論文　酸性河川内のコンクリート橋脚の侵食対策を目的としたチタンシートを用いた表面被覆工法の開発

園部　了[*1]・田中　健[*2]・草野　賢一[*3]・羽渕　貴士[*4]

要旨：強酸性河川中にコンクリート構造物を構築する場合，コンクリート自体の抵抗性だけでは酸によって侵食を受け，流石等による衝撃や磨耗により表面が欠損し，さらに侵食が進行することが懸念される。その対策として，優れた耐食性や耐衝撃性を有するチタンシートを用いた表面被覆工法に着目し，酸性河川中の構造物の表面被覆工法として必要な性能を抽出した上で，それらを確認するために基本性能確認試験を行った。その結果，チタンシートを用いた表面被覆工法が，強酸性水および衝撃の影響を受けるコンクリート構造物の表面被覆工法として優れた性能を有することが確認された。

キーワード：表面被覆工法，耐酸性，チタンシート，侵食対策，耐衝撃性

1. はじめに

一般に，温泉環境にある構造物などの厳しい酸性劣化環境に曝されるコンクリート構造物では，コンクリート自体の抵抗性だけで酸による侵食に対する耐久性を確保することは難しく，酸による侵食を抑制するために表面被覆などの対策を施すことが現実的かつ合理的であるとされている[1)]。酸性河川中に構築するコンクリート構造物においては，河川水によって表面が侵食を受け，そこに流石や漂流物などによる衝撃や磨耗が生じることにより表面が欠損し，さらに侵食を受けることが懸念される。したがって，強酸性河川中にコンクリート構造物を構築する場合，コンクリート表面が侵食や欠損することを防止するため，耐酸性と耐衝撃性の両方の性能が優れている対策を行うことが不可欠である。

その対策として，鉄筋かぶりを大きくすることやコンクリート自体の耐酸性や耐衝撃性を向上させることなどが考えられるが，これらは構造物の死荷重の増加や河川阻害率の増大，または大幅なコストアップといった多くの課題を有している。

そこで，酸性河川中に構築するコンクリート橋脚の表面保護対策として表面被覆工法に着目し，優れた耐食性や耐衝撃性を有するチタンシートを用いた表面被覆工法の検討を行った。

実構造物の適用に向けて，酸性河川中に構築するコンクリート橋脚に適用する表面被覆工法として要求される性能を整理し，本工法の適用性を基本性能確認試験によって確認した。

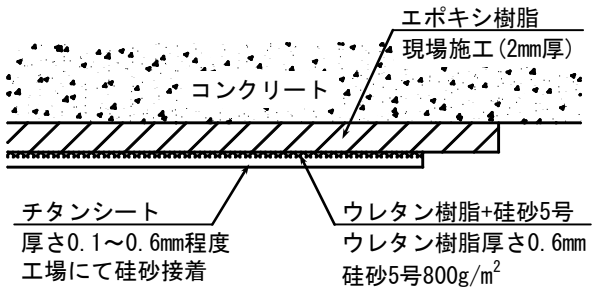
本文では，チタンシートを用いた表面被覆工法の概要および酸性河川中に構築するコンクリート橋脚に要求される性能に対する基本性能確認試験の結果を示し，このような構造物への本工法の適用性について述べる。

2. 本工法の概要

チタンシートを用いた表面被覆工法の仕様を**図－1** に示す。

チタンシートを用いた表面被覆工法は，優れた耐食性，耐衝撃性を有する材料であるチタンシート表面にウレタン樹脂を用いて硅砂を接着させたものを，現場においてコンクリート表面にエポキシ樹脂で接着する工法である。

*1 東亜建設工業（株）　技術研究開発センター新材料・リニューアル技術室研究員　工修(正会員)
*2 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構　鉄道建設本部　東北新幹線建設局　青森鉄道建設所長
*3 東亜建設工業（株）　東北支店　青森荒川作業所長
*4 東亜建設工業（株）　技術研究開発センター新材料・リニューアル技術室長　博(工)(正会員)



図－1　本工法の標準的な仕様

チタンシートを用いた表面被覆工法に使用される材料ごとの特徴および仕様を以下に示す。

(1) チタンシート

チタンシートは，JIS H 4600「工業用純チタン」に規定されている 1 種に準じており，99.8%以上の純度を有し，表面が厚さ数十Åから百数十Åの化学的に非常に安定した自然酸化膜(不動態皮膜)に覆われているため，各種の酸やアルカリ，海水等の環境において耐食性に優れた材料である [2)]。また，鉄と同程度の引張強度(382N/mm^2)や加工性を有し，熱膨張係数も 8.4×10^{-6}/℃でコンクリートや鋼材(12.0×10^{-6}/℃)と大きな違いはない。また，金属特有の耐衝撃性や耐摩耗性が期待できる。

チタンシートは，建築用部材として加工整形のしやすい厚さ 0.1mm～0.6mm のものが使用されており，構造物が位置する環境に応じてチタンシートの厚さを検討する。

(2) ウレタン樹脂+硅砂

チタンシートの表面に，硅砂を JIS K 5656「建築用ポリウレタン樹脂塗料」で規定されたウレタン樹脂により接着させておくことにより，付着性が向上することや，ウレタン樹脂の有する弾性によって外力による衝撃を緩和させる機能が期待できる。

硅砂は，4 号(粒径 0.5mm～1.2mm)，5 号(粒径 0.3mm～0.6mm)，6 号(粒径 0.1mm～0.4mm)のものをチタンシート表面にウレタン樹脂を用いて接着させ，JSCE-K 531 に基づき付着強さ試験を行った。最も付着強さが得られたのが硅砂 5 号(粒径 0.3mm～0.6mm)を接着させた場合であり，このときの 1m^2 あたりの硅砂平均散布量は 800g/m^{2}であった。

また，チタンシート表面にまんべんなく硅砂を接着させることができるウレタン樹脂の厚さは 0.6mm であった。

(3) エポキシ樹脂

エポキシ樹脂でチタンシートをコンクリート表面に接着させることにより，酸性河川水などの劣化因子からコンクリート表面を保護する機能が期待できる。また，水中硬化型のエポキシ樹脂の使用により，水中部やコンクリート表面が湿っている場合でも施工が可能である。

エポキシ樹脂は，JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」で規定された硬質形で，低粘度および中粘度のものを使用し，チタンシートとコンクリート表面の隙間に充填する。エポキシ樹脂の充填厚さは，チタンシートを接着するコンクリート面の不陸の状態を考慮して 2mm 以上とした。

3. 基本性能確認試験

3.1 試験項目

表面被覆工法の基本的な要求性能としてコンクリートとの付着性が必要とされている [3)]。また，化学的侵食の劣化対策として用いる表面保護工に要求される性能項目には，耐酸性，耐アルカリ性，防水性があり，必要に応じてひび割れ追従性が必要とされている [3)]。また，酸性河川中を流れる流石や漂流物などによる衝撃や磨耗により表面が欠損し，さらに酸による侵食が進行することが懸念されるので，耐衝撃性や耐摩耗性も河川中の構造物に適用する表面被覆工法に要求される項目であると考えられる。

上記の要求性能の中で耐アルカリ性は，コンクリート自体が強アルカリ性であることからアルカリに対する表面被覆材への影響が考えられるが，チタンシートが耐食性に優れた材料であることと，エポキシ樹脂が耐薬品性に優れていることから，チタンシートを用いた表面被覆工法は耐アルカリ性を有していると考えられる。

表－1　基本性能確認試験の項目

性能確認項目	試験項目
付着性	付着強さ試験 （JSCE-K 531）
耐酸性	塩酸暴露試験
防水性	
耐衝撃性	おもり落下試験
耐摩耗性	摩耗輪による摩耗試験 （JIS K 7204）
ひび割れ追従性	三等分点載荷試験

以上より，付着性，耐酸性，防水性，耐衝撃性･耐摩耗性およびひび割れ追従性に関して確認することで酸性河川中に構築される構造物の表面被覆工法としての性能をすべて満足できると考えられる。各性能を確認するために**表－1**に示す項目に関する確認試験を行った。

耐酸性・防水性においては，チタンシート自体が耐食性を有するため，チタンシート表面からの侵食および河川水の侵入は考えにくく，チタンシートの継目部における酸の侵食および河川水の侵入について検討した。

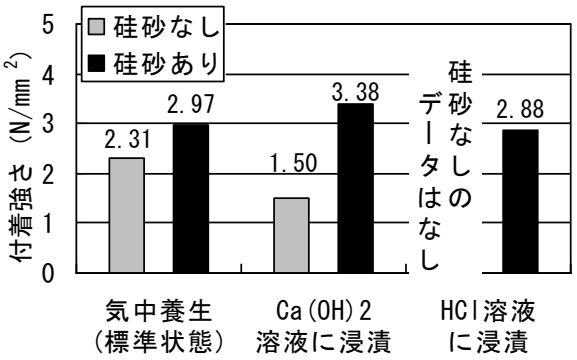
3.2 付着強さ試験

(1) 試験概要

チタンシート表面に硅砂を接着させることによってコンクリート表面との付着性の向上を図るために，ウレタン樹脂を用いて硅砂を接着したチタンシートと硅砂を接着させないチタンシートを，モルタル表面にエポキシ樹脂で貼り付けた供試体をそれぞれ作製し，標準状態の他に，アルカリや酸による影響を確認するために，負荷条件として飽和水酸化カルシウム溶液中に 28 日間浸漬後，pH1 塩酸溶液中に 6 ヶ月間浸漬後において JSCE-K 531 に基づき付着強さ試験実施した。

(2) 試験結果

試験結果を**図－2**に示す。硅砂を接着した場合，すべての条件において，付着強度は有機系被覆工法における評価基準値 1.0～1.5N/mm^2 以上[3]を十分に満足しており，全ての供試体においてモルタル自体が破壊していた。硅砂を接着しない場合，評価基準値を満足はしたが，エポキシ樹脂とチタンシートとの界面で剥離が生じた。



図－2　付着強さ試験結果

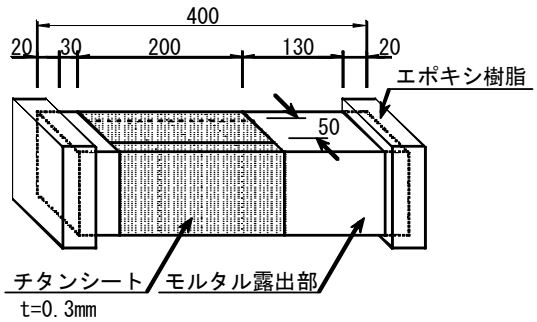
したがって，硅砂をチタンシートに接着することで付着強度が増加し，酸やアルカリによる厳しい腐食環境下においてもコンクリートとの一体性が向上することが確認できた。

3.3 塩酸暴露試験

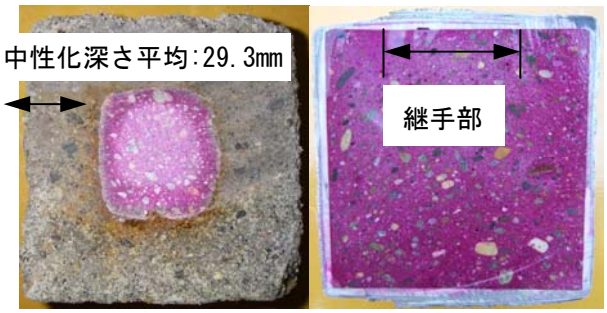
(1) 試験概要

チタンシート自体は耐食性に優れた材料であるが，酸性河川中のコンクリート構造物にチタンシートを被覆した場合，チタンシートの継手部または端部からの侵食が懸念される。そこで，**図－3** に示すチタンシート（継手部接着長さ 50mm）を貼り付けたモルタル供試体（普通ポルトランドセメント，W/C=50%，S/C=2.5）を pH1 塩酸溶液に浸漬し(pH1 は一般的な強酸性河川の水素イオン濃度 pH3 の約 25 倍の侵食速度[4])，暴露 3，6，15 ヶ月後におけるモルタルの中性化深さを測定することにより，チタンシートの継手部での耐酸性および防水性を評価した。

中性化深さの測定は，チタンシートの端部と



図－3　塩酸暴露供試体



モルタル露出部　　チタンシート部

写真－1　中性化深さの測定結果(15 ヵ月後)

継手部からの酸による侵食を確認するために横断方向と縦断方向に切断し，フェノールフタレイン法により行なった。

(2) 試験結果

中性化深さの測定結果(15 ヵ月後)の一例を**写真－1** に示す。

モルタル露出部の中性化深さは，暴露 3 ヶ月後では 4～6mm 程度，6 ヶ月後では 9～12mm 程度，15 ヶ月後では 26～32mm であった。一方，チタンシートの被覆範囲では，3,6 ヵ月後において中性化は見られなかったが，15 ヵ月後においてチタンシート端部付近にチタンシート背面への中性化が確認された。また，チタンシートの継目部からの酸による侵食および水分の侵入はいずれの供試体においても確認されなかった。

これより，チタンシートの継手長を 50mm 以上貼り重ねることによって，継手部からの酸による侵食の影響および河川水の侵入を十分に遮断できることを確認した。また，実施工においては，チタンシート端部からの酸性河川水による侵食が考えられるため，酸性河川水が影響を及ぼす高さまでチタンシートを用いた被覆を行う必要がある。

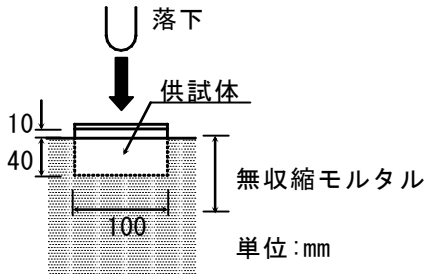
3.4 おもり落下試験

(1) 試験概要

河川流速 1，2，3，4m/sec の速度で径 20cm，重さ 10kg の流石がチタンシート表面に衝突する場合を想定したおもり落下試験を実施し，落下回数または損傷状況を**表－2** に示す各種被覆材料において確認を行った[5)]。

表－2　おもり落下試験の供試体の仕様

	材料名	材料厚	構　成
a	チタンシート	0.3mm	チタンシート t=0.3mm エポキシ樹脂 t=2.0mm モルタル　t=50mm
b	チタンシート	0.6mm	チタンシート t=0.6mm エポキシ樹脂 t=2.0mm モルタル　t=50mm
c	FRP 板	1.0mm	FRP 板　t=1.0mm エポキシ樹脂 t=2.0mm モルタル　t=50mm
d	エポキシ樹脂	2.0mm	エポキシ樹脂 t=2.0mm モルタル　t=50mm
e	モルタル(PCM)	80mm	モルタル(PCM)t=80mm



図－4　おもり落下試験

表－3　おもりの落下高さ

河川流速	おもりの落下高さ
1 m/sec	16 cm
2 m/sec	65 cm
3 m/sec	145 cm
4 m/sec	258 cm

換算式

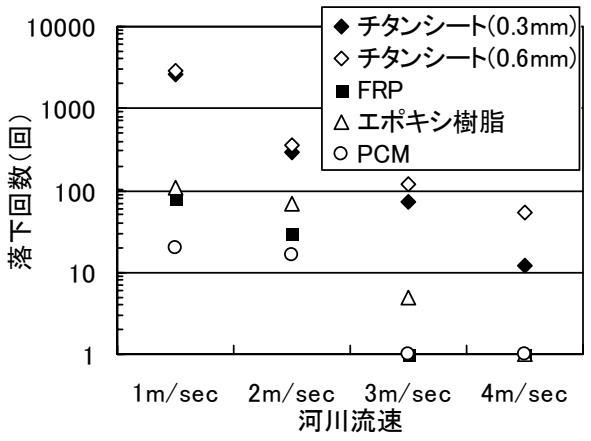
$$\frac{1}{2}mV^2 = mgh$$

供試体の形状は，**図－4** に示すように平面寸法は 100×100mm とし，供試体側面の損傷状況を確認するために 10mm 突出させ，残り 40mm を無収縮モルタルに埋め込んだ。

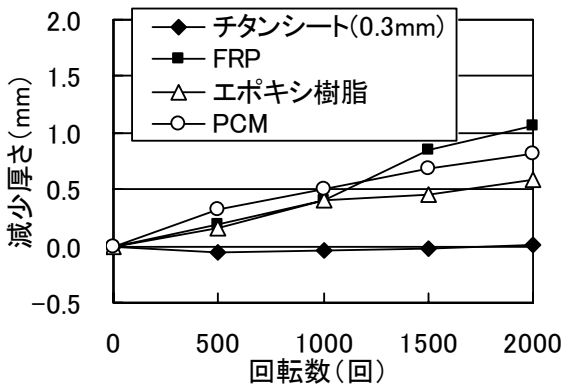
おもりは，先端を丸く加工した φ32mm（L=50cm，W=3.16kg）の丸鋼とし，前出の条件による衝突エネルギーから換算した**表－3** に示す高さから同じ位置に繰り返し落下させ，被覆材料が破壊に至るまでの落下回数を測定した。

(2) 試験結果

試験結果を**図－5** に示す。チタンシート(0.3mm, 0.6mm)は，表面に割れが発生するまでの落下回数が他の被覆材料の 10 倍以上あることから，他



図－5　流速と落下回数の関係



図－6　摩耗による減少厚さ

の被覆材料と比べて優れた耐衝撃性を保持していることが確認できた。

チタンシート厚さ 0.3mm と 0.6mm との比較では，厚さ 0.3mm の場合は衝撃によるチタンシートの変形は大きいもののエポキシ樹脂との剥離等は見られず，外力による衝撃に対して局所的な損傷に留まる傾向が見られた。厚さ 0.6mm の場合はエポキシ樹脂とチタンシートとの間に剥離が生じ，外力による影響範囲が厚さ 0.3mm の場合と比べて大きかった。

以上より，チタンシートによる被覆工法がチタンシート自体の延性やウレタン樹脂の弾性による衝撃の緩和の効果により，非常に優れた耐衝撃性を有していることが確認でき，また，チタンシートの厚さが薄いほど，チタンシートの延性による外力に対する衝撃緩和性を発揮し，チタンシートの厚さが厚いほど，衝突に対する抵抗性があると考えられる。

3.5 摩耗輪による摩耗試験

(1) 試験概要

JIS K 7204 に準じて，摩耗輪 H22（と粒結合材，方輪荷重 9.8N）を用いた摩耗試験を実施し，摩耗によるチタンシート(厚さ 0.3mm)の厚さの減少量を他の被覆材料と比較することにより耐摩耗性を評価した。比較材料は，おもり落下試験と同じものを用いた。

(2) 試験結果

試験結果を**図－6** に示す。厚さ 0.3mm のチタンシートは，2000 回転までほぼ摩耗が見られなかった。一方，FRP 板においては，1500 回転を越えた時点で摩耗輪が FRP 板を貫通し，エポキシ樹脂が露出した。また，エポキシ樹脂やポリマーセメントモルタルにおいても 0.6～0.8mm 程度の摩耗が確認された。

これより，チタンシートを用いた表面被覆工法は，金属特有の耐摩耗性を有するチタンシートを使用していることから他の被覆材料と比較すると耐摩耗性に優れていることが確認できた。

3.6 三等分点載荷試験

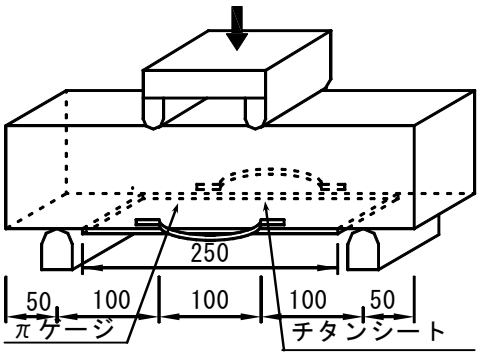
(1) 試験概要

図－7 に示すように，10×10×40cm のコンクリート供試体に厚さ 0.1mm のチタンシートをエポキシ樹脂で貼り付け，三等分点載荷試験を実施し，曲げ載荷により拡大するひび割れへの追従性を確認した。

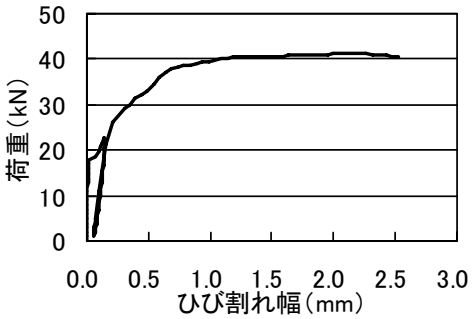
(2) 試験結果

試験結果の一例を**図－8** に示す。曲げ載荷試験において，ひび割れが発生してからひび割れ幅が 2.5mm 付近に至るまでチタンシート自体に割れや変形等の顕著な損傷は見られず，ひび割れ幅が 2.5mm に達した時点でチタンシートに引張による破断が生じた。この結果は，建設省総合開発プロジェクト(塩害)における評価基準値 0.2mm 以上[3)]を大きく上回っており，チタンシートを用いた表面被覆工法が優れたひび割れ追従性を有していることが確認できた。

この高いひび割れ追従性には，チタンシート



図－7　曲げ試験状況図



図－8　曲げ載荷試験結果

自体が破断するまで弾性効果のあるウレタン樹脂が追従していることや，硅砂を接着しているためエポキシ樹脂と十分な付着性を有していることが寄与していると考えられる。

4. まとめ

酸性河川中に構築される構造物の表面被覆工法として要求される性能を基本性能確認試験によって確認し，以下の結論を得た。

(1) 酸性河川においては，チタンシートの継目部における酸による侵食および河川水の侵入が懸念されるが，エポキシ樹脂を用いてチタンシートを 50mm 以上貼り重ねることによって継目部からの酸の侵食や河川水の侵入を遮断することが確認できた。

(2) 河川構造物においては，流石や漂流物などにより表面が欠損することが懸念されるが，チタンシート自体の延性やウレタン樹脂の弾性による衝撃緩和の効果により，チタンシートを用いた表面被覆工法が優れた耐衝撃性と耐摩耗性を有することが確認できた。

(3) ウレタン樹脂を用いてチタンシートの裏面に硅砂を接着させることにより付着強さが増加し，コンクリート構造物との一体性が向上することが確認できた。また，チタンシートが持つ延性およびウレタン樹脂が有する柔軟性によって優れたひびわれ追従性を有することが確認できた。

なお，チタンシートを用いた表面被覆工法に期待できるその他の特長としては，長期の耐用年数を要する構造物において，ライフサイクルコストの低減が期待できることやチタンシートの光沢によるきれいな仕上がり性が期待できることおよび薄いチタンシートを用いるため人力での施工が可能であることや構造設計上の制約を受けないことなどが考えられる。

また，本工法の施工性を確認するために橋脚モデル供試体を用いて，施工性確認試験を行い，本工法がコンクリート構造物との一体性および良好な施工性を有していることを確認した[6)]。

参考文献

1) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，p.30，2002.3
2) 木下和宏：チタンを活用した鋼構造物の防食工法，土木施工，Vol.41，No.15，pp.45-48，2000.11
3) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法　設計施工指針（案），p.25，p.35，p.147，p.154，2005.4
4) 坂本浩之：セメントモルタルの耐酸性に関する実験，土木技術資料，Vol.14th，No.8，1972
5) 鍋島益弘ほか：河川橋脚の補強にアラミドシートを併用した鋼板巻立工法の耐衝撃性等，日本道路会議論文集，Vol.24th，一般 B，pp.246-247，2001.10
6) 園部了ほか：酸性河川内のコンクリートに適用するチタンシートを用いた表面被覆工法の開発，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.6th，pp.203-208，2006.10