

高耐久性鋼橋の実現に向けて

大同大学工学部建築学科土木・環境専攻 准教授 宮寄 靖大

概要

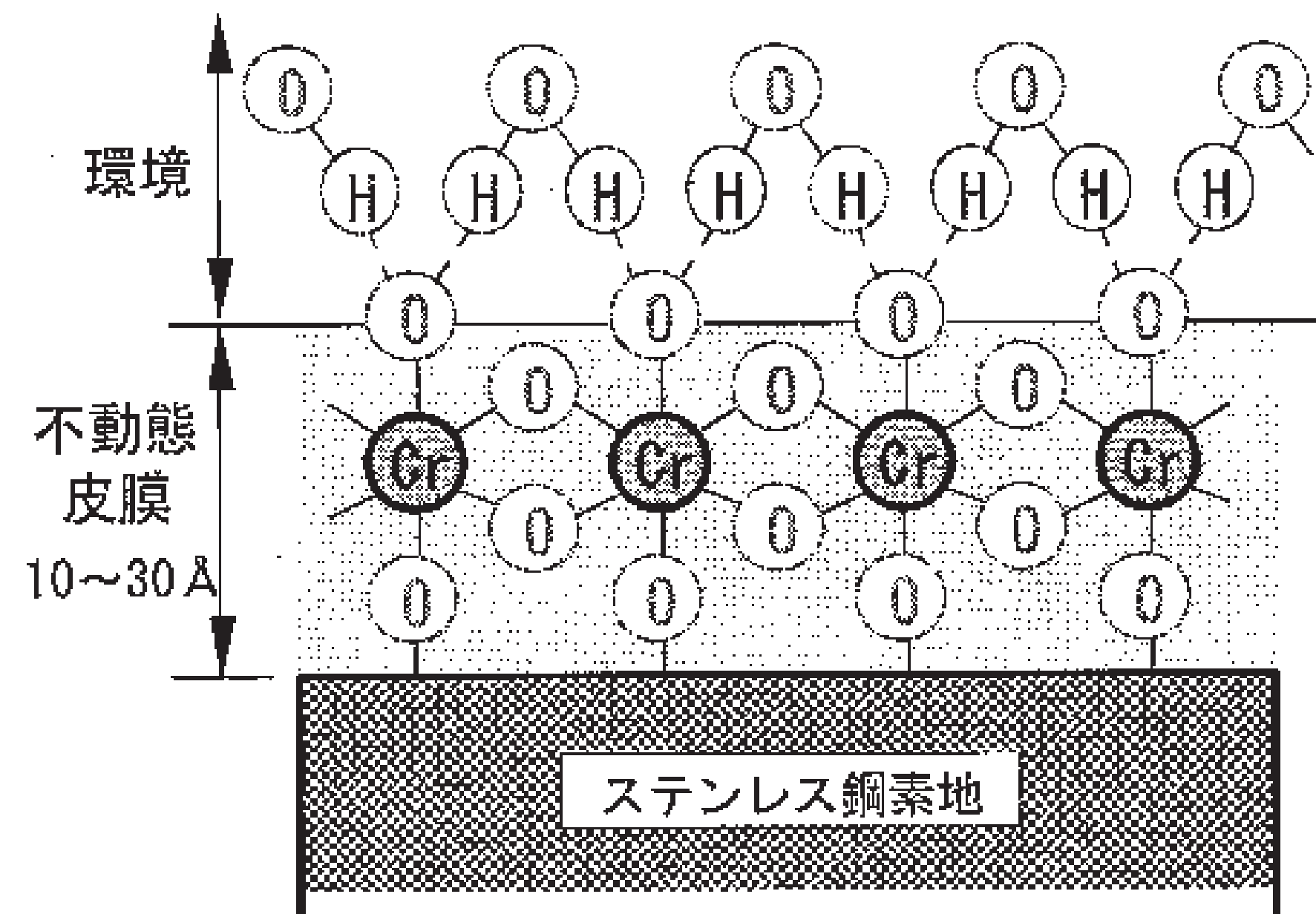
- ・ 高耐久性材料（ステンレス鋼）について
- ・ ステンレス鋼橋の実現に向けて
- ・ ステンレス鋼部材の強度特性
- ・ 適材適所の材料配置としたハイブリッド部材
- ・ ステンレス鋼と炭素鋼の接合

高耐久性材料であるステンレス鋼

ステンレス鋼

鉄にクロムを10.5%以上含有した合金鋼

不動態皮膜



○素地中のクロム(Cr)が外界の酸素(O)と結合し、表面に厚さ10~30 Åの薄い不動態皮膜(保護性皮膜)を形成する。

○不動態皮膜は $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ で表される網目構造の酸化皮膜。

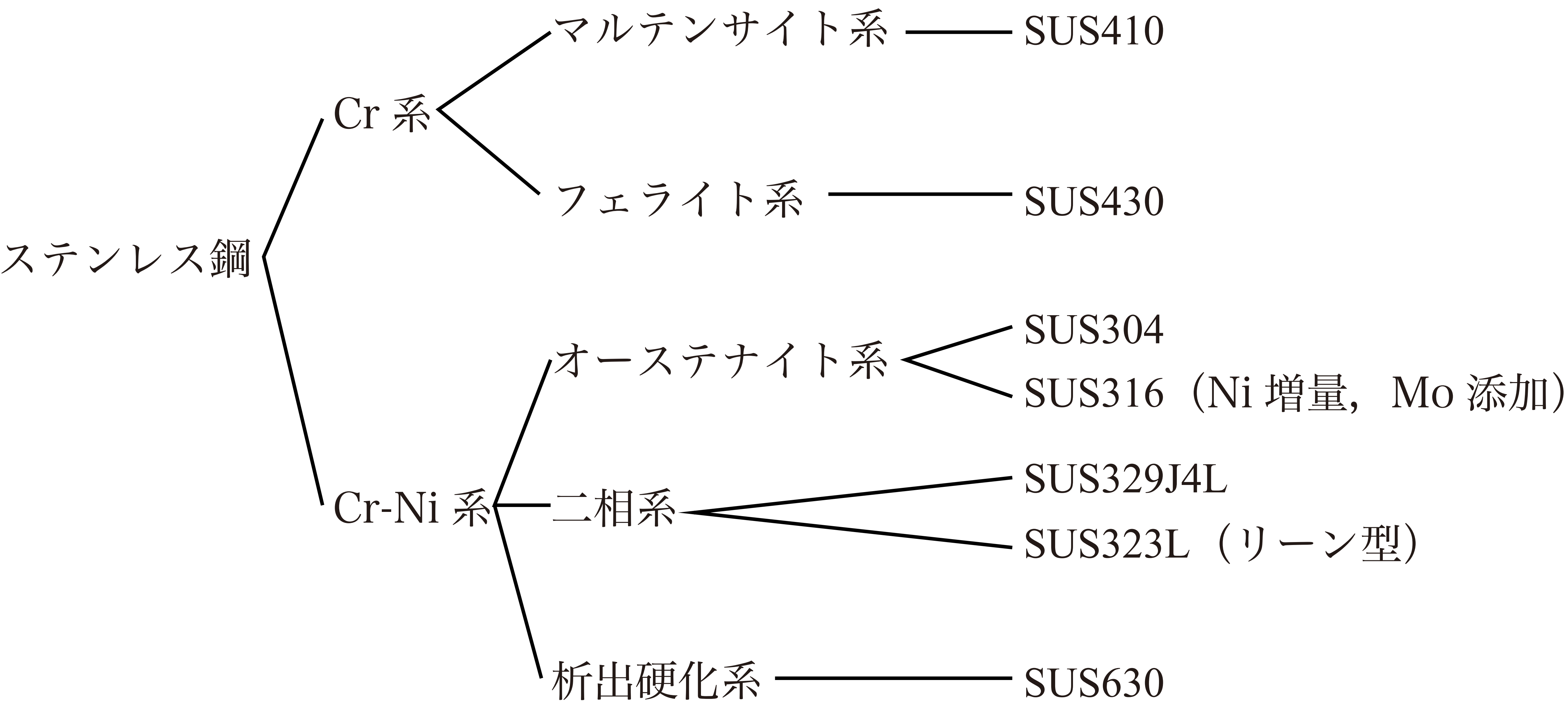
○不動態皮膜が腐食進行を防止。

○不動態皮膜は、一般環境下では自己補修能があり、物理的に破壊されても瞬時に再生するため、耐食性が維持される。

出典：日本鋼構造協会 ステンレス鋼の土木構造物への適用検討小委員会，土木構造物技術者のためのステンレス鋼ガイドブック，日本鋼構造協会，2009.

ステンレス鋼の分類

主な鋼種 (JIS)

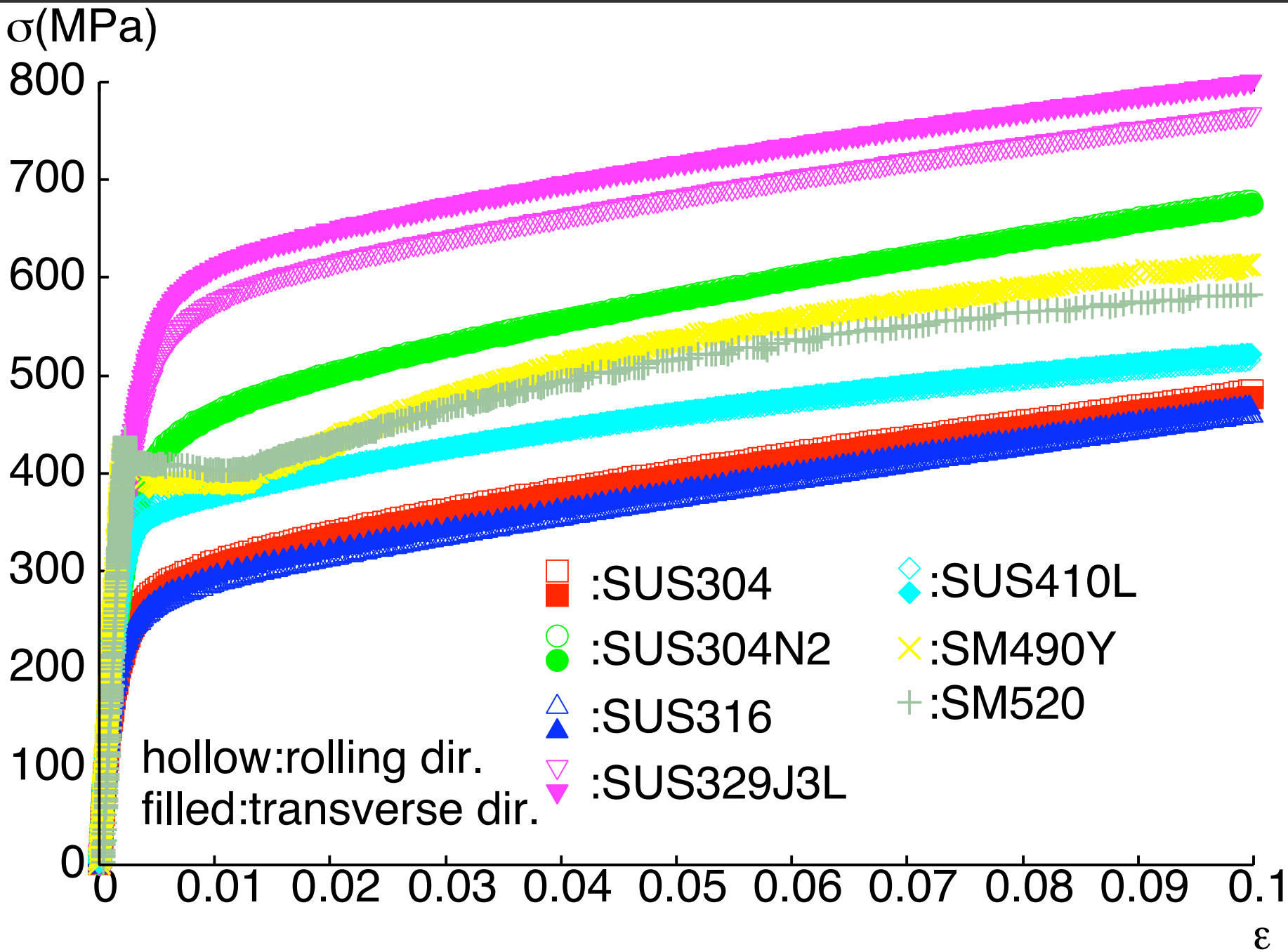


ステンレス鋼の材料特性

基準強度 (JIS)

鋼種	SUS304	SUS304N2	SUS430	SUS410	SUS329J4L	SUS630
0.2%耐力 (MPa)	205以上	345以上	205以上	205以上	450以上	725以上
引張り強度 (MPa)	520以上	690以上	420以上	440以上	620以上	930以上

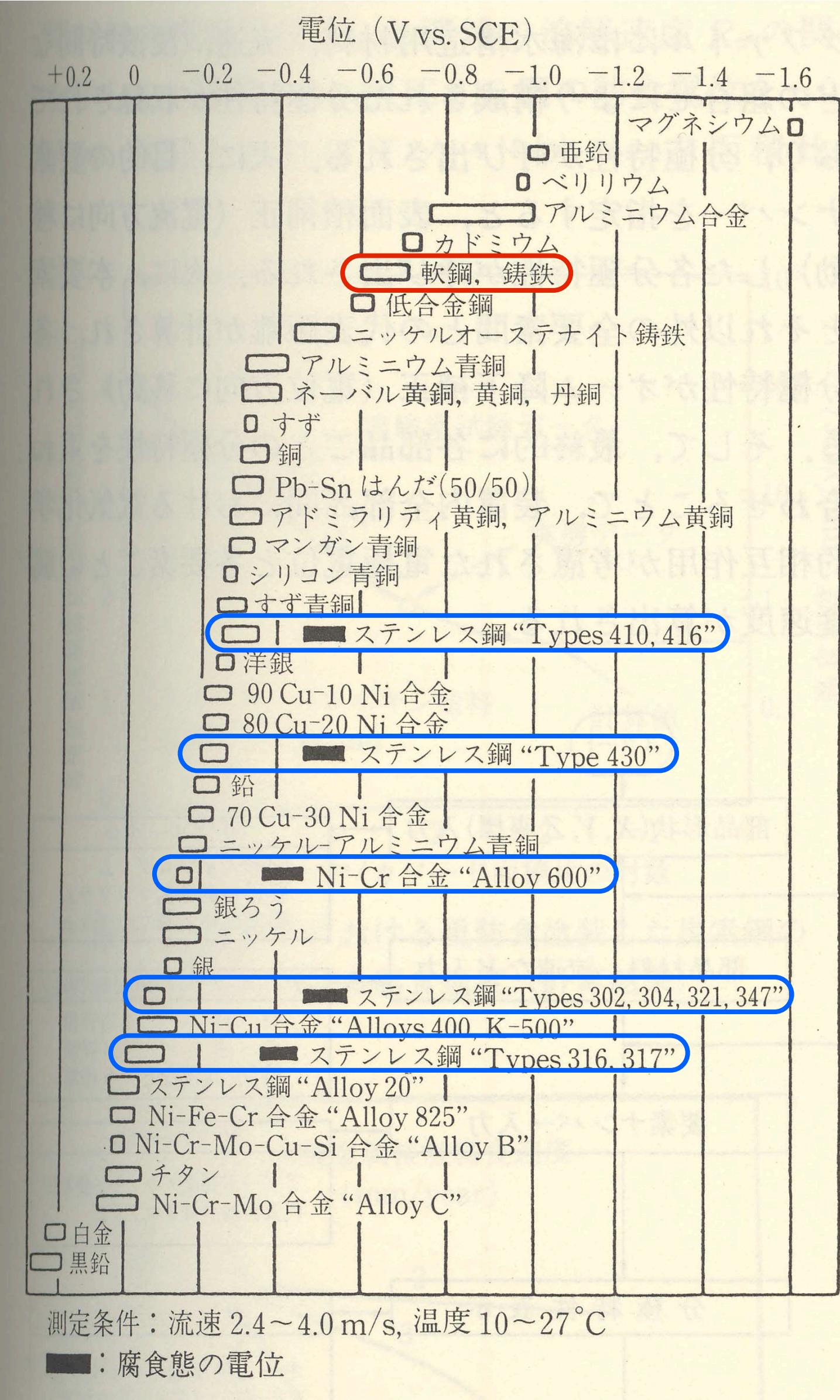
ヤング係数
193-200GPa



引張試験結果の一例

ステンレス鋼の化学成分

Type	化学成分 (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS304	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	8.00-10.05	18.00-20.00	-
SUS316	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下	10.00-14.00	16.00-18.00	2.00-3.00
SUS329J4L	0.030以下	1.00以下	1.50以下	0.040以下	0.030以下	5.50-7.50	24.00-26.00	2.50-3.50
SUS410L	0.030以下	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.030以下	-	11.00-13.50	-
SUS630	0.07以下	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.030以下	3.00-5.00	15.00-17.50	-
SUS323L	0.030以下	1.00以下	2.50以下	0.040以下	0.030以下	3.00-5.50	21.50-24.50	0.05-0.20
SM490Y	0.20以下	0.55以下	1.65以下	0.035以下	0.035以下	-	-	-



ステンレス橋梁

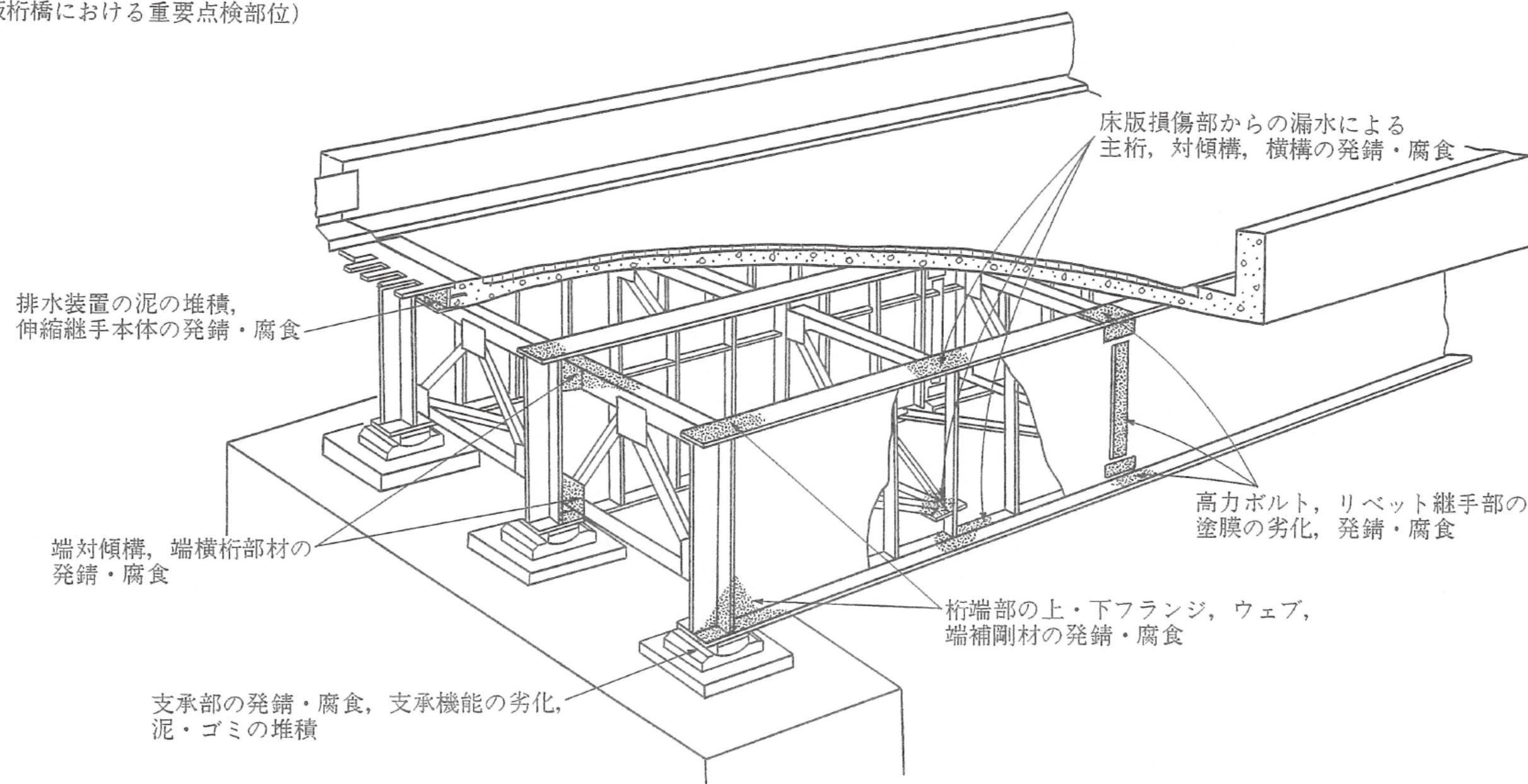


ステンレス鋼製部材の設計法

- SEI/ASCE-8, ASCE, 2003.
- AS/NZS, Standards Australia, 2001.
- Eurocode 3, CEN, 2006.
- ステンレス建築構造設計基準作成委員会, ステンレス建築構造物設計基準・同解説 【第2版】, ステンレス構造建築協会, 2001.
- JSSCテクニカルレポートNo.108 ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針 (案), 日本鋼構造協会, 2015.
- など

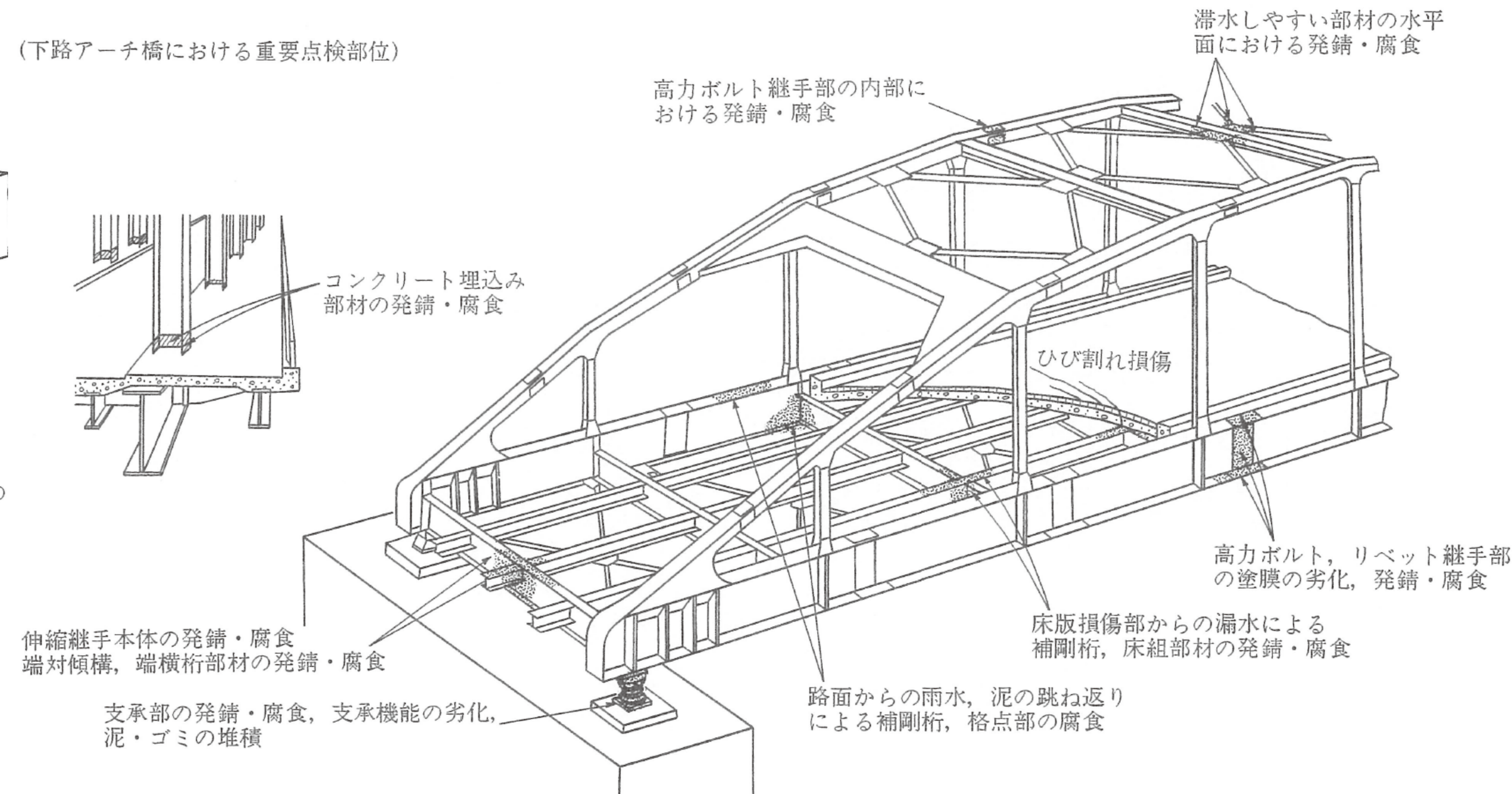
鋼橋の腐食マップの一例

(鈑桁橋における重要点検部位)



注：海岸地域に位置する橋梁に関しては，主桁内側面，対傾構，横桁，横構部材の発錆・腐食をチェックすること。

(下路アーチ橋における重要点検部位)



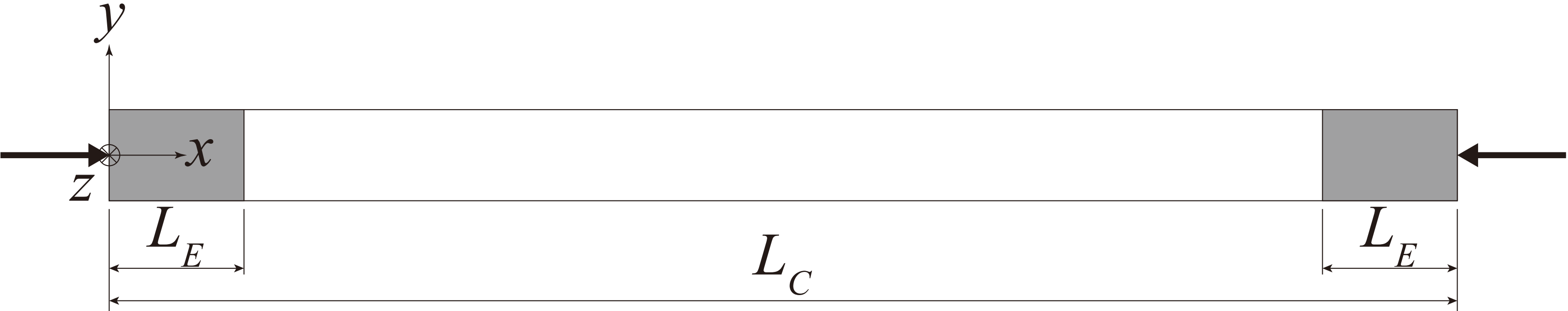
注1：海岸地域に位置する橋梁に関しては，床組部材の発錆・腐食をチェックすること。

出典：土木学会鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会，鋼構造シリーズ7 公共における劣化現象と損傷の評価，土木学会，1996.

適材適所の材料配置としたハイブリッド部材

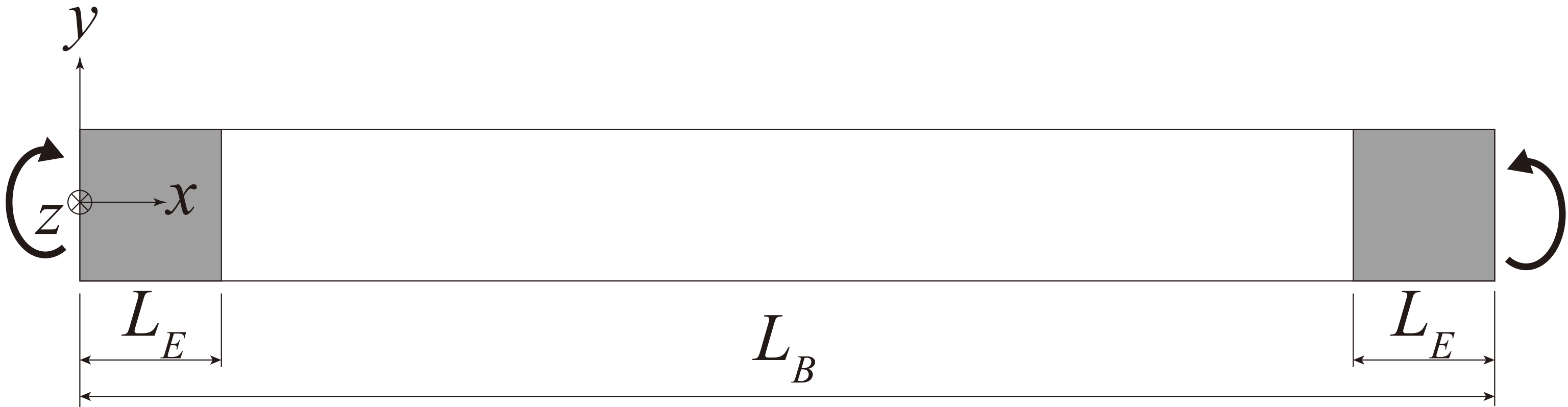
- ・ 部材の長さ方向のハイブリッド化
- ・ 部材断面内でのハイブリッド化
- ・ 橋梁部位でのハイブリッド化
- ・ その他

部材の長さ方向のハイブリッド化



I 形断面または中空正方形断面長柱

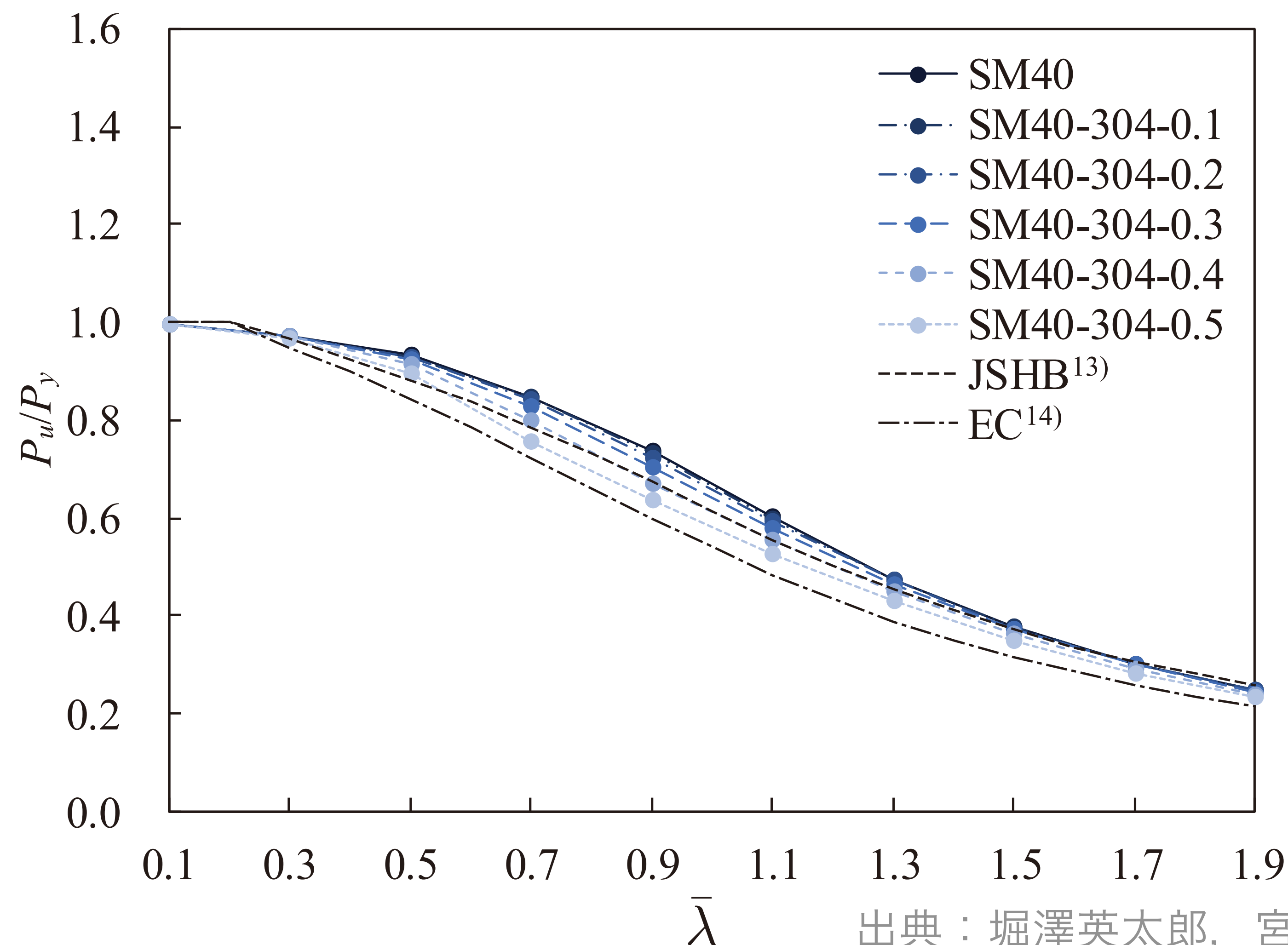
$$\frac{2L_E}{L_C \text{ or } L_B}$$



■ :stainless steel

I 形断面梁

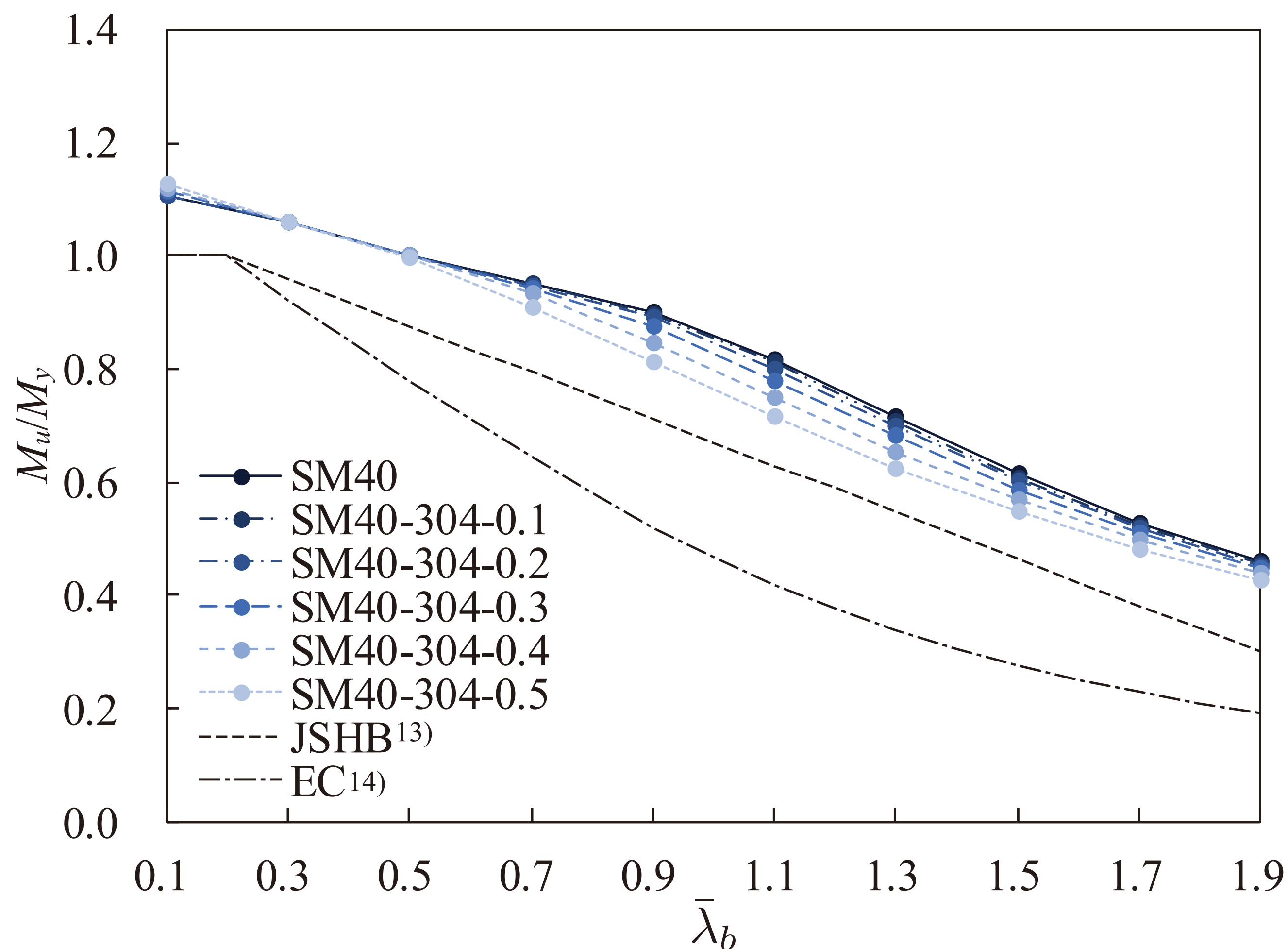
ハイブリッド中空正方形断面長柱の終局強度



- 部材長に対するステンレス鋼の割合が30%以下のハイブリッド長柱の終局圧縮強度は、炭素鋼製長柱の終局圧縮強度の95%以上となる。

出典：堀澤英太郎，宮寄靖大，部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法，構造工学論文集A，Vol.65A，pp.1-14，2019.

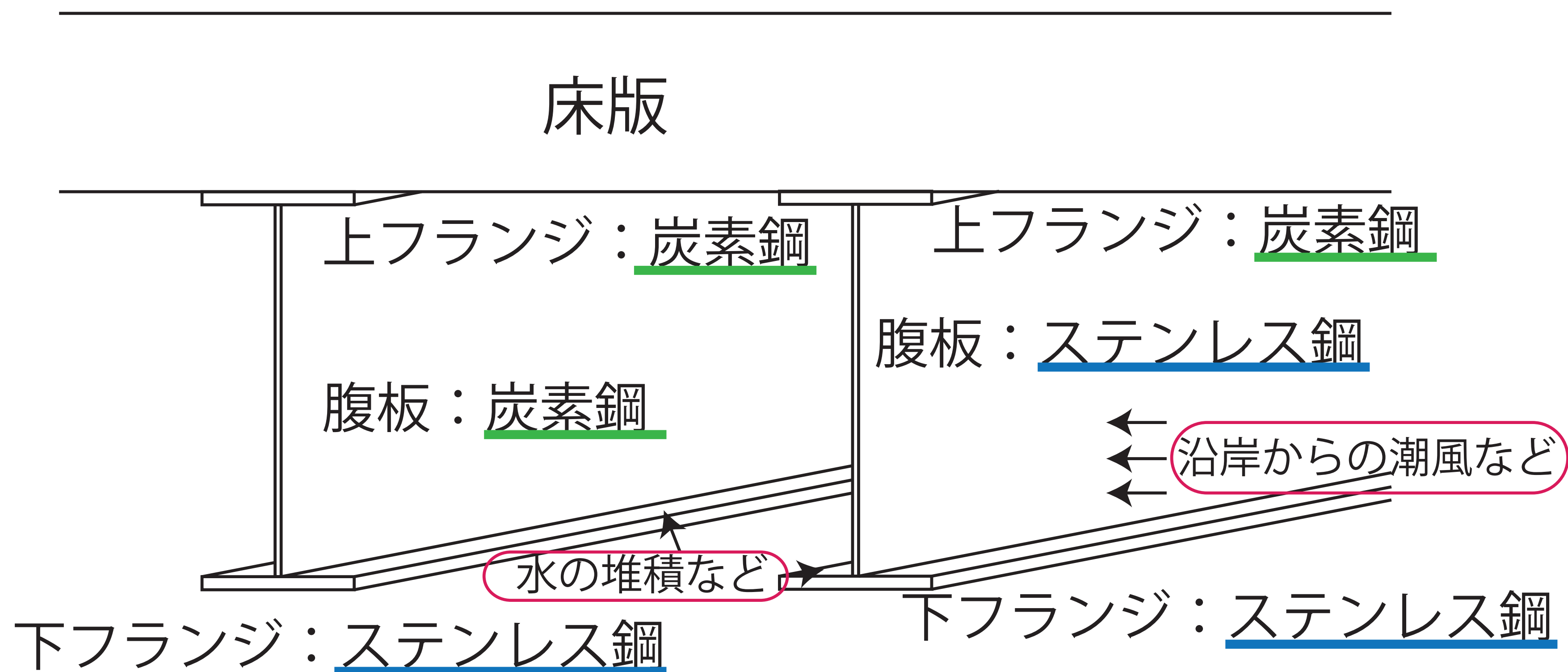
ハイブリッドI形断面梁の終局強度



- 部材長に対するステンレス鋼の割合が30%以下のハイブリッドI形断面梁の終局曲げ強度は、炭素鋼製I形断面梁の終局曲げ強度の95%以上となる。

出典：堀澤英太郎，宮寄靖大，部材両端をステンレス鋼とした鋼製部材の圧縮および曲げ強度評価法，構造工学論文集A，Vol.65A，pp.1-14，2019.

部材断面内でハイブリッド化1



モデル名	上フランジ	腹板	下フランジ	モデル名	上フランジ	腹板	下フランジ
HOSM40	SM400	SM400	SM400	HOSM57	SM570	SM570	SM570
MHY40-40-04			SUS304	MHY57-57-J3L			SUS329J3L
MHY40-04-40		SUS304	SM400	MHY57-J3L-57		SUS329J3L	SM570
MHY40-04-04			SUS304	MHY57-J3L-J3L			SUS329J3L
MHY04-40-40	SUS304	SM400	SM400	MHYJ3L-57-57	SUS329J3L	SM570	SM570
MHY04-40-04			SUS304	MHYJ3L-57-J3L			SUS329J3L
MHY04-04-40		SUS304	SM400	MHYJ3L-J3L-57		SUS329J3L	SM570
HO304			SUS304	HO329J3L			SUS329J3L
HOSM49	SM490Y	SM490Y	SM490Y	MHY40-40-10L	SM400	SM400	SUS410L
MHY49-49-N2			SUS304N2	MHY40-10L-40		SUS410L	SM400
MHY49-N2-49		SUS304N2	SM490Y	MHY40-10L-10L			SUS410L
MHY49-N2-N2			SUS304N2	MHY10L-40-40	SUS410L	SM400	SM400
MHYN2-49-49	SUS304N2	SM490Y	SM490Y	MHY10L-40-10L			SUS410L
MHYN2-49-N2			SUS304N2	MHY10L-10L-40		SUS410L	SM400
MHYN2-N2-49		SUS304N2	SM490Y	HO410L			SUS410L
HO304N2			SUS304N2				

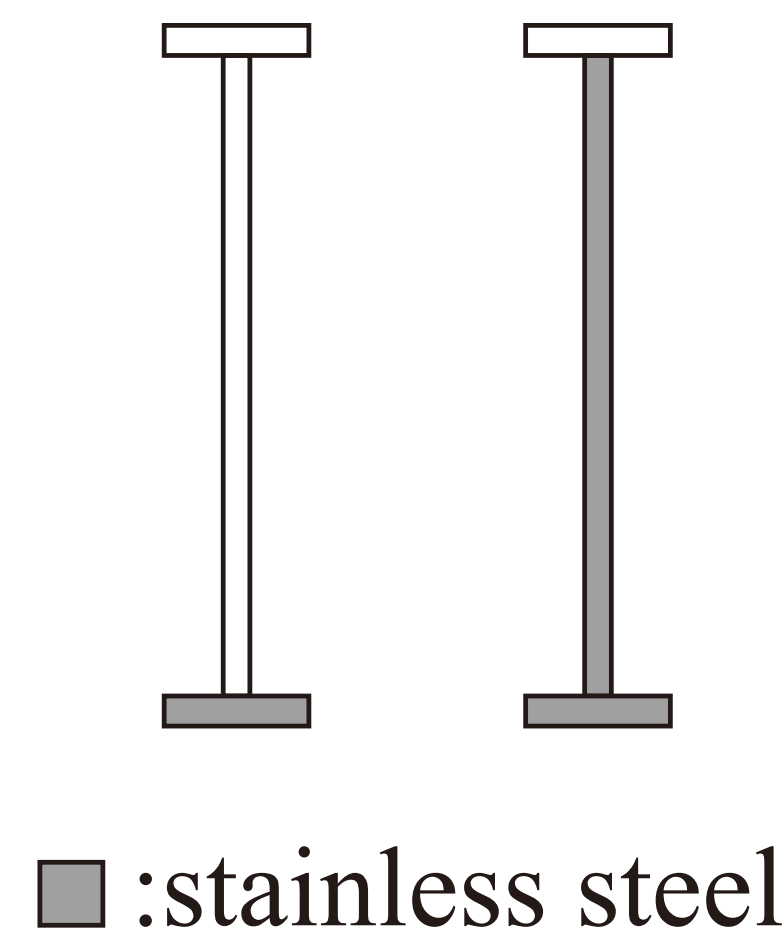
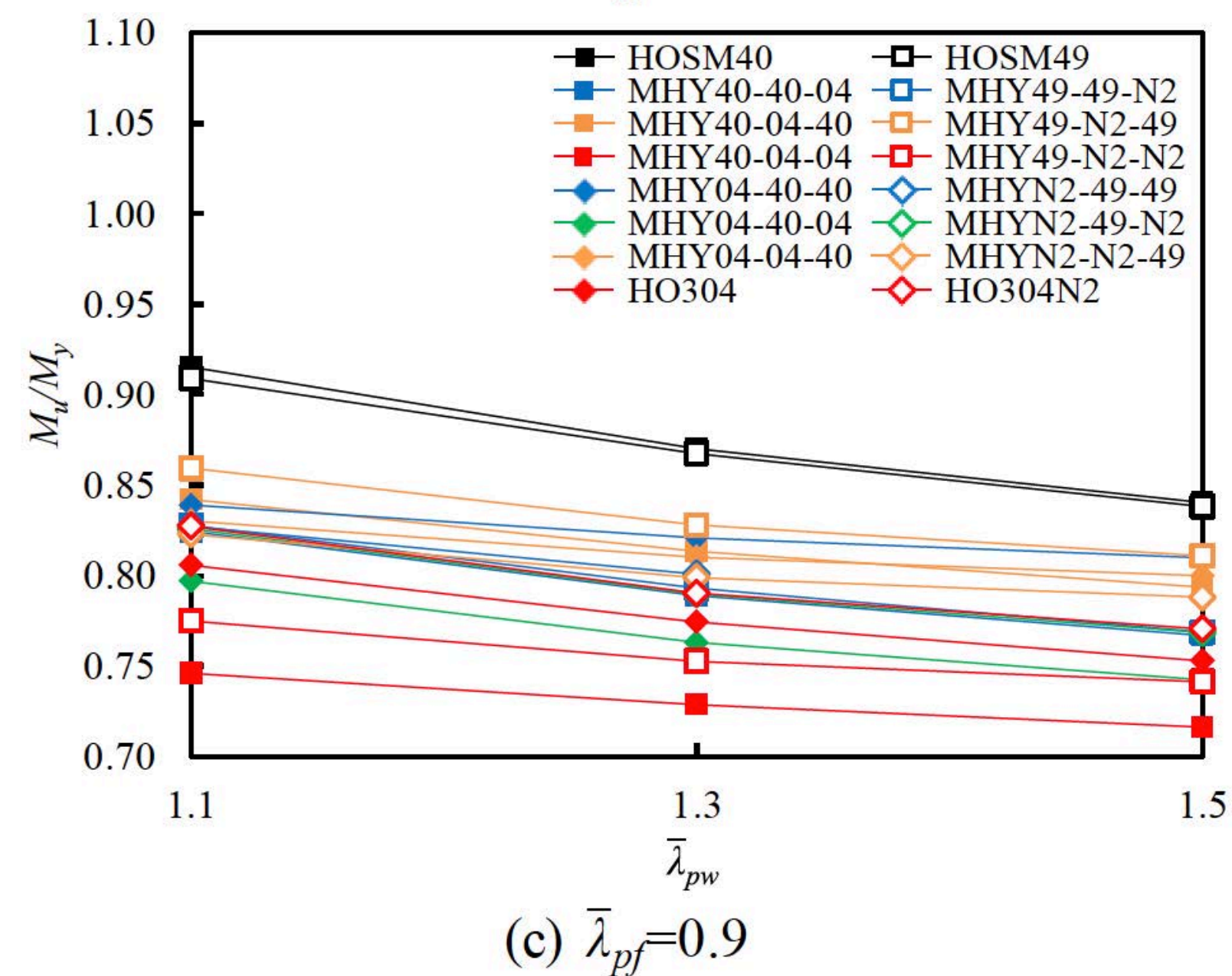
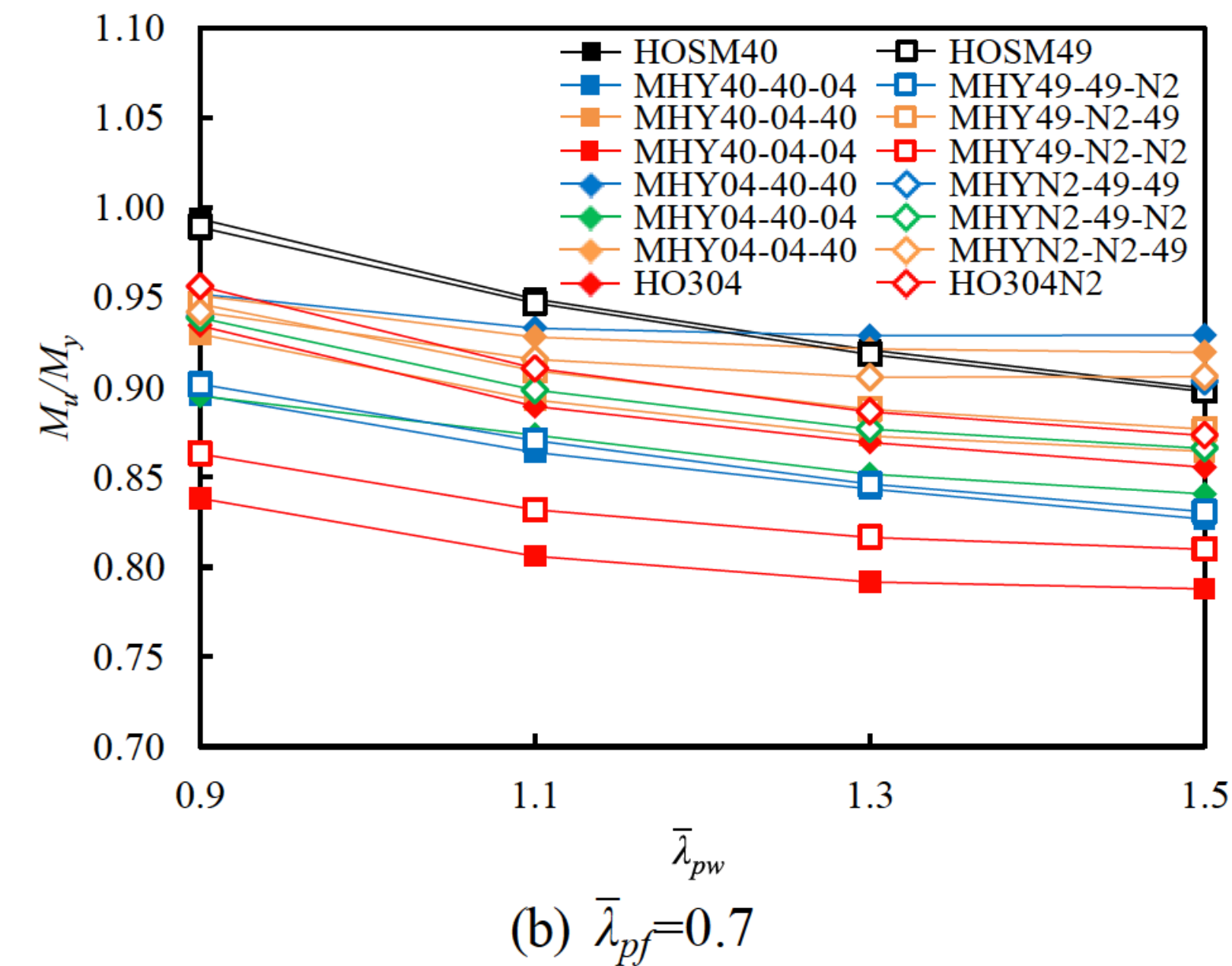
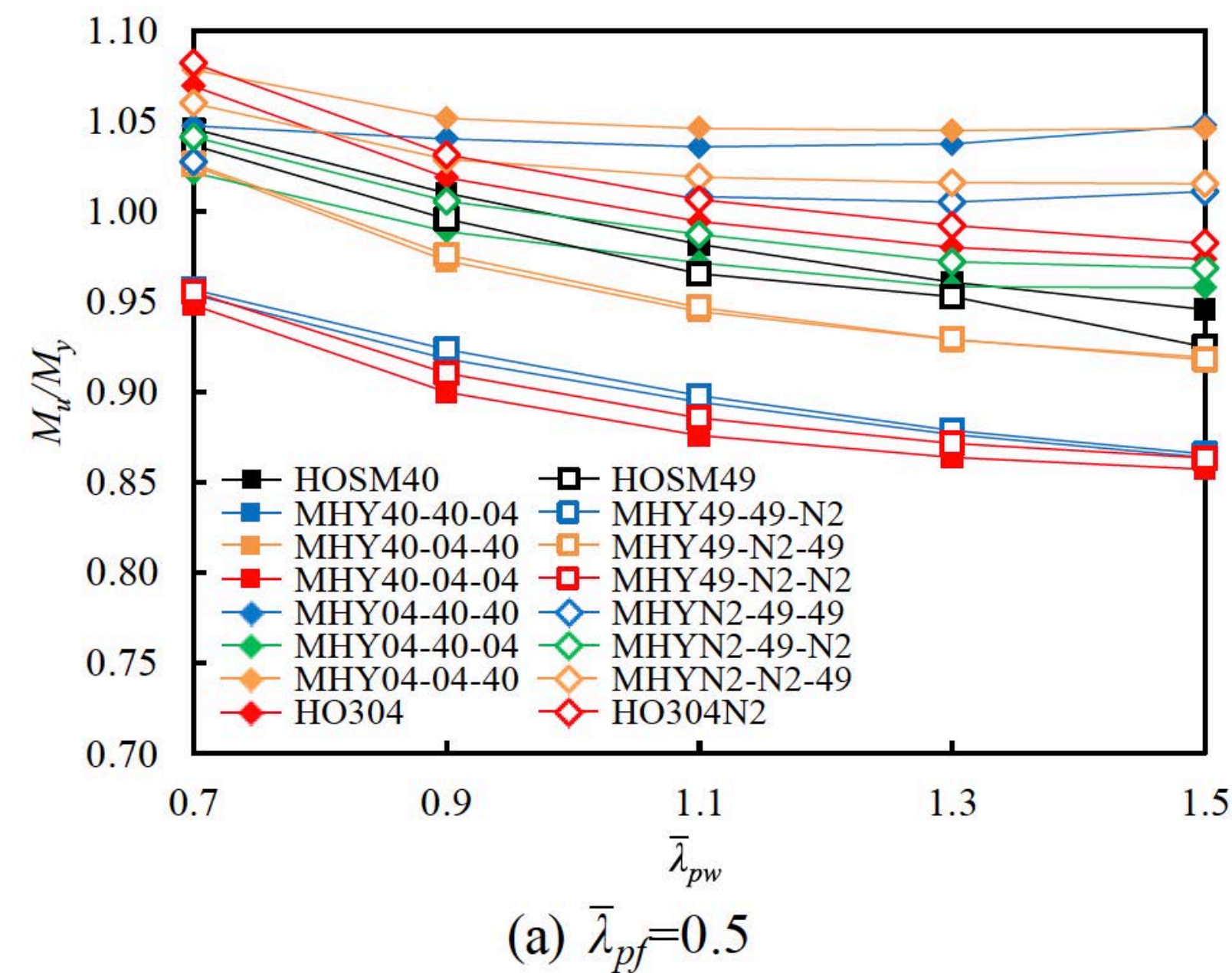
$$\bar{\lambda}_{pf} = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_{yf}}{E_f} \frac{12(1 - \nu^2)}{\pi^2 k_f}}$$

$$\bar{\lambda}_{pw} = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{\sigma_{yw}}{E_w} \frac{12(1 - \nu^2)}{\pi^2 k_w}}$$

$\bar{\lambda}_{pf}$	$\bar{\lambda}_{pw}$
0.5	0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5
0.7	0.9, 1.1, 1.3, 1.5
0.9	1.1, 1.3, 1.5

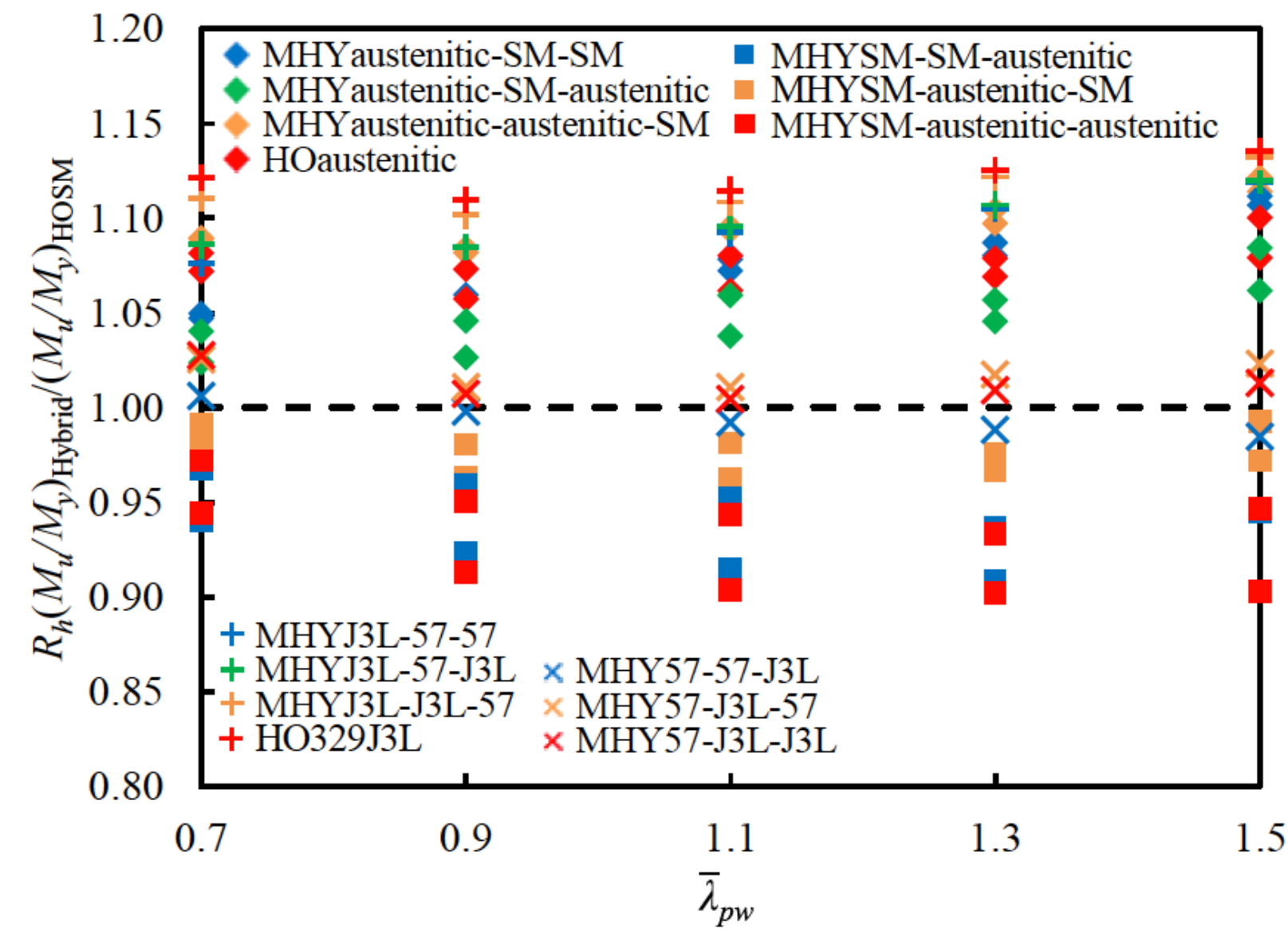
出典：和田勇輝，宮寄靖大，ステンレス鋼と構造用炭素鋼で構成されるI形断面梁の曲げ強度特性および曲げ強度評価法，構造工学論文集A，Vol.63A, pp.92-105，2017.

終局曲げ強度

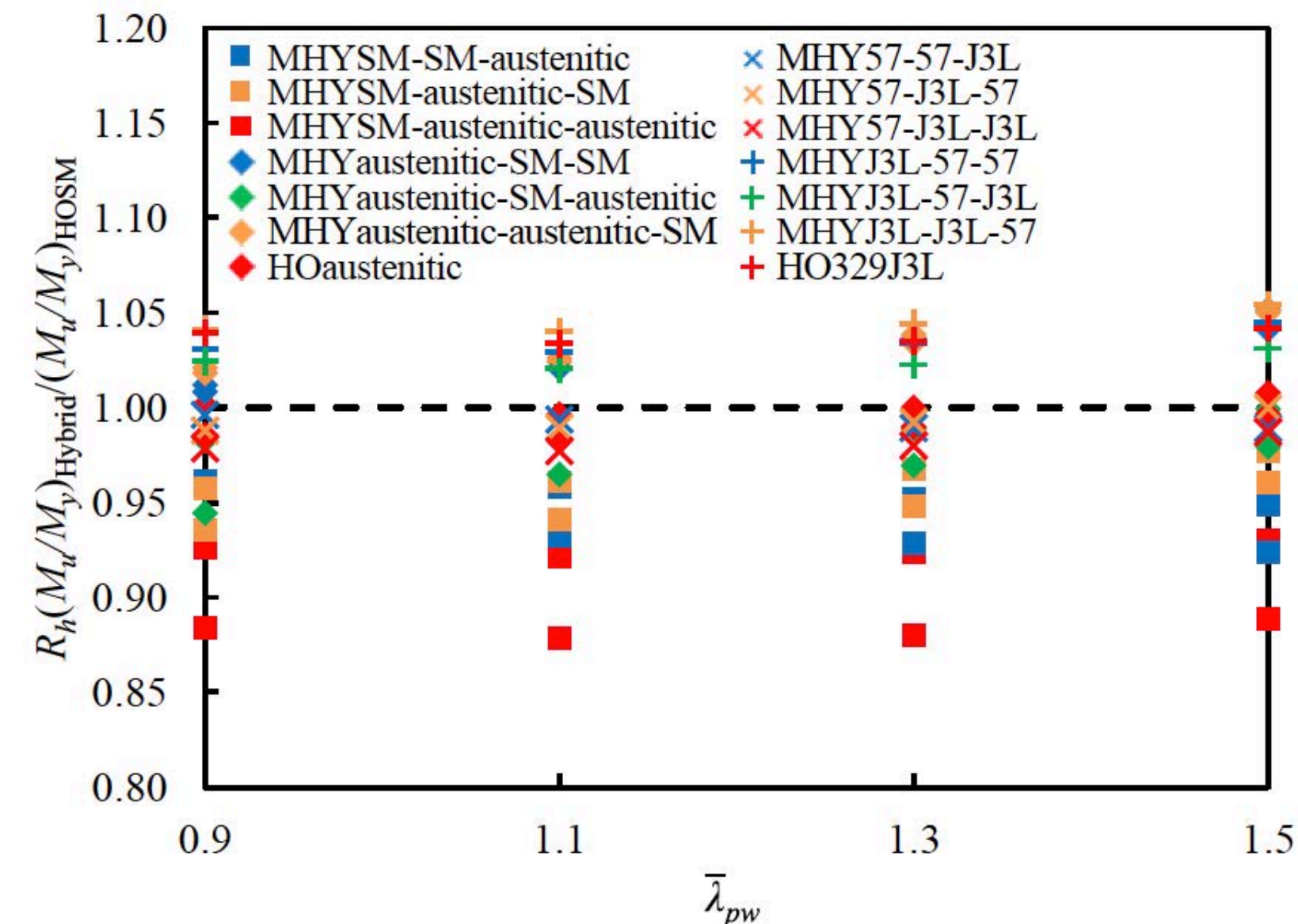


- 構造用炭素鋼のみのI形断面梁の終局曲げ強度の約0.82倍から約1.02倍となる.

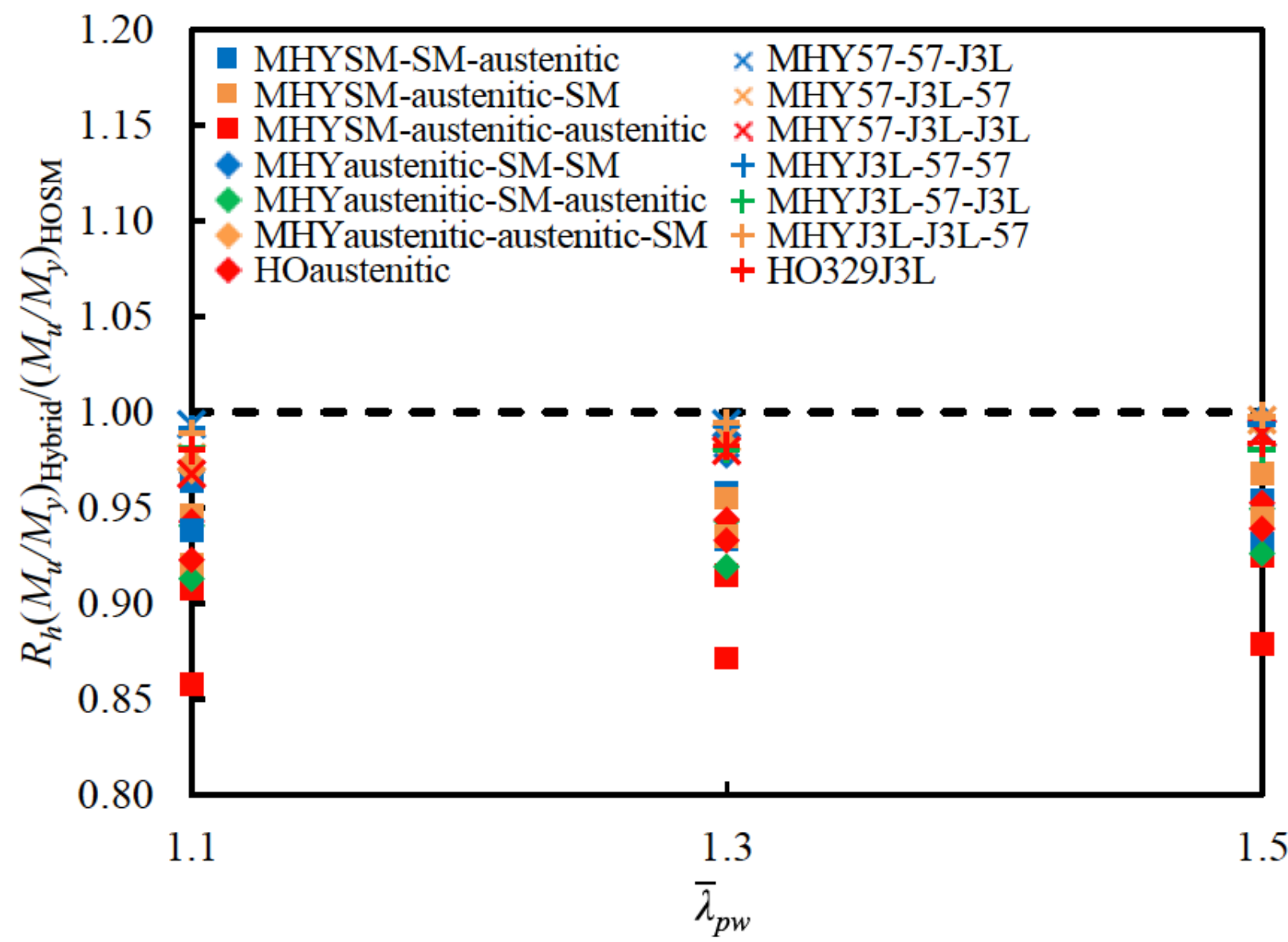
ハイブリッド係数を考慮した終局曲げ強度



(a) $\bar{\lambda}_{pf}=0.5$

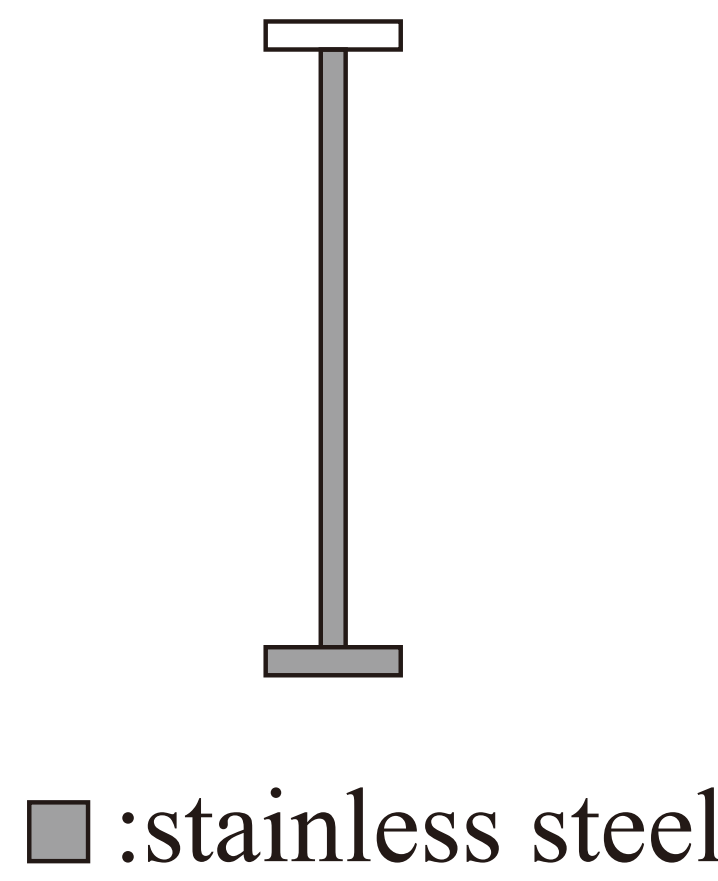


(b) $\bar{\lambda}_{pf}=0.7$



(c) $\bar{\lambda}_{pf}=0.9$

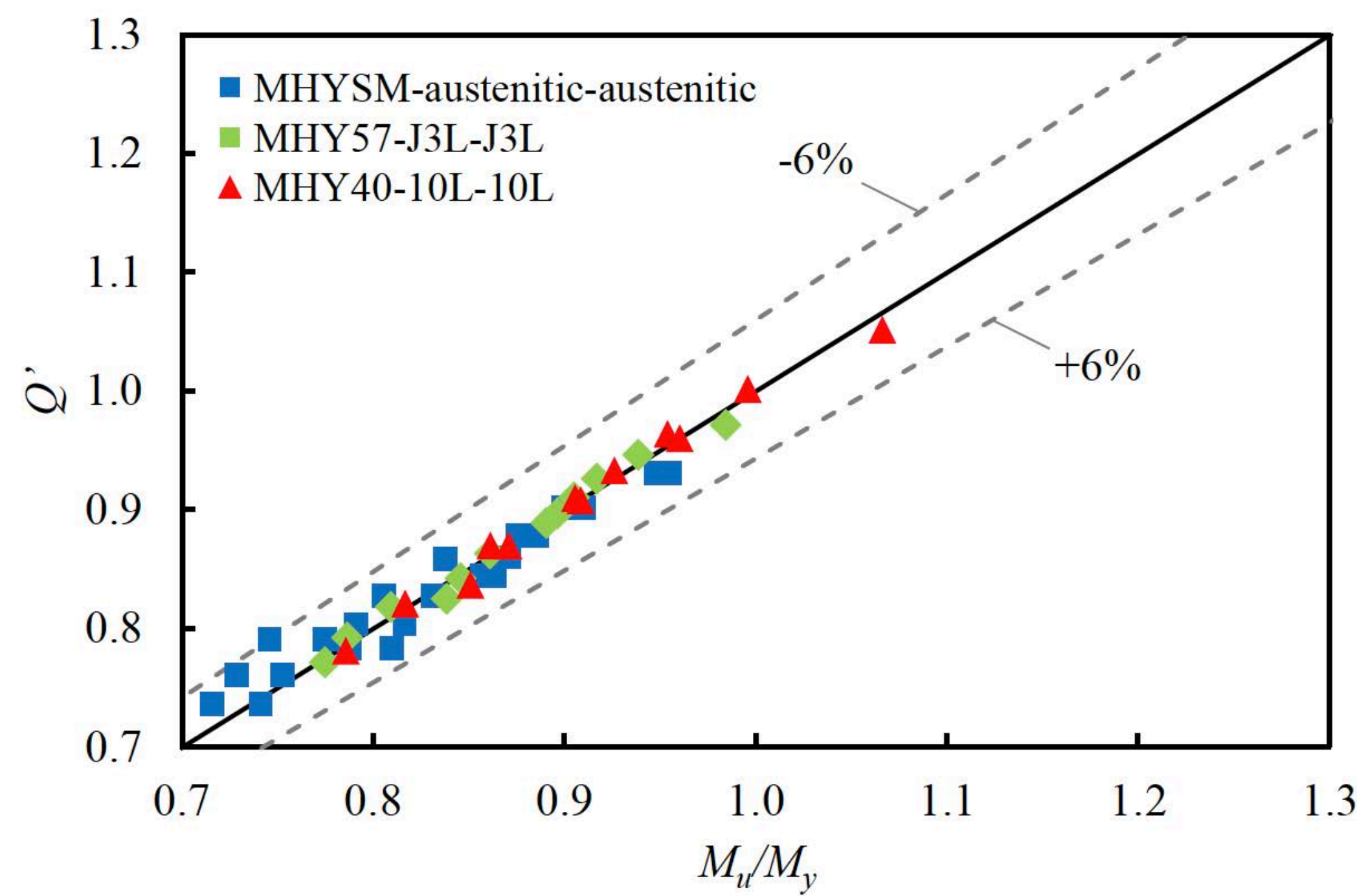
$$R_h = \frac{M_y}{M_{y_SM}}$$



- 構造用炭素鋼のみのI形断面梁の終局曲げ強度の約0.86から1.12倍となる.

終局曲げ強度評価式

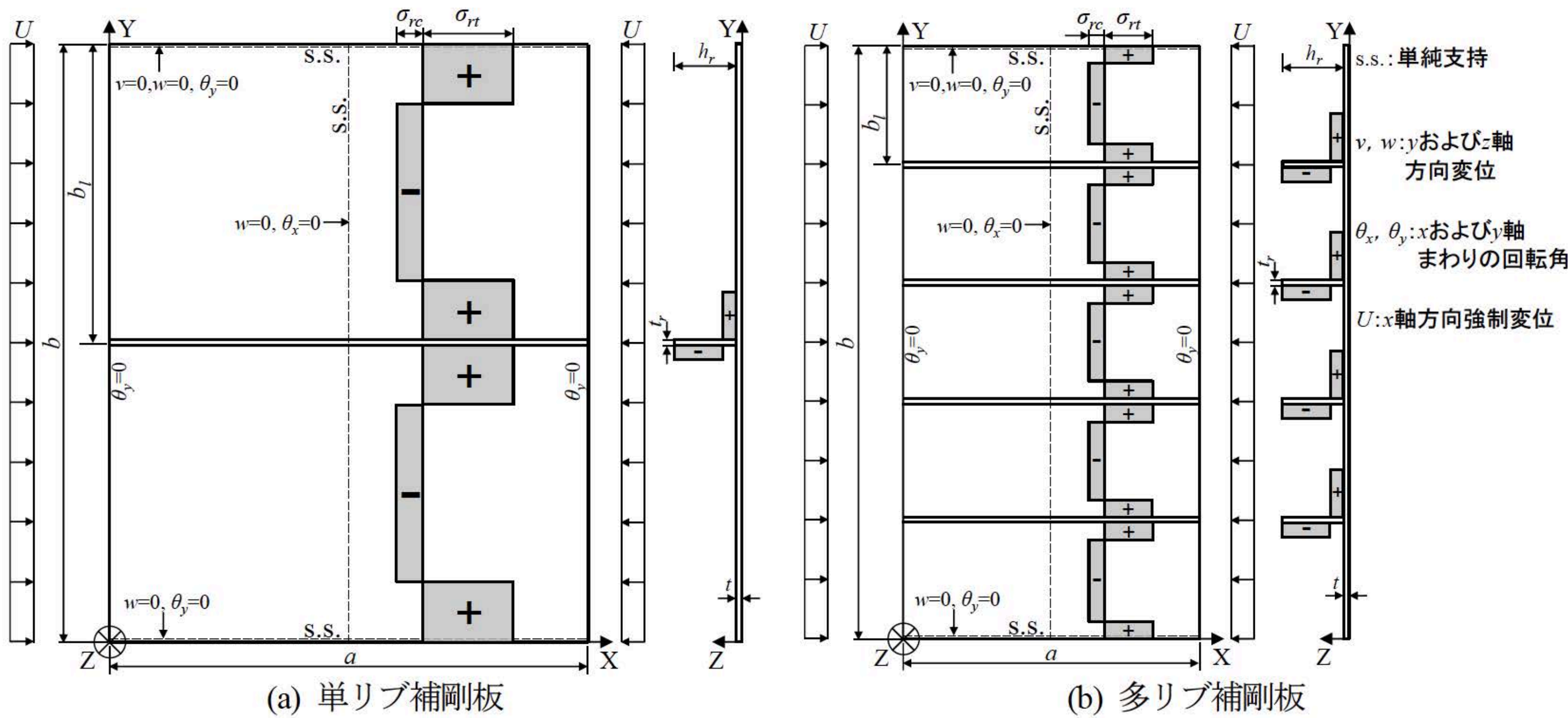
M_u / M_y = Q' = (A λ_pf^B) λ_pw^C λ_pf



(d) 腹板および下フランジがステンレス鋼

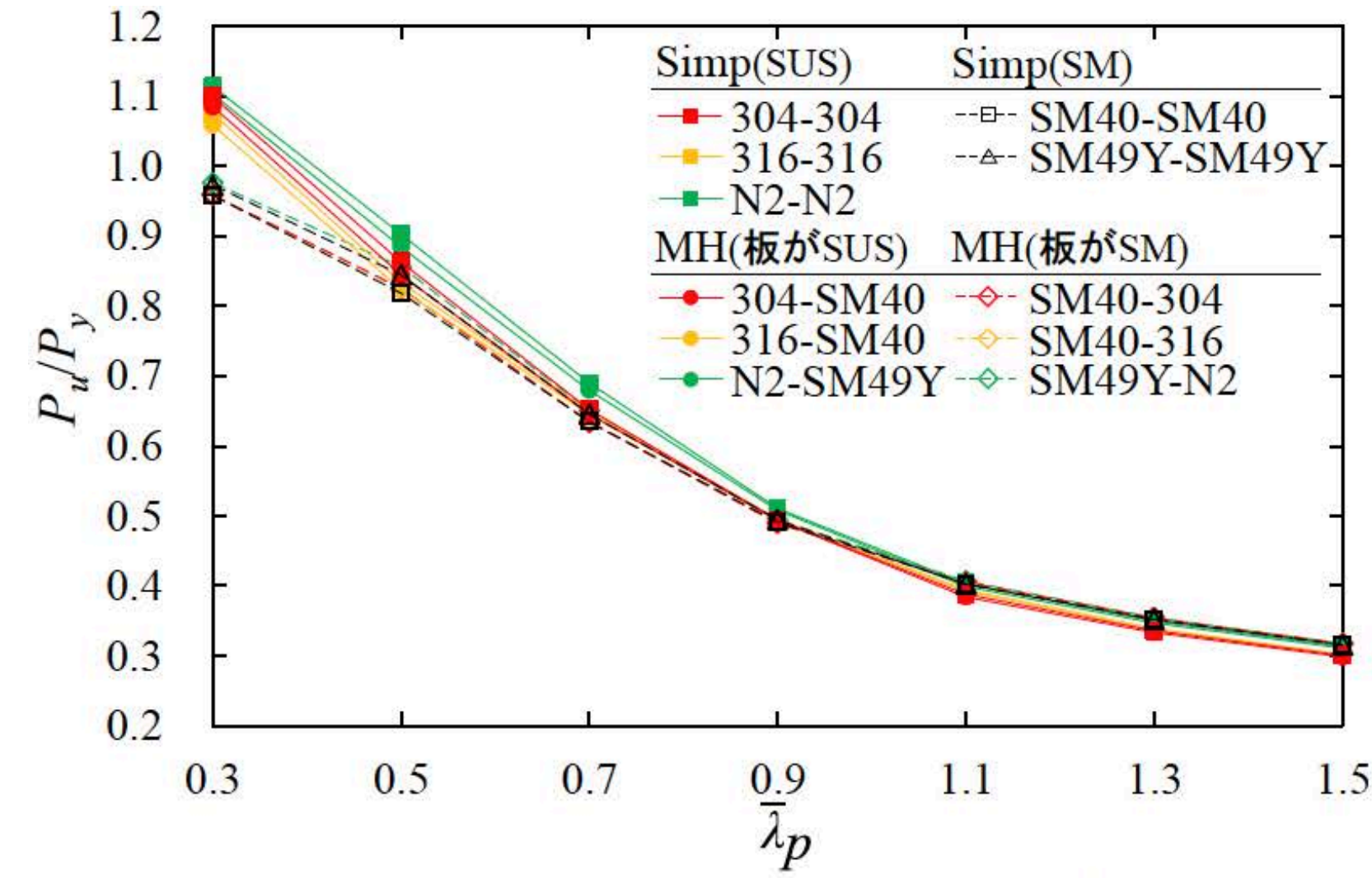
断面構成			係数		
上フランジ	腹板	下フランジ	A	B	C
SM	SM	SM	0.930	-0.087	-0.288
		austenitic	0.854		
		SUS329J3L	0.866		
		SUS410L	0.887		
	austenitic	SM	0.865	-0.162	-0.257
		austenitic	0.795		
	SUS329J3L	SM	0.897	-0.138	-0.264
		SUS329J3L	0.842		
austenitic	SUS410L	SM	0.906	-0.123	-0.371
		SUS410L	0.894		
	SM	SM	0.810	-0.364	-0.092
		austenitic	0.810		
SUS329J3L	SM	SM	0.813	-0.329	-0.163
		SUS329J3L	0.813		
	SUS329J3L	SM	0.832	-0.291	-0.251
		SUS329J3L	0.832		
SUS410L	SM	SM	1.020	-0.295	-0.039
		SUS410L	1.020		
	SUS410L	SM	0.787	-0.249	-0.211
		SUS410L	0.787		

部材断面内でハイブリッド化2

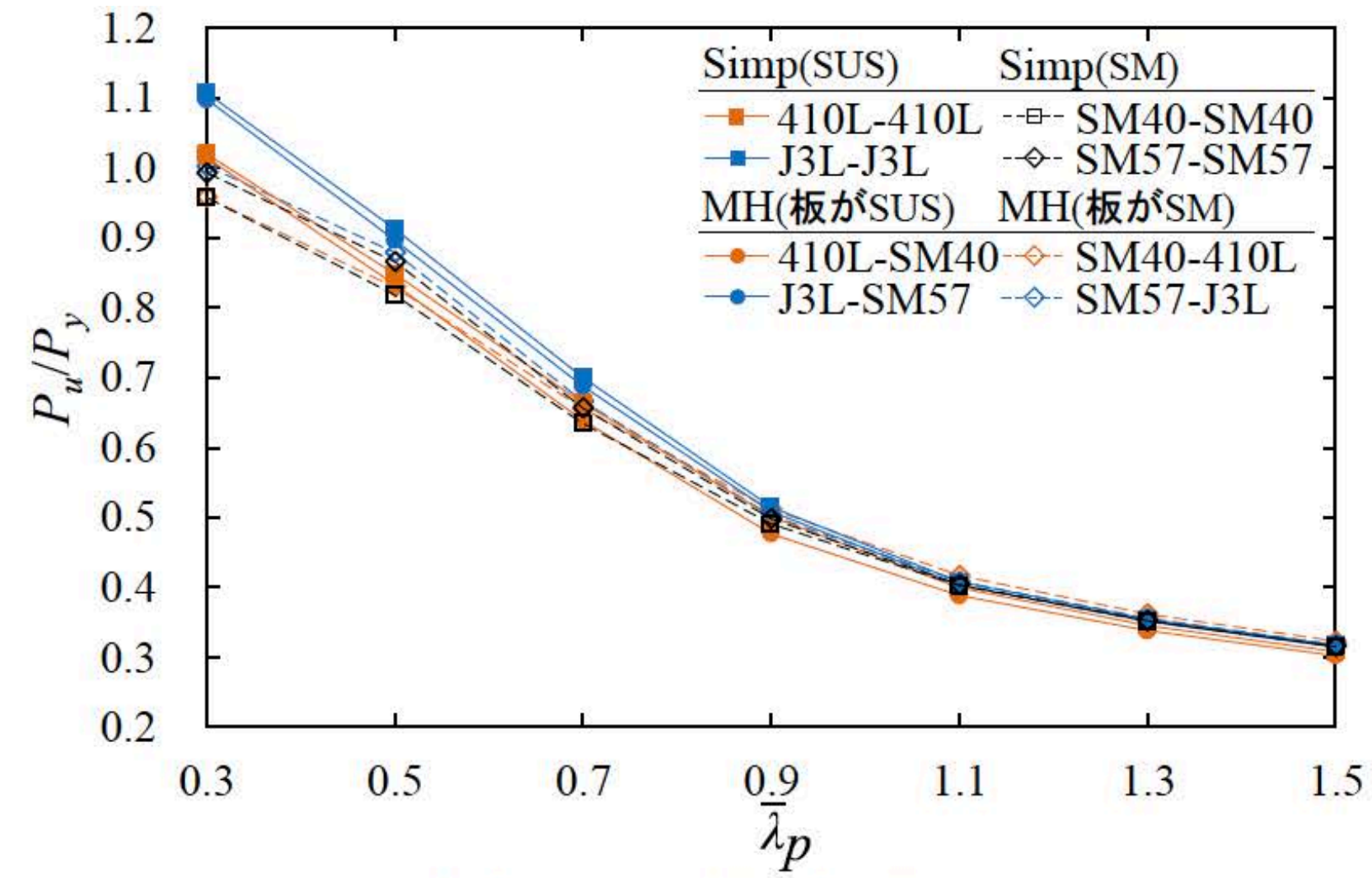


モデル名	クラス	板パネル	補剛材	γ/γ_{req}	縦補剛材 本数
304-304	Simp	SUS304		(単) 1.0	1, 4
316-316		SUS316			1, 4
N2-N2		SUS304N2			1, 4
410L-410L		SUS410L			1, 4
J3L-J3L		SUS329J3L			1, 4
SM40-SM40		SM400			1, 4
SM49Y-SM49Y		SM490Y			1, 4
SM57-SM57		SM570			1, 4
304-SM40	MH	SUS304	SM400	(多) 1.0 1.5 2.0	1, 4
SM40-304		SM400	SUS304		1, 4
316-SM40		SUS316	SM400		1, 4
SM40-316		SM400	SUS316		1, 4
N2-SM49Y		SUS304N2	SM490Y		1, 4
SM49Y-N2		SM490Y	SUS304N2		1, 4
410L-SM40		SUS410L	SM400		1, 4
SM40-410L		SM400	SUS410L		1, 4
J3L-SM57		SUS329J3L	SM570		1, 4
SM57-J3L		SM570	SUS329J3L		1, 4

終局圧縮強度

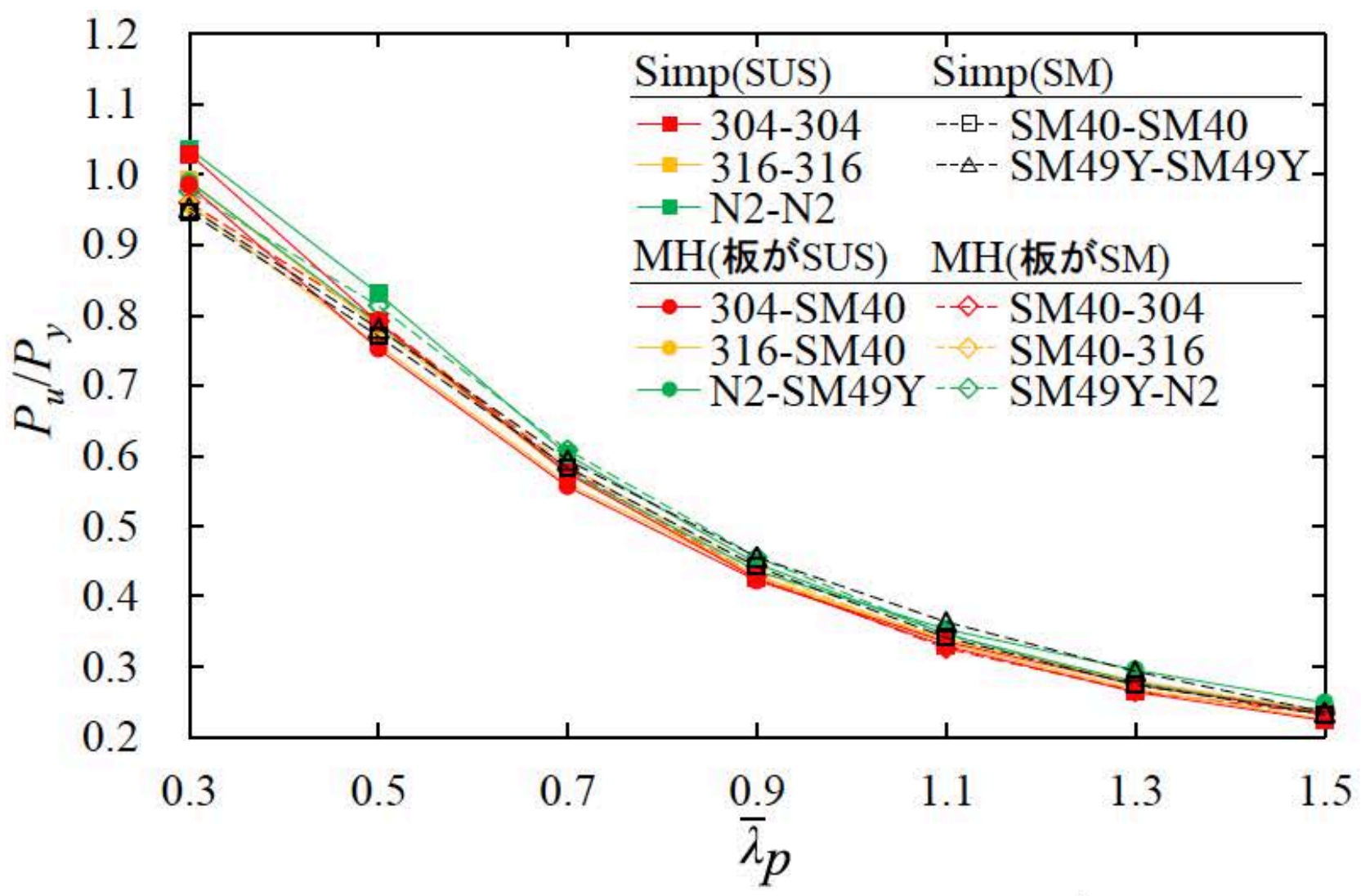


(a) オーステナイト系ステンレス鋼

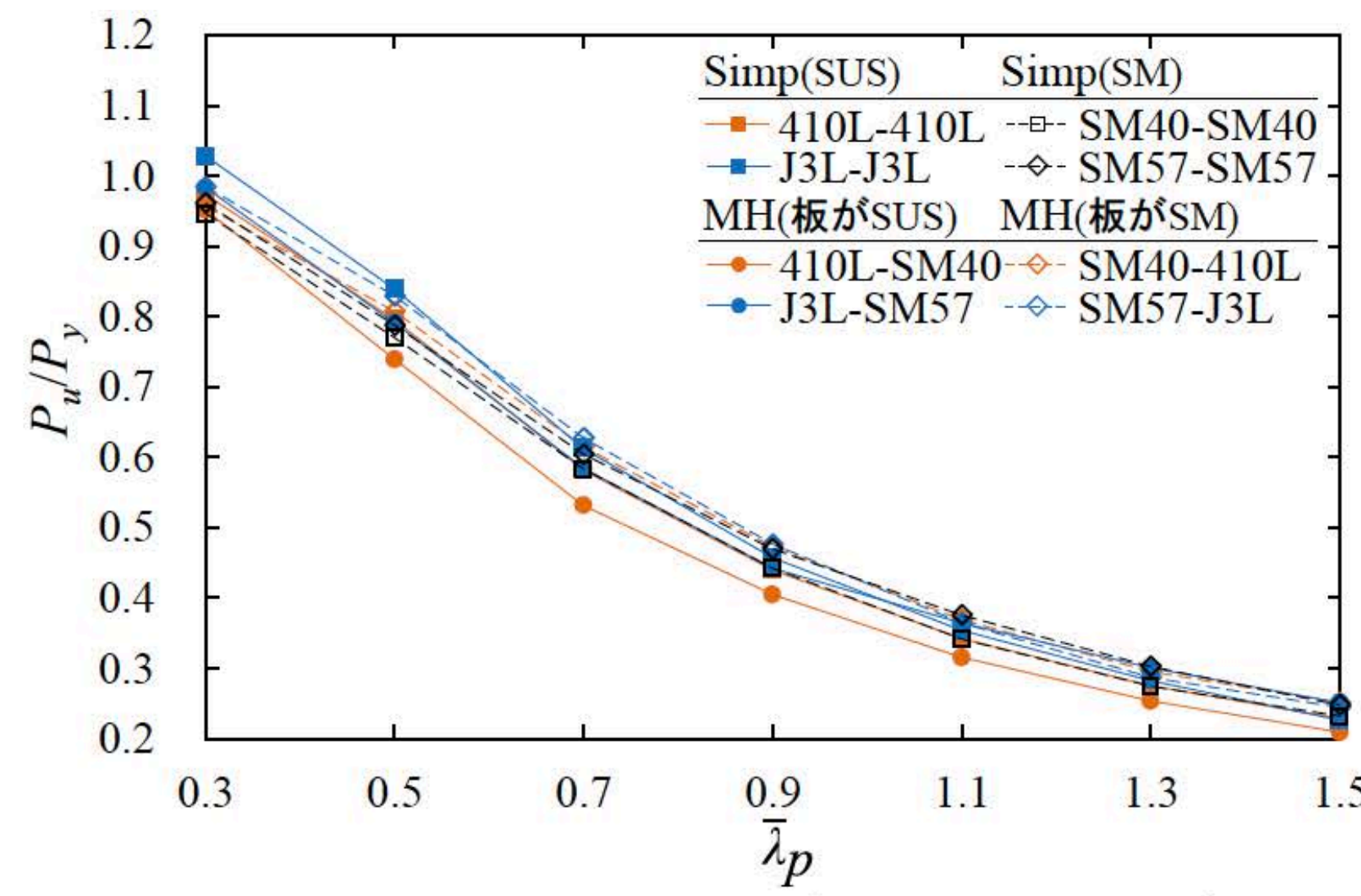


(b) フェライト系および二相系ステンレス鋼

単リブ補剛板 ($\gamma_l/\gamma_{l.req} = 1.0$)



(a) オーステナイト系ステンレス鋼



(b) フェライト系および二相系ステンレス鋼

多リブ補剛板 ($\gamma_l/\gamma_{l.req} = 1.0$)

終局圧縮強度評価法

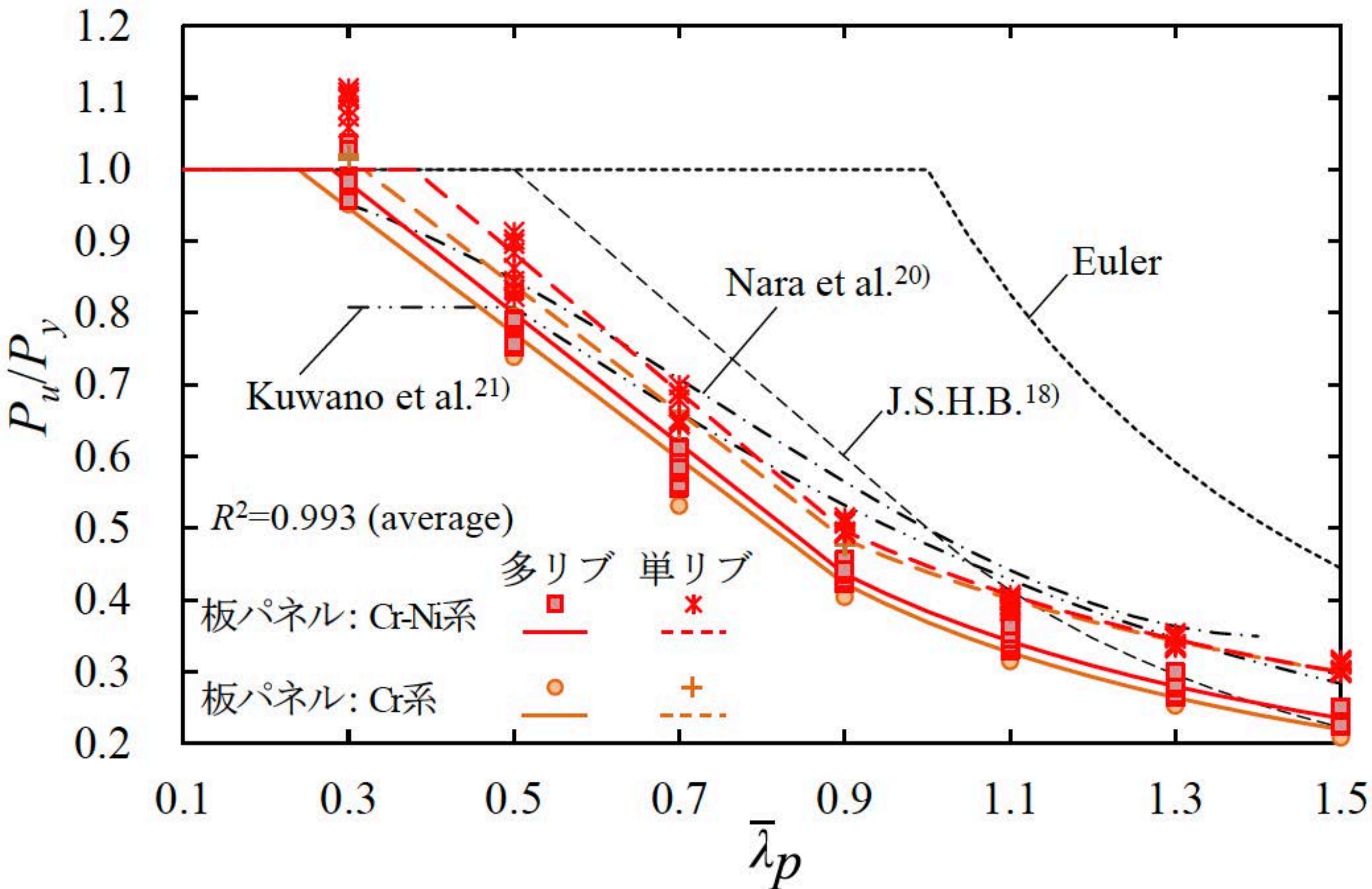
$$\frac{P_u}{P_y} = \begin{cases} C_1 - C_2 \bar{\lambda}_p & (\bar{\lambda}_{p-u} \leq \bar{\lambda}_p \leq 0.90) \\ \frac{C_3}{\bar{\lambda}_p^{C_4}} & (0.90 < \bar{\lambda}_p) \end{cases}$$

(a) 単リブ補剛板

分類	C_1	C_2	C_3	C_4	$\bar{\lambda}_{p-u}$
板が Cr-Ni 系ステンレス鋼	1.37	0.966	0.447	0.988	0.38
板が Cr 系ステンレス鋼	1.28	0.884	0.439	0.938	0.32
板が炭素鋼の MH クラス	1.23	0.814	0.450	0.884	0.28
炭素鋼	1.23	0.825	0.446	0.893	0.28

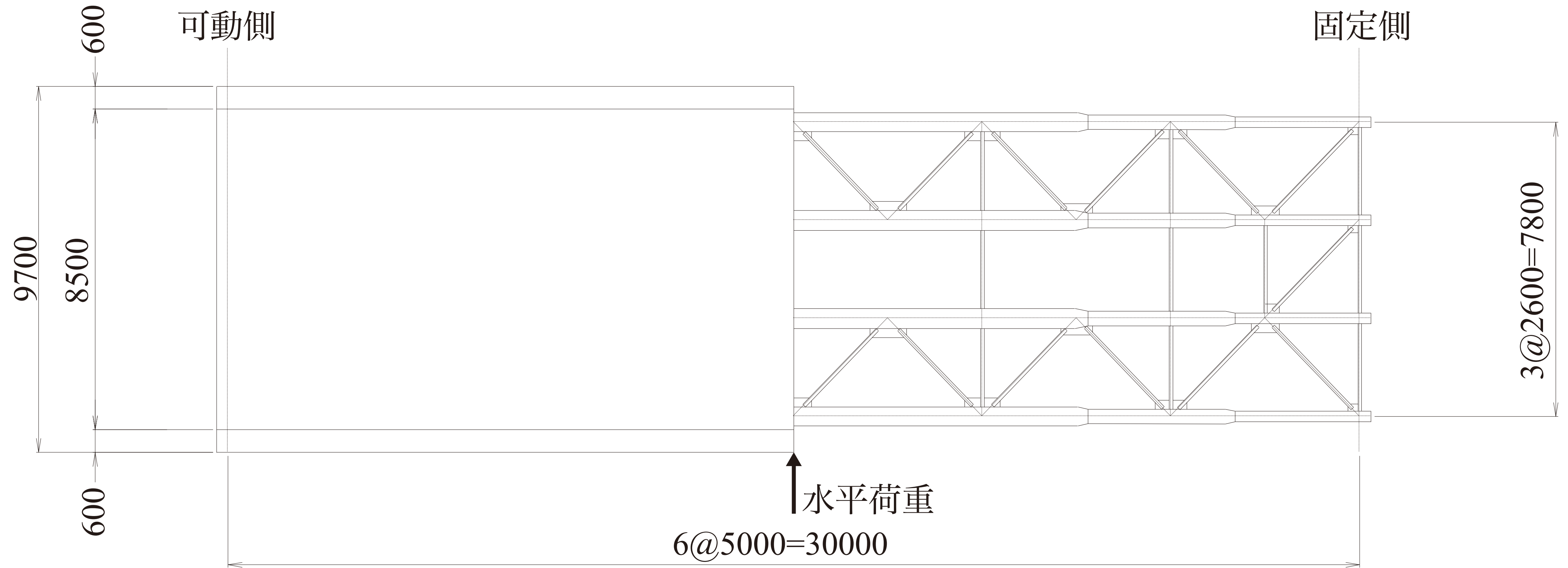
(b) 多リブ補剛板($\gamma_l/\gamma_{l \cdot req}=1.0$)

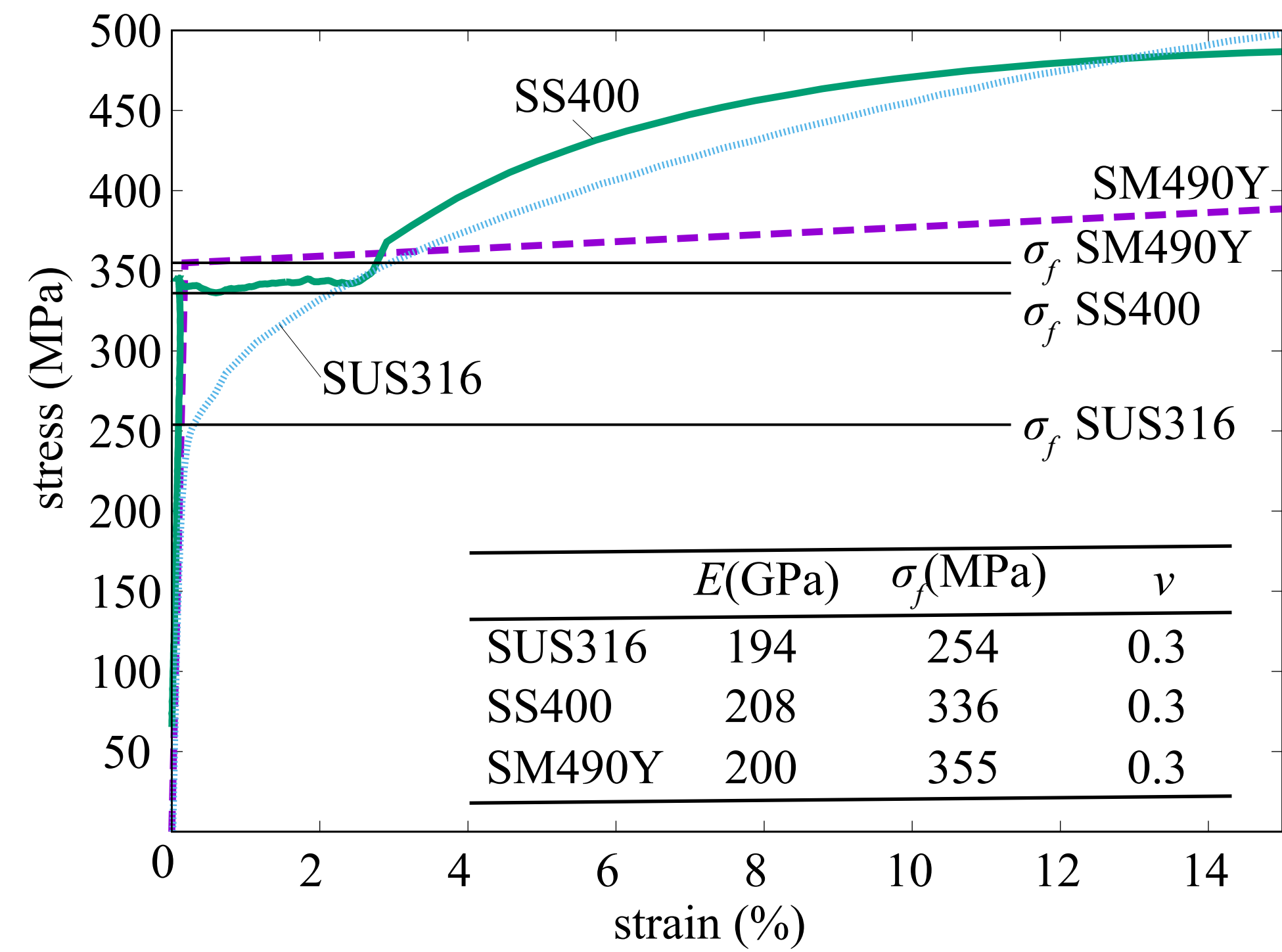
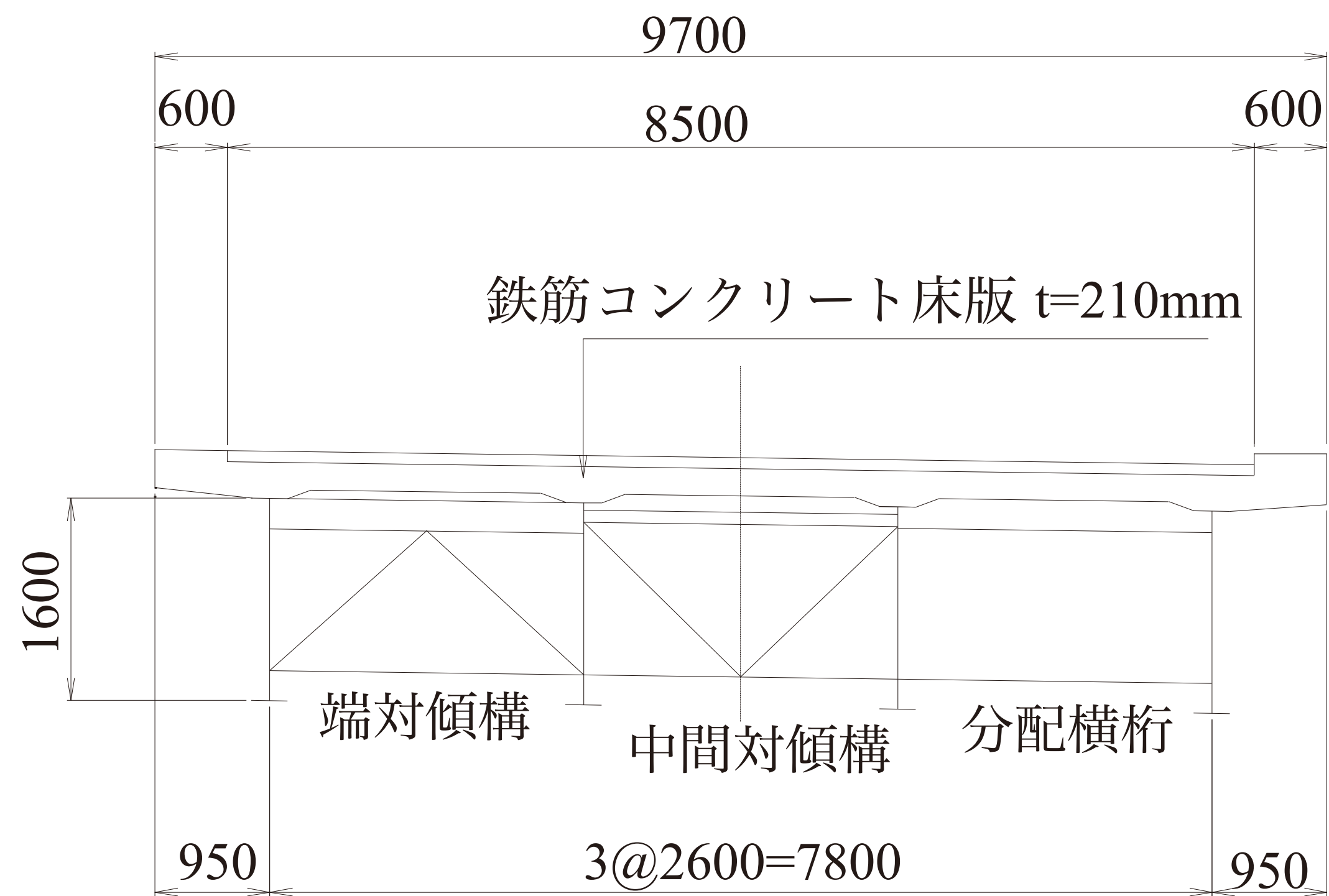
分類	C_1	C_2	C_3	C_4	$\bar{\lambda}_{p-u}$
板が Cr-Ni 系ステンレス鋼	1.25	0.908	0.384	1.21	0.28
板が Cr 系ステンレス鋼	1.21	0.872	0.369	1.28	0.24
板が炭素鋼の MH クラス	1.22	0.858	0.395	1.28	0.26
炭素鋼	1.19	0.809	0.401	1.25	0.23

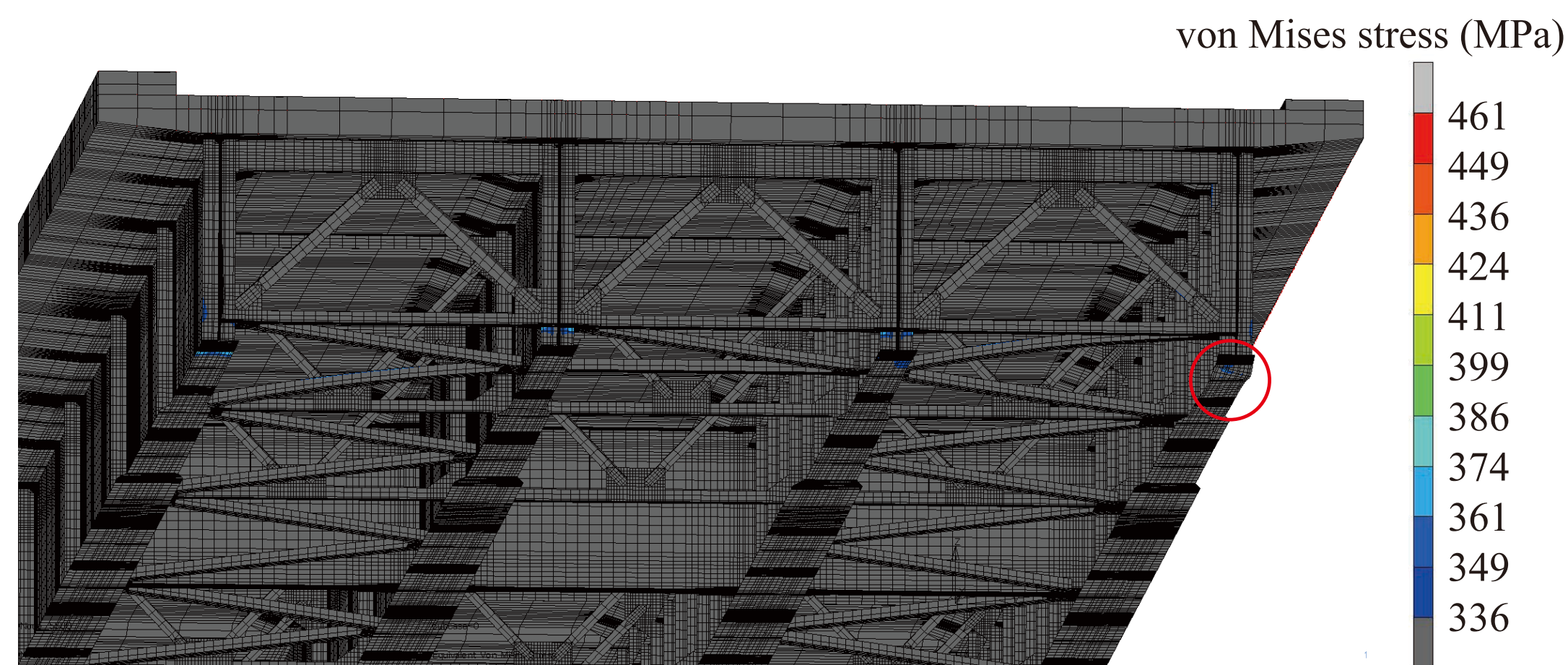
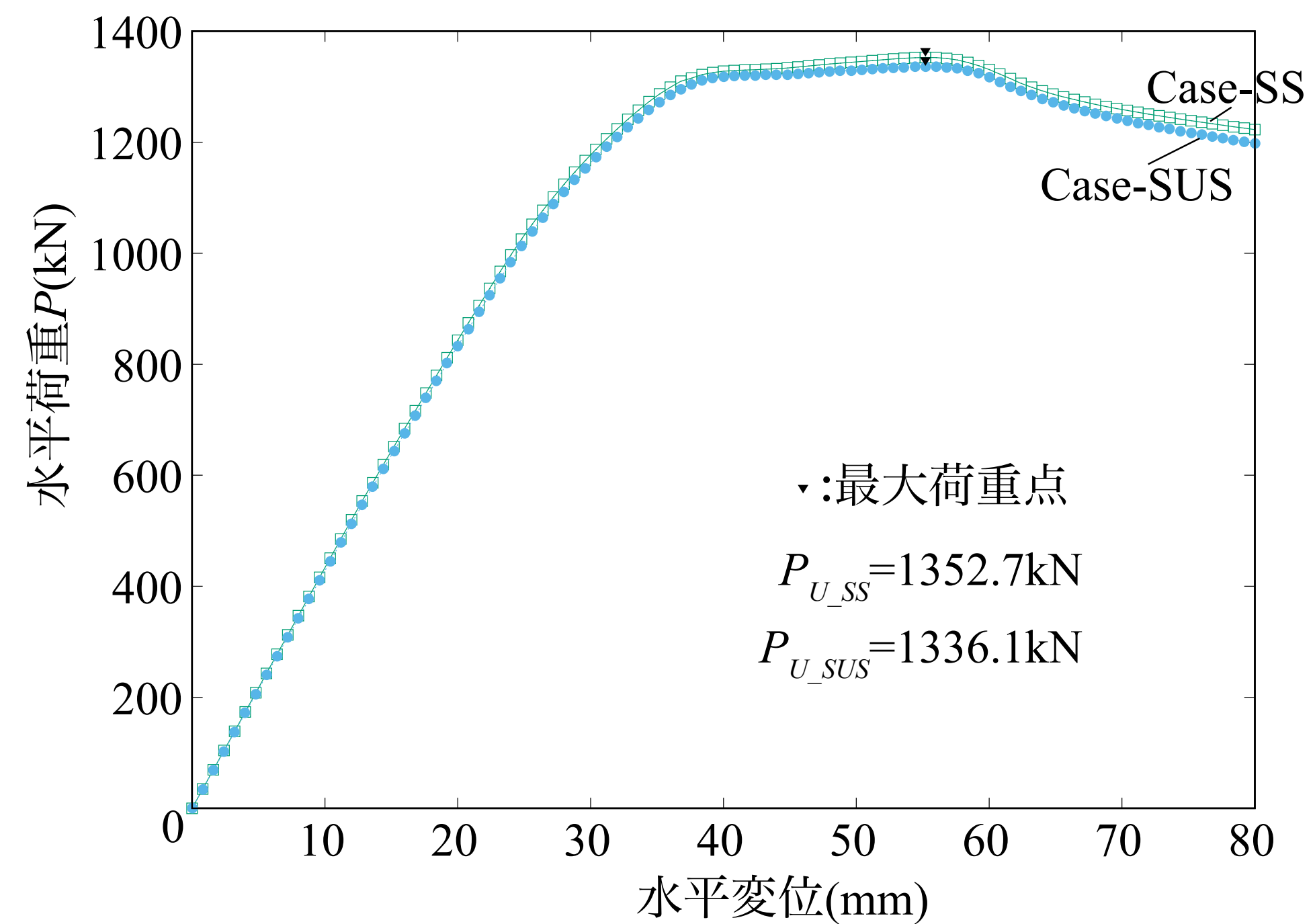


(a) 板パネルをステンレス鋼

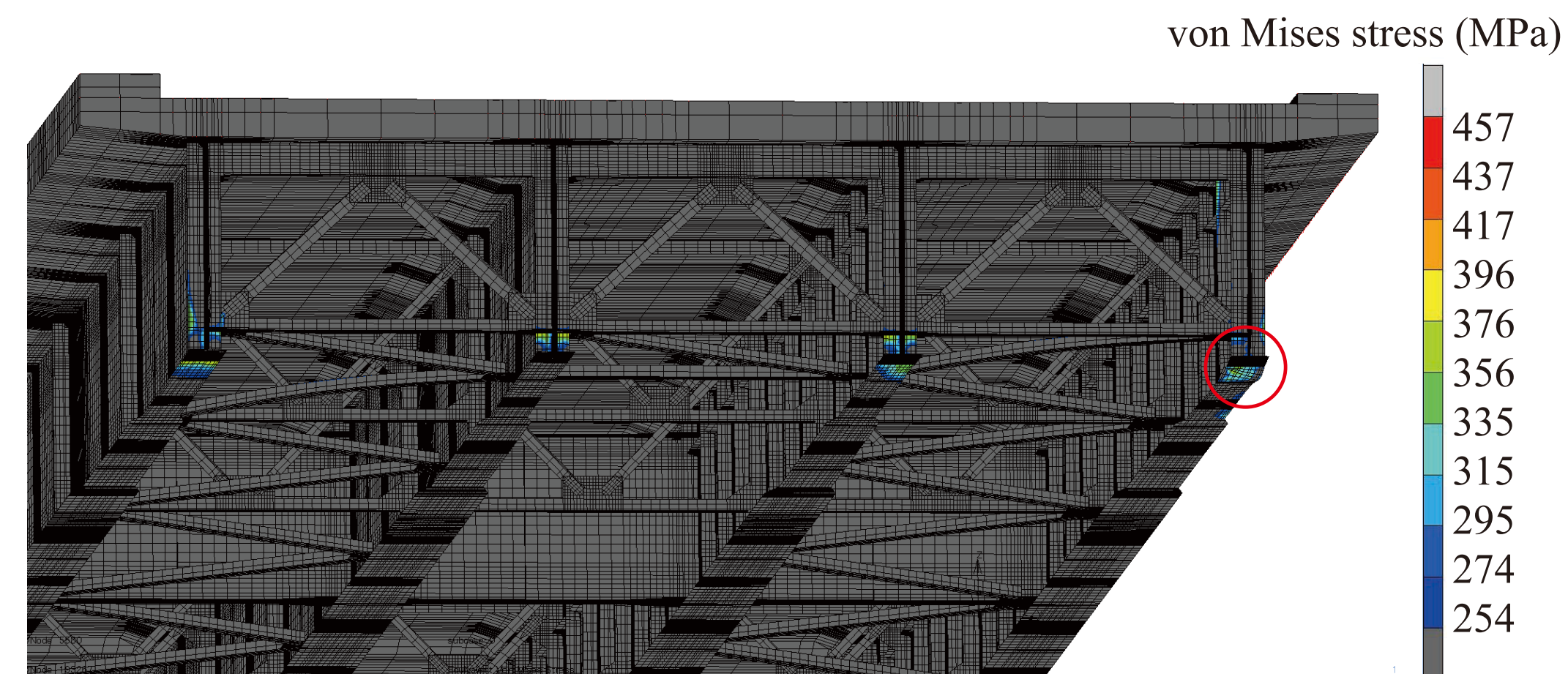
橋梁部位でのハイブリッド化







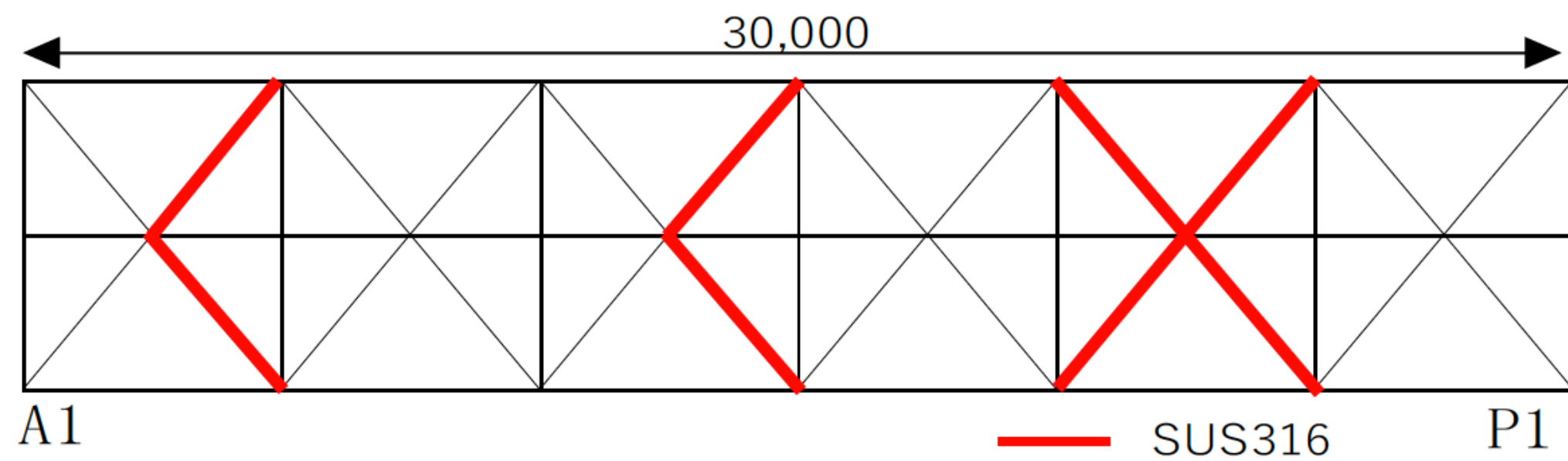
(a) Case-SS



(b) Case-SUS

出典：内山草太郎, 宮寄靖大, 高橋涼介, 2次部材をSUS316とした鋼鈑桁橋の終局強度, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, I-227, 2022.9.

試験適用例

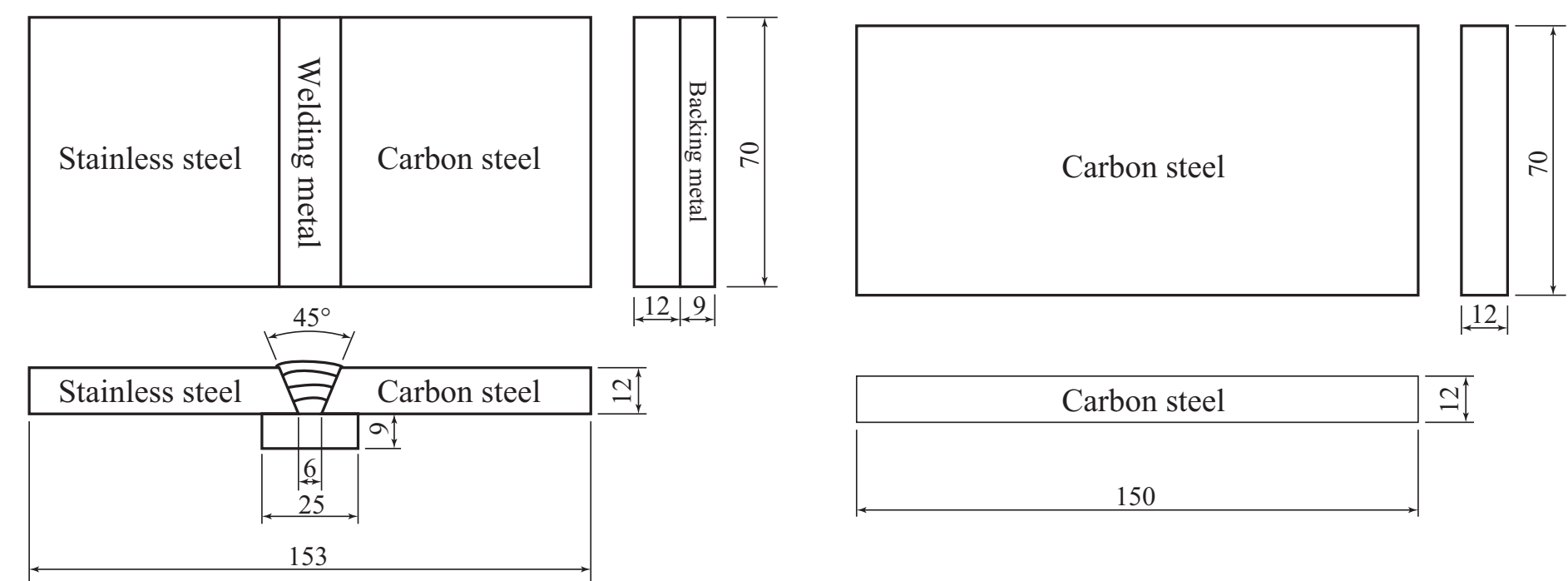


橋梁形式：3径間連続鈑桁
径間長：30m
供用開始：1980年
適用示方書：道路橋示方書（1973）



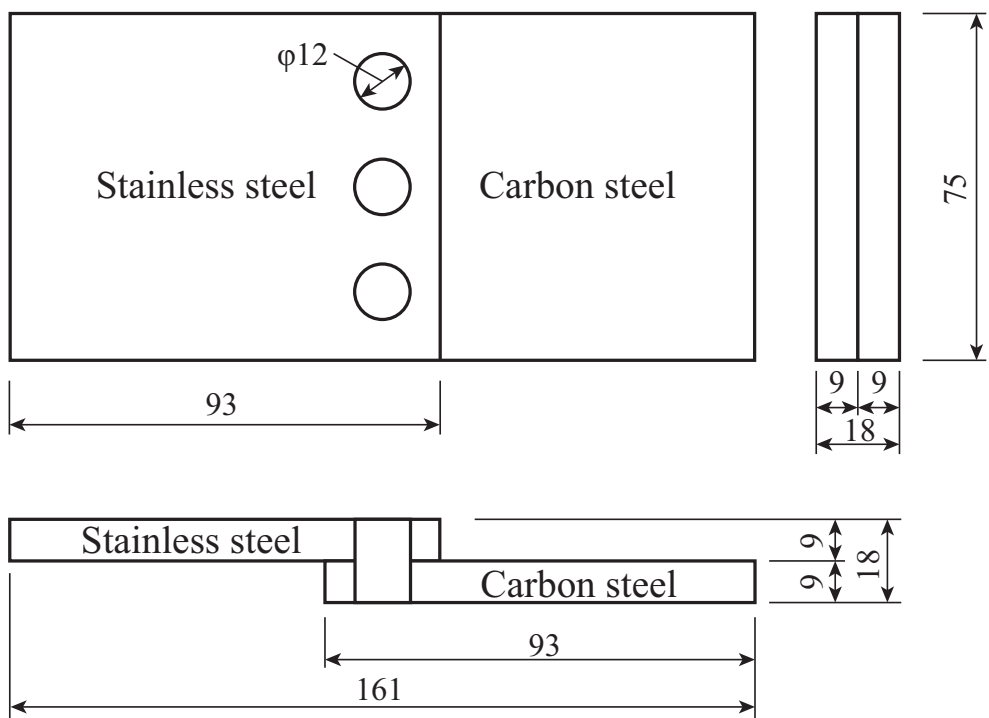
出典：大西達也，澤田守，志村保美，藤城忠郎，絶縁仕様を施した異種金属接触継手の実環境における耐久性の検証，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，I-271，2023.9.

ステンレス鋼と炭素鋼の接合

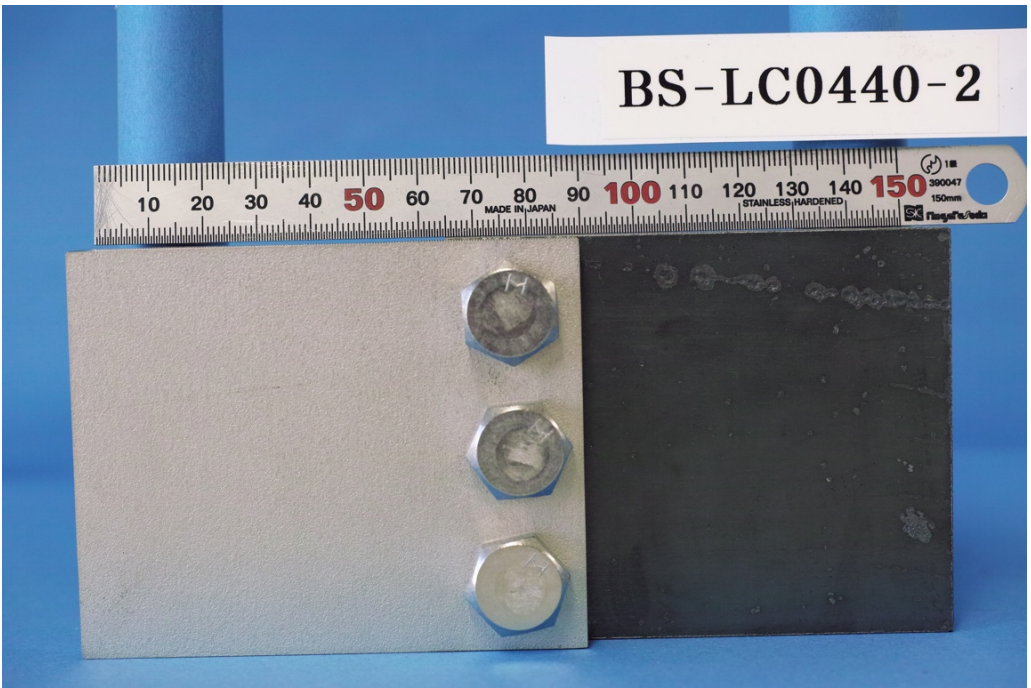
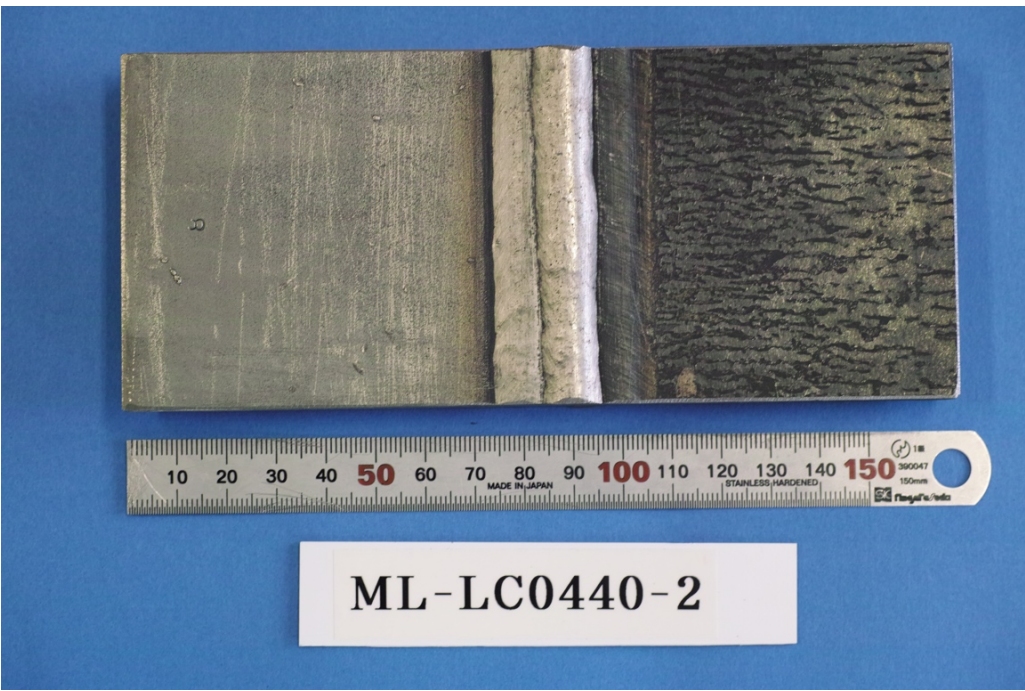


(a) Welding specimen

(b) Simple specimen

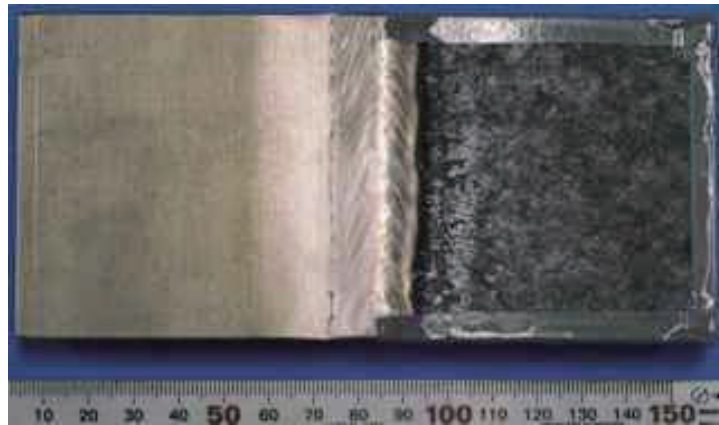
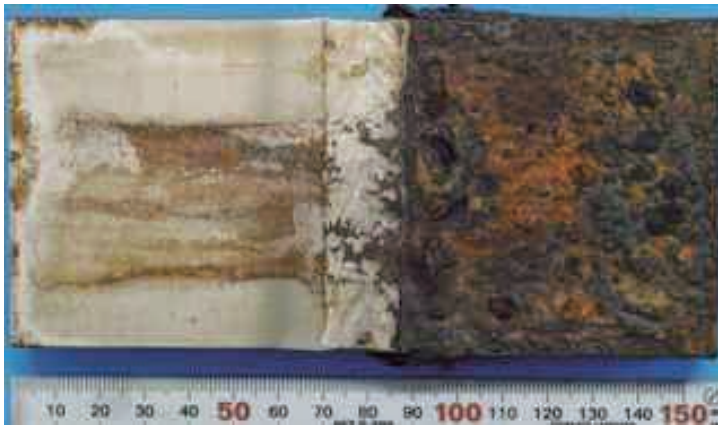
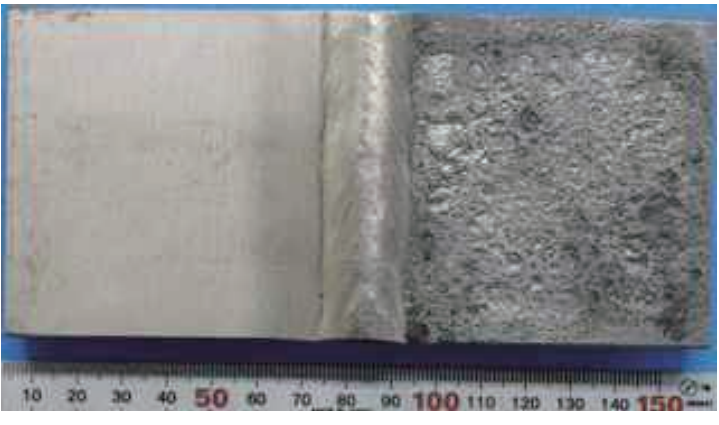
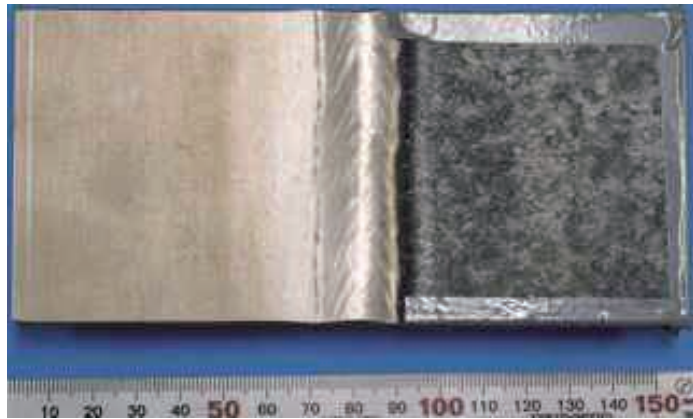
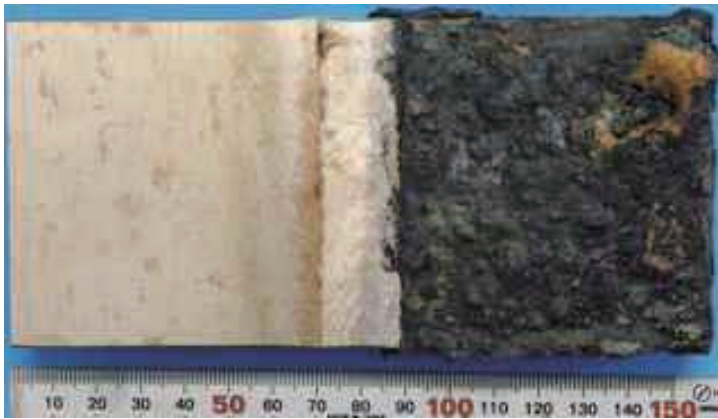
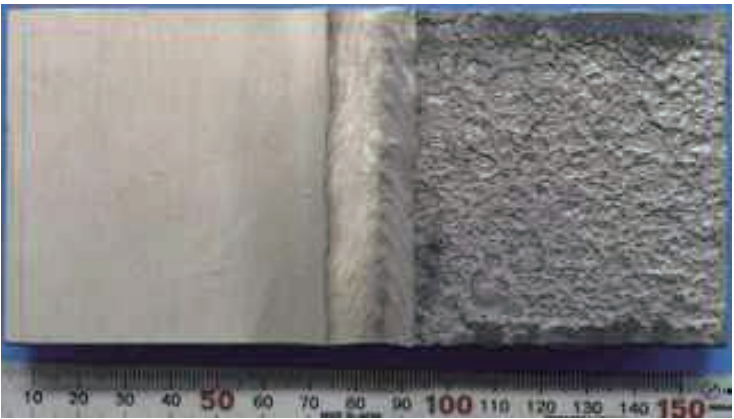
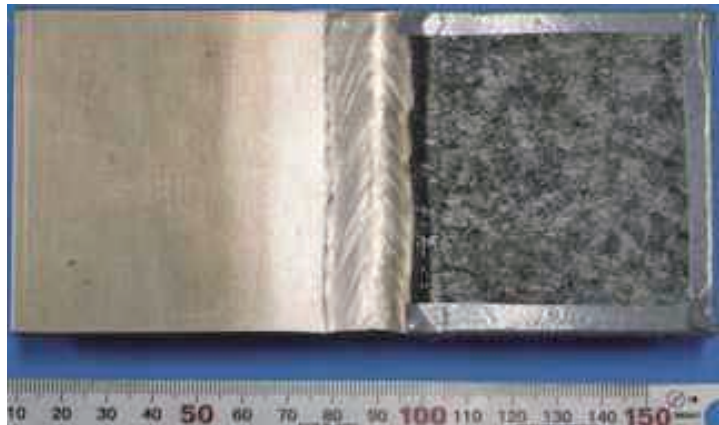
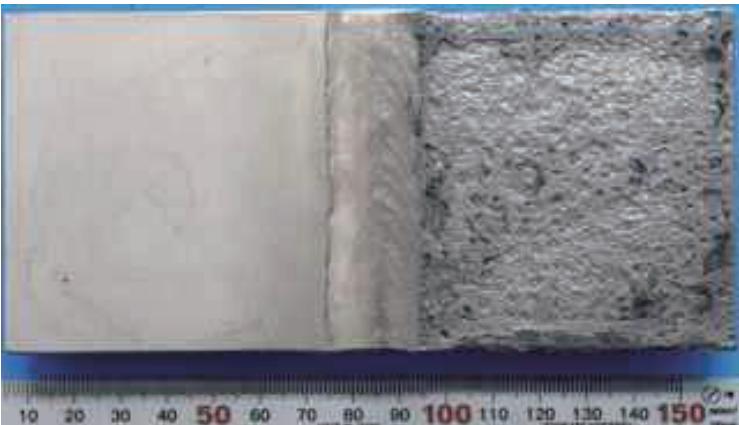
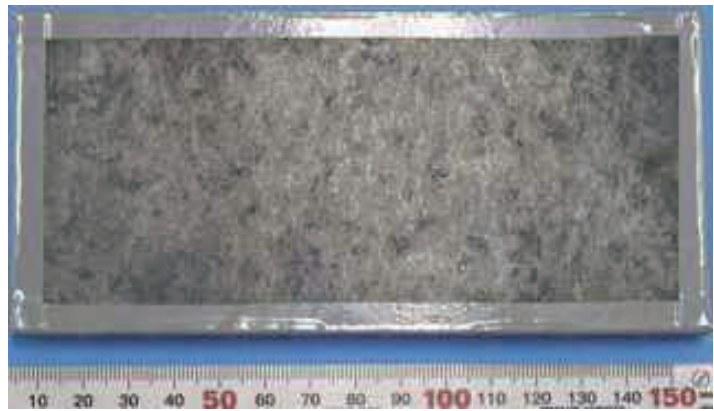
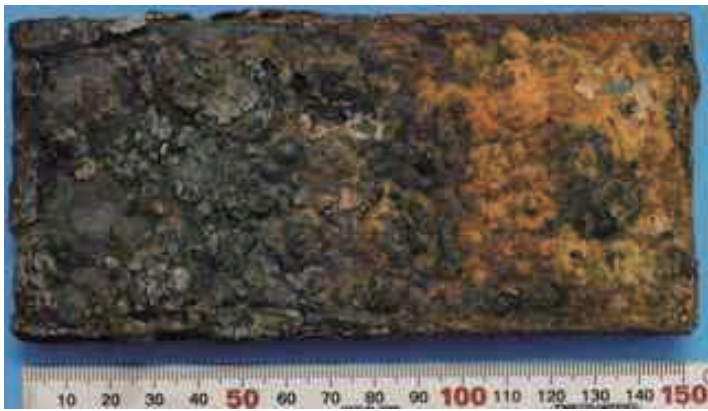
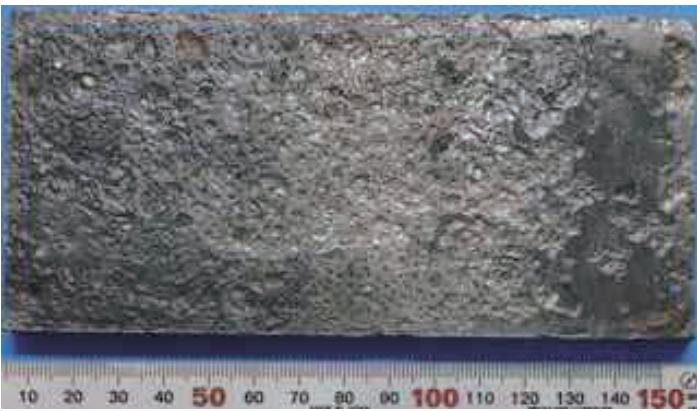


(c) Bolting specimen





促進腐食試験前後の供試体外観

供試体名	試験前	1440h 経過時	試験後
LC0440			
LS0440			
H0440			
SM400			

試験適用例



ステンレス鋼と炭素鋼の溶接

SUS304 + SM400

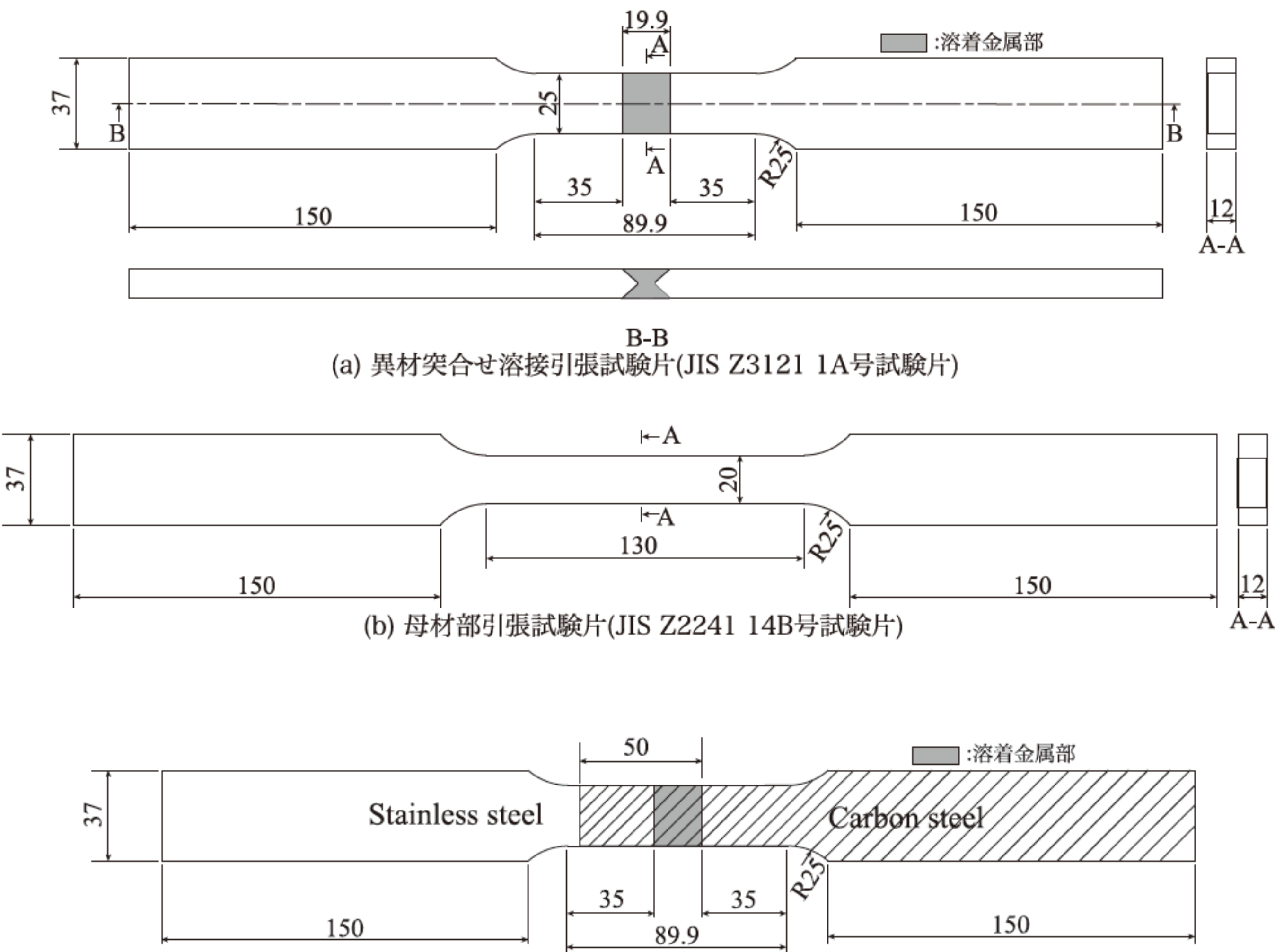
SUS316 + SM400

SUS304N2 + SM490Y

SUS329J3L + SM570

SUS323L + SM570

異材溶接試験体の腐食前後の引張強度



(a) 異材突合せ溶接引張試験片(JIS Z3121 1A号試験片)

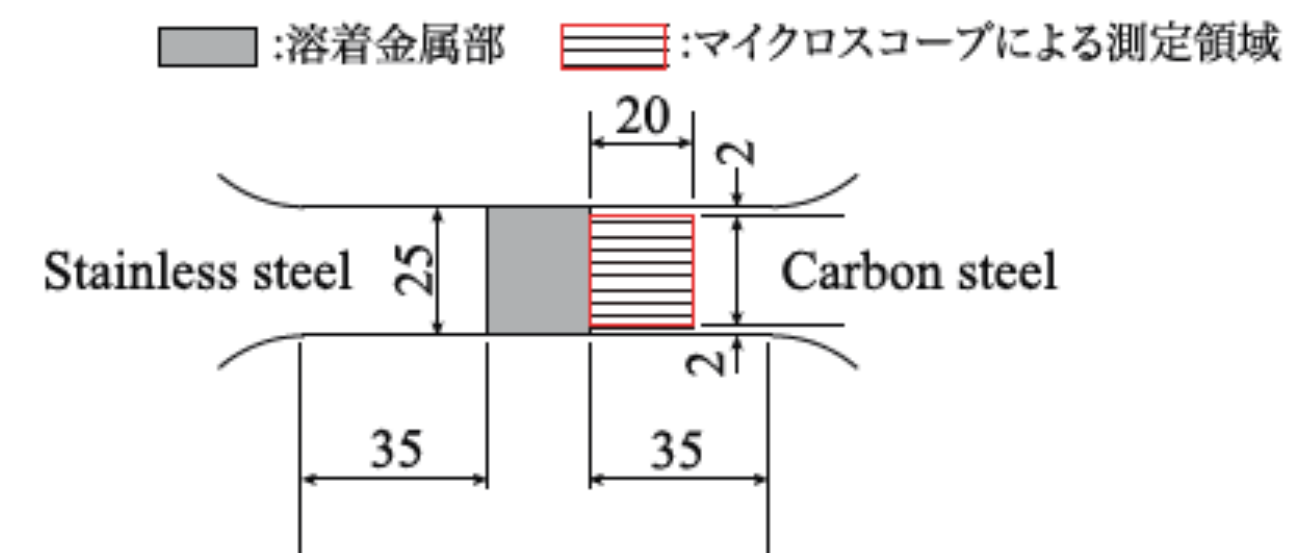
(b) 母材部引張試験片(JIS Z2241 14B号試験片)

Specimen	Steel type	Cyclic corrosion	
		test	Paint
0440-T-1(2)	SUS304+SS400	-	-
0440-AT-1(2)		○	-
0440-PAT-1(2)		○	○
23L57-T-1(2)	SUS323L+SM570	-	-
23L57-AT-1(2)		○	-
23L57-PAT-1(2)		○	○
304-T-1(2)	SUS304	-	-
304-AT-1(2)		○	-
323-T-1(2)	SUS323L	-	-
323-AT-1(2)		○	-
400-T-1(2)	SS400	-	-
400-AT-1(2)		○	-
570-T-1(2)	SM570	-	-
570-AT-1(2)		○	-

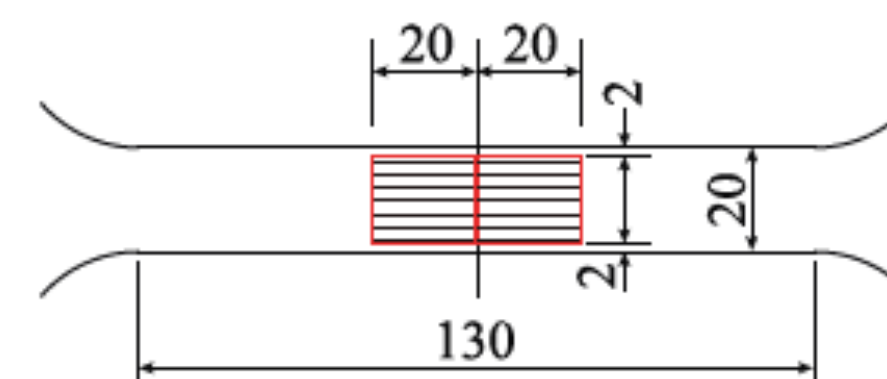
出典：宮寄靖大，星野由，志村保美，ステンレス鋼と炭素鋼を異材突合せ溶接した板部材の腐食の有無による引張強度特性に関する実験的研究，鋼構造論文集，第30巻，第118号，pp.15-27，2023.

試験体名	複合サイクル試験前	複合サイクル試験後	腐食生成物除去後
0440-AT-1			
0440-PAT-1			
23L57-AT-1			
23L57-PAT-1			

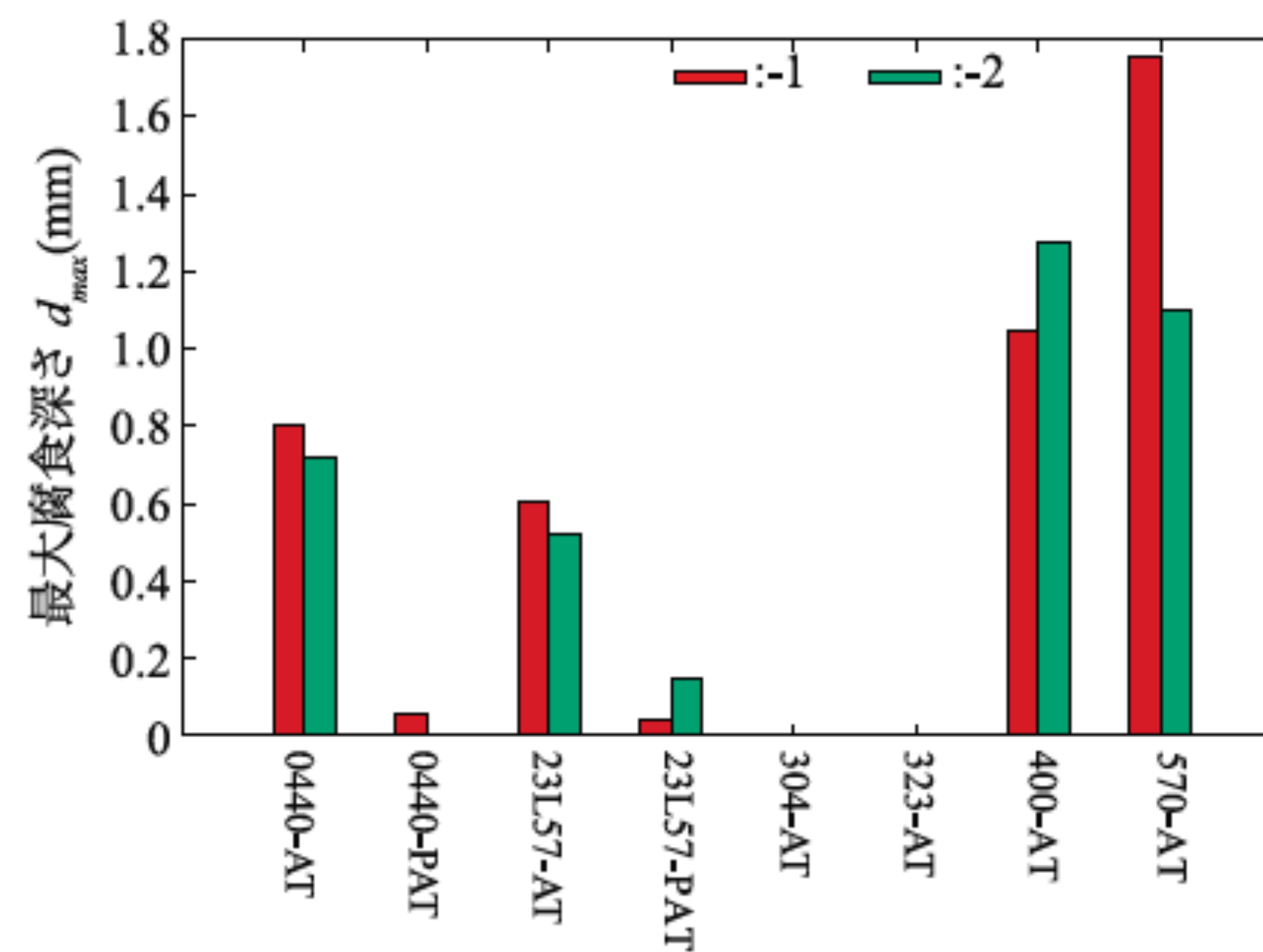
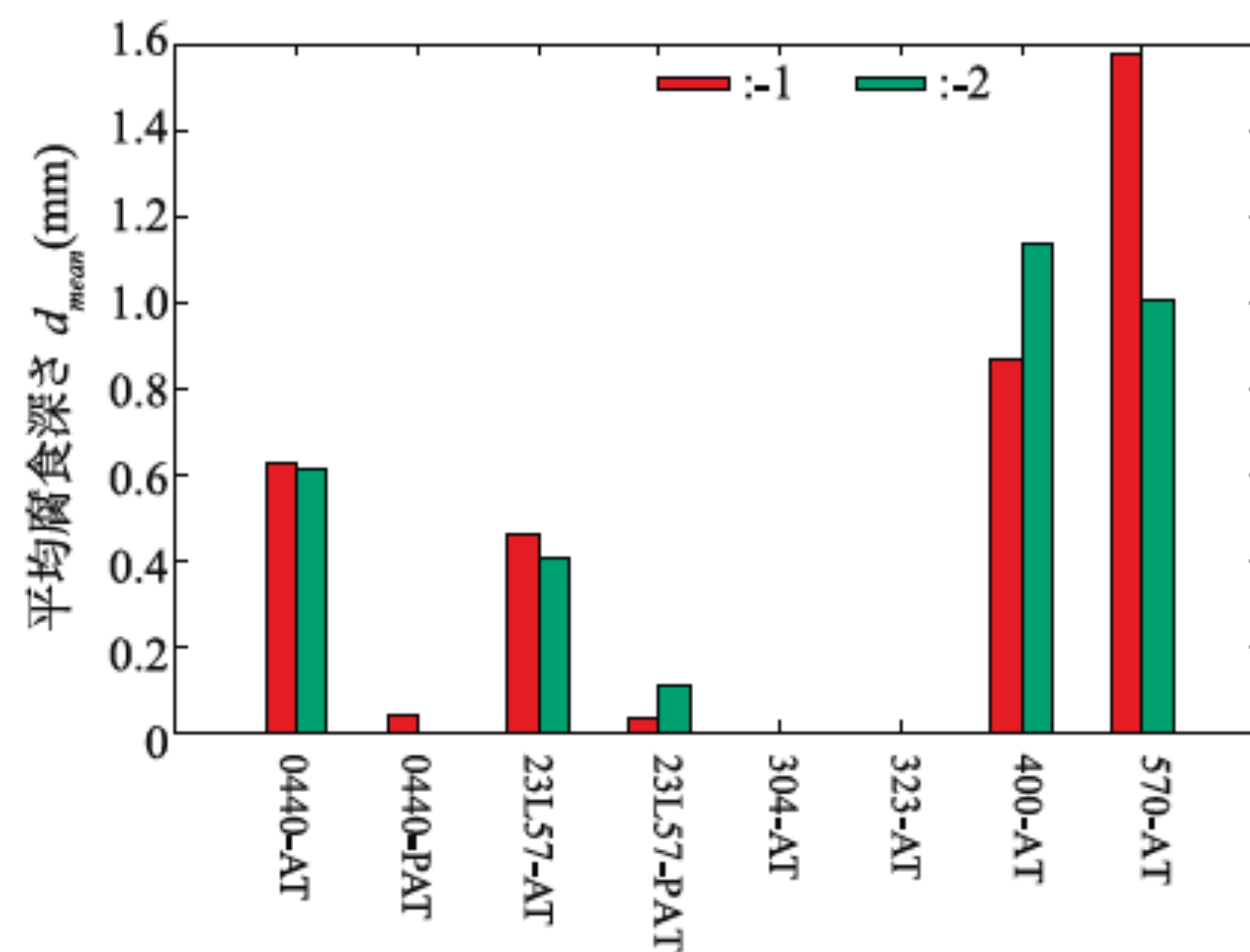
左側：ステンレス鋼，右側：炭素鋼

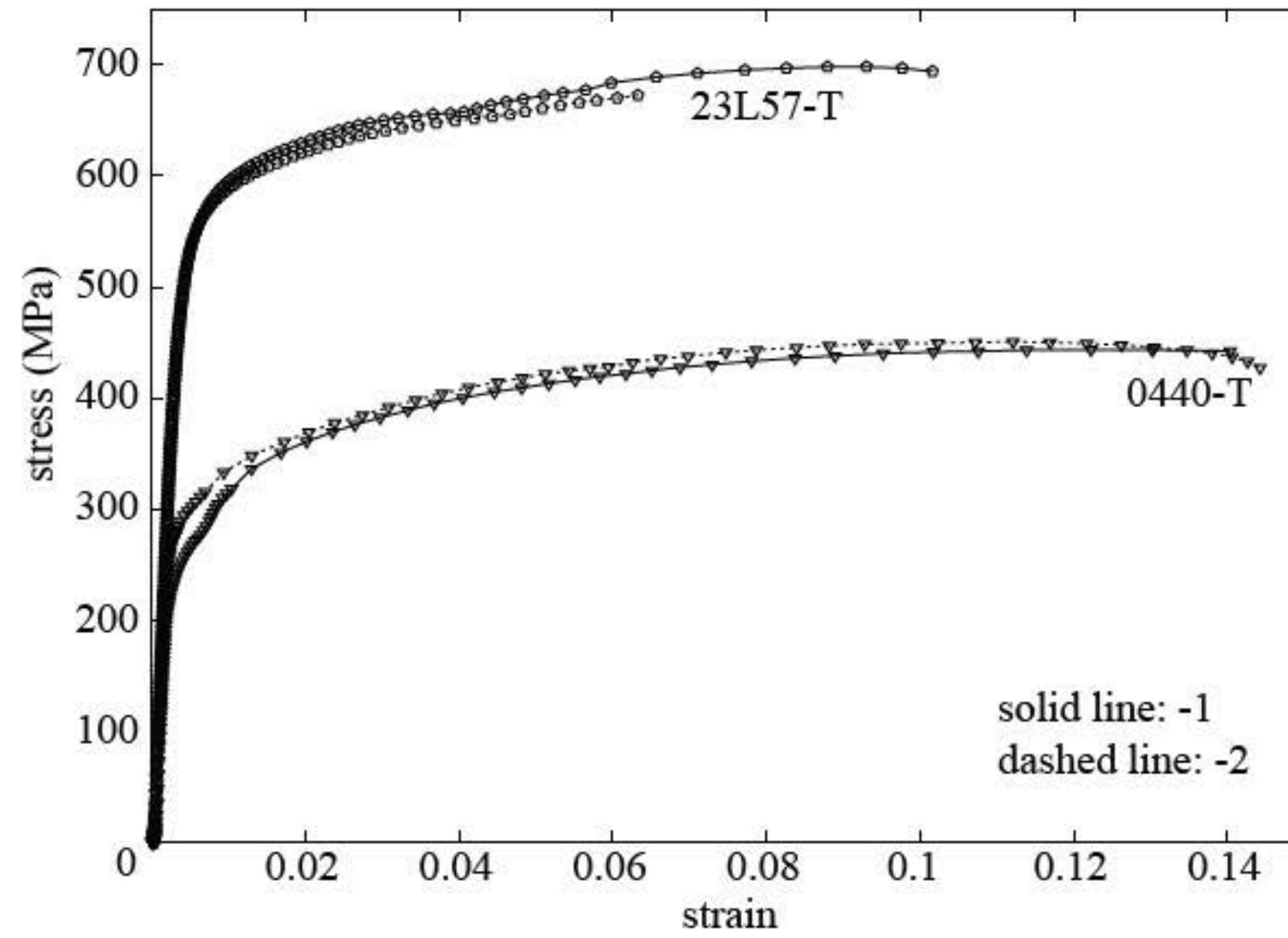


(a) 異材突合せ溶接試験体

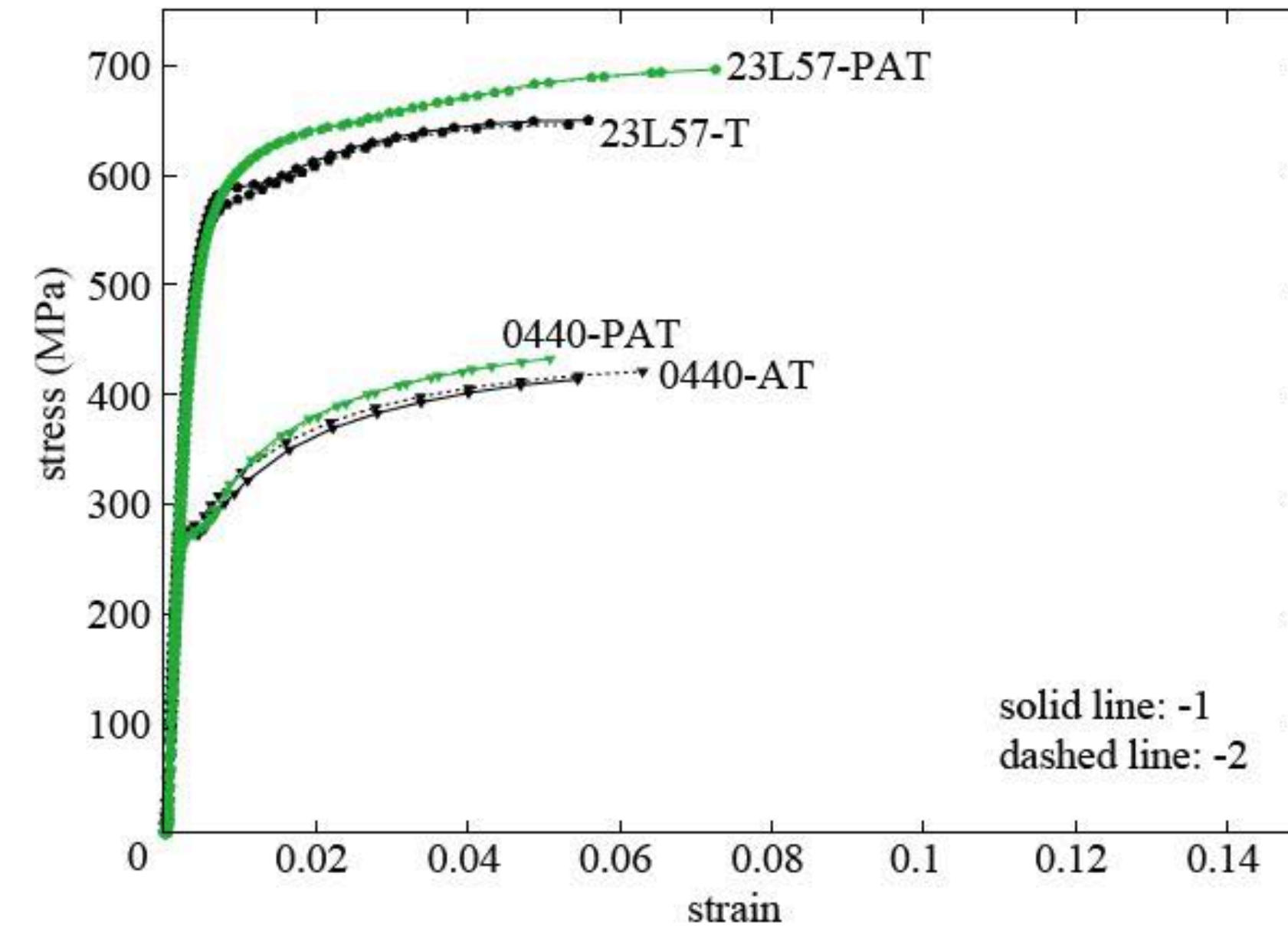


(b) 単体材料試験体



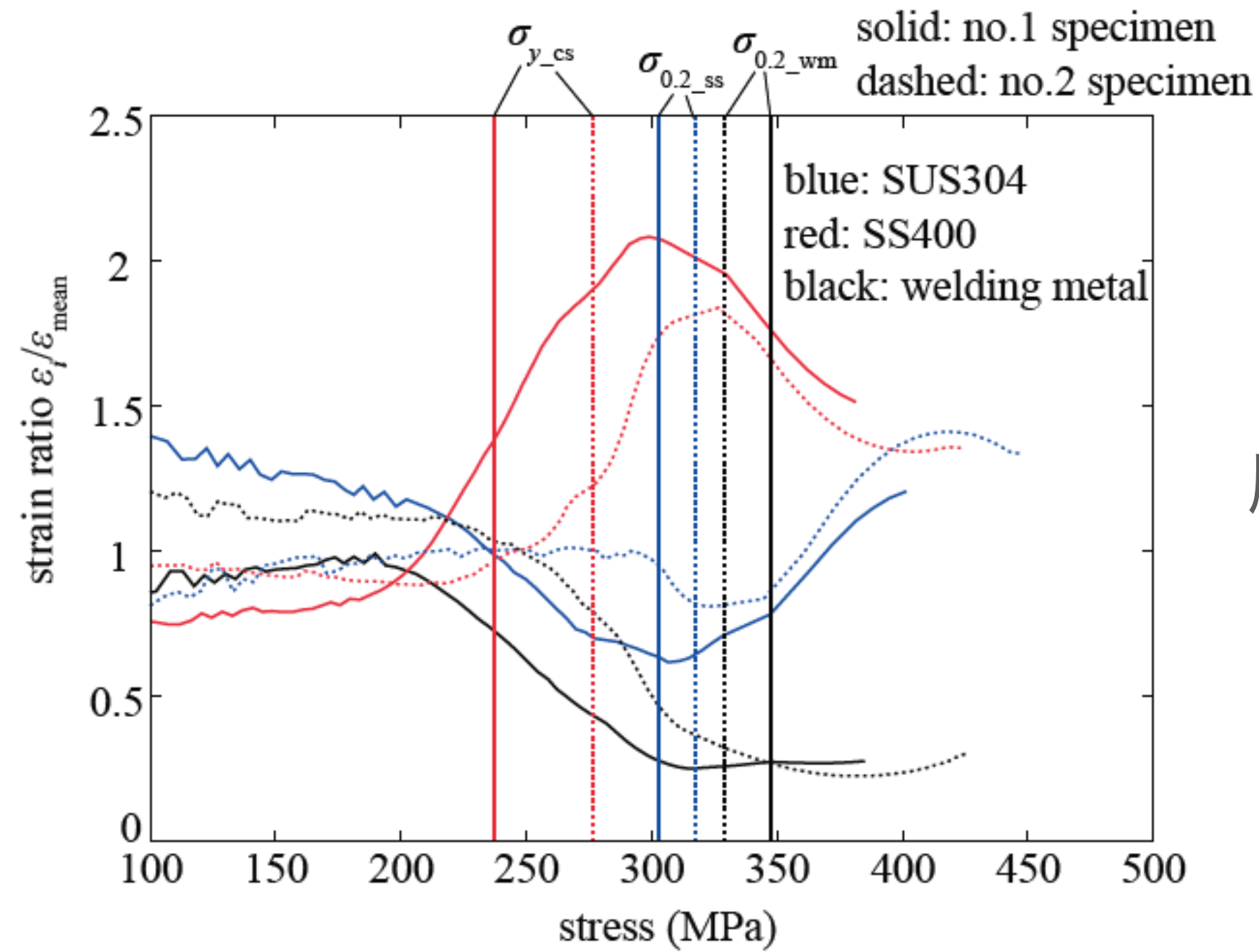


(a) 異材接合試験体（促進腐食試験無し）

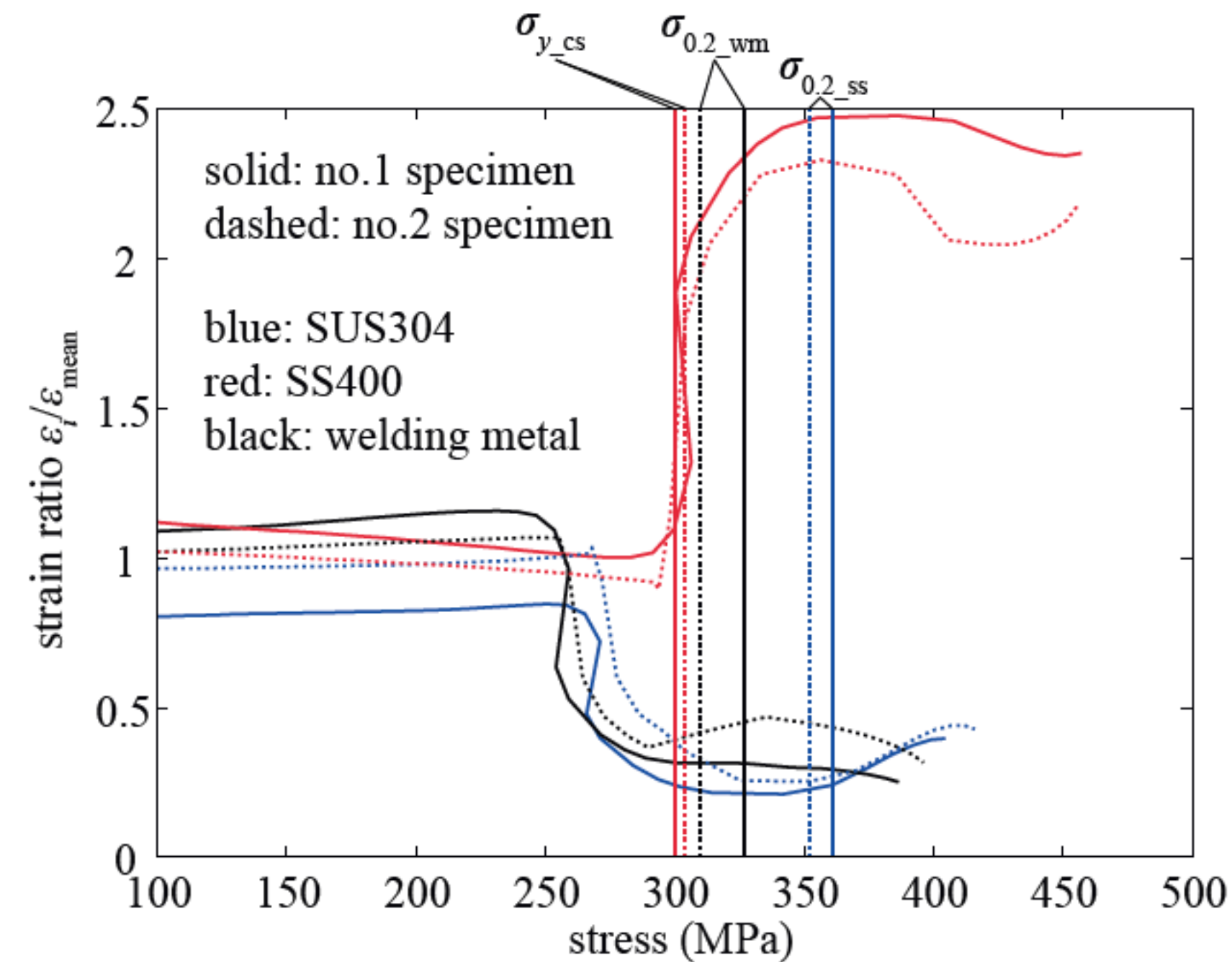


(b) 異材接合試験体（促進腐食試験有り）

試験片	複合サイクル試験 無し T-1	複合サイクル試験 有り AT-1	複合サイクル試験 有り（塗装有り） PAT-1
0440-	SS CS	SS CS	SS CS
23L57-	SS CS	SS CS	SS CS



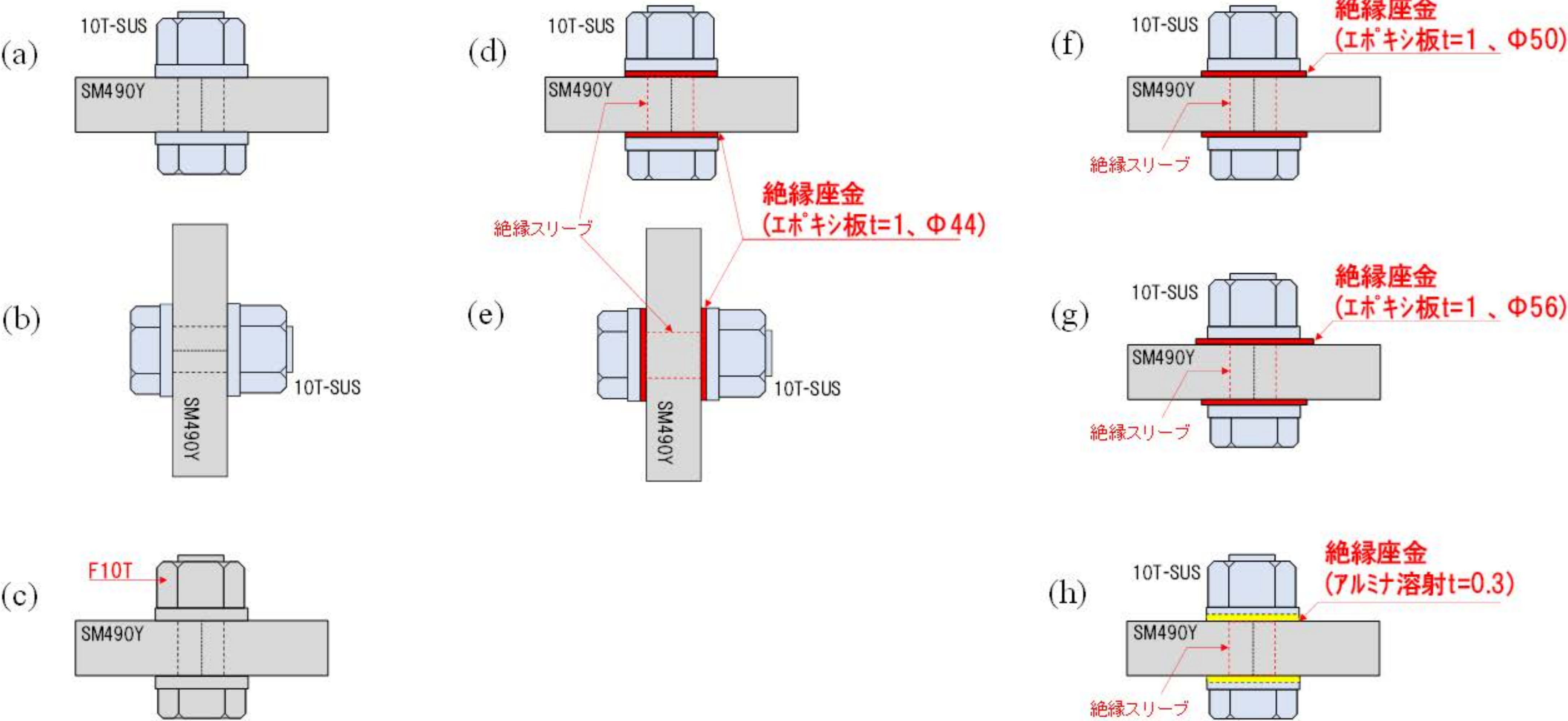
腐食無し



腐食有り

- 炭素鋼単体試験体およびステンレス鋼と炭素鋼の溶接試験体ともに，腐食後の材料強度の算出に当たっては，腐食に伴う換算板厚減少量により評価することで問題無い。
- 本研究で対象とした異材接合試験体の引張強度特性は，炭素鋼側の腐食の有無に関わらず異材接合部が弱点となる現象が生じない。

絶縁方法の違いが腐食性状に及ぼす影響



供試体名	絶縁方法	設置条件	高力ボルト	図2
None-F-SS-1(,2,3)	無	水平	10T-SUS	(a)
None-V-SS-1(,2,3)	無	垂直	10T-SUS	(b)
None-F-CS-1(,2,3)	無	水平	F10T	(c)
E44-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(φ 44)	水平	10T-SUS	(d)
E44-V-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(φ 44)	垂直	10T-SUS	(e)
E50-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(φ 50)	水平	10T-SUS	(f)
E56-F-SS-1(,2,3)	エポキシ樹脂板(φ 56)	水平	10T-SUS	(g)
AS-F-SS-1(,2,3)	アルミナ溶射	水平	10T-SUS	(h)

供試体名中の括弧は，2 体目，3 体目を意味する．

1サイクル(8時間)

1. 塩水噴霧(2時間)

・温度: 35±1℃

・塩水の塩濃度: 5±0.5%

2. 乾燥(4時間)

・温度: 60±1℃

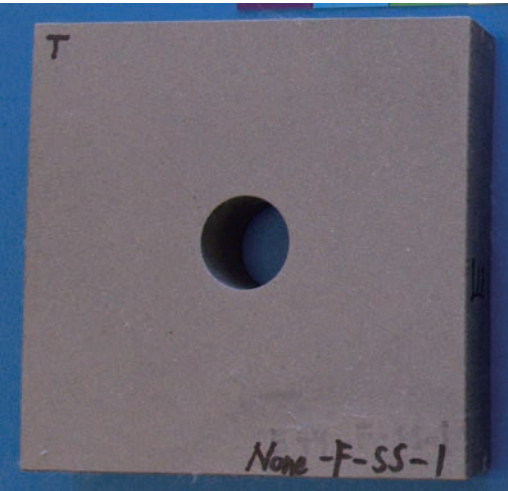
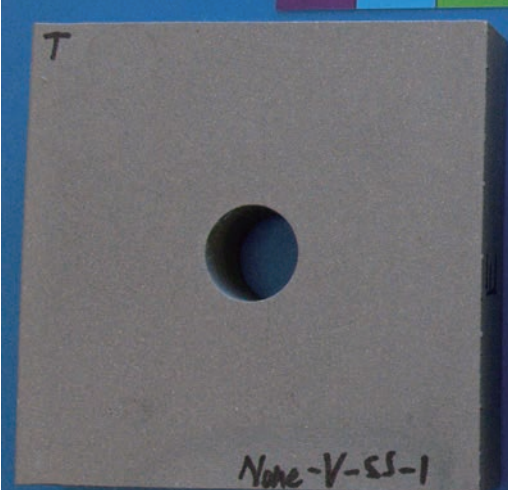
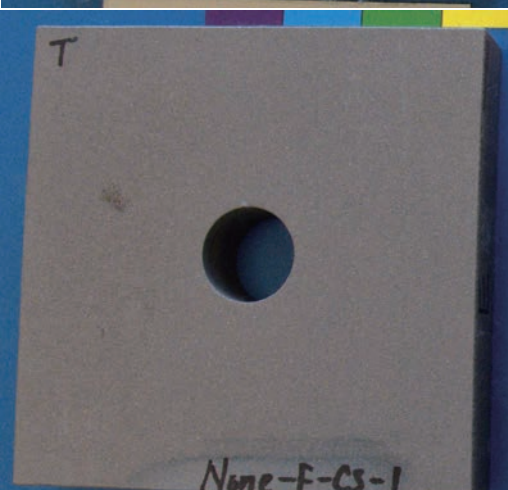
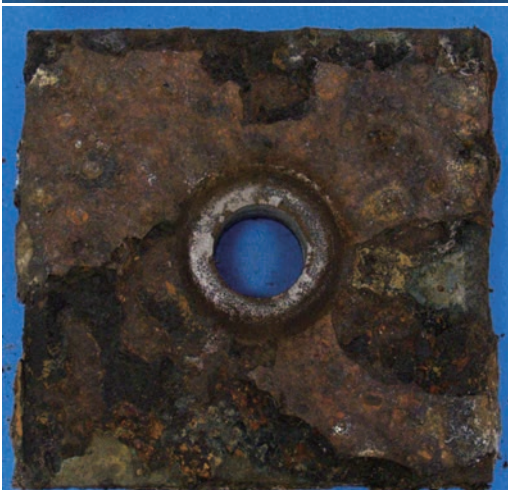
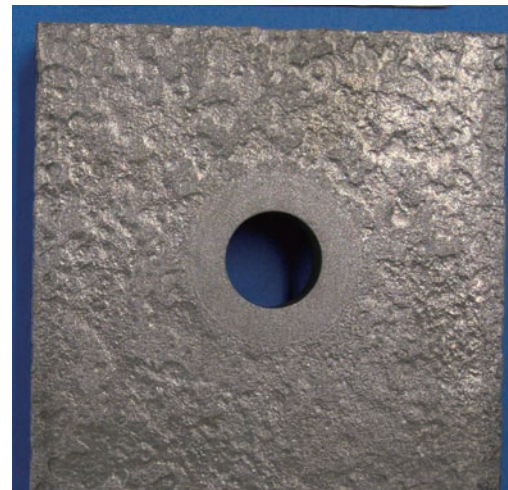
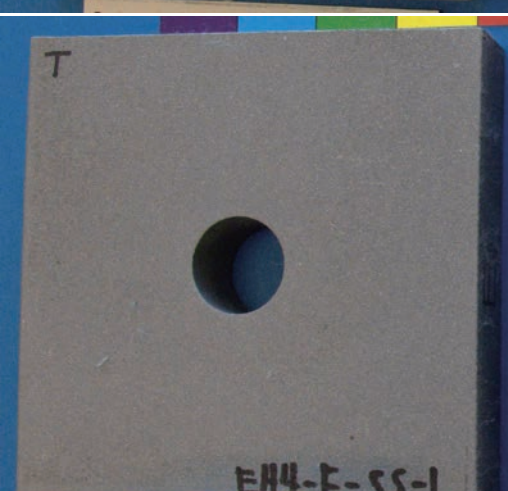
・相対湿度: 20-30%RH

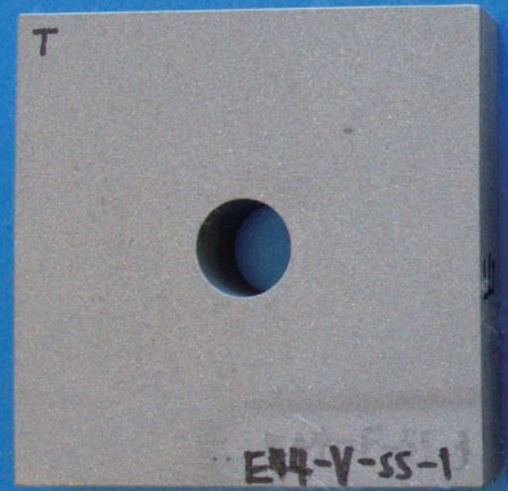
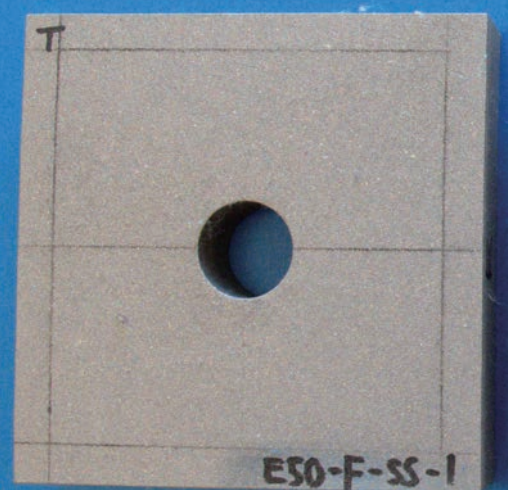
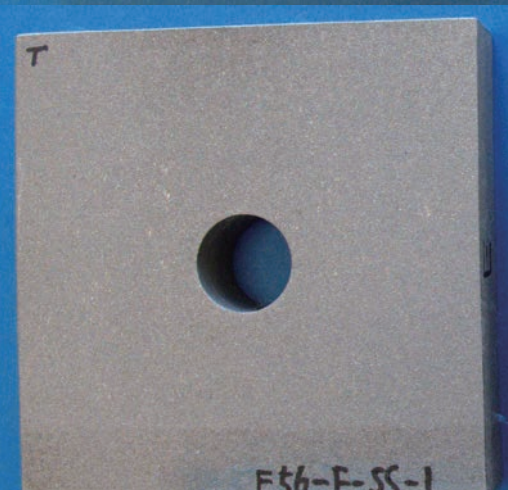
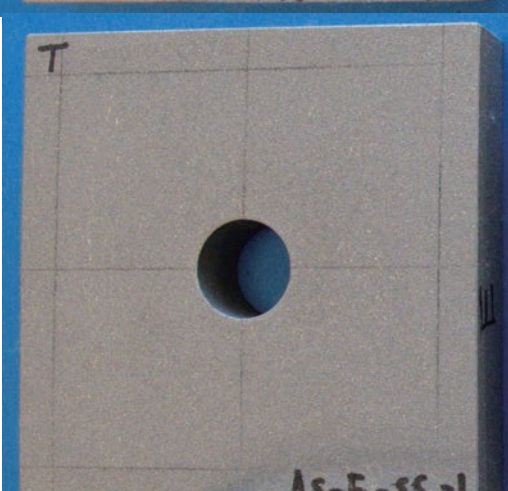
3. 湿潤(2時間)

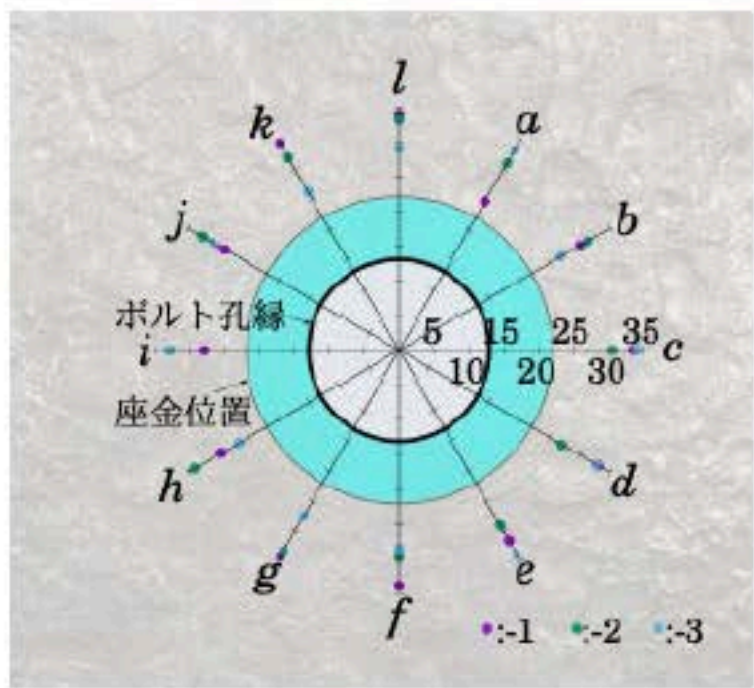
・温度: 50±1℃

・相対湿度: 90%RH以上

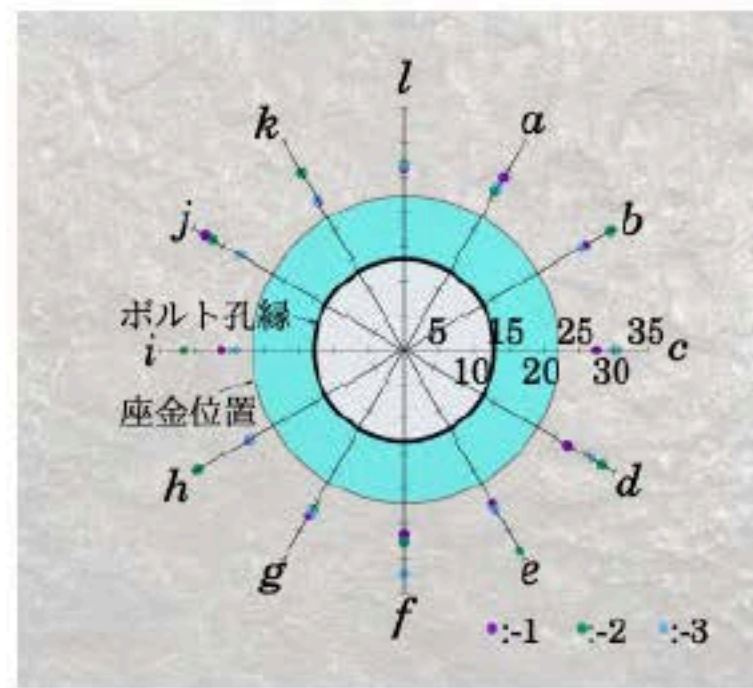
腐食外観

供試体	試験前 (0h)	試験後 (1440h)	腐食生成物 除去後
None-F-SS-1			
None-V-SS-1			
None-F-CS-1			
E44-F-SS-1			

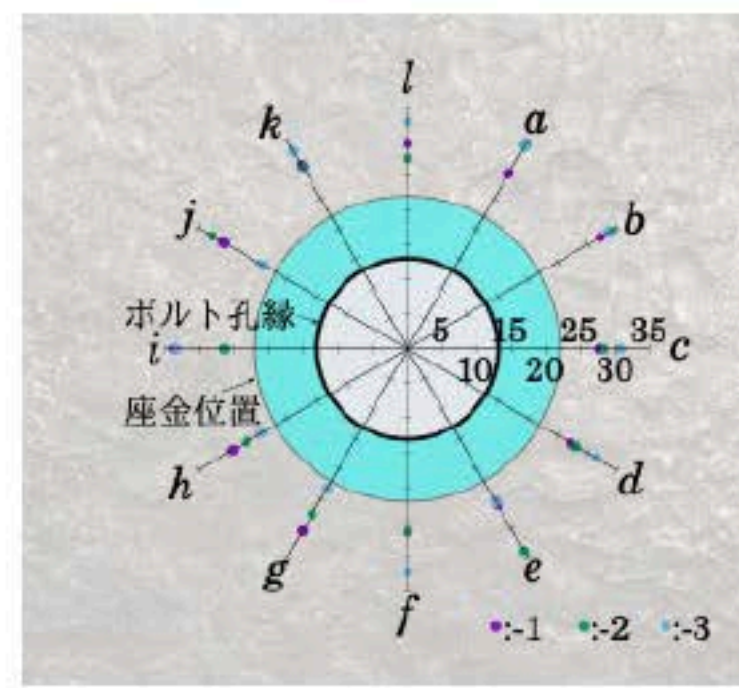
供試体	試験前 (0h)	試験後 (1440h)	腐食生成物 除去後
E44-V-SS-1			
E50-F-SS-1			
E56-F-SS-1			
AS-F-SS-1			



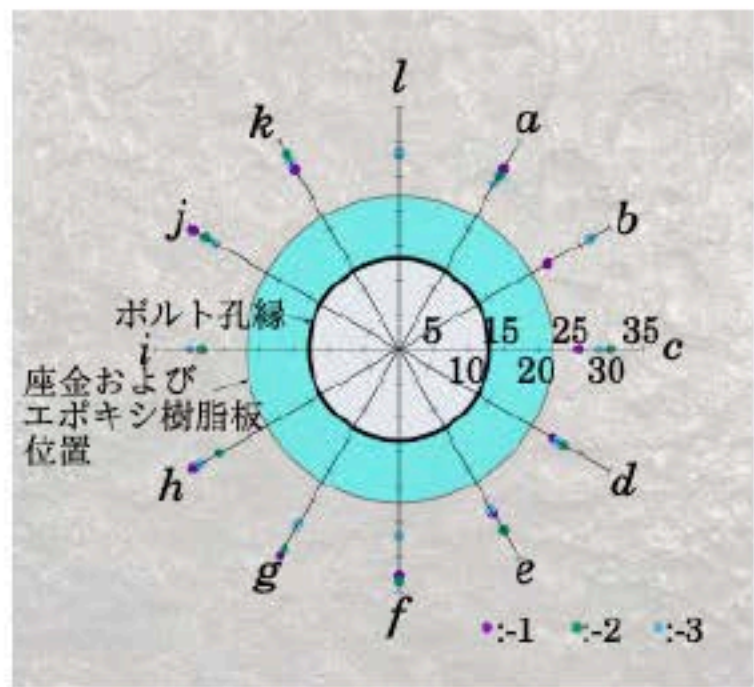
(a) None-F-SS



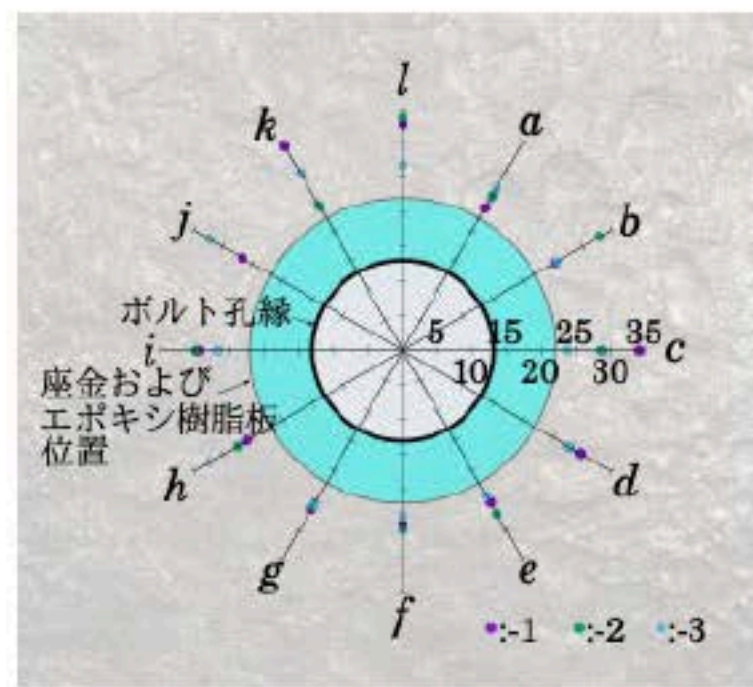
(b) None-V-SS



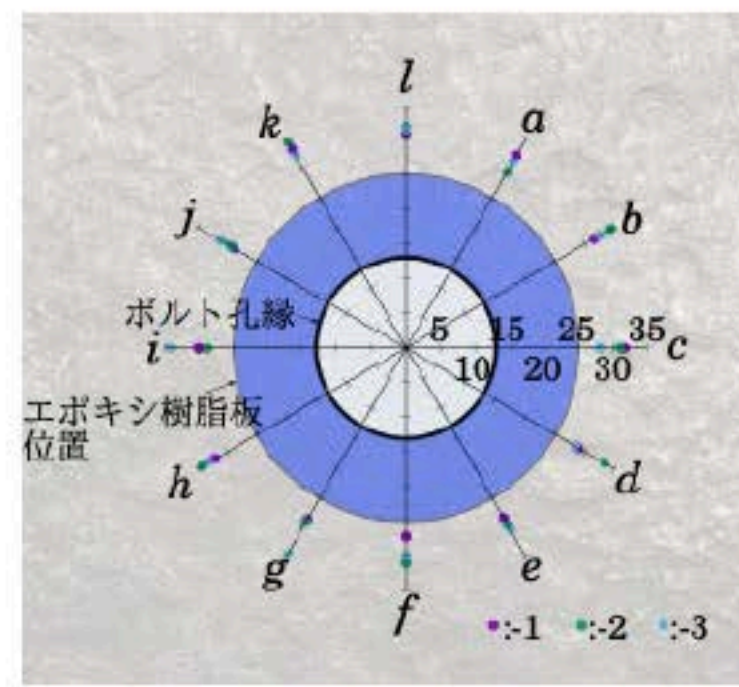
(c) None-F-CS



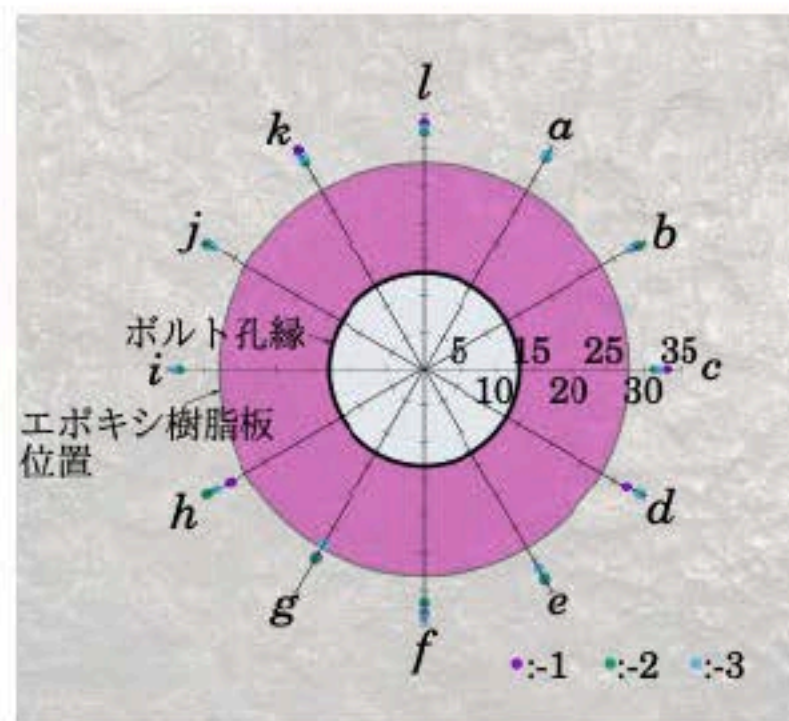
(d) E44-F-SS



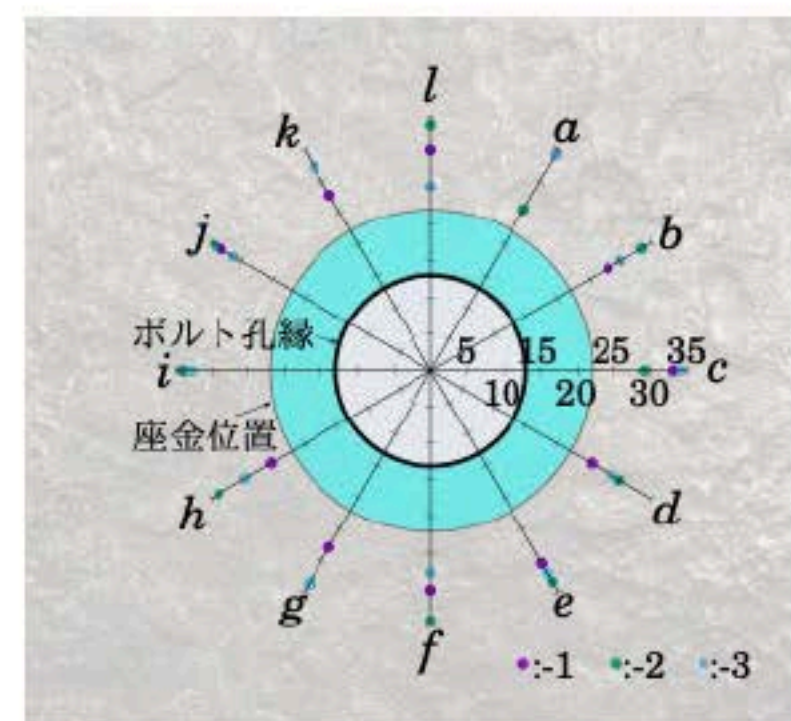
(e) E44-V-SS



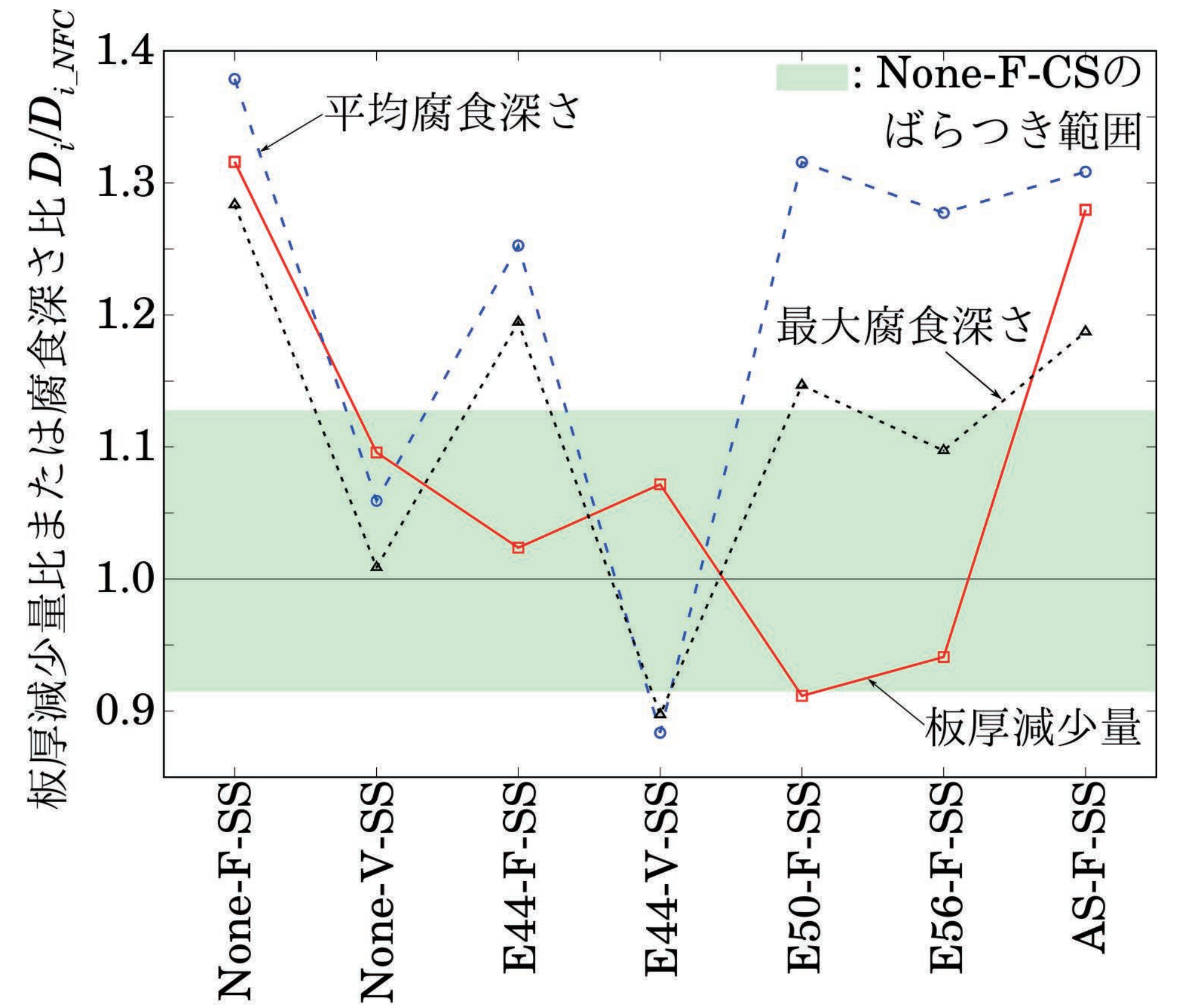
(f) E50-F-SS



(g) E56-F-SS



(h) AS-F-SS

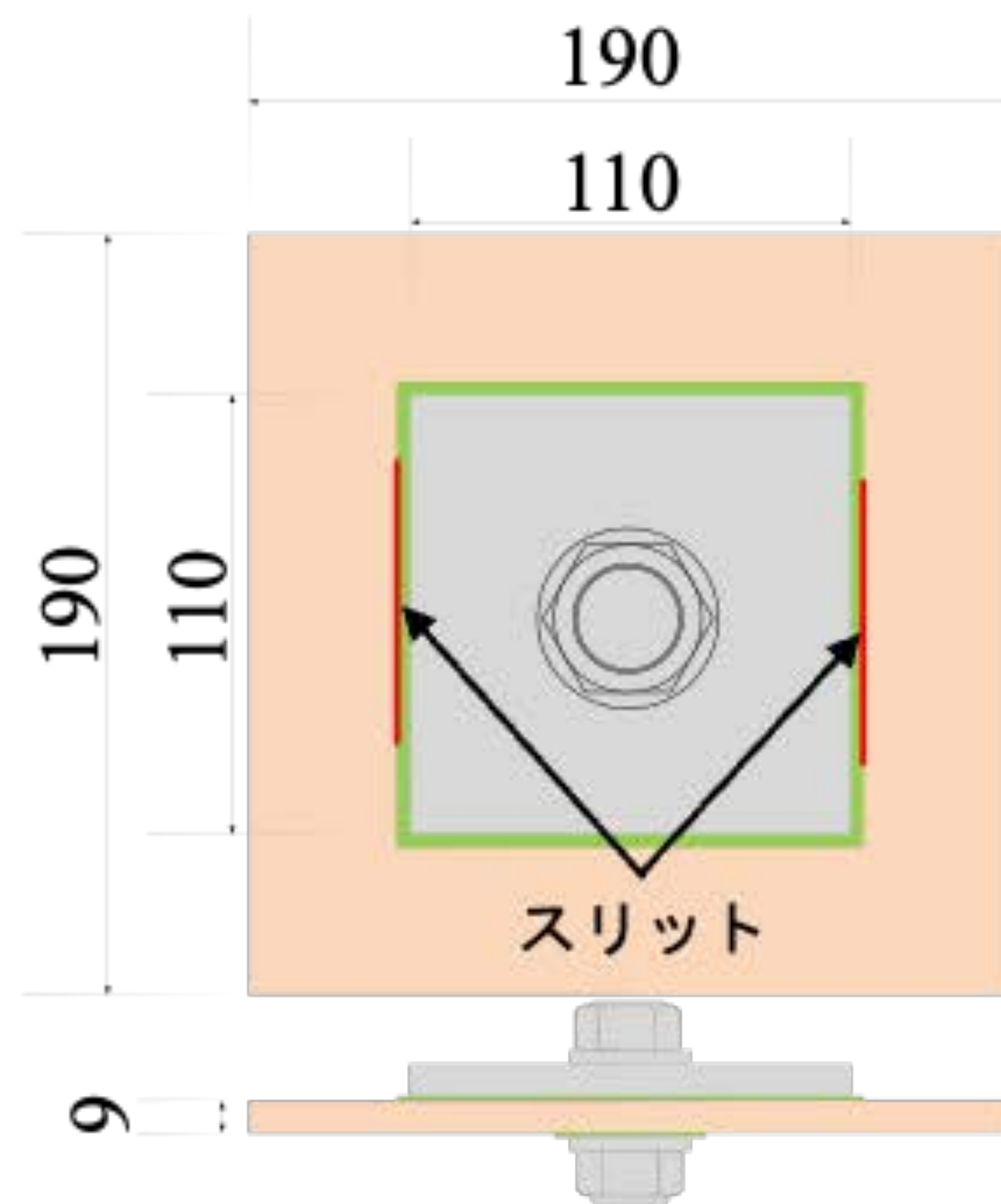
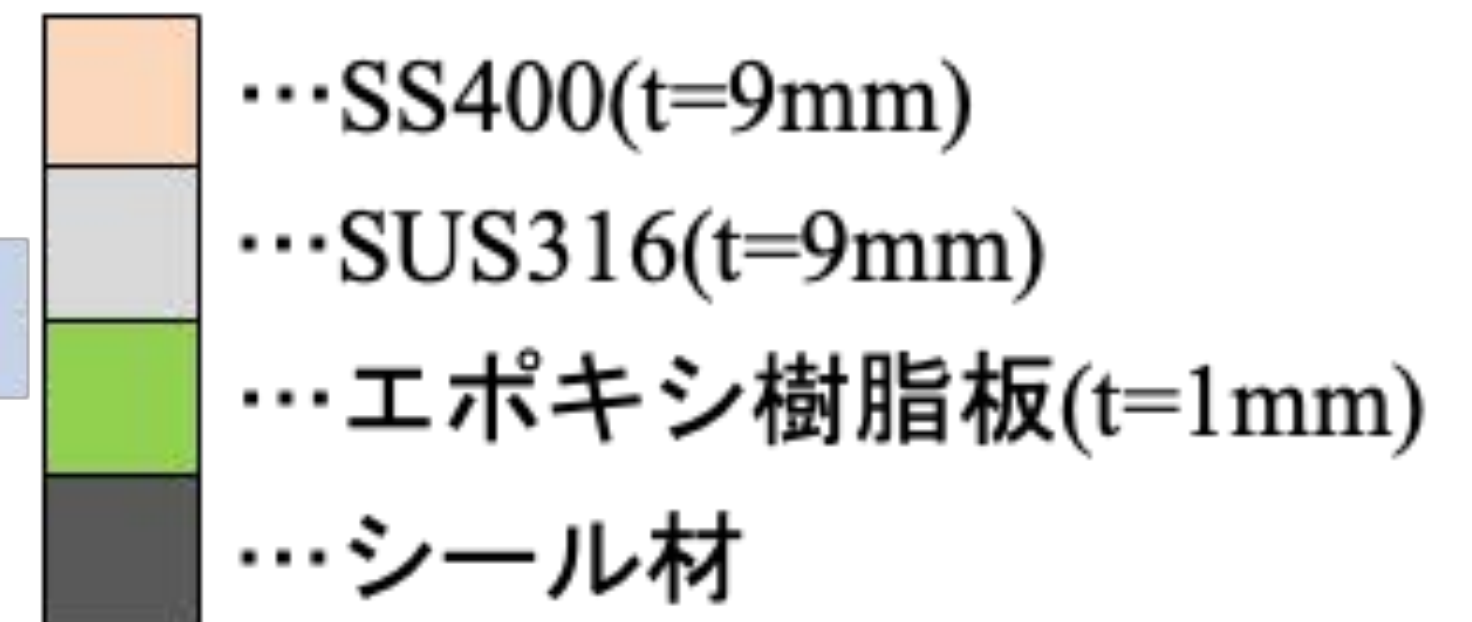


3

試験体形状



EpS-Rc-Sus-L

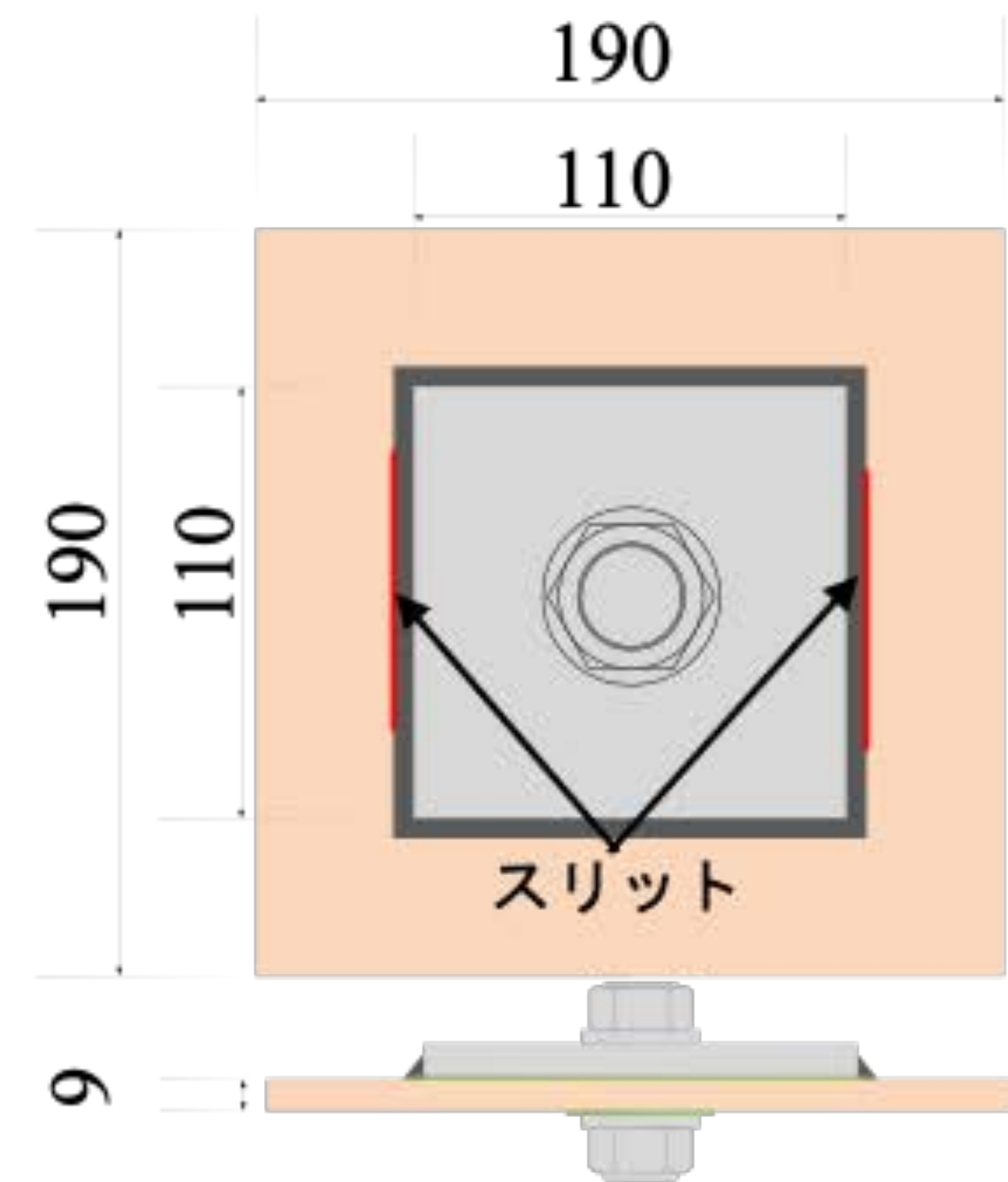


スリット部

施工品質の不都合
などによる連結部
の塗膜変状を再現



接触面端部の
耐久性を確認

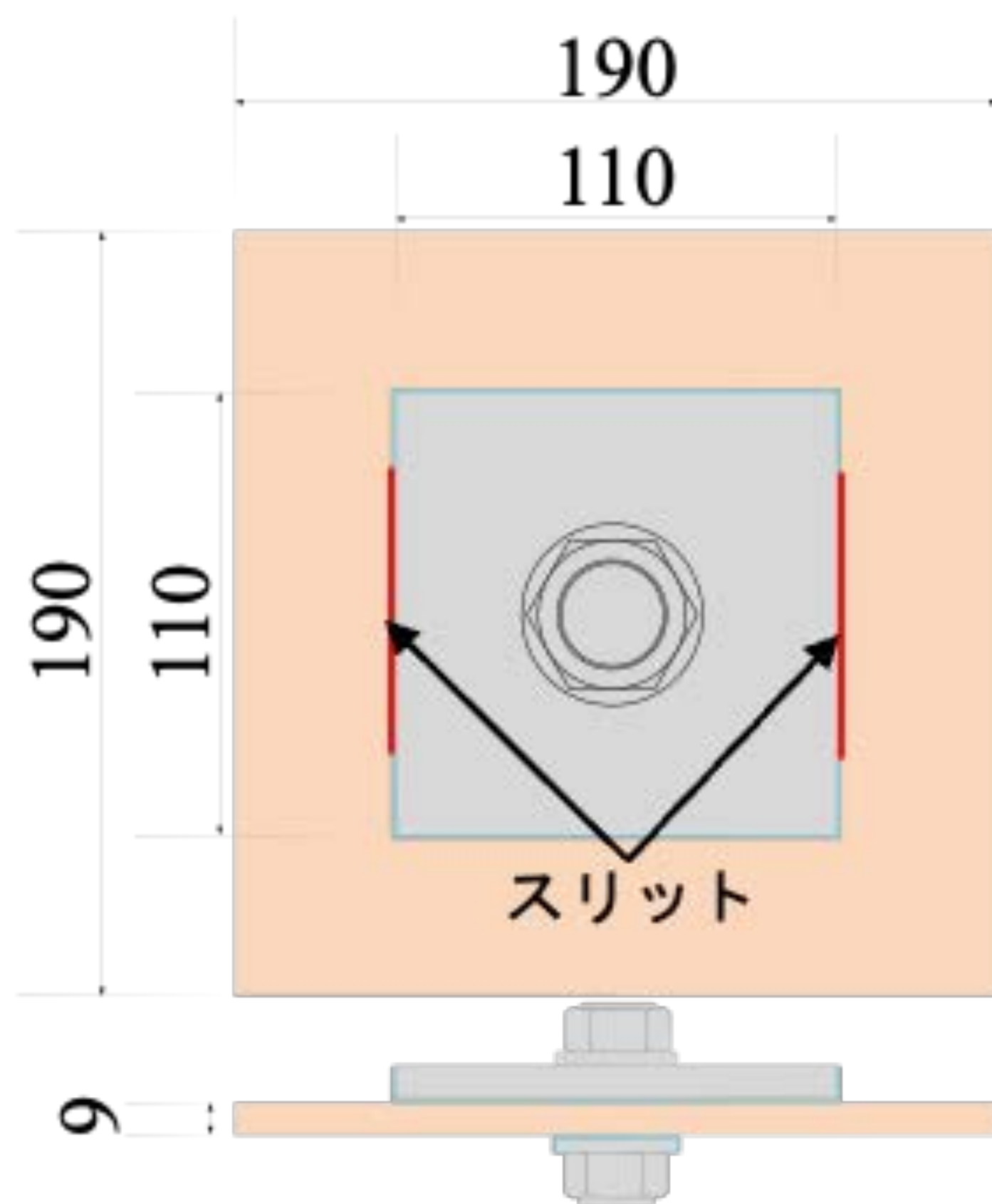


出典：星野由，宮寄靖大，大西達也，志村保美，小林裕輔，澁谷敦，防食処理を施したSUS316とSS400の高力ボルト継手部の複合サイクル試験，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，I-272，2023.9.

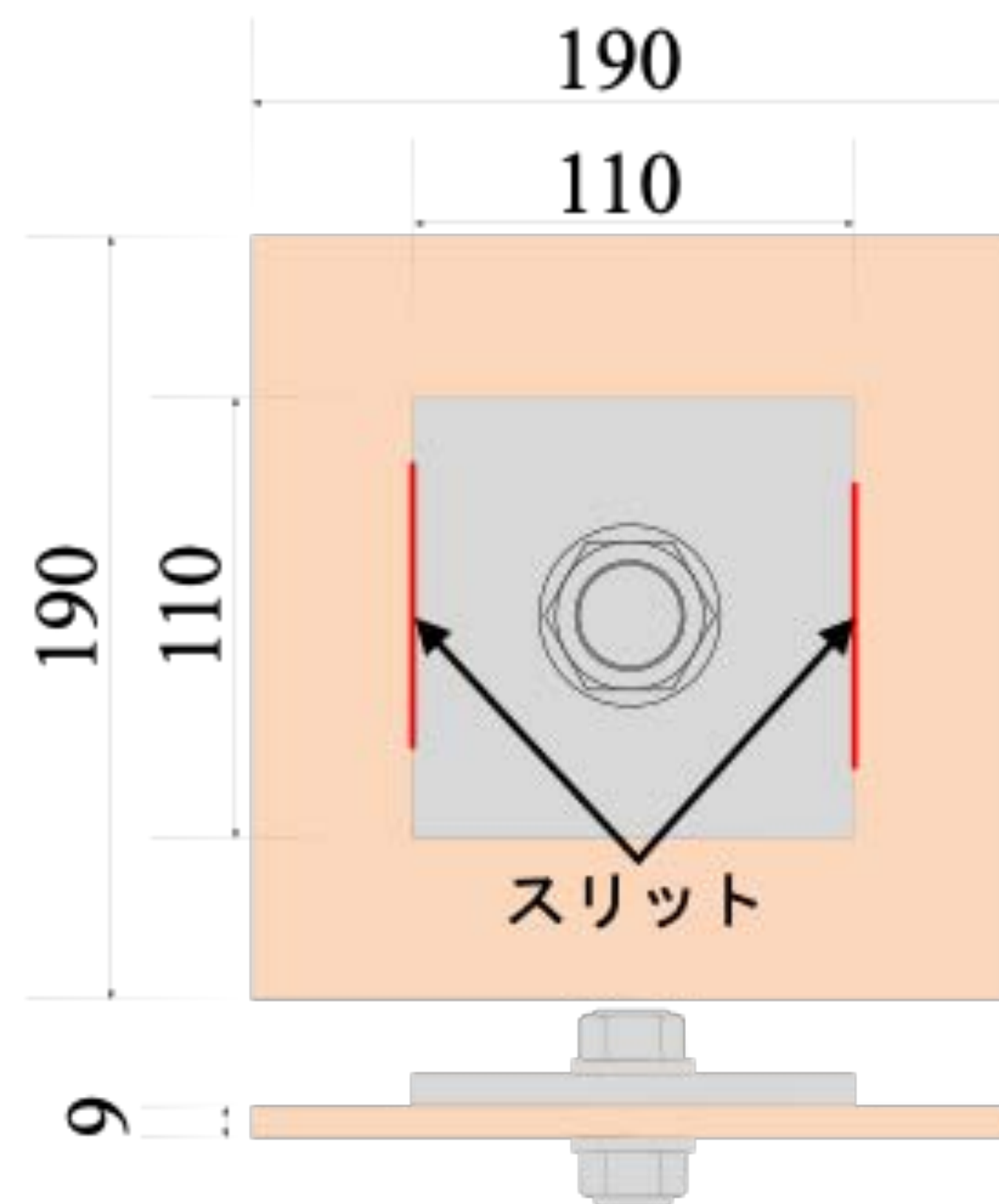
3

試験体形状

Al-F11-Sus-L	…SS400(t=9mm)
Al-Rc-Sus-L	…SUS316(t=9mm)
Al-Rc-Sus-V	…アルミナ溶射(t=0.3mm)



None-Rc-Sus-L	…SS400(t=9mm)
None-Rc-Car-L	…SUS316(t=9mm)



試験体名	絶縁材料	塗装	添接板	設置条件	高力ボルト
Ep-F11-Sus-L	エポキシ樹脂板	F-11	ステンレス	水平	10T-SUS
Ep-Rc-Sus-L	エポキシ樹脂板	Rc-II	ステンレス	水平	10T-SUS
Ep-Rc-Sus-V	エポキシ樹脂板	Rc-II	ステンレス	垂直	10T-SUS
EpS-Rc-Sus-L	エポキシ樹脂板+シー ル材	Rc-II	ステンレス 鋼	水平	10T-SUS
Al-F11-Sus-L	アルミナ溶射	F-11	ステンレス	水平	10T-SUS
Al-Rc-Sus-L	アルミナ溶射	Rc-II	ステンレス	水平	10T-SUS
Al-Rc-Sus-V	アルミナ溶射	Rc-II	ステンレス	垂直	10T-SUS
None-Rc-Sus-L	なし	Rc-II	ステンレス	水平	10T-SUS
None-Rc-Car-L	なし	Rc-II	炭素鋼	水平	F10T

塗装方法…F-11(C-5塗装系)

塗装工程	塗料名
1次素地調整	ブラスト処理
プライマー	無機ジンクリッチプライマー
2次素地調整	ブラスト処理
防食下地	無機ジンクリッチペイント
素地調整	動力工具処理
ミストコート	変形エポキシ樹脂塗料下塗
下塗り	超厚膜形エポキシ樹脂塗料
中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗
上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗

塗装方法…Rc-II塗装系

塗装工程	塗料名
素地調整	2種
防食下地	有機ジンクリッジペイント
下塗り	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗装下塗
中塗り	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗
上塗り	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗

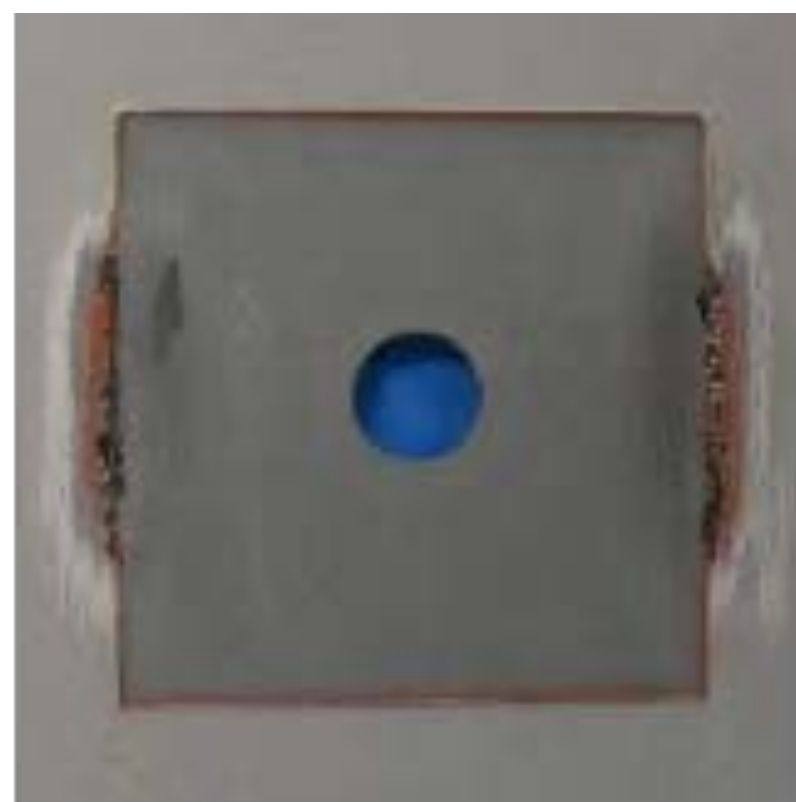
赤ライン部分にて以下の加工

- ・ 絶縁材料
- ・ SUS接触面にプライマー

腐食試験終了後



Ep-F11-Sus-L



Ep-Rc-Sus-L



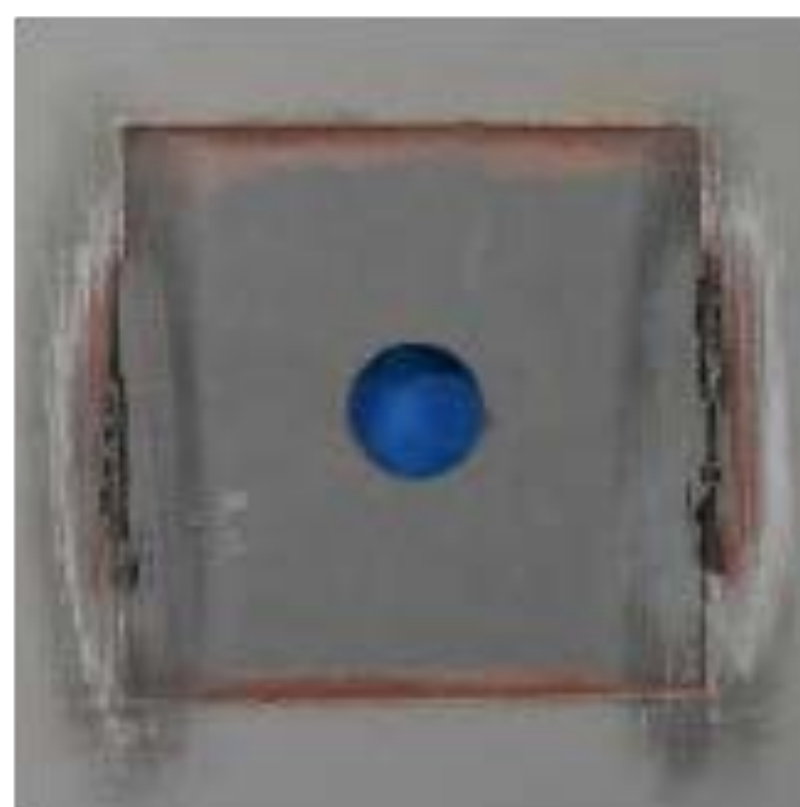
Ep-Rc-Sus-V



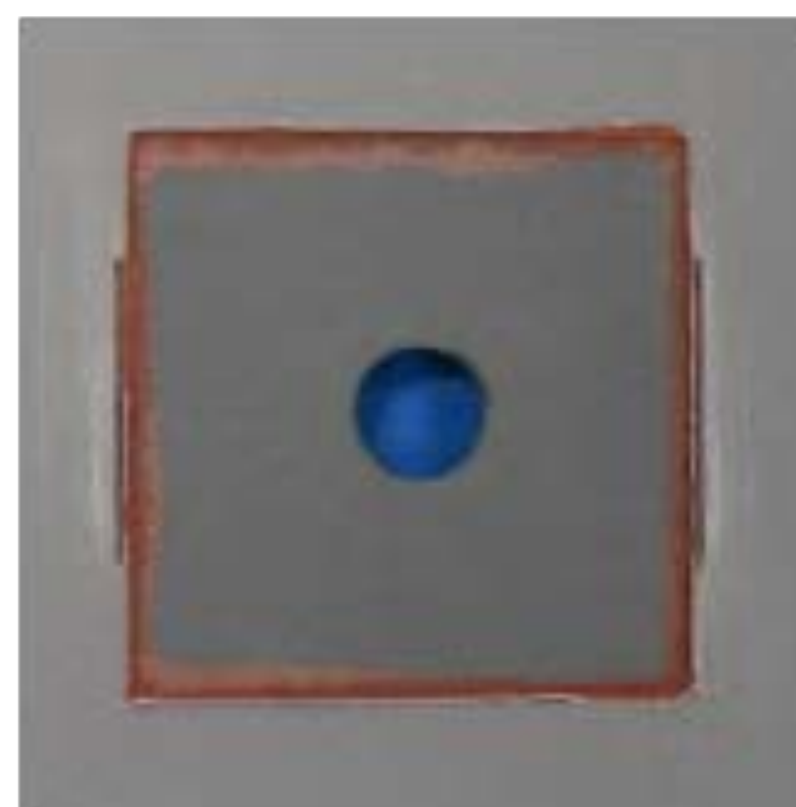
EpS-Rc-Sus-L



Al-F11-Sus-L



Al-Rc-Sus-L



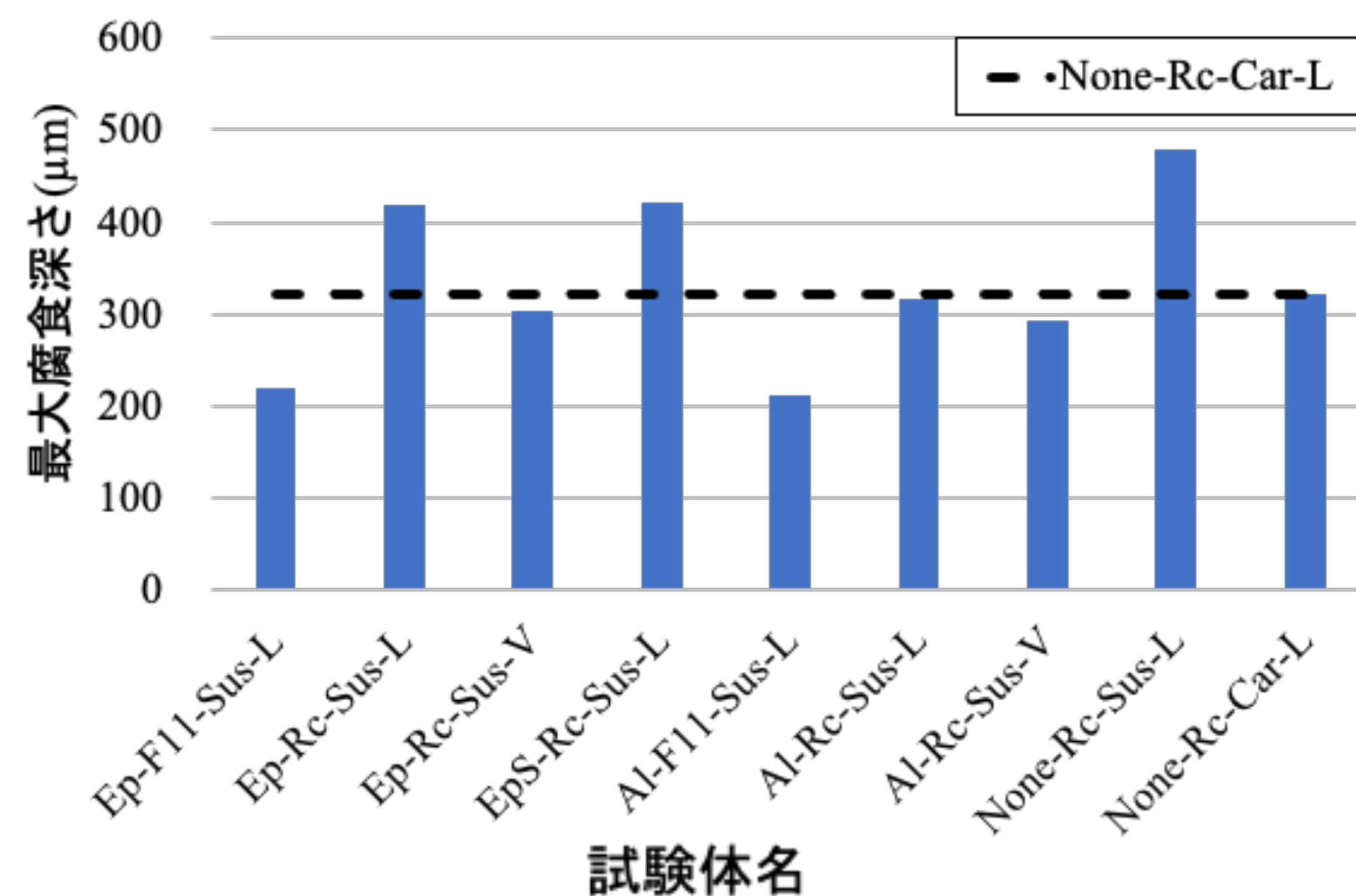
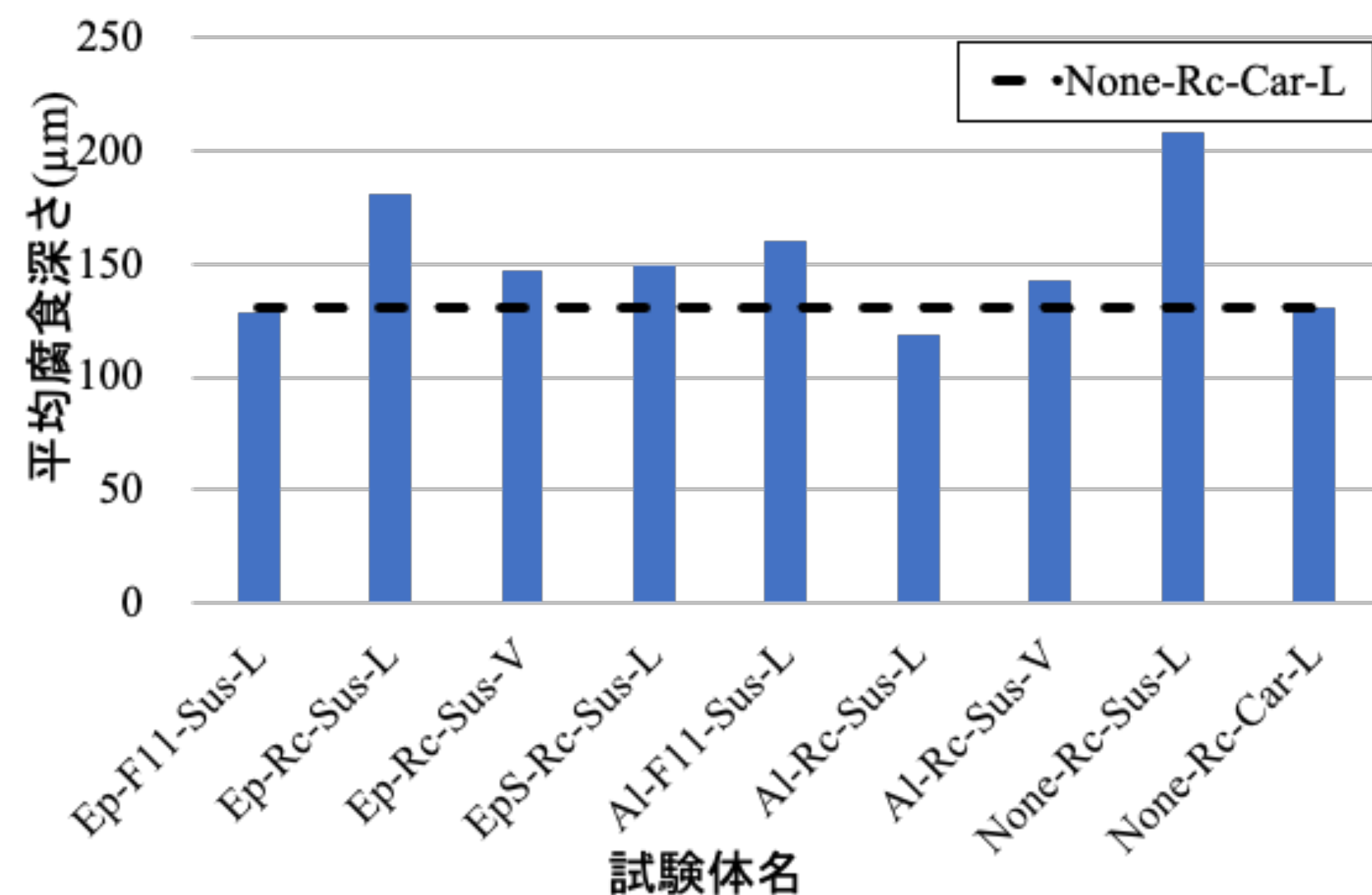
Al-Rc-Sus-V



None-Rc-Sus-L



None-Rc-Car-L



- (1)対象とした全ての試験体の塗装健全部分は、腐食が発生しない.
- (2)F-11塗装系を施した試験体は、None-Rc-Car-Lに比べて、平均粗さが約35～49%，最大腐食深さが約65～68%となる.
- (3)絶縁材料を用いたEp-Rc-Sus-L，EpS-Rc-Sus-L，Al-Rc-Susは、絶縁材料を使用していないNone-Rc-Sus-Lに比べて、平均腐食深さおよび最大腐食深さが小さくなる.

ご清聴, ありがとうございます。