

2021年7月改訂

高耐久性鋼材/Sn 添加鋼(塗装周期延長鋼 CORSPACE®)
の防食性能評価に関する共同研究概要
および
鋼橋設計における材料の留意点

令和2年 3月

阪神高速道路株式会社

日本製鉄株式会社



目次

1.背景	3
2.本研究成果概要	3
3.実環境における CORSAPCE の耐食性評価	4
4.補修塗装を想定した CORSPACE の曝露試験結果	6
5.CORSAPCE による塗装塗り替え時期の延長効果	7
【各種特性と鋼橋設計における材料の留意点】	
1.CORSAPCE の化学成分、機械的特性	8
2.CORSAPCE 用の溶材材料	11
3.鋼橋設計における材料の留意点	12

1.背景

CORSPACE®は、塩化物を含む大気環境の腐食メカニズムに基づいて開発された新たな耐食鋼である。CORSPACE は微量の Sn を含み、塩化物を含む大気環境中の塗装欠陥部の腐食を抑制する。その結果、CORSPACE は橋梁等の鋼構造物の供用期間中の塗替え回数を従来鋼材に比べて削減することが可能となり、鋼構造物のライフサイクルコストの縮減が期待される。

そこで、阪神高速道路株式会社と日本製鉄株式会社において、CORSPACE の耐食性能を評価することを目的に、兵庫県神戸市の東神戸大橋の橋脚下にて曝露試験を 2008 年から、徳島県鳴門市の大鳴門大橋の橋脚下にて曝露試験を 2009 年から、10 年間実施した。

2.本研究成果概要

- 1) 実環境における 10 年曝露試験を実施した結果、CORSPACE は普通鋼に比べて塗装欠陥部の腐食を抑制し、塗装剥離と腐食深さの抑制が認められた。
- 2) 海上等の厳しい腐食環境に曝される橋梁に対して CORSPACE を適用することにより、100 年間の供用期間中において普通鋼に比べて塗替え回数を最大で 3 回削減することが可能と推定され、CORSPACE の適用はライフサイクルコストの縮減に寄与できると考えられる。
- 3) 補修時、鋼材表面のさび残存が懸念されるため、さびが残存した状態で塗装を施した試験片を準備し、実環境で曝露試験を実施したところ、CORSPACE は普通鋼に比べて塗装欠陥部の腐食を抑制し、塗装剥離を抑制することがわかった。

以下に本共同研究における研究成果の概略を示す。

3.実環境における CORSAPCE の耐食性評価

3.1.東神戸大橋における CORSAPCE の耐食性評価(10 年間)

曝露試験条件

- ・試験環境： 東神戸大橋橋脚部隣接、飛来塩分量 0.07mdd、日照水平曝露
- ・加速評価目的に C5 塗装系から無機 Zn リッチペイントを省略した塗装系で評価
 塗装系:エポキシ樹脂塗装(120 μ m)+ふっ素樹脂中塗(30 μ m)+ふっ素樹脂上塗(25 μ m)

曝露試験結果

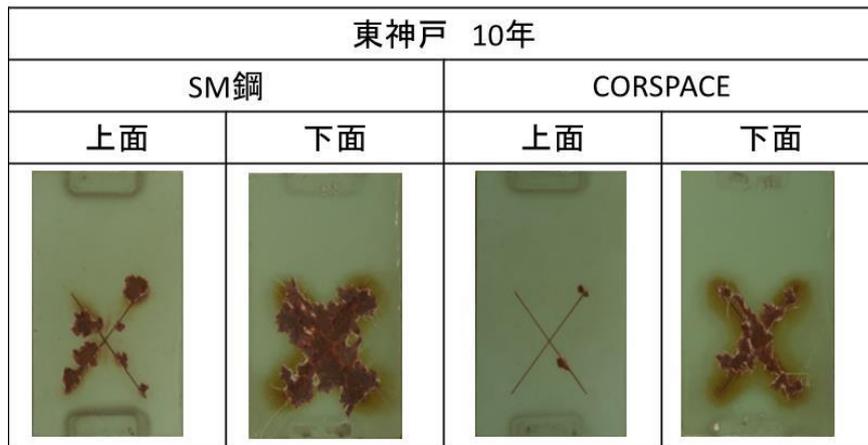


図 1 下面側の普通鋼および CORSPACE の曝露 10 年目の外観写真

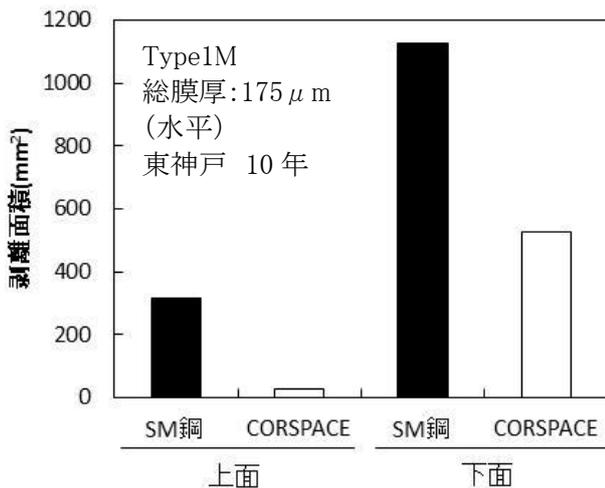


図 2 剥離面積(10年目)

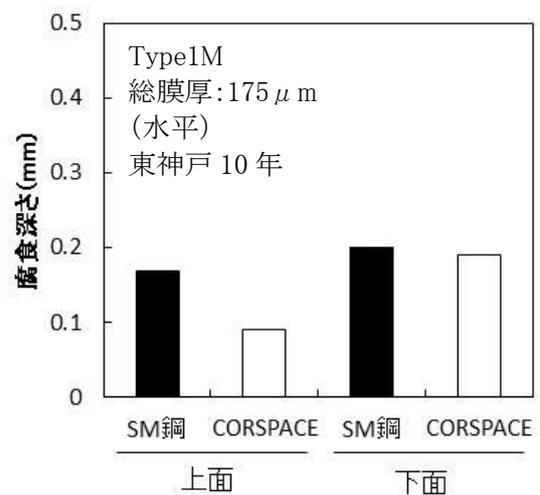


図 3 塗装きず部の腐食深さ(10年目)

東神戸大橋橋脚隣接部にて 10 年間曝露試験を行った結果、上下面とも **CORSPACE は普通鋼に比べて塗膜疵部の剥離面積が著しく抑制した。**

3.2.大鳴門大橋における CORSPACE の曝露試験(10 年間)

曝露試験条件

- ・試験環境: 大鳴門大橋四国側橋脚下、飛来塩分量 0.09mdd、日照水平曝露 下向き
- ・加速評価目的に C5 塗装系から無機 Zn リッチペイントを省略した塗装系で評価
 塗装系: エポキシ樹脂塗装(120 μm) + ふっ素樹脂中塗(30 μm) + ふっ素樹脂上塗(25 μm)

曝露試験結果

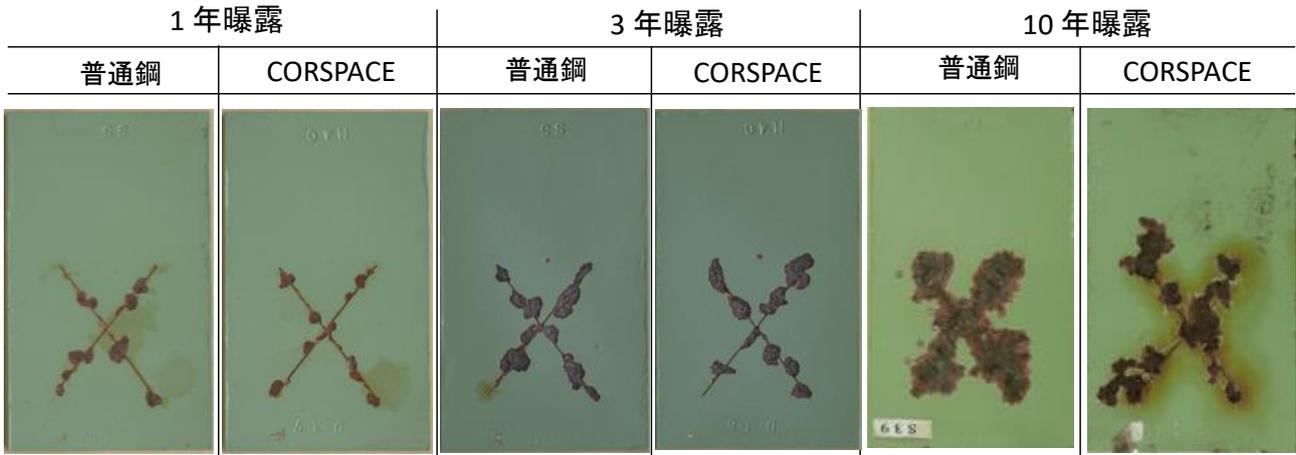


図 4 下面側の普通鋼および CORSPACE の曝露外観写真(大鳴門大橋)

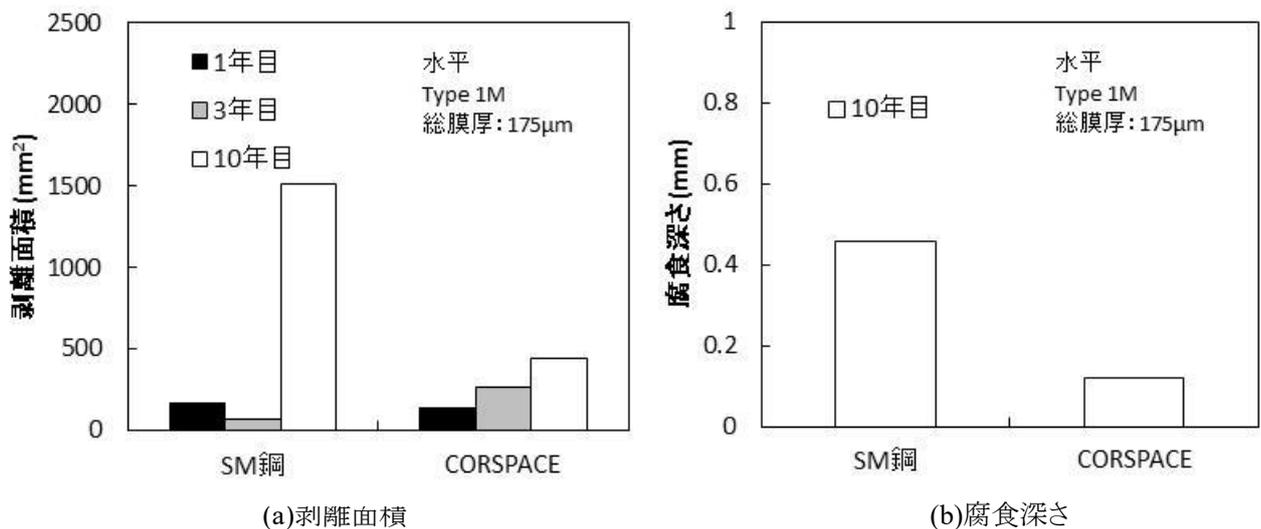


図 5 下面側の剝離さび面積率の変化と 10 年目の腐食深さ(大鳴門大橋)

大鳴門大橋にて水平下面側曝露試験を 10 年間行った結果、CORSPACE は普通鋼に比べて塗膜疵部の剝離面積と腐食深さの抑制が認められた。

4.補修塗装を想定した CORSPACE の曝露試験結果

曝露試験条件

- ・試験環境: 東神戸大橋橋脚部隣接、飛来塩分量 0.07mdd、日照水平曝露
- ・素地調整: ショットブラスト面をラボ腐食試験 (SAEJ2334) にて約 30 日間腐食させて表面浮きさび除去後、カップワイヤーホイールで素地調整 3 種 (3 種ケレン) を実施後、塗装
- ・試験片塗装: 加速評価目的に C5 塗装系から無機 Zn リッチペイントを省略した塗装系で評価
 塗装系: エポキシ樹脂塗装(120 μm) + ふっ素樹脂中塗(30 μm) + ふっ素樹脂上塗(25 μm)

曝露試験結果

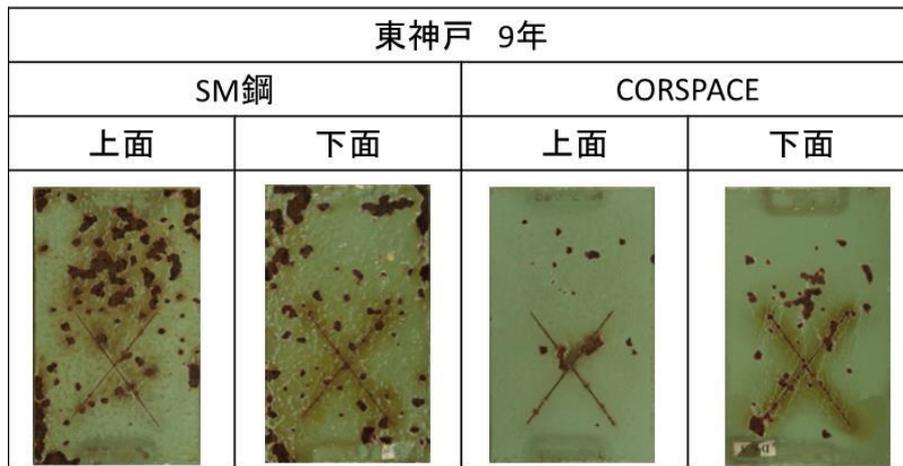


図 6 普通鋼および CORSPACE の 9 年曝露後の外観写真

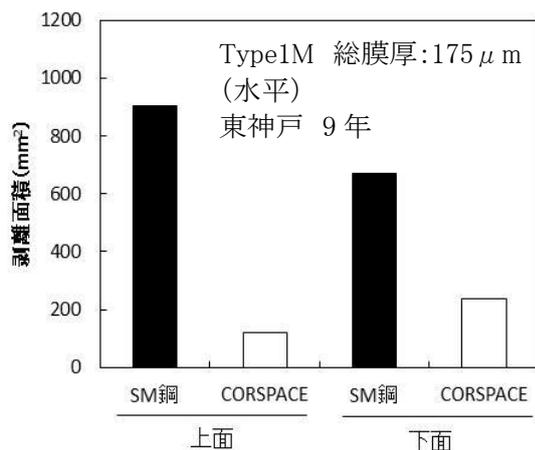


図 7 剥離面積(9年目)

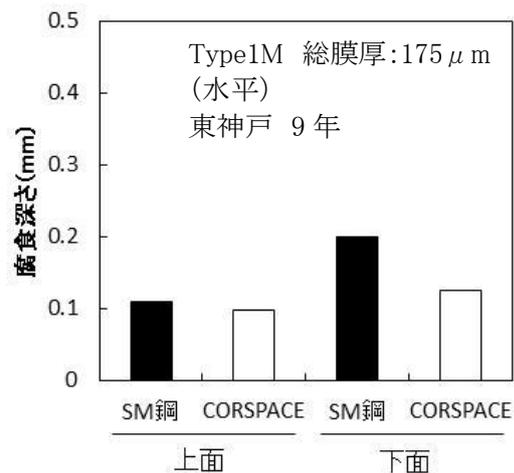


図 8 塗装きず部の腐食深さ(9年目)

補修塗装を想定したさび残存状態で塗装した試験片で CORSPACE は普通鋼に比べて塗膜疵部の剥離面積の抑制が認められた。

5.CORSAPCE による塗装塗り替え時期の延長効果

腐食促進試験

•SAE J2334 試験 :塩付着+乾湿の腐食試験サイクル

1)塩化物を含む大気環境の鋼の腐食形態が類似.

2)凍結防止剤の散布環境における鋼橋の腐食評価に用いられている.

試験結果

•橋梁一般外面塗装の C-5 塗装仕様と、防食下地のジンクリッチペイントを簡略した塗装仕様の試験片を評価.

•剥離面積の経時変化をゴンペルツ関数で Fitting して腐食劣化曲線を求めた.

•塗替え判定基準を総面積の 3%と仮定し、判定基準に至る腐食期間(試験サイクル)を比較した.

•ジンクリッチペイントの膜厚が大きくなる程、腐食は抑制され、CORSPACE はいずれの塗装仕様でも塗替え時期を延長できる(表1)

•C-5 塗装仕様では、SM 鋼に対して 1.7 倍延長可能.

•名古屋大伊藤教授の S6 サイクル試験による評価でも C-5 塗装仕様で、SM 鋼に対して 1.8 倍延長可能と報告.

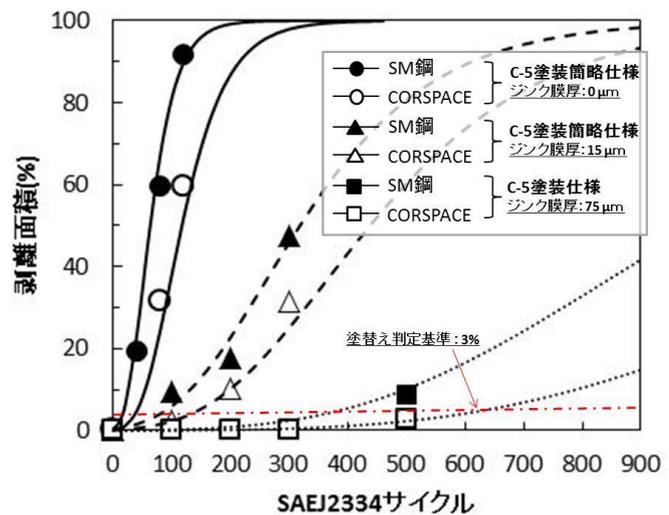


図 9 腐食促進試験における塗膜剥離面積率の変化と腐食劣化曲線

表 1 塗装仕様毎の腐食劣化曲線の係数と判定基準に至る腐食サイクル数, CORSPACE の効果

塗装仕様 (ジンクリッチ膜厚)	鋼材	腐食劣化曲線の係数		判定基準に至る サイクル数	Sn添加鋼の 延長効果	
		K	a			b
c-5簡略 (0 μm)	SM鋼	100	5.0×10^{-3}	0.968	15	2.0
	CORSPACE		1.5×10^{-3}	0.981	30	
c-5簡略 (15 μm)	SM鋼		4.8×10^{-3}	0.993	75	2.2
	CORSPACE		2.0×10^{-3}	0.995	170	
c-5 (75 μm)	SM鋼		0.5×10^{-3}	0.997	330	1.7
	CORSPACE		0.15×10^{-3}	0.998	560	

橋梁一般外面塗装の C-5 塗装仕様で、CORSPACE は普通鋼に比べて塗替え時期を約2倍延長できる。

【各種特性と鋼橋設計における材料の留意点】

1.CORSAPCE の化学成分、機械的特性

CORSPACE の化学成分および機械的特性を表 2~5 に示す。

表 2 種類の記号

種類の記号	化学成分,機械的性質	適用板厚(mm)	備考
SS400 -CORSPACE	JIS G3101 SS400 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SM400 -CORSPACE	JIS G3106 SM400 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SM490 -CORSPACE	JIS G3106 SM490 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SM490Y -CORSPACE	JIS G3106 SM490Y 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SM520 -CORSPACE	JIS G3106 SM520 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SM570 -CORSPACE	JIS G3106 SM570 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SBHS400 -CORSPACE	JIS G3140 SBHS400 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加
SBHS500 -CORSPACE	JIS G3140 SBHS500 通り	6 - 100	JIS規定内で化学成分にSnを添加

表 3 化学成分

種類の記号	厚さ		化学成分 (mass%)				
	(mm)	C	Si	Mn	P	S	Sn
SS400 -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 150	-	-	-	≤ 0.050	≤ 0.050	Add
SM400A -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 50	≤ 0.23	-	2.5×C以上	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
	50 < t ≤ 150	≤ 0.25					
SM400B -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 50	≤ 0.20	≤ 0.35	0.60 ~ 1.50	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
	50 < t ≤ 150	≤ 0.22					
SM400C -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.18	≤ 0.35	0.60 ~ 1.50	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
SM490A -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 50	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.65	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
	50 < t ≤ 150	≤ 0.22					
SM490B -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 50	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.65	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
	50 < t ≤ 150	≤ 0.20					
SM490C -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.65	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
SM490YA -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.65	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
SM490YB -CORSPACE							
SM520B -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.20	≤ 0.55	≤ 1.65	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
SM520C -CORSPACE							
SM570 -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.18	≤ 0.55	≤ 1.70	≤ 0.035	≤ 0.035	Add
SBHS400 -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.15	≤ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.006	Add
SBHS500 -CORSPACE	6 ≤ t ≤ 100	≤ 0.11	≤ 0.55	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.006	

表 4-1 降伏点または耐力、引張強さおよび伸び(JIS G3101 に同じ)

種類の記号	降伏点または耐力 (N/mm ²)				引張強さ (N/mm ²)	伸び		
	板厚(mm)					板厚(mm)	試験片	%
	16以下	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 100	t > 100				
SS400 -CORSPACE	≥ 245	≥ 235	≥ 215	≥ 205	400 ~ 510	t ≤ 16 t > 16 t > 40	1A号 1A号 4号	≥ 17 ≥ 21 ≥ 23 ^{a)}

a) 厚さ90mmを超える鋼板の4号試験片の伸びは、厚さ25.0mm又はその端数を増すごとにこの表の伸びの値から1を減じる。ただし、減じる限度は3とする。

表 4-2 降伏点または耐力、引張強さおよび伸び(JIS G3106 に同じ)

種類の記号	降伏点または耐力 (N/mm ²)					引張強さ (N/mm ²)		伸び		
	板厚(mm)					板厚(mm)		板厚(mm)	試験片	%
	16以下	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 75	75 < t ≤ 100	100 < t ≤ 150	6 ≤ t ≤ 100	100 < t ≤ 150			
SM400A -CORSPACE	≥ 245	≥ 235	≥ 215	≥ 215	≥ 205	400 ~ 510	400 ~ 510	t ≤ 16	1A号	≥ 18
SM400B -CORSPACE					-			t > 16	1A号	≥ 22
SM400C -CORSPACE					-			t > 40 ^{b)}	4号	≥ 24
SM490A -CORSPACE	≥ 325	≥ 315	≥ 295	≥ 295	≥ 285	490 ~ 610	490 ~ 610	t ≤ 16	1A号	≥ 17
SM490B -CORSPACE					-			t > 16	1A号	≥ 21
SM490C -CORSPACE					-			t > 40 ^{b)}	4号	≥ 23
SM490YA -CORSPACE	≥ 365	≥ 355	≥ 335	≥ 325	-	490 ~ 610	-	t ≤ 16	1A号	≥ 15
SM490YB -CORSPACE					-		t > 16	1A号	≥ 19	
					-		t > 40 ^{b)}	4号	≥ 21	
SM520B -CORSPACE	≥ 365	≥ 355	≥ 335	≥ 325	-	520 ~ 640	-	t ≤ 16	1A号	≥ 15
SM520C -CORSPACE					-		t > 16	1A号	≥ 19	
					-		t > 40	4号	≥ 21	
SM570 -CORSPACE	≥ 460	≥ 450	≥ 430	≥ 420	-	570 ~ 720	-	t ≤ 16	1A号	≥ 19
					-		t > 16	1A号	≥ 26	
					-		t > 20 ^{b)}	4号	≥ 20	

b) 厚さ100mmを超える鋼板の4号試験片の伸びは、厚さ25.0mm又はその端数を増すごとにこの表の伸びの値から1を減じる。ただし、減じる限度は3とする。

表 4-3 降伏点または耐力、引張強さおよび伸び(JIS G3140 に同じ)

種類の記号	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び		
			板厚(mm)	試験片	%
SBHS400 -CORSPACE	≥ 400	490 ~ 640	t ≤ 16	1A号	≥ 15
			t > 16	1A号	≥ 19
			t > 40	4号	≥ 21
SBHS500 -CORSPACE	≥ 500	570 ~ 720	t ≤ 16	5号	≥ 19
			t > 16	5号	≥ 26
			t > 20	4号	≥ 20

表 5-1 シャルピー吸収エネルギー (JIS G3106 に同じ)

種類の記号	試験温度 (°C)	シャルピー吸収 エネルギー(J)	試験片及び 試験片採取方向
SM400B -CORSPACE	0	≥ 27	Vノッチ 圧延方向 (板厚12mm超の 鋼板に適用)
SM400C -CORSPACE	0	≥ 47	
SM490B -CORSPACE	0	≥ 27	
SM490C -CORSPACE	0	≥ 47	
SM490YB -CORSPACE	0	≥ 27	
SM520B -CORSPACE	0	≥ 27	
SM520C -CORSPACE	0	≥ 47	
SM570 -CORSPACE	-5	≥ 47	

表 5-2 シャルピー吸収エネルギー (JIS G3140 に同じ)

種類の記号	試験温度 (°C)	シャルピー吸収 エネルギー(J)	試験片及び 試験片採取方向
SBHS400 -CORSPACE	0	≥ 100	Vノッチ 圧延方向 (板厚12mm超の 鋼板に適用)
SBHS500 -CORSPACE	-5	≥ 100	

【解説】

CORSPACE は、従来より用いられてきた、一般構造用圧延鋼材(SS 材:JIS G3101)、溶接構造用圧延鋼材(SM 材:JIS G3106)、および橋梁降伏鋼板(SBHS 材:JIS G3140)の耐食性を高めるため、微量の「スズ(Sn)」を新たに添加している。機械的特性やその他の化学成分は、従来の JIS 規格品に適合していることから、鋼橋設計では、CORSPACE 用に特段配慮する必要はなく、従来の JIS 規格品(SS 材、SM 材、SBHS 材)のまま、設計を行ってよい。

2.CORSAPCE 用の溶材材料

CORSAPCE 用の各種溶接材料を表 6、7 に示す。

表 6 種類の記号

鋼種	被覆アーク溶接棒 全姿勢	ソリッドワイヤ	フラックスワイヤ		サブマージアーク溶接材料	
			全姿勢	すみ肉	突合せ	すみ肉
SS400 -CORSPACE	L-55・PX	YM-26・PX	SF-1・PX	SM-1F・PX	YF-15 × Y-D・PX	YF-800 × Y-D・PX
SM400 -CORSPACE						
SM490 -CORSPACE						
SM490Y -CORSPACE						
SBHS400 -CORSPACE						
SM520 -CORSPACE	-	YM-55C・PX	-	-	YF-15B × Y-DM3・PX	NF-820 × Y-D・PX
SM520 -CORSPACE SBHS500 -CORSPACE	L-60・PX	YM-60C・PX	SF-60・PX	SM-60・PX	YF-15B × Y-DM・PX	NF-820 × Y-DM・PX

表 7 化学成分

銘柄	化学成分(%)								引張性能		衝撃性能	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Sn	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	温度 (°C)	vE (J)
L-55・PX	0.07	0.61	1.10	0.012	0.003	-	-	Add	503	607	-30	145
L-60・PX	0.07	0.56	1.07	0.010	0.006	0.70	0.24	Add	612	700	-20	126
YM-26・PX	0.08	0.39	0.97	0.005	0.011	-	-	Add	483	571	0	133
YM-55C・PX	0.06	0.46	1.02	0.004	0.010	-	0.22	Add	521	606	0	140
YM-60C・PX	0.05	0.48	1.06	0.004	0.010	-	0.23	Add	554	629	-5	127
SF-1・PX	0.06	0.44	1.19	0.013	0.006	-	-	Add	539	612	0	136
SM-1F・PX	0.05	0.54	1.46	0.018	0.014	-	-	Add	510	597	0	64
SF-60・PX	0.05	0.55	1.57	0.011	0.006	0.53	-	Add	595	665	-5	78
SM-60F・PX	0.05	0.57	1.80	0.014	0.010	-	-	Add	567	642	-5	81
YF-15 × Y-D・PX	0.07	0.45	1.54	0.016	0.006	-	-	Add	511	601	0	93
YF-800 × Y-D・PX	0.04	0.68	1.55	0.009	0.011	-	-	Add	415	534	0	49
YF-15B × Y-DM3・PX	0.08	0.31	1.76	0.013	0.006	-	0.21	Add	553	648	0	108
NF-820 × Y-D・PX	0.05	0.63	1.88	0.007	0.011	-	-	Add	478	588	0	81
YF-15B × Y-DM・PX	0.08	0.31	1.70	0.013	0.005	-	0.37	Add	595	699	-20	67
NF-820 × Y-DM・PX	0.06	0.59	1.81	0.005	0.011	-	0.40	Add	564	662	-5	70

【解説】

溶接材料の選定にあたっては、母材である CORSPACE と同等以上の耐食効果が期待出来る材料を用いることとする。

3. 鋼橋設計における材料の留意点

現在、CORSPACE は、鋼板(板厚:6~100mm)のみの製造であることから、設計段階において、形鋼、薄板、ボルトなどの調達可否について、十分な配慮が必要である。

(1) 鋼板の板厚:

設計における板厚選定における推奨板厚は、以下とする。

【 9、10、12、14、16、19、22、25、28、32、36、40～(以後+5mm ピッチ) 】

上記の推奨板厚は、(一社)日本鉄鋼連盟と(一社)日本橋梁建設協会により実施した板厚集約化に関する共同研究(H21 年度実施)より、板厚の集約化が「環境負荷の低減」ならびに「鋼材ロス率の低減」の効果があるという結果に基づくものである。

一方、鉄鋼メーカーの製造可能範囲は、従来通り 1mm ピッチであることから、上記の推奨板厚の選択が極端に不経済となる場合は、1mm ピッチとしてもよい。

ただし、1mm ピッチで鋼材重量が極端に少ないものがある場合は、推奨板厚の中から選定することとする。ここで、最小の鋼材重量は、各材質・板厚毎で 4.0t 以上かつ幅 1200 mm 以上とする。

(2) 形鋼:

下横構・対傾構で用いられる山形鋼や、横桁で用いられる H 形鋼などの形鋼類は、原則、CORSPACE 鋼板からの溶接構造とする。また、鋼床版下面のバルブリップについても、平リップもしくは U リップにて設計を行うこととする(次ページ 図 10 参照)。

(3) 箱桁や鋼製橋脚などの BOX 構造における内外の鋼材選定

箱桁や鋼製橋脚などの BOX 構造において、内側材の選定は、下図1のように内面塗装をする前提において、普通鋼の採用を原則とする。ただし、部材状況(対象:同一形状である部材や高力ボルトなど)により、取付け間違いを回避する配慮から、すべて CORSPACE 仕様に統一することが望ましい。

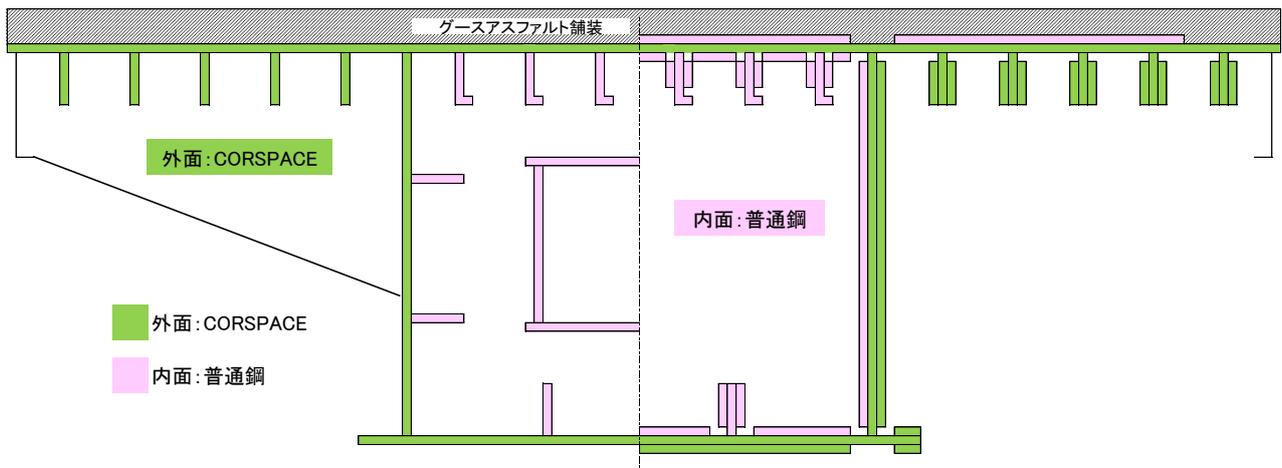


図 10 鋼床版箱桁の内側材の普通鋼の採用事例

【参考文献】

- 1) '16 デザインデータブック 日本橋梁建設協会 改訂新版発行 2016年5月 P.173-174より