

外壁下地鋼材とドリルねじ接合部の耐久性に関する研究

Study on durability of the joint of steel furring strips and drilling screws

岸元 孝之^{*1} 久保 康弘^{*1} ○萩原 裕久^{*1} 城倉 貴史^{*2} 中島 一浩^{*3}

Kishimoto Takayuki, Kubo Yasuhiro, Hagiwara Hirohisa, Shirokura Takashi, Nakajima Kazuhiro

ABSTRACT In this study, based on the fact that on the steel wall panels located in semi-outdoor space of rail facilities, corrosion can be seen sporadically at the joint of steel furring strips and drilling screws, we compared corrosion resistant of different combinations of drilling screws and steel furring strips finally to find out the most effective corrosion resistant combinations. As a result of corrosion test, we have found the most effective corrosion resistant combinations and by measuring the corrosion resistant amount of steel furring strips and drill screws, we reached the conclusion that the coating material of steel furring strips contributes to the suppression of corrosion of drilling screws.

Keywords: ドリルねじ, 鋼製胴縁, 耐食性, 高耐食めつき鋼板, 耐荷力
drilling screws, steel furring strips, corrosion resistant, high corrosion-resistant plated steel sheet, loading capacity

1. はじめに

建設から40年ほど経過した鉄道高架上の駅舎において点検・調査の結果、外壁仕上材（以下、仕上材）に一部劣化が見られ、胴縁となる下地鋼材の接続部で局部的な発錆が見られた。駅舎の建設当時、外壁下地鋼材（以下、下地材）には、一般さび止めペイント（JIS K 5621）などが塗布されたリップ溝形鋼が用いていたが、現在では、建築工事監理指針[1]において、軽量形鋼が用いられる部材は「板厚が薄いので腐食に対する安全性が一般の鋼構造より低く、十分な防錆処置を要する」とされており、防錆性の配慮が必要である。

一方、仕上材を下地材に固定するねじについては公共建築工事標準仕様書[2]では具体的な仕様が規定されておらず、結果的に様々なねじが用いられている。

^{*1} 第1種正会員

東日本旅客鉄道(株)

〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-2-2

^{*2} 第1種正会員

日本製鉄(株)

〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1

^{*3} (株)ロブテックス

〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町1-5-11

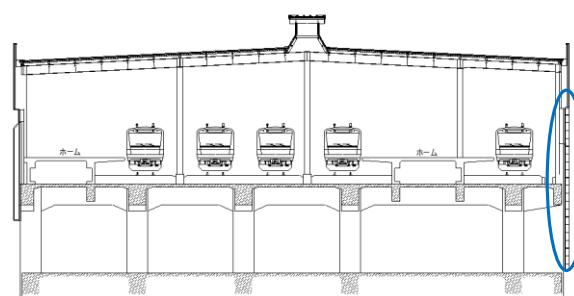
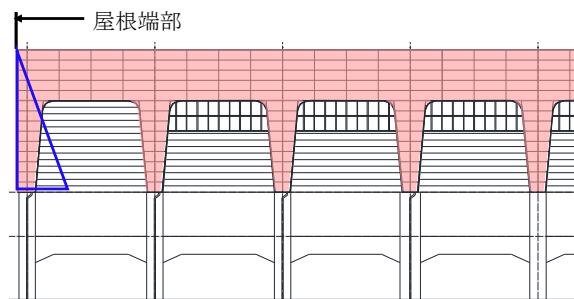


図 1-1 駅舎立面図

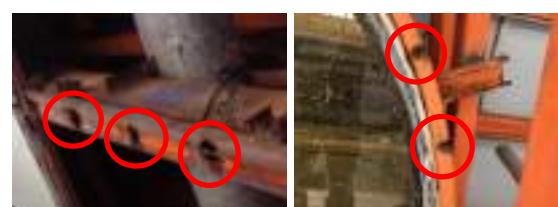


写真 1 ドリルねじと下地材の接触部

先述の点検・調査は、経年40年程度の駅舎の仕上材を部分的に撤去し、下地材の状況について現地調査を行ったものである。その結果、図1-1に示す屋根端部側の内側から雨が吹き込む範囲では、下地材の腐食が認められた。特に写真1のように、外壁の下地材とドリルねじの接触部において、腐食が著しく進行していた。下地材の腐食を防ぐためには、壁内部への浸水を防ぐ必要があるが、仕上材を貫通して取り付けるドリルねじの接合部は、表面シーリング材の劣化等により浸水の可能性があり、完全な止水対策が難しいという課題がある。また、土木構造物の上部に建築物が建設されている駅舎では、その取り合い部分が変形性能の違いによって隙間が生じやすく、漏水を発生しやすいという特有の課題がある。

一方、下地材とドリルねじ接合部の耐久性に関する既往の研究としては、工場建物やスチールハウスを対象として、外壁材を固定しているドリルねじ接合部の腐食を調査した結果が報告[3]されている。ここでは、溶融亜鉛めっき鋼板や電気亜鉛めっきなどのドリルねじを対象としているが、近年流通している高耐食めっき鋼板(JIS G 3323)や新しい表面処理を施したドリルねじについては評価されていない。また、溶融亜鉛めっきに比べて錆びやすいさび止め塗装鋼板は、鋼板が腐食することによりドリルねじ接合部の耐久性に影響を及ぼすと考えられ、下地材とドリルねじの組み合わせ効果について明らかにする必要がある。

本研究では、半屋外空間の鉄道施設の外壁において、下地材とドリルねじ接合部での局部的な腐食が散見される実態を踏まえ、より安全性の高い設備の仕様選定に寄与する接合部の耐久性評価

を目的として、下地材とドリルねじの各要素比較とその組み合わせによる評価を行った。図1-2に本研究の評価要素を示す。耐食性の評価は、下地材の表面処理とドリルねじの表面処理の組み合わせを比較するために、中性塩水噴霧サイクル試験による外観調査、腐食減量の測定及び局所的な板厚減量測定を行った。また、ドリルねじ接合部の耐力評価は、中性塩水噴霧サイクル試験後に引張及びせん断耐力試験を行い、接合部の腐食が耐力に及ぼす影響を検討した。

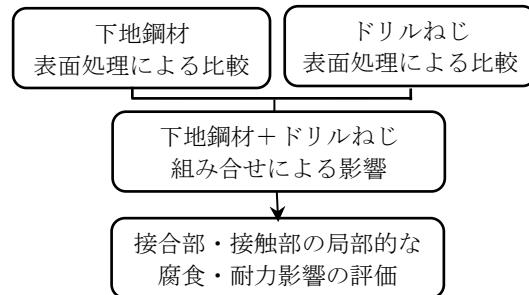


図1-2 本研究の評価要素

2. 試験方法

2.1 試験に用いた材料

本研究で使用した下地材の鋼板とドリルねじの仕様を表2に示す。

2.1.1 鋼板の仕様

下地材の鋼板には胴縁の材料として選定されることが多い表面処理の仕様と、比較用としてステンレス鋼板(SUS304)を選定した。鋼板の膜厚は、製品規格の膜厚と膜厚の実測値を示している。鋼板の膜厚は電磁膜厚計にて試験体の鋼板1枚につき表裏各1点を測定し、全15枚(ドリルねじ5

表2 試験に用いた鋼板とドリルねじの仕様

鋼板	材質	板厚mm	JIS名称(本報での呼称)	実測膜厚μm(規格値)
A	SS400	2.3	JIS K 5674 鉛・クロムフリーさび止めペイント(さび止めペイント) A: 公共建築工事標準仕様書の仕様 A': 工場出荷時までの赤錆防止の仕様	61(60μm以上)
A'				13.2(無し)
B			JIS H 8641 溶融亜鉛めっき(溶融亜鉛めっき) B: HDZ55 B': HDZ40(下限側)	119(76μm以上:参考)
B'				58.6(56μm以上:参考)
C	SGMH400		JIS G 3323 溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板及び鋼帶 (高耐食めっき) *両面3点平均最小付着量	27(275g/m ² *)
C'				25.3(275g/m ² *)
D	SUS304	2.0	JIS G 4305 冷間圧延ステンレス鋼板(SUS304/2B仕上げ)	—
ドリルねじ	材質	ねじ径mm	表面処理の成分・構成	膜厚μm(製品規格)
a	SWCH18A	6.0	電気亜鉛めっき Ep-Fe/Zn5 CM1	5
b			亜鉛・珪素系複合被膜(焼付塗装)	8
c			亜鉛・エポキシ樹脂複合被膜(焼付塗装)	12
d			亜鉛ニッケル合金めっき+合金コーティング+無機系コーティング	9
e	SUS410		バシペート仕上げ(不動態化処理)	—

種類×試験数 N=3)の膜厚の平均値を算出した。鋼板の板厚は 2.3mm(SUS304 は 2.0mm), ドリルねじのねじ径は $\phi 6\text{mm}$ とした。

鋼板 A の表面処理は、公共建築工事標準仕様書[2]で規定されている鉛・クロムフリーさび止めペイント(以下、さび止めペイント)2 回塗りとした。また、実施工ではさび止めペイントを工場出荷時までの赤錆防止として塗装された形鋼が下地材(膜厚 10~15 μm)として使用されることがある。そこで、膜厚 13 μm の試験体を鋼板 A' として用いた。

鋼板 B の表面処理は、溶融亜鉛めっき HDZ55 とした。また、鋼板 B' の表面処理は、HDZ40 のめっき付着量の下限側となる片面のめっき厚が約 59 μm の試験体を用いた。これは、下地材は板厚 2.3 mm の形鋼を用いることが多く、溶融亜鉛めっきの JIS 規格によると、この板厚は HDZ40 までしかめっき処理をすることが出来ないためである。

鋼板 C は、JIS G 3323 溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっき鋼板とした。これは、近年、乾式胴縁システム[4]の下地材として用いられている。鋼板 C' は鋼板 C と同じ仕様であるが、製品ロットが異なる。

鋼板 D は、冷間圧延ステンレス鋼板(SUS304)の 2B 仕上げとした。また、板厚は市場で入手可能で、他の試験片との板厚差が小さい 2.0mm とした。

2.1.2 ドリルねじの仕様

ドリルねじは、ねじ径を $\phi 6\text{mm}$ とし、表面処理は、一般的に用いられることが多い電気亜鉛めっきとステンレス鋼(SUS410)の他に、現在流通している製品のうち、表面処理の仕様を 3 種類選定した。ドリルねじ a, d, e の頭部形状は六角、ドリルねじ b, c は十字穴付きナベ頭とした。

ドリルねじ a の表面処理は、電気亜鉛めっきで膜厚は 5 μm であり、安価で入手し易く、外壁の固定に関わらず、ドリルねじの表面処理としては一般的な仕様である。

ドリルねじ b の表面処理は、層状に重なった亜鉛フレークと珪素系の無機バインダーを主成分とする塗装で、膜厚は約 8 μm である。外壁用の金属パネルを固定するドリルねじの表面処理として用いられている。

ドリルねじ c の表面処理は、亜鉛・アルミフレークを含有するベースコートと、アルミと有機系樹脂を主成分とするトップコートの 2 層からな

る複合被膜で、膜厚は約 12 μm である。ドリルねじ b と同様に、外壁用の金属パネルを固定するドリルねじの表面処理として用いられている。

ドリルねじ d の表面処理は、亜鉛ニッケル合金めっきに合金コーティングを施し、さらに潤滑効果があるトップコートからなり、膜厚は約 9 μm である。これは近年開発された表面処理で、ドリルねじのように傷が付きやすい金属に有効な表面処理である。

ドリルねじ e は、ステンレス鋼 SUS410 に硝酸処理による不動態化被膜を生成するパシペート仕上げを施している。耐食性に優れるため、建築工事では一般的な仕様として用いられている。

2.1.3 材料の組合せ

本研究では、塩水噴霧試験機の試験体設置スペースと試験スケジュールの関係で、鋼板 A, B, C, D と鋼板 A', B', C' は異なる時期に試験を行った。鋼板 A, B, C, D については、ドリルねじ a, b, c, d, e を使用した。一方、鋼板 A', B', C' では、鋼板 A, B, C, D の試験結果をもとに、市場流通材の膜厚仕様の検証とせん断耐力の影響も確認することとしたが、試験スケジュールを考慮して組合せを限定して実施した。その際、ドリルねじは、最も耐食性が低いと考えられるドリルねじ a と最も耐食性が高いとされるドリルねじ d の 2 種類を選定した。

2.2 耐食性試験による外観調査

下地材とドリルねじ接合部の耐食性を評価するために、下地材とドリルねじを組み合わせた試験体を製作し、中性塩水噴霧サイクル試験で腐食劣化を促進させた。耐食性評価の試験方法は、JIS H 8502 (めっきの耐食性試験方法) とし、塩水噴霧 35°C (2 時間) → 乾燥 60°C (4 時間) → 湿潤 50°C, 95%RH (2 時間) を 1 サイクルとする中性塩水噴霧サイクル試験 (以下,CCT) とした。繰り返し回数は、促進試験と大気曝露試験の関係[5]を参考に、都市・海岸地帯の約 40 年に相当する 200 サイクルとした。試験状況を写真 2-1 に示す。

試験体は、CCT 後に引張耐力試験を行うため、図 2-1 のようにドリルねじを下地材に中間付近まで締結した。写真 2-2 に試験体の写真を示す。鋼板 D(SUS304)は、ドリルねじの締結時に発生する摩擦熱によってドリルねじの先端が軟化して締付けが出来ないため、 $\phi 5.2\text{mm}$ の下孔を開けた後、ドリルねじを締結した。また、金属接触や鋼板の表面処理の影響を受けないドリルねじ単体の耐

食性を確認するために、厚さ 2.0 mm の樹脂板にドリルねじを締結した試験体の評価も行った。試験体は、約 70 度傾斜させ、試験機内にドリルねじの頭部が上面に向くように設置した。試験体は鋼板を各 3 体とし、樹脂板の試験体には、1 枚に 5 種類のドリルねじを 2 本ずつ打ち込んだ。

外観調査は、CCT200 サイクル後にドリルねじのねじ先端側の腐食状況を観察した。



写真 2-1 塩水噴霧試験機内部

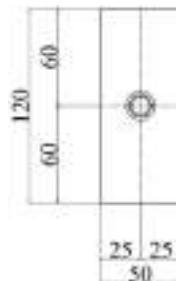


図 2-1 試験体形状



写真 2-2 試験体

2.3 腐食減量測定

2.3.1 鋼板の鋼素地の腐食減量率

鋼板の腐食を定量的に評価するために、CCT 前後の鋼板の鋼素地の腐食量を測定した。鋼板の鋼素地の腐食減量率は、以下の方法で算出した。

(1) CCT200 サイクル後に後述の引張耐力試験を行った後、各鋼板の腐食状況を目視で確認し、試験体 3 体のうち腐食状況が中間レベルの試験体を 1 体選定する。

(2) 上記(1)の鋼板を中性除錆剤に浸漬し、鋼板表面のめっきや塗膜及び錆をワイヤーブラシで除去した後、電子天秤で「CCT 後の鋼板の鋼素地重量」を測定する。①

(3) CCT 前の各鋼板を上記(2)と同様の方法でめっき及び塗膜を除去した後、「CCT 前の鋼板の鋼素地重量」を測定する。②

(4) 鋼板の鋼素地の腐食減量率(%)は以下の式で求めた。

$$\text{鋼板の鋼素地の腐食減量率(%)} = \{(② - ①) /$$

$$②\} \times 100$$

2.3.2 ドリルねじの鋼素地の腐食減量率

ドリルねじの腐食を定量的に評価するために、CCT 前後のドリルねじの鋼素地の腐食量を測定した。ドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、2.3.1 「鋼板の鋼素地の腐食減量率」の(2)～(4)と同様の方法で求めた。

2.4 ドリルねじ周辺の板厚測定

ドリルねじ接合部の局所的な腐食を定量的に評価するために、CCT200 サイクル後に鋼板 A の板厚を、ドリルねじ近傍と遠方について測定した。図 2-2 にドリルねじ周辺の板厚測定位を示す。測定位置は、ドリルねじ近傍はドリルねじから 10mm の位置、ドリルねじ遠方はドリルねじから 25mm の位置とし、各 4 点をデジタルマイクロメーターで測定した。



図 2-2 板厚減量測定位置

2.5 引張耐力試験

下地材とドリルねじ接合部の腐食後の引張耐力の低下を評価するために、万能試験機による引張耐力試験を行った。引張耐力試験は、図 2-3 のように CCT 前及び CCT 終了後の試験体を除錆せずに、ドリルねじ引張試験用の治具に試験体を設置し、万能試験機(SHIMADZU 製 UH-

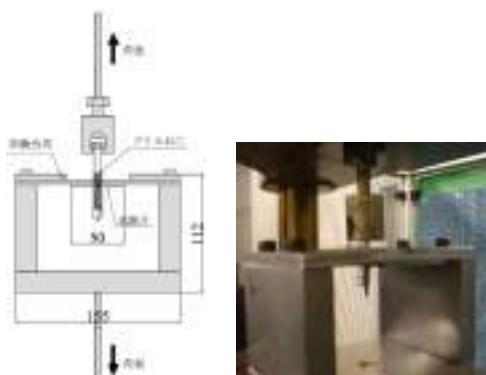


図 2-3 引張耐力試験 写真 2-3 引張耐力試験

200kNXR)によって引張載荷を行った。載荷速度は10mm/minとし、万能試験機のクロスヘッド間の移動距離と荷重を読み取った。試験状況を写真2-3に示す。引張耐力試験は、鋼板A, B, C, DについてはCCT前、CCT100サイクルとCCT200サイクル後とした。鋼板A', B', C'については、塩水噴霧試験機内の設置スペース及び試験スケジュールの関係で、CCT前、CCT200サイクル後とした。試験数は各3体とした。

2.6 せん断耐力試験

下地材とドリルねじ接合部の腐食後のせん断耐力の低下を評価するために、万能試験機によるせん断耐力試験を行った。図2-4に示すように、2枚の鋼板をドリルねじで締結したせん断試験体を約70度傾斜させ、塩水噴霧試験機内にドリルねじの頭部が上面に向くように設置した。CCT前及びCCT200サイクル終了後に、試験体を除錆せずに、写真2-4のように万能試験機(SHIMADZU製UH-200kNXR)によって引張載荷を行った。載荷速度は10mm/minとし、万能試験機のクロスヘッド間の移動距離と荷重を読み取った。せん断耐力試験は、鋼板A', B', C'とし、試験数は各3体とした。

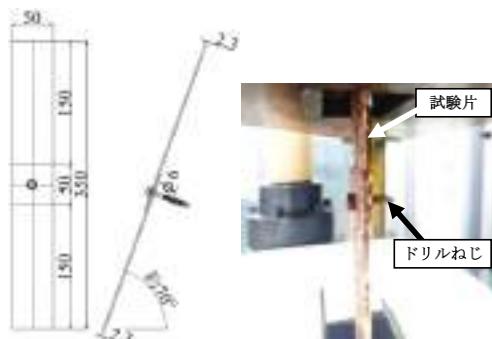


図2-4 せん断試験体 写真2-4 せん断耐力試験

3. ドリルねじ接合部の外観調査及び鋼板の鋼素地の腐食減量率

3.1 外観調査結果

ドリルねじ接合部の耐食性を確認するために、CCT200サイクル後の試験体3体(樹脂板のドリルねじは2本)のうち、ドリルねじの腐食が最も激しい試験体の外観を調査した。試験結果を表3に示す。各試験体の腐食状況は以下の通りであった。

(1) 樹脂板

下地材の表面処理の影響を受けない樹脂板に締結したドリルねじの腐食状況を観察した結果、ドリルねじa, b, c, eは著しい赤錆が発生しているが、ドリルねじdは白錆のみで赤錆の発生は確認されなかった。ドリルねじ単体の耐食性としては、ドリルねじdが良好であることが分かる。

(2) 鋼板A

鋼板及び全てのドリルねじで著しい赤錆が確認された。また、ドリルねじ単体の耐食性が良いドリルねじdにも赤錆が発生している。鋼板Aの場合は、鋼板から腐食が進行し、ドリルねじの耐食性にも影響を及ぼすことが分かる。

写真3に鋼板Aのドリルねじa及びdのCCT100サイクル後の腐食状況を示す。鋼板にはドリルねじ周辺に赤錆が発生しているが、ドリルねじから遠い部分では赤錆の発生は少なく、鋼板とドリルねじの接合部から腐食が進行していることが分かる。また、ドリルねじaはねじの先端まで赤錆が発生している。一方、ドリルねじdは鋼板とドリルねじの噛み合わせ部に僅かに赤錆が発生しているが、ねじの先端は白錆に留まっている。従って、鋼板Aは外観上、半屋外となるような環境の下地材の鋼板として適さないと言える。



写真3 CCT100サイクル後の外観写真
ドリルねじa ドリルねじd

(3) 鋼板A'

鋼板Aと同様に、鋼板及びドリルねじa, dとともに著しい赤錆が確認された。鋼板Aに比べて、鋼板表面の腐食は激しく、また、ドリルねじの先端まで赤錆が進行しており、さび止め塗装鋼板の膜厚の影響であると推定される。従って、さび止めペイントを一次防錆用に塗装された鋼板は、外観上、下地材の鋼板としては適さないと言える。

(4) 鋼板B

鋼板には赤錆の発生は少ないが、白錆が多く発生していた。全てのドリルねじは、鋼板Aに比べて腐食が抑制されており、また、樹脂板のドリルねじの腐食状況と同様に、ドリルねじdの赤錆は

表3 CCT200 サイクル後の試験体外観と鋼板の鋼素地の腐食減量率(%)

		ドリルねじ				
		a	b	c	d	e
樹脂板						
鋼板	A さび止めペイント					
	A' さび止めペイント		鋼板の鋼素地の腐食減量率			
	B 溶融亜鉛めっき					
	B' 溶融亜鉛めっき					
	C 高耐食めっき					
	C' 高耐食めっき					
	D SUS304					

注) 鋼板の鋼素地の腐食減量率は、鋼板 A', B', C' についてドリルねじ d のみを調査した

僅かであった。これは、溶融亜鉛めっき鋼板の犠牲防食作用で鋼板の腐食が抑制され、ドリルねじの腐食に与える影響が小さかったと考えられる。

(5) 鋼板 B'

鋼板の一部に点状の赤錆が確認された。これは鋼板 B の溶融亜鉛めっきに比べてめっき付着量が約 1/2 に少なくなった影響と考えられる。このため、ドリルねじ a, ドリルねじ d の腐食は鋼板 B よりも進行していた。

(6) 鋼板 C

鋼板の赤錆の発生は少なく、またドリルねじ b, c は樹脂板のドリルねじ及び鋼板 A, B で確認されたような著しい赤錆は確認されなかった。さらに、ドリルねじ b, d は赤錆の発生が確認されなかった。鋼板 C は、高耐食めっき鋼板であり、緻

密な腐食成生物が腐食を抑制する[6]ため、半屋外となるような環境のドリルねじ接合に用いる下地材の鋼板としては、耐食性に優れていることが分かる。

(7) 鋼板 C'

鋼板 C と同様に赤錆の発生は少なく、ドリルねじ d も腐食が少なかった。

(8) 鋼板 D

鋼板の表面にドリルねじからの流れ錆による赤錆が確認され、ドリルねじ d 以外は著しい赤錆が発生した。ドリルねじ d は、ステンレス SUS410 のドリルねじ e よりもステンレス鋼板との相性が良いことが分かる。

以上の外観調査結果から、半屋外となるような環境の下地材の鋼板としては、鋼板 C, C' とす

るのが良いことが分かった。

3.2 鋼板の鋼素地の腐食減量率

鋼板の鋼素地の腐食減量率を表3に示す。各試験体の腐食減量率は以下の通りであった。

(1)鋼板 A, A'

鋼板 A 及び鋼板 A'は、ドリルねじの種類によらず鋼板の鋼素地の腐食減量率が約 30%まで達していた。一般に、鋼材板厚の 10%が腐食した時を鋼材の耐用限界に達したとされる[7]が、鋼板 A, A'の鋼板の鋼素地の腐食減量率が耐用限界である 10%を大幅に超えており、今回の試験体の中では最も耐食性が劣る結果となった。

鋼板 A の防錆仕様は、さび止めペイントの2回塗りであるが、この防錆仕様では十分な防錆効果はなく、中塗り、上塗り用塗料を組み合わせて初めて十分な防錆機能を発揮されると言われている[8]。今回の試験結果はそれを裏付けるものとなった。

(2)鋼板 B, B'

鋼板 B は鋼板の鋼素地の腐食減量率が 2%以下であり、鋼板の鋼素地の腐食はほとんどないことが確認された。鋼板 B'は鋼板の鋼素地の腐食減量率が 7.2%であった。

鋼板 B, B'は、めっきの犠牲防食が働き、鋼素地を保護したため腐食が少なかったと考えられ

る。鋼板 B'が鋼板 B より鋼板の鋼素地の腐食減量率が大きくなった理由は、めっき付着量が少ないことによる影響と考えられる。

(3)鋼板 C, C'

鋼板 C は鋼板の鋼素地の腐食減量率が 2%以下であり、鋼板の鋼素地の腐食はほとんどないことが確認された。鋼板 C'は鋼板の鋼素地の腐食減量率が 4%となり、鋼板 C よりもわずかに大きくなつたが、塩水噴霧試験機の機差の影響だと考えられる。

鋼板 C, C'は、めっきの犠牲防食が働き、鋼素地を保護したため腐食が少なかったと考えられる。

(4)鋼板 D

鋼板 D の鋼板の鋼素地の腐食減量率は 0.1%以下であった。これは、鋼板表面の不動態皮膜による防錆効果と言える。尚、ステンレス鋼 SUS304 は耐食性に優れるが、前述のようにあらかじめ下孔をあけておく必要があるなど、施工手間が大幅に増える事が課題である。

以上の鋼板の鋼素地の腐食減量率の測定結果から、半屋外となるような環境の下地材の鋼板としては、鋼板 B, C, C'とするのが良いことが分かった。

表4 ドリルねじの除錆後の外観とドリルねじの鋼素地の腐食減量率 (%)

		ドリルねじ				
		a	b	c	d	e
CCT前	除錆剤浸漬前					
	除錆剤浸漬後 (プランク)					
CCT200 サイクル後 鋼板	樹脂板	36.0%	31.4%	24.2%	2.2%	7.2%
	A さび止めペイント	37.0%	29.6%	22.4%	4.9%	6.1%
	A' さび止めペイント	42.8%(対A1.2倍)	ドリルねじの鋼素地の腐食減量率		13.8%(対A2.8倍)	
	B 溶融亜鉛めっき	28.4%	9.2%	11.0%	1.7%	4.3%
	B' 溶融亜鉛めっき	37.6%(対B1.3倍)			2.0%(対B1.2倍)	
	C 高耐食めっき	24.4%	6.4%	7.8%	1.2%	3.9%
	C' 高耐食めっき	27.5%(対C1.1倍)			1.5%(対C1.3倍)	
D SUS304		35.2%	30.6%	24.3%	2.1%	7.0%

4. ドリルねじの除鏽後の外観調査及びドリルねじの鋼素地の腐食減量率

腐食したドリルねじの除鏽後の外観写真及び鋼素地の腐食減量率を表4に示す。各ドリルねじの外観と鋼素地の腐食減量率は以下の通りとなつた。

(1) 樹脂板のドリルねじ

ドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a, b, c は 20% を超え、ねじ山も樹脂板との噛込部以外はほとんど消失していた。一方、ドリルねじ d, e の鋼素地の腐食減量率は 10% 未満であり、ねじ山の多くが残存していた。

(2) 鋼板 A のドリルねじ

樹脂板のドリルねじと同様にドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a, b, c は 20% を超え、ねじ山も鋼板との噛込部以外はほとんど消失していた。一方、ドリルねじ d, e の鋼素地の腐食減量率は 10% 未満であり、ねじ山の多くが残存していた。

(3) 鋼板 A' のドリルねじ

ドリルねじ a の鋼素地の腐食減量率は 42.8%，ドリルねじ d の鋼素地の腐食減量率は 13.8% となり、鋼板 A に比べ 1.2 倍及び 2.8 倍に増加した。これは鋼板のさび止めペイントの塗膜が薄くなつたため、鋼板 A' が早期に発鏽し長期間その影響を受けたことが原因と考える。

(4) 鋼板 B のドリルねじ

ドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a, c は 10% を越えたが、ドリルねじ b, d, e は 10% 未満であり、ねじ山の多くが残存していた。鋼板 A のドリルねじの鋼素地の腐食減量率よりも鋼板 B のドリルねじの方が少なかつた。これは亜鉛めつきの成分が犠牲防食作用によりドリルねじを覆い、ドリルねじの腐食を抑制したと考えられる。

(5) 鋼板 B' のドリルねじ

ドリルねじ a の鋼素地の腐食減量率は 37.6%，ドリルねじ d の鋼素地の腐食減量率は 2.0% となり、鋼板 B に比べ 1.3 倍及び 1.2 倍に増加した。これは鋼板のめつき付着量が少なくなつたことが原因と考える。

(6) 鋼板 C のドリルねじ

ドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a は 20% を超えたが、ねじ山は残存していた。ドリルねじ b, c は 10% 未満であり、また、ドリルねじ d, e は 5% 未満であった。鋼板 B のドリルねじの鋼素地の腐食減量率よりも鋼板 C のド

リルねじの方が少なかつた。これは亜鉛めつきよりも高い耐食性を有する亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めつきの成分が犠牲防食作用によりドリルねじを覆い、ドリルねじの腐食を抑制したと考えられる。

(7) 鋼板 C' のドリルねじ

ドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a は 20% を超えたが、ねじ山は残存していた。一方、ドリルねじ d の鋼素地の腐食減量率は 1.5% であり、ねじ山の多くが残存していた。

(8) 鋼板 D のドリルねじ

樹脂板のドリルねじ、鋼板 A のドリルねじと同様にドリルねじの鋼素地の腐食減量率は、ドリルねじ a, b, c は 20% を超え、ねじ山も鋼板との噛込部以外はほとんど消失していた。一方、ドリルねじ d 及びドリルねじ e の鋼素地の腐食減量率は 10% 未満であり、ねじ山の多くが残存していた。

以上のドリルねじの鋼素地の腐食減量率の測定結果より、ドリルねじ d の鋼素地の腐食減量率は、鋼板 A' 以外のすべての鋼板で 5% 未満であつた。従つて、半屋外となるような環境に用いるドリルねじとしては、ドリルねじ d とするのが良いことが分かった。

5. ドリルねじ周辺の腐食

写真 5 にドリルねじ周辺が円形に腐食した鋼板 A の外観と板厚の測定個所を示す。現地調査

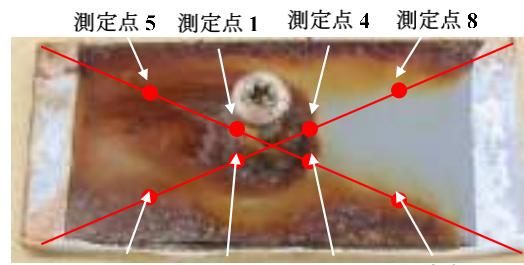


写真 5 鋼板 A(CCT200 サイクル)

表 5 除鏽後の板厚 (CCT200 サイクル)

下地-ドリルねじ	測定位	測定点1	測定点2	測定点3	測定点4	平均
A-a		1.02	1.36	1.28	1.22	1.22
A-b	ねじ孔	0.81	1.19	1.29	1.42	1.18
A-c	中心から	1.24	1.18	1.26	1.40	1.27
A-d	10mm	1.47	1.49	1.46	1.45	1.47
A-e		1.19	1.14	1.52	1.44	1.32
					総平均	1.29

mm

下地-ドリルねじ	測定位	測定点5	測定点6	測定点7	測定点8	平均
A-a		1.64	1.55	1.69	1.83	1.68
A-b	ねじ孔	1.67	1.66	1.77	1.63	1.68
A-c	中心から	1.93	1.54	1.98	1.98	1.86
A-d	25mm	1.70	1.50	2.09	2.19	1.87
A-e		1.62	1.73	1.42	1.53	1.58
					総平均	1.73

で確認されたように、下地材がドリルねじ貫通部を中心として円形に錆びている状況が、本研究の促進試験でも再現された。そこで、CCT200 サイクル後の鋼板 A の除錆後の板厚を、ドリルねじ近傍と遠方について測定した。表 5 に測定結果を示す。ねじ穴の中心から 10mm の位置の平均板厚は 1.29mm, 25mm の位置の平均板厚は 1.73mm であり、ねじの周辺部ではドリルねじの近傍ほど腐食が進行することが確認できた。

ドリルねじの貫通部を中心として円形に錆びた原因は、図 5 のようなねじ周辺の腐食メカニズムであると推定される。ドリルねじの周辺に水及び腐食因子が滞留すると、ドリルねじとその周辺の鋼板が腐食し、腐食成生物に水が滞留し腐食が促進される。これらの繰り返しにより局所的な腐食が進行した。

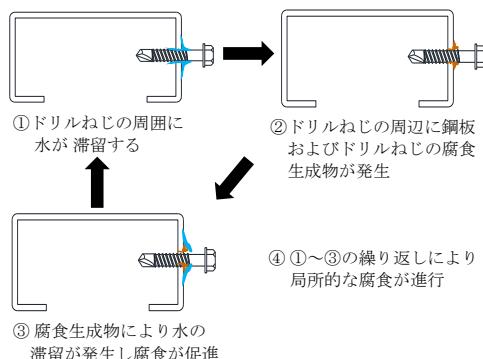


図 5 ねじ周辺の腐食メカニズム

6. 引張耐力

引張試験後の試験片は、写真 6-1 のようにドリルねじが鋼板から引抜ける破壊性状であり、鋼板が面外方向に変形した。また、図 6-8 のように、荷重と変形の関係には明確な降伏点が現れないため、本稿では、ドリルねじ接合部の降伏引張耐力を試験における最大荷重の 70% と定義した[9]。また、ドリルねじ接合部の短期許容引張耐力[10]は、鋼板の板厚が 2.3mm、ドリルねじ径が 6.0mm の場合は 2.32kN である。

図 6-1 から図 6-4 に、鋼板 A, 鋼板 B, 鋼板 C, 鋼板 D の CCT 前, CCT100 サイクル後, CCT200 サイクル後の降伏引張耐力と短期許容引張耐力を示す。また、表 6 に CCT 前に対する CCT200 サイクル後の引張耐力の低下率 {1-(CCT200 サイクル/CCT 前)} × 100(%) を示す。

図 6-1 に示す鋼板 A の場合、引張耐力の低下率は 26% から 38% であり、CCT200 サイクル後には、短期許容引張耐力よりも小さくなるケースが

あった。一方、図 6-2, 図 6-3, 図 6-4 の鋼板 B, C, D は、鋼板 D のドリルねじ c 以外は引張耐力の低下率は 10% 以下で、著しい引張耐力の低下は認められなかった。

図 6-5 から図 6-7 に、鋼板 A', 鋼板 B', 鋼板 C' の CCT 前, CCT200 サイクル後の降伏引張耐力と短期許容引張耐力を示す。

図 6-5 の鋼板 A'において、CCT200 サイクル後の引張耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 28%, ドリルねじ d は 27% 低下した。鋼板 A では、ドリルねじ d の引張耐力は、短期許容引張耐力近くまで低下したが、鋼板 A' でも同様の結果となった。鋼板 A' の CCT200 サイクル後の試験片は、写真 6-1 のように塗膜が残っておらず、鋼板の鋼素地の腐食減量率が同程度であったことを考えると、さび止めペイントの塗膜厚の違い(鋼板 A: 61μm, 鋼板 A': 13μm)は、引張耐力への影響が小さかったと考えられる。

図 6-6 の鋼板 B'において、CCT200 サイクル後の引張耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 23%, ドリルねじ d は 12% 低下した。鋼板 B では、溶融亜鉛めっき鋼板におけるドリルねじ d の引張耐力は 3% 低下したが、鋼板 B' のようにめっき厚の下限側に近い場合は、引張耐力に影響したと考えられる。

図 6-7 の鋼板 C'において、CCT200 サイクル後の引張耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 7%, ドリルねじ d は 6% 低下した。写真 6-1 のように鋼板 C' の腐食は少なく、鋼板 C の試験結果と同様に、引張耐力の低下は僅かであった。

7. せん断耐力

図 7-1 から図 7-3 に、鋼板 A', 鋼板 B', 鋼板 C' の CCT 前と CCT200 サイクル後の各鋼板の降伏せん断耐力と短期許容せん断耐力を示す。また、表 7 に CCT 前に対する CCT200 サイクル後の引張耐力の低下率 {1-(CCT200 サイクル/CCT 前)} × 100(%) 示す。ドリルねじ接合部の短期許容せん断耐力[10]は、鋼板の板厚が 2.3mm、ドリルねじ径が 6.0mm の場合は 5.09kN である。降伏せん断耐力は、最大荷重の 70% とした。試験後のドリルねじは、写真 7-1 のようにせん断破断している。

図 7-1 の鋼板 A'において、CCT200 サイクル後のせん断耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 9%, ドリルねじ d は 6% 低下した。いずれも、降伏せん断耐力は短期許容せん断耐力に対しては余裕があることが分かる。

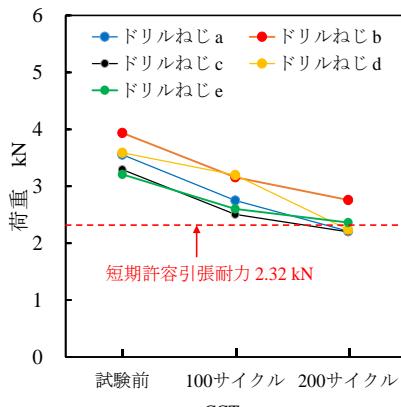


図 6-1 鋼板 A の引張耐力

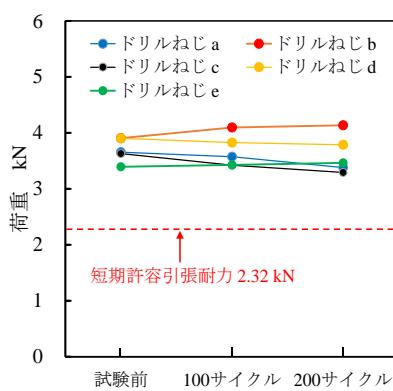


図 6-2 鋼板 B の引張耐力

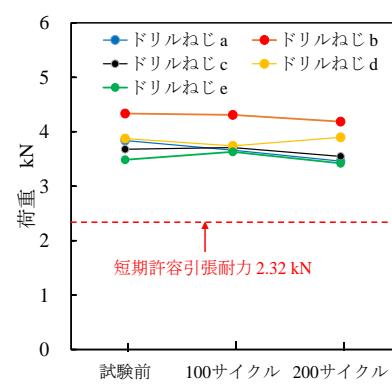


図 6-3 鋼板 C の引張耐力

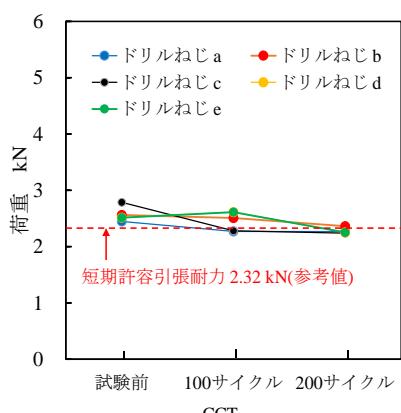


図 6-4 鋼板 D の引張耐力

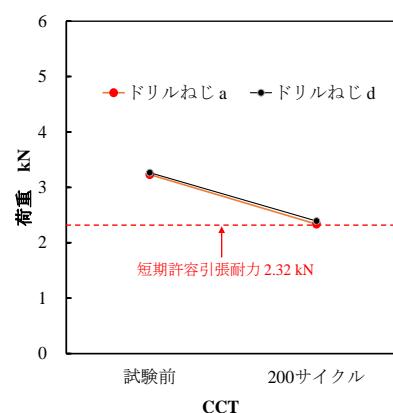


図 6-5 鋼板 A' の引張耐力

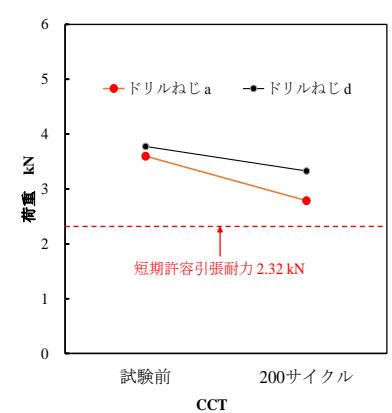


図 6-6 鋼板 B' の引張耐力

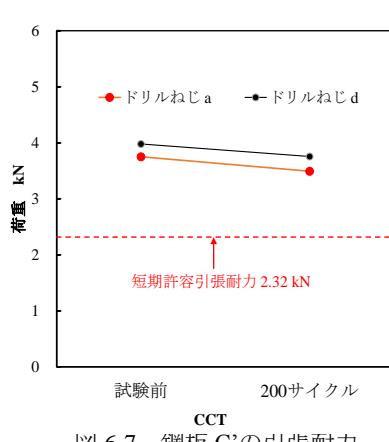


図 6-7 鋼板 C' の引張耐力

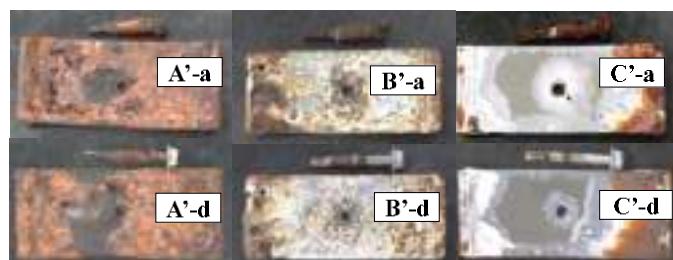


写真 6-1 引張耐力試験後の試験片(CCT200 サイクル後)

表 6 引張耐力の低下率

鋼板	ドリルねじ						
	a	b	c	d	e		
A	38%	30%	33%	38%	26%		
B	8%	-6%	9%	3%	-2%		
C	10%	3%	4%	-1%	2%		
D	7%	8%	20%	-4%	10%		
A'	28%	27%		C-a-200 C-b-200 C-c-200 C-d-200 C-e-200			
B'	23%	12%					
C'	7%	6%					

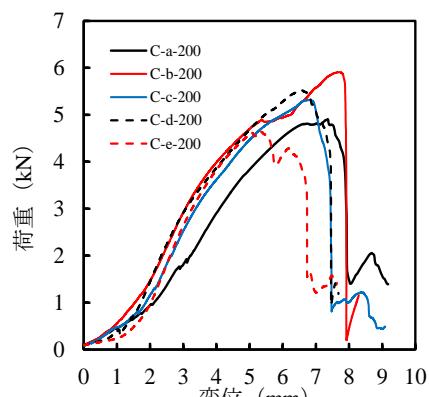


図 6-8 鋼板 C の CCT200 サイクル後の荷重-変位

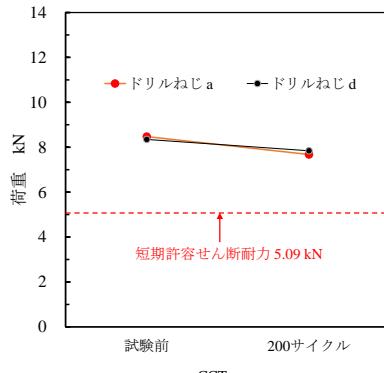


図 7-1 鋼板 A' のせん断耐力

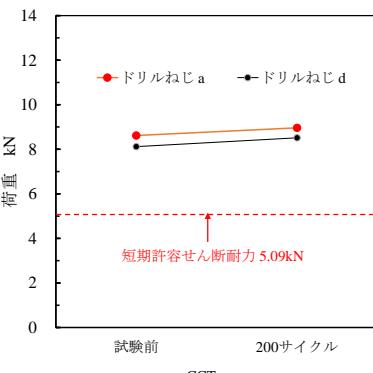


図 7-2 鋼板 B' のせん断耐力

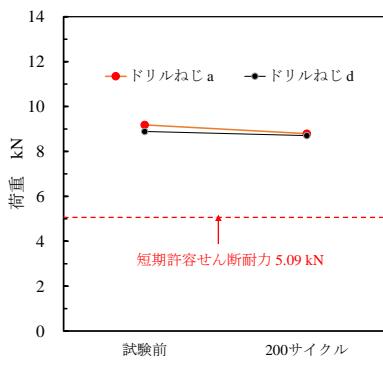


図 7-3 鋼板 C' のせん断耐力

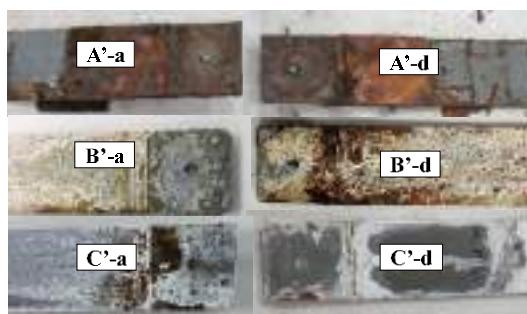


写真 7-2 ドリルねじの破断面とねじの直径

写真 7-1 せん断試験後の試験片(CCT200 サイクル後)

図 7-2 の鋼板 B'において、CCT200 サイクル後のせん断耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 4%，ドリルねじ d は 5%増加した。腐食後に荷重が僅かに増加しているのは、腐食により接合部が固着したためだと考えられる。

図 7-3 の鋼板 C'において、CCT200 サイクル後のせん断耐力は、CCT 前に対してドリルねじ a は 4%，ドリルねじ d は 2%低下した。引張耐力試験と同様にせん断耐力の低下は僅かであった。

写真 7-2 に、鋼板 A', B', C'のドリルねじ a の破断面と直径の測定値を示す。ドリルねじ a の腐食は顕著であったが、破断面の直径は各鋼板とも CCT 前後で大きな差は無かった。鋼板とドリルねじの噛み合わせ部分の腐食は少なく、せん断耐力への影響は小さかったと考えられる。

表 7 せん断耐力の低下率

鋼板	ドリルねじ	
	a	d
A'	9%	6%
B'	-4%	-5%
C'	4%	2%

8. 試験結果のまとめ

外壁接合部の耐久性に関する実験を行なった結果、以下の結論を得た。試験結果のマトリック

表 8 外壁下地鋼材とドリルねじ接合部の耐久性

鋼板	評価項目	ドリルねじ				
		a	b	c	d	e
A さび止めペイント (膜厚60μm)	腐食減量	×	×	×	●	×
	外観	ドリルねじ	×	×	△	×
	引張耐力	×	×	×	×	×
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×			
	引張耐力	×				
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	×	●
	引張耐力	△	●	△	●	●
A' さび止めペイント (膜厚15μm)	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×			
	引張耐力	×				
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	×	●
	引張耐力	△	●	△	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	×	●
B 溶融亜鉛めっき (HDZ55)	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	×	×	●
	引張耐力	△	●	△	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	×	●
	引張耐力	△	●	△	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
B' 溶融亜鉛めっき (HDZ40)	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
	引張耐力	△				
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
	引張耐力	△	●	△	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
C 高耐食めつき (K27)	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	●	△	●
	引張耐力	△	●	●	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
	引張耐力	△	●	●	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
C' 高耐食めつき (K27)	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	●			
	引張耐力	●				
	せん断耐力	●				
	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
	引張耐力	△	●	●	●	●
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
D SUS304	腐食減量	●	●	●	●	●
	外観	ドリルねじ	×	△	△	●
	引張耐力	△	△	×	●	×
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	△	△	△	●
	引張耐力	△	△	×	●	×
	せん断耐力	●				
	腐食減量	-				
	外観	ドリルねじ	△	△	△	●

腐食減量率 ●5%未満 △5%以上10%未満 ×10%以上

引張耐力低下率 ●5%未満 △5%以上10%未満 ×10%以上

外観 ●白錆または僅かな赤錆 △赤錆あり ×激しい赤錆

せん断耐力低下率 ●5%未満 △5%以上10%未満 ×10%以上

スを表8に示す。尚、各試験の評価は、「腐食減量率」については5%未満を●、5%以上10%未満を△、10%以上を×で、「外観」については、白錆または僅かな赤錆を●、赤錆ありを△、著しい赤錆を×で、「引張耐力低下率」及び「せん断耐力低下率」は5%未満を●、5%以上10%未満を△、10%以上を×で示し、整理した。

8.1 外観調査

鋼板A及び鋼板A'は、鋼板に著しい赤錆が確認された。ドリルねじについては、鋼板Aのドリルねじd以外は著しい赤錆が確認された。

鋼板Bは白錆が多く発生し、鋼板B'は点状赤錆が確認された。ドリルねじについては、ドリルねじd以外は著しい赤錆が確認された。

鋼板C及び鋼板C'は、鋼板に白錆が確認された。また、ドリルねじについてはドリルねじa,eは著しい赤錆が確認されたが、それ以外のドリルねじは、白錆または僅かな赤錆の発生までであった。

鋼板Dは鋼板に流れ錆による赤錆が確認された。また、ドリルねじは、ドリルねじd以外は著しい赤錆が確認された。

従って、外観上は鋼板Cとドリルねじbとdの組み合わせが良い。

8.2 鋼板の鋼素地の腐食減量率

鋼板A及び鋼板A'の鋼板の鋼素地の腐食減量率は約30%に及んだ。一方、鋼板B,C,C',Dは、鋼板の鋼素地の腐食減量率が全て5%未満であった。ただし、鋼板Dはあらかじめ下孔をあけておく必要があるなどの課題があることから、下地材の選定においては鋼板の鋼素地の腐食減量が少ない鋼板B,C,C'とするのが良い。

8.3 ドリルねじの鋼素地の腐食減量率

ドリルねじdの鋼素地の腐食減量率は、鋼板A'以外の全ての鋼板で5%未満であった。このことから、耐食性の高いドリルねじとしてはドリルねじdとするのが良い。

8.4 ドリルねじ周辺の腐食

ドリルねじ周辺の腐食状況を確認した結果、ドリルねじ遠方に比べねじ近傍の方が板厚の減少量が大きかった。これは、ドリルねじ周辺の腐食生成物により水が滞留しやすく長期間に渡り湿潤状態になるためと推定された。

8.5 引張耐力

鋼板A,A'は、ドリルねじの種類に関わらず接合部の引張耐力が低下し、降伏引張耐力が短期許容引張耐力を下回るケースがあった。鋼板B,B'及び鋼板C,C'は、著しい引張耐力の低下は認められなかった。

8.6 せん断耐力

外観上の腐食に違いがあつても、せん断耐力の低下は少ないことが分かった。これはドリルねじと鋼板の噛み合わせ部では、ねじの腐食が僅かであることが原因と考えられる。

8.7 結論

本研究の結果、外壁下地鋼材の鋼板の表面処理の仕様とドリルねじの表面処理の仕様の組合せによって、ドリルねじ接合部の腐食や耐力に影響を及ぼすことが明らかになった。

実験の結果、鋼板C,C'に打込まれたドリルねじは、最も腐食量が少ないことが分かった。これは、耐食性の高い亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきの犠牲防食がドリルねじにも働いたためと考えられる。また、近年流通している新しい表面処理を施したドリルねじの中でも、ドリルねじdが耐食性に優れることが分かった。

従って、本研究により得られた耐食性の観点での鋼板とドリルねじの最適な選定は、下地材には鋼板C,C'(高耐食めっき鋼板)を、ドリルねじはd(亜鉛ニッケル合金めっき+合金コーティング+無機系コーティング)を用いた組み合わせである。

9. おわりに —研究成果と今後の展開—

既往の研究においては、建築の仕上げを構成する仕上材及び下地鋼材について、単体の経年による塩害等への耐久性、耐力の評価はなされていたが、近年流通している高耐食めっき鋼板(JIS G 3323)や新しい表面処理を施したドリルねじ等を組み合わせて総合的に比較評価したものはない。また、実際の建築設備において散見された接合部における局部的な劣化について、その要因と対策に至る研究成果がなかった。

本研究においては、材料単体の表面処理の差異とともに、実現象を踏まえた異なる表面処理仕様の接合部での組み合わせによる腐食影響の差異を比較検証することができた。

前章で述べたような最適な組み合わせが研究

成果から評価・抽出される反面、市場での入手性、施工性、期待する耐久性による費用対効果を含めた判断が必要となる。本研究の結果が設備の立地条件、期待する耐久性をもとに材料選定する際の判断材料となることを期待する。

本研究成果にとどまらず、進化する耐食技術を加味し、今後も技術的な検証を図り、設備の安全性と信頼性を向上させ、安全な高速度鉄道等の建設と維持保全に役立てていく。

参考文献

- [1] 国土交通省大臣官房官庁營繕部、建築工事監理指針、上巻 令和元年版、P658-P659、2019年10月
- [2] 国土交通省大臣官房官庁營繕部、公共建築工事標準仕様書（建築工事編）令和4年版、2022年5月
- [3] 作本好文、野村広正、松本雅充、二宮淳、宮尾俊明、坂本義仁：亜鉛めっき薄板軽量形鋼の耐久性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集 第540号、P133-P140、2001年2月
- [4] 中島一浩、岡本憲尚、川邊裕一、星山守、藤井勝義、城倉貴史：高耐食めっき鋼板と高耐食タッピング型ワンサイドボルトによる乾式接合胴縁システムに関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、P1143-P1144、2016年8月
- [5] 中村清徳、野村広正、山本誠志、松本雅充、辻川茂男：スチールの構造・耐久性に関する実験的研究（その11. 建築構造用表面処理軽量形鋼の耐久性試験）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、P421-P422、1996年9月
- [6] 清水剛、吉崎布貴男、三吉泰史、安藤敦司：溶融Zn-6%Al-3%Mg合金めっき鋼板(ZAM)の大気腐食挙動、日新製鋼技報、No.85、P15、2004年
- [7] 一般財団法人国土開発技術研究センター：鉄骨建築物の耐久性向上技術、技報堂出版、P75、1986年6月
- [8] 日本建築学会：鉄骨工事技術指針・工事現場施工編、P307、2018年1月
- [9] 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準、P48、2019年
- [10] 一般社団法人日本鉄鋼連盟：薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き第2版、P189、2014年3月