

輸電導線劣化原因分析

鄭錦榮

A Case Study About Deterioration of ACSR Conductor

J. R. Cheng

摘要

本文探討沿海輸電導線(ACSR)長期曝露於海鹽環境中，由輸電導線外觀觀察導線外層鋁素線易斷股，內層絞線間大量腐蝕生成物沉積，鋼心線銹蝕，在更換導線時鋁素線很容易被扯斷，因此進行導線劣化因素分析。試驗方法包括腐蝕生成物分析、外觀腐蝕分析、腐蝕率及線徑損耗分析、鋁素線熱性質分析、機械強度分析、電氣特性分析、材質金相微觀分析等，綜合分析結果粉狀腐蝕生成物的化合物組成主要為 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 及 AlOCl 與 C-O-C 鍵油脂，鋁素線表層長滿白色腐蝕生成物，愈內層孔蝕愈嚴重，鋁包鋼素線表面鋁層嚴重腐蝕鋼心素線外露，海鹽氯離子是導致鋁素線加速孔蝕的主因，各層鋁素線、鋁包鋼素線、絞合鋁包鋼心鋁線破壞強度及伸長率皆低於規範值，主要受腐蝕及長期荷重影響，鋁素線的平均導電率皆約少於規範平均值 3%，電阻係數則較規範值高約 5%，鋁包鋼素線的電阻皆約高於規範值 94.45%，檢測同批號導線發現斷股或大量腐蝕生成物時，儘速更換，避免機械強度不夠而扯斷與消耗電力成本。

關鍵詞：輸電導線；鋁素線；鋁包鋼素線；腐蝕。

ABSTRACT

ACSR was long-term exposure in the salty environment, lead the severity corrosion in aluminum wire, a great deal of corrosive accumulate inside the layer, the steel wire becomes rusty eclipse, The aluminum wire was pull to break easily after maintains, so this study was analysis deteriorate in conductor. Experimental method includes corrosive analysis, appearance analysis; radius loses corrosion rate, machine strength and metallographic analysis etc. According to analyze result the corrosive was $\text{Al}(\text{OH})_3$ and AlOCl and C-O-C grease, the white corrosive decorate in aluminum wire surface layer, inside layer pitting serious, The steel cladding was serious corrosion, the chlorine ion is a main cause pitting, The strength and elongation rates in each aluminum layer, steel wire and ACSR were low than specifications, The mainly affect was corrosion and long-term loading, When examination and detection a great deal of breakdown ACSR, change as soon as possible, Avoid the machine strength not enough pulling to break and consume the electric power.

Keywords: ACSR conductor; Aluminum wire; Aluminum cladding steel; Corrosion.

1. 緣由

草湖~芳苑線位於台中縣芳苑鄉沿海，線路建於 1986 年 1 月，由草湖變電所至芳苑變電所，途經 39 座鐵塔，線路距離海岸約 2 ~ 3 公里，其中以 10 號塔最靠近海岸。2 號塔 ~ 14 號塔導線全長為 2736.38 公尺，該導線屬 954 MCM (45/7)ACSR/AW 的鋁包鋼心鋁線(ACSR/AW)，954 MCM 為其絞線之截面積。絞線結構共分為五層，線數排列方式由外向內分別由 21、15、9、6、1 條所組成，如圖 1。第一至第三層為 1350-H19 鋁素線，線徑為 3.698 mm，45 為第一至第三外層的鋁素線數量。第四至第五層為鋁包鋼心線，線徑為 2.466 mm，鍍鋁量為 334 g/m²，7 為第四至第五層之鋁包鋼心線數量。於 2004 年 7 月間巡線時發現白線 9 號塔向 8 號塔約 5 公尺處，一番線導線斷股 12 股；且 10 號塔向 9 號塔約 45 公尺處，一番線導線(R相)斷股 10 股。因而著手進行 2 號塔 ~ 14 號塔線路導線更換，期間發現 2 號塔~10 號塔 ACSR 954 MCM 導線外層鋁素線已嚴重腐蝕，絞線間大量腐蝕生成物沉積，在導線更換時外層鋁素線，如圖 2，很容易扯斷；因此進行導線劣化腐蝕因素研究分析。

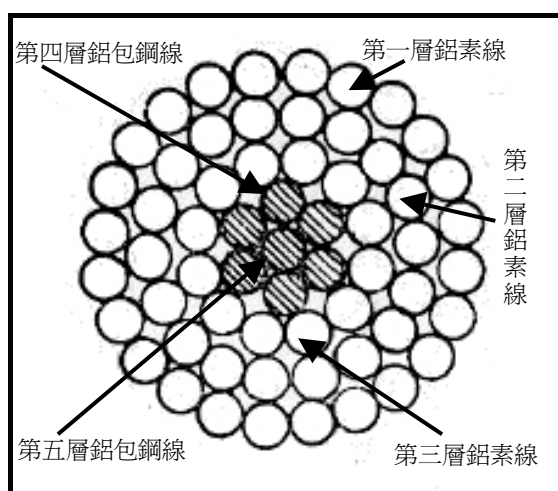


圖 1 954 MCM (45/7) ACSR/AW 鋁包鋼心鋁絞線截面圖。

Figure 1 Cross section of 954 MCM (45/7) ACSR.

2. 破損樣品分析

2.1 試驗樣品

試驗樣品：(1) 腐蝕生成物一包、(2) 現場拆卸 2 號塔 ~ 10 號塔及 10 號塔 ~ 14 號塔 2 m 長導體各 5 條及鋁壓接頭二十支、(3) 現場拆卸 2 號塔 ~ 10 號塔 1 m 長導體各二條。

2.2 試驗方法

- (1) 腐蝕生成物分析：以 XRD、拉曼光譜、DSC、TGA 及 ICP 分析腐蝕化合物組成及定性定量分析。
- (2) 外觀腐蝕分析：分別以各層鋁素線、鋁包鋼素線取樣照相，評估鋁素線表面孔蝕及劣化狀況，鋁包鋼素線的腐蝕狀況。
- (3) 腐蝕率及線徑損耗分析：分別以各層鋁素線浸於 5% HNO₃ 中 5 分鐘清洗表面腐蝕生成物後，稱重計算損耗及腐蝕速率。鋁包鋼素線浸於 50% HCl 中 5 分鐘清洗表面腐蝕生成物及鋁鍍層後，稱重計算鍍鋁量損耗及腐蝕率。分別以經酸洗後鋁素線及未酸洗鋁包鋼素線各 20 cm，利用線徑測徑儀量測各層鋁素線、鋁包鋼素線線徑 20 點及計算平均值。
- (4) 機械強度分析：分別以各層鋁素線、鋁包鋼素線、



圖 2 草湖~芳苑 2 號塔~10 號塔 954 MCM (45/7) ACSR/AW 導線已嚴重腐蝕。

Figure 2 The corrosion appearance of Hao Wu-Fun Yen #2 to #10 ACSR/AW.

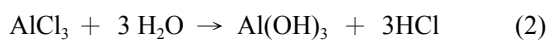
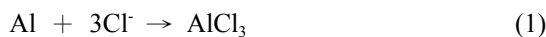
經壓接後絞合鋁包鋼心鋁線依 ASTM B230M、B232、B502 進行抗拉強度、破壞強度及伸長率試驗。

- (5) 材質金相微觀分析：分別以 SEM(JEOL-JSM-820iL)及 EDX(Oxford-INCA)對各層鋁素線、鋁包鋼素線進行微觀組織分析及附著導線上的腐蝕生成物的元素定性分佈分析。

3. 結果與討論

3.1 腐蝕生成物分析

粉狀腐蝕生成物經酸溶後以 ICP 順序掃描判斷腐蝕生成物含有 Al、Fe、Si、Na、Ca、Mg、Mn 等元素，再以定量方式量測其含量。分析結果顯示主要含有鋁，為導線的氧化物；其次含有鐵、錳等金屬鹽，應是由鋁包鋼素線鐵的腐蝕生成物；其他氯鹽含鈉與鎂粒子，主要為海鹽的成份，矽、鈣離子應是經由砂土沉積物，腐蝕生成物的元素含量分析如表 1 所示。此外分別以電極法量測溶於水中 Cl⁻及 SO₄²⁻濃度，並利用 XRD 判斷腐蝕生成物的化合物組成主要為 Al(OH)₃ 及 AlOCl。因鋁在鹽水或酸性環境中與氯離子或水分子，可發生下列反應的化學作用而易產生孔蝕^[1-2]：



3.2 外觀腐蝕分析

樣品外觀分別以各層鋁素線、鋁包鋼素線取樣照相，評估鋁素線表面孔蝕和劣化狀況，以及鋁包鋼素線的腐蝕狀況。10 號塔 ~ 14 號塔的鋁素線，很明顯地，愈內層孔蝕愈嚴重。在 2 號塔 ~ 10 號塔的鋁素線表層及孔蝕處佈滿白色腐蝕生成物，鋁素

表 1. 經 ICP 定量分析腐蝕生成物的元素含量 (wt%)。

Table 1 Quantitative analysis of corrosive was detected by ICP. (wt%)

Al	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Si	Na	Ca	Mg	Mn
25	0.14	0.38	0.003	0.22	0.12	0.049	0.11	0.003

線沿著孔蝕有裂縫的延伸。顯示鋁包鋼素線表面鋁層已嚴重腐蝕損耗，導致鋼心素線外露；由於鋁材對鋼材具有犧牲陽極功能，更導致裸露鋼材的鋁層加速消耗。此外，在靠近鋼心素線內側鋁素線出現磨耗損傷，主要是鋼心素線外露與外層鋁素線在導線受風力狀況時產生相互磨擦的結果。在 10 號塔 ~ 14 號塔的第一層鋁素線之表面產生黑色氧化層導線並無孔蝕，在第二及第三層鋁素線表面有少量白色腐蝕生成物，鋁素線保持良好金屬光澤，第四及第五層的鋁包鋼素線則外觀全完良好，無腐蝕。

3.3 腐蝕率及線徑損耗分析

分別以各層鋁素線浸於 5% HNO₃ 中 5 分鐘，清洗表面腐蝕生成物後，稱重計算損耗及腐蝕速率；鋁包鋼素線浸於 50% HCl 中 5 分鐘，清洗表面腐蝕生成物及鋁鍍層後，稱重計算鍍鋁量損耗及腐蝕率。

經由圖 3 鋁素線分析，可證明內層腐蝕率及線徑損耗均較外層嚴重。主要原因是在沿海向風面導線，季風帶來的海鹽粒子隨風沉積在導線內層，海鹽粒子中氯離子為鋁材產生孔蝕破壞的主因。孔蝕是金屬表面局部被腐蝕而產生孔洞，其發生通常需要兩個條件：第一是材料需具有鈍態膜，鋁合金的鈍態膜厚度及緻密性雖然不如不銹鋼、鈦、鉻等高耐蝕材料，但仍具有基本的耐蝕性。第二個條件是材料所處的環境必須含有侵蝕性離子的電解質存在，此電解質可為液體、濕的固體、液態薄膜或水滴等不同型態。對鋁合金而言，這些侵蝕性離子主要是 Cl⁻、Br⁻、I⁻等鹵素離子，尤其是 Cl⁻，內層最易殘留水份，當殘留的海鹽粒子經水份溶解成為強電解質時，則孔蝕發生於內層。

線徑損耗分析乃分別以經酸洗後鋁素線及未酸洗鋁包鋼素線各 20 cm，利用線徑測徑儀量測各層鋁素線、鋁包鋼素線線徑 20 點及計算平均值。在圖 3，2 號塔 ~ 10 號塔線徑損耗，可得知第二層鋁素線孔蝕損耗等致線徑損失約 2%，在鋁包鋼素線線徑損耗率更在 10%，已超過原始鍍鋁層須為半徑之 10% 之要求，顯示鋁層已完全消耗。

3.4 機械強度分析

分別使用各層鋁素線、鋁包鋼素線、絞合鋁包鋼心鋁線依 ASTM B230M、B232、B502 進行抗拉

強度及伸長率試驗。利用 100 噸臥式拉力試驗機進行絞合鋁包鋼心鋁線破壞強度試驗。2 號塔 ~ 10 號塔導線皆在線間最弱點產生鋁素線破斷，鋁包鋼素線完好，四條導線破壞強度均較規範值 11500 kgf 為低。10 號塔 ~ 14 號塔導線皆在壓接頭鋁素線破斷，鋁包鋼素線完好，五條導線中四條破壞強度均較規範值 11500 kgf 為低，亦較 2 號塔 ~ 10 號塔導線破壞強度為低。10 號塔 ~ 14 號塔導線皆是在壓接頭應力集中點鬆脫斷裂，應是導體抗拉力良好，導致拉力集中在壓接頭，壓接鋁素線受到切應力產生破斷；第四條破壞強度低至 7460 kgf 主要是壓接不良，導致損傷，皆非正常破斷模式。在 2 號塔 ~ 10 號塔導線，經拉力後，力量主要集中在最弱或腐蝕嚴重線段，導致線段間產生斷裂，為合理拉力破壞強度

的模式。

以 2 號塔 ~ 10 號塔及 10 號塔 ~ 14 號塔之鋁素線及鋁包鋼素線所進行抗拉強度、破壞強度及伸長率測試，結果圖 4、圖 5 及表 2 至表 4 所示。2 號塔 ~ 10 號塔之鋁素線在破壞強度、抗拉強度、伸長率皆低於規範值，雖然腐蝕率及孔蝕第一層較其他二層為低，但在破壞強度、抗拉強度、伸長率皆以第一層最差。主要原因第一層受整體導體拉力最大，長期在受力的條件中產生彈性疲勞，失去材料應有的延展性及伸長率；第二、第三層則因受第一層支撐，尚保持部份延展性。10 號塔 ~ 14 號塔之鋁素線的破壞強度、抗拉強度皆高於規範值，但同理因長時間在受力環境中慢慢失卻材料之延展性，導致伸長率降低。第四、第五層鋁包鋼素線皆維持高於

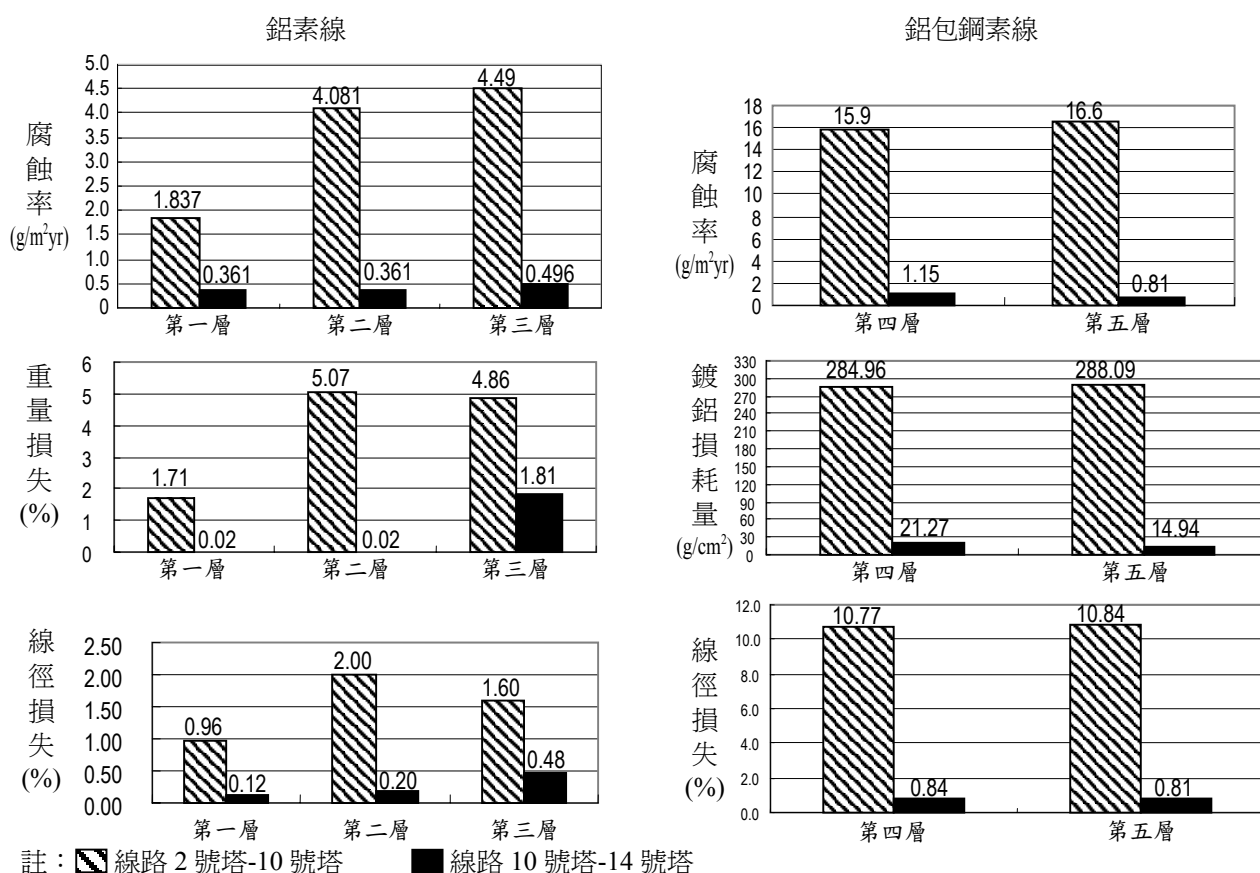


圖 3 2 號塔 ~ 10 號塔及 10 號塔 ~ 14 號塔鋁素線與鋁包鋼素線之腐蝕率、重量損失及線徑損耗比較。

Figure 3 The corrosion rate, mass loss and radius loss of the aluminum and cladding steel wires of Hao Wu-Fun Yen #2 to #14 ACSR/AW.

規範值，但失卻材料之延展性，其中在抗拉強度因 2 號塔 ~ 10 號塔之鋁包鋼素線外層鋁已經完全腐蝕，只剩鋼線。

3.5 材質金相微觀分析

分別以 SEM 及 EDS 對各層鋁素線、鋁包鋼素線進行微觀組織分析及腐蝕生成物的元素定性分佈分析。如表 5 所見，2 號塔 ~ 10 號塔在第一至第三層鋁素線上腐蝕生成物主要為鋁的氧化物及微量氯化物，第四至第五層鋁包鋼素線中除了鋁的氧化物外鐵材亦裸露。10 號塔 ~ 14 號塔在第一至第三層鋁素線上腐蝕生成物主要亦為鋁的氧化物，在第四至第五層鋁包鋼素線中主要為鋁的氧化物及微量氯化物，少量鐵；鋁包鋼素線及鋁素線表層皆有高含量碳，碳元素來源應為素線表層的保護油脂，隨著

碳油脂愈多，素線更受到保護，氧化物及腐蝕物不易形成^[3]。

經由微觀金相組織分析第一層鋁素線(2 號塔 ~ 10 號塔)，腐蝕物表面成多孔侵蝕狀層分佈，在表層主要為鋁的氧化物，元素分佈隨著含量多寡而形成緻密組織。2 號塔 ~ 10 號塔第二層至第三層鋁素線愈往內層氧化物及氯化物相對減少，在第四層鋁包鋼素線(2 號塔 ~ 10 號塔)很明顯鋼線中鐵、錳元素的出現，已到達鐵基材，但仍有部份鋁鍍層殘留，鋁發揮犧牲陽極功能，保護鋼素線，不致急速腐蝕，仍能維持破壞強度。

同樣隨了第一層鋁素線(10 號塔 ~ 14 號塔)含有較高氧化物及氯元素外，在第二及第三層鋁材表面局部氧化，亦無氯元素殘留，碳化物(油脂)保持良好。但第五層鋁包鋼素線表面腐蝕生成物元素分析中，皆發現少量重金屬 Ag 離子，溶液中含有陰極

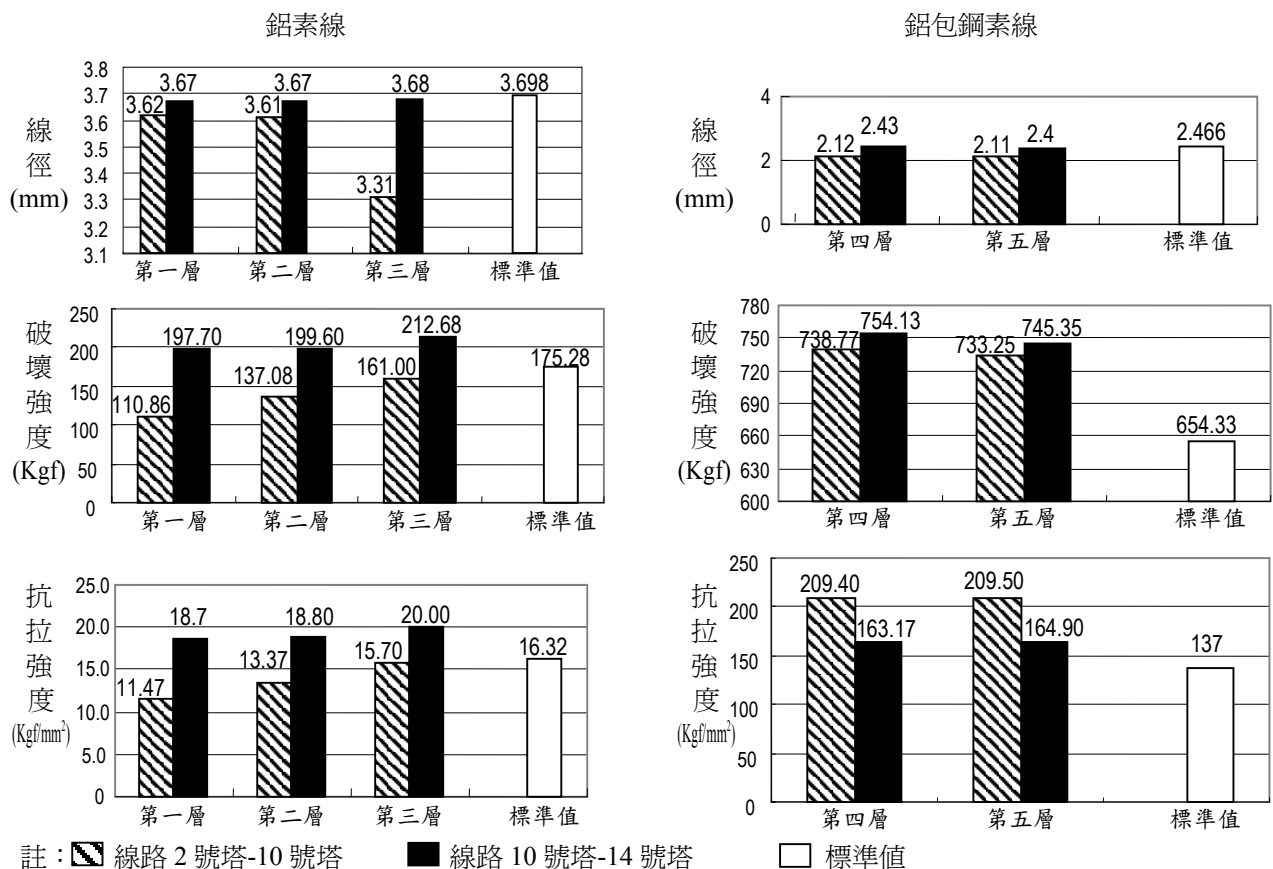


圖 4 鋁素線及鋁包鋼素線進行線徑、破壞強度及抗拉強度之比較。

Figure 4 Aluminum and steel cladding carry on breaking strength.

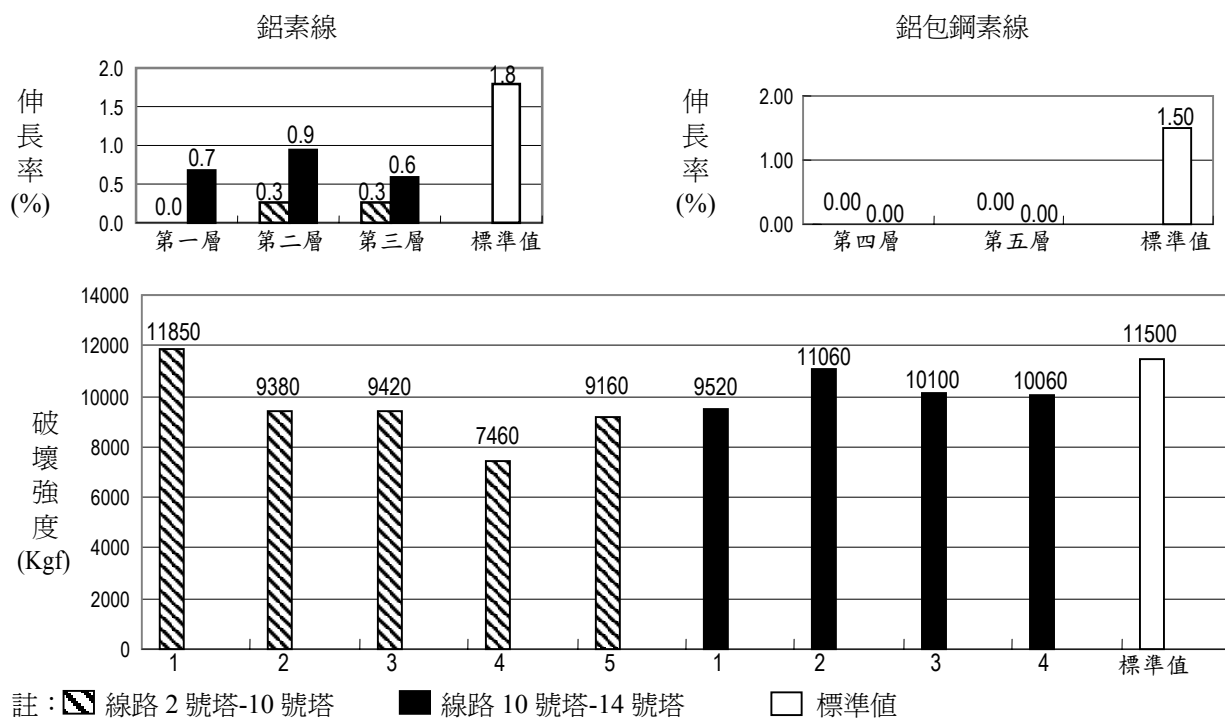


Figure 5 Comparison with breaking strength and elongation in ACSR

表 2. 鋁素線進行抗拉強度、破壞強度、伸長率及線徑之比較。

Table 2 Comparison with tensile strength, breaking strength and elongation of aluminum wire.

取樣地點	編號	線徑 (mm)	破壞強度 (kgf)	抗拉強度 (kgf/mm ²)	伸長率 (%)	
2 號 ~ 10 號塔	第 1 層鋁素線	1-1	3.61	98.304	9.6	0
		1-2	3.21	85.754	10.6	0
		1-3	3.65	148.532	14.2	0
	第 2 層鋁素線	2-1	3.61	135.168	13.2	0
		2-2	3.62	130.683	12.7	0.8
		2-3	3.61	145.408	14.2	0
	第 3 層鋁素線	3-1	3.62	160.524	15.6	0
		3-2	3.62	163.611	15.9	0.4
		3-3	3.59	158.884	15.7	0.4
10 號 ~ 14 號塔	第 1 層鋁素線	1-1	3.66	196.724	18.7	0.4
		1-2	3.69	190.282	17.8	1.2
		1-3	3.66	206.192	19.6	0.4
	第 2 層鋁素線	2-1	3.69	200.972	18.8	1.2
		2-2	3.68	197.904	18.6	0.4
		2-3	3.65	199.786	19.1	1.2
	第 3 層鋁素線	3-1	3.69	210.593	19.7	0.4
		3-2	3.68	214.928	20.2	0.4
		3-3	3.66	212.504	20.2	1
規範值	鋁素線	3.698	175.28	16.32	1.8	

性比鋁強的粒子附著在鋁表面時，會形成局部加凡尼沉積腐蝕，對鋁具侵蝕性，在大氣酸雨酸性溶液中，這些重金屬的效應影響會較大。

4. 結論

1. 粉狀腐蝕生成物的化合物組成主要為 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 及 AlOCl 。

表 3. 鋁包鋼素線進行抗拉強度、破壞強度、伸長率及線徑之比較。

Table 3 Comparison with tensile strength, breaking strength and elongation of steel cladding wire.

取樣地點	編號	線徑 (mm)	破壞強度 (kgf)	抗拉強度 (kgf/mm ²)	伸長率 (%)	
2 號 ~ 10 號塔	第 4 層鋁包鋼素線	4-1	2.18	734.437	196.9	0
		4-2	2.09	738.136	215.2	0
		4-3	2.08	734.74	216.1	0
	第 5 層鋁包鋼素線		2.11	733.25	209.5	0
10 號 ~ 14 號塔	第 4 層鋁包鋼素線	4-1	2.45	742.767	157.7	0
		4-2	2.43	768.384	165.6	0
		4-3	2.40	751.224	166.2	0
	第 5 層鋁包鋼素線		2.40	745.348	164.9	0
規範值	鋁包鋼素線		2.466	654.33	137	1.5

表 4. 絞線進行破壞強度之比較。

Table 4 Comparison with breaking strength in ACSR.

2 號塔 ~ 10 號塔			10 號塔 ~ 14 號塔		
試樣編號	破壞強度 (kgf)	斷點位置及情況	試樣編號	破壞強度 (kgf)	斷點位置及情況
1	9520	導線在套管內滑脫	1	11850	導線在套管內斷裂
2	11060	導線斷裂點離套管前緣 226 mm	2	9380	導線在套管內斷裂
3	10100	導線斷裂點離套管前緣 670 mm	3	9420	導線在套管內斷裂
4	10060	導線斷裂點離套管前緣 80 mm	4	7460	導線在套管內斷裂
			5	9160	導線在套管內斷裂

表 5. 鋁素線與鋁包鋼素線 EDS 元素分析(wt%)。

Table 5 EDS analysis in aluminum and steel cladding wire (wt%).

樣品及檢測位置		Al	O	Fe	Cl	S	Si	C	Na	Ca	Mg	Mn
導線	腐蝕生成物	25	--	0.14	0.38	0.003	0.22	--	0.12	0.049	0.11	0.003
2 號 ~ 10 號塔	第一層	28.76	62.17	--	0.25	0.37	0.15	7.85	0.27	0.09	0.09	--
	第二層	25.81	66.08	--	0.10	0.05	0.10	5.83	0.32	0.59	1.07	--
	第三層	31.42	59.87	--	0.12	--	--	7.99	0.18	0.18	0.24	--
	第四層	21.92	41.06	25.44	0.08	--	0.10	9.94	0.91	0.1	0.08	0.15
	第五層	19.01	33.66	36.08	0.11	--	0.12	9.07	1.31	0.15	0.08	0.27
10 號 ~ 14 號塔	第一層	26.14	44.18	1.00	0.29	2.38	2.07	20.27	0.21	0.26	0.23	--
	第二層	76.09	7.93	--	--	--	--	15.99	--	--	--	--
	第三層	61.82	10.03	--	--	--	--	28.15	--	--	--	--
	第四層	57.36	9.68	0.74	0.16	0.18	0.69	29.98	0.08	0.20	--	--
	第五層	41.84	19.9	2.01	0.23	0.34	0.97	33.44	0.14	--	--	--

2. 2 號塔 ~ 10 號塔的鋁素線表層長滿白色腐蝕生成物，愈內層孔蝕愈嚴重，鋁包鋼素線表面鋁層嚴重腐蝕鋼心素線外露，10 號塔 ~ 14 號塔導線表面良好。
 3. 海鹽氯離子是導致鋁素線加速孔蝕的主因。
 4. 2 號塔 ~ 10 號塔各層鋁素線、鋁包鋼素線、絞合鋁包鋼心鋁線破壞強度及伸長率皆低於規範值，主要受腐蝕及長期荷重影響；10 號塔 ~ 14 號塔伸長率低於規範值，主因為長期荷重失卻材質延展性。
2. Marcel Pourbaix, in: *Lectures on Electrochemical Corrosion*, Plenum Press, New York-London, 1973。
 3. Power Division of The Institution of Electrical Engineers, "Overhead line design and construction: Theory and Practice (up to 150 KV)", Conference Publication Number 297, London 28 ~ 30 November 1988.

收到日期：2005 年 9 月 8 日

修訂日期：2006 年 6 月 23 日

接受日期：2006 年 7 月 7 日

參考文獻

1. Herbert H. Uhlig, in: *Corrosion and Corrosion Control*, 3rd. Edn., John Wiley & Sons.