

腐食した鋼構造物の残存性能評価および性能回復技術

2007 年 5 月

土木学会 鋼構造委員会

鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会

まえがき

老朽鋼構造物およびその構成部材の物理的寿命の主要因は、疲労とともに腐食による劣化・損傷であることは周知の通りである。したがって、鋼構造の耐久性向上に対する要求が高まる中、この腐食に伴う構造全体および構成部材の残存耐力の適切な評価、および計画・設計から維持管理に至る鋼構造物のライフタイムを包含する鋼構造物の防食設計法の確立が重要になっている。しかし、腐食による残存耐荷性能および使用性能、さらに長寿命でかつ維持管理費用を最小にする防食法、将来の劣化予測などに関する研究は不十分であり、防食設計に関する技術規準も整備されているとは言い難い状況にある。

このような状況の中、鋼構造委員会では、2004年に「鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会」を発足し、3カ年の活動期間において腐食した鋼構造(鋼橋、港湾構造、電力施設など)を対象にしてa)残存耐荷性能評価、およびb)耐久性向上方策の確立に向けた検討を主な活動目的とし、これらの活動を通して鋼構造の耐久性アップとなる防食設計のガイドラインに向けた基礎的資料の提示を目指してきました。

a) 残存耐荷性能評価の具体的活動は、鋼構造の腐食損傷の実態調査およびその腐食形状の計測技術、腐食による鋼構造および構成部材の残存耐力評価、さらに補修・補強の履歴を考慮した構造性能変化の予測解析手法の確立、b) 耐久性向上方策では、腐食損傷を有する鋼構造物の性能回復方策、耐久性向上方策および防食設計体系の基本的枠組み作りの試み、であり、ここに3カ年の活動成果を第Ⅰ編：腐食した鋼構造物の残存耐荷性能評価(第2章～第4章)、第Ⅱ編：腐食した鋼構造物の耐久性向上方策(第2章～第6章)から構成された報告書にまとめることができました。今後、継続的に研究開発を進めていかなければならない内容も含まれておりますが、現段階における最新の技術成果を網羅できたものと確信しております。

近年、土木構造物の設計は性能設計に移行している中、維持管理に関する基準類も性能設計体系化に見直されていくことになるでしょう。また、土木鋼構造物の点検技術を含む維持管理全般に係る広い知見を有し、鋼構造部材・部位に発生する様々な損傷・劣化に適切に対応できる技術者(診断士)の養成が望まれている状況において、本報告書が維持管理に関わる多くの技術者、管理者および研究者の方々に参考になれば幸いです。

最後になりましたが、本委員会において熱心に活動いただき、報告書の執筆を担当された委員各位に対し深甚の謝意を表します。また、活動の一環として、日本橋梁建設協会には腐食損傷した鋼橋の補修・補強工事に関するアンケート調査にご協力いただきました。また、そのアンケート結果に対して管理者側のご意見もいただきました。関係各位に対して厚く御礼申し上げます。

3年間にわたり本委員会の全体進行・運営にあたられました杉浦邦征幹事長，耐荷性能評価 WG の北原武嗣幹事，健全度評価 SWG の高木千太郎主査，中村宏幹事，腐食計測技術 SWG の舘石和雄主査，上林正和幹事，耐荷力評価 SWG の藤井堅主査，山沢哲也幹事，さらに耐久性向上方策 WG の山田岳史幹事，防食工の耐久性評価 SWG の貝沼重信主査，中村信秀幹事，耐荷性能回復技術 SWG の村上茂之主査，古賀政二郎幹事，およびマニュアル SWG の永田和寿幹事には具体的な作業の取りまとめにあたり多大のご尽力を賜りました。重ねて厚く御礼申し上げます。

2007 年 5 月

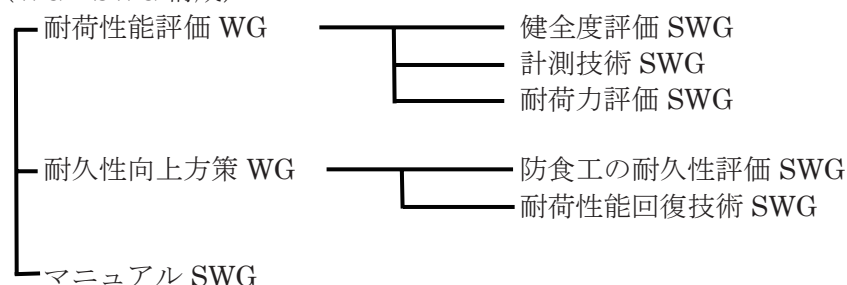
土木学会 鋼構造委員会
鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会
委員長 野上 邦栄

鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会 委員構成(平成 19 年 4 月末)

入部 孝夫	((株)東京鐵骨橋梁, 計測技術 SWG)
岩田 節雄	(金沢工業大学, 耐荷性能回復技術 SWG)
薄井 稔弘	(本州四国連絡高速道路(株), 防食工の耐久性評価 SWG)
大塚 洋	(トピー工業(株), 健全度評価 SWG, 防食工の耐久性評価 SWG)
貝沼 重信	(九州大学大学院, 防食工の耐久性評価 SWG(主査))
鹿毛 勇	(JFE スチール(株), 防食工の耐久性評価 SWG)
上林 正和	(三菱重工業 (株), 計測技術 SWG(幹事), 耐荷力評価 SWG)
川西 弘明	(日本ペイント(株), 防食工の耐久性評価 SWG)
北原 武嗣	(関東学院大学, 幹事, 健全度評価 SWG, 耐荷力評価 SWG)
古賀 政二郎	(炭素繊維補修・補強工法技術研究会・(株)大林組, 耐荷性能回復技術 SWG(幹事))
小崎 明郎	((財)電力中央研究所, 計測技術 SWG, 防食工の耐久性評価 SWG)
後藤 芳顯	(名古屋工業大学大学院, 耐荷力評価 SWG)
小山 明久	((株)横河ブリッジ, 防食工の耐久性評価 SWG)
齋藤 潔	((財)電力中央研究所, 健全度評価 SWG, 耐荷力評価 SWG)
佐々木 保隆	((株)横河ブリッジ, 連絡幹事)
下里 哲弘	(琉球大学, 健全度評価 SWG)
杉浦 邦征	(京都大学大学院, 幹事長)
杉本 一朗	((財)鉄道総合技術研究所, 健全度評価 SWG)
高木 千太郎	(東京都建設局, 健全度評価 SWG(主査))
高田 佳彦	(阪神高速道路(株), 耐荷性能回復技術 SWG)
竹内 正一	(日本橋梁(株), 耐荷力評価 SWG)
舘石 和雄	(名古屋大学, 計測技術 SWG(主査))
永田 和寿	(名古屋工業大学大学院, 耐荷力評価 SWG, マニュアル SWG(幹事))
中野 正	(関西ペイント販売(株), 防食工の耐久性評価 SWG)
中村 信秀	(JFE エンジニアリング(株), 防食工の耐久性評価 SWG(幹事))
中村 宏	(住友金属工業(株), 健全度評価 SWG(幹事))
野上 邦栄	(首都大学東京大学院, 委員長, マニュアル SWG(主査))
野呂 直以	(新日鉄エンジニアリング(株), 耐荷力評価 SWG)
林 健治	(トピー工業(株), 健全度評価 SWG, 計測技術 SWG, 耐荷性能回復技術 SWG)
藤井 堅	(広島大学大学院, 耐荷力評価 SWG(主査), 耐荷性能回復技術 SWG)
藤原 博	((株)東関東, 防食工の耐久性評価 SWG)
前川 晶三	((財)日本塗料検査協会, 防食工の耐久性評価 SWG)
村上 茂之	(岐阜大学, 耐荷力評価 SWG, 耐荷性能回復技術 SWG(主査))
森 猛	(法政大学, 耐荷力評価 SWG)
山沢 哲也	(鹿島建設(株), 計測技術 SWG, 耐荷力評価 SWG(幹事))
山田 岳史	((株)神戸製鋼所, 幹事, 耐荷性能回復技術 SWG)
山根 信	(新日鉄エンジニアリング(株), 健全度評価 SWG, 計測技術 SWG)
若原 直樹	(コニシ(株), 耐荷性能回復技術 SWG)

(50 音順)

(WG・SWG 構成)



目 次

第 I 編 残存耐荷性能評価

第 1 章 はじめに	1-1
第 2 章 健全度評価	1-2
2.1 はじめに	1-2
2.1.1 一般	1-2
2.1.2 適用範囲	1-2
2.1.3 用語の定義	1-3
2.2 鋼構造物における健全度評価とは	1-4
2.2.1 健全度の定義	1-4
2.2.2 点検・調査要領	1-5
2.2.3 目的	1-9
2.2.4 判定要領	1-9
2.2.5 部材評価と構造物評価	1-15
2.2.6 補修の優先度	1-78
2.2.7 補修要領（腐食劣化に対する補修方法）	1-85
2.3 各種構造物における腐食損傷事例	1-91
2.3.1 腐食損傷マップ	1-91
2.3.2 損傷事例写真	1-101
2.4 鋼構造物の健全度評価への提言	1-107
2.5 参考資料（各機関の基準を抜粋）	1-108
2.5.1 国土交通省：「橋梁定期点検要領」	1-108
2.5.2 旧日本道路公団：「道路構造物点検要領」	1-108
2.5.3 首都高速道路（株）：「構造物等点検要領」	1-109
2.5.4 本州四国連絡高速道路（株）：「長大橋梁点検」	1-109
2.5.5 阪神高速道路（株）：「道路構造物の点検要領」	1-110
2.5.6 東京都：「橋梁の点検要領」	1-110
2.5.7 ダム、堰、水門施設管理者：「ダム、堰施設技術基準」	1-111
2.5.8 他の文献等における類義語の定義	1-111

第 3 章 計測技術	1-119
3.1 腐食形状の一般的な傾向と分類	1-119
3.1.1 一般	1-119
3.1.2 橋 梁	1-120
3.1.3 水中構造物	1-126
3.2 板厚計測法	1-142
3.2.1 計測のための前処理	1-142
3.2.2 板厚を直接計測する方法	1-145
3.2.3 板の表面形状から板厚を計測する方法	1-155
3.2.4 その他の方法	1-171
3.3 板厚計測法の適用事例	1-175
3.3.1 試験体	1-175
3.3.2 超音波法	1-178
3.3.3 レーザー法	1-185
3.3.4 画像計測法	1-188
3.3.5 板厚への変換事例	1-192
3.3.6 まとめ	1-196
3.4 計測作業および計測結果の取扱いに関する考察	1-197
3.4.1 統計処理の基本的な考え方	1-197
3.4.2 計測点の設定方法	1-217
第 4 章 残存耐荷性能評価	1-221
4.1 残存耐力評価の現状	1-221
4.2 部材の耐荷力評価	1-224
4.2.1 部材の耐荷力評価のための指標	1-224
4.2.2 引張部材	1-226
4.2.3 柱部材	1-234
4.2.4 曲げ部材	1-251
4.2.5 板	1-253
4.3 鋼構造物の耐荷力評価	1-261
4.3.1 鋼橋	1-261
4.3.2 港湾施設（海洋構造物）	1-270
4.3.3 水門の耐荷力評価	1-281
4.4 FEM 解析による残存耐荷力評価とその精度	1-287
4.4.1 作用外力と有限要素の選定	1-287
4.4.2 板および板で構成される構造部材の圧縮残存耐荷力解析	1-288
4.4.3 初期不整（初期撓み、残留応力）が腐食による耐荷力減少に与える影響	1-299
4.4.4 腐食と補修履歴を考慮した力学性能評価	1-303

4.4.5 溝状腐食による残留応力の変化と残存耐荷力	1-317
4.5 あとがき	1-331

第Ⅱ編 耐久性向上方策

第1章 はじめに	2-1
第2章 防食技術	2-2
2.1 各種材料の腐食特性と耐久性	2-2
2.1.1 普通鋼	2-2
2.1.2 耐候性鋼	2-5
2.1.3 ステンレス鋼	2-9
2.1.4 アルミニウム	2-19
2.1.5 クラッド鋼	2-27
2.2 各種表面被覆の特徴と耐久性	2-32
2.2.1 塗装	2-32
2.2.2 めっき	2-39
2.2.3 溶射	2-41
2.3 防食関連技術	2-44
2.3.1 湿度制御と電気防食	2-44
2.3.2 構造詳細の改良	2-49
第3章 防食機能の維持管理	2-52
3.1 点検・調査	2-53
3.1.1 点検・調査の目的	2-53
3.1.2 点検・調査の種別と頻度	2-53
3.1.3 点検・調査項目	2-54
3.1.4 点検・調査時の携行器具	2-59
3.2 評価・判定	2-60
3.2.1 評価・判定の方法	2-60
3.2.2 評価・判定の対象箇所	2-60
3.2.3 塗膜評価基準	2-61
3.2.4 塗替え時期の判定	2-65
3.2.5 耐候性鋼の評価・判定	2-66
3.2.6 めっきの評価・判定	2-66
3.2.7 溶射皮膜の評価・判定	2-67
3.3 対策	2-67
3.3.1 対策方法の判定	2-68
3.3.2 対策の実施	2-68

3.4	点検・調査結果の記録	2-71
3.5	維持管理技術者の資質	2-72
第4章	防食技術の選定	2-74
4.1	新設橋における防食技術選定の基本	2-74
4.1.1	塗装	2-74
4.1.2	耐候性鋼	2-77
4.1.3	溶融亜鉛めっき	2-78
4.2	既設橋における防食技術選定の基本	2-80
4.2.1	塗装の塗替え	2-80
4.2.2	耐候性鋼の補修	2-81
4.2.3	溶融亜鉛めっきの補修	2-81
第5章	防食設計の課題	2-83
5.1	塗装における課題	2-83
5.1.1	塗装設計における課題	2-83
5.1.2	塗装の品質における課題	2-84
5.1.3	塗装作業における課題	2-84
5.1.4	塗装の維持管理における課題	2-86
5.1.5	塗装材料における課題	2-86
5.2	耐候性鋼における課題	2-87
5.3	溶融亜鉛めっきにおける課題	2-88
5.4	溶射における課題	2-88
5.5	腐食耐久性からの詳細部位への対応	2-89
第6章	耐荷性能の維持，回復および増強	2-94
6.1	耐荷性能の維持，回復および増強の技術，その適用の現状	2-94
6.1.1	総論	2-94
6.1.2	耐荷性能の維持，回復および増強技術の適用の概況	2-97
6.1.3	耐荷性能の維持，回復および増強技術の分類	2-98
6.1.4	耐荷性能の維持技術の特徴と効果	2-101
6.1.5	材料の接着や添接による耐荷性能の回復および増強技術の特徴と効果	2-107
6.1.6	部材の取替による耐荷性能の回復および増強技術の特徴と効果	2-114
6.1.7	構造系改善による耐荷性能の回復および増強技術の特徴と効果	2-119
6.1.8	耐荷性能の維持，回復および増強技術，その適用の現状と課題	2-123
6.2	耐荷性能の維持，回復および増強に関する新技術の動向	2-133
6.2.1	塗装系塗膜に関する技術の改良・開発	2-133

6.2.2	コンクリート系材料に関する技術の改良・開発	2-134
6.2.3	FRP 系材料に関する技術の改良・開発	2-136
6.2.4	金属系材料に関する技術の改良・開発	2-144
6.3	耐荷性能の維持、回復および増強技術の評価方法	2-151
6.3.1	鋼橋の腐食耐久性における寿命予測の現状と課題	2-151
6.3.2	回復性能の評価	2-154
6.4	耐荷性能の維持、回復および増強技術の適用、およびその評価例	2-156
6.4.1	耐荷性能の維持、回復および増強技術の適用区分（試案）	2-156
6.4.2	FRP 系材料による耐荷性能の回復および増強技術、その部材への適用と評価	2-162
6.4.3	金属系材料による耐荷性能の回復および増強技術、その部材への適用と評価	2-164
6.5	資料編	2-179
6.5.1	耐荷性能の維持、回復および増強に関する技術適用の基準	2-179
6.5.2	耐荷性能の維持、回復および向上の新技术に関する資料	2-179