

炭素繊維を用いた水圧鉄管の補強に関する検討

東電設計(株) 正会員 松本 正浩 三菱重工業(株) 正会員 ○小笠 勝
三菱重工業(株) 正会員 坂野 茂 東京電力(株) 金子 賢一

1. 目的

近年、腐食・磨耗等の経年劣化によって管胴の板厚が減少し、強度不足をきたしている水圧鉄管が見受けられる。そこで、炭素繊維シートとレジンとの複合体であるCFRPを水圧鉄管の外側に巻き立てることによる二重円筒効果を期待した水圧鉄管の補強法について、実機で試験施工を実施することにより、その補強効果を検討した。

2. CFRP補強工の設計

本補強工は、内水圧による円周方向の引張応力から管胴板厚が定まる水圧鉄管が、腐食等の原因で板厚減少した場合の補強を対象とし、既設鉄管の外面に隙間無くCFRPを巻き立てることにより二重管として内水圧に抵抗し、既設鉄管の円周方向応力の低減を期待するものである。

半径Rの二重円筒に均一に内水圧が作用した場合の応力状態は、理論的には主応力状態にあり、既設鉄管とCFRPとの接触面には、ずれせん断力は発生しないと考えられる。この時、既設鉄管とCFRPと間に間隙が無いと仮定し、鉄管管胴とCFRPの厚さが管半径に比べ十分に小さいと仮定すると、近似的に、既設鉄管の半径方向膨張変位(δ₁)及びCFRPの半径方向膨張変位(δ₂)は、それぞれ(1)式及び(2)式で表される。

ここに、P₁:既設鉄管が負担する内圧、P₂:CFRPが負担する内圧、R:半径、t₁:既設鉄管の管胴板厚、t₂:炭素繊維シート1枚の厚さ、E₁:鋼の弾性係数、E₂:炭素繊維シートの弾性係数、n:炭素繊維シートの積層数を表す。

$$\delta_1 = \frac{P_1 R}{E_1 t_1} \quad \cdots \cdots (1),$$

$$\delta_2 = \frac{P_2 R}{n E_2 t_2} \quad \cdots \cdots (2),$$

また、両者の半径方向膨張変位は等しく、両者が負担する内水圧の和は、管内面に作用する内水圧に等しいから、(3)式及び(4)式が成り立つ。

$$\delta_1 = \delta_2 \quad \cdots \cdots (3),$$

$$P = P_1 + P_2 \quad \cdots \cdots (4)$$

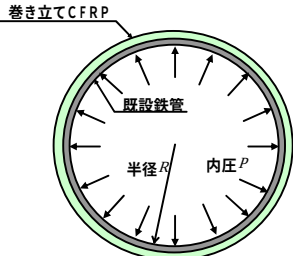
これより、(3)式へ(1)式、(2)式及び(4)式の関係代入すると、鉄管の応力低減率に応じた炭素繊維シートの積層数nを(6)式により算定できる。

$$n = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} \cdot \frac{P - P_1}{P_1} \quad \cdots \cdots (5)$$

3. 試験施工

試験施工を写真－1に示す内径1.676mの既設水圧鉄管において、弾性係数の異なる2種類の炭素繊維シート（高弾性品及び超高弾性品）を用いて、平成14年11月に、それぞれ1.5m長さの区間を実施した。試験施工に用いた炭素繊維シートの物性値及び積層数を表－1に示す。積層数は、既設鉄管の円周方向応力を25%低減することを目標に、(5)式によりP₁=0.75Pとして定め、高弾性品を9層巻き、超高弾性品を7層巻きとした。

写真－2に施工完了後の状況を示す。



図－1 二重円筒モデル



写真－1 試験施工現場



写真－2 施工完了後の状況

表－1 炭素繊維シートの物性と積層数

炭素繊維の種類	炭素繊維目付(g/m ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	一枚の厚さ(mm)	試験施工時積層数
高弾性品	310	3,880	4.36×10 ⁵	0.163	9
超高弾性品	314	2,200	6.27×10 ⁵	0.143	7

キーワード 炭素繊維、水圧鉄管、補強

連絡先

〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計第一土木本部水力部
〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1 三菱重工業(株)神戸造船所鉄構部
〒100-0011 東京都千代田区幸町 1-1-3 東京電力工務部工務土木グループ

T E L 03-4464-5042 F A X 03-4464-5190
T E L 078-672-5546 F A X 078-672-5564
T E L 03-4216-3866 F A X 03-4216-6943

以下に、施工上留意した点について記す。

- 1) 本水圧鉄管は、リベット継手であったため、継手部で炭素繊維シートの曲率が極端に変化しないよう、継手部を不陸修正材により滑らかに擦り付けた。
- 2) 理論上、鉄管とCFRPとの間の接着力を期待する必要はないが、両者の線膨張係数の相違で、温度変化による隙間の発生が懸念されたため、施工にあたっては、既存塗装の撤去、下地処理及びプライマ塗布を実施している。
- 3) レジンには、冬季の施工性を考慮してメタクリル系樹脂を使用した。
- 4) CFRP外面には、耐候性を考慮してウレタン系上塗り塗装を実施している。

4．補強効果の確認

施工完了後、補強効果を確認する目的で、応力計測をレジンの養生完了後0～3ヶ月にわたりおよそ1ヶ月ごとに計4回実施した。荷重は、予め空水状態にした水圧鉄管を満水の状態にまで充水することにより内水圧を付与している。ひずみ計は、図－2に示すようにCFRP補強部及び無補強部それぞれ2断面について、1断面（円周）につきほぼ均等な間隔で8箇所計測した。

計測結果の一例を図－3、図－4及び表－2に示す。図－3は、第1回計測時の水位上昇に伴う鉄管ひずみの変化を示しており、補強を施したB、C断面のひずみ値が、無補強のA、D断面の値の約75％と、期待した通りの補強効果が確認された。

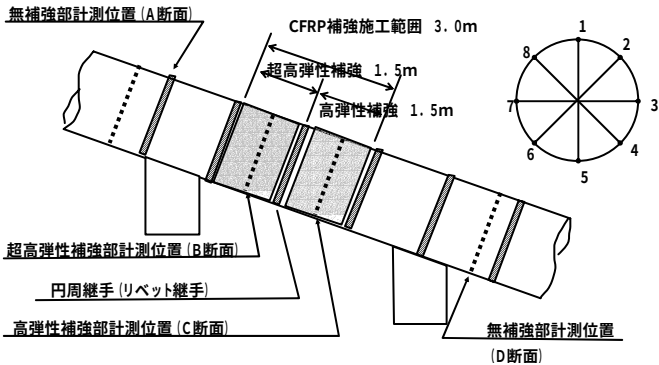
図－4は、A断面及びC断面の円周上のひずみ分布を示す。これより、ひずみの分布にバラツキが認められるものの、4回の計測値は安定しており再現性が確認できた。

表－2は、4回の計測結果について、満水時の断面ごとの平均値と理論値との比較を示すものである。これより、補強を施したB断面、C断面ともに理論値に比べて若干小さい計測結果が存在するものの、概ね期待通りの補強効果が確認でき、補強効率（実測値／理論値）は、平均すると95％程度であった。

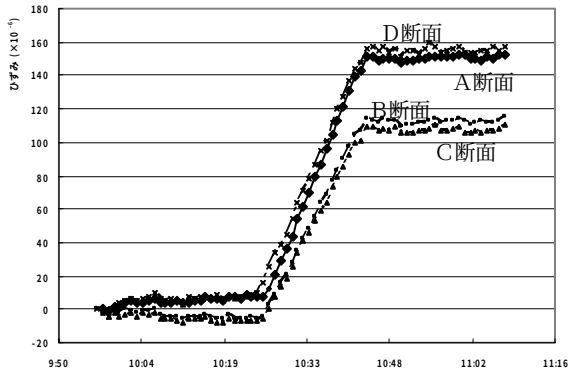
8．まとめ

本試験施工により、板厚が減少した水圧鉄管の補強方法として、CFRP巻き立ての有効性が確認できた。本補強方法は、従来法と比較して、短工期化（断水期間の短縮）が可能で、かつ、材料が軽量であることから山間部での施工性に優れており、今後、有力な補強方法と成り得ると考えられる。

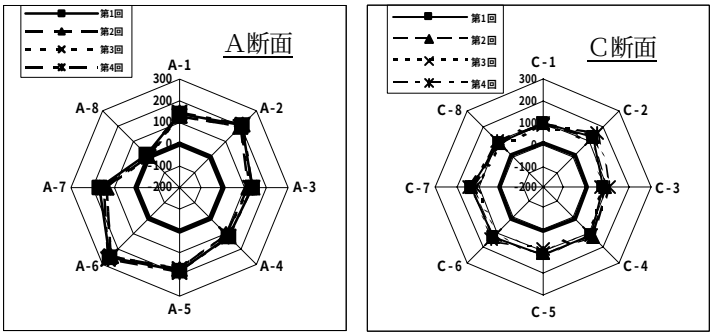
今回の試験施工では、一方向（周方向）のみの補強に着目したが、今後、管軸方向に対する補強についても検討を進めていきたい。



図－2 応力計測点



図－3 充水に伴うひずみの変化
（第1回計測、断面ごとの平均値）



図－4 円周上のひずみ分布

表－2 ひずみ計測結果（μ）

	理論値	第1回 (H14.12.19)	第2回 (H115.1.16)	第3回 (H115.2.13)	第4回 (H115.3.04)
A断面(補強なし)	155	153	139	139	153
B断面(補強あり)	116	115	114	106	125
C断面(補強あり)	117	111	110	95	121
D断面(補強なし)	155	158	145	141	161