

高力ボルト摩擦接合継手の水中構造物への適用可能性に関する基礎的研究

Fundamental Study on Applicability of High Strength Bolted Frictional Type Joints for Underwater Steel Structures

橋梁工学分野

孫 宏赫

Abstract

水中構造物の接合には、溶接が一般的に用いられ、高力ボルト摩擦接合継手は採用されていないのが現状である。その継手では施工性・信頼性・経済性の向上が期待されるが、継手の強度に関連するすべり係数の低下、腐食、遅れ破壊の問題が指摘されている。本研究では、すべり係数に着目して、水が継手の強度に与える影響を実験により評価し、水中構造物に適用しても問題ないことを示した。また、錆の変化によって生じる板厚の変化、ボルト軸力の変化の寄与についても検討した。Currently, welding joints are used in most of underwater steel structures, but high strength bolted frictional type joints are not used. However, as the increment of renovation of existing structures expected in the future, if high strength bolted frictional type joints could be adapted to, it will be contributed to wider choices of how to repair, a significant improvement of economic efficiency, reliability and workability. In this study experiments focusing on the changes of slip coefficients causing by the penetration of water and the decrement of the bolt axial force due to corrosion will be carried out to investigate the applicability of application of high strength bolted frictional type joints of underwater steel structures.

1. まえがき

水中構造物の継手は主に溶接構造であり、高力ボルト摩擦接合継手はほとんど採用されない現状である。今後増加が予想される既設構造物の改修などにおいては、既設材料の溶接性や熱ひずみによる精度確保への影響や現場作業スペースの観点から溶接構造の採用が困難な箇所が多くなることが予想される。この際高力ボルト摩擦接合継手が採用できる状況にあれば、改修方法の選択肢が広がり施工性・信頼性・経済性の向上に大きく寄与できるものと考えられる。現在、高度成長期に集中的に整備した水門扉などの水中構造物が維持・更新期を迎えることになった。図-1.1に水中構造物の現状を示す。

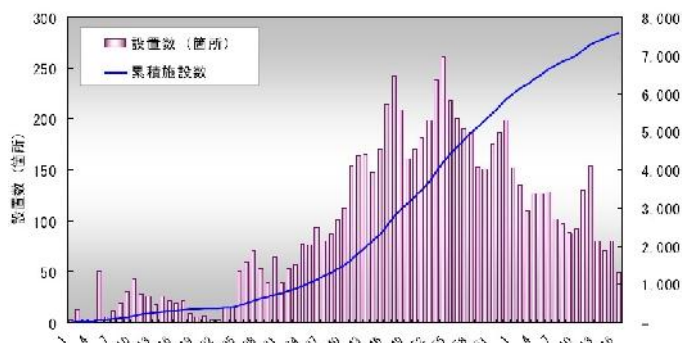


図-1.1 水中構造物の現状¹⁾

しかし、高力ボルト摩擦接合継手を水中構造物に適用する場合の課題は、1.水の浸透によりすべり係数の変化；2.腐食によるボルト軸力の低下；3.遅れ破壊の大きく3つに集約される。水中構造物に関連する技術基準類である水門鉄管技術基準溶接・接合編（平成5年発行）²⁾（以下、水鉄基準）やダム・堰施設技術基準（案）（基準解説編・マニュアル編）（平成11年発行）³⁾（以下、ダム堰基準）において、同様に問題点が指摘されている。このうち水の浸透によるすべり係数の変化と腐食によるボルト軸力低下については、これまでほとんど検討されてないである。

本研究では水の浸透によりすべり係数の変化と腐食によるボルト軸力の低下に着目して水中構造物への適用できる設計法を確立するための基礎資料を提供する。そして、結果をもとに、高力ボルト摩擦接合継手の水中構造物への適用の可否を検討する。

2. 水中加圧を受けた高力ボルト継手のすべり実験

2.1 実験概要

水中構造継手の評価指標の一つはすべり係数である。本実験では、水中構造物が水の浸透によってすべり係数の変化を明らかにすることを目的とする。

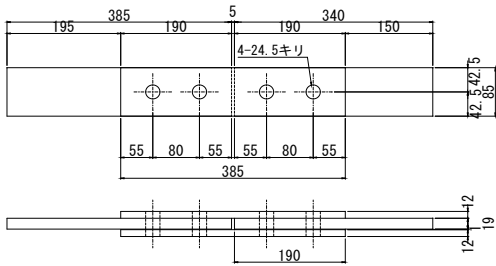


図-2.1 実験供試体の寸法

表-2.1 実験ケース

ケース番号	記号	水圧加圧有無	載荷環境	板厚差 (mm)	ボルト軸力	実験供試体数	水中加圧日数
1	wet-ar-1-100-1	○	大気中	1	100%	5	1日
2	wet-ar-1-050-1	○	大気中	1	50%	5	1日
3	wet-ar-1-020-1	○	大気中	1	20%	5	1日
4	dry-ar-1-100-0		大気中	1	100%	3	1日
5	dry-ar-1-050-0		大気中	1	50%	3	1日
6	dry-ar-1-020-0		大気中	1	20%	3	1日
7	wet-ar-0-100-1	○	大気中	0	100%	5	1日
8	wet-ar-0-020-1	○	大気中	0	20%	3	1日
9	wet-sub-1-100-1	○	水中	1	100%	5	1日
10	wet-sub-1-050-1	○	水中	1	50%	3	1日
11	wet-sub-1-020-1	○	水中	1	20%	3	1日
12	wet-ar-1-100-10	○	大気中	1	100%	3	10日
13	wet-ar-1-100-28	○	大気中	1	100%	3	28日

表-2.2 実験供試体の一覧

高力ボルト				
ボルトの呼び径 (mm)	22			
ボルトの等級	F10T			
ボルト列数	2			
孔径 (mm)	24.5			
設計ボルト軸力 (kN)	205			
鋼板				
	母板1-すべり側	母板2-固定側	連結板	フィラー
鋼板の材質	SM 570	SM 570	SM 570	SPCC
板幅 (mm)	85	85	85	85
板厚 (mm)	19	19	12	1
板長 (mm)	385	340	385	190
降伏点 (公称値) (N/mm ²)	450	450	460	-
引張強度 (公称値) (N/mm ²)	570	570	570	270
供試体全体				
すべり/降伏耐力比 β_d			0.634	
連結板/母板降伏耐力比 γ			1.29	
すべり耐力 N_s (kN)			328	
降伏耐力 F_{yn} (kN)			517	
縁端距離 e_1 (mm)			55	
幅縁端距離 e_2 (mm)			42.5	
ピッチ p (mm)			80	

2.2 実験方法及び供試体設計

本実験は、土木学会で制定された高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)⁴⁾に示されている標準すべり試験に従って行うことを基本とする。図-2.1に供試体の寸法を示す。図-2.2に相対変位の測定位置を示す。表-2.1に実験ケースを示す。表-2.2に、供試体の構造諸元を示す。表-2.3に供試体の比較項目のまとめを示す。写真-2.1に加圧容器を示す。写真-2.2に載荷状況を示す。



写真-2.2 載荷状況

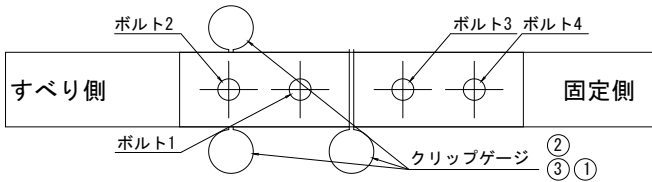


図-2.2 相対変位の測定位置

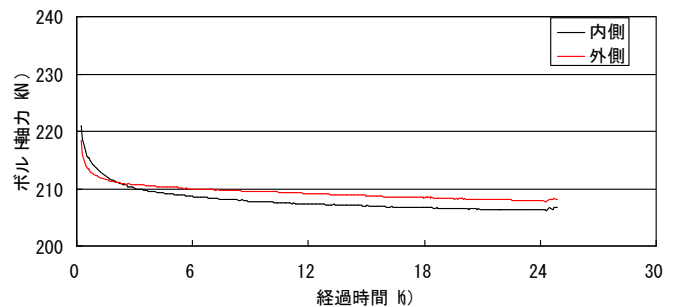


写真-2.1 加圧容器

2.3 実験結果及び考察

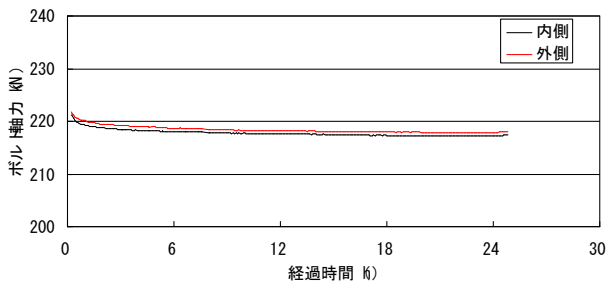
(1) ボルト軸力のリラクゼーション

高力ボルトのリラクゼーションの例を図-2.3に示す。水圧作用のケース1とドライ状態のケース4におけるボルト軸力の低下率を比較すると、水圧作用のケースの方がやや大きい結果を示す。ケース13にボルト軸力の経時変化を示す。水中と空気のボルト軸力低下率の比較は4章で詳細に評価する。

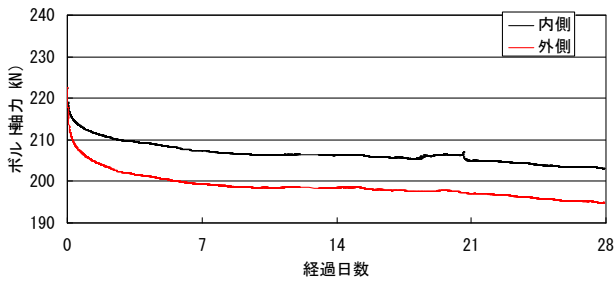


(a) ケース 1

図-2.3 高力ボルトのリラクゼーションの例



(b) ケース 4



(c) ケース 13

図-2.3 高力ボルトのリラクゼーションの例(続き)

(2) すべり载荷実験結果

すべり発生は、相対変位において、供試体の母板と連結板の間大きなすべり量が生じた時、すべりと定義した。すべり载荷実験の結果を図-2.4に示す。結果より、空気中でも水中でもいずれも0.4以上で保証でき、高力ボルト摩擦接合継手が水中構造物への適用きると考えられる。

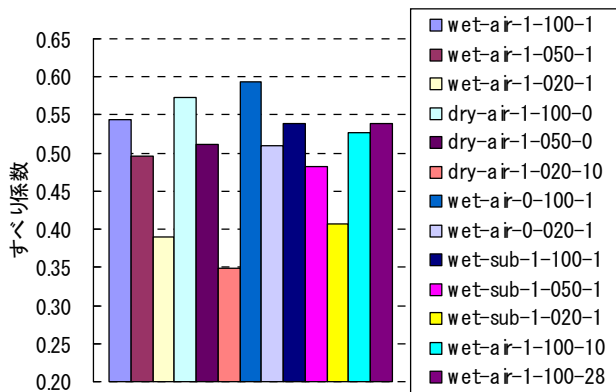
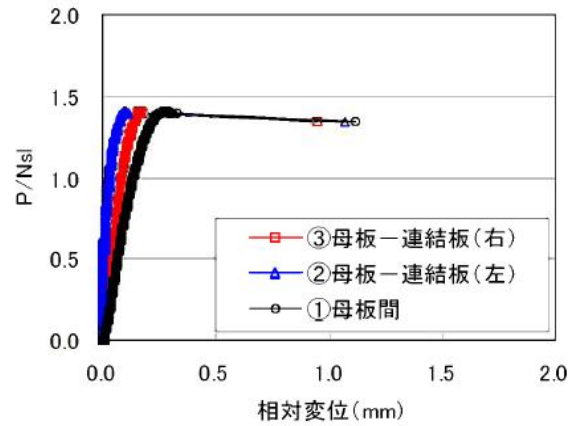


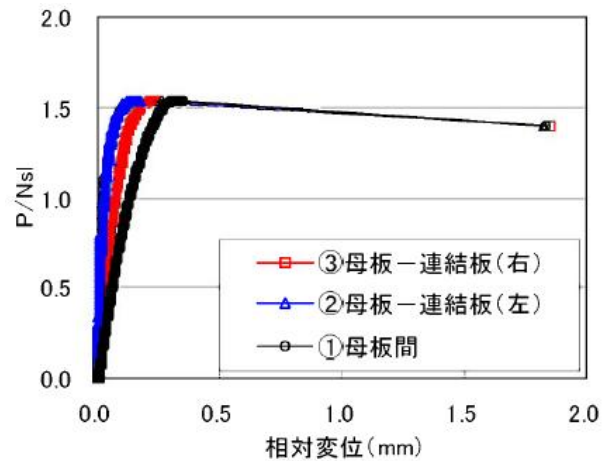
図-2.4 すべり係数のまとめ(ケース毎平均値)

(3) 荷重-母板と連結板間の相対変位

载荷荷重と母板-連結板間の相対変位の関係の一例を供試体ケースごとに図-2.5に示す。荷重载荷中の母相対変位の関係は、水圧作用の有無や板厚差、载荷時の継手周りの環境条件に関係なく、同様の傾向を示す。



(a) ケース 1 wet-air-1-100-1



(d) ケース 4 dry-air-1-100-0

図-2.5 荷重と連結板間の相対変位の例

(4) すべり係数の評価

・水浸透の影響

水浸透がすべり係数に与える影響を見るため、ケース1~6で得られたすべり係数を図-2.6に示す。水浸透の場合でも設計基準値である0.4を十分に満足している。こちらの原因は水の浸透により、供試体の接合面は赤錆から黒錆になって、表面の摩擦係数が小さくなったことが考える。

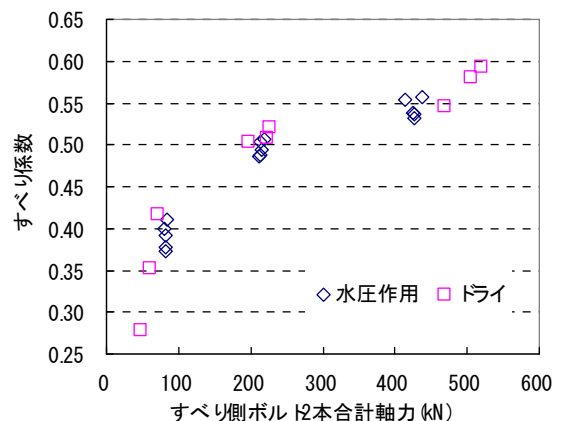


図-2.6 水浸透とすべり係数

・ 載荷環境の影響

載荷条件がすべり係数に与える影響を見るため、水没載荷（ケース 1～3）と、大気中載荷（ケース 9～11）で得られたすべり係数を図-2.7 に示す。水没載荷のケースにおいても大気中載荷のケースとほぼ同等の結果となり、載荷条件による差異は認められない。

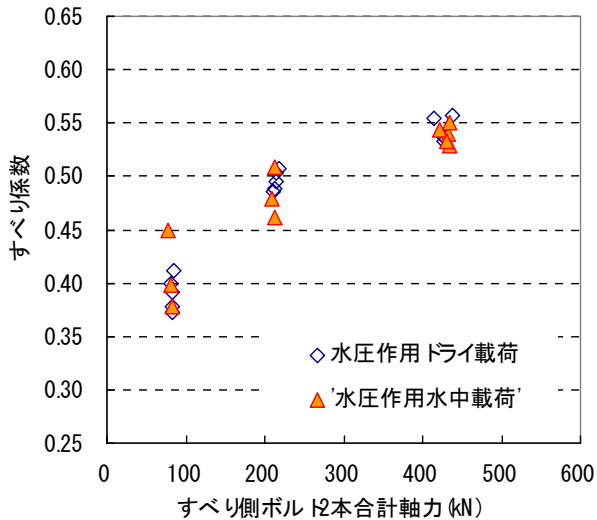


図-2.7 載荷環境の影響とすべり係数

・ 板厚差の影響

板厚差がすべり係数に与える影響を見るため、ケース 1, 3, 7, 8 で得られたすべり係数を図-2.8 に示す。図より、隙間量が大きくなると、すべり係数が低下している。

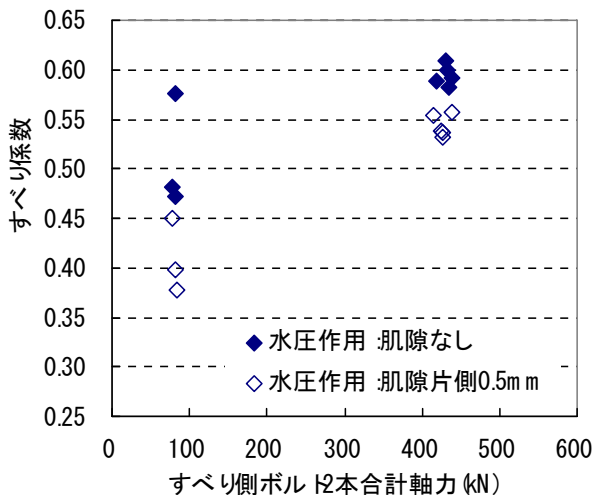


図-2.8 板厚差の影響すべり係数

・ 水圧加圧の作用時間の影響

板厚差がすべり係数に与える影響を見るため、ケース 1, 3, 7, 8 で得られたすべり係数を図-2.9 に示す。経時変化によってすべり係数の低下を認められない。高力ボルト摩擦継手が短期間の水中構造物の改修などの施工への適用できる。

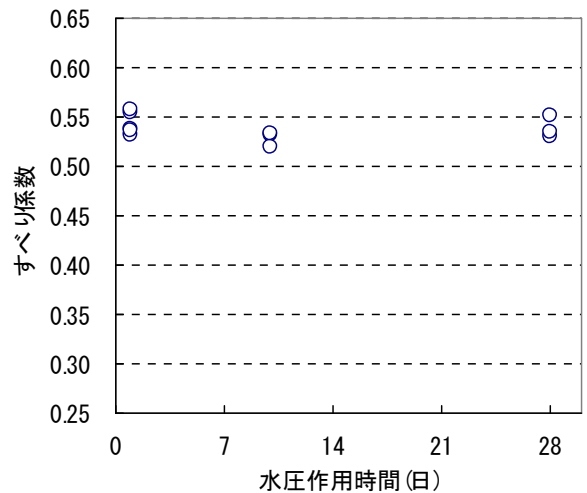


図-2.9 水圧作用時間とすべり係数

3. 水中が高力ボルトのリラクゼーションに与える影響の検討

3.1 実験概要

従来の水中加圧実験⁵⁾において、ボルト軸力低下率が水中の場合が空気の場合より高い(水中の場合では 7-10%、空気中では 4-5%)ことが確認された。この章で、水中の軸力低下率の原因の解明するために、水中における締め付けられた高力ボルト摩擦接合面の 1)表面状態、2)錆厚さ、3)粗さ、4)水中の酸素濃度に着目して、高力ボルトの軸力計測実験を行い、リラクゼーションの低下率を解明していく。写真-3.1 に水中の計測の様子を示す。写真-3.1 に水中の計測の様子を示す。

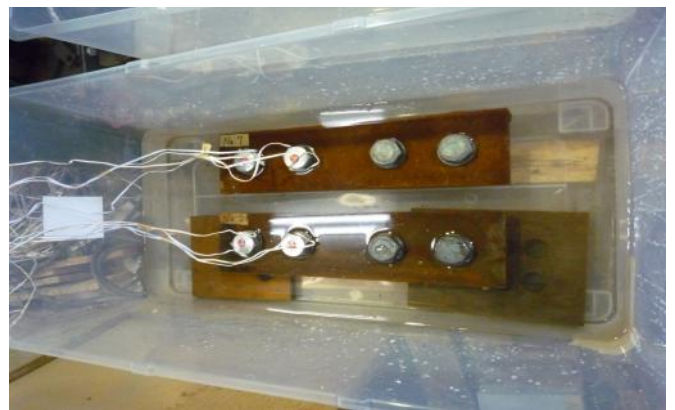


写真-3.1 水中の計測の様子

3.2 実験方法及び供試体

接合板の表面初始状態は赤錆、ブラストと黒錆 3 つの状態を分ける。また、実験環境空気中と水中、実験軸力計測用と表面観察の実験体合計 5 体を用いた。表-3.1 に供試体の内訳を示す。表-3.2 に本実験で設定した 3 つの比較項目に対する供試体間の関係を示す。表中の比較項目の詳細について以下に述べる。

表-3.1 供試体の内訳

供試体ケース名	供試体表面状態	実験内容	実験環境条件	計測時間
B-A-1	ブラスト	軸力計測	空気	7日
A-A-1	赤錆	軸力計測	空気	7日
A-W-1	赤錆	軸力計測	水中	7日
A-W-2	赤錆	表面観察	水中	7日
K-W-1	黒錆	軸力計測	水中	7日

表-3.2 供試体の比較項目

計測時間	環境	赤錆-ブラスト	赤錆-赤錆	赤錆-黒錆
7日	空気	①	②	-
	水中	-		③

3.3 測定項目

本試験における計測項目は、高力ボルトの軸力、接合面粗さ、錆厚さ、温度及である。表-3.3に測定間隔を示す。

表-3.3 測定間隔

項目	測定間隔															
	0h	3h	6h	9h	12h	15h	24h	30h	36h	48h	60h	72h	96h	120h	144h	168h
錆厚さ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
温度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
酸素濃度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
粗さ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

3.4 実験結果

・接合面の変化の観察

写真-3.2 に供試体(A-W-2)表面観察を示す。観察の結果は、赤錆が最初の24時間内で赤錆は激しい変化して、どんどん黒錆になった。そして、一週間内では黒錆安定して変化量が少なくなった。



(a) 0時間 (b) 24時間 (c) 48時間



(d) 72時間 (e) 96時間 (f) 192時間

写真-3.2 供試体(A-W-2)表面観察の例

・ボルト軸力計測

表-3.4 に各供試体のそれぞれの軸力残存率の経時変化を示す。図-3.1 に各供試体のそれぞれの軸力の経時変化を示す。図-3.2 に各供試体のそれぞれの軸力残存率の経時変化を示す。空気における赤錆とブラストの軸力残存率はほぼ一致である。その原因は、空気の

中で、赤錆のパラメータでもブラストと同様にクリープの影響のみを受け、リラクゼーション低下の率は低いである。水中の赤錆(A-W-1)と水中の黒錆(K-W-1)に比べると、168時間における軸力低下率約1.3倍。その原因は水中に於ける黒錆の腐食速度は赤錆より低いと考えられる。

表-3.4 軸力残存率

供試体ケース名	軸力残存率(%)			
	B-A-1	A-A-1	A-W-1	K-W-1
供試体初期表面状態	ブラスト	赤錆	赤錆	黒錆
0h	100%	100%	100%	100%
3h	99.59%	99.57%	99.23%	99.36%
6h	99.55%	99.57%	99.21%	99.34%
9h	99.60%	99.61%	99.14%	99.32%
12h	99.53%	99.50%	99.08%	99.22%
15h	99.51%	99.49%	99.08%	99.22%
24h	99.55%	99.45%	99.06%	99.20%
30h	99.48%	99.42%	98.96%	99.13%
36h	99.50%	99.45%	98.96%	99.11%
48h	99.51%	99.40%	98.91%	99.03%
60h	99.51%	99.42%	98.84%	98.98%
72h	99.51%	99.37%	98.80%	98.92%
96h	99.39%	99.28%	98.60%	98.89%
120h	99.42%	99.25%	98.55%	98.84%
144h	99.40%	99.26%	98.55%	98.82%
168h	99.40%	99.23%	98.48%	98.84%

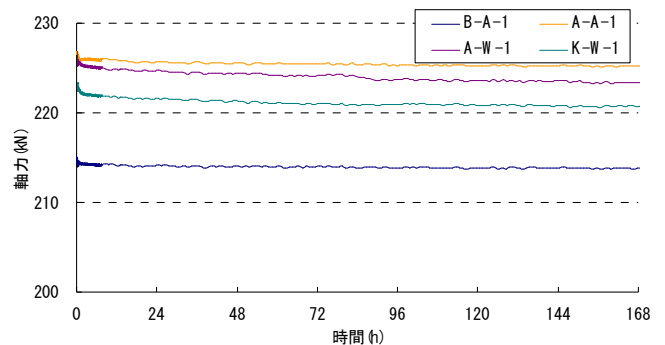


図-3.1 軸力の変化

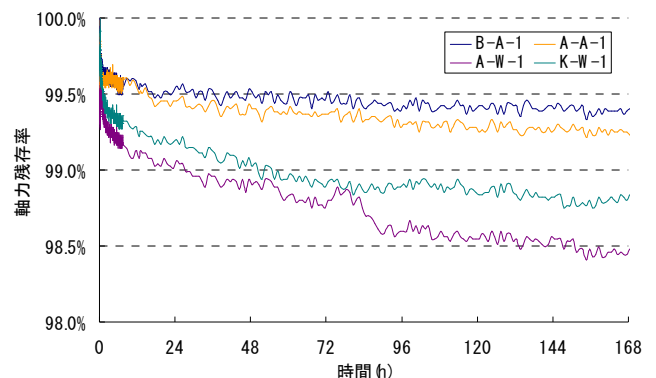


図-3.2 軸力残存率

・接合面の錆厚の変化の考察

図-3.3 に表面錆厚さの減少量を示す。最初の24時間接合面は赤錆から激しい変化し、黒錆になっている。

その後、水中における黒錆は赤錆より安定する状態の
で、錆の進展の障壁になっている、錆厚さの低下も安
定して、ほぼ変化してない状態になった。

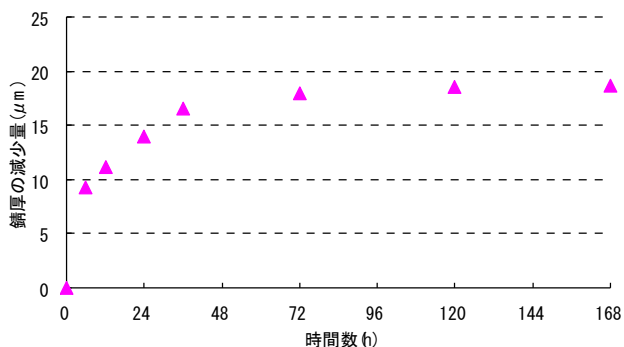


図-3.3 表面錆厚さの減少量

5. まとめと今後の課題

実験供試体は M22 高力ボルトで母板の厚さが 19mm
の高力ボルト摩擦接合継手を設定して、加圧容器によ
って水中実環境を模擬し、一定時間水圧を作用させて
載荷実験を行った。得られた結果から下記の結論を示
した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 供試体表面処理が赤錆の条件におけるすべり係数
が 0.4 以上であった。水浸透の条件では、板厚差 1mm
の場合もすべり係数(平均 0.544)の低下率は比較的
小さく、悪影響は認められない。ただし、水中の場合
すべり係数(平均 0.544)がドライの場合(平均
0.573)より少し低いことが確認した。低下する理由
は黒錆の摩擦係数は赤錆の摩擦係数より高いと考
えられる。
- (2) 供試体の表面処理が赤錆の条件においては、高力ボ
ルト摩擦接合継手は水圧加圧して、経時変化を考え
ると1日、10日、28日においてすべり係数(平均値
0.544, 0.527, 0.539)が0.4以上で保証でき、経時変化
によってすべり係数の低下を認められない。高力ボ
ルト摩擦継手が短期間の水中構造物の改修などの
施工への適用できる。
- (3) 本実験の実験環境における、接合面の変化は赤錆が
24時間で赤錆は激しい変化して、どんどん黒錆にな
った。そして、1週間では黒錆が安定して変化量が
少なくなったことが分かった。
- (4) 高力ボルト摩擦接合継手では、水中のボルト軸力低
下率は空気の比ると大きい結果が分かった。表面

処理が赤錆とした供試体は水中における軸力低下量
が大きい原因は赤錆から黒錆になって、錆厚減少に
よって、軸力低下であり、空気のケースと比べると、
クリープと錆厚さの変化両方の影響を受けている。
ボルト軸力の低下は錆の減少量と関連することと考
えられる。

参考文献

- 1) 河川局の気候変化への取り組み：水災害分野におけ
る地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方
について
- 2) 水門鉄管技術協会：水門鉄管技術基準溶接・接合編，
pp.122-123, 1993
- 3) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準（案）
（基準解説編・マニュアル編），pp.132-133, 1999.3
- 4) 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），2006.
- 5) 仲保京一，森井俊明，松下裕明，山口隆司：高力ボ
ルト摩擦接合継手の水中構造物への適用に関する
実験的研究，構造工学論文集 Vol.57A, pp.831-841,
2011.

◆討議 [重松 孝昌 教授]

結論で水中のボルト軸力低下が空气中より大きいと挙げられているが、その原因は、板の（すべり面の）隙間に水が入るからだと理解してよいか？

◆回答：はい、そうです。板の（すべり面の）隙間に水が入って、赤錆から黒錆になって連れて、錆厚が減少すると共に、ボルト軸力が下がっている。

◆討議 [重松 孝昌 教授]

同様に、結論で水中のボルト軸力低下が空气中より低くなると挙げられているが、その原因は、板の（すべり面の）隙間に水が入るからだと理解してよいか？

◆回答：違います。高力ボルト軸力低下の原因は赤錆が水中における軸力低下量が大きい原因は赤錆から黒錆になって、錆厚減少によって、軸力低下であり、空気の比べると、クリープと錆厚さの影響両方を受けていることと考えられる。

◆討議 [松村 政秀 准教授]

実験は、水槽で行ない水中の酸素濃度が低下しているが、実構造物を考えたとき、例えば海中では常に水が入れ替わるため酸素濃度は一定に近いと考えられる。今回の実験と実構造物の条件が違いか、得られた結果にどのように影響すると考えられるか？

◆回答：本研究の目的は水中環境における高力ボルト軸力低下のメカニズムを解明するためである。実際の水循環より本実験の水槽中の酸素濃度が低減しやすいである。錆の形成過程を考えると、水環境における鋼板の経時変化によって赤錆から黒錆になる。酸素濃度が赤錆から黒錆になる形成速度を作用させる。本実験の水環境における酸素濃度は実際環境の酸素濃度より低いので、黒錆になって、軸力が安定する状態になる時間が短いである。しかし、黒錆が形成した後、黒錆が赤錆を守って、酸素濃度により影響が少ないと考える。今回の実験と実構造物の条件の違いが得られた結果に影響が少ないと考えられる。

◆討議 [重松 孝昌 教授]

すべり試験で、水中加圧したときの圧力を教えてほしい。

◆回答：0.8Mpa です。作用水圧は高压ゲートを想定し水深 80m に相当する 0.8MPa を 24 時間加圧保持する