

# 鋼構造物の機能強化と長寿命化のための 溶接補修技術の構築

大阪大学大学院 工学研究科

地球総合工学専攻 社会基盤工学部門

准教授 廣畑幹人



<http://www.civil.eng.osaka-u.ac.jp/struct/>

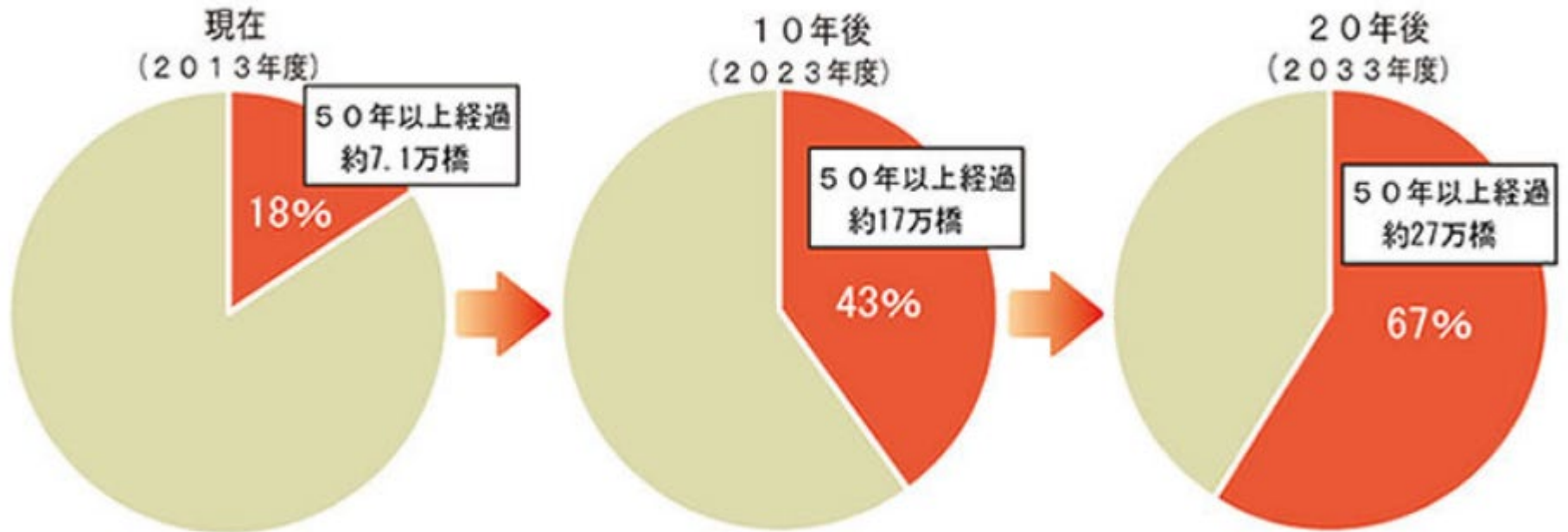
# 研究の背景

## インフラ構造物(橋梁)の維持管理, 補修補強

### 全国の橋梁

(橋長2m以上対象、2013年4月時点)

■ 建設後50年以上の橋梁  
■ 建設後50年未満の橋梁



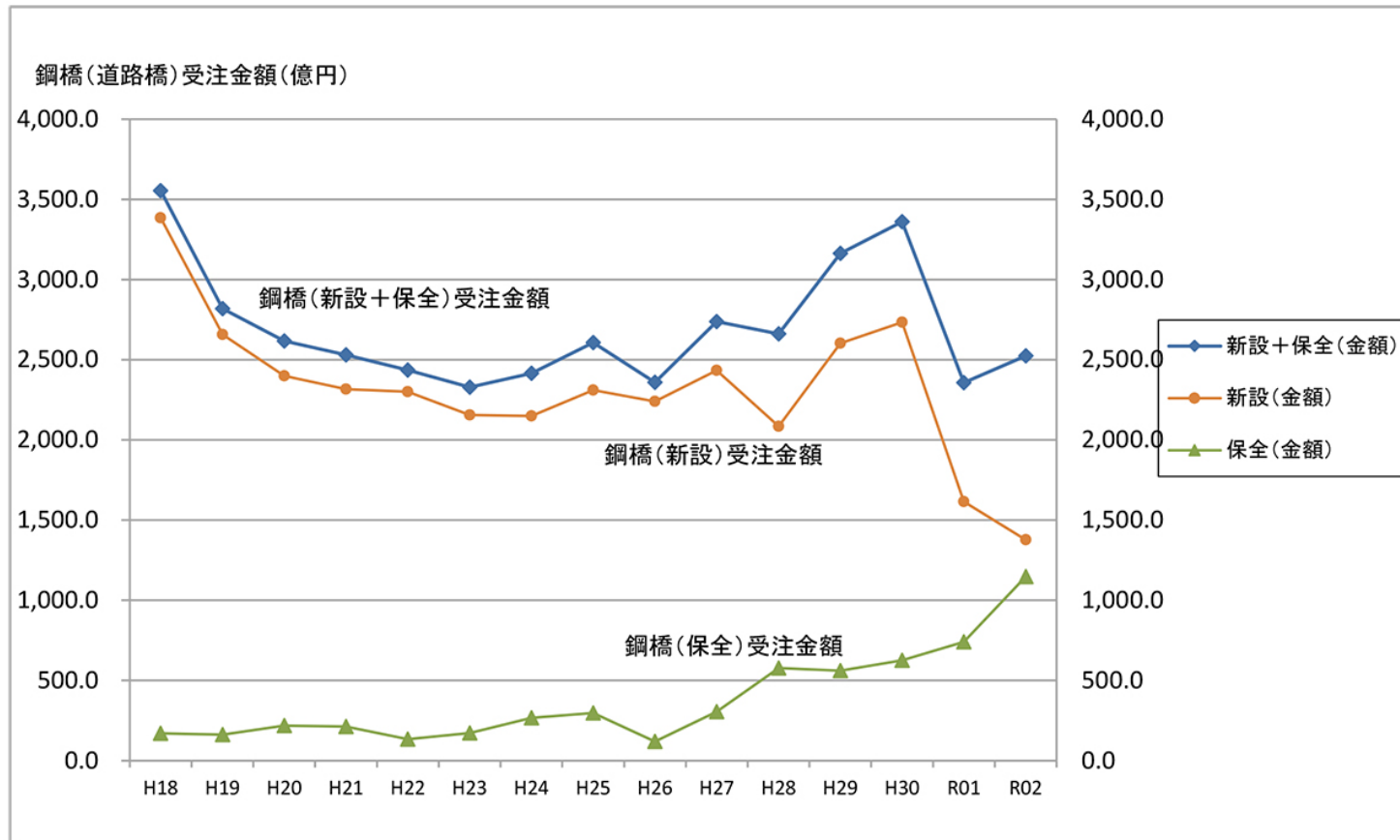
※国土交通省調べ(平成24年4月1日)現在 建設年度不明橋梁を除く

<https://www.cbr.mlit.go.jp/road/taisaku/situation/situation.html>

■ 老朽橋梁の維持管理, 補修補強の重要性はますます増加.

# 研究の背景

## インフラ構造物(橋梁)の維持管理, 補修補強



日本橋梁建設協会 鋼道路橋受注金額の推移(新設・保全)

<https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/news/17872/>

■ 鋼橋の保全に係わる需要の増加が著しい傾向にある。

# 研究の背景

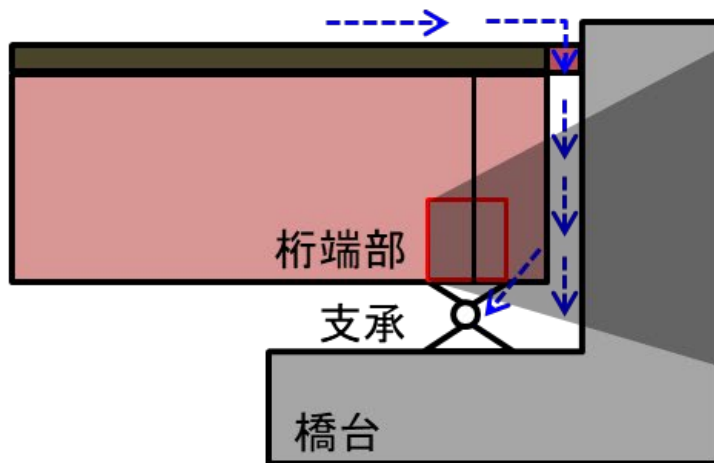
## インフラ構造物(橋梁)の維持管理, 補修補強

鋼橋の損傷, 劣化 : **疲労き裂**, **腐食**による構造部材の断面欠損

土砂や雨水などが堆積, 滞留する狭隘部 : 腐食しやすい環境

伸縮装置の劣化, 損傷

→ 雨水, 土砂, 凍結防止剤の侵入



国土技術政策総合研究所：道路橋の定期点検に関する参考資料（2013年度版）—橋梁損傷事例写真集—, 国総研資料, 第748号, 2013.

# 研究の背景

## インフラ構造物(橋梁)の維持管理, 補修補強

対処

き裂, 減厚部に対する**当て板の接合**(**当て板補修**)

接合方法	長所	短所
高力ボルト	施工管理が容易 安定した強度 多数の施工実績	重量の増加 穿孔作業が必要 耐腐食性が低い
溶接	耐腐食性が高い 穿孔作業が不要 狭隘部での作業性	溶接欠陥 疲労強度 溶接入熱の影響 施工事例が少ない

- 実績の多さから, 高力ボルトが採用されることがほとんど.
- 溶接が適用できれば, 高力ボルトの難点, 短所を克服できる.

※ 損傷部と新規部材の交換, 新規部材の付加も可能

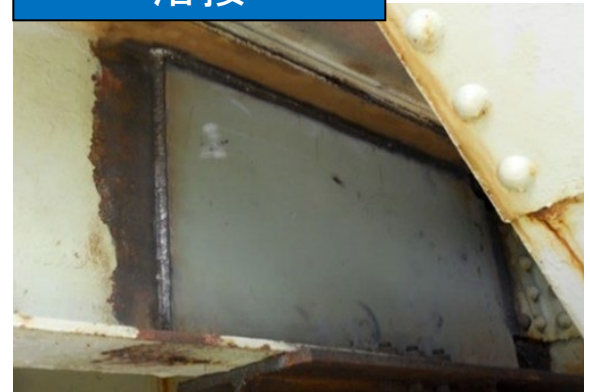
- 適材適所で接合方法を選択することが重要.

高力ボルト



<https://www.shutoko.jp/ss/tech-shutoko/save/cfrp.html>

溶接



<https://xtremefabllc.com/wp-content/uploads/2019/09/gallery-bridges-03.jpg>

## 溶接補修の適用における課題

### 課題1 経年鋼材に対する溶接の可否

- 補修が必要な橋梁は、古い年代に建設されたものが多い（経年橋梁）。
- 橋梁に使用されている鋼材（経年鋼材）は溶接の適用が想定されていない。  
⇒ **経年鋼材に対し、健全な溶接継手が得られるか？**

### 課題2 荷重・拘束作用下における溶接の可否

- 供用中の橋梁補修では、活荷重や拘束が作用する。  
⇒ **荷重や拘束が作用する状態で溶接が可能か？**

# 研究の目的

## 研究目的

**鋼構造物の機能強化と長寿命化のための  
溶接補修技術の構築**

## 研究項目

- (1) 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件
- (2) 荷重および拘束下における鋼構造部材の力学挙動に及ぼす溶接入熱の影響

# 研究の目的

## 研究目的

鋼構造物の機能強化と長寿命化のための  
溶接補修技術の構築

## 研究項目

(1) 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

- 経年鋼材サンプルの収集
- 溶接可否の評価
- 熱処理による材質改善

2024年度実施内容  
(本日の報告)

(2) 荷重および拘束下における鋼構造部材の力学挙動に及ぼす溶接入熱の影響

## 経年鋼材サンプルの収集

<https://web.pref.hyogo.lg.jp/ks05/soranoeki.html>



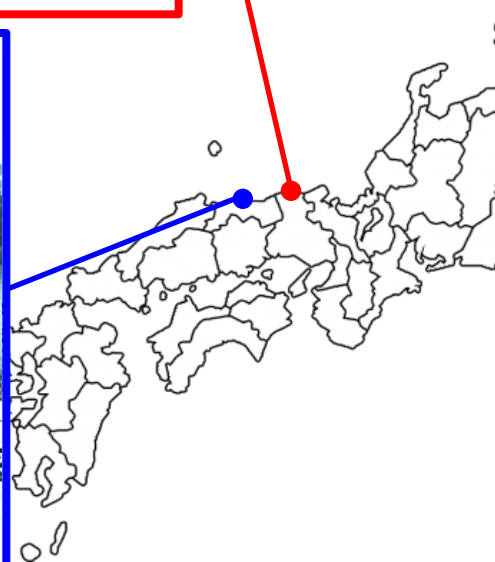
**C橋（1912年建設）**



<http://library.jsce.or.jp/jselib/committee/2003/bridge/Photo/G7-019-1.jpg>



**B橋（1931年建設）**



**A橋（1953年建設）**

# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 機械的性質および化学組成

### 機械的性質

鋼材	橋梁 建設年	板厚 (mm)	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)
A	1953	10	261	423	35	65
B	1931	10	326	446	30	58
C	1912	10	288	430	32	63

### 化学組成

鋼材	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
A	0.097	0.02	0.40	0.012	0.021	0.21	0.091	0.048	0.006	<0.002	<0.0001
B	0.080	0.01	0.44	0.016	0.014	0.11	0.028	0.014	<0.005	<0.002	<0.0001
C	0.092	0.01	0.46	0.016	0.035	0.071	0.039	0.024	<0.005	<0.002	<0.0001

## 溶接施工性評価

### 炭素等量

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 + 5B \leq 0.44$$

### 溶接割れ感受性組成

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \leq 0.24$$

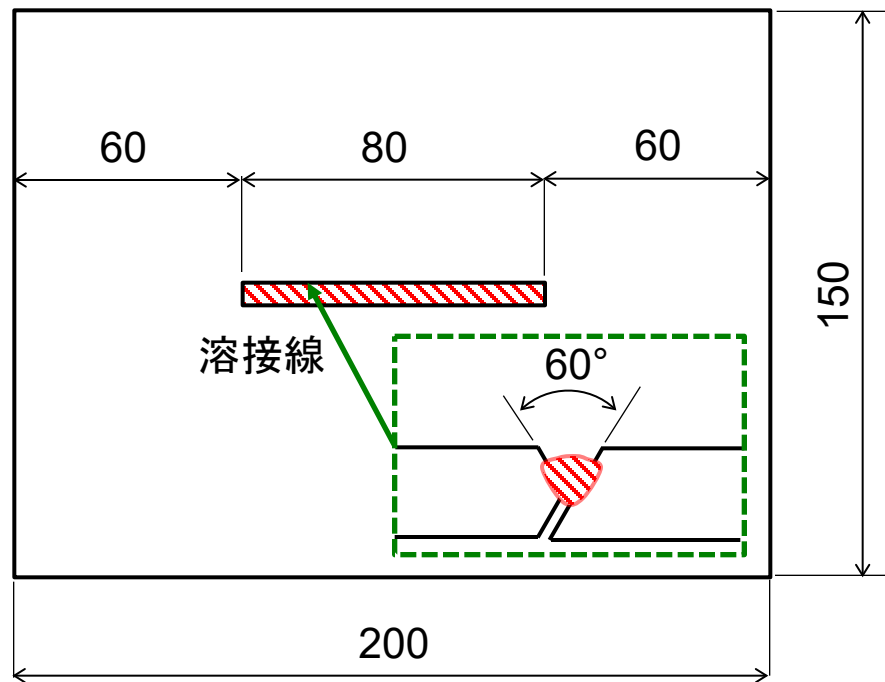
鋼材	$C_{eq}$	$P_{cm}$
A	0.18	0.13
B	0.16	0.11
C	0.18	0.12

⇒ 化学組成の観点からは、  
溶接は可能

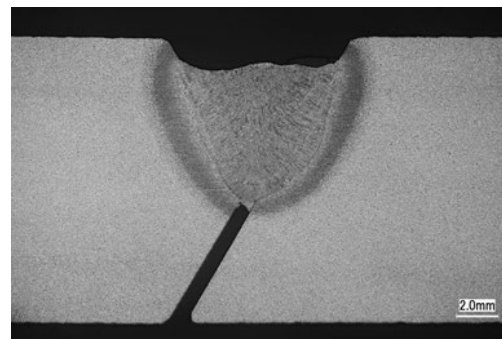
## 溶接施工性評価

### y形溶接割れ試験

JIS Z 3158



鋼材	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/s)	入熱量 (J/mm)
A	218	26.1	7.1	801
B	213	26.0	7.2	769
C	216	26.1	6.7	841

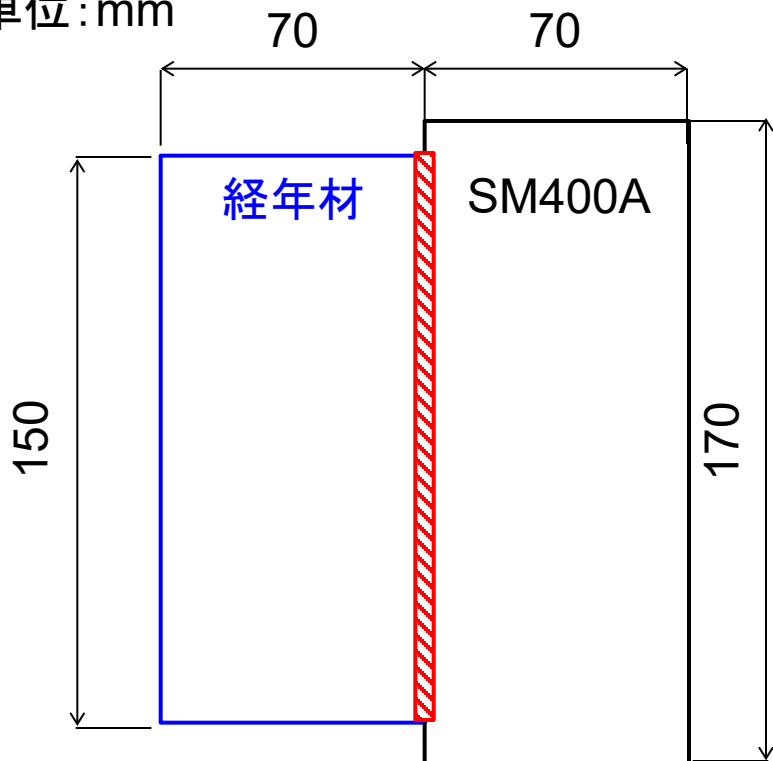


■ いずれの鋼材においても溶接割れは確認されなかった。

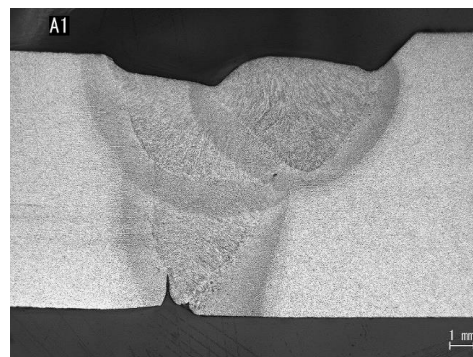
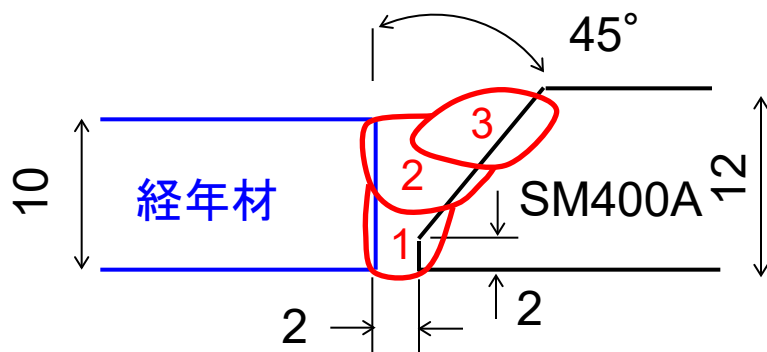
# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 溶接継手の作製

単位:mm



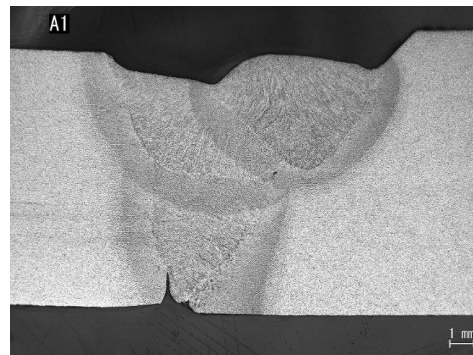
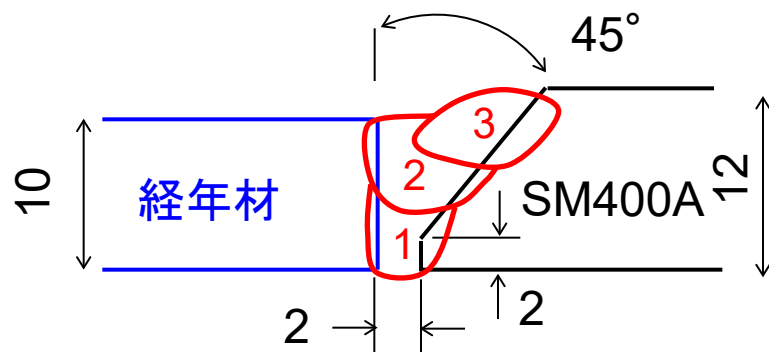
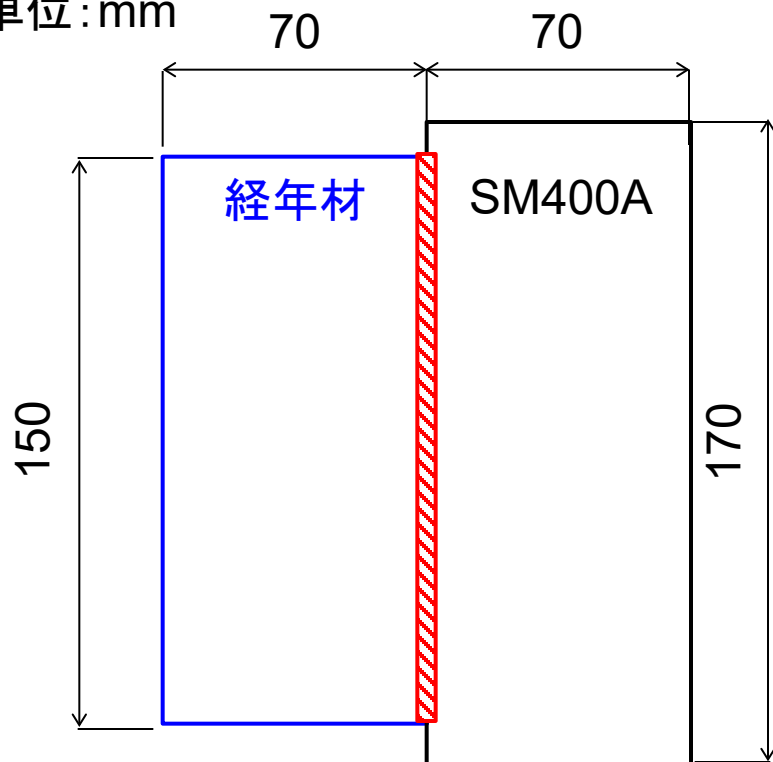
パス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/s)	入熱量 (J/mm)
1	167	20	4.7	711
2	176	20	5.2	677
3	178	20	5.0	712



# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 溶接継手の作製

単位:mm



## 熱処理実験

- 溶接性, 機械的性質: 問題なし.
- 変形性能, 靱性: 現在の鋼材よりも劣る可能性がある<sup>[1, 2]</sup>.

⇒ **熱処理**による材質改善を検討

名称	方法	効果
焼入れ Quenching	A <sub>1</sub> ~A <sub>3</sub> 変態点(720~900°C)の加熱から急冷	高強度化するが, 硬化, 脆化する.
焼戻し Tempering	焼入れ後の鋼を400~600°C加熱から急冷.	組織安定化, 細粒化.
焼ならし Normalizing	A <sub>3</sub> 変態点(約900°C)以上の加熱から空冷.	組織微細化, 強度, 延性向上.
焼なまし Annealing	約600°Cから徐冷.	組織再結晶化, 不純物, 偏析の除去. 軟化, 残留応力緩和

[1] 廣畑幹人: 経年橋梁に使用された鋼材の材料特性および溶接性に関する基礎的検討, 鉄と鋼, Vo1. 103, No. 11, pp.629-635, 2017.11.

[2] H. Matsunawa, H. Mitamura, T. Hayashikawa, M. Hirohata, Y.-C. Kim: Mechanical Properties and Toughness Evaluation of Overaged Steel Used in Cold Region, Proceedings of the 8th Korea-Japan Joint Seminar on Bridge Management, Seoul, Korea, pp.22-27, 2011.10.

# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 熱源



- 複雑な形状に適合可能. 高精度, 自動温度管理  
⇒ 各種実構造物への適用可能性を検討<sup>[3-6]</sup>

[3] 廣畑幹人, 伊藤義人: 簡易熱源を用いた熱処理によるすみ肉まわし溶接継手の残留応力緩和に関する研究, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.2, pp.208-220, 2015.7.

[4] 廣畑幹人, 伊藤義人: トラフリブ溶接部の残留応力緩和に対する簡易熱源による熱処理の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1168-1179, 2016.3.

[5] 森博啓, 廣畑幹人: 溶接後熱処理による熱履歴が鋼部材の応力緩和および変形挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.73, No.2, pp.1679-1690, 2018.1.

[6] 中原智法, 廣畑幹人, 豊嶋大輝, 小西日出幸: 鋼橋高力ボルト継手部に対する加熱装置による塗膜剥離の適用性検証, 鋼構造論文集, 第28巻第111号, pp.51-61, 2021.9

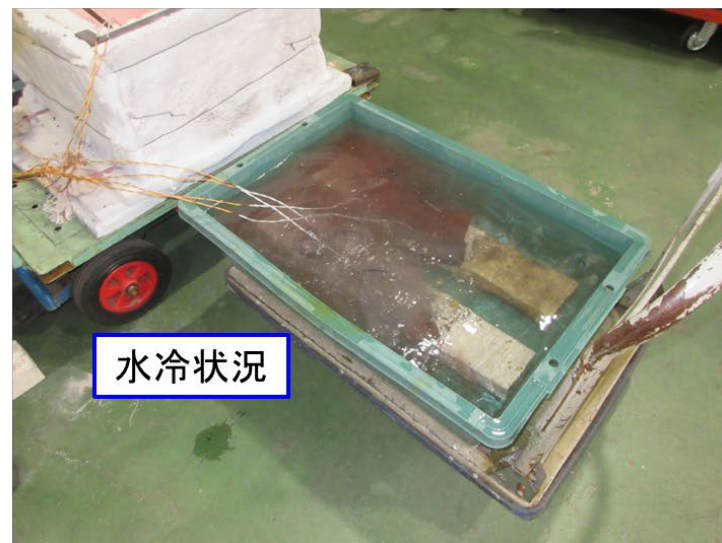
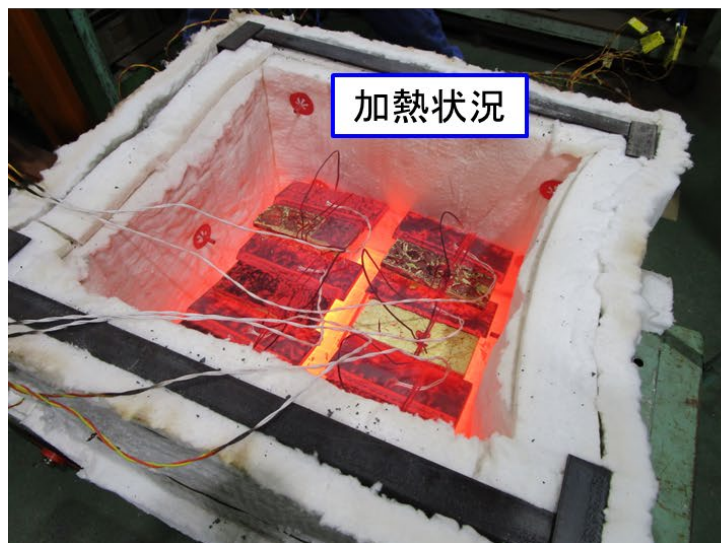
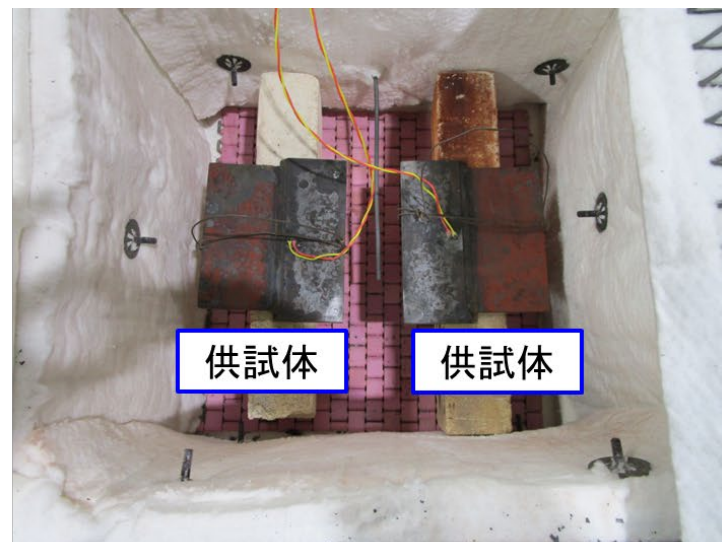
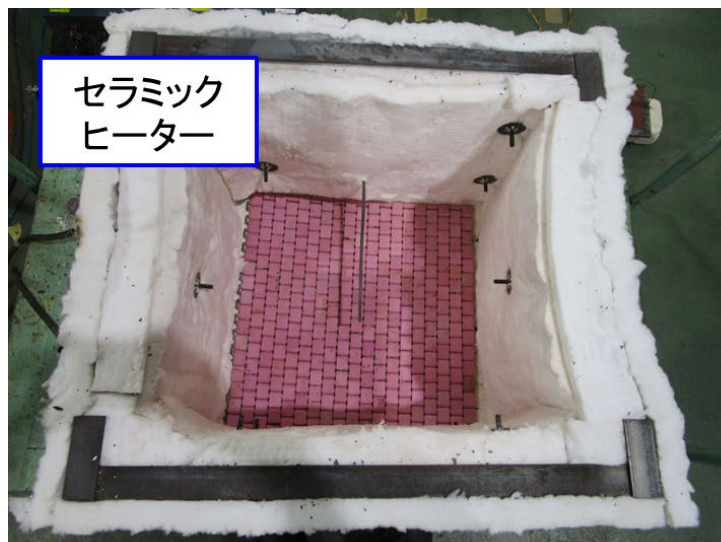
# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 熱処理条件

記号	条件	内容
AW	溶接まま	—
QT-H	焼入れ＋高温焼戻し	850℃で1時間保持後，水冷 650℃で1時間保持後，空冷
QT-L	焼入れ＋低温焼戻し	850℃で1時間保持後，水冷 200℃で2時間保持後，空冷
NORM	焼ならし	925℃で1時間保持後，空冷
ANNEAL	焼なまし	600℃で1時間保持後，徐冷

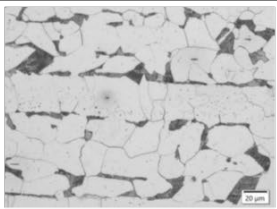

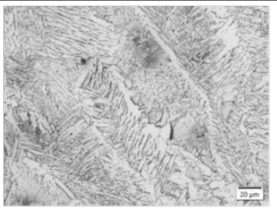
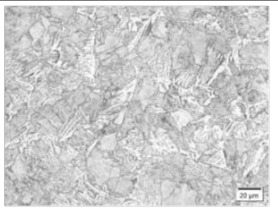
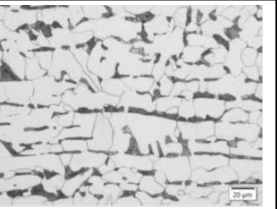
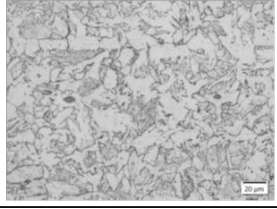
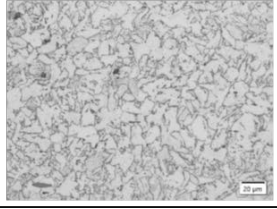
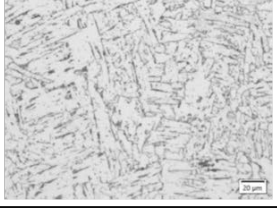
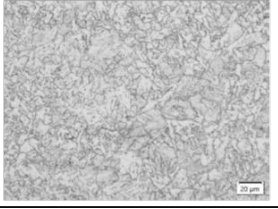
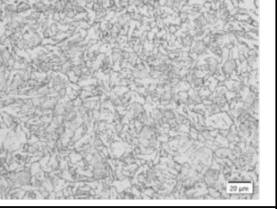
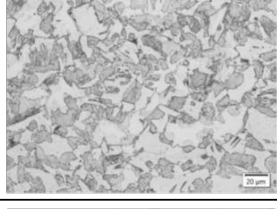
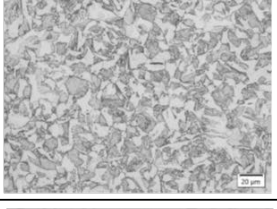
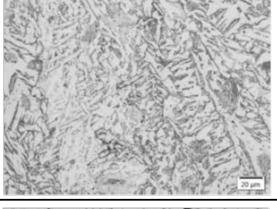
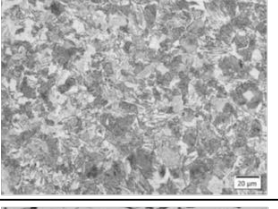
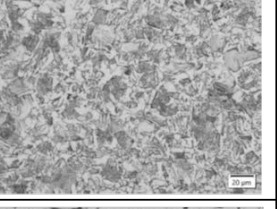
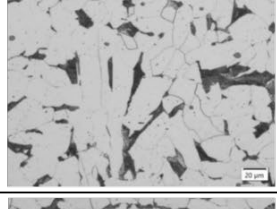
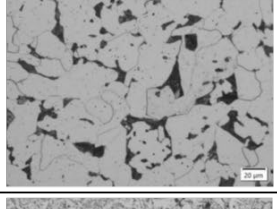
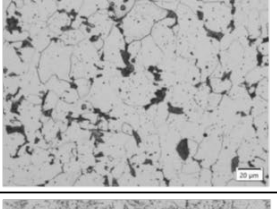
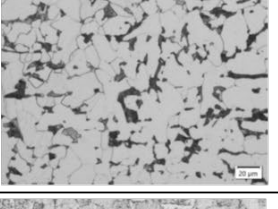
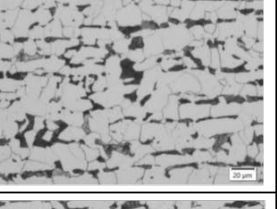
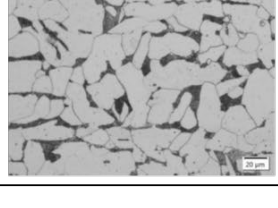
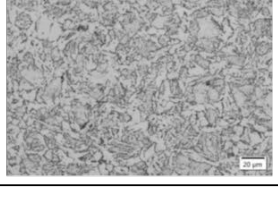
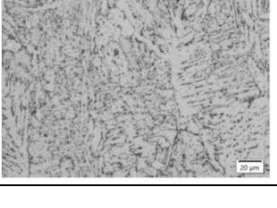
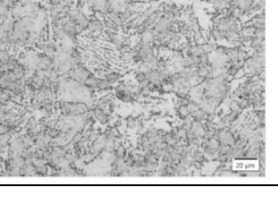
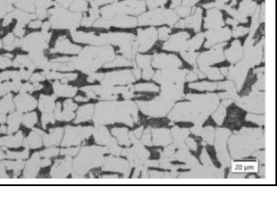
# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## 熱処理状況



# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

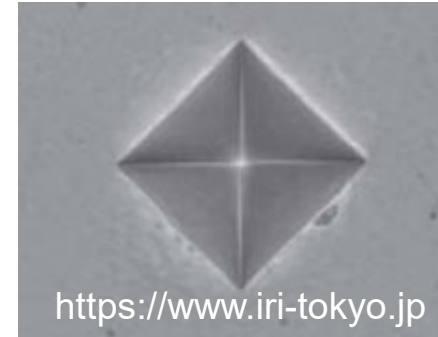
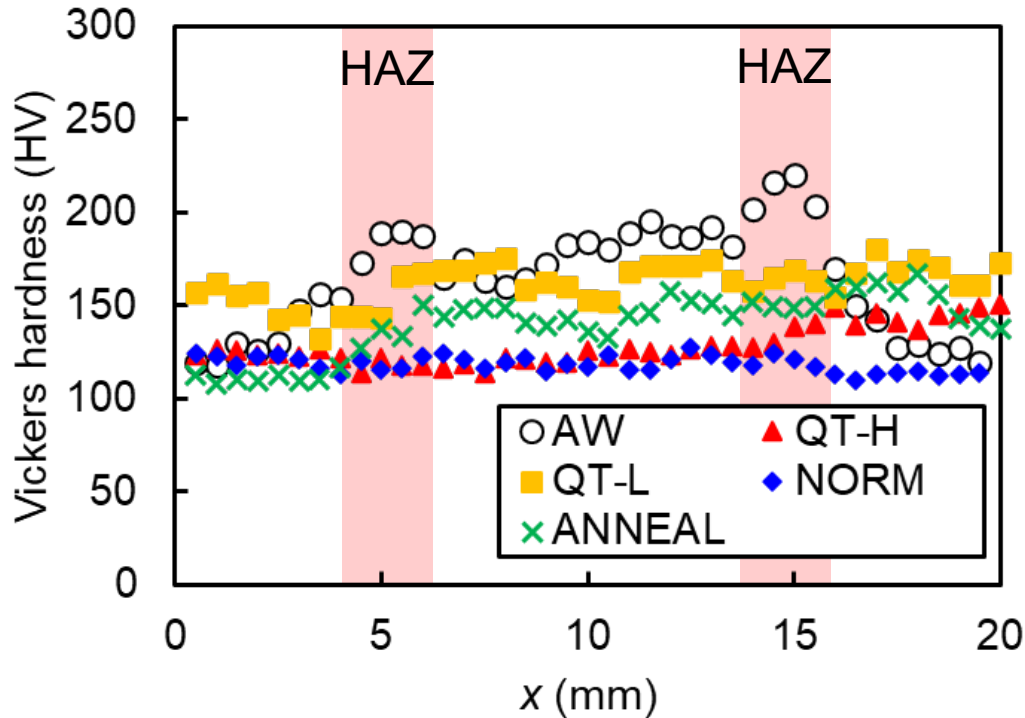
## 金属組織

x 400 □: 20μm	経年材		Depo	SM400A	
	BM	HAZ		HAZ	BM
AW					
QT-H					
QT-L					
NORM					
ANNEAL					

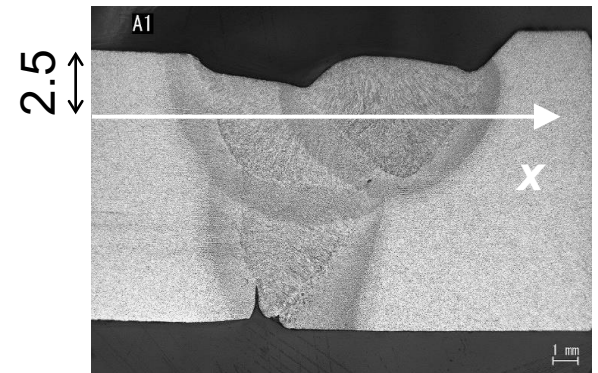
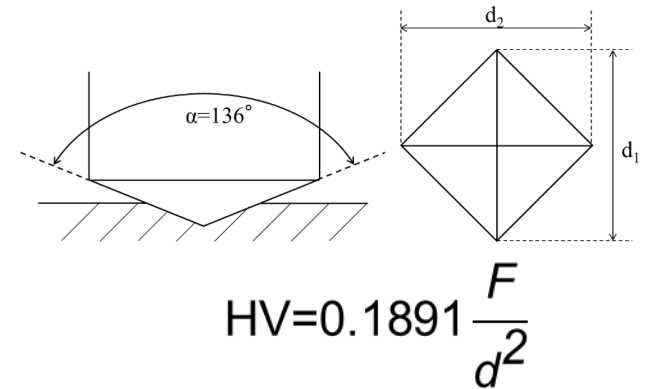
# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## ビッカース硬さ試験

- 試験片にダイヤモンド製の圧子を一定の力で押し込み，試験片に生じる圧痕の対角線の長さから硬さを測定する。
- 金属組織の変状，強度の変化を推定することが可能。



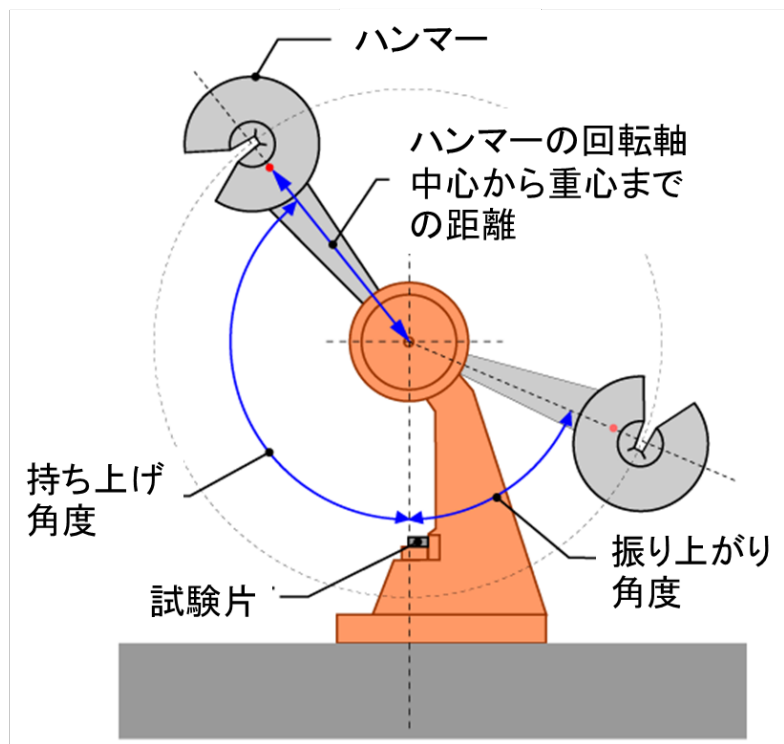
<https://www.iri-tokyo.jp>



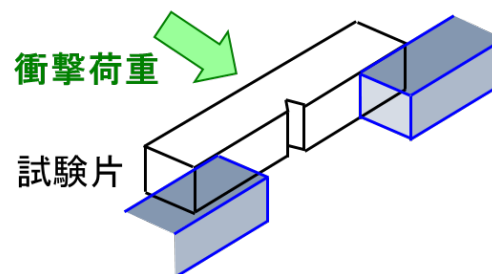
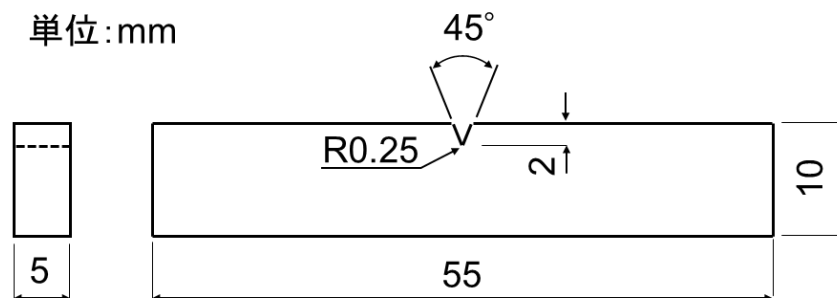
- 熱処理による軟化，均質化の効果が確認できた。

## シャルピー衝撃試験

- 衝撃的な荷重により鋼材を破壊させるのに要するエネルギー（吸収エネルギー）を求める。



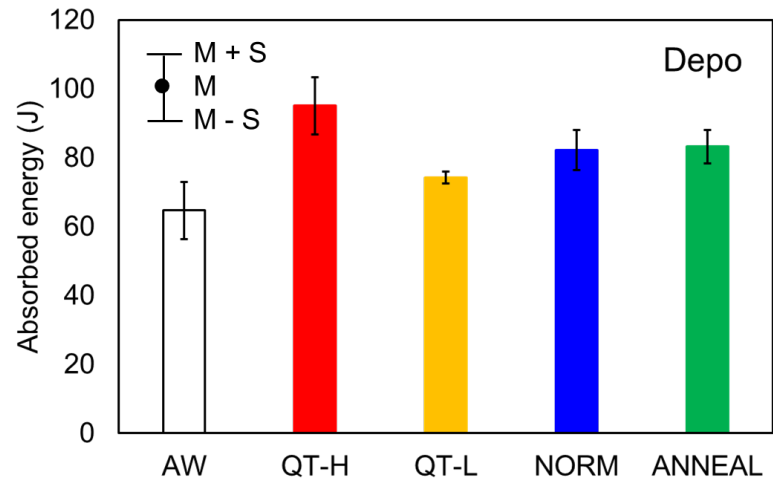
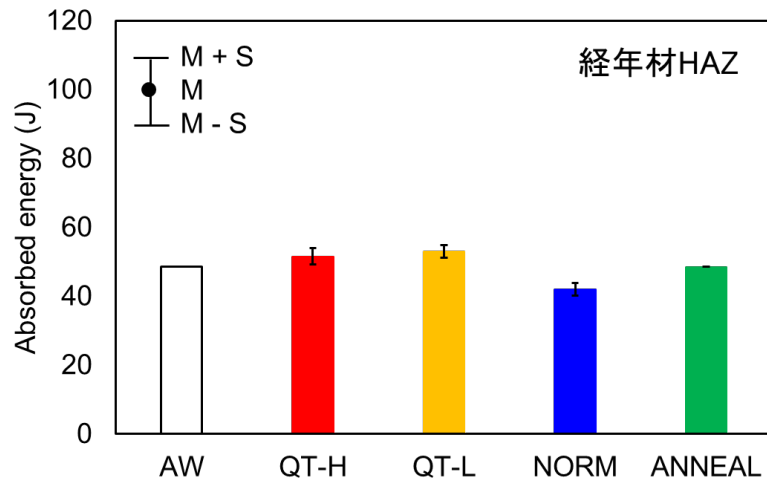
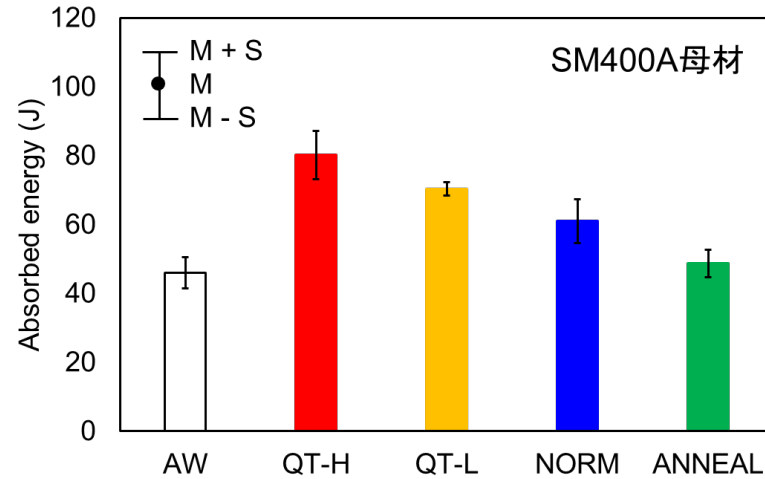
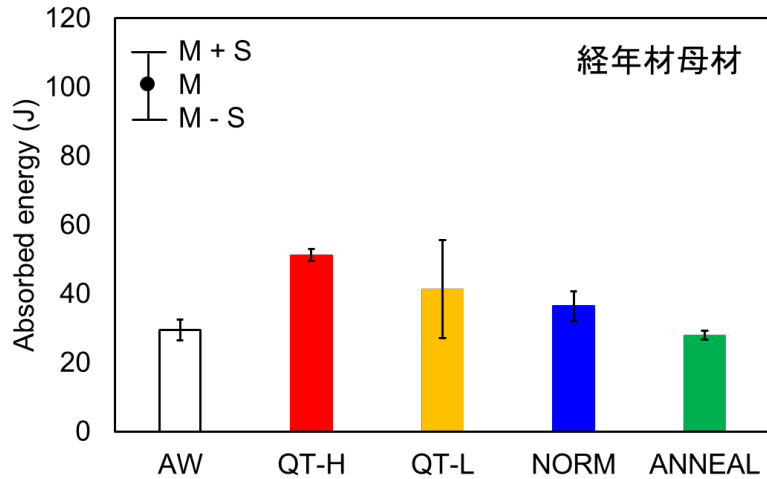
単位:mm



# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## シャルピー衝撃試験

※試験温度: 0°C



- 焼入れ＋高温焼戻しにより靱性が向上する可能性を結果は示唆している。  
(金属組織, 硬さの傾向とも整合. 組織の安定化, 細粒化)

# 経年鋼材およびその溶接補修部の材質改善のための熱処理条件

## まとめ

- (1) 建設年代の古い橋梁から3種類の経年鋼材サンプルを採取し、その化学成分と機械的性質を調査し、溶接が可能であることを確認した。
- (2) 上記のうち1種類の経年鋼材について熱処理による靱性改善効果を確認した。試験温度0°Cで実施したシャルピー衝撃試験の範囲では、焼入れ＋高温焼戻しの熱処理により、経年材の母材、熱影響部および溶接金属の吸収エネルギーが溶接ままの状態に比べ高くなる結果を得た。

## 今後の予定

- 残りの経年鋼材についても靱性改善効果が得られるかどうかを検証する。
- 実構造物への溶接補修の適用を念頭に、経年鋼材に対して振動作用下の溶接施工実験を行う。実験結果に基づき、実施工における溶接補修の適用条件を明確にする。

# 荷重および拘束下における鋼構造部材の力学挙動に及ぼす溶接入熱の影響

## 今後の予定

- 実構造物への溶接補修の適用を念頭に、経年鋼材に対して振動作用下の溶接施工実験を行う。実験結果に基づき、実施工における溶接補修の適用条件を明確にする。

