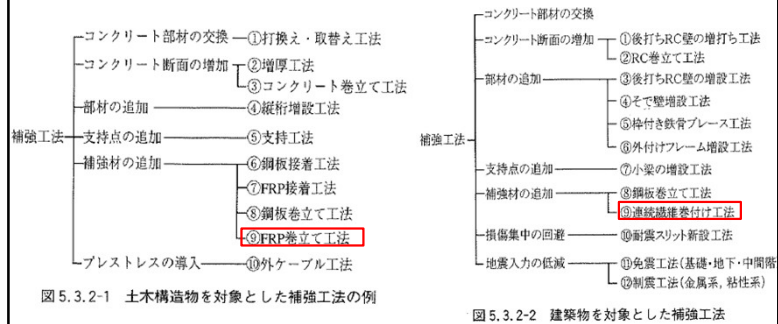


コンクリートの補強工法の例

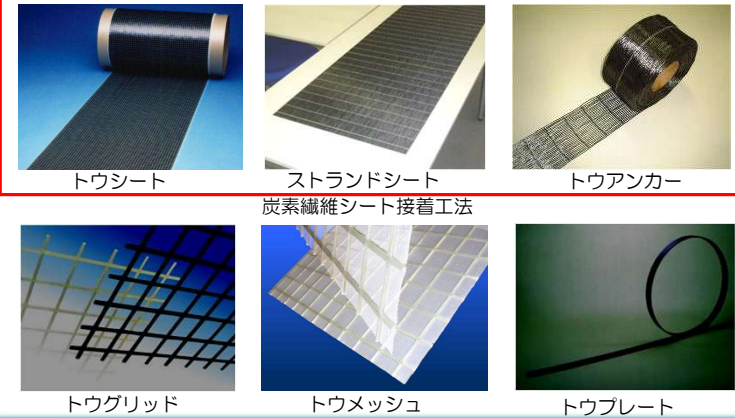


NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

5

主な製品のラインナップ

- ・構造物補強用の炭素繊維シート、ストランドシート、CFアンカー、FRPグリッド、トウメッシュ、樹脂、セメント類、金属アンカー
- ・補強用FRP、樹脂を含め工法として開発。



CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

6

炭素繊維シート接着工法の適用事例

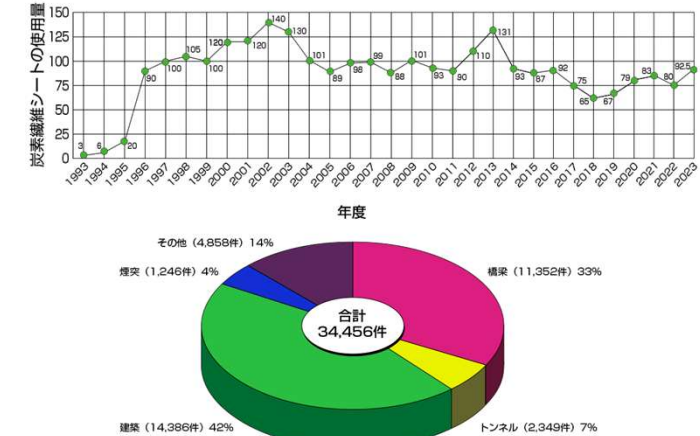


CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

7

炭素繊維シート接着工法の実績 (研究会3社)

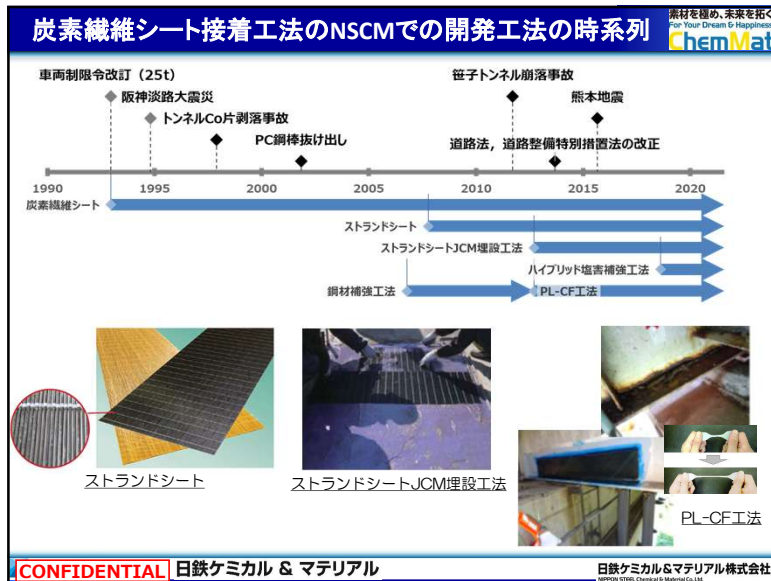


出典：炭補研 (炭素繊維補修・補強工法技術研究会) HP

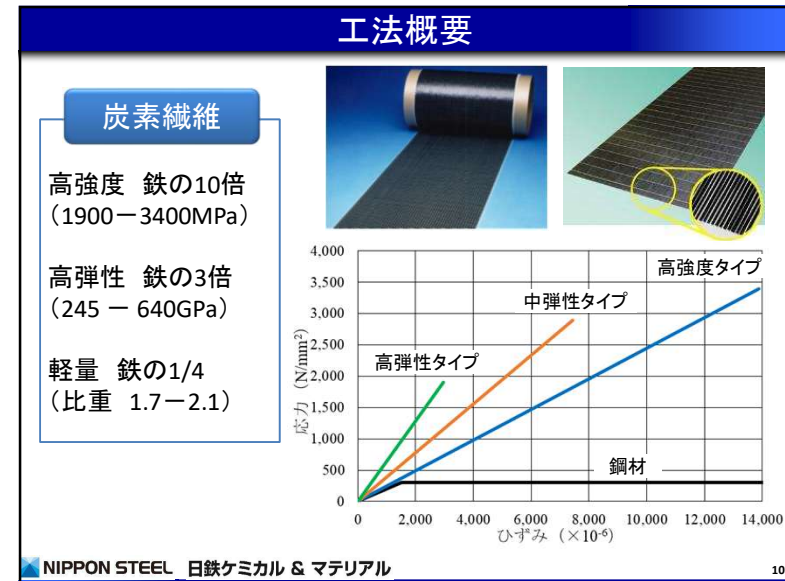
CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

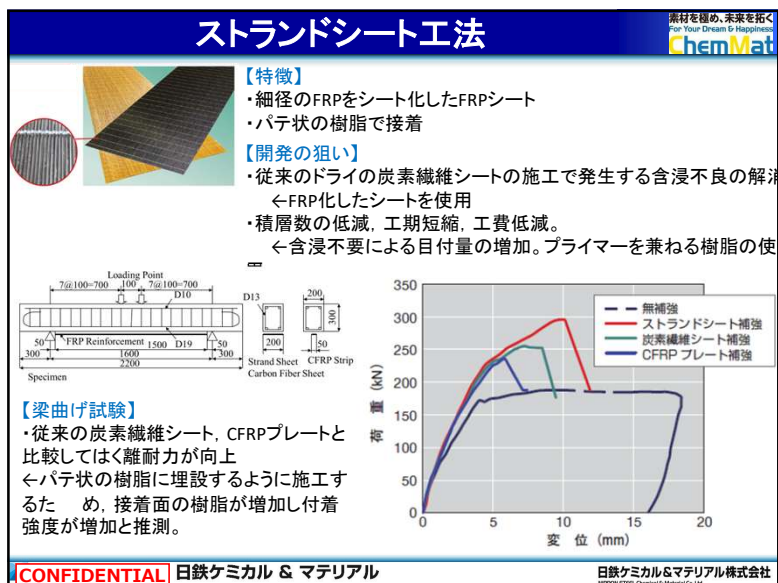
8



9



10



11



12

ストランドシートJCM埋設工法

素材を極め、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
ChemMat

【開発の狙い】

- 歩道の増設、高覧と地覆の変更による縁端拡幅、中央分離帯の移動、輪荷重位置の変更によって生じる床版支点上の負曲げ対策。
- 床版取替工事前の補強にも採用例。

床版上面の急速施工。夜間工事で、昼間は規制解除可能。

約13mm

1 舗装面 (切削および研掃)
2 接着剤
3 不陸修正用JCM
4 ストランドシート (上下に接着剤)
5 保護用JCM
6 アスファルト防水
7 アスファルト舗装

13mm

CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

13

ストランドシートJCM埋設工法

素材を極め、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
ChemMat

【施工手順】

養生3時間

橋面防水・舗装復旧

①～⑥までの工程を各工程ごとの養生の待ち時間なしで施工完了できる。

【開発のポイント】

- ウェットな状態での塗継性能。
- 施工後3時間での強度の発現と物性の両立
- 施工管理 (施工指導体制)

CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

14

ストランドシートJCM埋設工法

素材を極め、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
ChemMat

【撤去床版の疲労試験による検証】

供用33年後の塩害、凍害の複合劣化床版。階段載荷 (200回ごとに50kN増加)

表-5 等価繰返し回数結果

供試体	等価繰返し回数	平均等価繰返し回数	等価繰返し回数比
RC-O-1	81,330,803	107,995,266	1
RC-O-2	134,659,728		
RC-O-C1	595,566,383	445,976,550	4.1
RC-O-C2	296,386,718		

図-6 たわみと等価繰返し回数の関係

図-7 各供試体の破壊状況

(1) 補修供試体の破壊状況

(2) 補強供試体の破壊状況

CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

15

ハイブリッド塩害補強工法

素材を極め、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
ChemMat

【工法概略】

シラン系鉄筋腐食抑制剤 (プロテクトシルCIT) と炭素繊維シート接着工法を併用した工法。

【特徴】

- 腐食抑制剤による内在塩分の鉄筋腐食の抑制
- 中性化後の腐食にも効果。
- 炭素繊維シートによる飛来塩分の浸透の抑制

【開発の狙い】

- 表面含浸材はエポキシとの接着を阻害するものが多い。
- 信頼性の高い補強工法を提案する。
- 補強用樹脂の接着を阻害しない含浸剤の採用
- 専用のプライマーの開発

はく 汎用 開発プライマー

・内在塩分を除去することなく、鉄筋腐食を抑制する工法とすること。

CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

16

ハイブリッド塩害補強工法

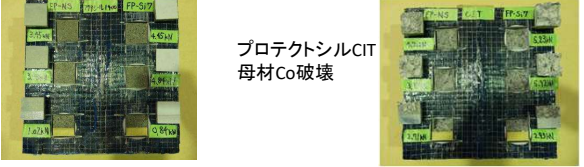
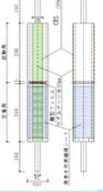
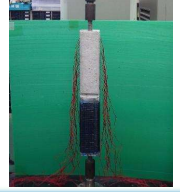
素材を極め、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
chemMat

【評価】
・建研式接着試験

シラン・シロキサン系
界面はく離

プロテクトシルCIT
母材Co破壊

・JSCE-E-543 連続繊維シートとコンクリートとの付着強度試験
界面はく離破壊エネルギー $G_f=1.04 > 0.5\text{N/mm}$

CONFIDENTIAL 日鉄ケミカル & マテリアル

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
NIPPON STEEL Chemicals Material Co., Ltd.

17

鋼構造への展開について

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

18

18

補修と補強

補修と補強とは？

- 補修は、**元の性能レベルまで回復させる**ことが目的
- 補強は、元の性能レベルを上回るように向上させることが目的

鋼構造物の腐食補修方法

金属パテ, セラミックパテ, UV硬化ガラスシート, etc...

パテ材の弾性形数は5-7GPa, UVガラスも7-8GPa程度
一方で鋼は200GPa. これらでは, 力学的性能は回復しない
(防錆性能などの回復・向上は可能)

**現状, 鋼構造物の腐食補修(力学的性能回復)は
当て板 or 炭素繊維(CFRP)接着のみ**
(炭素繊維シートの弾性係数は245-640GPa)

CONFIDENTIAL NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

19

19

鋼材補強(PL-CF)工法の概要

○炭素繊維シート接着工法とは
炭素繊維シートを接着し, 構造物を補修・補強する工法

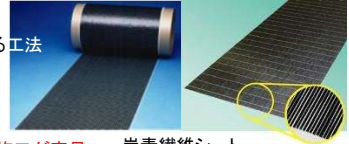
○炭素繊維シート接着工法の特徴

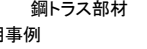
炭素繊維の特徴

- ◆ 高強度・高弾性 → 高い補修・補強効果
- ◆ 軽量 → 死荷重の増加が少ない。施工が容易。
- ◆ 腐食しない → 長期耐久性に優れる

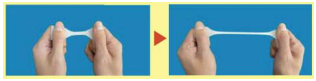
○炭素繊維シート接着工法の適用範囲
コンクリート構造物, 鋼構造物ともに適用可能
→ 橋梁をはじめ様々な構造物に適用実績有。

○OPL-CF工法(鋼部材補強)
特に鋼構造物の補強では, 接着に高伸度・低弾性のポリウレアパテを用いることで, 炭素繊維のはく離を抑制





コンクリート橋脚 鋼トラス部材
適用事例



ポリウレアパテ

CONFIDENTIAL NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

20

20

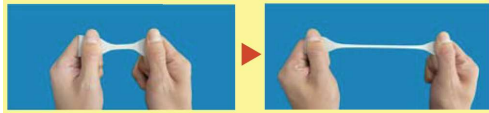
工法概要

PL-CF工法

硬くて強い炭素繊維シートと、
柔らかい良く伸びるポリウレアパテ（高伸度弾性パテ）
を用いた、鋼構造物の補修・補強工法

ポリウレアパテ（高伸度弾性パテ）とは？

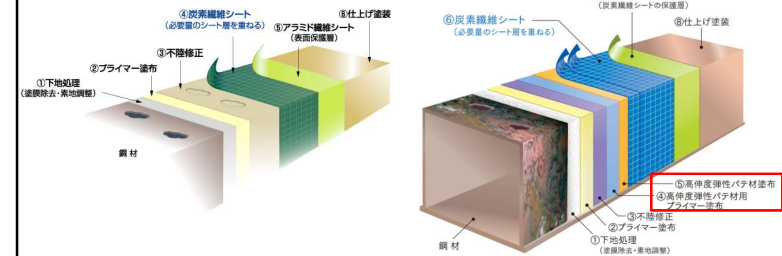
高伸度（伸び300%～500%）、低弾性（55 N/mm²～75 N/mm²）で
鋼と炭素繊維の間に塗布し、炭素繊維の剥離を抑制する。



施工工程

従来の炭素繊維接着工法

PL-CF工法



PL-CF工法では、不陸修正後にウレタンプライマーと
ポリウレアパテの塗布の工程が入る。

従来の炭素繊維接着工法

鋼板当て板工法

- ・重機の使用、大掛かりな作業
- ・狭隘な箇所への適用は困難
- ・母材へのボルト穴等のダメージ



従来の炭素繊維接着工法

- ・重機不使用、手作業で作業可能
- ・狭隘な箇所への適用も可能（手が入れば）
- ・母材へのダメージなし



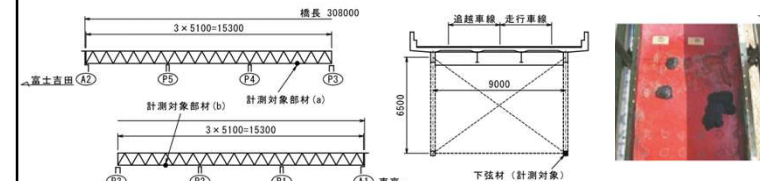
従来の炭素繊維シート接着工法の適用例



浅利橋 2007年施工（NEXCOの鋼橋初）

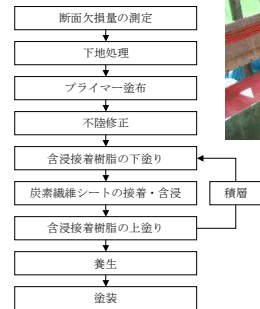
- ・ 所在：中央自動車道 山梨県
- ・ 形式：鋼3径間連続ワーレントラス橋
- ・ 橋長：153m（3@51m）
- ・ 幅員：11.2m
- ・ 橋等級：一等橋
- ・ 竣工年：昭和44年

目的：腐食による断面欠損を、初期性能へ回復させる
対象：下弦材の腐食断面欠損部 補修前後のひずみ計測も実施



従来の炭素繊維シート接着工法の適用例

施工概要



NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

25

25

首都高 鋼製橋脚の腐食補修



基礎ハツリ後全景



ストランドシート施工完了



炭素繊維シート周巻き施工



仕上げ施工

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

26

26

なぜ、ポリウレアが必要か？

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

27

27

従来工法と問題点

接着への信頼性、剥離の懸念

- 実験例、適用事例が少ない。
 - 引張部材はあるが、圧縮部材への検討は少ない。
 - 適用範囲に限られる。応力度や、限界積層数が決められている。
- 剥離設計が出来ない(困難)。
 - 塑性域で剥離する。貼り方によって弾性域で剥離する。
 - 剥離が脆性的。
 - 剥がれない前提で使用範囲、貼り方を限定。

- NEXCO要領(H23年版)では、炭素繊維シート5層(端部は階段状)まで、鋼材応力100MPaまで、引張部材の腐食部補修のみ適用可。
- 首都高の鋼製脚基部補修では、炭素繊維ストランドシート6層(端部は階段状)。
- 土研の鋼製脚耐震補強指針では記載はなし(適切に検討)。

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

28

28

解決法

接着層に柔らかい材料を使用することで剥離抑制可能。
(既往の研究, HiPer CF工法など)

実質, 鋼構造へ適用可能な材料はない。
(温度, 付着性, 施工性)

ポリウレアパテを開発。(川重と共同開発)

- 低温-10℃から60℃まで安定した物性.
- 鋼, エポキシ樹脂との良好な付着性.
(鋼への付着にはプライマー必要)
- 現場で容易に施工可能な施工性.

従来工法からPL-CF工法へ

鋼に対する**接着の信頼性**, **剥離の懸念の払拭**,
適用範囲を拡大するためポリウレアの実験開始.

NEXCO総研, 川重, 長岡技科大との共同研究を実施
(平成21年度～平成24年度)

ポリウレアを使用することで, **剥離照査不要**.
圧縮部材への適用可能.

平成25年7月の設計要領第二集, 構造物施工管理要領,
平成25年10月の「炭素繊維シートによる鋼構造物の
補修・補強工法 設計・施工マニュアル」に
PL-CF工法が採用→令和元年, 令和2年更新

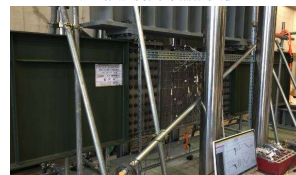
NEXCOマニュアル



NEXCO総研マニュアル
設計要領第2集橋梁保全編
構造物施工管理要領



トラス格点腐食部補修実験



プレートガーダー補強実験

PL-CF工法の適用範囲

積層数 : 一方向当り最大**35層**(令和2年7月現在)
鋼材応力 : **制限なし**

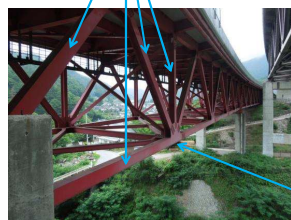
適用可能部材(令和2年7月現在)

部材	応力状態	適用対象	対象部位の例(橋梁)
軸方向力を受ける部材	引張	○	鋼桁のフランジ(主桁・横桁・縦桁等), 対傾構, 横構, 水平・垂直補剛材トラス弦材, アーチリブ
	圧縮	○	
支点反力を受ける部材	圧縮	○	鋼桁の支点上補剛材及び腹板
せん断力を受ける部材	せん断	○	鋼桁の腹板
曲げを受ける部材	引張, 圧縮	○	鋼桁の主桁フランジ及び腹板(座屈補強)
トラス橋のガセット	引張, 圧縮	○	トラス橋のガセットと弦材の取付部

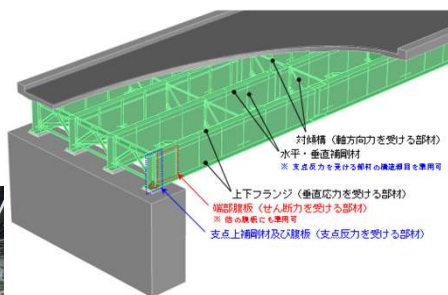
PL-CF工法の適用範囲

適用可能部材

トラス橋の
斜材、垂直材、弦材
(引張、圧縮)



トラス橋の
ガセット

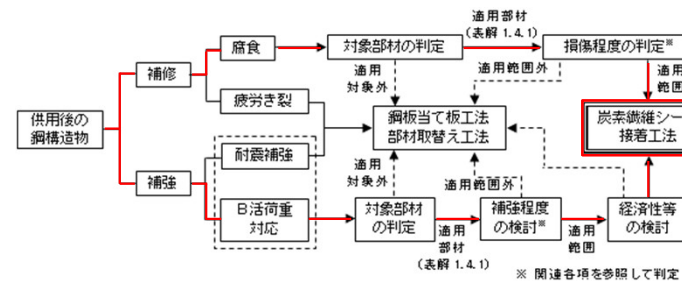


NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

33

33

工法選定フロー



炭素繊維シート or 当て板

- ・規定の定着長が取れない・最大積層数の規定を超える。
 - ・疲労き裂も同時に発生している・主応力が複雑に変化している。
- 鋼板当て板工法を適用

※NEXCO設計要領第二集より

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

34

34

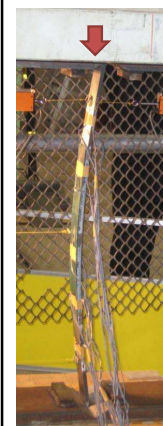
実験例

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

35

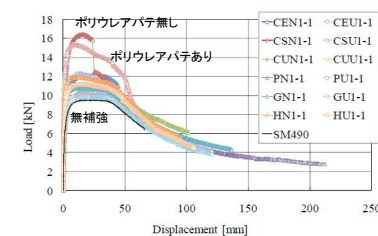
35

PL-CF工法の検証実験① 変形追従性



ポリウレアパテ無し

ポリウレアパテあり



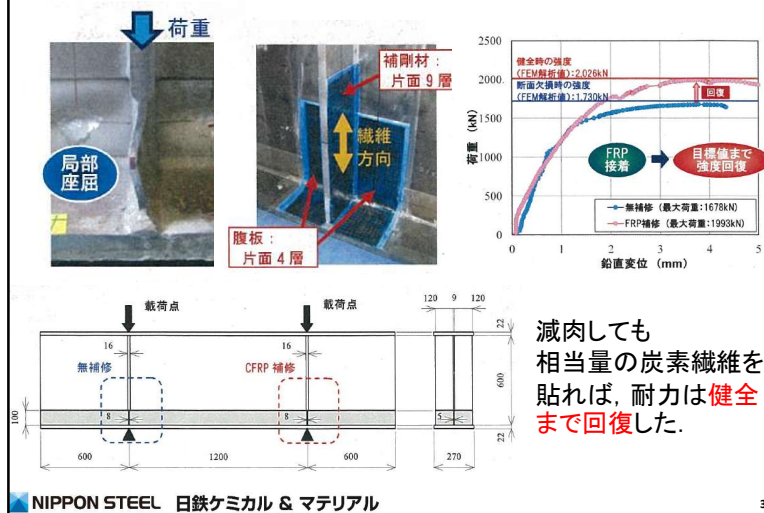
ポリウレアパテにより剥離が抑制され、座屈の大変形にも炭素繊維シートが追従する。

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

36

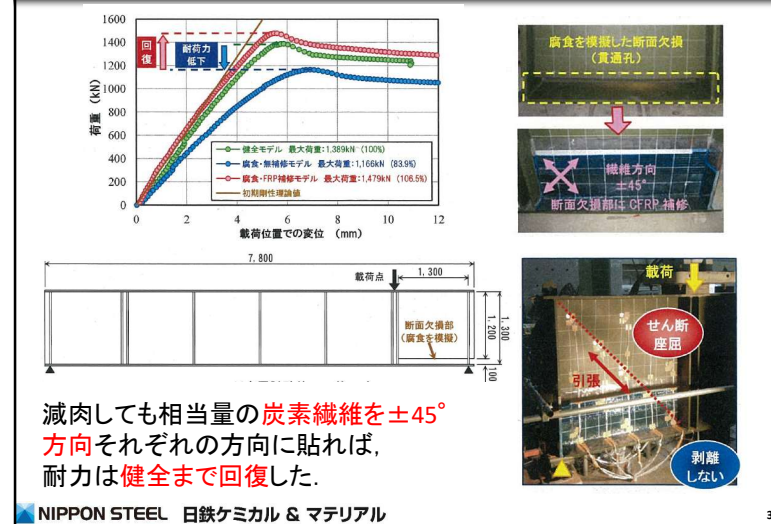
36

PL-CF工法の検証実験② 支点上十字柱



37

PL-CF工法の検証実験③ ウェブのせん断



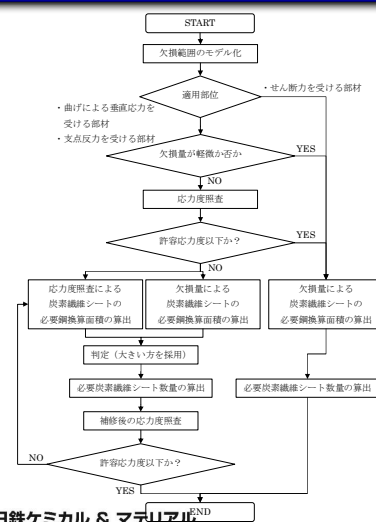
38

設計について

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

39

設計フロー



NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

40

基本的な設計の考え方

- 炭素繊維を剛性換算にて鋼としての断面積に置き換える。
腐食補修の場合 = $A_{cf,s}$ が欠損断面積より大きくなるように設計。
補強の場合 = $A_{cf,s}$ 分鋼が厚くなるとして設計。

$$A_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_f} \times t_{cf} \times B_{cf} \times n \quad (\text{炭素繊維の鋼換算断面積}) = (\text{ヤング係数比}) \times (\text{炭素繊維の断面積})$$

$A_{cf,s}$: 鋼換算した炭素繊維シートの断面積 (mm²)
 E_{cf} : 炭素繊維シートのヤング係数 (kN/mm²)
 t_{cf} : 炭素繊維シートの設計厚 (mm)
 n : 炭素繊維シートの積層数

E_s : 鋼材のヤング係数 (kN/mm²)
 B_{cf} : 炭素繊維シートの接着幅 (mm)

- 炭素繊維は活荷重(後荷重)のみに抵抗する。

(ジャッキアップしてから施工すれば、死荷重(前荷重)も負担できる。)

軸力により生じる応力度

$$\sigma_a \geq \frac{P_d}{A_s} + \frac{P_l}{A_s + A_{cf,s}}$$

σ_a : 許容応力度 (N/mm²)
 P_d : 死荷重 (N)
 P_l : 活荷重 (N)
 A_s : 鋼材の断面積 (mm²)

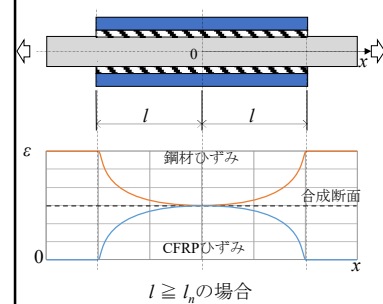
曲げモーメントにより生じる応力度

$$\sigma_a \geq \frac{M_d}{I_s} y + \frac{M_l}{I_s + I_{cf,s}} y'$$

M_d : 死荷重モーメント (Nmm)
 M_l : 活荷重モーメント (Nmm)
 I_s : 鋼材の断面2次モーメント (mm⁴)
 $I_{cf,s}$: 炭素繊維の鋼換算断面2次モーメント (mm⁴)

y : 中立軸までの距離, y' : 補強後の中立軸までの距離
NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル 41

定着長と補強効果



$$l_n \geq \frac{1}{c} \cosh^{-1} \left(\frac{2 E_f A_f}{\eta - 1 E_s A_s} \right) \quad (1)$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{b_f G_e}{h_e} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{E_s A_s}} \quad (2)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + (2 E_f A_f) / (E_s A_s)} \quad (3)$$

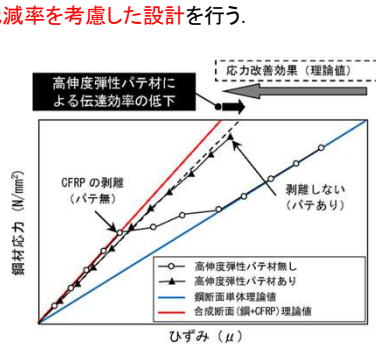
$$G_e = \frac{E_e}{2(1 + \nu_e)} \quad (4)$$

l_n : 合成断面となるために必要な定着長
 E_s, A_s : 鋼材の弾性係数と断面積
 E_f, A_f : CFRPの弾性係数と断面積
 η : 鋼材応力の収束度 (ここでは1.01)
 b_f : CFRPの幅
 G_e, h_e : 接着樹脂のせん断弾性係数と厚さ
 E_e, ν_e : 接着樹脂の弾性係数とポアソン比

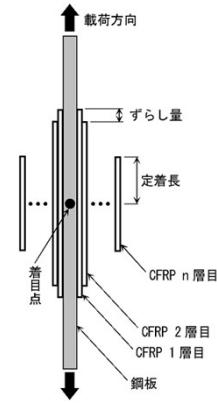
NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル 42

高伸度弾性パテ材の設計の考え方

- 高伸度弾性パテ材を接着層に塗布することにより、高応力時や座屈変形時においてもCFRPのはく離が発生しない。
- 一方で、鋼部材からCFRPへの荷重伝達効率が低減する。
→ 低減率を考慮した設計を行う。



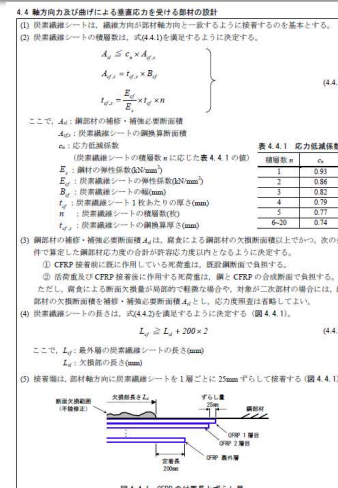
図解 4.4.1 CFRP 接着鋼板の応力-ひずみ曲線 (概念図)



図解 4.4.2 検討モデル

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル 43

設計① 軸力、曲げモーメントを受ける部材



$$A_{sl} \leq C_n \times A_{cf,s}$$

$$A_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times B_{cf} \times n$$

C_n : 応力低減係数
 $A_{cf,s}$: CFRPの鋼換算面積

積層数	C_n
1	0.93
2	0.86
3	0.82
4	0.79
5	0.77
6-35	0.74

- 高伸度低弾性パテ材による補強効果のロス分である応力低減係数を考慮する
- 必要補強量が5層を超える場合、死荷重は補強前断面、活荷重は補強後剛性断面で抵抗するとして、許容応力度以下となるように応力度照査をしてシート枚数を計算する。そして、応力度照査の結果と欠損分の鋼換算の多い方を採用する。
- 定着長は200mmで各層25mmずらし。改定前の定着長は100mm

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル 44

設計② 桁端の支点反力を受ける部材

4.5 支点反力を受ける部材の設計

(1) 炭素繊維シートは、繊維方向が桁端方向となるように貼着するを基本とする。

(2) CFRP 貼着の対称は、支点上補剛材と腹板（支点上補剛材の中心から腹板厚の12倍の範囲）の12倍の範囲とからなる支点上十字柱の範囲とし、炭素繊維シートの積層数は、式(4.5.1)を満足するように決定する。

$$A_{CFRP} \geq A_{CFRP}^* + A_{CFRP}^* \quad (4.5.1)$$

ここで、 A_{CFRP}^* ：支点上十字柱の合計補強・補強必要断面積
 A_{CFRP}^* ：支点上補剛材に貼着する炭素繊維シートの鋼換算断面積
 A_{CFRP}^* ：支点上補剛材の中心から腹板厚の12倍の範囲の断面積に貼着する炭素繊維シートの鋼換算断面積

ただし、支点上十字柱を構成する各部の断面欠損量に応じて、補強量を適切に割り付けることを基本とする。

(3) 鋼材材の合計補強・補強必要断面積 A_{CFRP}^* は、原状による鋼材材の欠損断面積以上でかつ、次の条件で算出した補強材の必要断面積の合計が平均応力強度以下となるように決定する。

① 支点上補剛材及び腹板は、運搬量1.5.2の規定に基づき、軸方向に受ける柱として設計する。

② CFRP 貼着前に既に作用している応力強度は、設計断面積に負担する。ここで、設計断面積は、支点上十字柱の合計断面欠損量が最大の位置の断面面積を用いて決定する。

③ 応力強度及びCFRP 貼着後に作用する応力強度は、鋼とCFRP との合成断面積に負担する。

④ 規定に用いる許容圧縮応力強度は、鋼とCFRP との合成断面積の値より決定する。

ただし、原状による断面欠損量が局部的で軽微な場合には、支点上十字柱を構成する各部の欠損断面積を各部の必要断面積とし、応力強度は表(4.5.1)に適用する。

(4) 炭素繊維シートの長さ L_{CFRP} は、式(4.5.2)を満足するように決定する。(図4.5.1)。

$$L_{CFRP} \geq L_{CFRP} + 100 \quad (4.5.2)$$

ここで、 L_{CFRP} ：最外層の炭素繊維シートの長さ(mm)
 L_{CFRP} ：欠損部の長さ(mm)

(5) 上側の接合部は、桁端方向に炭素繊維シートを1層ごとに25mmずらして貼着し、下フランジ側の接合部は下フランジと支点上補剛材がある12腹板との溶接ビード手前までとする。(図4.5.1)。

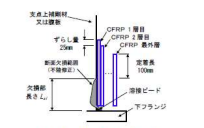


図4.5.1 CFRPの貼着長とずらし量

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

45

- ・支点上十字柱の有効断面は、支点上補剛材と腹板厚12倍の幅の腹板。
- ・補正係数は考慮しなくて良く、欠損断面の鋼換算分で補修、ただし、5層を超える場合は**応力度照査**が必要。
- ・定着長は**100mm**で各層**25mm**ずらし。
- ・下フランジへの定着は無くても良い、防錆のためにR50で定着しても良い。

設計③ 桁端のせん断力を受ける部材

4.6 せん断力を受ける部材の設計

(1) 本項で対象とする部材は、せん断力が卓越する鋼材の桁端部腹板とし、炭素繊維シートは、繊維方向が下フランジに対して45度方向となるように、交互に貼着する。

(2) CFRP 貼着の対称は腹板下側とし、炭素繊維シートの積層数は、式(4.6.1)を満足するように決定する。

$$k_{CFRP} \geq k_{CFRP}^* \quad (4.6.1)$$

ここで、 k_{CFRP} ：腹板（せん断強度に影響する領域）の最大欠損断面積 (mm)
 k_{CFRP}^* ：腹板に貼着する一方あたりの炭素繊維シートの鋼換算断面積 (mm)²
※ 炭素繊維は式(4.6.1)に準じる

(3) 炭素繊維シートの長さは、式(4.6.2)を満足するように決定する。(図4.6.1)。

$$L_{CFRP} \geq (L_{CFRP} - 50) + 100 = \alpha \quad (4.6.2)$$

ここで、 L_{CFRP} ：最外層の炭素繊維シートの長さ(mm)
 L_{CFRP} ：欠損部の長さ(mm)
 α ：R50mmを含む下フランジ定着長(mm)

(4) 上側の接合部は、桁端方向に炭素繊維シートを1層ごとに10mmずらして貼着する。また、下フランジ側の接合部は、R50mmで下フランジに定着し、下フランジ縁端から5mm以上控えて貼着する。(図4.6.1)。

(5) 炭素繊維シートの貼着範囲は、支点上補剛材から支端側の最初の垂直補剛材までの溶接ビード手前側の範囲を標準とする。(図4.6.2)。

(6) 積層数が多い場合は、鋼板両面の合計欠損量を両面のCFRPで等分に負担するように貼付位置を分散させてもよい。

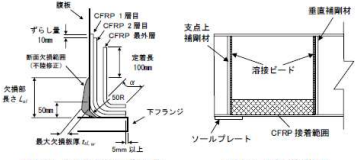


図4.6.1 CFRPの貼着長とずらし量

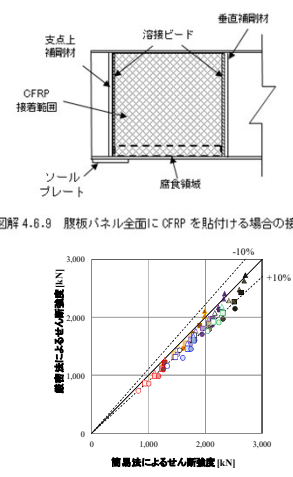
NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

46

- ・補正係数、応力度照査必要無し。
- ・欠損量の鋼換算分を、**+45度方向、-45度方向それぞれに交互に**貼付する。
- ・定着長は**100mm**で各層**10mm**ずらし（ともに垂直方向に）。

設計③' 桁端のせん断力を受ける部材(補強)

図解 4.6.9 腹板パネル全面にCFRPを貼付ける場合の接合範囲



図解 4.6.9 腹板パネル全面にCFRPを貼付ける場合の接合範囲

Baslar式のせん断弾性座屈応力に炭素繊維シートの鋼換算板厚を考慮する。

$$\frac{Q_{u+cf}}{Q_y} = C_f \times \left\{ \frac{\tau_{cr+cf}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 - \tau_{cr+cf} / \tau_y}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \left(1 + \frac{E_L \cdot t_c}{E_s \cdot t_s} \times n \right) \right\}$$
$$\tau_{cr+cf} = \begin{cases} \tau_{cr} & (\tau_{cr} \leq 0.8 \tau_y) \\ \sqrt{0.8 \cdot \tau_{cr} \cdot \tau_y} & (\tau_{cr} > 0.8 \tau_y) \end{cases} \quad (a)$$
$$\tau_{cr+cf} = k_s \frac{\pi^2 E_s}{12(1 - \nu_s^2)} \left(\frac{t_{s+cf}}{h} \right)^2 \quad (b)$$
$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00 / \alpha^2 & (\alpha \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34 / \alpha^2 & (\alpha < 1.0) \end{cases} \quad (c)$$
$$t_{s+cf} = t_s + \frac{E_L}{E_s} \times t_c \times n \times 2 \quad (d)$$

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

47

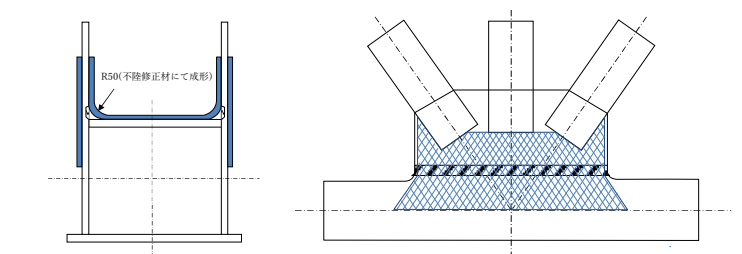
トラスのガゼットの設計方法

欠損分の剛性のシートをガゼット内外に斜材平行に貼付

ガゼットの面積が限られるため、十分な定着長、端部ずらしが確保できない。

↓

端部ずらしなし、定着長が短い場合の応力低減係数を新たに設定



NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

48

トラスのガセットの設計方法

4.7 トラス絶ガセットの設計

(1) 本項で対象とする部材はトラス軸のガセットで、ガセットと下材材等のウェブとを一体にして製作されたもので、下材材上フランジに沿った要素を対象とする。炭素繊維シートは、繊維の方向が設計方向 (圧縮・引張) に対して交互に貼付する。

(2) CFRP 接着の対象は部材の端部から貼付部とし、炭素繊維シートの貼付数は、式(4.7.1)を満足するように決定する。

$$\left. \begin{aligned} A_{cf} &\leq c_n \times A_{gs} \\ A_{gs} &= t_{gs} \times B_{cf} \\ t_{gs} &= \frac{R_{gs}}{E_s} \times l_{gs} \times n \end{aligned} \right\} \text{式(4.7.1)}$$

ここで、 A_{cf} : 鋼部材の断面積・補強必要断面積
 A_{gs} : 炭素繊維シートの断面積
 c_n : 応力低減係数
 t_{gs} : 炭素繊維シートの貼付厚さ (mm)
 B_{cf} : 鋼部材の弾性係数(N/mm²)
 R_{gs} : 炭素繊維シートの許容引張応力(N/mm²)
 E_s : 鋼材の弾性係数(N/mm²)
 l_{gs} : 炭素繊維シート1枚あたりの長さ(mm)
 n : 炭素繊維シートの貼付層数
 t_{gs} : 炭素繊維シートの貼付厚さ(mm)
(貼付厚さは、貼付層数は貼付厚さの逆数で表す)

表 4.7.1 応力低減係数

層数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.84	0.93	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.67	0.81	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.55	0.72	0.82	-	-	-	-	-	-	-
4	0.47	0.64	0.76	-	-	-	-	-	-	-
5	0.41	0.57	0.70	0.77	-	-	-	-	-	-
6	-	0.52	0.65	0.75	-	-	-	-	-	-
7	-	0.47	0.60	0.70	-	-	-	-	-	-
8	-	0.43	0.56	0.67	-	-	-	-	-	-
9	-	0.40	0.53	0.63	-	-	-	-	-	-
10	-	0.37	0.49	0.60	-	-	-	-	-	-

図 4-7-1 トラス絶ガセットの定着長さ及び接着範囲

(1) 鋼部材の合計断面積・補強必要断面積 A_{gs} は、断面より鋼部材の欠損部厚さ以上かつ、次の条件で算定した必要断面積を満足するように決定する。

① ガセットの必要断面積は、通常は 3.2 の規定に基づき、部材に貼付される部材の最小断面積に算定する。

② CFRP 接着前に既に作用している応力値は、設計断面積で負担する。

③ ガセットの水平せん断力に対しては、設計断面積部分のみで算出したせん断力が、部材の断面積に作用していることを確認する。

④ 応力値及び CFRP 接着後に作用する応力値は、鋼と CFRP の合成断面で算定する。

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

プレートガーダーの曲げ耐荷力補強

床板取替に伴い耐荷力不足となるプレートガーダーの補強

床板の死荷重の増大

RC床版

鋼桁

座屈

プレキャスト PC床版

合成桁の床版取替時の非合成桁化

床版

ずれ止め

鋼桁

座屈

床版撤去

床版取替施工図

① RC床版撤去
②プレキャストPC床版架設

フランジの座屈の懸念

フランジ・ウェブの補強が必要

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

I 桁の座屈補強の設計

4.8 I 桁の座屈補強の設計

(1) 対象とする部材はI 桁 (多主桁) のフランジ及び腹板とし、炭素繊維シートは、フランジについては部材軸方向と一致するよう、腹板については圧縮フランジに対して 90 度方向 (層目は部材軸方向) となるように、交互に貼付する。

(2) CFRP 接着の対象は補強後の鋼桁の中立軸より圧縮側の腹板及びフランジとし、炭素繊維シートの貼付数は、式(4.8-1)を満足するように決定する。ただし、フランジのみの補強は適用しないものとする。

$$\left. \begin{aligned} nlf &\leq nlf_{ax} \\ nlf &\leq nlf_{cf} \end{aligned} \right\} \text{式(4.8-1)}$$

ここで、 nlf_{ax} : 腹板の合計補強必要断面積 (mm)
 nlf_{cf} : フランジの合計補強必要断面積 (mm)
 nlf_{ax} : 腹板に貼付する一方あたりの炭素繊維シートの鋼換算厚さ(mm)※ (施工は二方向なので、総シート層数は2倍となる)
 nlf_{cf} : フランジに貼付する一方あたりの炭素繊維シートの鋼換算厚さ(mm)※※ ※ 算定方法は式(4.8-1)に準じる

(3) 鋼部材の合計断面積必要断面積 nlf_{ax} は、次の条件で算定した必要断面積を満足するように決定する。

① CFRP 接着前に既に作用している応力値は、設計断面積で負担する。

② 応力値及び CFRP 接着後に作用 (増加) する応力値や架設時の荷重等の補強後に作用する荷重に対しては、鋼と CFRP の合成断面で負担する。

③ 補強後の断面は、1 桁に相当する曲げモーメントが、補強後の許容抵抗曲げモーメントを超えないことを確認する。ただし、鋼部材のみで算出される局所応力を考慮しない許容応力度で決定される抵抗曲げモーメントを上限とする。

$$M_{act} - M_{cr} - M_{dc} / M_e \text{ 式(4.8-2)}$$

ここで、 M_{act} : 補強後の許容抵抗曲げモーメント
 M_{cr} : 補強前の許容抵抗曲げモーメント
 M_{dc} : 補強後の合成断面で有効断面積を算出した鋼桁断面での局所座屈に対する基準曲げ耐力
 M_e : 補強後の鋼桁断面で算出される局所座屈に対する基準曲げ耐力

(4) 炭素繊維シートの貼付は、腹板に対しては両端から貼付するものとし、層数は均等であることを原則とする。

また、圧縮フランジに対しては、片側から貼付することを基本とする。

図 4-8-1 CFRP の腹板接着範囲 (圧縮側)

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

施工について

①圧縮フランジの有効断面積

$$\frac{b_f}{b} = \left(\frac{b_f}{b} \right)^{0.64}$$

ここで、 b_f : 圧縮フランジの片側有効断面積 (mm)、 b : フランジの片側幅 (mm)。
 R_f : フランジの幅厚比パラメータ

$$R_f = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \sqrt{\frac{f_a}{E_s}} \frac{b}{t_{gs}}$$

ここで、 f_a : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸から圧縮側の腹板片側有効断面積 (mm)、 b : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸高さ (mm)、 R_f : 腹板の幅厚比パラメータ

②圧縮腹板の有効断面積

$$\frac{h_w}{h} = \left(\frac{h_w}{h} \right)^{0.60}$$

ここで、 h_w : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸から圧縮側の腹板片側有効断面積 (mm)、 h : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸高さ (mm)、 R_w : 腹板の幅厚比パラメータ

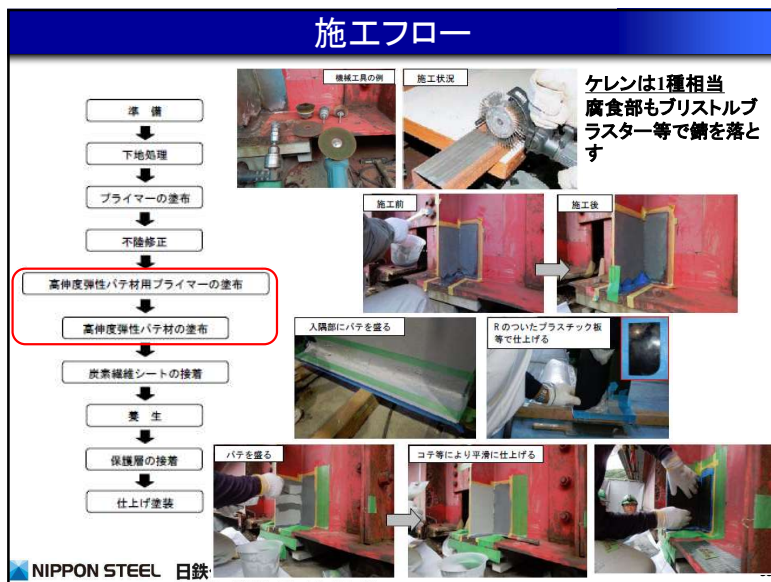
$$R_w = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}} \sqrt{\frac{f_a}{E_s}} \frac{h_w}{t_{gs}}$$

ここで、 f_a : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸から圧縮側の腹板片側有効断面積 (mm)、 h_w : 鋼と炭素繊維シートの鋼換算厚の合成断面で算出される中立軸高さ (mm)、 R_w : 腹板の幅厚比パラメータ

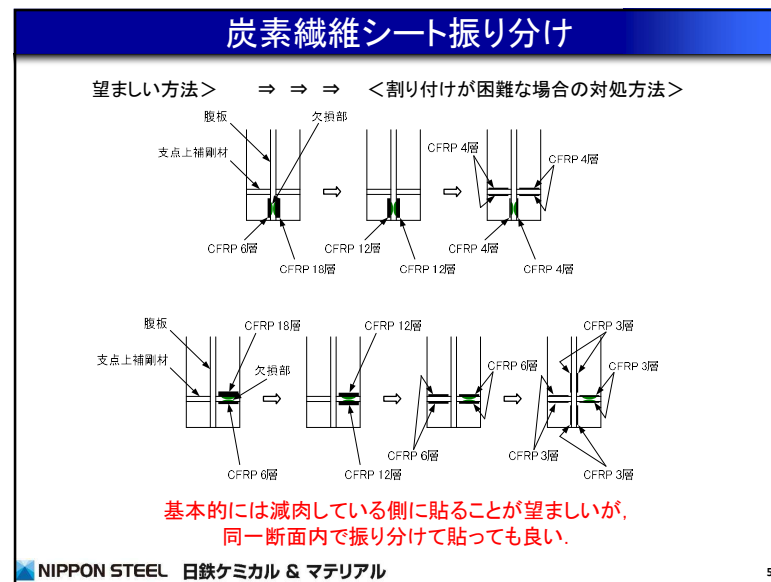
鋼桁軸方向、軸直角方向交互に貼付する。

鋼と炭素繊維を合成断面として考え、幅厚比パラメータを算出し、許容抵抗曲げモーメントを決定する。

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル



53



54



55



56

PL-CF工法の適用例② 支点反力

湖辺底橋 2014年施工

- ・ 所在: 沖縄自動車道
- ・ 形式: 鋼2径間+3径間+2径間連続鉄桁橋
- ・ 対象部位: 支点上十字断面
- ・ 目的: 腐食補修



補強前



不陸修正パテ施工



炭素繊維シート工完了



塗装完了

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

61

61

PL-CF工法の適用例③ せん断

田尻川橋 2015年施工

- ・ 所在: 北陸自動車道
- ・ 形式: 鋼単純活荷重合成桁
- ・ 対象部位: 桁端のウェブ
- ・ 目的: 腐食補修



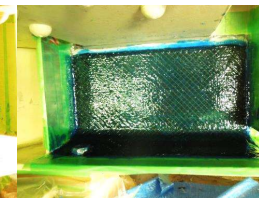
補強前(ケレン後)



+45° 方向シート施工



-45° 方向シート施工



補強後

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

62

62

PL-CF工法の応急補修例

駒飼橋 2016年施工

- ・ 所在: 中央自動車道
- ・ 形式: 鋼トラス橋
- ・ 対象部位: ガセット
- ・ 目的: ガセットの内面腐食補修
- ・ 定点カメラにてモニタリング



補強前(ケレン後)



ポリウレパテ



シート施工



施工完了

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

63

63

PL-CF工法の適用例

大島大橋 2019年施工

- ・ 所在: 国道437号標識 大島郡周防大島町間の大島瀬戸に架かる橋
- ・ 形式: 鋼単純活荷重合成桁
- ・ 対象部位: 連続鋼トラス
- ・ 目的: 衝突事故応急対策および併設トラス

上弦材(圧縮部材)の
座屈防止の応急補強上弦材(圧縮部材)の
座屈防止の応急補強

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

64

64

PL-CF工法の緊急補修例

柏橋 2020年施工

- 所在: 札幌市
- 形式: 鋼板桁橋
- 対象部位: 下フナラジ
- 目的: 変形による耐力低下の回復
- 補強後にひずみの低下を確認。
- 応急ではなく、恒久補修。



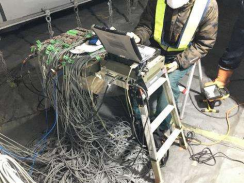
変形部補強後



ひずみゲージ貼付状況



載荷状況



計測状況

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

65

PL-CF工法の緊急補修例

歩道橋 多数

- 所在: 各所
- 形式: 鋼製人道橋
- 対象部位: 鋼製橋脚
- 目的: 地際腐食補修



腐食部不陸修正



ひずみゲージ貼付状況



載荷状況



施工完了

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

66

PL-CF工法の補強例

トラス橋 多数

- 所在: 東名高速道路
- 形式: 鋼トラス橋
- 対象部位: 上下弦材, 斜材, 垂直材
- 目的: 活荷重対応(補強)



上弦材施工状況



斜材裏面施工状況



当て板とCF併用



全景

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

67

PL-CF工法の適用例

FORCA PL-CF工法施工実績
【鋼部材補修工】

平成30年4月1日現在

施主	案件名	時期	内容
1 西日本高速道路株式会社	関西支社橋梁保全工事 (内府市高架橋 鋼部材補修)	13. 06	主桁桁端、CS-30、AK20BW
2 西日本高速道路株式会社	九州支社橋梁保全工事 (八木山・福ヶ谷橋)	13. 11	トラス斜材、CS-30、AK20BW
3 西日本高速道路株式会社	神岡自動車道 周辺改修	14. 01	主桁桁端、CS-30、AK20BW
4 首都高速道路株式会社	災害応急復旧工事	15. 07	主桁ウェブ、下フランジ、CS-80、AK20BW
5 民間	サンマークタワー17F 鋼材腐食部補修工事	15. 07	鋼材補修
6 中日本高速道路株式会社	瀬田内橋	15. 08	主桁桁端、CS-30、AK20BW
7 中日本高速道路株式会社	北陸自動車道 山ノ内橋鋼部材補修工事	15. 10	主桁桁端、CS-30、AK20BW
8 民間	木口屋橋 腐食補修	15. 11	CS-30、AK20BW
9 神奈川県大和市	平成27年度橋梁補修工事	16. 01	CS-30、AK20BW
10 静岡市	興津大橋	16. 05	CS-30、AK20BW
11 首都高速道路株式会社	土木維持補修 (首都高7号小松川線277)	16. 05	主桁桁端、CS-30、AK20BW
12 川崎市	都野路橋梁補修工事	16. 06	主桁ウェブ、CS-30、AK20BW
13 首都高速道路株式会社	土木維持補修 (首都高7号小松川線311)	16. 06	主桁桁端、CS-30、AK20BW
14 西日本高速道路株式会社	平成28年度橋梁保全工事 (天降川橋)	16. 06	トラス下弦材、CS-30、AK20BW
15 中日本高速道路株式会社	中央自動車道 駒形橋	16. 06	トラスセット、CS-30、AK20BW
16 首都高速道路株式会社	土木維持補修28-2	16. 08	主桁桁端、CS-30、AK20BW
17 東日本高速道路株式会社	都心自動車道 大泉高架橋地区橋梁補修工事	16. 08	橋脚、PL-CF工法、CS-30、AK20BW
18 伊勢市	平成28年度 新赤穂大橋橋梁補修工事	16. 11	CS-30、AK20BW
19 東京都	都心橋梁補修工事	16. 11	CS-30、AK20BW
20 国土交通省国土政策局道路局	白比橋	17. 01	主桁ウェブ、フランジ、CS-30、AK20BW
21 横浜市	新横浜歩道橋耐震補修工事	17. 06	歩道橋上部工、CS-30、AK20BW
22 西日本高速道路株式会社	NECO西日本九州支社橋梁保全工事 (小倉南橋)	17. 07	CS-30、AK20BW
23 西日本高速道路株式会社	中国東部支社 (神奈川支社) 市川橋 (上り橋) 和洋橋梁補修工事	17. 10	鋼1500、AK20BW
24 中日本高速道路株式会社	北陸自動車道 庄川橋主桁部修理工事	17. 10	CS-30、AK20BW
25 東日本高速道路株式会社	NECO山ノ内支社 電柱補修	17. 10	電柱、H8000
26 下関市	下関駅前人工地盤改良工事	17. 11	CS-30、AK20BW
27 中日本高速道路株式会社	金沢高架橋 (東海東名区)	17. 11	主桁下フランジ、CS-30、AK20BW
28 中部地整 北勢出道事務所	竹谷橋・山ノ内橋	18. 01	CS-30、AK20BW
29 郡城市	小坂本橋 補修工事	18. 02	H8000、AK20BW
30 首都高速道路株式会社	(都)橋梁改良工事26-1-1	18. 02	鋼橋ウェブ、CS-30、AK20BW

2024年4月1日現在
123件の施工事例

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

68

その他 プラント関連

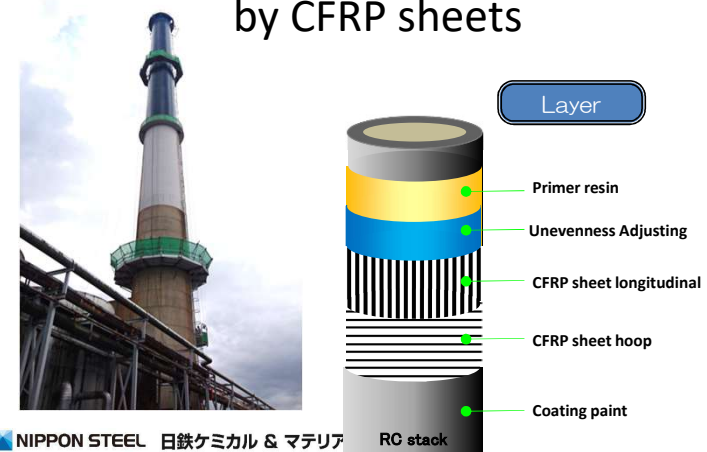
NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

69

69

Application examples

Seismic retrofitting for RC stack by CFRP sheets

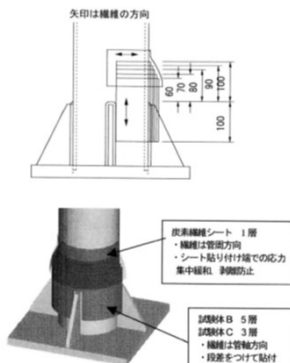


NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

70

Other application examples

- Countermeasure against fatigue of steel poll



Owing to high modulus CFRP strand sheet adhesion, the rate of crack propagation decreased from 1/6 to 1/7

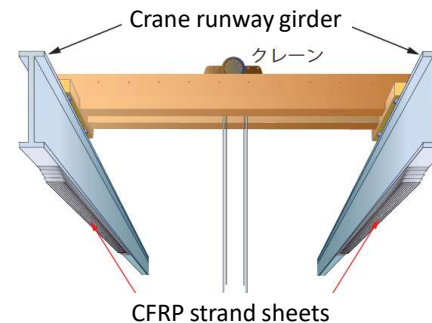
NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

71

Other application examples

For plant infrastructure

- Countermeasure against fatigue of crane runway girder of private factory



NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

72

Other application examples

For plant infrastructure



73

送電鉄塔

未来を創る、未来を拓く
For Your Dream & Happiness
hemMat

ターゲット: 送電鉄塔 (アングル部材)

目的: 腐食補修

従来工法: 当て板, 部材取替, 溶射

提案工法: 炭素繊維シート接着

⇒特徴: 軽量, 高強度, 高剛性, 高耐久性

接着のため母材にボルト孔や溶接熱が入らない

材料自体は高価であるが, 施工が簡便

橋梁ではマニュアル化されており, 実績も多数

課題: 腐食したアングル材に炭素繊維シート補修する知見は少ない

本検討: 腐食を模した円孔を有するアングル材を用い,

炭素繊維シート接着にて引張・圧縮耐力が回復することを確認

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

> 74 <

74

最新の開発について

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

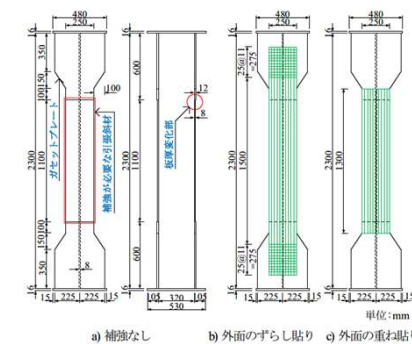
75

75

鋼トラス橋斜材の耐震補強工法

【概要】

- 鋼トラス橋の引張部材として設計された斜材を模した供試体における単調引張試験および交番載荷試験を実施し, 耐荷性能等を評価した。



(論文)

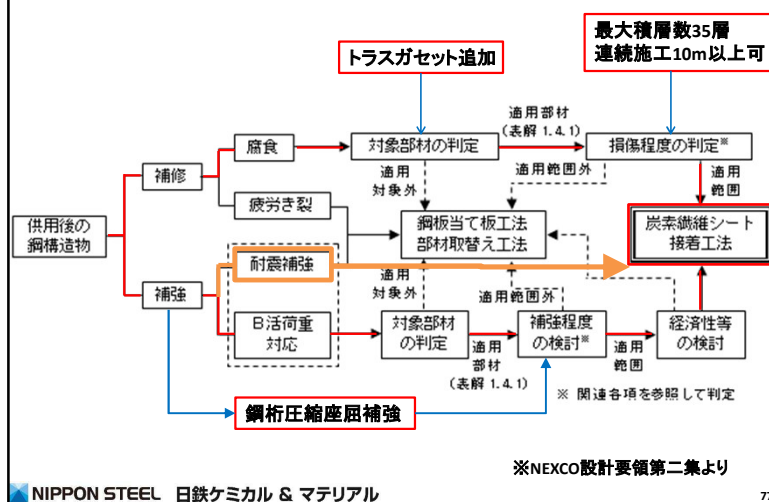
大垣ら: CFRPシートによるトラス橋H形断面斜材の耐震補強に関する実験的研究, 土木学会論文集A1, Vol.79, No.5, II_29-II_41, 2023

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

76

76

現在の工法選定フロー



77

限界状態設計法に関する取り組み

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

78

78

FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)

FRP接着による構造物の補修・補強指針(案) 委員長 大垣先生



- ①コンクリートのみならず鋼構造物のFRPによる補修・補強の設計・施工方法を示した
 - ②新しい補強用FRP材料や柔軟性樹脂などの諸元を示した
 - ③はく離破壊のメカニズムの考え方や補強された部材の耐久性評価法を規定した
 - ④接着接合に関する次の2つの試験法を示した。
 - ・補強用FRPの接着接合に用いる接合用材料と鋼材との接着試験方法(案)
 - ・鋼板と当て板の接着接合部における強度の評価方法(案)
- 参考資料
- ・FRP接着により補修・補強した構造物の性能照査例
 - ・FRP接着による構造物の補修・補強事例

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

79

79

土木研究所の取り組み

異種材料を活用した鋼橋の合理的な性能回復技術の開発に関する 共同研究

構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ

合理的に鋼橋の性能回復を図るためには、従来鋼による当て板や部材交換等の一般的な補修補強工法 だけではなく、**高強度・軽量なFRP**や高耐久性のステンレス鋼等、様々な材料の適材適所の活用が求められる。

今後、道路橋の技術基準類について新設橋だけでなく既設橋の修繕設計に対しても充実させていくことが求められており、**限界状態設計法及び部分係数法に基づく既設橋の性能回復のための設計施工法等**について検討を進める必要がある。

本共同研究では、**新しい材料を活用した補修補強方法の適用**による合理的な鋼橋の性能回復の実現に向けて、代表的な材料として**FRPにより補修した鋼桁部材**やステンレス鋼により部材更新した鋼上部構造の 状態を評価できる実務で適用可能な方法を提案するとともに、他の材料を用いて補修補強設計法を開発する際に参考となる技術資料の提示を目的とする。

2023年～共研開始(土研、大学、繊維補修補強協会)

NIPPON STEEL 日鉄ケミカル & マテリアル

80

80