

実腐食凹凸部と当板ボルト接触面のすべり耐力低下特性と 向上技術に関する実験的研究

設計工学講座 坂本 健太

1. はじめに

一般的に、鋼橋における劣化現象として腐食損傷が挙げられる。腐食は鋼橋の桁端部で発生しやすく、腐食の進行に応じて、断面欠損および部材の破断が生じる。腐食部位への一般的な補修法として、図 1-1 の当板ボルト補修法が挙げられる。現行では、腐食表面に対し、鏽除去としての二種ケレンや減厚した不陸面にエポキシパテを充填し、当板との接触面を平滑化することが求められている。そのため、平滑処理を施すことなく補修効果が得られれば、補強効果を満足して、効果的かつ効率的な補修を行うことが可能となる。しかし、当板と腐食面の接触部は、腐食凹凸の影響ですべり耐力が低下することが懸念される。

本研究では、腐食凹凸度とすべり耐力低下特性の解明を行い、合理的なすべり耐力向上技術の提案を目的に、実橋梁より採取した腐食鋼板を用いたすべり試験¹⁾を実施した。

2. 実腐食凹凸部の評価

試験体に用いた鋼板は、実橋梁から採取した腐食鋼板 (SMA490, 公称板厚 9mm) である。実腐食凹凸度を評価するために図 2-1 の腐食鋼板をレーザー変位計で横 140mm×縦 100mm を 2mm 間隔で鋼板の表裏面を合計 7,000 点計測した。計測状況を図 2-2 に示す。鋼板の腐食深さは腐食表面最大高さから腐食表面までの距離の差と定義した。図 2-3 に腐食減肉量と腐食凹凸度の関係を示す。図より、強度低下に繋がる腐食減肉量の増加に伴い、腐食凹凸度が増加しているのが確認できる。これは減肉が進行すると鋼材表面の腐食凹凸が大きくなることを示している。なお、同図の線形近似式の相関値は $R=0.7157$ であり、一定の正の相関がある。また、腐食凹凸の例として、腐食度が異なる腐食表面とコンタ図、腐食深さのデータを図 2-4 に示す。腐食表面とコンタ図の関係は色の変化を見るものとする。腐食度小は、表面が一様で腐食が微小であるが、腐食度の増加に伴い、表面が斑模様になる。また、腐食鋼板一枚あたり腐食深さの比率である相対度数-腐食深さの関係より、腐食深さのバラつきが小さいと腐食度が小さく、バラつきが大きいと腐食度が大きいことも確認できる。以上のことより、本研究での腐食凹凸度は、腐食度小を 0.3 未満、腐食度中を 0.3 以上 0.6 未満、腐食度大を、0.6 以上として以降



図 1-1 当板ボルト補修法

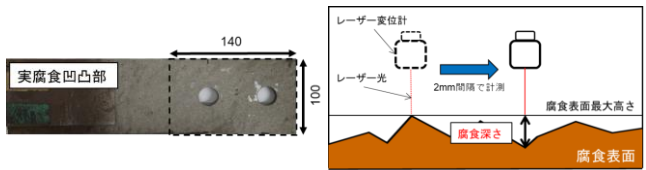


図 2-1 実腐食鋼板の一例

図 2-2 腐食深さ計測状況

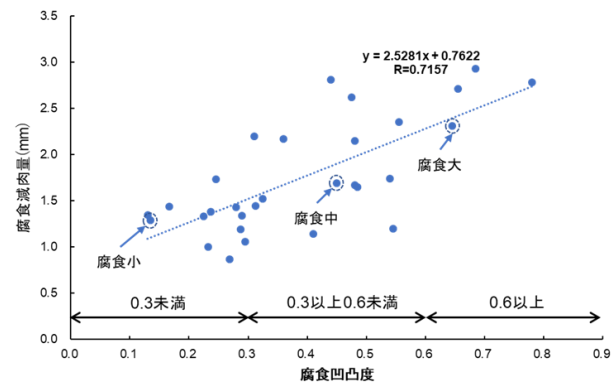


図 2-3 腐食減肉量-腐食凹凸度

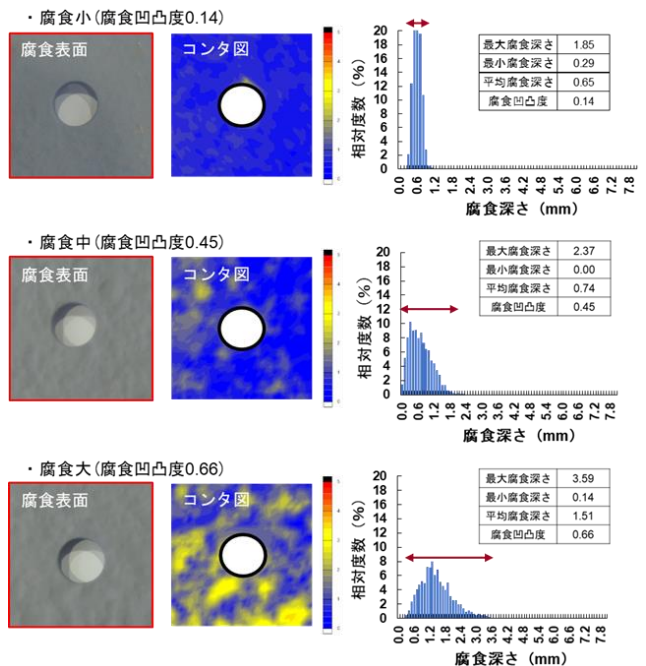


図 2-4 実腐食凹凸度評価

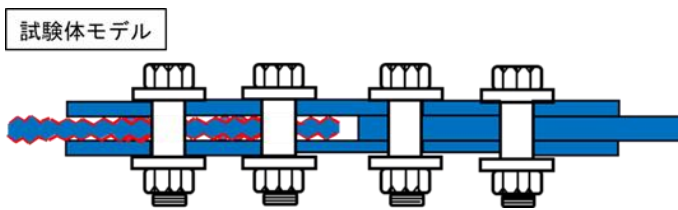


図 3-1 すべり試験体概要

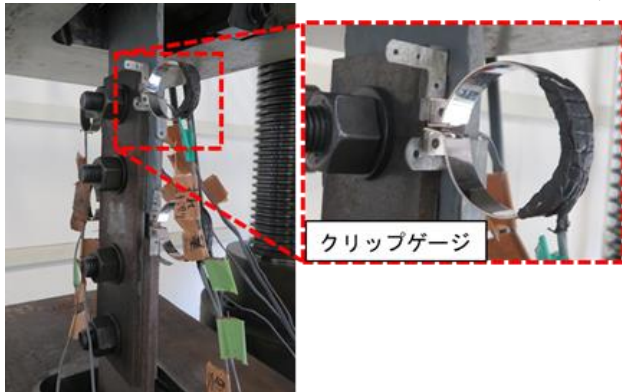


図 3-2 相対変位計測箇所

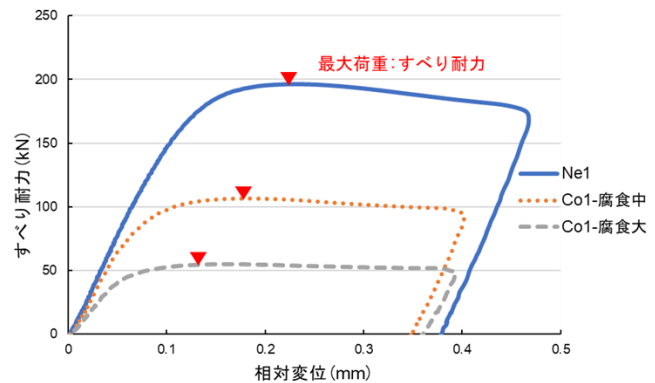


図 3-3 すべり耐力-相対変位

に考察に用いる。なお、本論文では、腐食度小は新材と同等に表面性状であるため、腐食度中と大の腐食鋼板のすべり耐力特性を評価する。

3. 腐食凹凸度と当板ボルト補修法のすべり耐力特性

3-1 試験体概要と試験試験パラメータ

本研究で用いたすべり試験体を図 3-1 に示す。組立時のボルトは F10TM20 の六角高力ボルトを使用し、腐食側のボルト軸部にひずみゲージを貼付け、道路橋示方書²⁾を参考に設計ボルト軸力:182kN に相当するひずみ値となるように組立した。なお、腐食側ですべりを先行させるために、設計ボルト軸力は所定の 50% の値を導入した。

また、鋼材表面の処理方法として、まず、表面の錆除去を目的に一種ケレンをし、次に、防食機能を有する無機ジンクリッチペイント(以下、防食皮膜)の塗装処理をした。防食皮膜理由は鋼材表面の粗度を均一化することを目的とし、粗度の影響を考慮せずに腐食凹凸度に応じたすべり耐力の確保である。防食便覧³⁾を参考に、試験パラメータとして、母材と当板それぞれの防食皮膜を 100 μ m と設定し、すべり試験を実施した。標準試験体として新材試験体が 3 体、実腐食凹凸を有する腐食材試験体が 17 体、合計 20 体である。

3-2 腐食凹凸度とすべり耐力低下特性

腐食凹凸度とすべり耐力低下特性は式①に示す、すべり試験より得られたすべり耐力をボルト軸力、接触面数、ボルト本数で除した摩擦係数による評価を行った。なお、本試験では、図 3-2 に示すように、すべりという現象を

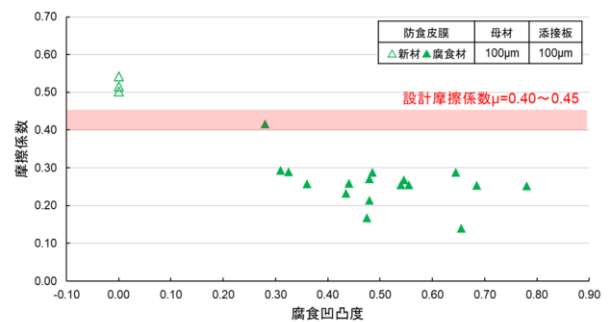


図 3-4 摩擦係数-腐食凹凸度

正確に判断するために母材と当板の対応箇所ですべり耐力を計測した。計測結果の一例を図 3-3 に示す。これより、すべりで荷重が減少した直前の値をすべり耐力と定義した。なお、すべり耐力の比較として、新材試験体と腐食材試験体の例も図中に示してある。

$$\mu = \frac{P}{N \times m \times n} \quad (1)$$

μ : 摩擦係数 P : すべり耐力

m : 接触面数 m : 接触面数 n : ボルト本数

図 3-4 は摩擦係数-腐食凹凸度の結果を示す。道路橋示方書²⁾を参考に腐食凹凸がない新材面の防食皮膜の設計摩擦係数は $\mu=0.40 \sim 0.45$ である。設計摩擦係数を基準とすると、新材試験体は設計摩擦係数を満足しているが、腐食凹凸度 0.30 以上では、設計摩擦係数の半分の値となった。

4. 当板ボルト補修法のすべり耐力向上技術

4-1. すべり耐力向上技術の検討と試験パラメータ

表 4-1 引張試験パラメータ

試験体	試験体名	使用鋼材	防食皮膜		ボルト本数	導入軸力	試験対象母材		当板		試験体数
			母材	添接板			板厚	材質	板厚	材質	
Ne	Ne1	新材	100μm		2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	3
	Ne2		300μm		2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	3
	Ne3		100μm	300μm	2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	1
	Ne4		300μm	100μm	2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	1
Co	Co1	腐食材	100μm		2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	17
	Co2		300μm		2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	18
	Co3		100μm	300μm	2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	6
	Co4		300μm	100μm	2	50%	9mm	SM490	9mm	SS400	6

前章の腐食凹凸度とすべり耐力低下特性より、腐食凹凸度 0.30 以上では設計摩擦係数の半分の値である。今回得られた結果を実際の補修時に適用するのであれば、補強効果を満足して、効果的かつ効率的な補修効果を得ることができない。そのため、合理的なすべり耐力を向上させる技術提案が必要である。

既往研究⁴⁾を参考に、腐食凹凸がない新材面に対して、防食皮膜の増加に伴い、摩擦係数が増加する傾向がある。この結果から、すべり耐力を向上させる技術提案として、防食皮膜の膜厚(以下、防食皮膜厚)に着目する。従って、試験パラメータとして、母材と当板の防食皮膜厚をそれぞれ 100μm と 300μm と設定し、すべり試験を実施した。表 4-1 に試験体パラメータを示す。パラメータとしては、母材と当板が同じ防食皮膜厚の新材試験体(Ne1, Ne2)が 6 体、腐食材試験体(Co1, Co2)が 35 体。母材と当板で異なる防食皮膜厚の新材試験体(Ne3, Ne4)が 2 体、腐食材試験体(Co3, Co4)が 12 体。合計 55 体である。

4.2. 腐食凹凸度とすべり耐力向上技術の提案

腐食凹凸度とすべり耐力特性の評価は節 3-2. に記載してある。

図 4-1 は摩擦係数-腐食凹凸度の結果を示す。図 3-4 と同様に道路橋示方書²⁾の設計摩擦係数 $\mu=0.40\sim0.45$ をもとに評価した。本試験における評価は防食便覧³⁾を参考に、母材と当板の防食皮膜 100μm の結果を基準とする。母材と当板が同じ防食皮膜厚では、防食皮膜厚の増加に伴い、すべり耐力が向上した。また、母材と当板で異なる防食皮膜厚でも、すべり耐力が向上した。つまり、防食皮膜厚の増加がすべり耐力向上に寄与することが確認できる。なお、今回の試験結果において、最も高い摩擦係数が確保できるのは、母材と当板が同じ防食皮膜厚 300μm である。

実験結果より、合理的なすべり耐力を向上させる技術として、現場での施工状況を鑑み、確実な摩擦係数を確保するために腐食凹凸を有する母材の防食皮膜厚 300μm、経済性を考慮して工場製作の新材面の当板は防食皮膜厚 100μm を提案する。

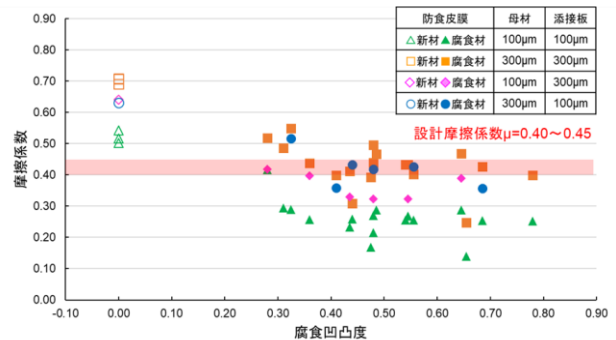


図 4-1 摩擦係数-腐食凹凸度

4.3. 防食皮膜厚増加に伴う接触面のすべり痕

図 4-2 にすべり発生後の接触面のすべり痕を示す。接触面は防食皮膜厚 100μm の新材試験体(Ne1)が 1 体と腐食材試験体(Co1)が 1 体、防食皮膜厚 300μm の腐食材試験体(Co2)が 1 体の合計 3 体である。

まず、防食皮膜厚 100μm の新材試験体(Ne1)は、腐食凹凸がない新材面である。そのため、母材と当板との接触痕がボルトの締め付け軸力によって、ボルト孔周りに均一に分布している。

次に、防食皮膜厚 100μm と 300μm の腐食材試験体(Co1, Co2)は、両者とも、母材の腐食凹凸の影響で当板との接触痕が不均一である。また、腐食凹凸の凸部により、防食皮膜厚 100μm は、防食皮膜が完全に剥離し、防食皮膜塗装前の鋼材の金属光沢が確認できる。しかし、防食皮膜厚 300μm は、100μm と同様に防食皮膜塗装前の鋼材の金属光沢が確認できるが、接触痕の周りに防食皮膜が一部、残っている(以下、残留皮膜厚)。つまり、防食皮膜厚を増加することで、腐食凸部と当板との接触している箇所が増加したと考えられる。以上の結果より、防食皮膜厚の増加で、腐食凸部と当板の接触面積が増加し、すべり耐力が向上したと推察する。

4.4. 断面マクロ観察による防食皮膜厚とすべり特性

図 4-3, 図 4-4 に防食皮膜厚 100μm と 300μm の腐食材試験体の断面マクロ観察結果を示す。図 4-3 の腐食凸部拡大図より、腐食凸部で防食皮膜が完全に剥離しているの

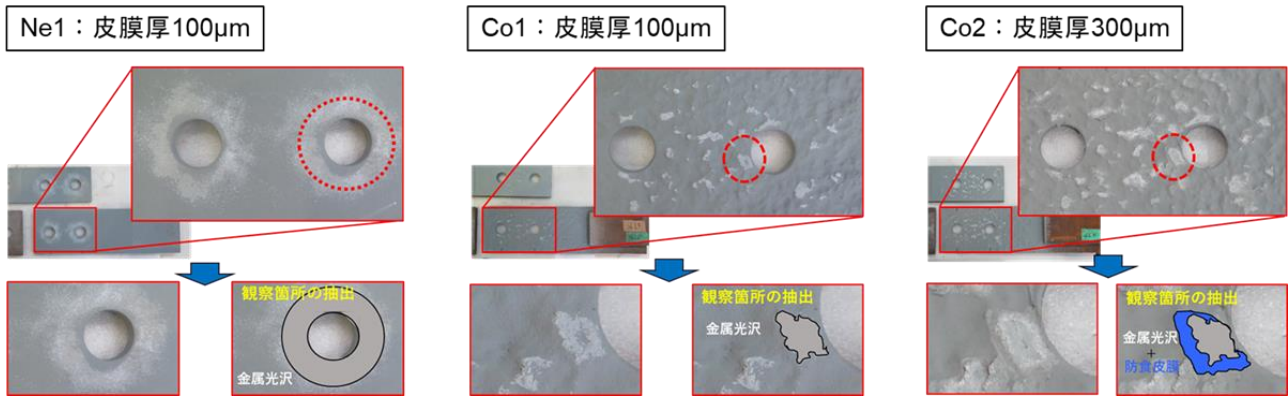


図 4-2 すべり発生後の接触面結果

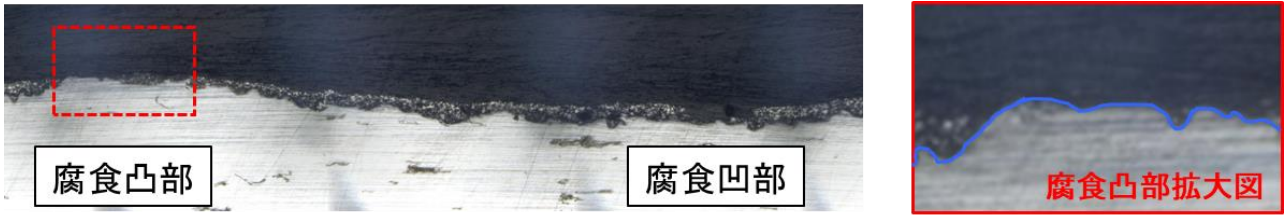


図 4-3 断面マクロ観察結果(防食皮膜厚 100µm)

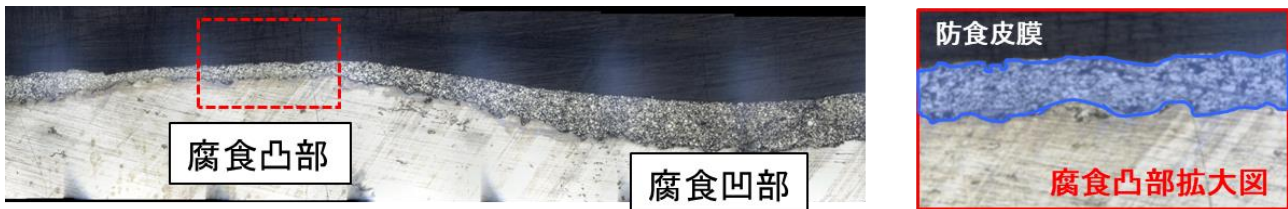


図 4-4 断面マクロ観察結果(防食皮膜厚 300µm)

が確認できる。図 4-4 の腐食凸部拡大図では、腐食凸部で防食皮膜が一部残っているのが確認できる。以上の結果より、腐食凸部と当板との接触部で、せん断抵抗力が増加し、すべり耐力が向上したと推察する。

5. 結論

本研究では、腐食凹凸度とすべり耐力低下特性の解明を行い、合理的なすべり耐力向上技術の提案を目的に、実橋梁より採取した腐食鋼板を用いたすべり試験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 鋼材の腐食度は、強度を示す腐食減肉量に対して、一定の相関があるので、すべり面の評価パラメータとして定義した。
- 2) 腐食凹凸度 0.3 以上では、設計摩擦係数の半分の値となり、腐食凹凸度に応じて低下するすべり耐力特性を解明した。
- 3) 合理的なすべり耐力を向上させる技術として、現場での施工状況を鑑み、確実な摩擦係数を確保するため腐食凹凸を有する母材の防食皮膜厚 300µm、新材の当板は防食皮膜厚 100µm を提案した。
- 4) 防食皮膜厚の増加がすべり耐力特性に与える影響は、防食皮膜厚を増加することで、腐食凸部と当板の接触面積の増加と腐食凸部と当板との接触部

のせん断抵抗力の増加による2つの要因で、すべり耐力が向上したと推察した。

本研究により、腐食凹凸度 0.3 以上では、設計摩擦係数の半分の値となり、腐食凹凸度とすべり耐力低下特性が解明された。また、腐食凹凸面に対し、防食皮膜厚の増加ですべり耐力が向上する、合理的な技術を提案した。今後は、腐食凹凸度 0.3 未満の腐食鋼板を用い、腐食凹凸度とすべり耐力特性評価を一般化し、腐食凹凸度に応じた合理的な当板ボルト補修法を明確にする。また、現場の施工に多用されている有機系ジンクリッジペイントや金属溶射法による防食皮膜処理の適用性を検証し、防食皮膜材ごとで評価し、腐食凹凸面に対する効果的かつ効率的な補修方法を確立する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), pp.34-59.2006.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋.2012.3.
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧・第II編塗装編, II-65.2014.3
- 4) 丹波ら：接合面が鋼材粗面と無機ジンクリッジペイント面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No1, pp.137-149.2014.