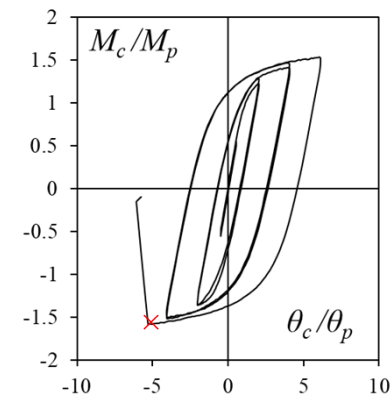
L-1-SS



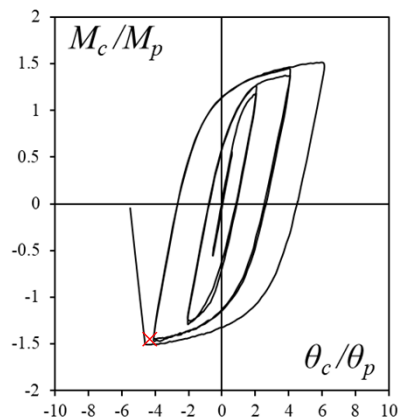
L-1-LL



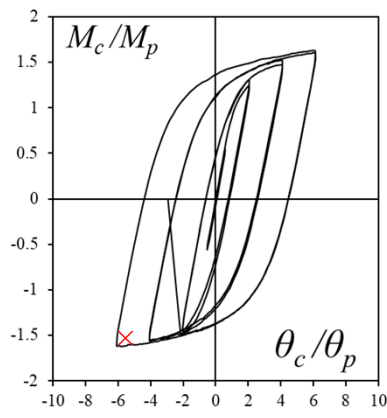
L-2-SS



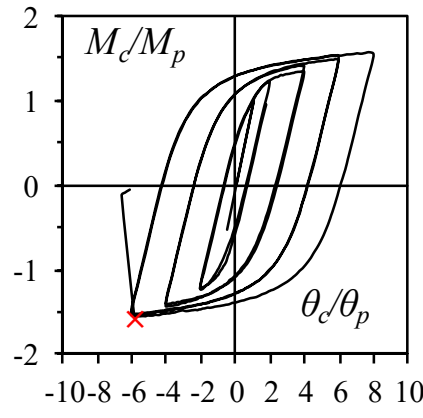
L-2-M1



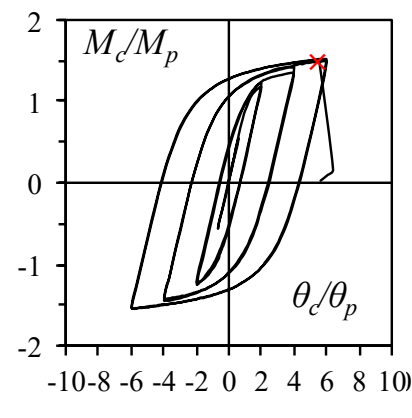
L-2-M2



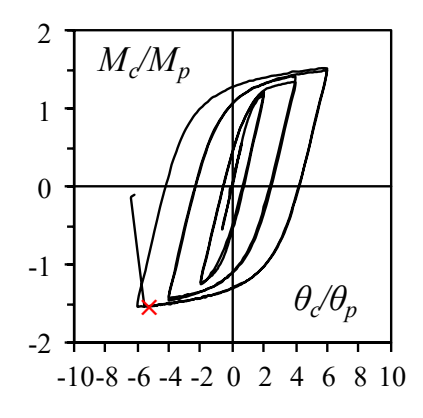
L-2-L



L-2-LL

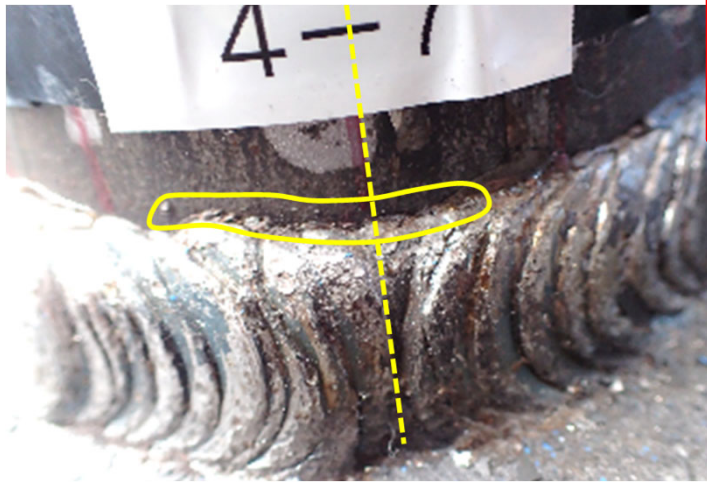


L-R1-L

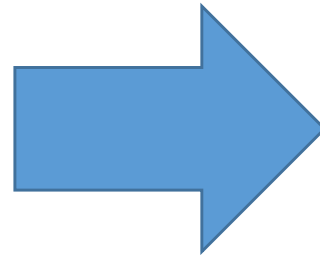


L-R2-LL





$$\theta_f = 108^\circ$$

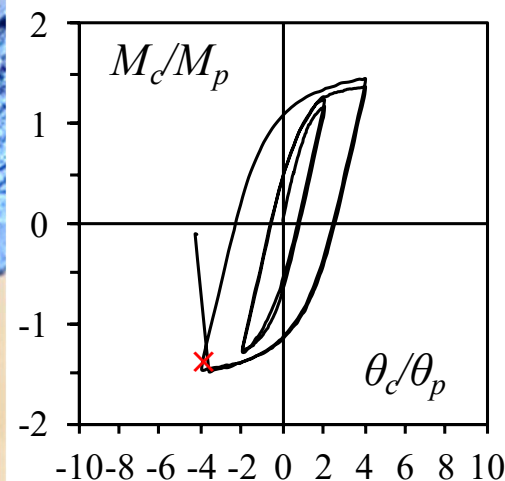


延性き裂発生  
[ $4\theta_p(-1)$ ]

破断  
[ $4\theta_p(-2)$ ]

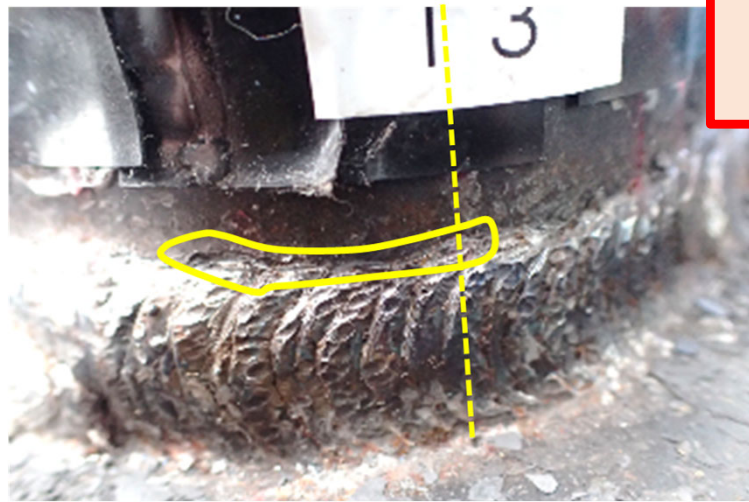


破面

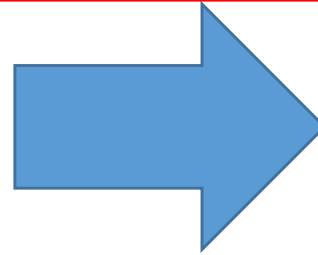


荷重—変形関係



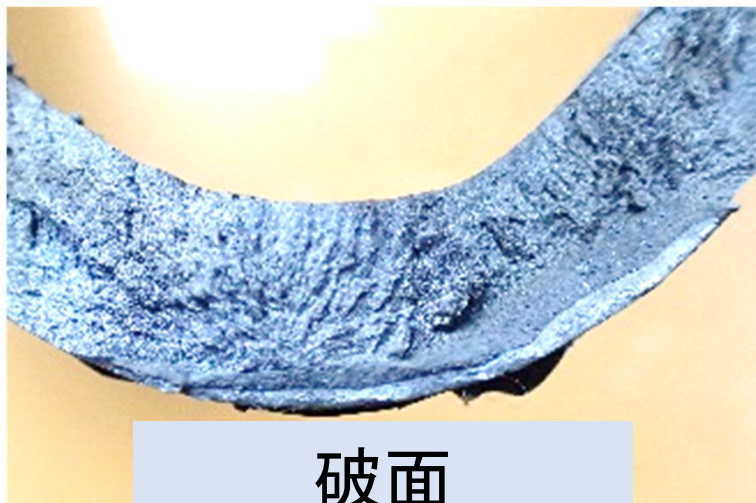


$$\theta_f = 157^\circ$$

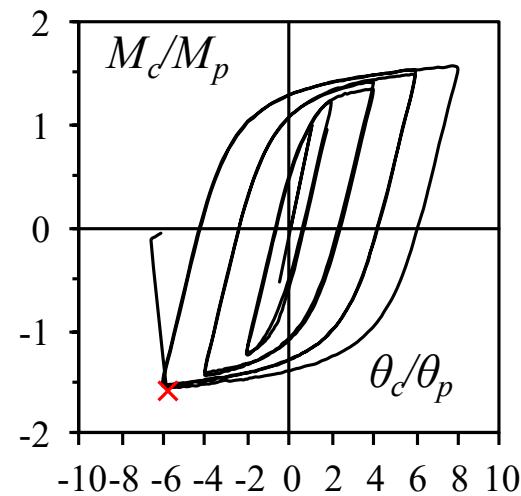


延性き裂発生  
[ $6\theta_p(-1)$ ]

破断  
[ $8\theta_p(-1)$ ]

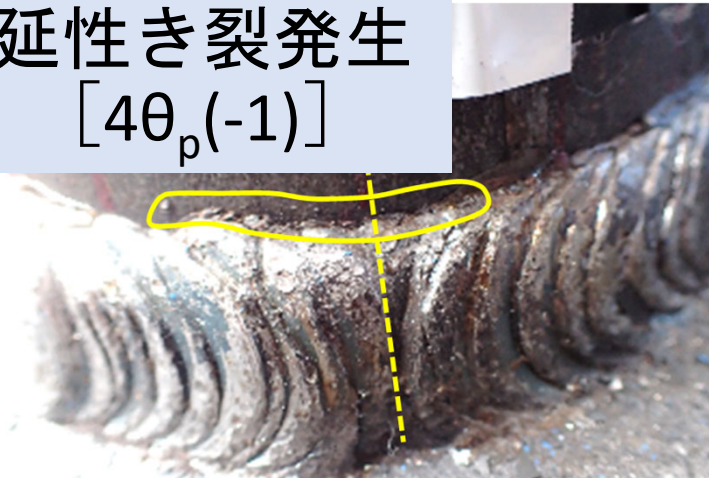


破面

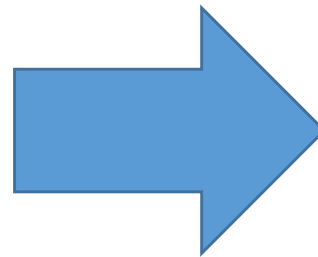


荷重—変形関係

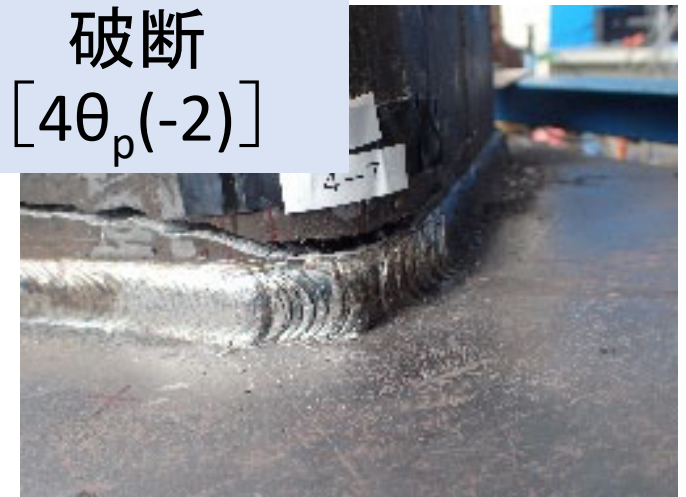
延性き裂発生  
[4 $\theta_p$ (-1)]



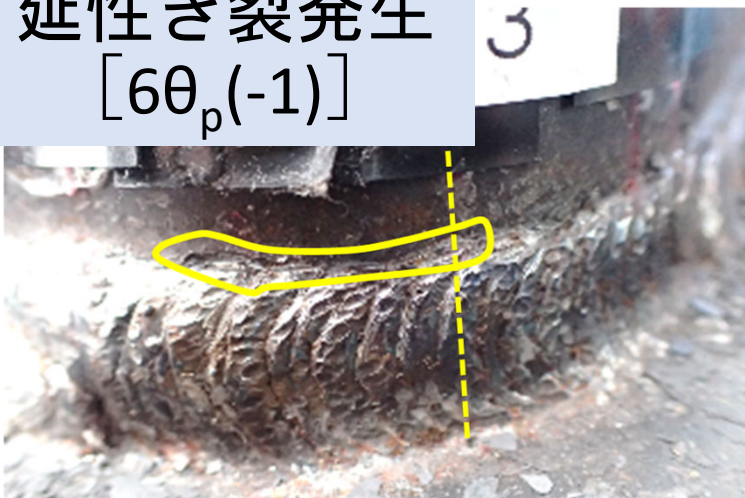
$$\theta_f = 108^\circ$$



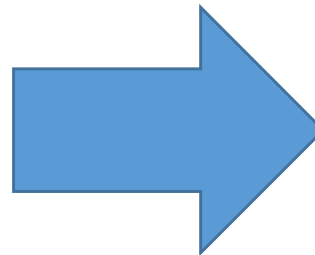
破断  
[4 $\theta_p$ (-2)]



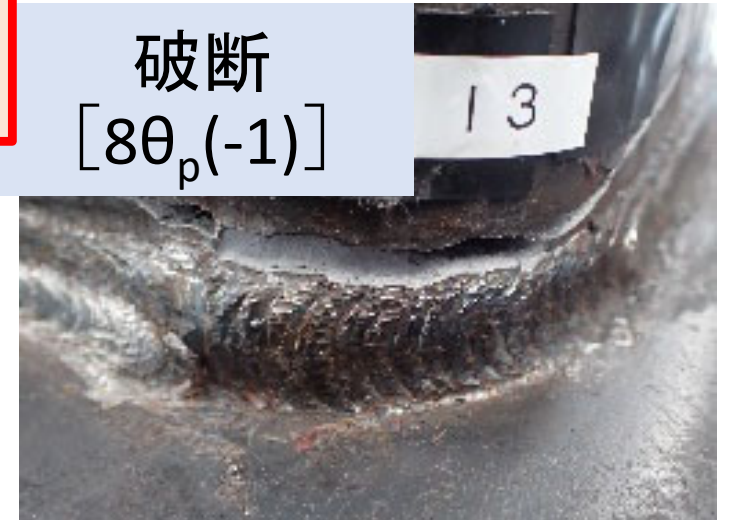
延性き裂発生  
[6 $\theta_p$ (-1)]



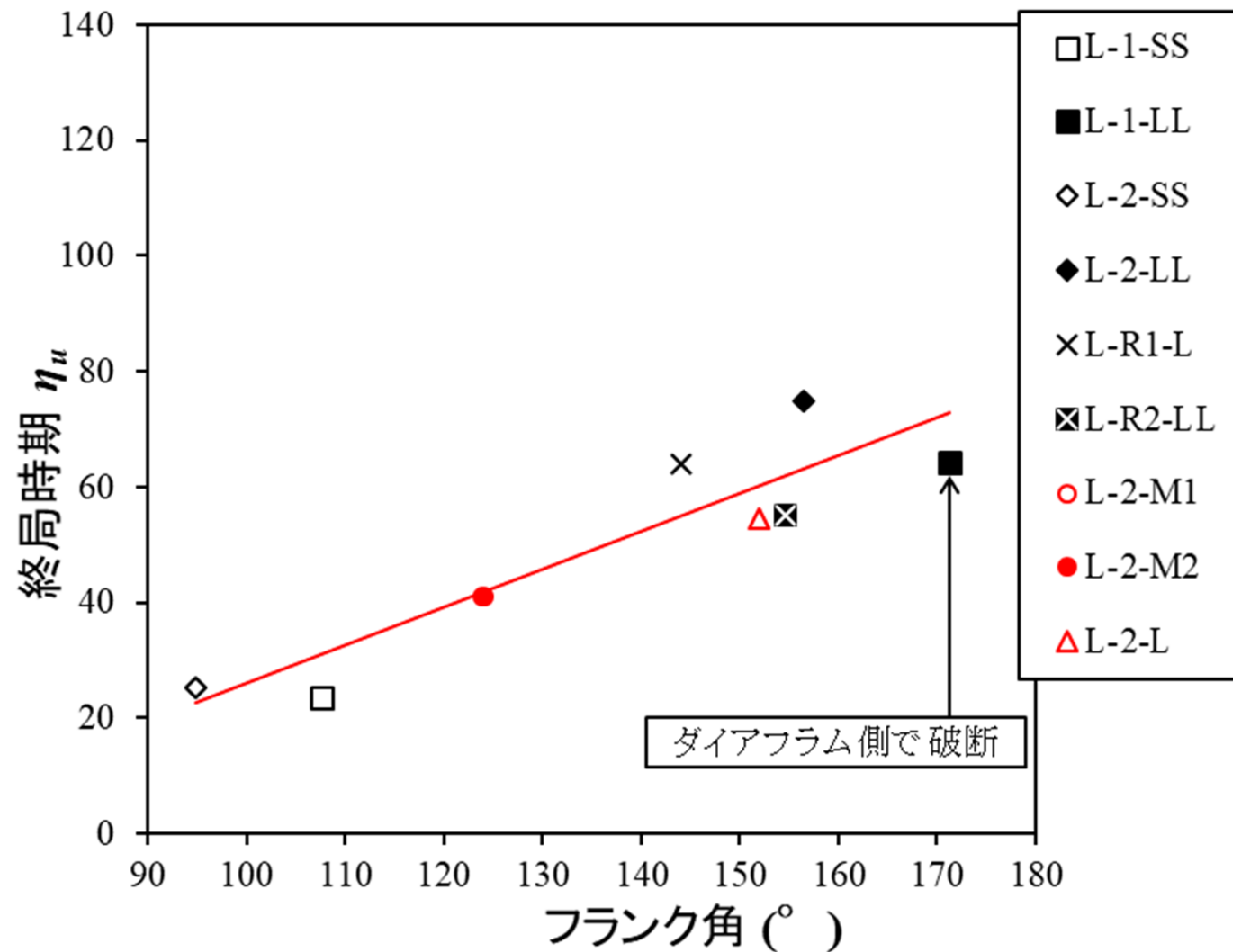
$$\theta_f = 157^\circ$$



破断  
[8 $\theta_p$ (-1)]

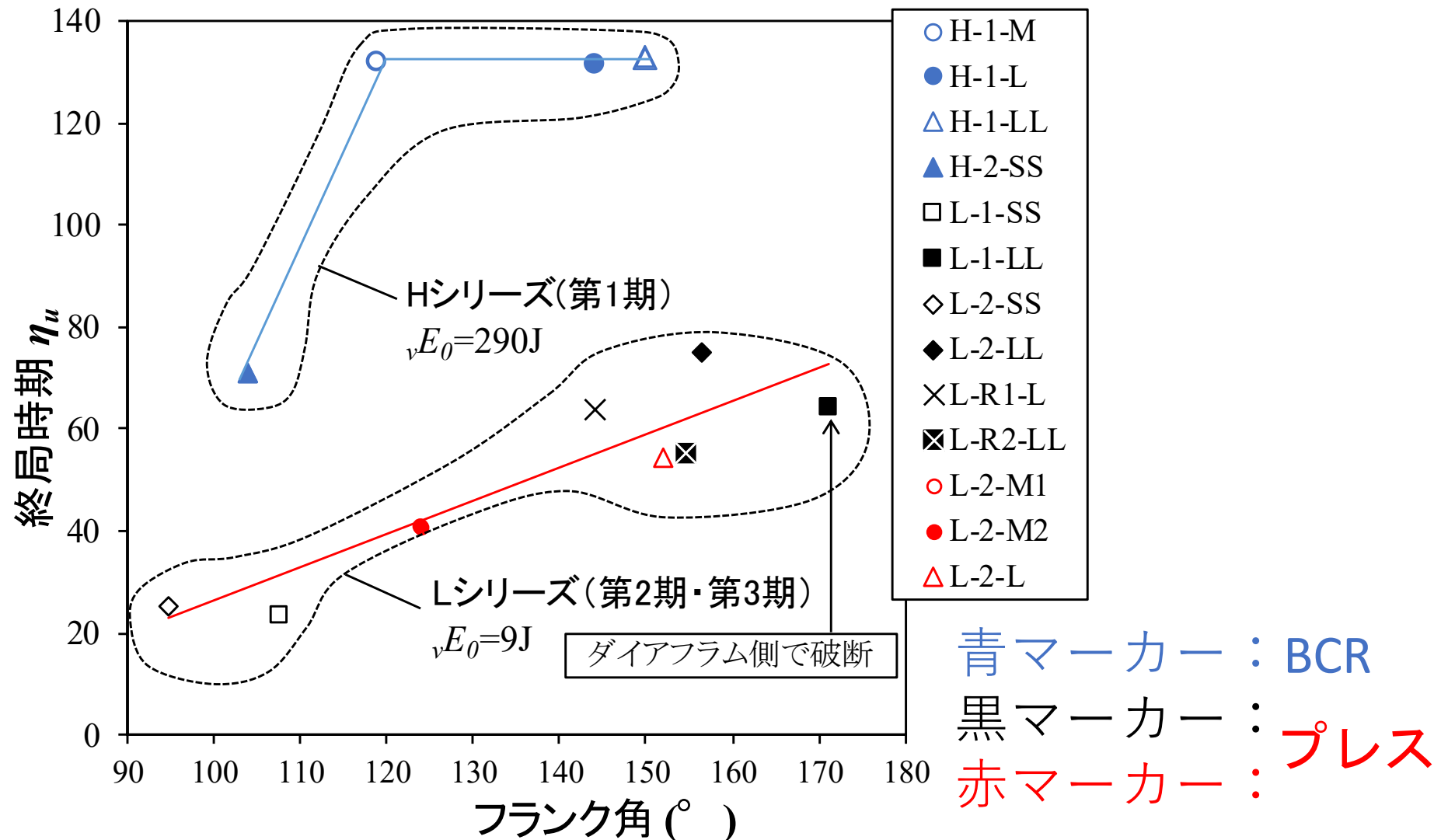


延性き裂発生時期、破断時期ともに、  
フランク角が小さいほど、早くなる



フランク角が小さいほど，**早期に終局状態**に達する

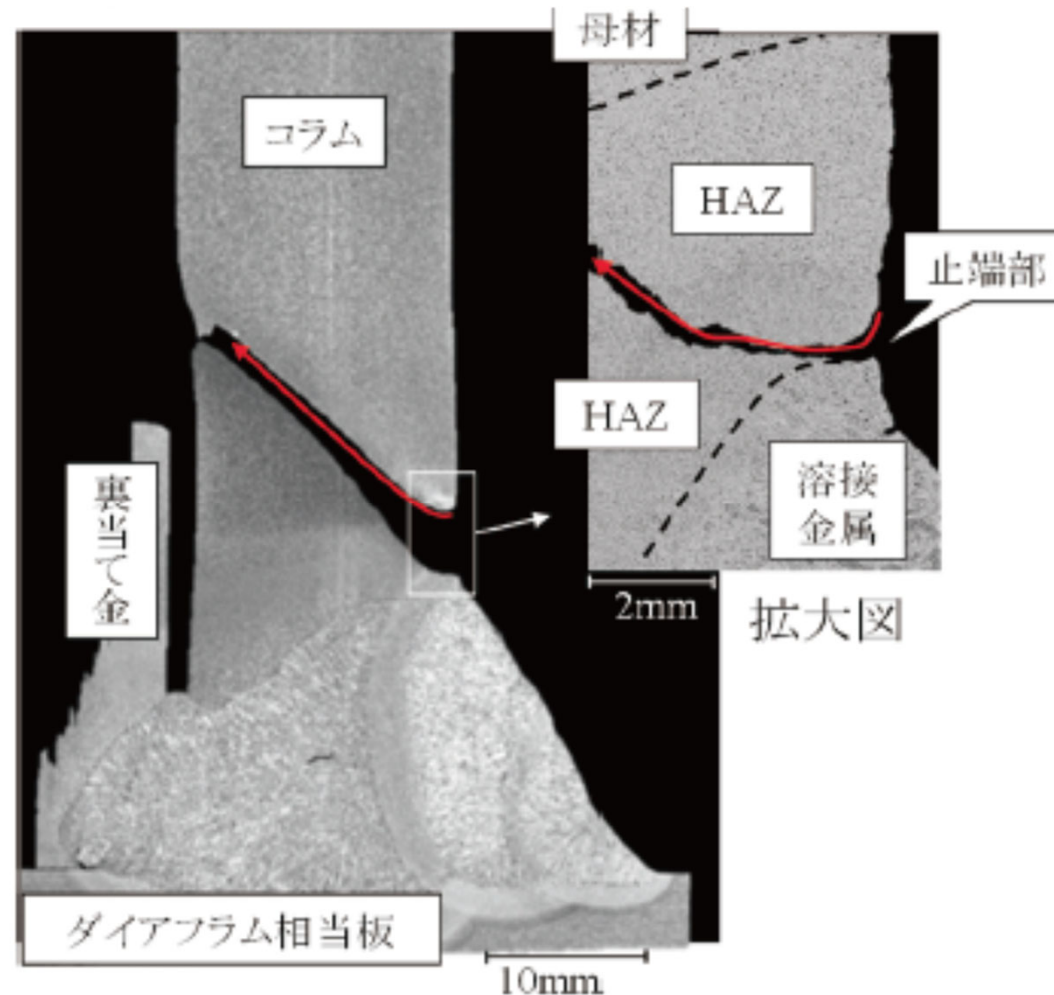
$\eta_u$  : 終局状態までの累積塑性変形倍率



角部母材の靱性の差で塑性変形能力に違いが現れている

$\eta_u$  : 終局状態までの累積塑性変形倍率

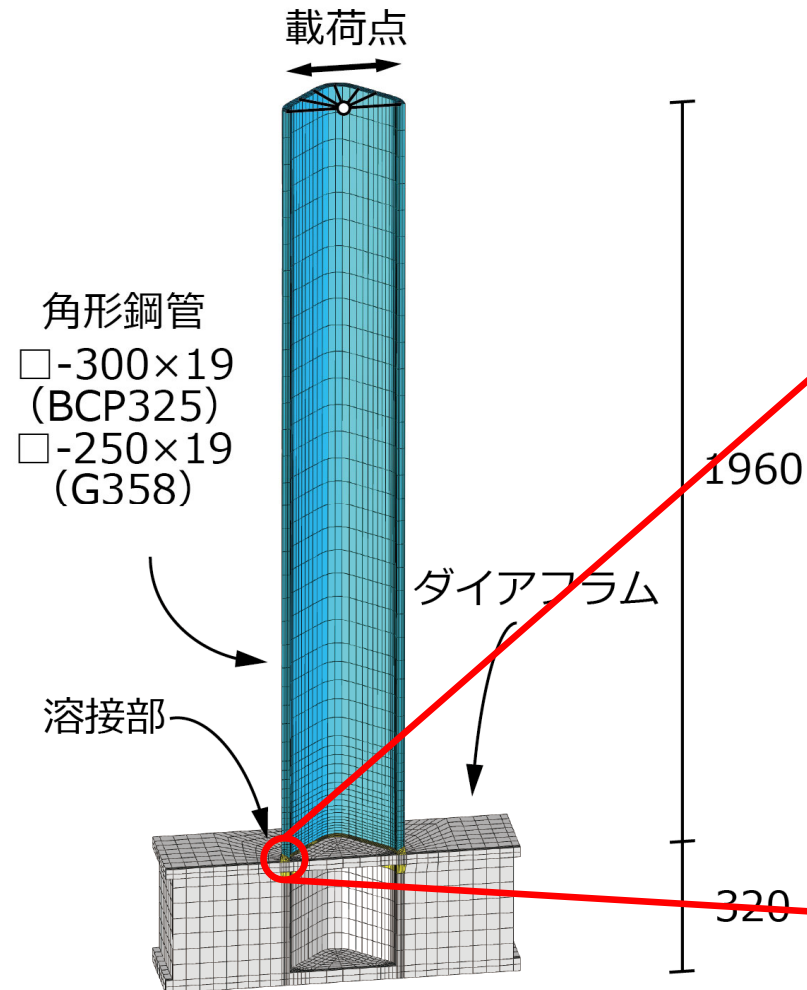




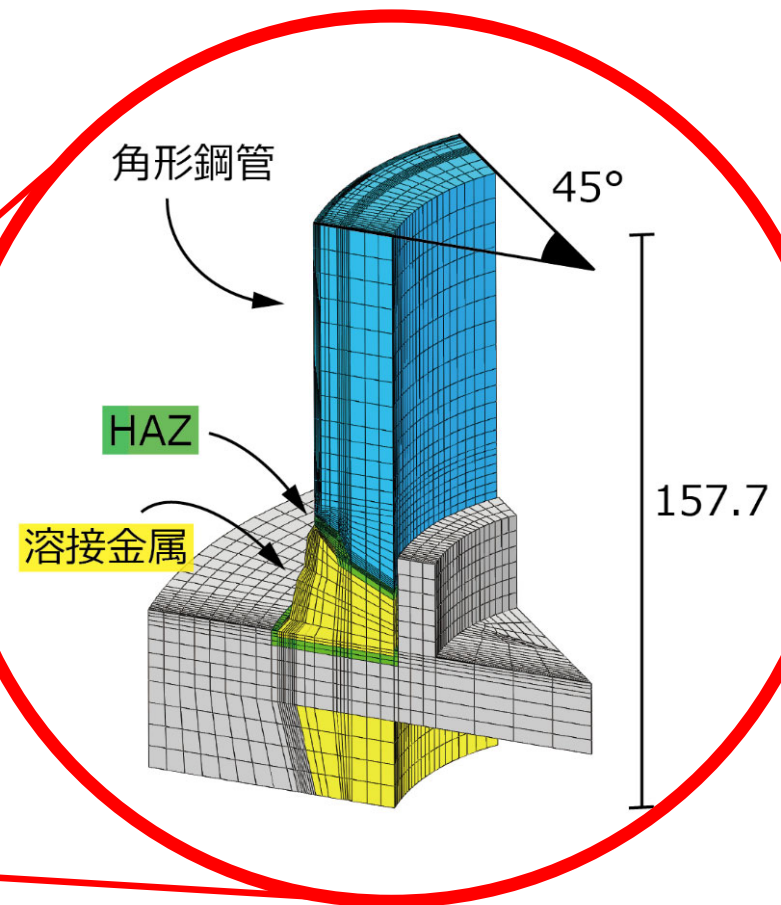
延性き裂の起点：溶接止端部近傍のHAZ部



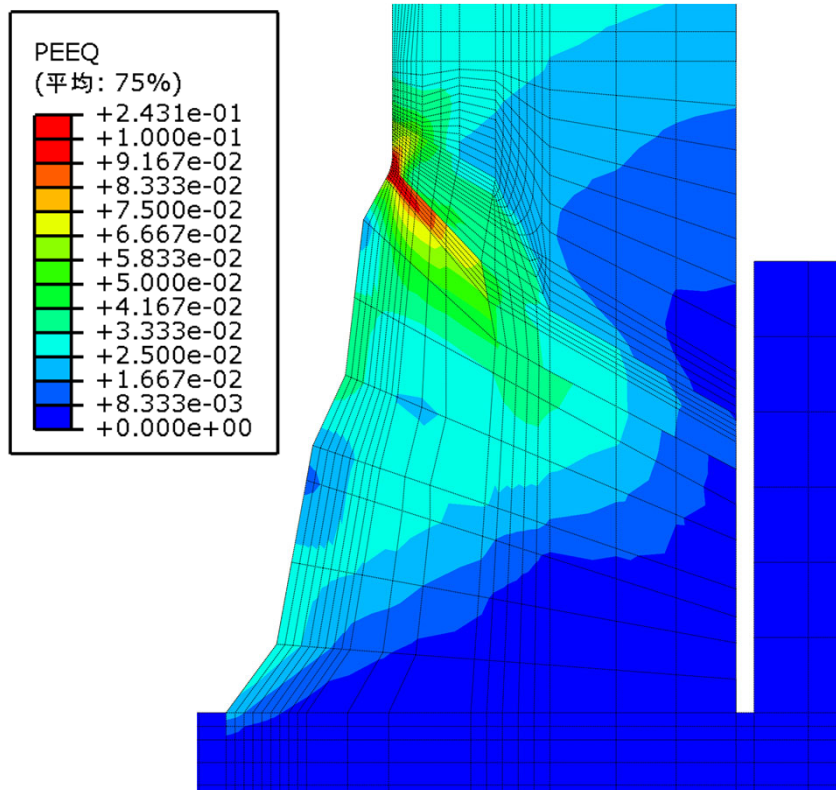
## グローバルモデル



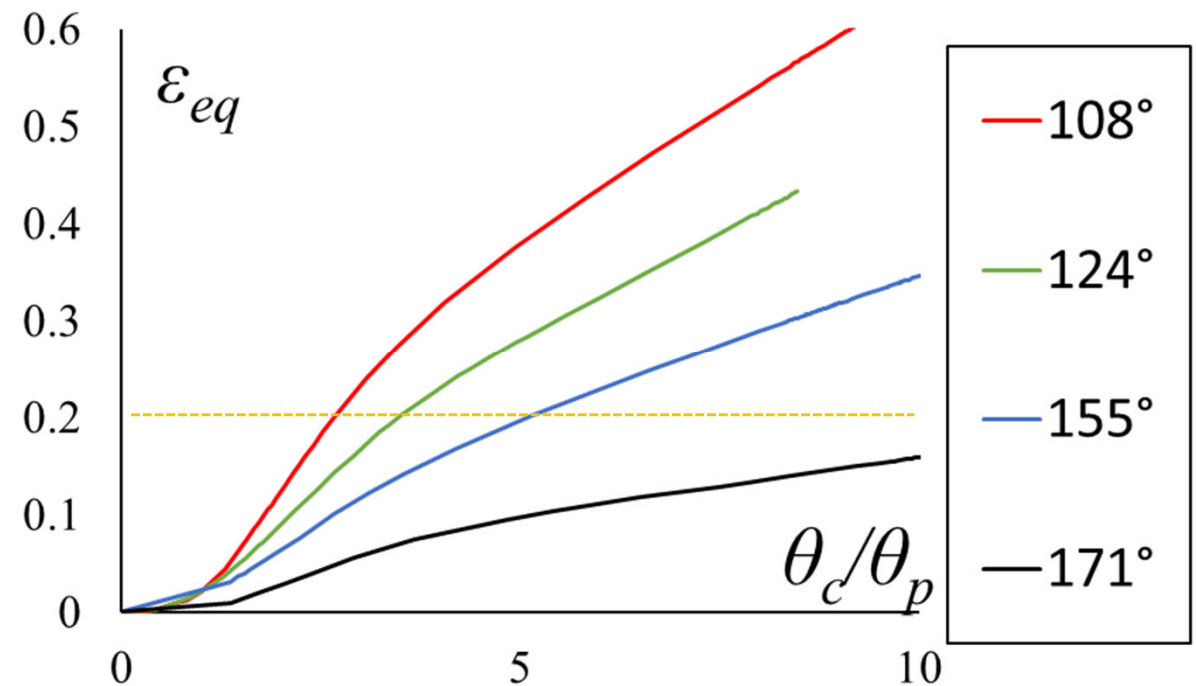
## サブモデル



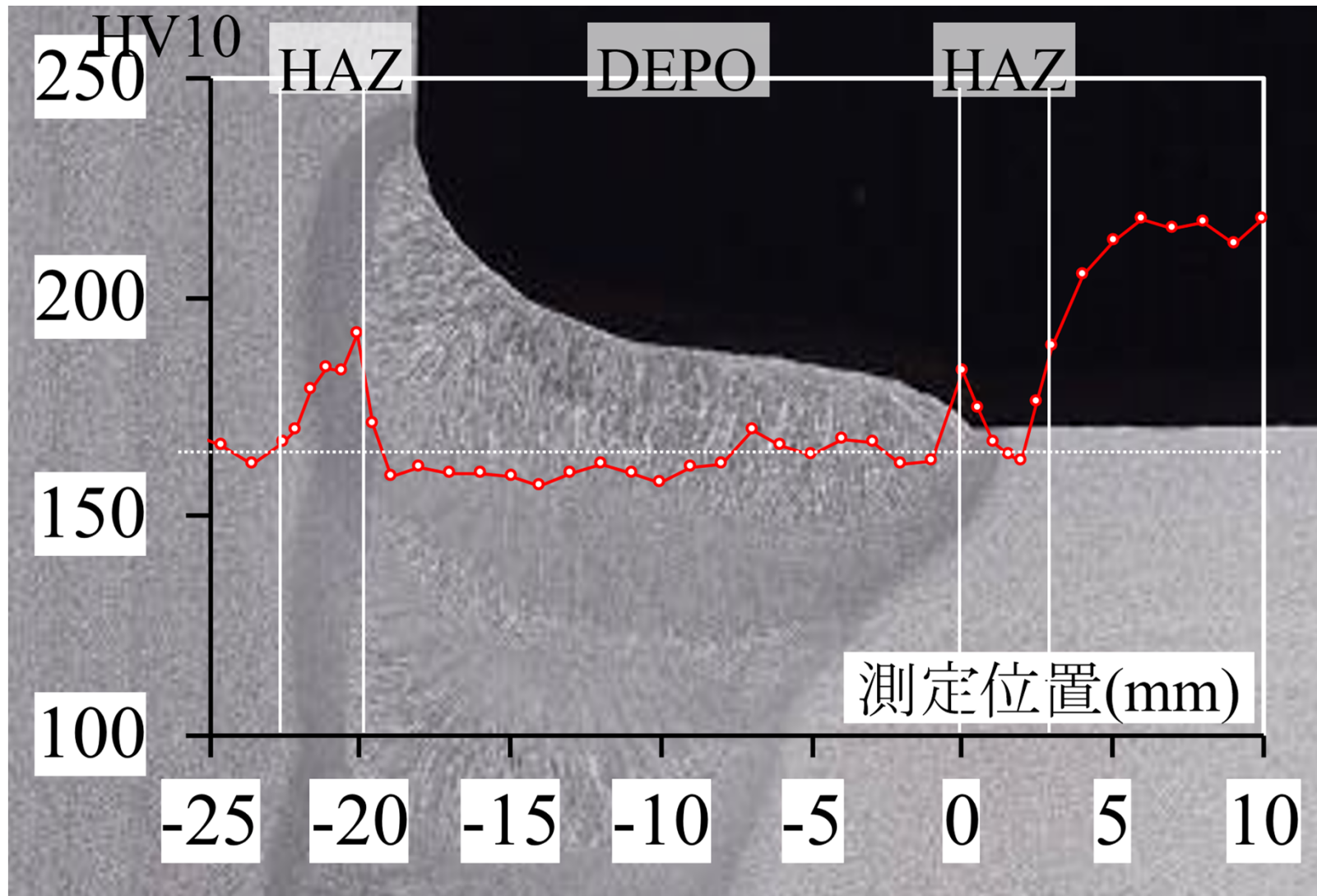
## 【相当塑性歪分布】



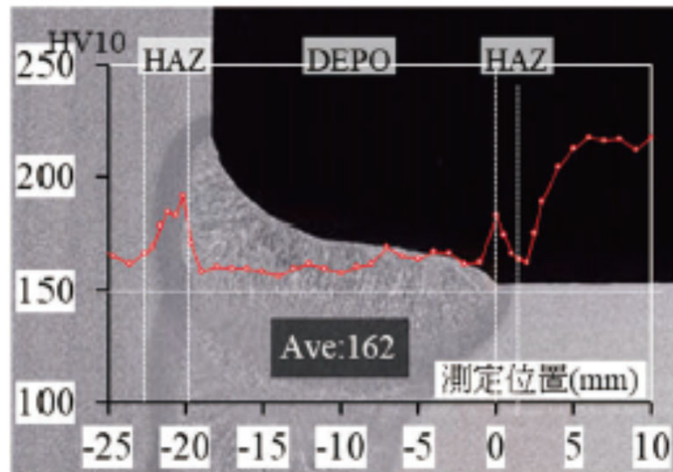
P45-L1



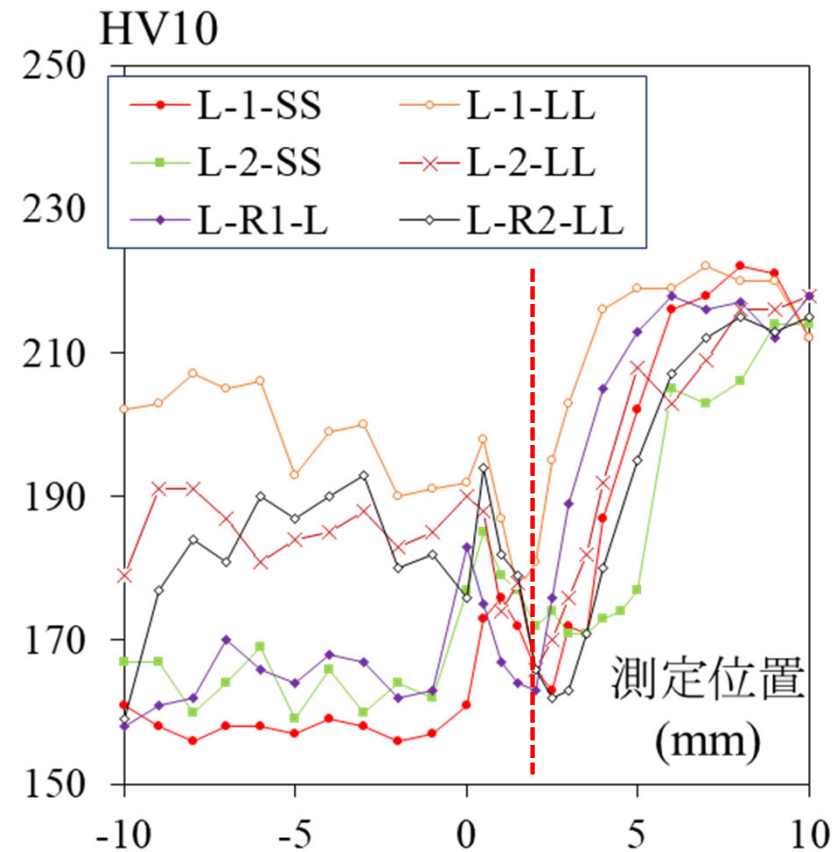
相当塑性歪—柱部材角関係



## 溶接金属強度が塑性変形能力 に影響を与えない理由

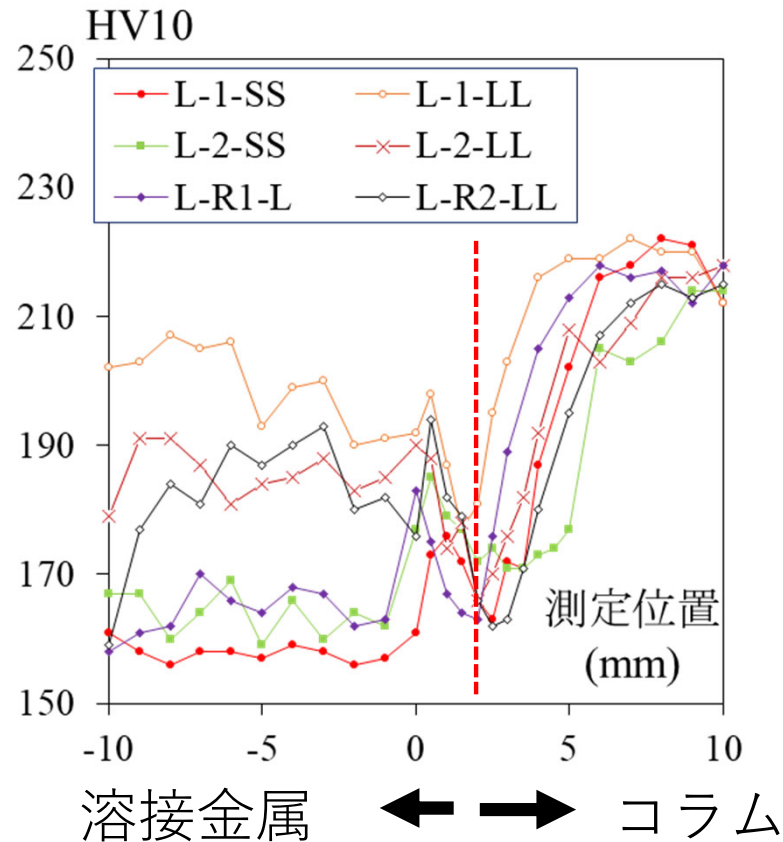


硬さ分布



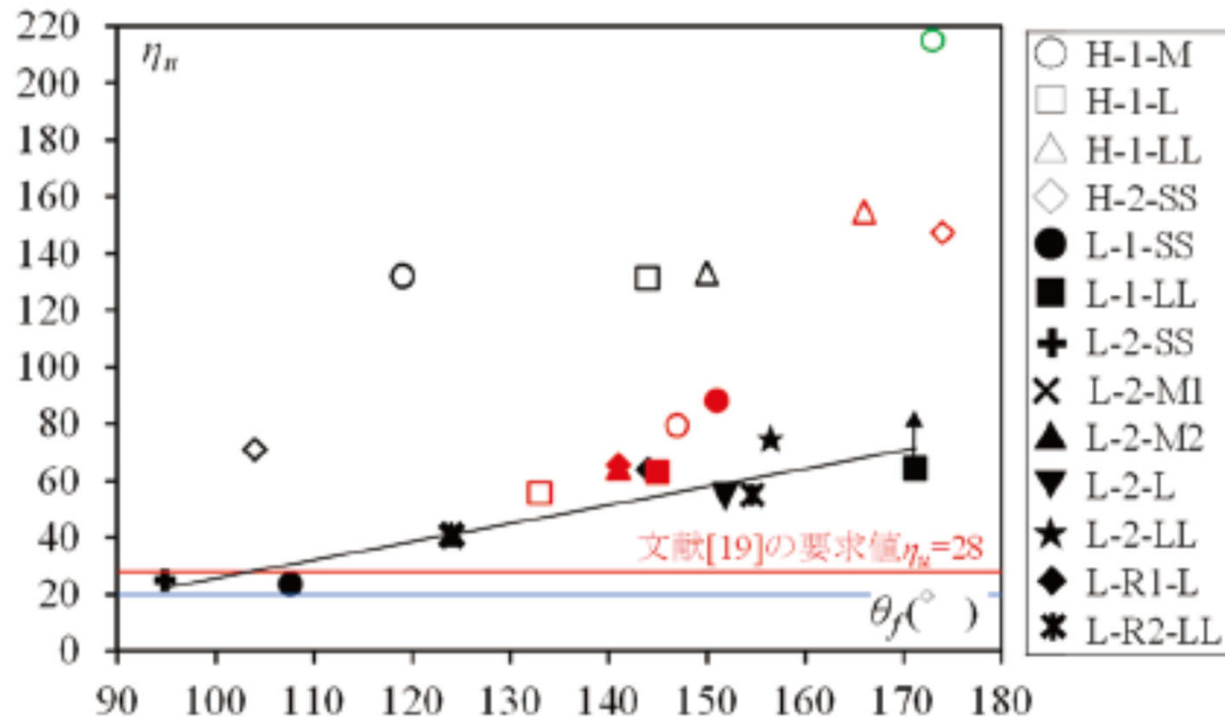
溶接金属 ← → コラム

BOND部近傍の硬さ分布



- 破壊の起点となる**角部HAS**⇒溶接による**焼きならし**により**軟化**
- **溶接金属** (DEP0) の強度は**関与しない**
- **軟化部**の硬さ分布には, **溶接入熱・溶接法**の影響が見られない
- **軟化部**があっても閉断面である角形鋼管では周方向の**拘束効果**があるため**強度が上昇**する ⇒ 母材の**塑性化**が進行する





既往の実験結果

➤ 柱端に**塑性ヒンジ**が形成される場合：

$\eta_u \geq 28 \Rightarrow \theta_f \geq 120^\circ$  程度とする必要がある

➤  $\eta_u = 20$ 程度を要求値とすると， 厳密な管理は不要

- 溶接施工時に，冷間成形角形鋼管の角部の加工硬化による強度上昇を考慮する必要は無い ⇒ 平板部と同等の溶接条件で可
- 溶接施工法・手順によらず， $\eta_u$ は $\theta_f$ と比例関係にある
- フランク角 $\theta_f$ が著しく小さく（ $90^\circ$  に近く）ならないように溶接する

## [実験Ⅰ]

- 1) 岡本昌大, 濱地南美, 田中剛, 浅田勇人, 小関千尋, 藤沢清二, 大庭諒介, 田渕基嗣 : ロボット溶接によって通しダイアフラムに接合された冷間プレス成形角形鋼管柱の塑性変形能力 (角部溶接部詳細が柱の繰返し曲げ性能に与える影響), 鋼構造論文集, 第27巻第108号, pp. 31-43, 2020. 12
- 2) 佐藤璃奈, 田中剛, 浅田勇人, 濱地南美, 藤沢清二, 大庭諒介, 小関千尋, 田渕基嗣 : 冷間プレス成形角形鋼管柱の塑性変形能力に与える角部溶接部詳細の影響ーその8, ーその9ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 633-636, 2020. 09

## [実験Ⅱ]

- 3) 古結泰司, 浅田勇人, 田中剛, 豊島秀我, 田渕基嗣 : 半自動CO<sub>2</sub> アーク溶接による冷間ロール成形角形鋼管柱の溶接施工法に関する研究ーその1ーその3ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp. 597-602, 2020. 09

## [実験Ⅲ]

- 4) 露木瞭太, 市川優, 浅田勇人, 田中剛, 板谷俊臣, 田渕基嗣 : 柱端完全溶込み溶接部の溶接方法が冷間成形角形鋼管柱の塑性変形能力に与える影響, 鋼構造論文集, 第31巻第124号, pp. 22-38, 2025. 01