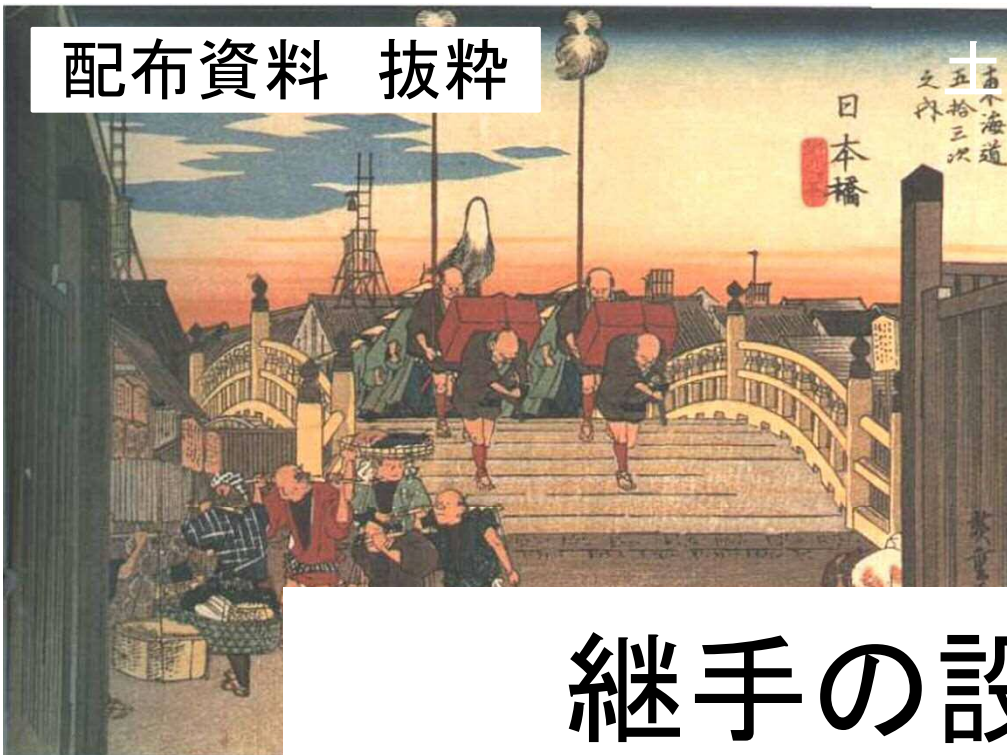


継手の設計とその耐久性について

山田 健太郎

名古屋大学名誉教授

中日本ハイウェイ・エンジニアリング(株)顧問



継手の設計と その耐久性について



山田健太郎

名古屋大学 名誉教授

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 顧問



設計（形を決める）



全体の構造（デザイン） ⇒ 耐荷力
細部構造（ディテール） ⇒ 強度、耐久性



名港中央、西大橋 | 名港東大橋の主塔より 2013

目次

1. はじめに

歴史的な継手 木の継手、ピン

2. 鋼構造物の継手の種類

リベット、ボルト、溶接、現場溶接

継手の終局限界状態(実験)

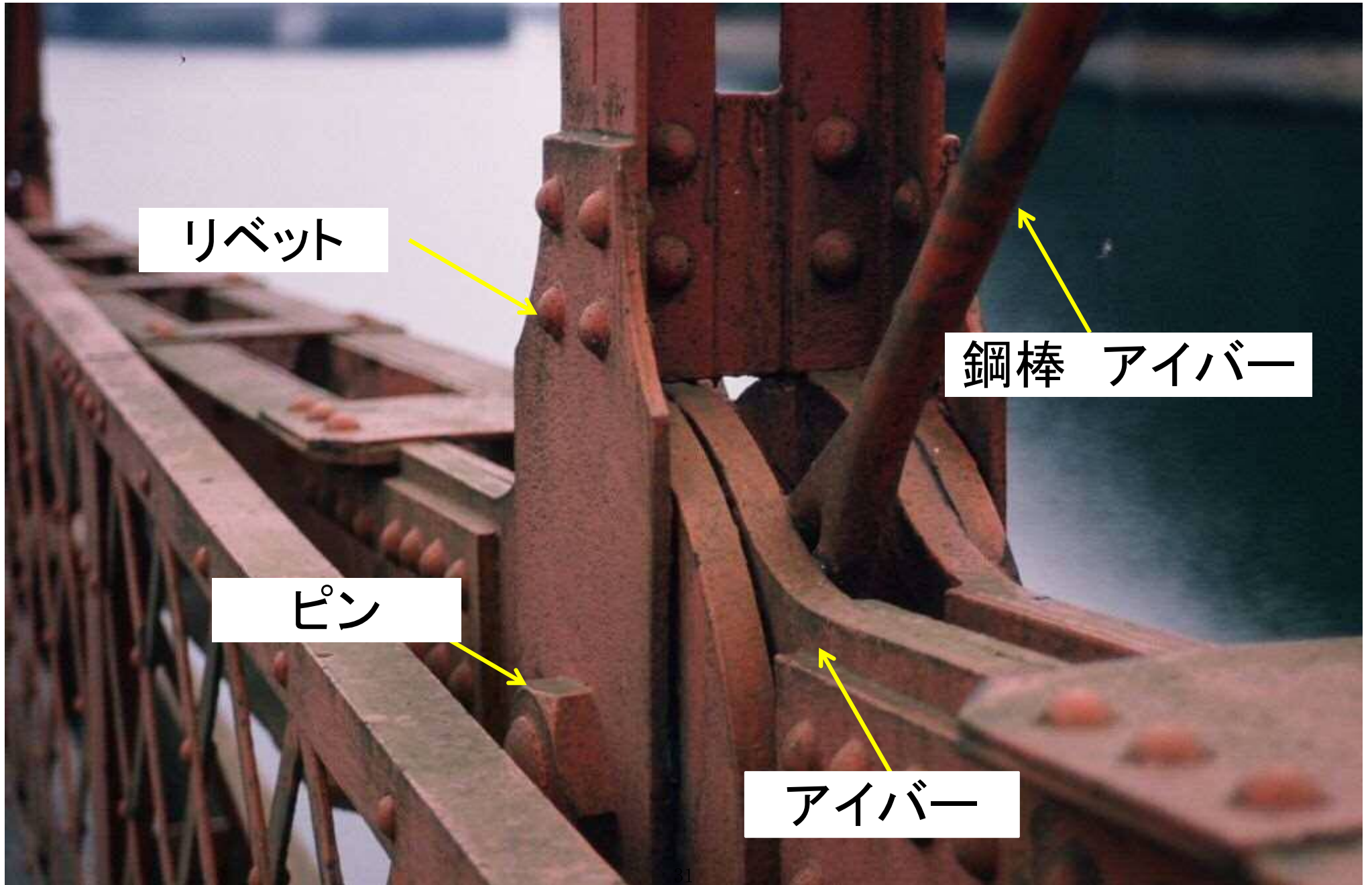
3. 現場溶接継手

厚板の溶接、スイスの事例

4. 耐久性の観点から見た継手

溶接継手の疲労耐久性の照査

継手 リベット、アイバー、ピン



継手の設計と製作

鋼構造物では、基本的に継手部では壊れないように設計する。

壊れないように設計するために、壊れるメカニズムを検討し、設計式に反映させる。

壊れるメカニズムを検討するために実験を行う。

1. 静的な荷重による試験
2. 繰返し荷重による試験 ≡ 疲労試験

例:リベット継手の例 ⇒ボルト継手の設計に反映

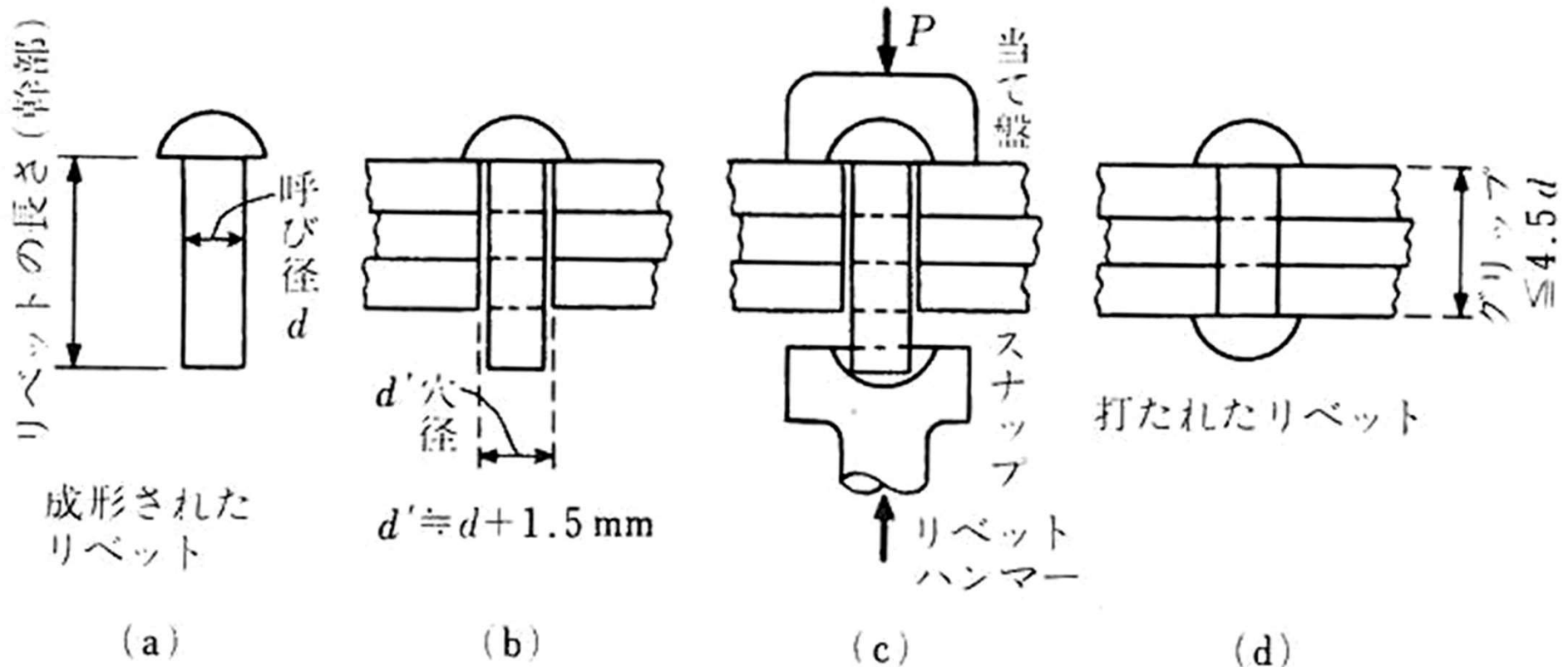
例:溶接継手の疲労の問題

鋼構造物の継手の種類

工場 部材の組立て (板組み)	工場 部材の連結 (組立て)	現場架設 部材の連結 (建設)
リベット (昔)	リベット (昔)	リベット (昔) ピン
溶接	溶接	リベット (昔)
溶接	溶接	高力ボルト摩擦接合 (高力ボルト支圧接合) 現場溶接

リベット接合 ⇒ボルト継手につながる

- ・赤熱したリベットを孔に挿入し、頭の無い軸部をリベットハンマーで叩いてつぶして頭を形成。
- ・力の伝達はリベット軸部のせん断抵抗と、リベット・材片間の支圧抵抗による。



リベットの現場作業



リベット



赤熱



赤熱されたリベット



リベット締め(騒音)



締められたリベット



餘部鉄橋のリベット

関西大学 石川敏之提供

リベット継手の壊れ方 (終局限界状態)

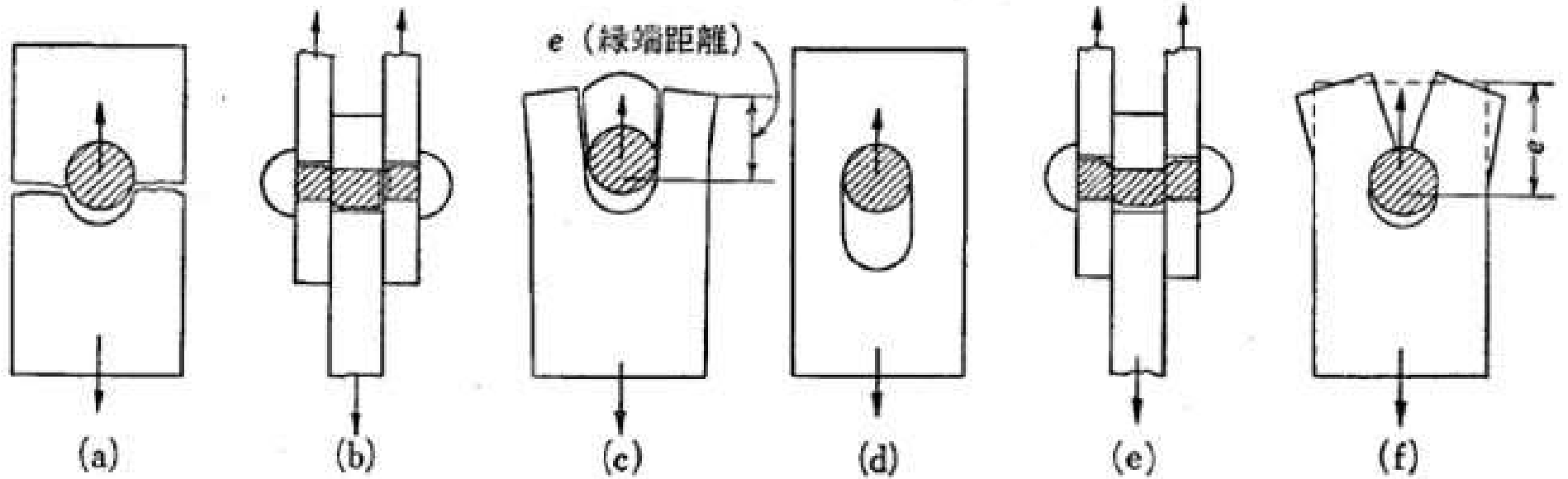


図 6.8 リベット継手の破壊 (e)

- (a) 断面の引張
- (b) リベットのせん断
- (c) 板のはしめけせん断
- (d) リベットの支圧
- (e) 板の支圧
- (f) 板の端部引張

板の縁端距離eを確保

高力ボルト摩擦接合の設計にも反映されている

小西一郎編 鋼橋より

リベット接合の荷重変形曲線

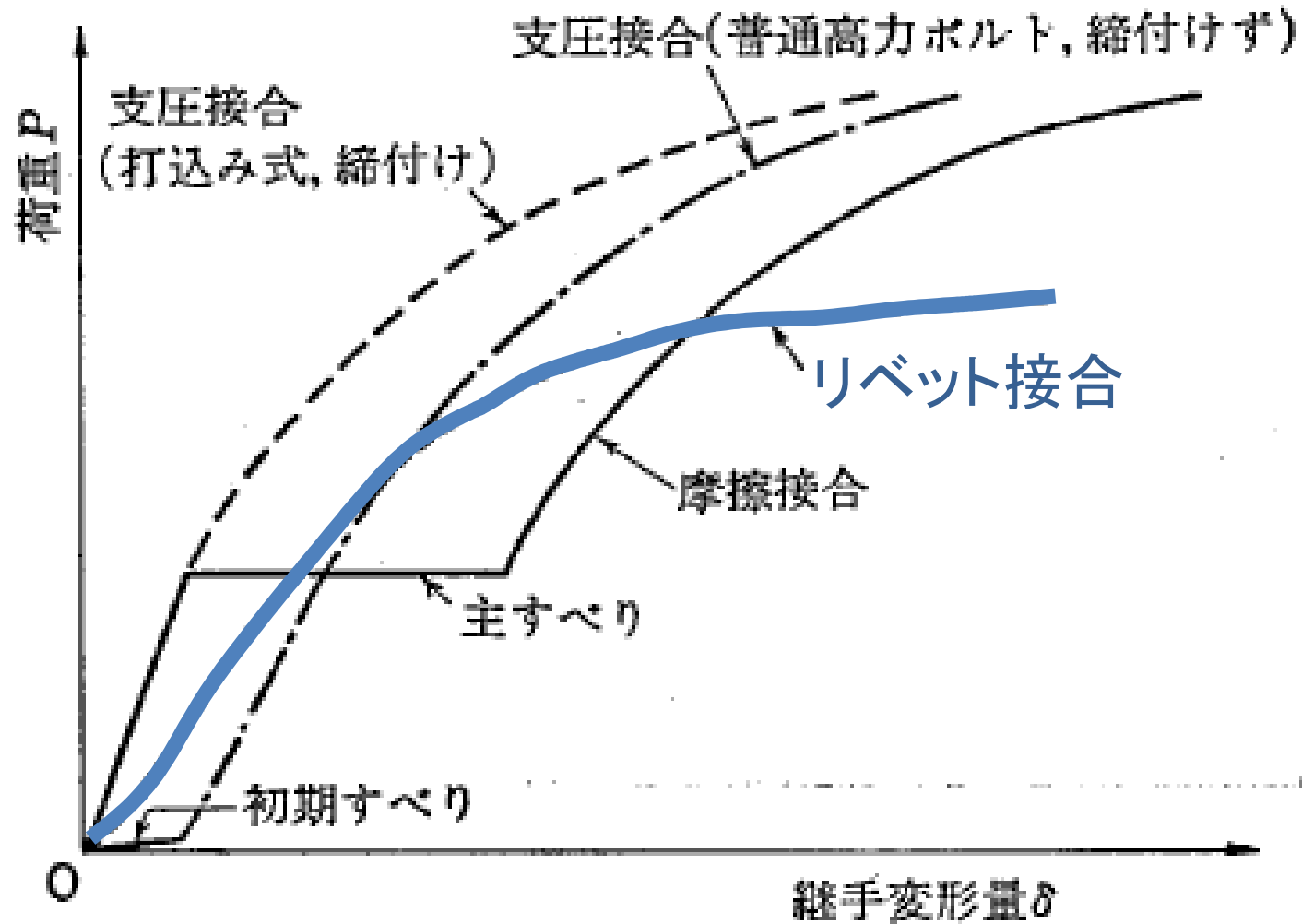


図 6.18 各種継手の荷重-変形曲線の比較

小西一郎編 鋼橋より

高力ボルト継手 (摩擦、支圧、引張)

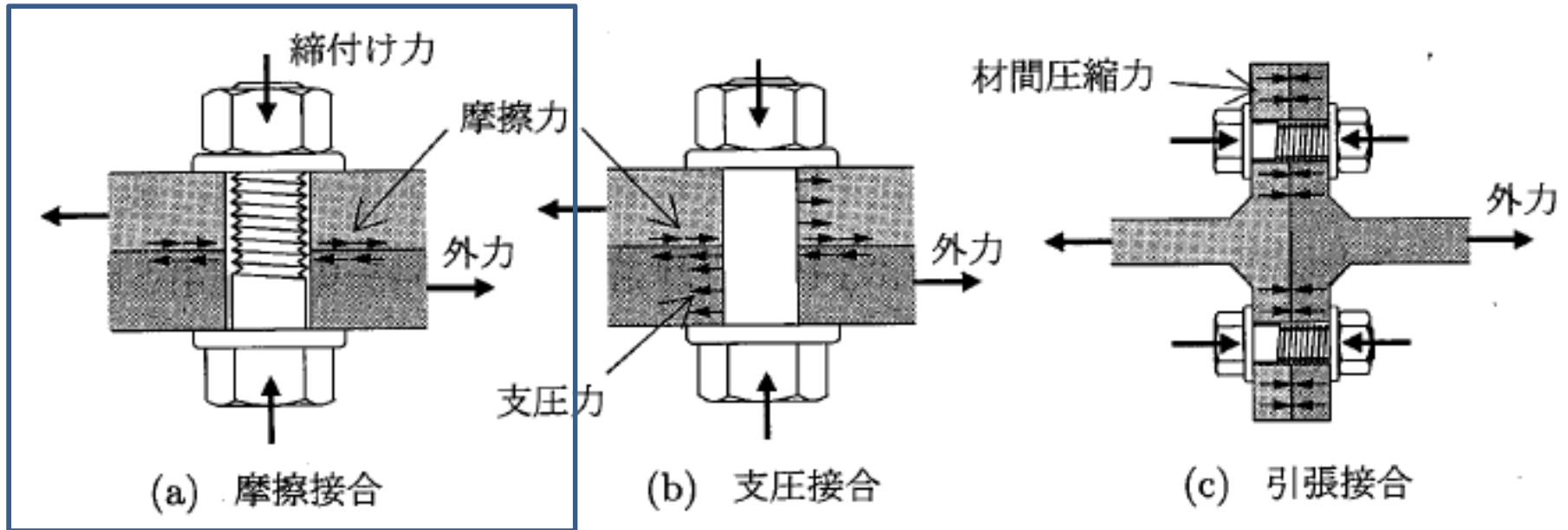


図 10.2 高力ボルト継手の力の伝達メカニズム

締付け力の制御

六角ボルト



トルク法
ナット回転法

トルシア型
高力ボルト



ピンの切断

高力ボルト摩擦接合

主すべり (すべり係数: μ)

接触面を塗装しない場合: 0.40

接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装: 0.45

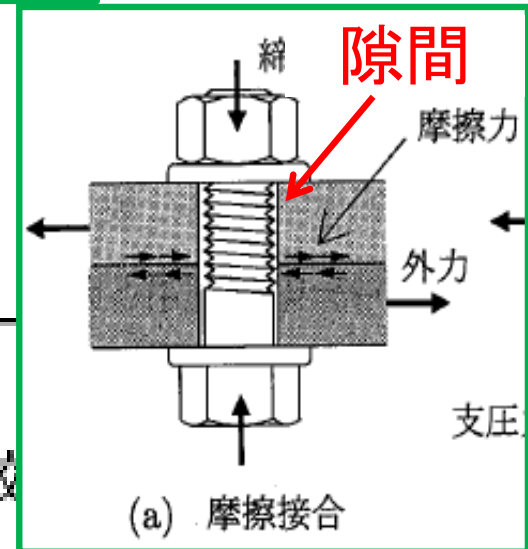
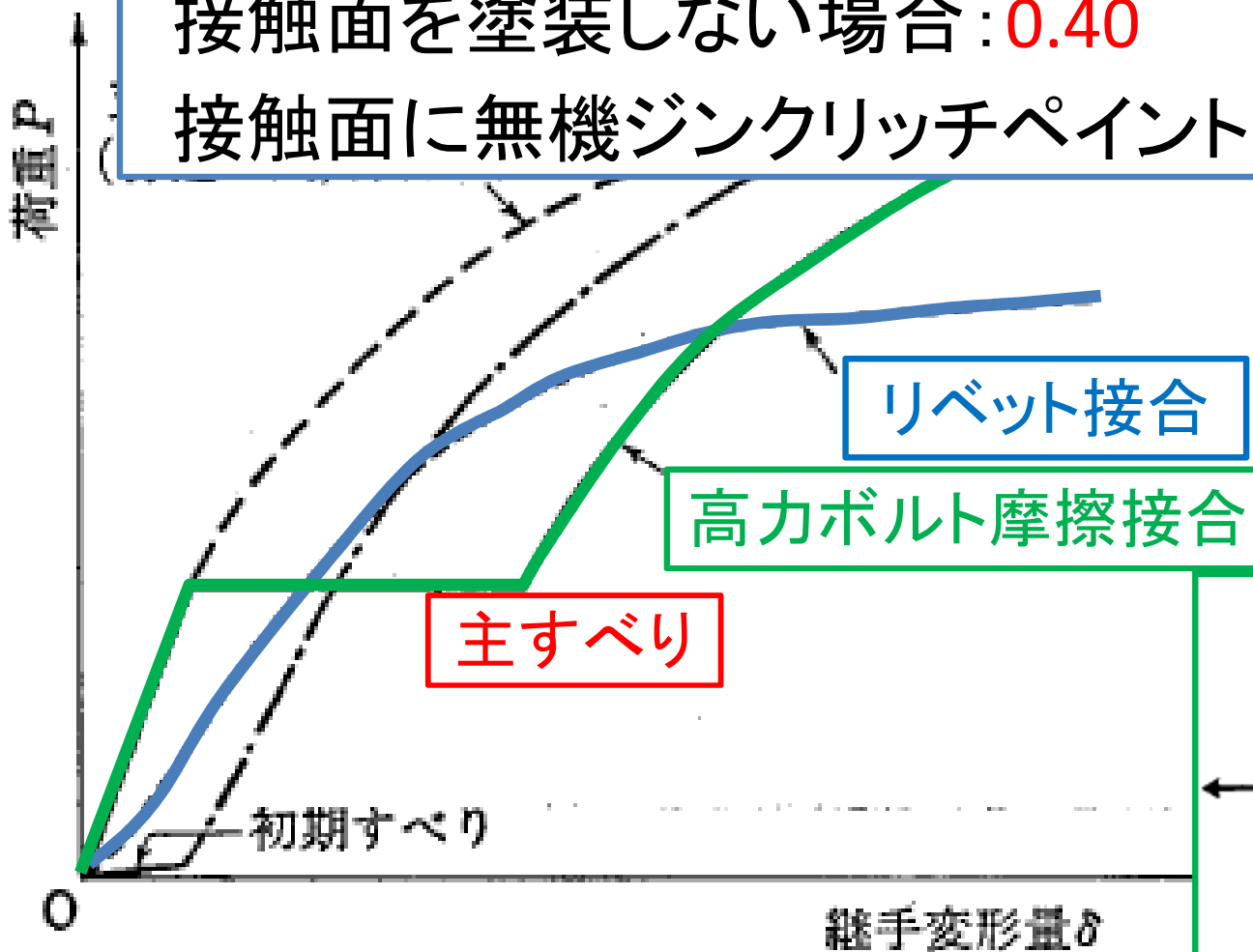


図 6.18 各種継手の荷重-変形曲線の比較

高力ボルト摩擦接合の設計法

摩擦接合継手の許容伝達力

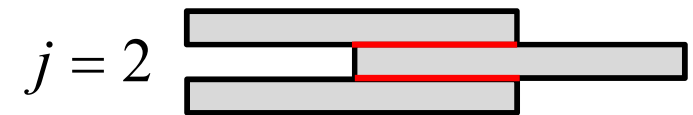
γ : 安全率: 1.7

μ : すべり係数 0.40 0.45

N : 垂直力 (設計ボルト軸力)

j : 摩擦面の数

$$\rho_a = \frac{1}{\gamma} \mu N j$$



設計ボルト軸力

$$N = \alpha \sigma_Y A_e$$

α : 降伏点に対する比率 (F10T:0.75、F8T:0.85)

σ_Y : ボルトの降伏応力

A_e : ボルトの有効断面積

高力ボルト摩擦接合の設計法

摩擦接合継手の設計式

P :作用外力, n :ボルト本数

$$\rho = \frac{P}{n} \leq \rho_a$$

添接板と母材の強度

軸力を受ける場合

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \leq \sigma_a$$

A_i : 圧縮を受ける場合 **総断面**

引張を受ける場合 **純断面**

純断面: ボルト孔(ボルトの呼び径+3mm)を差し引く

ボルト継手の制限と注意

ボルト継手の

最小中心間隔（ボルトが締められる間隔）

M22 75mm

最大中心間隔（ボルト間での板の局部座屈）

p（応力の方向） 12t または150mm

g（応力に直角） 24t 300mm以下

最小縁端距離： M22 切断縁 37（手動ガス）

32（自動ガス）

最大縁端距離：密着性が確保できる寸法

隙間腐食に注意

ボルト継手の防食に注意（塗装の耐久性の問題）

ボルト継手部の腐食



1. 架設時に最後に塗装
素地調整の不備
2. 溶接継手の可能性？
凹凸がなくなる

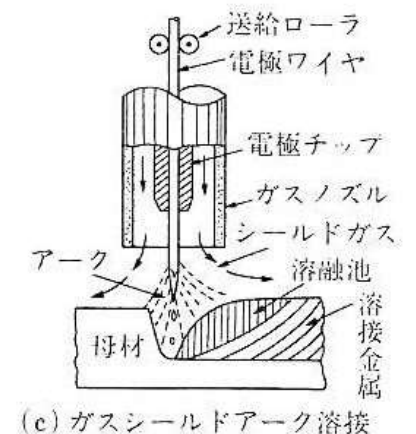
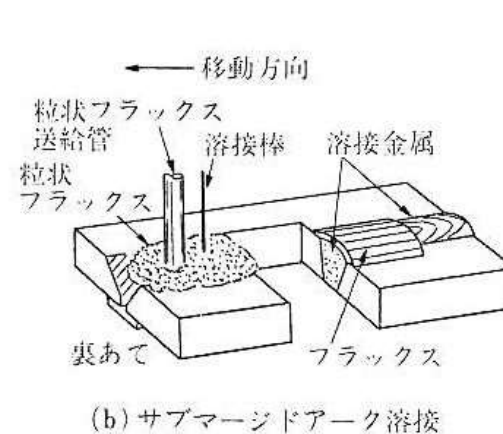
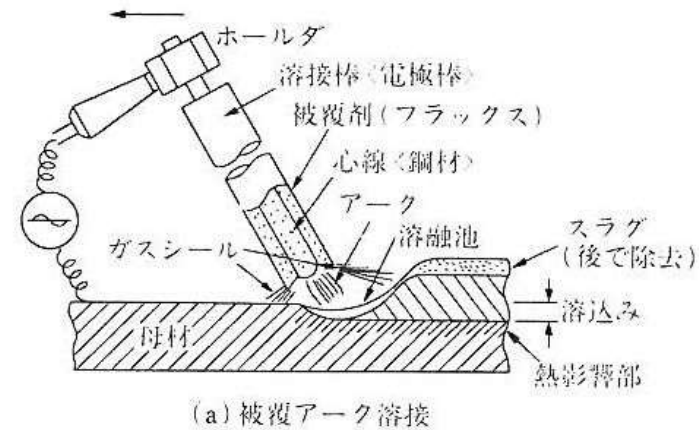


溶接による接合

- ・アークの熱で金属を溶融し、金属材片どうしを直接接合。
- ・孔あけによる断面の損失がない。
- ・細部構造上の制約などが少なくなる。

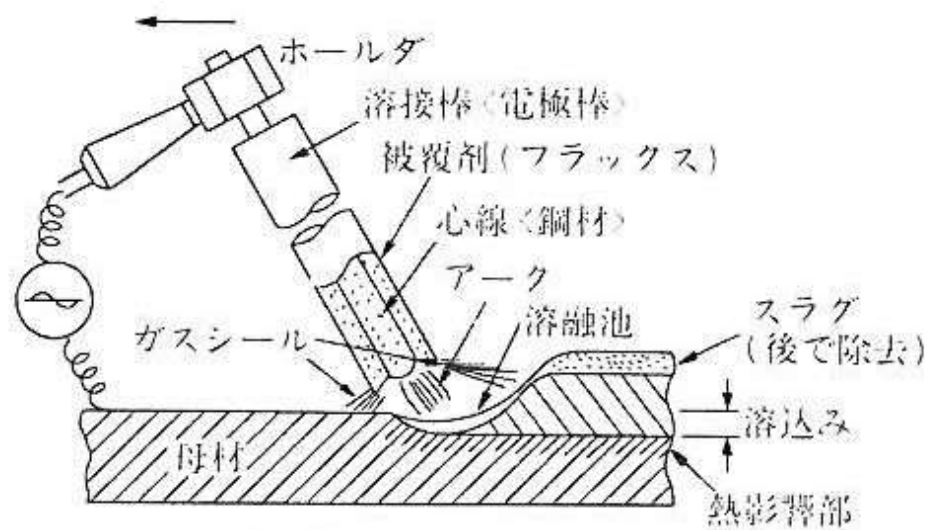
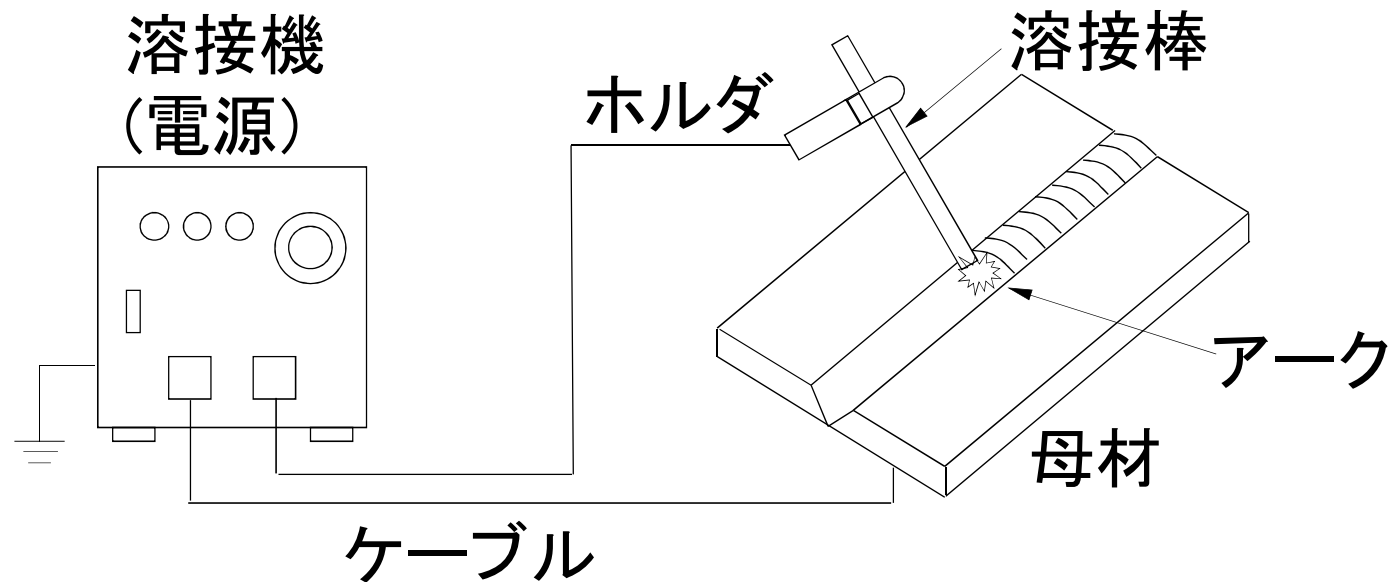
主な溶接法

- (a) 被覆アーク溶接
- (b) サブマージアーク溶接
- (c) ガスシールドアーク溶接
(CO₂溶接)



石川敏之 提供

被覆アーク溶接（手溶接）

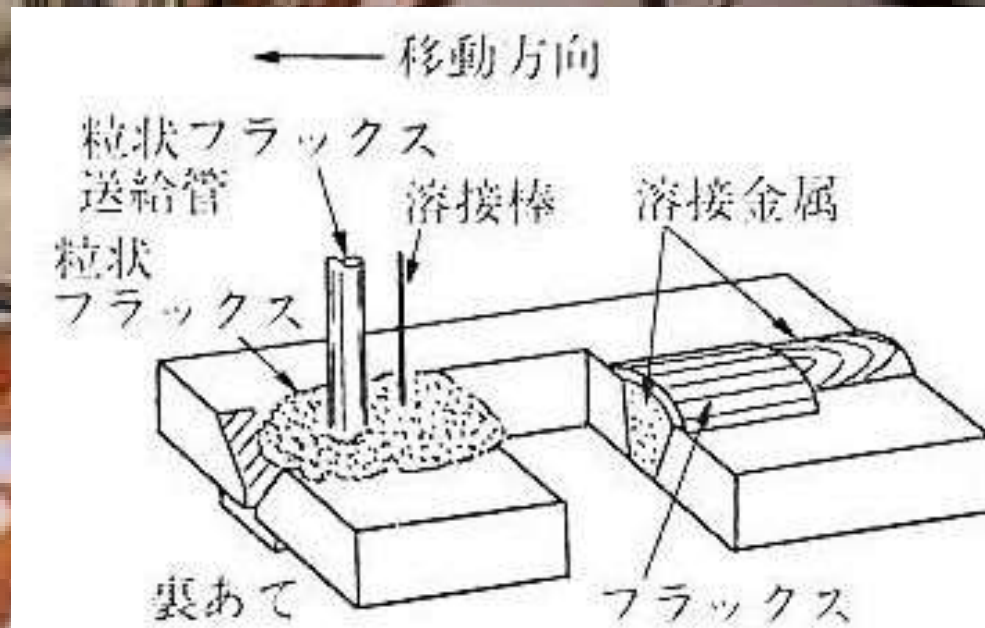


(a) 被覆アーク溶接

館石和雄、石川敏之 提供

サブマージアーク溶接（自動溶接）

鋼床版デッキプレート
の突合せ溶接

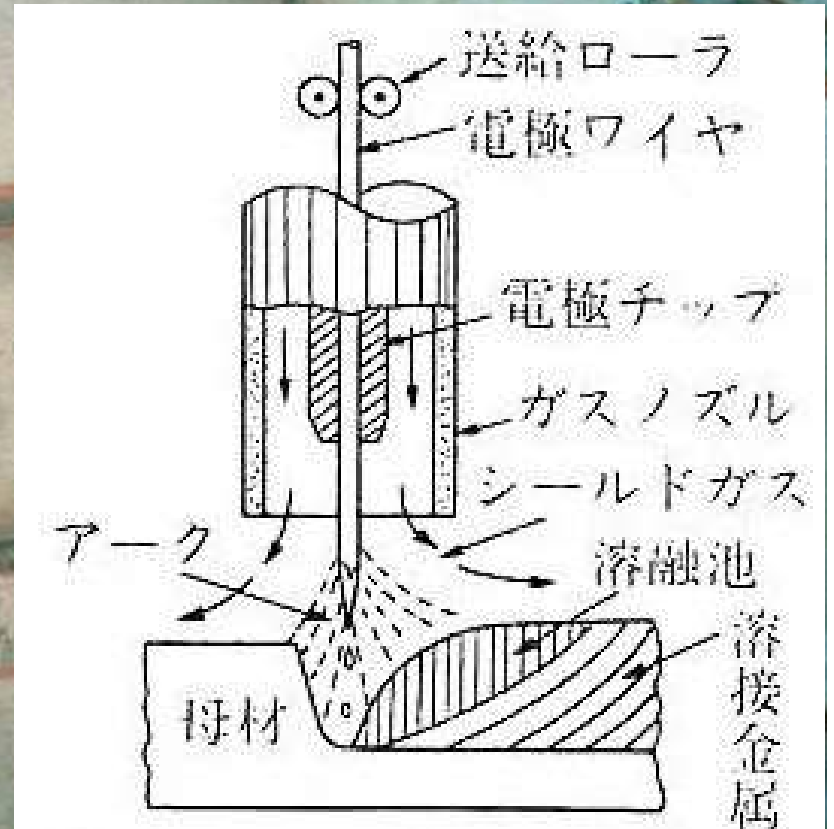


(b) サブマージドアーク溶接

ガスシールドアーク溶接



鋼床版のUリブの現場溶接



(c) ガスシールドアーク溶接

鋼床版のUリブのデッキプレートへの溶接

1

多電極溶接機による自動溶接

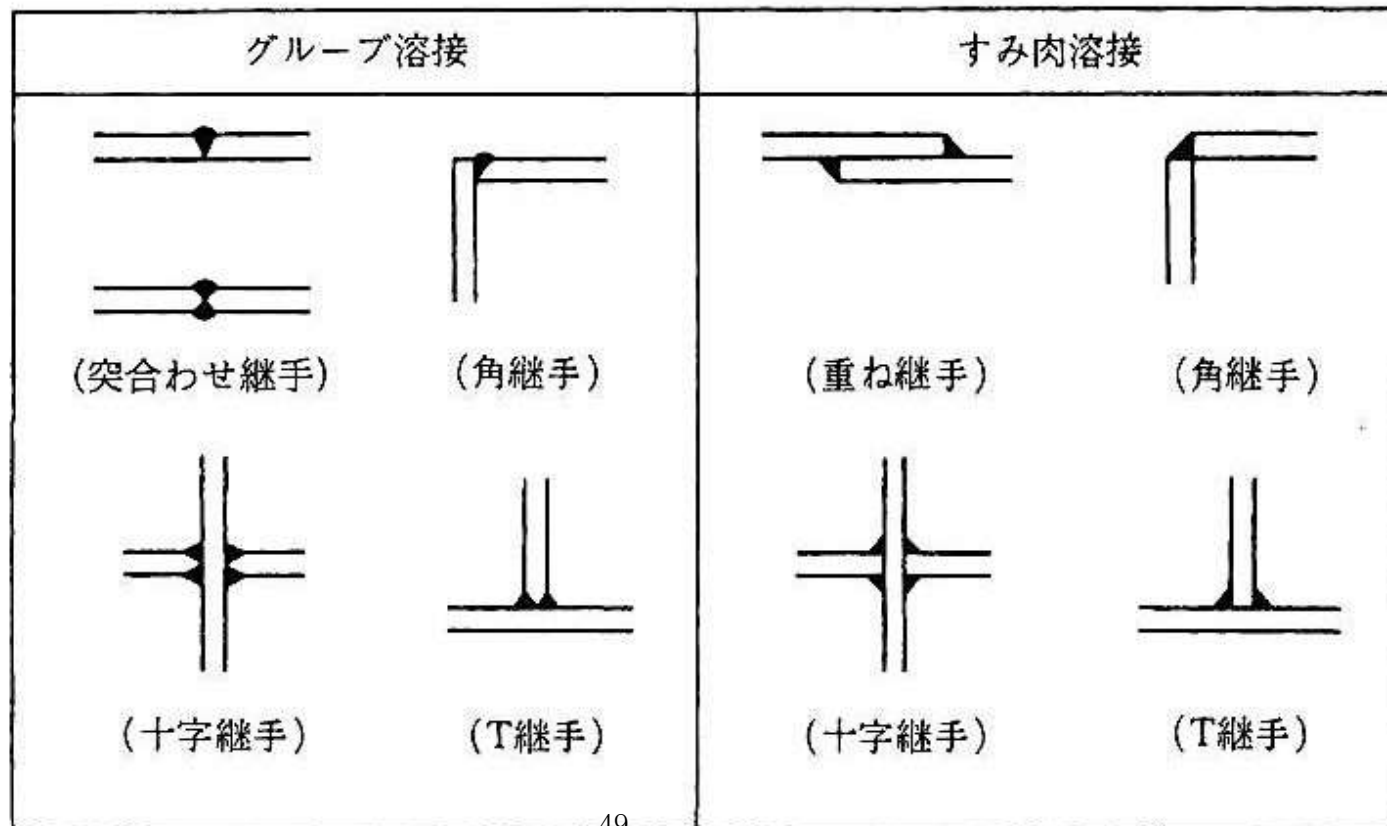
溶接の種類（グループ溶接、すみ肉溶接）

(1) グループ溶接

鋼板の端部をカットして開先を設けて溶接する。

(2) すみ肉溶接

開先を取らずに溶接する。



溶接部の設計

溶接サイズ s (6mm以上), のど厚 a ($s = \sqrt{2}a$), 有効長 l

$$\sqrt{2}t_2 < s < t_1$$

t_2, t_1 : 板厚 ($t_2 \geq t_1$)

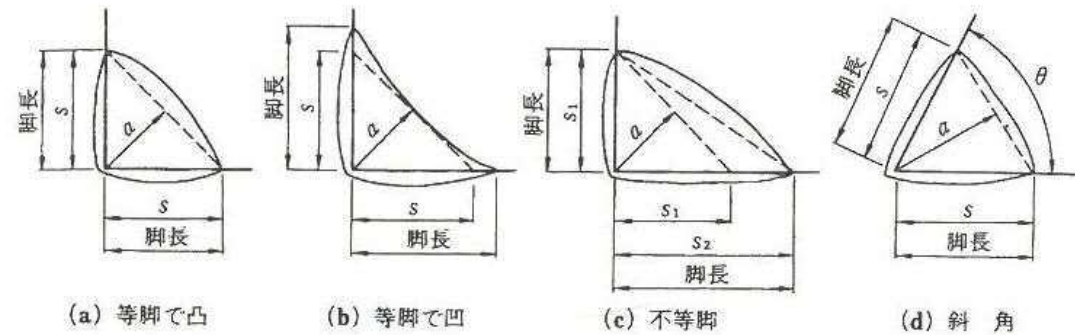
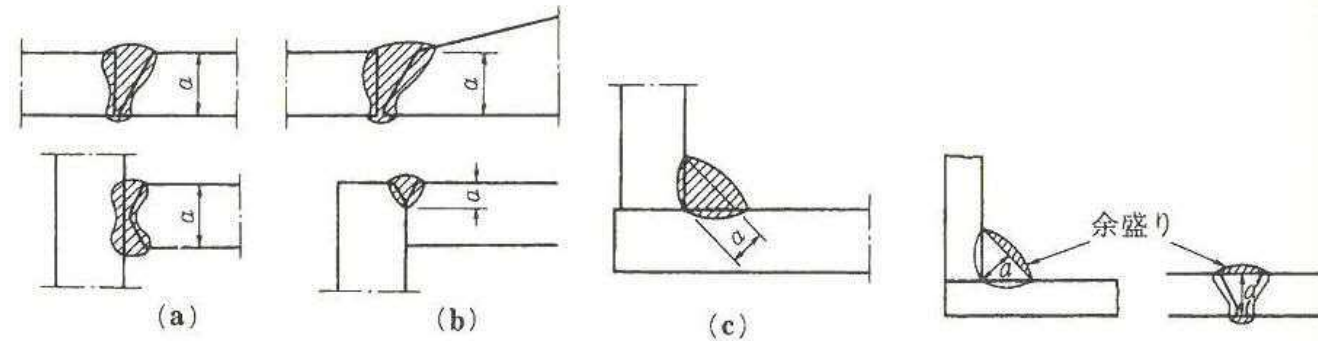


図 7.34 すみ肉溶接のサイズ (s), 脚長およびのど厚 (a)

$$l \geq 10s \quad (l \geq 80\text{mm})$$



図 7.35 溶接の有効長

石川敏之 提供

溶接部の設計

軸力に対して溶接部に生じる応力

$$\sigma_t = \frac{P}{\sum (al)}$$

せん断力に対して溶接部に生じる応力

$$\tau = \frac{P}{\sum (al)} = \frac{P}{\sum (sl / \sqrt{2})}$$

曲げモーメントに対して溶接部に生じる応力(最外縁)

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y$$

I は溶接部ののど厚 a のみを用いて計算する.

ここで、溶接サイズ s 、のど厚 a 、有効長 l

石川敏之 提供

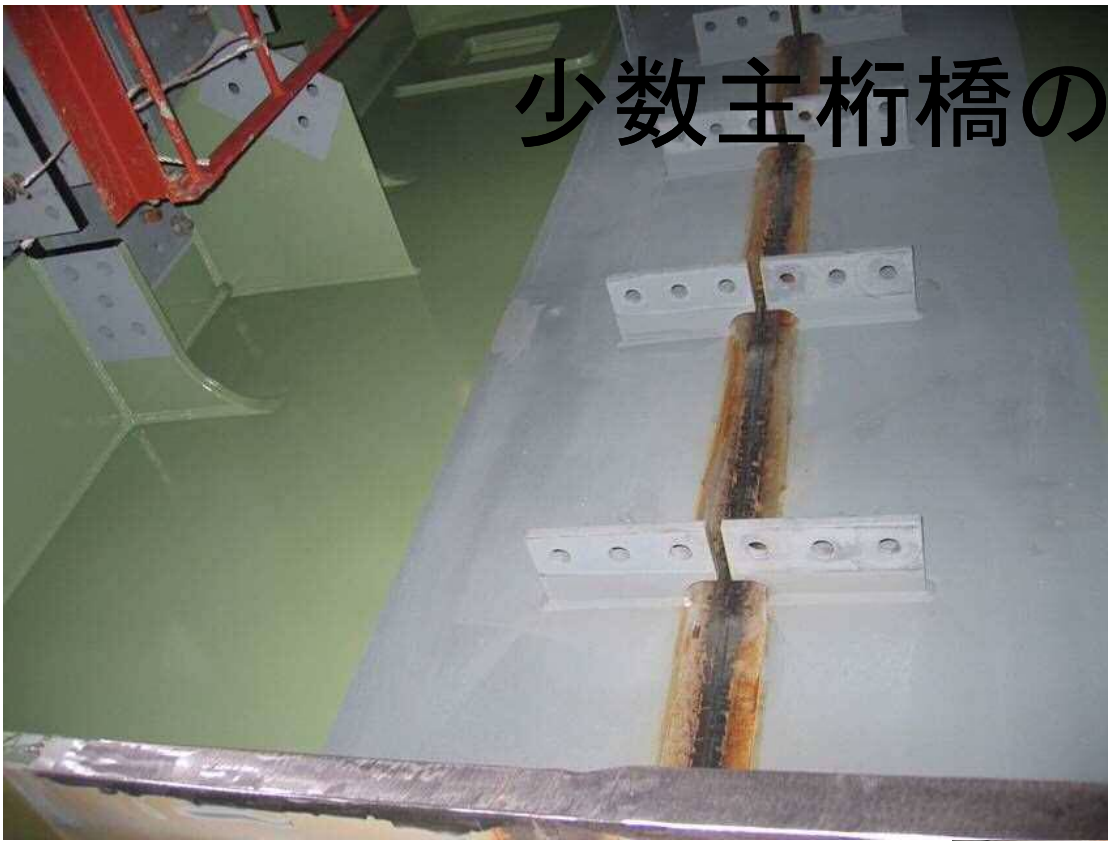
現場での溶接 主桁の連結

風防設備



工場並みの作業環境を確保

少数主桁橋の現場溶接

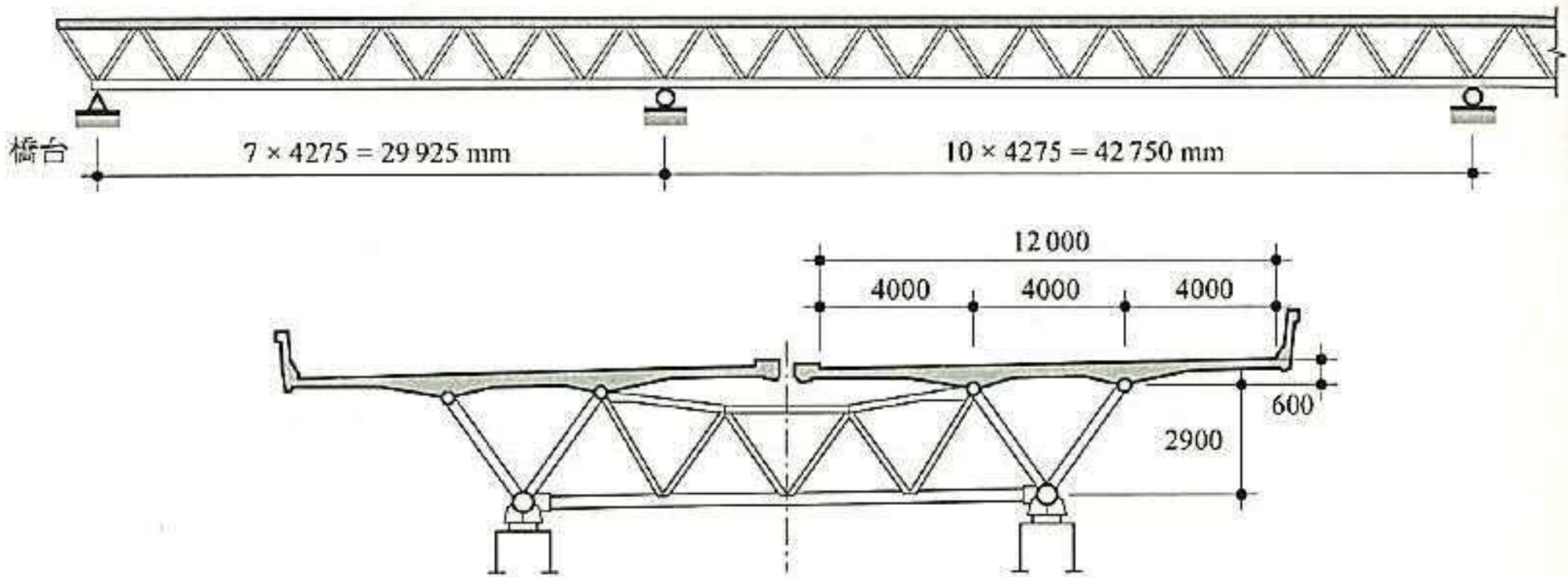


拘束治具
裏なみ溶接(セラミック)



拘束治具
エンドタブ

鋼管を用いたトラス橋（ルーリー高架橋）



(a) ルーリー高架橋

ルーリー高架橋

1996年、2000年、2004年



牧草地が分断されることで地元が大反対:

周辺環境に配慮した構造: 牧草地, 風通し, 見晴らし, など

工場での製作 ルーリー高架橋



かなり大きな部材を現場に輸送

パイプの開先加工 ルーリー高架橋

専用のNC切断、開先加工機を用いる



ICOM, EPFL 提供

継手の現場溶接 風防施設



高欄、透明性 ルーリー高架橋



支承の移動量が分かるシステム



ルーリー高架橋 スイス



Lanzendorf高架橋 ドイツ

EPFLの構造実験室 鋼管継手の疲労試験



Thesis Senta Haldimann
ICOM, EPFL 提供

箱桁橋の現場溶接継手

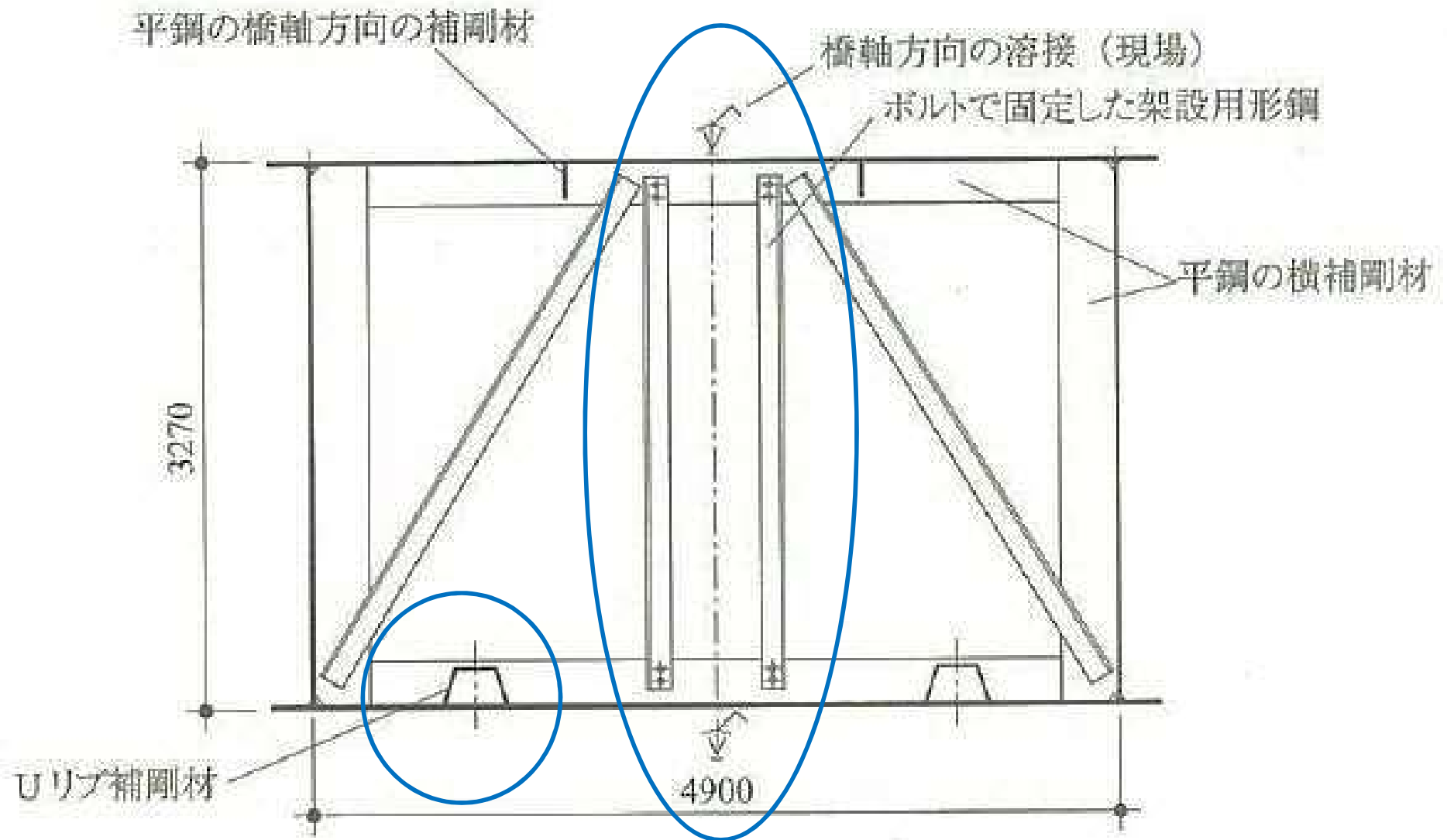


図 6.18 箱桁のトラス形式の対傾構

スイスの箱桁橋 耐候性鋼無塗装橋



2主桁橋

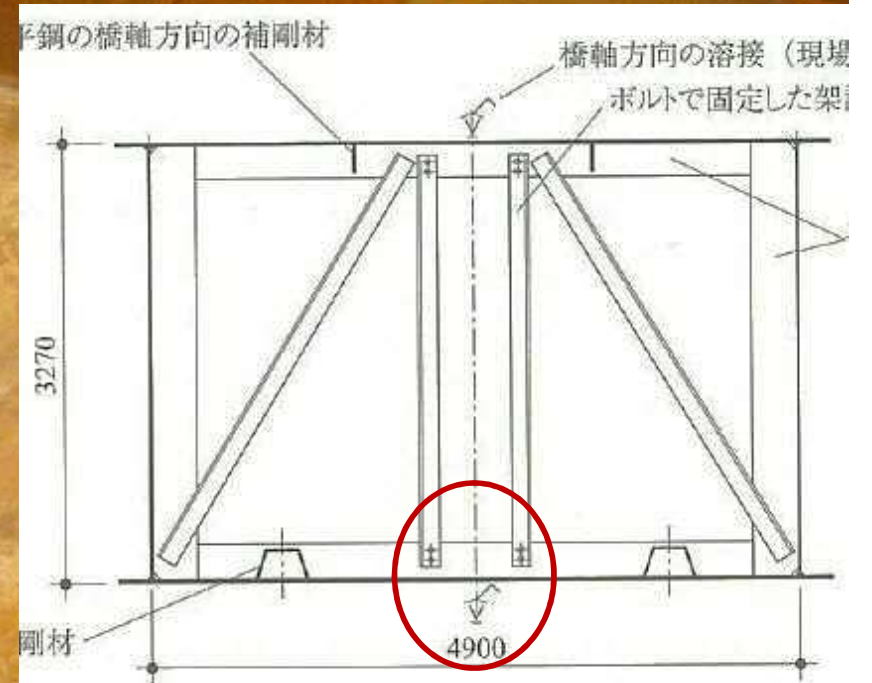
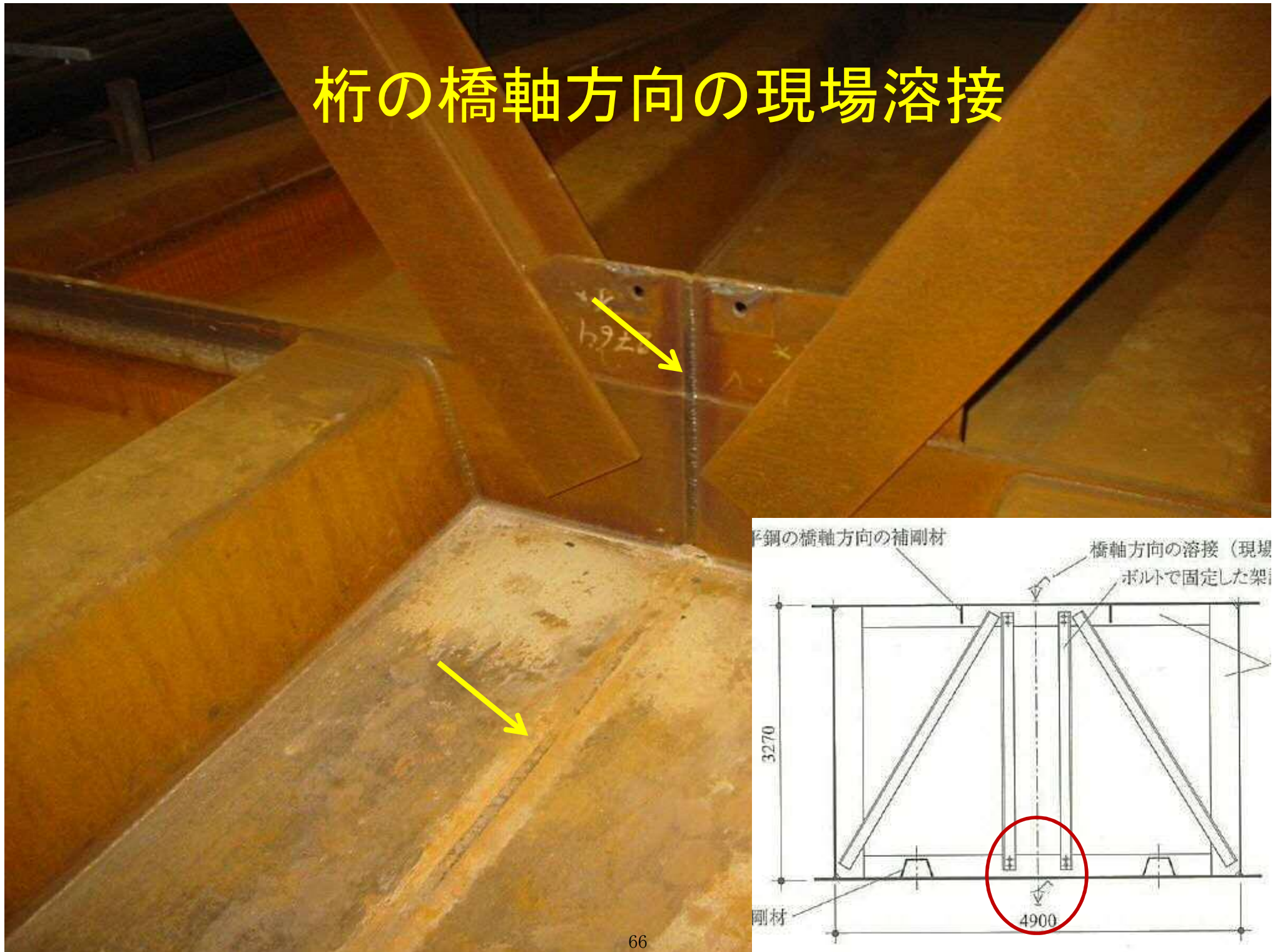
箱桁橋

検査路（2主桁橋 横桁をまたぐ？）



それなりに配慮

桁の橋軸方向の現場溶接



桁の橋軸直角方向の現場溶接



疲労照査の必要な継手と応力方向の例
(桁の応力範囲は小さいことが多い)

継手の耐久性について

1. 鋼構造物の劣化

腐食 ⇒ 防食する(例: 塗装、塗替え塗装)

鋼橋の劣化要因(素地調整の不備)

疲労 ⇒ 疲労照査する(例: 道路橋示方書)

2. 疲労

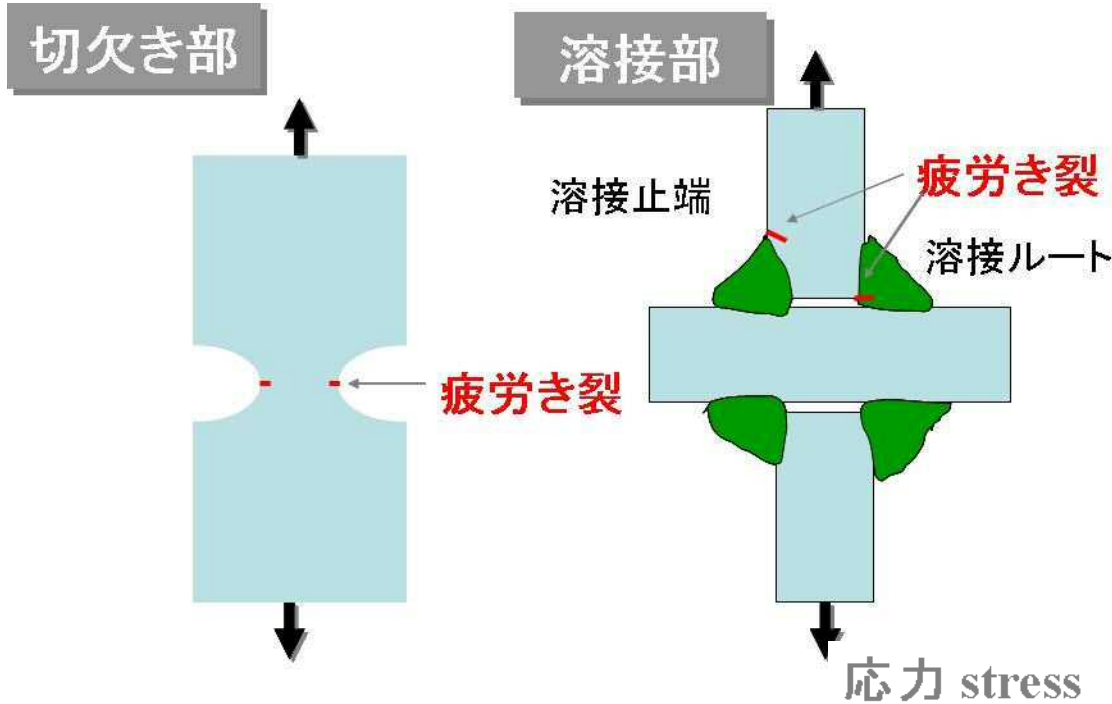
繰返し荷重が作用することで、疲労き裂が発生・進展する挙動



静的な強度は照査 繰返し荷重に対しては？

継手形状、応力範囲、繰返し数 疲労の3要素

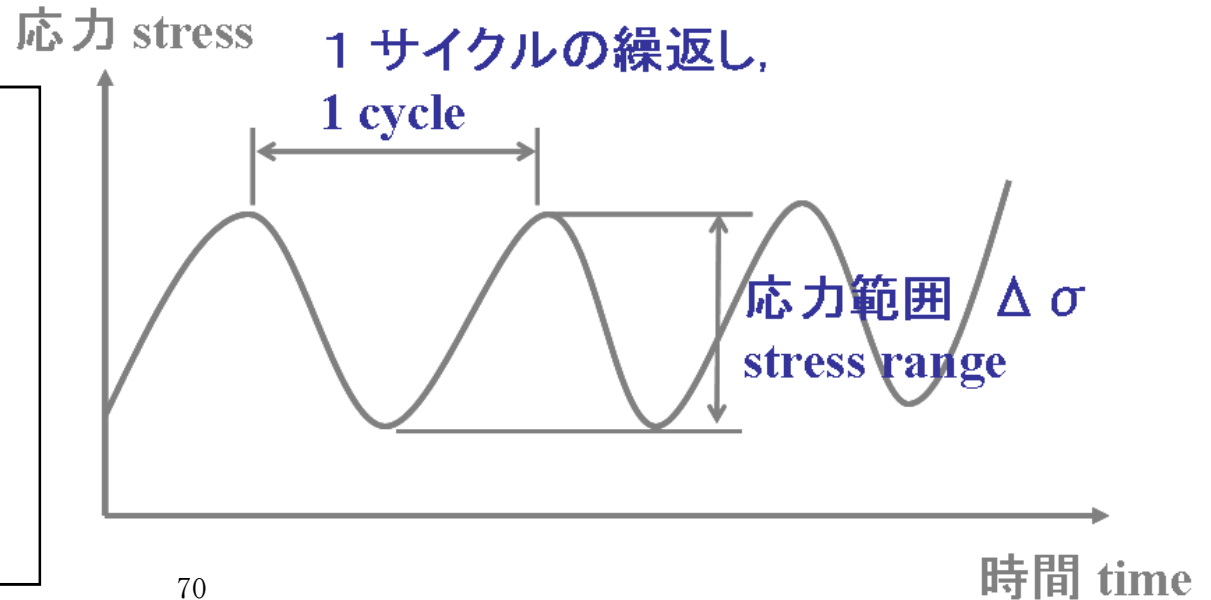
Detail, stress range and number of cycles



応力範囲が重要
静的荷重は影響しない
溶接による残留応力

疲労き裂は**応力集中の
高いところに発生する**

溶接継手は応力集中を
持つ



溶接構造物の疲労の基礎 (疲労の3要素)

溶接継手の形 structural detail

継手の疲労強度 S-N線図 (強度)

疲労試験, ホットスポット応力法, 1mm法
破壊力学を用いた疲労き裂進展解析

強度

作用する応力範囲 stress range

作用荷重に起因 計測, 解析

荷重計測 (Bridge Weigh-in-Motion, BWIM)

繰返し数 number of cycles

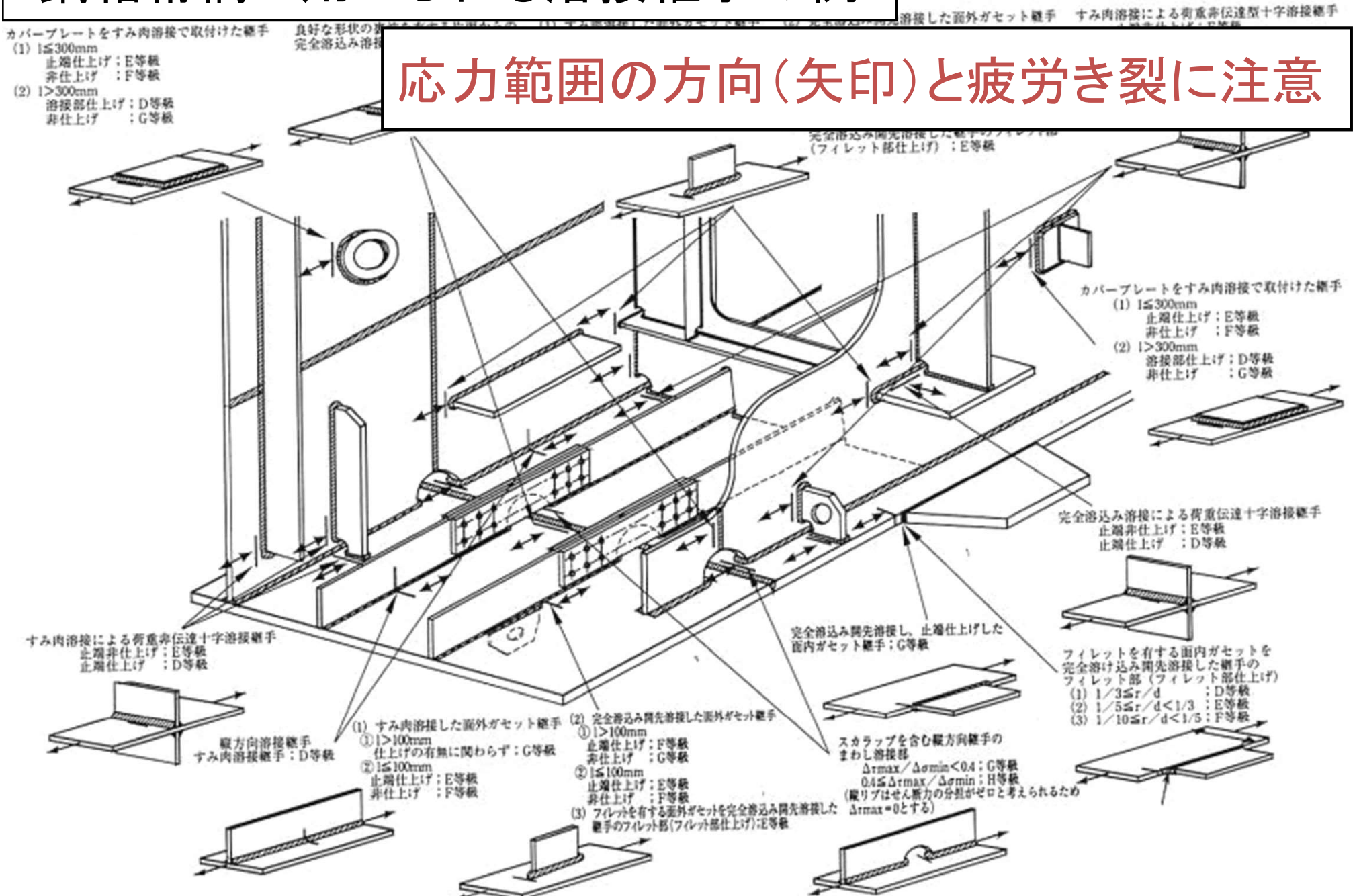
経済, 社会の影響, 予想交通量

使われ方

疲労の3要素がわかれば, 疲労寿命予測が可能

鋼箱桁橋に用いられる溶接継手の例

応力範囲の方向(矢印)と疲労き裂に注意



強度： 疲労試験とS-N曲線

小形試験(継手試験)

設計S-N線図の基本
基礎的なデータ



中型試験

小型試験を補足, サイズの効果

板曲げ疲労試験

早く, 安く, 省エネ → 長寿命域
載荷速度: 20Hz程度



解析, 静的試験でS-N線図→ホットスポット応力法, 1mm法
破壊力学を用いた疲労き裂進展解析

大型，実物モデルの疲労試験の例



大型試験(実物大)
大型海洋構造物
本四架橋



実物試験(鉄道桁) JR東海提供

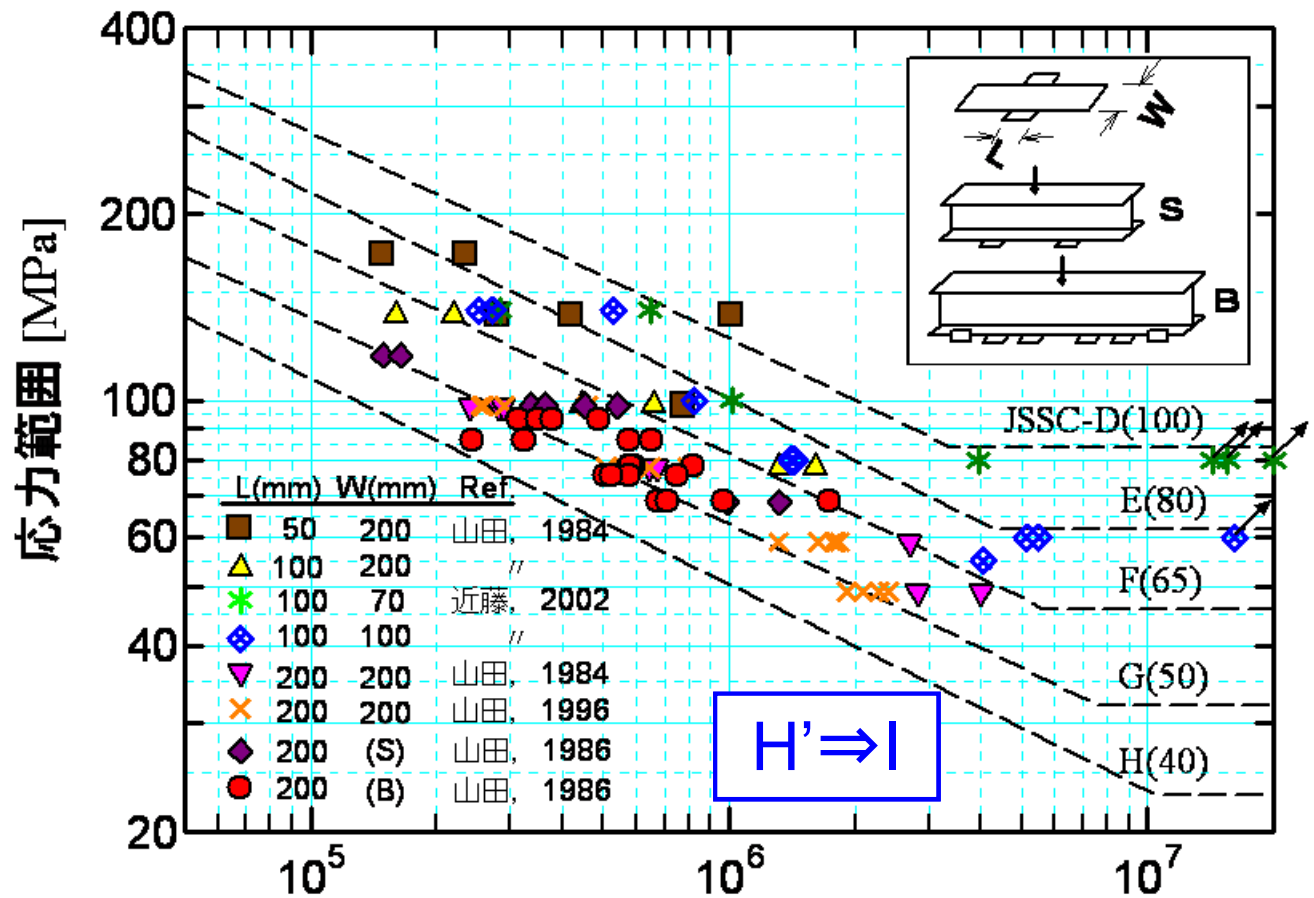
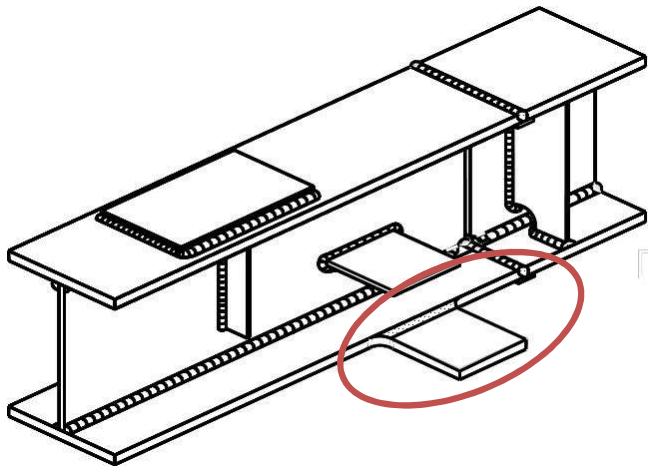


鋼製橋脚(首都高)

補修・補強方法の検討

S-N曲線と疲労設計指針 JSSC、道路橋示方書

面内ガセット溶接継手のS-N線図の例



ガセットの長さLでKt (応力集中)が変わる→疲労強度の差

溶接構造物の疲労の基礎 (疲労の3要素)

溶接継手の形

structural detail

継手の疲労強度 S-N線図 (強度)

疲労試験, ホットスポット応力法, 1mm法

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析

強度

作用する応力範囲 stress range

作用荷重に起因 計測, 解析

荷重計測 (Bridge Weigh-in-Motion, BWIM)

繰返し数

number of cycles

経済, 社会の影響, 予想交通量

使われ方

疲労の3要素がわかれば, 疲労寿命予測が可能

繰り返し数(例) 設計の仮定?

ジャンボジェット機(B747) 長距離旅客機 (20,000回の実験)

大陸の往復 2回/日x365日x20年= 14,600回

日本では 4回/日x365日x20年= 29,200回

クレーン走行桁 工場 →製鉄所 →ドラッグライン(豪)

10回/日 10回x300日x20年 = 60,000回

6回/時間 144回x300日x20年 = 864,000回

30回/時間 720回x360日x20年 =5,184,000回

新幹線, 在来線 200万回疲労強度 →長寿命のデータ

60列車/日 60列車x365日x70年= 1,533,000回

150列車/日 150列車x365日x70年= 3,832,500回

縦桁 17x 150列車x365日x70年= 65,000,000回

照明柱・標識柱 大型車の交通振動の影響を受ける

4回/台 4回x1000台x365日 = 1,460,000回/年

4回x1000台x365日x20年= 29,200,000回

標識柱の風による振動



振動ビデオ



基部の構造



疲労き裂



破面観察

疲労の基礎（溶接継手）まとめ

(1) 溶接継手の疲労で重要な3要素

継手の形状, 作用応力範囲, その繰返し数

この3要素が分かると、疲労き裂の原因が分かる
応力範囲の作用する方向にも注意

(2) S-N曲線が重要(継手の疲労強度)

設計S-N曲線

(3) S-N曲線は、疲労試験を行って求める

疲労破面をよく観察

⇒疲労き裂の発生・進展挙動が重要

⇒実物の疲労損傷でも同じ

まとめ 継手の設計

1. 継手は、壊れないように設計する。そのため、どのように壊れるか、実験で確かめる。
2. 示方書の規定が、どのような実験結果に基づくのか、原点に立ち戻ってみることも必要。
3. 繰返し荷重が作用する継手の疲労耐久性は、継手形状、作用応力範囲、その繰返し数を調べる。
4. 既設の道路橋では、疲労照査を行ってこなかった。そのため、疲労耐久性の低い継手が存在する。計測、解析で疲労照査すると良い。

まとめ 2 継手の設計

5. 設計時に疲労照査していない構造物は、簡単
でよいから疲労照査すると良い。

例：標識柱、照明柱：外力は風、振動（橋梁上）

例：伸縮装置：外力は輪重の繰返し

6. 疲労強度が低い継手で、耐久性に疑問があ
る場合、適切な疲労強度向上法を用いると良い。
（予防保全）

鋼橋における維持管理の配慮について

玉越 隆史

土木研究所構造物メンテナンス研究センター