

アルカリ骨材反応の進行した鉄塔基礎の調査

大阪営業所
山本 将之

キーワード 鉄塔 アルカリ骨材反応 岩石鑑定 促進膨張試験

概 要

アルカリシリカ反応（ASR）によるひびわれ発生等被害を受けたと思われる鉄塔基礎に関して健全性を把握するために調査ならびに材料試験を実施し、今後の対策（補修・補強）に関して検討を行ったものである。



鉄塔基礎全景

1. 調査内容

設備の周辺環境調査・外観調査・配筋調査・ひびわれ深さ確認・圧縮強度試験・静弾性係数試験・単位体積重量測定・中性化深さ測定・岩石鑑定試験（岩種判定・偏光顕微鏡観察・X線粉末回析試験）・促進膨張試験

調査項目および数量

調査項目		仕 様	単位	実施数量
現地調査	基礎部の掘削	人力・バックホウ	脚 (m^3)	1 (73)
	外観・打音調査	寸法、打音	脚 (m^2)	4 (50)
	コア採取箇所における配筋調査（レーダ法）	RCレーダ	箇所	2
	コンクリートコア採取（ $\phi 100 \sim 66\text{mm}$ 、長さ250mm）	コアマシン 無収縮セメント（復旧用）	本	柱 :2 フーチング :6
	ひびわれ深さ	コアマシン	箇所	1
	鉄筋腐食の確認	電動チッパー		
室内試験	圧縮試験強度（静弾性含む）	JIS A 1107, 1108, JIS A1149	本	フーチング :3
	単位体積重量測定	JIS A 1110	本	フーチング :3
	中性化深さ	JIS A1152	本	柱 :2
	岩石鑑定試験	偏光顕微鏡、 X線回析	本	フーチング :1
	残存膨張量測定	カナダ法	本	フーチング :3
	報告書の作成	—	式	1

2. 現地調査結果

外観調査

- ・ ひびわれ幅が 1mm 以上の延長は 3m であり、ごく稀に発生しているものであった。
- ・ ひびわれの発生は柱ごと、打継ぎ毎に異なり A および B 脚の GL から GL+2m 程度(1 リフト) の範囲内がそれぞれ 45. 4m および 52. 5m であり比較的発生割合が大きかった。
- ・ C・D 脚の柱部における全体のひびわれ密度は 0 から 12. 8m 範囲内であり A・B 脚に比べ劣化の発生は少ない傾向が認められた。
- ・ ひびわれは柱端部が比較的発生割合が大きかった。
- ・ 劣化の著しい A・B 脚においては、比較的日射の影響を受ける南東および南西面のひびわれ発生密度が高い傾向が認められた。

柱ごとのひびわれ集計表

		A脚 柱					B脚 柱					C脚 柱					D脚 柱				
		1面	2面	3面	4面	合計	1面	2面	3面	4面	合計	1面	2面	3面	4面	合計	1面	2面	3面	4面	合計
		北西	北東	南東	南西		北西	北東	南東	南西		北西	北東	南東	南西		北西	北東	南東	南西	
柱377	ひびわれ長さ(m)	0.0	0.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	密度(m/m ²)	0.00	0.10	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
柱277	ひびわれ長さ(m)	1.9	1.6	1.0	1.4	5.9	0.0	0.0	0.8	0.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.5	1.4	3.4	10.1
	密度(m/m ²)	0.43	0.38	0.23	0.32	-	0.00	0.00	0.18	0.06	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.92	1.54	1.45	0.81	-
柱177	ひびわれ長さ(m)	10.1	10.3	9.6	15.5	45.4	10.9	13.9	17.7	9.9	52.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	2.3	5.2	4.7	12.8
	密度(m/m ²)	2.93	2.98	2.78	4.49	-	2.58	3.62	4.18	2.14	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.12	0.42	0.95	0.86	-
ブチン	ひびわれ長さ(m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.5	10.5	10.5	28.4	-	-	-	-	-
	密度(m/m ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.07	1.50	1.50	-	-	-	-	-	-
ひびわれ長さ 柱 合計(m)		12.0	12.3	10.6	16.9	51.7	10.9	13.9	18.5	10.2	53.5	0.0	7.5	10.5	10.5	28.4	4.5	3.7	6.6	8.1	22.9

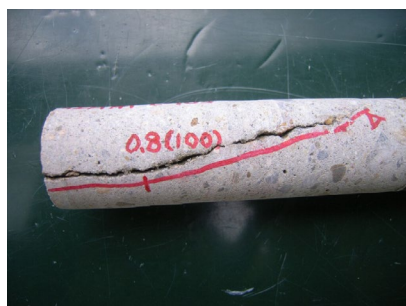
※A, B, D脚については柱のみ

方向ごとのひびわれ集計表

		北西 (1面)					北東 (2面)					南東 (3面)					南西 (4面)				
		A脚	B脚	C脚	D脚	合計	A脚	B脚	C脚	D脚	合計	A脚	B脚	C脚	D脚	合計	A脚	B脚	C脚	D脚	合計
柱377	ひびわれ長さ(m)	0.0	0.0	-	-	0.0	0.4	0.0	-	-	0.4	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0
	密度(m/m ²)	0.00	0.00	-	-	0.00	0.10	0.00	-	-	0.10	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00
柱277	ひびわれ長さ(m)	1.9	0.0	0.0	3.8	5.7	1.6	0.0	0.0	1.5	3.1	1.0	0.8	0.0	1.4	3.2	1.4	0.3	0.0	3.4	5.0
	密度(m/m ²)	0.43	0.00	0.00	0.92	1.36	0.38	0.00	0.00	1.54	1.92	0.23	0.18	0.00	1.45	1.87	0.32	0.06	0.00	0.81	1.19
柱177	ひびわれ長さ(m)	10.1	10.9	0.0	0.7	21.7	10.3	13.9	0.0	2.3	26.4	9.6	17.7	0.0	5.2	32.5	15.5	9.9	0.0	4.7	30.1
	密度(m/m ²)	2.93	2.58	0.00	0.12	5.63	2.98	3.62	0.00	0.42	7.01	2.78	4.18	0.00	0.95	7.92	4.49	2.14	0.00	0.86	7.50
ブチン	ひびわれ長さ(m)	-	-	-	-	0.0	-	-	7.5	-	7.5	-	-	10.5	-	10.5	-	-	10.5	-	10.5
	密度(m/m ²)	-	-	-	-	0.00	-	-	1.07	-	1.07	-	-	1.50	-	1.50	-	-	1.50	-	1.50
ひびわれ長さ 柱 合計(m)		12.0	10.9	0.0	4.5	27.4	12.3	13.9	7.5	3.7	37.4	10.6	18.5	10.5	6.6	46.2	16.9	10.2	10.5	8.1	45.6

ひびわれ深さ調査

- ・ コアの側面ならびに孔壁にてひびわれ深さの確認を行ったところ、ひびわれ深さは 90~100mm であり鉄筋位置にまで達していたが、鉄筋より内部への発達は認められなかった。また、ひびわれ幅は表面と同様あるいは深部の幅が大きくなる傾向が認められた。



配筋調査

A 脚フーチング

配筋状態：主筋間隔が約 114mm、配力鉄筋間隔が 198mm

(設計図に示されている 100mm ならびに 200mm とほぼ同等)

かぶり厚さ：94～118mm

鉄筋の腐食：なし

C 脚フーチング

配筋状態：縦・横鉄筋間隔ともに約 250～280mm 間隔

(ほぼ設計どおりの配筋状態)

調査箇所		調査記号	縦鉄筋 (mm)				横鉄筋 (mm)			
			鉄筋探査 (RCレーダ)	鉄筋確認 (はつり出し)			鉄筋探査 (RCレーダ)	鉄筋確認 (はつり出し)		
				間隔 (平均)	径	純被り (mm)		腐食	間隔 (平均)	径
1	A脚 柱	P1, B1	114	D25	118	無	198	D16	94	無
				D25	116	無		D16	101	無
				D25	117	無		-	-	-
2	C脚 フーチング	P2	256	-	-	-	280	-	-	-
3	C脚 フーチング	P3	260	-	-	-	250	-	-	-
4	C脚 フーチング	P4	253	-	-	-	275	-	-	-

3. 室内試験結果

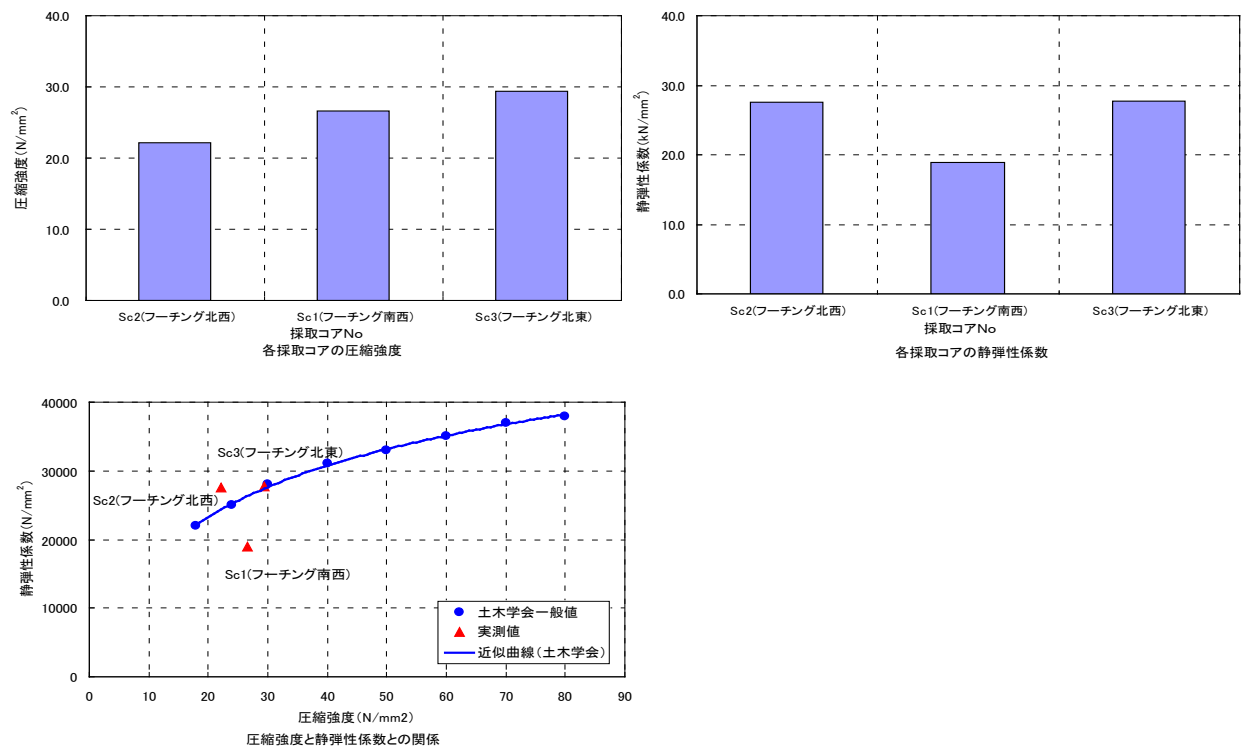
採取コアの外観観察結果

- ・採取したコンクリートコアは、ひびわれ深さ測定用コア Ph1、Ph2、H1 を除き、空隙・ひびわれ等の異常は見られなかった。
- ・目視にて使用されている粗骨材は堆積岩に分類されるチャートであると確認された。
- ・A 脚柱部より採取したひびわれ深さ確認用コアの折り取り面の骨材の周りには、ASR 特有の反応リングが認められた。
- ・コアの折り取り面においては粗骨材が破断しているものが多く認められ、白色滲出物も認められた。
- ・コア側面の観察結果から、骨材の一部には割れや脆弱化しているものが認められた。



コアの圧縮強度試験他

- ・ 静弾性係数は土木学会の一般値より極端に小さい値は見られなかった。



単位体積重量測定結果

- ・ コンクリートの単位体積重量は、普通コンクリートの一般的な値とされる、2.1kg/cm³～2.4kg/cm³の範囲であった。

中性化深さ測定結果

- ・ 本構造物における中性化深さは一般的な中性化速度式の値より小さな値を示した。

岩石鑑定試験結果

- ・ 本構造物のコンクリートに用いられた粗骨材における岩種は、堆積岩であるチャート、砂岩、シルト岩の3種類であり、量比はチャートが98%であった。

試験番号	岩石種	重量 (g)	量比 (%)
南近江線No.180	チャート	433.3	98
	砂岩	5.3	1
	シルト岩	5.1	1

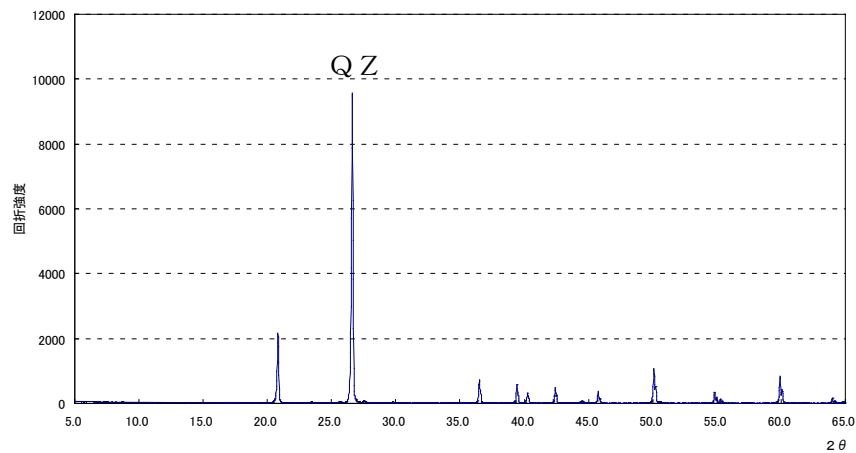
偏光顕微鏡観察

- ・ マトリックスは全体に微粒（径 0.01mm 以下）の珪酸鉱物（石英または玉髄など）から構成されており、これを貫いて幅 0.2～0.05mm の石英脈が縦横に発達していた。



X線粉末回析

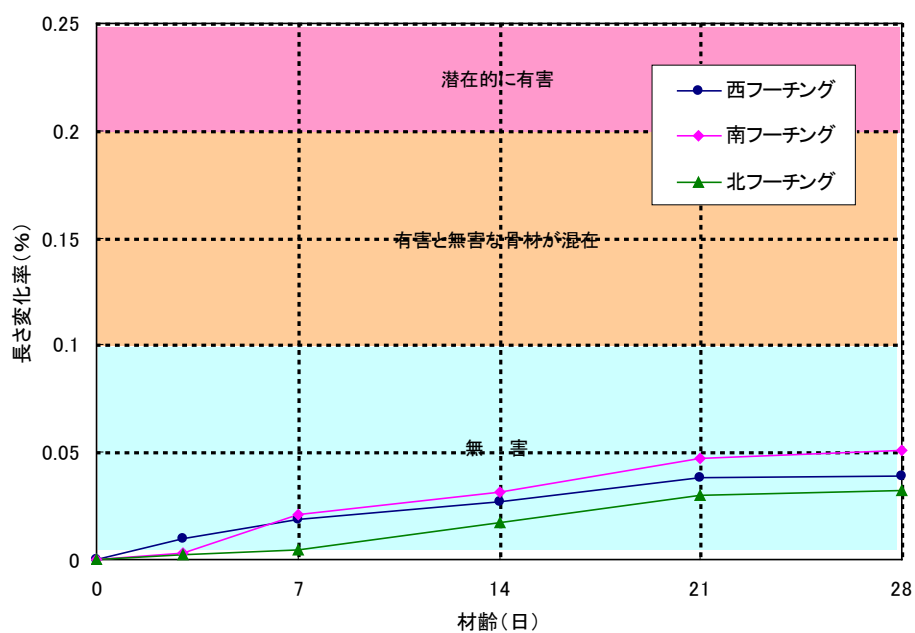
- ・検出された鉱物は石英のみであった。
- ・顕微鏡観察等に用いた当該資料（チャート）には「微粒の珪酸鉱物（石英または玉髄）」が含まれており、これらの鉱物はアルカリシリカ反応性に起因するため、注意を要するものと判定された。



促進膨張試験結果（カナダ法）

- ・判定基準である材齢 14 日の長さ変化率（膨張量）が 0.1%以下であることから無害であると判定された。

材齢(日)		3	7	14	21	28
西フーチング	①	0.007	0.016	0.023	0.034	0.035
	②	0.013	0.021	0.031	0.042	0.043
	平均	0.010	0.018	0.027	0.038	0.039
南フーチング	①	0.001	0.019	0.030	0.042	0.043
	②	0.005	0.022	0.034	0.052	0.053
	平均	0.003	0.021	0.032	0.047	0.051
北フーチング	①	0.003	0.006	0.017	0.023	0.027
	②	0.001	0.003	0.018	0.037	0.037
	平均	0.002	0.005	0.018	0.030	0.032



4. まとめ

ASRの可能性

(1) 現地調査結果

① ひびわれパターン

柱部分：構造物の拘束条件ならびに内部鉄筋の拘束条件から、ASRにより本構造物に発生するひびわれは柱軸に平行な方向で発生するものと推察され、本構造物の柱部に発生しているひびわれパターンと一致する。

フーチング：フーチング部は鉄筋による拘束力は小さく、構造物の拘束条件も一方向に限られていないことから、ひびわれパターンは亀甲状のひびわれパターンになると推察され、本構造物のC脚のフーチング上部に発生しているひびわれパターンと一致しているものと考えられる。

② ひびわれ発生位置

本構造物のうちA・B脚のひびわれの発生状況は、水の供給を受けやすい柱の端部かつ日射の良好な南西面に顕在化して発生しており、高温多湿の環境下で顕在化するASRの特徴を有しているものと考えられる。

③ 採取コアの観察結果

折り取り面：大部分の粗骨材が破断骨材の周りにASRの特徴である反応リングが認められ、折り取り面は滲出物により白色化（ひびわれ深さ確認用コア）

コア側面：一部の粗骨材にひびわれや欠落が存在

(2) 室内試験結果

① 骨材の岩石鑑定試験

岩石鑑定結果より、本構造物に使用されたコンクリートの骨材は、砂岩、チャート、シルト岩の堆積岩に分類されるものであり、骨材の量比はチャートが98%であった。採取コアの粗骨材の顕微鏡による観察結果からも注意を要する骨材とされる微小石英・波動消光を呈する石英が認められた。

② 促進膨張試験

残存膨張量は14日で0.05%以下であることから、無害と判定された。

(1) 現地調査結果および(2) 室内試験結果より、本構造物のひびわれはASRによるものと考えられる。

耐荷力低下の検討

(1) 鉄筋の状況

① ひびわれ深さ

コア採取によるひびわれ深さは90~100mmであり、鉄筋かぶり厚さまでひびわれが達していることを確認した。

② 内部鉄筋の腐食状況

主筋・配力筋ともに黒皮の状態であり、腐食は認められなかった。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

① 圧縮強度

設計基準強度($F_c=225\text{kg/cm}^2$ (22.5N/mm^2))を満たさないものが1本存在したが、これは長さが確保できなかったため補正係数を乗じた影響と考えられる。

他の2本のコアの圧縮強度は26~29N/mm²であり、設計基準強度を十分満足するものであった。

② 静弾性係数

Sc1（フーチング南西）を除き、全て土木学会の一般値を満足するもので、特に著しい低下は認められなかった。

(3) その他の物性（中性化・単位体積重量）

① 中性化

柱部における中性化深さは、一般的な値（岸谷氏による中性化速度）より小さな値を示した。

② 単位体積重量

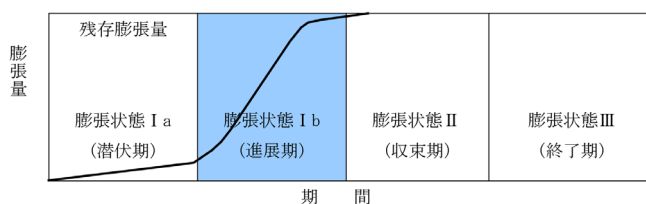
いずれも2.2kg/cm³以上を示した。

(1) から (3) の事項より、現時点における本構造物の著しい耐荷力の低下は認められず、特に補強等の対策を行う必要はないものと考えられる。

ASRによるコンクリートの進行予測

① コンクリートの膨張過程

膨張過程は「Ib 進展期」の末期に位置するものと考えられ、外部の環境条件（水の供給・日射条件）からもASRを助長する条件が揃っているものと推察される。



② 劣化の進行程度

ASRの劣化進行は、反応性骨材の種類とその含有量、コンクリートの配合、環境条件等により大きく異なる。今回実施した促進膨張試験の結果では、残存膨張量は14日で0.05%以下であることから、骨材中に含まれる反応性鉱物の量が比較的少ないためにASRによる膨張がある程度進行した段階で収束するものと考えられ今後使用性能や耐久性の低下を招く有害な膨張は生じにくいものと推察される。

劣化過程	定 義	期間を決定する要因
潜伏期	ASR そのものは進行するものの膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生しない	ASR ゲルの生成速度 (反応性鉱物の種類とその量、アルカリ量)
進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生する	ASR ゲルの吸水膨張速度 (水分とアルカリの供給)
加速期	ASR による膨張が顕著に表れ、膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展する	ASR ゲルの吸水膨張速度 (水分とアルカリの供給)
劣化期	ひび割れの幅および密度が増大し、鋼材腐食が進行するとともに、過大な膨張が発生した時には、鋼材の降伏や破断が発生し、部材として耐荷力に影響を及ぼす	ASR ゲルの吸水膨張速度 (水分とアルカリの供給) 鋼材の腐食速度 鋼材の引張応力度増加率

③構造物の外観上のグレード

外観上のグレードは現状の劣化状況と促進膨張試験結果から残存膨張量が小さかったことの両者を考慮すると、進展期末期あるいは加速期に位置するものと推察され、今回の調査範囲内では、今後 ASR による膨張で著しい劣化が生じる可能性は低いものと考えられる。

今後の課題

- ・促進膨張試験は大きな誤差を生じやすく、膨張の可能性が低いと予想される構造物でも継続的な監視などの適切な維持管理を行うことが重要である。
- ・今後現状のひびわれから水や空気の進入による ASR の助長や内部鉄筋の腐食が進行することによる複合劣化で構造物の機能低下が考えられる。

5. 補修対策の検討

補修設計

(1) 補修範囲と規模の決定

柱部（A～D 脚）

フーチング部

梁部（遠望目視より劣化があるため）

(2) 補修工法の選定

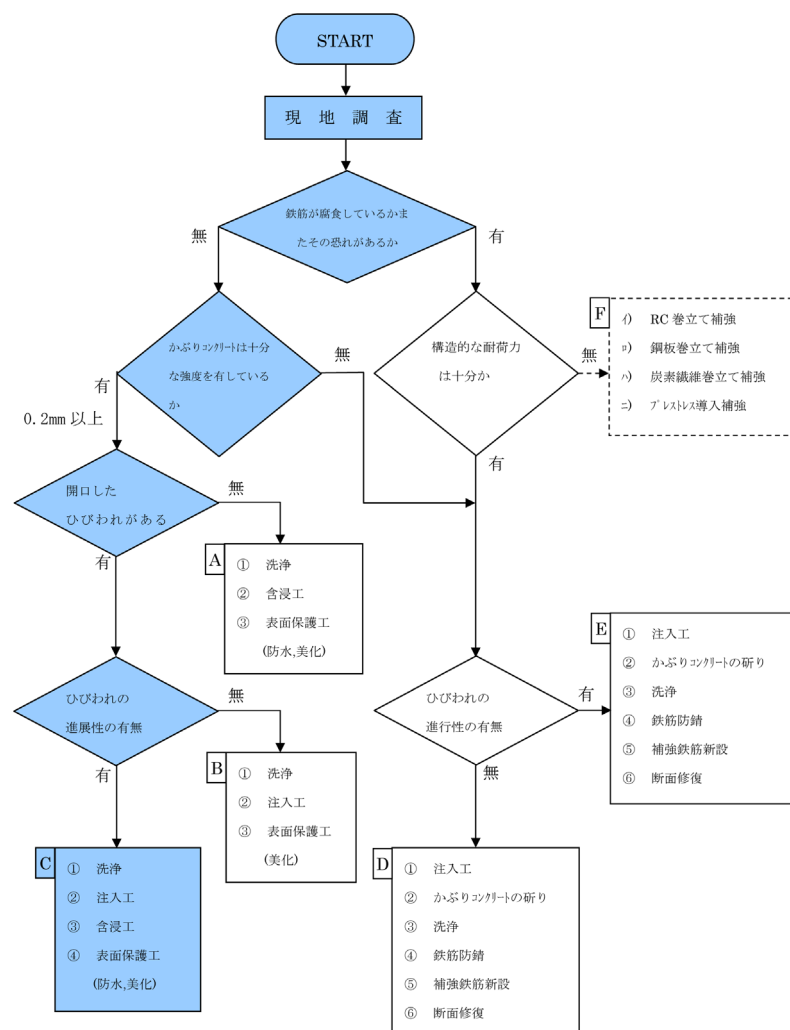
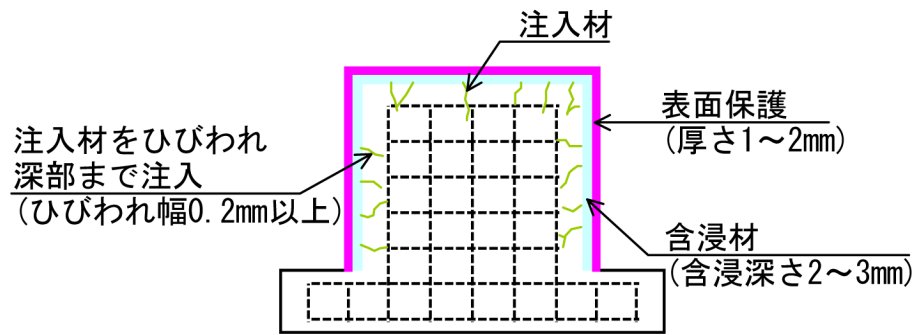


図 6-3 工法選定フロー



(3) 補修材料の選定

①ひびわれ注入材

ASR による膨張にも追従できる伸び能力のあるエポキシ系樹脂を使用する。注入はゴム風船等を用いた低圧注入を行うことにより微細なひびわれまでの注入を行う。

②含浸材（シラン系撥水材）

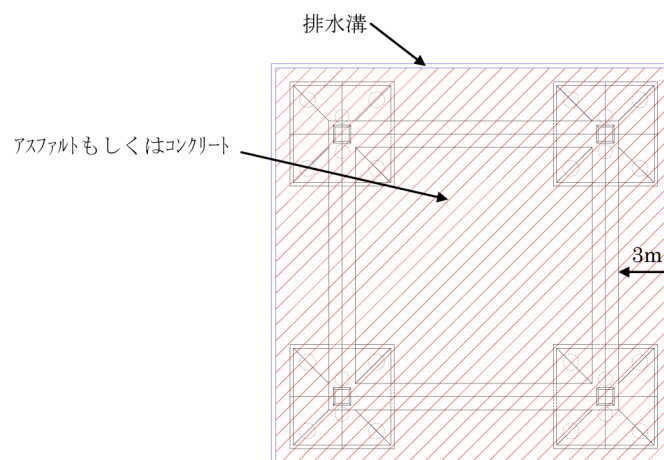
コンクリート表面から 3~5mm 程度の深さにシラン系の溶剤を含浸させて撥水機能によってコンクリート内部の水蒸気は外に通過させるが、外部からの水の浸入は遮断するような構造に改質する。

③表面保護材

表面保護は、含浸工が ASR の抑制効果を表す前にコンクリートに新たなひびわれが発生した場合や埋め戻しによる含浸材の損傷、劣化による防水性の低下を防止するために、耐候性に優れコンクリートの呼吸を妨げず、しかも伸び能力のある PCM（ポリマーセメント）系材料で含浸材の防水効果を保護する。

(4) その他の対策（排水対策）

- ・ 鉄塔基礎敷地内の表面をコンクリート等で覆う
- ・ 適切な排水溝を設け地中部の含水比を抑制する



補修の効果ならびにモニタリングの実施

- ・ 長期にわたって進行するのが一般的
- ・ 諸条件（反応性骨材の種類等）によって大きく変化
- ・ ASR の膨張による劣化を完全に防止する方法は現時点では存在しない。



再劣化を考慮し補修後のモニタリングを実施する必要がある。

実施方法

(1) ひびわれの進展確認

コンタクトゲージなどを用いて定期的な観測を実施する。

膨張は、季節による気温の変動などの影響を大きく受けるため 4 回/年程度に定期的実施する。

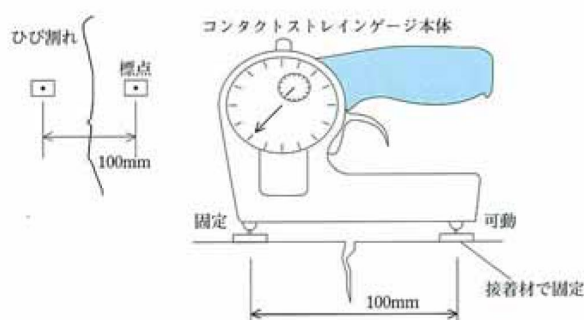


図 6-4 コンタクトゲージによる測定例

(2) 補修材（表面保護材）の劣化状況の確認

表面保護材による保護効果低下の確認ならびにひびわれの進展に伴う保護材のひびわれ調査により ASR の抑制効果の確認を行う。保護材の調査項目は以下の通りとする。

- ①保護材のひびわれ
- ②保護材のはがれ、浮き等

6. あとがき

今回はカナダ法にて促進膨張試験を実施し今後の膨張量の予測を行った。促進膨張試験にはいくつかの方法が提案されており、それらの促進環境には相違があるものの、これまでのわが国での実績からは促進膨張試験における膨張量が 0.1%以上のコンクリートは将来的に有害な膨張を生じ、構造物の耐久性等の低下を招く恐れがあると評価されている。一方、促進膨張試験による膨張量が 0.05%未満のコンクリートは、将来的に有害な膨張を生じる可能性は低いと評価される場合が多い。0.05～0.1%となる場合は、既存の検討事例での評価が分かれており、膨張の可能性を評価することは難しいとされている。コアによる促進膨張試験では、温度 40℃・相対湿度 100%の湿気槽にて実施するもの（JCI-DD2）が一般的であるが、この方法では判定が 3 ヶ月または 6 ヶ月の膨張量で行われることや、反応鉱物が玉髄・微細な結晶粒またはひずんだ結晶格子を持つ石英の場合、反応がゆっくり進行するので適切に評価できない場合がある。そこで、判定結果が約 1 ヶ月で可能な膨張試験であるカナダ法（温度 80℃の 1N の NaOH 溶液中で実施。ASTM C 1260-94）に準拠した促進膨張試験を実施した。カナダ法は、実績も少なく、試験方法を明確に示した書物もなく取扱いには十分注意が必要であるが、特に北陸などで通常の骨材のアルカリシリカ反応試験（物理法・化学法）や JCI-DD2 では判別できない場合などで稀に利用されているとのこと。