

亜硝酸リチウム内部圧入による塩害・中性化・ASR補修技術

リハビリカプセル工法

設計・施工マニュアル(案)

【初版】

平成 27 年 4 月

一般社団法人コンクリートメンテナンス協会

リハビリカプセル工法 設計・施工マニュアル(案)

目次

| | |
|-----------------|----|
| 1章 総則 | 1 |
| 1.1 適用範囲 | |
| 1.2 工法概要 | |
| 1.3 用語の定義 | |
| 2章 使用材料 | 4 |
| 2.1 抑制剤 | |
| 2.2 抑制剤圧入システム | |
| 3章 設計 | 8 |
| 3.1 一般 | |
| 3.2 設計抑制剤量 | |
| 3.3 圧入孔 | |
| 3.4 注入圧力 | |
| 3.5 設計注入日数 | |
| 4章 施工 | 16 |
| 4.1 標準施工フロー | |
| 4.2 下地処理工 | |
| 4.3 表面漏出防止工 | |
| 4.4 鉄筋探査工 | |
| 4.5 圧入孔位置出し工 | |
| 4.6 圧入孔削孔工 | |
| 4.7 リハビリカプセル設置工 | |
| 4.8 注入ホース配置工 | |
| 4.9 内部圧入工 | |
| 4.10 圧入孔充填工 | |
| 4.11 表面仕上げ工 | |
| 5章 施工管理基準 | 25 |
| 5.1 標準施工管理項目 | |
| 5.2 使用材料の品質管理 | |
| 5.3 圧入孔削孔の管理 | |
| 5.4 内部圧入工における管理 | |
| 5.5 出来形管理 | |
| 5.6 安全管理 | |

1章 総則

1. 1 適用範囲

(1) 本マニュアル(案)は、亜硝酸リチウムを主成分とする抑制剤をコンクリートへ内部圧入する補修技術『リハビリカプセル工法』(以下、本工法と称す)の設計および施工の標準を示すものである。

(2) 本工法は、塩害、中性化およびアルカリシリカ反応(以下、ASRと称す)で劣化したコンクリート構造物の補修工法として適用することを基本とする。

【解説】

(1) について

亜硝酸リチウムを用いたコンクリート補修技術には、ひび割れ注入工法、表面含浸工法、表面被覆工法、断面修復工法、油圧式内部圧入工法およびカプセル式内部圧入工法の6種類の工法が実用化されているが、本マニュアルではカプセル式内部圧入工法である「リハビリカプセル工法」について取り扱うこととする。

本マニュアルに記載されていない事項については、各構造物が遵守すべき示方書、基準、法規などに従うこととする。以下に関連する図書の例を示す。

- ・コンクリート標準示方書 [維持管理編] (土木学会)
- ・コンクリート構造物の維持管理 (一般社団法人コンクリートメンテナンス協会)
- ・ASR リチウム工法 技術資料 (ASR リチウム工法協会)

(2) について

コンクリート構造物の劣化機構には、塩害、中性化、化学的侵食、凍害、ASR および疲労が挙げられるが、本工法は亜硝酸リチウムによる劣化抑制メカニズムが最も効果的に発揮される塩害、中性化およびASRを対象とすることとした。

亜硝酸リチウムによる劣化抑制メカニズムは、第2章にて詳述する。

1.2 工法概要

(1) 本工法は、対象コンクリート構造物に小径の圧入孔を削孔し、そこから亜硝酸リチウムを主成分とする抑制剤をコンクリート内部へ圧入する技術である。圧入システムはカプセル式圧入装置「リハビリカプセル」と加圧パッカー、耐圧ホース、分配器、コンプレッサーから構成される。

(2) 本工法を塩害および中性化の補修対策として適用する場合、その目的は亜硝酸イオンを既設鋼材の周囲に浸透させ、不動態皮膜を再生することによって以後の鋼材腐食を抑制することにある。

(3) 本工法を ASR の補修対策として適用する場合、その目的はリチウムイオンを反応性骨材周囲のアルカリシリカゲルに浸透させ、ゲルを非膨張化することによって以後の ASR 膨張を抑制することにある。

【解説】

(1) について

本工法の概念図を図 1-1 に、施工状況の例を図 1-2 に示す。

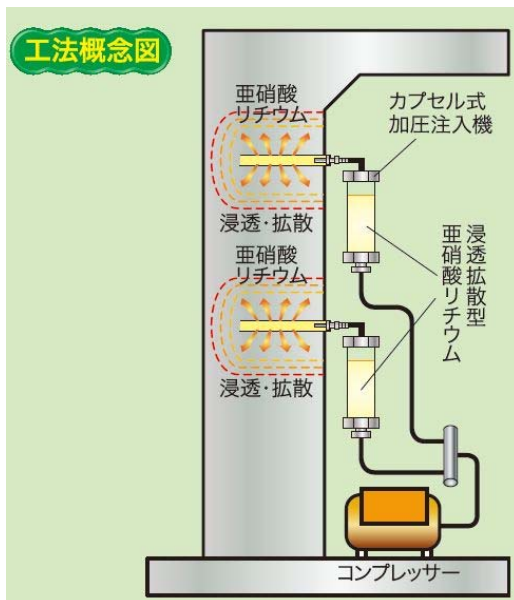


図 1-1 工法概念図



図 1-2 施工状況の例

(2) (3) について

本工法は塩害、中性化、ASR のいずれの原因で劣化したコンクリート構造物に対しても適用可能であるが、劣化機構によって目的が異なる。塩害および中性化はいずれも鋼材腐食に伴って劣化が進行するため、本工法の主たる目的を鋼材腐食抑制とする。ASR はアルカリシリカゲルの吸水膨張に伴って劣化が進行するため、本工法の主たる目的をゲルの非膨張化とする。亜硝酸リチウムによる劣化抑制メカニズムは、第 2 章にて詳述する。

1.3 用語の定義

(1) 本工法に関する固有の用語を次のように定める。

| | |
|----------|---|
| 抑制剤 | : 亜硝酸リチウムを主成分とした水溶液。浸透性に優れた内部圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液を使用する。 |
| リハビリカプセル | : 抑制剤を加圧してコンクリート内部へ浸透させるための容器型圧入装置。コンプレッサーを用いて抑制剤を加圧する。 |
| 圧入孔 | : 抑制剤をコンクリート内部へ浸透させるために行う削孔。ダイヤモンドコアドリルを用いることを原則とする。 |
| 加圧パッカー | : リハビリカプセルとコンクリートとを接続するための治具。圧入孔の内周面とパッカーとの周面摩擦で固定する。 |
| 注入ホース | : リハビリカプセルとコンプレッサーを接続するためのホース。 |
| 分配器 | : コンプレッサーからの圧縮空気を複数のリハビリカプセルへ分配するための治具。 |
| 表面漏出防止工 | : 内部圧入時に抑制剤がコンクリート表面から漏出することを防ぐために行う事前処理で、ひび割れ注入と表面シールからなる。 |
| 不動態皮膜再生 | : 塩害および中性化の補修対策として本工法を適用する場合の主たる目的。 |
| ゲルの非膨張化 | : ASR の補修対策として本工法を適用する場合の主たる目的。 |

【解説】

(1) について

塩害は、腐食発生限界濃度を超える塩化物イオンの存在により鋼材周囲の不動態皮膜が破壊され、鋼材腐食が進行する。中性化は、二酸化炭素の侵入によりコンクリート中の pH が低下し、鋼材周囲の不動態皮膜が破壊され、鋼材腐食が進行する。したがって、塩害および中性化の補修対策として本工法を適用する場合には、不動態皮膜の再生を図ることにより、以後の鋼材腐食を抑制する。

ASR は反応性骨材がコンクリート中のアルカリ金属イオンと反応してアルカリシリカゲルを生成し、それが吸水膨張を引き起こすことでコンクリート全体が膨張する。したがって、ASR の補修対策として本工法を適用する場合には、ゲルの非膨張化を図ることにより、以後のコンクリートの膨張を抑制する。

2章 使用材料

2.1 抑制剤

- (1) 本工法に用いる抑制剤は、亜硝酸リチウムを主成分とする水溶液とする。
- (2) 本工法においては、コンクリート中の抑制剤の浸透性が極めて重要であるため、浸透性に優れた内部圧入専用の浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液を使用する。

【解説】

(1) について

亜硝酸リチウム (Lithium Nitrite ; LiNO_2) は、正の電荷を帯びたリチウムイオン (Li^+) と、負の電荷を帯びた亜硝酸イオン (NO_2^-) とがイオン結合した化合物であり、亜硝酸リチウム水溶液として製品化されている。

亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオンは鋼材表面の不動態被膜を再生する効果があるため、塩害や中性化などの鋼材腐食に起因する劣化の補修材料として適用性が高い。一方、リチウムイオンはアルカリシリカゲルを非膨張化する効果があるため、ASR 劣化の補修材料として適用性が高い (図 2-1)。

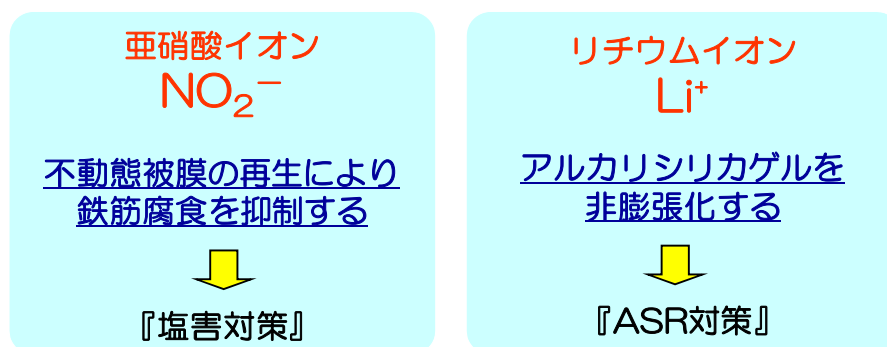


図 2-1 亜硝酸イオンおよびリチウムイオンの効果

亜硝酸リチウムの成分である亜硝酸イオンとリチウムイオンのうち、塩害および中性化の抑制に寄与するのは亜硝酸イオンである。塩害と中性化は、劣化要因や劣化メカニズムは異なるものの、両者とも最終的には不動態被膜の破壊による鋼材腐食の問題に帰着する。換言すれば、塩害および中性化の抑制とは、共に鉄筋腐食を抑制することと理解することができる。

亜硝酸イオンによる鉄筋腐食抑制メカニズムには諸説あり、亜硝酸イオンがアノード型インヒビターとして働く酸化剤としての効果 (不動態被膜再生効果)、亜硝酸イオンが鉄筋表面に吸着することにより鉄の溶解を抑制する効果などが提唱されており、それらが複合的に働いている可能性もある。ここで、不動態被膜再生に着目すると、亜硝酸イオン (NO_2^-) は 2 価の鉄イオン (Fe^{2+}) と反応してアノード部からの Fe^{2+} の溶出を防止し、不動態被膜 (Fe_2O_3) として鉄筋表面に着床することによって鉄筋腐食反応を抑制する。これが亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制メカニズムとされている。図 2-2 に鉄筋腐食の模式図を、図 2-3 に亜硝酸イオンによる不動態被膜の再生の模式図を示す。

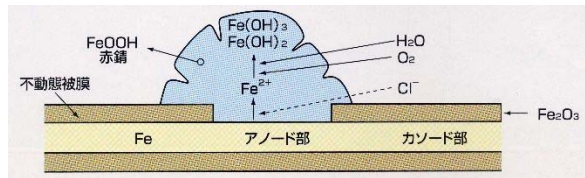


図 2-2 鉄筋腐食の模式図

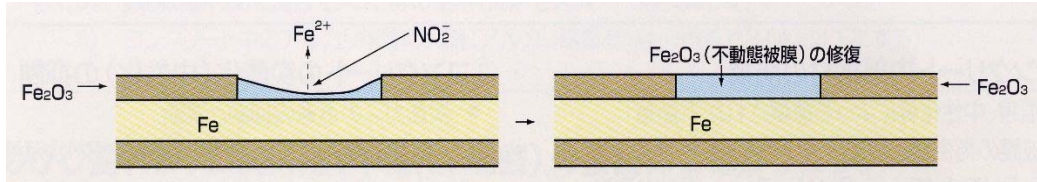


図 2-3 亜硝酸イオンによる不動態被膜の再生の模式図

亜硝酸リチウムの成分である亜硝酸イオンとリチウムイオンのうち、ASR の抑制に寄与するのはリチウムイオンである。ASR の進行過程は「骨材中のシリカ鉱物とコンクリート中のアルカリ金属との反応によってアルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) が形成される過程」と、「アルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) が水分を吸収して膨張する過程」に分離して考えることができる (図 2-4)。

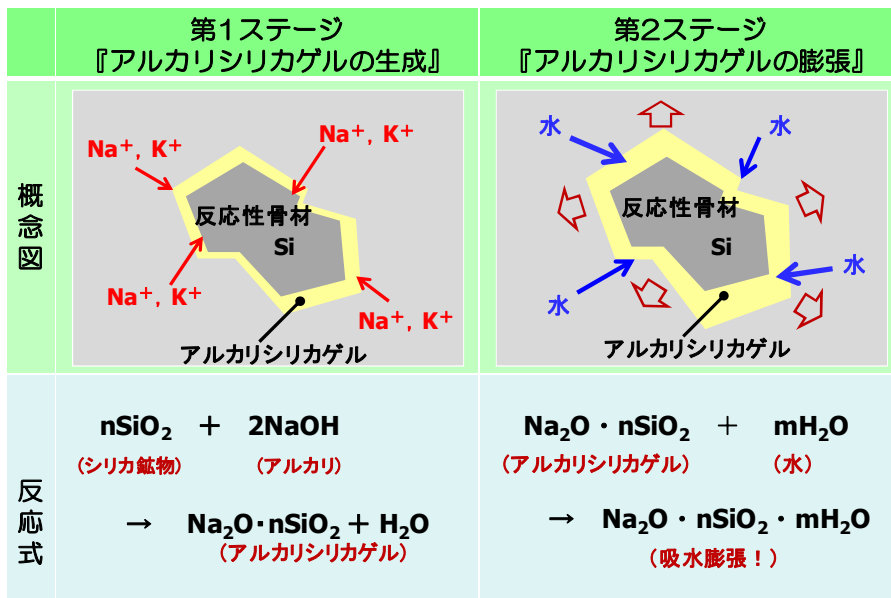


図 2-4 ASR 劣化の進行過程

リチウムイオンによる ASR 膨張抑制メカニズムは諸説あるが、現時点ではリチウムイオンがアルカリシリカゲルを非膨張化させるという考え方が一般的といえる。図 2-4 にて示した ASR の進行過程のうち、リチウムイオンの存在下ではアルカリシリカゲルの膨張反応が抑制される。すなわち、アルカリシリカゲル ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) にリチウムイオン (Li^+) が供給されることによって、水に対する溶解性や吸湿性を持たないリチウムモノシリケート ($\text{Li}_2 \cdot \text{SiO}_2$) またはリチウムジシリケート ($\text{Li}_2 \cdot 2\text{SiO}_2$) に置換され、アルカリシリカゲルが非膨張化される。これらを模式図と反応式で表すと図 2-5 のようになる。アルカリシリカゲルがリチウムイオンによって非膨張化されるとゲルの吸水膨張反応が収束するため、以後の ASR 膨張は進行しない。これがリチウムイオンによる ASR 抑制のメカニズムとされている。

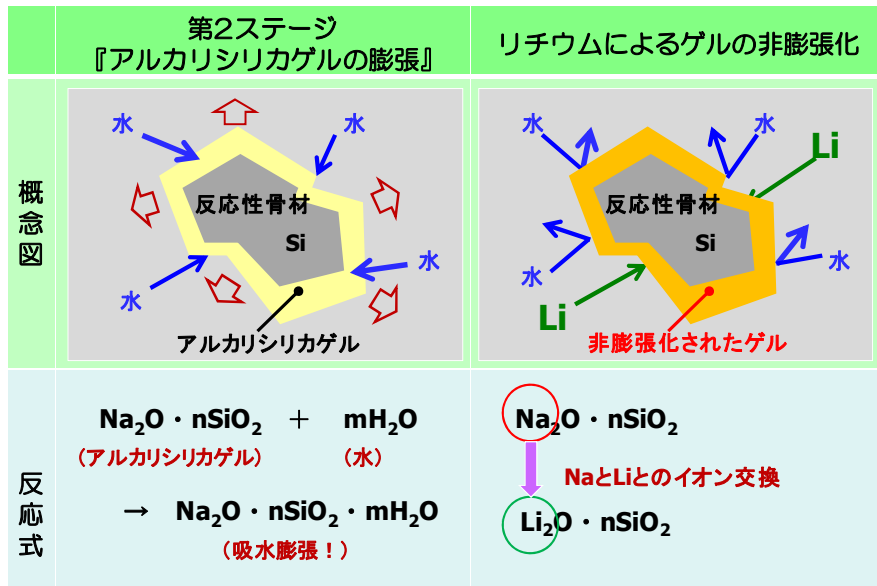


図 2-5 リチウムイオンによるゲルの非膨張化

(2) について

本工法における抑制剤は、浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液を用いることを原則とする。浸透拡散型亜硝酸リチウムは、製造過程での不純物混入を極力抑えた高機能材料であり、内部圧入工法やひび割れ注入工法などのようにコンクリート中に圧力をかけて亜硝酸リチウムを浸透させる場合の浸透性が向上している。従って、これらの工法に浸透拡散型亜硝酸リチウムを使用することにより、亜硝酸リチウムの有効成分の浸透範囲が拡大するとともに、浸透の確実性が向上する。

浸透拡散型亜硝酸リチウムの品質規格を表 2-1 に示す。

表 2-1 浸透拡散型亜硝酸リチウムの品質規格

| | | |
|------|----|--------------|
| 製品名 | | プロコン 40 |
| 製造者 | | 田島ルーフィング (株) |
| 品質規格 | 濃度 | 40±1% |
| | 比重 | 1.25±0.05 |
| | pH | 9.0±1.0 |
| | 粘度 | 20mPa・s 以下 |
| 外観 | | 淡黄色透明 |

2.2 抑制剤圧入システム

(1) 本工法における抑制剤圧入システムは、リハビリカプセル、加圧パッカー、注入ホース、分配器により構成する。

(2) 抑制剤圧入システムへの加圧はコンプレッサーを用いて行うこととする。

【解説】(1) について

本工法に使用する主要資材を図 2-6～図 2-8 に示す。

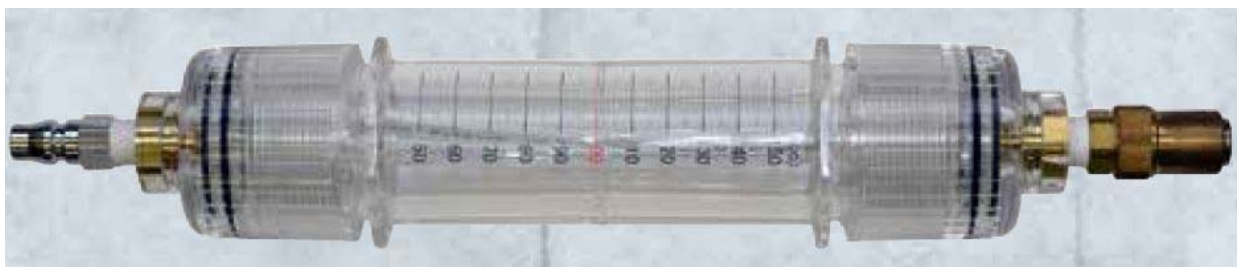


図 2-6 リハビリカプセル (標準容量 150ml)



図 2-7 加圧パッカー (パッカー径 ϕ 10mm)



図 2-8 分配器 (任意数の接続可能)

(2) について

抑制剤圧入システムへの加圧はコンプレッサーを用いる。本工法においては 100V 電源用で最大出力 2.0MPa 程度のベビーコンプレッサーで十分な加圧作業が可能である。狭隘な現場での作業となることが多いため、小型軽量のものが望ましい。ベビーコンプレッサーの例を図 2-9 に示す。



図 2-9 ベビーコンプレッサーの例

3章 設計

3.1 一般

(1) 本工法を塩害および中性化の補修対策として適用する場合、その目的は不動態皮膜再生による鉄筋腐食抑制にある。したがって、亜硝酸イオンを鋼材周辺に浸透させるための圧入仕様を定めなければならない。

(2) 本工法を ASR の補修対策として適用する場合、その目的はゲルの非膨張化による膨張抑制にある。したがって、リチウムイオンを反応性骨材周囲のアルカリシリカゲルに浸透させるための圧入仕様を定めなければならない。

(3) 本工法の圧入仕様は、抑制剤量、圧入孔、注入圧力、注入日数および抑制剤の漏出防止で構成される。

【解説】

(1) について

本工法による塩害補修とは、塩化物イオンの侵入を抑制することではなく、塩化物イオン存在下でも鋼材を腐食させないことを目的としている。同様に中性化補修では、二酸化炭素の侵入とそれに伴うコンクリートの中性化を抑制するのではなく、中性化したコンクリート内でも鋼材を腐食させないことを目的としている。そのためには亜硝酸イオンを鋼材周辺に浸透させ、不動態皮膜を再生することで鉄筋腐食を抑制する必要がある。したがって、塩害、中性化の補修対策としての圧入仕様は、十分な量の亜硝酸イオンを鋼材周辺に浸透させることを目的として定めることとする。

(2) について

本工法における ASR 補修とは、水分の侵入を抑制することではなく、水分供給環境下でもアルカリシリカゲルを膨張させないことを目的としている。そのためにはリチウムイオンをコンクリート内部の反応性骨材周囲に浸透させ、ゲルを非膨張化することで ASR 膨張を抑制する必要がある。したがって、ASR の補修対策としての圧入仕様は、十分な量のリチウムイオンをコンクリート内部に浸透させることを目的として定めることとする。

3.2 設計抑制剤量

(1) 劣化機構が塩害の場合、抑制剤の必要量はコンクリート中の塩化物イオン濃度に応じて算出する。このとき、亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比) が 1.0 となる抑制剤量を設計抑制剤量と定める。

(2) 劣化機構が ASR の場合、抑制剤の必要量はコンクリート中のアルカリ総量に応じて算出する。このとき、リチウムイオンとナトリウムイオン (等価アルカリ量) のモル比 (Li^+/Na^+ モル比) が 0.8 となる量の抑制剤量を設計抑制剤量と定める。

(3) 抑制剤の濃度は、亜硝酸リチウム有効成分 40% を標準とする。ただし、施工時外気温が 0°C を下回る場合には適切な対処を施さなければならない。

【解説】

(1) について

塩害の場合、抑制剤の必要量はコンクリート中の塩化物イオン濃度に応じて算出する。塩化物イオン濃度は対象構造物から採取したコア試料を 20mm 程度の間隔でスライスして粉碎し、イオンクロマトグラフ法や硝酸銀滴定法などの適切な測定方法にて定量分析するのがよい。試験本数は構造物あたり 3 本とすることで試験値のばらつきや偏りを考慮することができる。このとき、コンクリート表面から鉄筋位置までの塩化物イオン濃度分布を測定し、それら測定値の最大の値に対して亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比 ($\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比) が 1.0 となる量の亜硝酸リチウムを設計抑制剤量とする。塩化物イオン濃度と設計抑制剤量との関係を図 3-1 に示す。

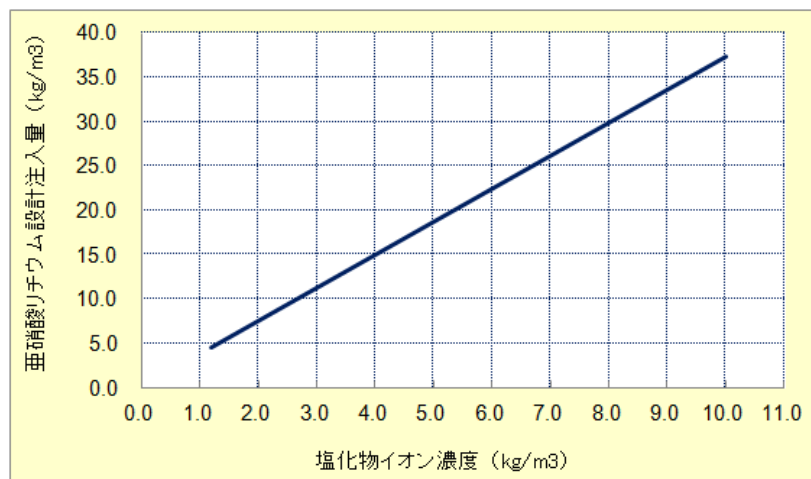


図 3-1 設計抑制剤量(塩害の場合)

中性化対策として本工法を適用する場合は、過去の実績から塩害対策における塩化物イオン濃度 2.0kg/m^3 に対する設計抑制剤量を用いている。すなわち、中性化対策の場合では 7.47kg/m^3 を設計抑制剤量とする。現時点では中性化深さや pH のように中性化特有の試験値と亜硝酸イオン必要量とが関連付けられていないため、塩害によって破壊された不動態被膜を修復しうる最小の亜硝酸イオン量を中性化に適用しているということである。

参考：【設計抑制剤量の算定例(塩害対策の場合)】

塩化物イオン濃度 3.5kg/m^3 の場合、設計抑制剤量の算定は以下の通りとなる。

Clの原子量： 35.453

LiNO₂の式量： 52.951

コンクリート中の塩化物イオン量 S (Cl)

$$S = \boxed{3.50} \text{ kg/m}^3$$

塩害を抑制するための有効なNO₂⁻/Cl⁻のmol比を $\boxed{1.0}$ とする。(通常1.0とする)

Cl⁻の式量 = 35.453

Cl⁻のコンクリート中のmol数を k1 とすると、

$$k1 = 3.5 \div 35.453 = 0.09872225 \text{ mol}$$

そのうち、Cl⁻のmol数を k2 とすると、

$$k2 = k1 = 0.09872225 \text{ mol}$$

亜硝酸リチウムLiNO₂の式量 = 52.951

NO₂⁻/Cl⁻のmol比を 1.0 とするため、亜硝酸リチウムの必要mol数 k3は、

$$k3 = k2 \times 1.0 = 0.09872225 \text{ mol}$$

コンクリート1m³あたりの亜硝酸リチウム必要量をXとすると、

$$X = k3 \times 52.951 = 5.227 \text{ kg/m}^3$$

使用する亜硝酸リチウム水溶液の濃度を $\boxed{40}$ %とする場合、(製品は40%水溶液)

コンクリート1m³あたりの亜硝酸リチウム水溶液の必要量X'は、

$$\begin{aligned} X' &= X \div 0.4 \\ &= 5.227 \div 0.4 = \boxed{13.07} \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

(2) について

ASR の場合、抑制剤の必要量はコンクリート中のアルカリ総量に応じて算出する。アルカリ総量は対象構造物から採取したコア試料を粉砕し、温水抽出法(総プロ法)などの適切な測定方法にて定量分析するのがよい。試験本数は構造物あたり3本とすることで試験値のばらつきや偏りを考慮することができる。対象コンクリートのアルカリ総量を測定し、それら測定値の最大の値に対してリチウムイオンとナトリウムイオン(等価アルカリ量)のモル比(Li⁺/Na⁺モル比)が0.8となる量の抑制剤量を設計抑制剤量とする。アルカリ総量と設計抑制剤量との関係を図3-2に示す。

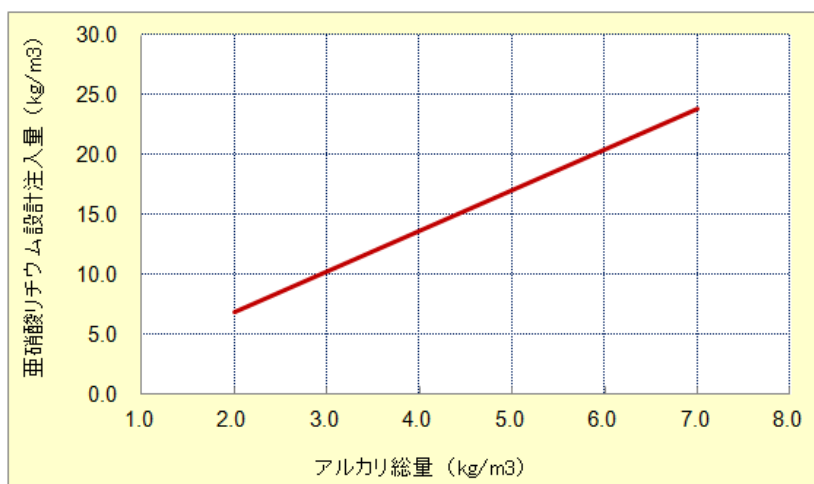


図 3-2 設計抑制剤量(ASR の場合)

参考：【設計抑制剤量の算定例(ASR 対策の場合)】

アルカリ総量 4.0kg/m³ の場合、設計抑制剤量の算定は以下の通りとなる。

コンクリート中のアルカリ総量 Z (Na₂O)

$$Z = \boxed{4.00} \text{ kg/m}^3$$

Li⁺/Na⁺のmol比の設定

$$\boxed{0.8} \text{ とする。}$$

Na₂Oの分子量 = 62

Na₂Oのコンクリート中のmol数を k1 とすると、

$$k1 = 4.0 / 62 = 0.06451613 \text{ mol}$$

そのうち、Na⁺のmol数を k2 とすると、

$$k2 = k1 \times 2 = 0.12903226 \text{ mol}$$

(Na₂Oの中にNa⁺は2つ存在するため)

亜硝酸リチウムLiNO₂の分子量 = 53

Li⁺/Na⁺のmol比を 0.8 とするため、亜硝酸リチウムの必要mol数 k3は、

$$k3 = k2 \times 0.8 = 0.10322581 \text{ mol}$$

コンクリート1m³あたりの亜硝酸リチウム必要量をXとすると、

$$X = k3 \times 53 = 5.471 \text{ kg/m}^3$$

使用する亜硝酸リチウム水溶液の濃度 = $\boxed{40}$ %

コンクリート1m³あたりの亜硝酸リチウム水溶液の必要量X'は、

$$X' = X / 0.4$$

$$= 5.471 / 0.4 = \boxed{13.7} \text{ kg/m}^3$$

(= 10.9 ℓ/m³)

(3) について

コンクリート躯体内部への圧入量を最小とする観点から、抑制剤濃度は亜硝酸リチウムを最も高濃度とした40%水溶液を用いることを標準とした。しかし、外気温が0℃を下回る施工環境の場合、抑制剤の温度低下による溶解度の低下から再結晶化が生じることがある。このよう状況が予測される場合には、適切な保温対策を講じるか、施工環境に応じた抑制剤の濃度調整を行うことにより結晶析出を防ぐ必要がある。参考として、**図 3-3** に抑制剤濃度と結晶析出温度との関係を示す。抑制剤の濃度調整を行う場合には、希釈の度合いに応じて設計抑制剤量を補正しなければならない。

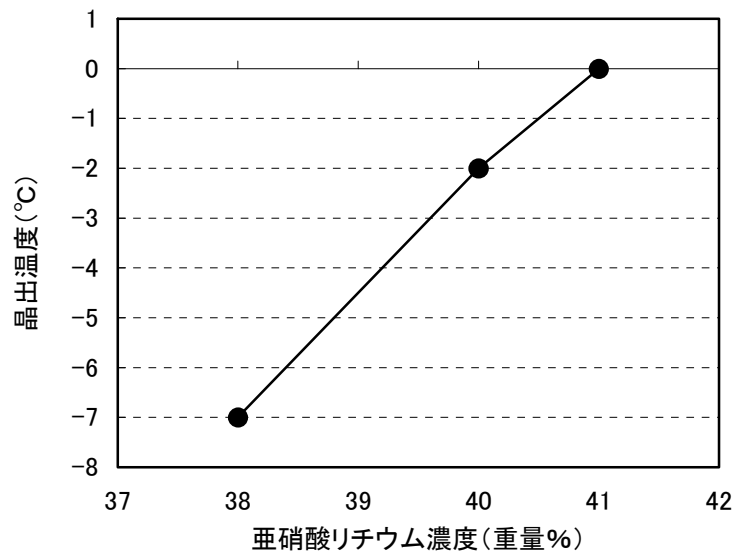


図 3-3 抑制剤濃度と結晶析出温度との関係

3.3 圧入孔

- (1) 圧入孔の寸法は内径 $\phi 10\text{mm}$ を標準とする。
- (2) 劣化機構が塩害または中性化の場合、圧入孔長は防錆対象とする鋼材のかぶり深さに応じて適切に定める。
- (3) 劣化機構が ASR の場合、圧入孔長は抑制剤を浸透させるコンクリートの範囲に応じて適切に定める。
- (4) 圧入孔の間隔は 500mm を標準とし、隣り合う圧入孔の間隔が等しくなるよう千鳥配置とすることが望ましい。

【解説】

(1) について

圧入孔径は加圧パッカー先端のウレタンゴム部材寸法に準じて $\phi 10\text{mm}$ を標準とした。

(2) について

抑制剤の浸透深さは圧入孔の深さによって決まる。劣化機構が塩害または中性化の場合、防錆対象とする鋼材のかぶり深さを考慮して圧入孔の深さを適切に定めることとした。鋼材かぶり深さに応じた圧入孔長の設定の例を表 3-1 に示す。

表 3-1 圧入孔長の設定の例

| 鋼材かぶり深さ | 圧入孔長 |
|----------|-------|
| 30mm 未満 | 75mm |
| 30~70mm | 100mm |
| 70~120mm | 150mm |
| 120mm 以上 | 200mm |

(3) について

劣化機構が ASR の場合、抑制剤を浸透させるコンクリートの範囲を考慮して圧入孔長を適切に定めることとした。ただし、 $\phi 10\text{mm}$ の限界削孔長は 250mm 程度であるため、本工法で対応可能な抑制剤浸透深さは 350mm 程度（削孔長+ 100mm ）までとしなければならない。それよりも深い浸透範囲を必要とする場合には、削孔方法を別途検討するか、油圧式内部圧入工法（ASR リチウム工法）の適用を検討するのがよい。

(4) について

本工法における圧入孔の間隔は 500mm を標準とした。ただし、コンクリート強度が高い場合などで抑制剤の浸透速度が著しく遅いと予測される場合には、圧入孔間隔を狭くして圧入に要する時間の短縮を図ることもある。

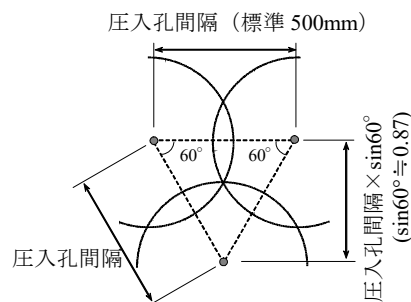


図 3-4 圧入孔間隔と配置

3.4 設計圧入圧力

- (1) 本工法の圧入圧力は0.5MPaを標準とする。
- (2) 施工時に圧入圧力を上げる場合には、劣化した躯体コンクリートに対して圧入により悪影響を与えないよう、コンクリートの引張強度に応じて定めた上限圧入圧力までとする。ただし、リハビリカプセルの耐圧性能を考慮して1.0MPaを上限と定める。
- (3) 以上より、設計圧入圧力は0.5MPa～上限圧入圧力(MAX=1.0MPa)の範囲とし、その範囲は構造物毎に定める。

【解説】

(1) について

一般に抑制剤の圧入に要する時間は圧入圧力に比例して短くなると考えられるが、過度に圧力を上げると漏出、漏洩の発生頻度が高くなり、圧入の継続が困難となる可能性場合がある。これまでの施工事例では、圧入圧力0.5MPaであれば躯体表面からの著しい漏出、漏洩が少ないことを確認しており、圧入圧力は0.5MPa程度が推奨される。

(2) について

上限圧入圧力は、コンクリート物性調査結果の圧縮強度に基づき推定される引張強度に対して、安全率を考慮して3で除したものとす。表3-2に上限圧入圧力の設定例を示す。

- ・ 推定引張強度＝圧縮強度（コンクリート物性調査結果）／10
- ・ 上限圧入圧力＝推定引張強度／安全率

ただし、安全率；3

表3-2 上限圧入圧力の設定例

| 圧縮強度 (N/mm ²) | 推定引張強度 (N/mm ²) | 上限圧入圧力 (MPa) |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 15 | 1.50 | 0.50 |
| 17 | 1.70 | 0.57 |
| 19 | 1.90 | 0.63 |
| 21 | 2.10 | 0.70 |
| 23 | 2.30 | 0.77 |
| 25 | 2.50 | 0.83 |
| 27 | 2.70 | 0.90 |
| 29 | 2.90 | 0.97 |

(3) について

リハビリカプセルの耐圧性能より、加圧可能な上限圧力を1.0MPaと定めた。これにより、圧入圧力は0.5MPaで開始し、状況に応じてコンクリート強度から算出される上限圧入圧力まで上げることができる。ただしその上限は1.0MPaまでとする。

3.5 設計圧入日数

(1) 設計圧入日数 (= 圧入に要する時間) は、対象構造物の設計抑制剤量、圧入孔数、設計圧入圧力、コンクリート圧縮強度をパラメータとして算出する。

(2) ただし、ここで算出される設計圧入日数は経験式にて推定される目安値であり、圧入日数を規定または制限するものではない。

【解説】

(1) について

設計圧入日数は以下のとおり算定する。

- ・アルカリ総量分析結果から算定された設計抑制剤量と配孔計画により決定した圧入孔本数より、圧入孔 1 孔あたりに圧入する抑制剤量 $Q(\text{m}^3)$ を算定する。

$$Q(\text{m}^3) = \text{設計抑制剤量}(\text{m}^3) / \text{圧入孔本数}$$

- ・設計圧入圧力 $P(\text{MPa})$ 、1 孔あたりに圧入する抑制剤量 $Q(\text{m}^3)$ 、対象構造物の諸元 (部材厚 $L(\text{m})$ 、圧入孔径 $D(\text{m})$) より、次式を用いて圧入に要する時間 $t(\text{hour})$ を求める。これを一日あたりの圧入時間 (例えば昼間のみ施工の場合、8 時間など) で除すると設計圧入日数 $T(\text{day})$ を設定できる。

$$\text{圧入に要する時間 } t(\text{hour}) = Q/q(\text{hour})$$

ただし、

$$q = 2\pi \cdot k_\alpha \cdot L \cdot \frac{10^6 \cdot P}{\rho g} \cdot \frac{1}{\ln(4L/D)} \quad (\text{m}^3/\text{hour})$$

ここに、

Q : 圧入孔 1 孔あたりに圧入する抑制剤量 (m^3)

q : 時間当たりの圧入量 (m^3/hour)

k_α : 抑制剤の圧入のしやすさに関するパラメータ

$$k_\alpha = h(f'_c) = 7 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.0892 f'_c}$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度

P : 設計注入圧力 (MPa) ($1\text{MPa}=10^6 \text{N/m}^2$)

ρ : 抑制剤の密度 ($=1,250$) (kg/m^3)

g : 重力加速度 ($=9.8$) (m/sec^2)

L : 部材厚 (m)

D : 圧入孔径 (m)

このとき、 T : 設計圧入日数(day)は

$$T = t / (\text{一日あたりの圧入時間})$$

(2) について

設計圧入日数はあくまで圧入に要する日数を推定するものであり、主に施工計画の工程管理の目安として活用される。

4章 施工

4.1 標準施工フロー

(1) 本工法の標準施工フローを図 4-1 に示す。

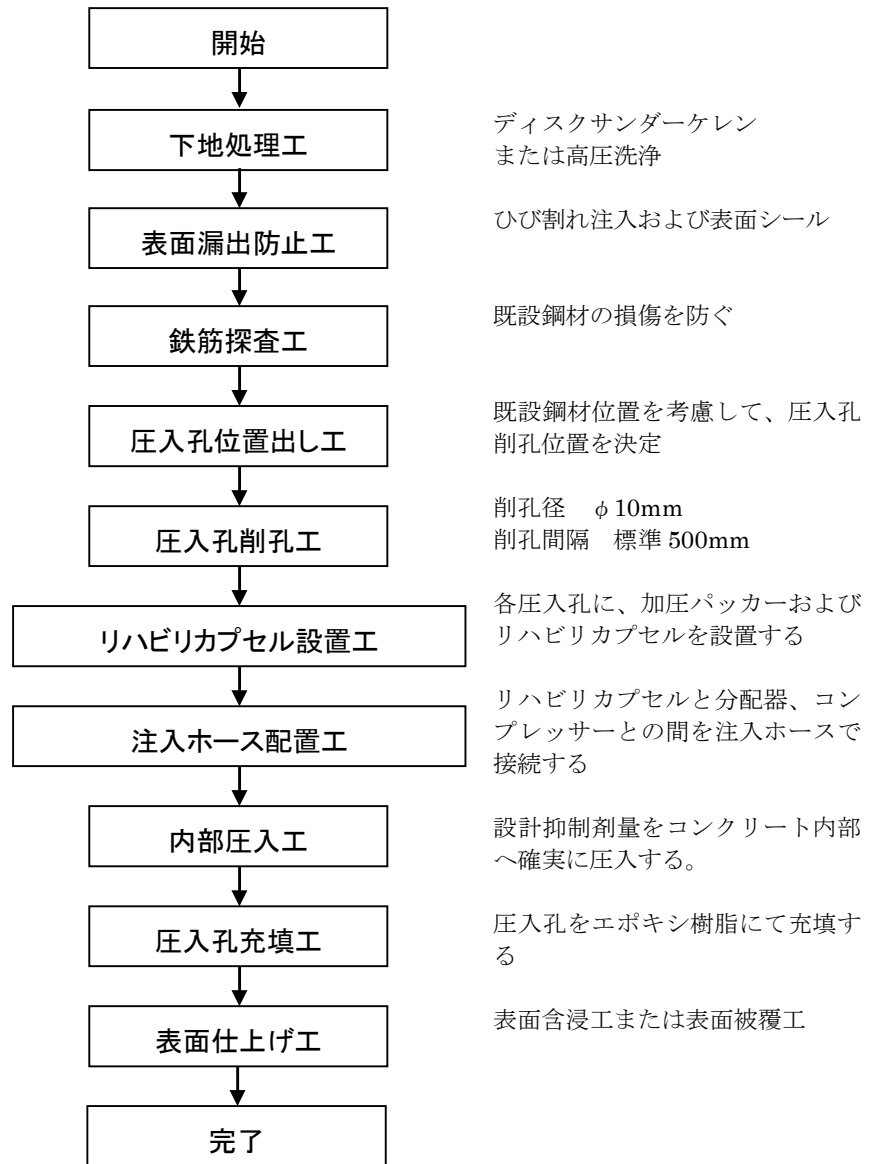


図 4-1 標準施工フロー

4.2 下地処理工

- (1) 既設コンクリート表面の油脂等の汚れや脆弱層を入念に取り除くために、高圧洗浄またはディスクサンダーケレンにより下地処理を行う。
- (2) 既設塗装がある場合は内部圧入の前に除去することを基本とする。

【解説】

(1) について

表面シール材が所定の付着強度を得られるよう、入念な下地処理が必要となる。また下地処理を行うことで汚れ等に隠れていたひび割れ等も明確となる。

(2) について

対象構造物表面に既設塗装がある場合、その塗装の下にひび割れが隠されていることが多い。したがって既設塗装は事前に撤去することとした。

4.3 表面漏出防止工

- (1) 下地処理の後、コンクリート表面の劣化状況を入念に確認し、適切な内部圧入作業の妨げとなる変状は事前に対処しなければならない。
- (2) 内部圧入作業の妨げとなる変状とは、ひび割れ、ジャンカ等を指す。これらの変状が生じている場合、内部圧入時に抑制剤が著しく漏出するため、ひび割れ注入工、表面シール工により漏出防止対策を施したうえで圧入作業を行うこととする。
- (3) 表面漏出防止工として適用するひび割れ注入材は、超微粒子セメント系を使用することを標準とする。また、表面シール材はポリマーセメントモルタル系を使用することを標準とする。

【解説】

(1) について

本工法において効果的な抑制剤の圧入のためには、躯体表面からの漏出防止が重要となる。このため、構造物の種別及び変状の程度などに基づき、必要に応じて事前に対処することを原則とした。

(2) について

ひび割れの存在は抑制剤の漏出の原因となるため、コンクリート表面に生じている幅 0.2mm 以上のひび割れに対してはひび割れ注入工法により事前に処理することとした。また、幅 0.2mm 未満のひび割れやコンクリート表面のジャンカ等も抑制剤の漏出の原因となるため、その範囲には表面シールにて事前に処理することとした。これら表面漏出防止工の良否が抑制剤の浸透精度に影響を与えるため、入念な施工とすることが重要である。

(3) について

使用するひび割れ注入材は超微粒子セメント系を標準とし、エポキシ樹脂等の有機系注入材は用いないこととする。これは、ひび割れ注入後に施工する内部圧入工において、抑制剤（亜硝酸リチウム水溶液）がコンクリート中を浸透する際にひび割れ注入箇所で浸透が阻害される影響を最小限とするための配慮である。エポキシ樹脂等の有機系注入材は遮水性が高いため抑制剤の浸透を阻害するが、

超微粒子セメント系等の無機系注入材は物性がコンクリートと近いため抑制剤の浸透を阻害しないことが既往の研究で確認されている。超微粒子セメント系注入材の品質規格を表 4-1 に、ひび割れ注入工の施工状況を図 4-2 に示す。

使用する表面シール材はポリマーセメントモルタル系被覆材を標準とし、エポキシ樹脂等の有機系注被覆材は用いないこととする。これは、表面シール後に施工する内部圧入工において、抑制剤の漏出によるシール材の膨れ等の不具合を最小限とするための配慮である。表面シール工の施工状況を図 4-3 に示す。

表 4-1 ひび割れ注入材(超微粒子セメント系注入材)

| 試験項目 | 単位 | 測定値 | | 備考 |
|----------|-------------------|---------|------|--------------------------|
| 硬化体密度 | g/cm ³ | 1.64 | | JIS A 1110 |
| コンシステンシー | 秒 | 13.7 | | JSCE-F531 (JA ロート) |
| ブリーディング率 | % | 3 時間 | 0.9 | JSCE-F532 |
| 圧縮強度 | N/mm ² | 材齢 28 日 | 36.7 | JIS A 1108 (φ 5×10cm) |
| 曲げ強度 | N/mm ² | 材齢 28 日 | 4.2 | JIS R 5201 |
| 接着強度 | N/mm ² | 材齢 28 日 | 3.5 | JIS A 6024 |



図 4-2 表面漏出防止工(ひび割れ注入工)



図 4-3 表面漏出防止工(表面シール工)

4.4 鉄筋探査工

(1) 圧入孔の削孔時に既設鋼材を損傷させないために、削孔に先立って非破壊試験による鉄筋探査を行わなければならない。

【解説】

(1) について

削孔に先立ち、既設鋼材を傷つけないための処置として鉄筋探査を行うこととした。鉄筋探査には、電磁波レーダー法もしくは電磁誘導法の鉄筋探査機を使用する。探査結果は躯体表面にマーキングする。使用機械の例を図 4-4 に、鉄筋探査状況を図 4-5 に示す。



図 4-4 鉄筋探査機の例



図 4-5 鉄筋探査状況

4.5 圧入孔位置出し工

(1) 圧入孔の位置出しは鉄筋探査工の結果を考慮して、現場にて最終決定する。圧入孔の設計削孔位置と既設鋼材位置とが干渉する場合は、圧入孔位置を 100mm 以内で移動させ、既設鋼材の損傷を防がなければならない。

【解説】

(1) について

圧入孔の削孔はダイヤモンドコアドリルを用いるため、削孔時の既存鋼材の損傷を未然に防ぐための鉄筋探査工および圧入孔位置出し工は特に重要な工程といえる。圧入孔の位置は鉄筋探査工の結果を考慮して現場で最終決定することとした。設計削孔位置と既設鋼材位置とが干渉する場合は圧入孔位置を移動しなければならないが、その移動量の目安は 100mm 以内とし、圧入孔数は設計孔数以上とする。この 100mm の根拠は躯体内の鋼材径、鋼材間隔と削孔径との関係から導いた値であり、経験則に基づくものである。ただし、構造物によっては 100mm 以内の移動では鋼材との干渉を避けられない場合も想定される。その場合は監督官の協議のうえ、既設鋼材保護を優先させるための適切な対処を行うこととする。

4.6 圧入孔削孔工

- (1) 圧入孔の削孔はダイヤモンドコアドリルを用いたコアボーリングを標準とする。
- (2) 削孔長は設計圧入孔長の $\pm 20\text{mm}$ の範囲内となるよう管理する。
- (3) 障害物等により所定の圧入孔長が確保できないものについては、配孔計画を見直すことにより、設計圧入孔数を確保する。
- (4) 削孔完了後は孔内に支障物等がないよう十分に清掃を行う。

【解説】

(1) について

圧入孔の削孔方法は、劣化した既設構造物に与える影響を最小限とするために、ダイヤモンドコアドリルを用いたコアボーリングを標準とした。削孔状況を図4-6に示す。

(2) について

削孔長は設計圧入孔長に対し、 $\pm 20\text{mm}$ の範囲内となるよう管理することとした。 -20mm とした根拠は削孔先端部での鋼材損傷を避けるための配慮であるが、極力設計圧入孔長以上を確保するのが望ましい。 $+20\text{mm}$ とした根拠は鋼材との接触を避けるために削孔の方向や角度を変更し、削孔長が長くなる場合の許容範囲である。これらはいずれも経験則に基づくものである。

(3) について

(2)に示す設計圧入孔長の管理値以内に収まらない場合には、圧入孔位置を再検討することとした。その際の移動量は4.5 圧入孔位置出し工の規定に準拠して定めることとする。

(4) について

圧入孔の削孔周面から抑制剤がコンクリート内部に浸透するため、抑制剤の浸透を阻害することのないよう、孔内の清掃を行うこととした。



図4-6 削孔状況(ダイヤモンドコアドリル)

4.7 リハビリカプセル設置工

- (1) 圧入孔口に加圧パッカーを設置し、確実に固定させる
- (2) リハビリカプセルに所定の抑制剤を充填し、加圧パッカーと接続する。

【解説】

(1) について

圧入孔の孔口に加圧パッカーのウレタンゴム部を挿入し、ナットを締め込むことでゴムを膨張させ、圧入孔周面との摩擦にて確実に固定させる。

(2) について

リハビリカプセルの最大容量は 200ml であるが、管理上 150ml を上限として抑制剤を充填する。1 孔あたりの設計抑制剤量が 150ml を超える場合は、複数回に分けて内部圧入作業を行う。加圧パッカーとリハビリカプセルを設置した状況を図 4-7 に示す。

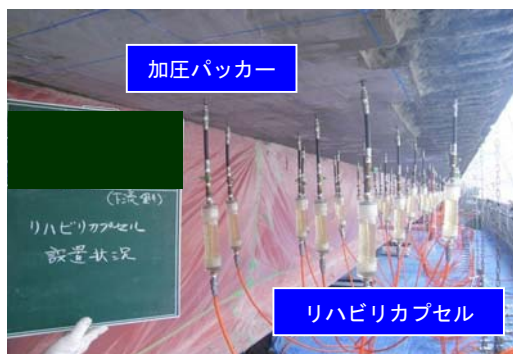


図 4-7 リハビリカプセル設置状況

4.8 注入ホース配置工

- (1) リハビリカプセルと分配器、コンプレッサーとの間を注入ホースで接続し、配管を行う。

【解説】

(1) について

コンプレッサーと分配器を注入ホースで接続する。分配器を用いて任意の個数のリハビリカプセルと接続し、圧力を分配させる。配管は内部圧入の作業に支障とならないように配置する。

4.9 内部圧入工

- (1) 設計抑制剤量をコンクリート内部の所定範囲内に内部圧入する。
- (2) 内部圧入工では以下の項目を標準管理項目とする。
 - ① 圧入圧力
 - ② 抑制剤圧入量
 - ③ 圧入時間
 - ④ 躯体からの漏出の有無
- (3) 圧入に要する時間が長期化し、設計圧入日数を大幅に超えることが予測される場合には、該当箇所の圧入計画を見直し、周辺の孔への再分配を行うこととする。

【解説】

(1) について

塩化物イオン濃度またはアルカリ総量に応じて算出された設計抑制剤量を、コンクリート内部の所定範囲に内部圧入する。1孔あたりに圧入する抑制剤量はリハビリカプセルにて定量的に管理することができる。

(2) について

内部圧入工における標準管理項目は、①圧入圧力、②抑制剤圧入量、③圧入時間および④躯体からの漏出の有無の4項目とした。

①圧入圧力：コンプレッサーの圧力ゲージを目視にて読み取り、0.5MPa～上限圧入圧力以内にあることを確認する（コンプレッサー毎/毎日）。

②抑制剤圧入量：リハビリカプセルの目盛を目視で読み取り、リハビリカプセル内の抑制剤減量を確認する（全圧入孔毎/毎日）。また、1孔あたりの設計抑制剤量を全て圧入完了したことを確認する（全圧入孔毎/圧入完了時）。

③圧入時間：圧入孔毎の抑制剤減量に要している時間を把握することで、一定の圧入速度で圧入がなされているかを確認する（全圧入孔/毎日）。

④躯体からの漏出の有無：圧入孔の口元または圧入孔周辺の躯体表面からの抑制剤の漏出の有無を目視で確認する（全圧入孔/毎日）。

(3) について

コンクリート内部の状況は均一ではなく、部分的に密実またはポーラスな箇所などが存在していることがある。内部圧入に要する時間（＝設計圧入日数）はコンクリート強度を用いてあらかじめ推定しているが、このような理由により局部的に圧入速度が遅い孔が認められることがある。それらの圧入孔については、以下のとおり内部圧入計画を見直し、周辺の孔に再分配することとする。

【圧入速度が非常に小さい圧入孔】

状況：対象躯体コンクリートが密実で、抑制剤が浸透していかない状態

対処：可能な限り現状のまま内部圧入工を継続するが、最終的には周囲の圧入孔へ配分

4.10 圧入孔充填工

- (1) 圧入孔の充填はエポキシ樹脂系注入材を用いることを標準とする。
- (2) 圧入孔充填工に先立ち、孔内に残留する抑制剤を除去する。

【解説】

(1) について

内部圧入工完了後、全ての孔をエポキシ樹脂系注入材にて入念に充填する。圧入孔充填状況を図 4-8 に示す。

(2) について

圧入孔からリハビリカプセル、加圧パッカーを取り外した後、孔内に抑制剤が残留していることがある。充填材のエポキシ樹脂の硬化不良を防ぐために、残留する抑制剤は除去することとした。



図 4-8 圧入孔充填状況(エポキシ樹脂)

4.11 表面仕上げ工

(1) 内部圧入工完了後は、表面仕上げ工としてコンクリート躯体表面に対して表面含浸工または表面被覆工を施す。

(2) 表面含浸工を適用する場合、表面漏出防止として施した表面シール材は全て撤去し、コンクリート躯体表面を露出させたいうで表面含浸材を塗布する。

(3) 表面被覆工を適用する場合、表面漏出防止として施した表面シール材はそのまま中塗り材として残し、素地調整を行ったいうで被覆材を塗布する。

【解説】

(1) について

表面仕上げ工として、表面含浸工または表面被覆工を適用することができることとした。表面含浸工ではコンクリート表面の外観を変えないため、補修後の点検、モニタリングを行いやすいという特徴がある。表面被覆工ではコンクリート表面の美観性が向上するため、景観等を重視される環境では適している。

(2) について

圧入孔充填工が完了した段階では、まだ表面シール工のポリマーセメントモルタルが塗布されたままの状況である。表面仕上げ工として表面含浸工を適用する場合には、この表面シール材が表面含浸材の含浸性を阻害するため、撤去する必要がある。表面シール材の撤去はディスクサンダーによるケレンとする。

(3) について

表面仕上げとして表面被覆工を適用する場合には、表面シール材を撤去する必要はなく、むしろそれを表面被覆工の中塗り材とみなすことができる。ただし、表面シール材表面には鉄筋探査工のマーキング等が残っているため、素地調整程度の処理が必要となる。

5章 施工管理基準

5.1 標準施工管理項目

(1) 本工法の施工においては、事前に作成した施工計画書に基づき、必要な項目について適切な施工管理を行うことにより所定の品質を確保しなければならない。

【解説】

(1) について

本工法における標準施工管理項目を表 5-1 に示す。

表 5-1 標準施工管理項目

| 工程 | 管理時期 | 管理項目 | 管理方法 | 管理基準 | 頻度 |
|-------|-------|--------------|----------------|--------|--------------|
| 材料検収 | 材料受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | — | ロット毎 |
| | | 材料数量 | 目視 | 設計数量 | 全数 |
| 圧入孔削孔 | 削孔前 | 削孔数 | 目視 | 設計数量 | 全数 |
| | 削孔時 | 削孔長 | スケール | ±20mm | 全数 |
| 内部圧入工 | 圧入中 | 圧入圧力 | コンプレッサの圧力ゲージ目視 | 設定圧力 | 全圧入孔毎 ／毎日 |
| | | 抑制剤圧入量 | カプセル内の抑制剤減量 | 設計数量 | |
| | | 圧入時間 | 累積圧入時間 | 設計圧入日数 | |
| | | 躯体表面からの漏出の有無 | 目視 | — | |

5.2 使用材料の品質管理

- (1) 使用材料の品質は、材料検収時に品質検査証明書（ミルシート）により確認する。
 (2) 使用材料の使用数量は空缶、空袋を検収することにより行う。

【解説】

(1) について

本工法では、要求性能を満足する材料の使用と適切な施工方法により所定の性能が発揮されるため、使用材料の品質管理を確実にを行うことが重要となる。主な使用材料を表 5-2 に示す。

表 5-2 主な使用材料と品質管理項目

| 名称・工種 | 管理時期 | 管理項目 | 管理方法 | 管理基準 | 頻度 |
|---------------------------------|-----------|------|---------|--------|-------|
| 表面シール材 (ポリマーセメントモルタル) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |
| ひび割れ注入材 (超微粒子セメント系) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |
| 抑制剤 (浸透拡散型亜硝酸リチウム 40%水溶液) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |
| 圧入孔充填材 (エポキシ樹脂材) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |
| 表面含浸材 (亜硝酸リチウム併用型表面含 浸材) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |
| 表面被覆材 (高分子系浸透性防水材) | 材料 受入時 | 材料品質 | 品質検査証明書 | メーカー規格 | 材料搬入毎 |

5.3 圧入孔削孔の管理

- (1) 削孔長は設計圧入孔長の±20mmの範囲内となるよう管理する。
(2) 圧入孔の削孔長は、全圧入孔において管理基準値を満たしているかをスケールにて測定する。

【解説】

(1) について

圧入孔の削孔長は、「4.6 圧入孔削孔工」にて規定したとおり、設計圧入孔長の±20mmの範囲内を管理基準値とする。

(2) について

圧入孔の削孔長はスケールにて測定することとし、頻度は全数とした。

5.4 内部圧入工における管理

- (1) 内部圧入工では以下の項目を標準管理項目とする。

- ① 圧入圧力
- ② 抑制剤圧入量
- ③ 圧入時間
- ④ 躯体からの漏出の有無

【解説】

(1) について

本工法では、設計抑制剤量を所定の圧力で内部圧入するプロセスを管理する。このプロセス管理の項目として、「4.9 内部圧入工」にて規定したとおり①圧入圧力、②抑制剤圧入量、③圧入時間および④躯体からの漏出の有無の4項目とした。

① 圧入圧力：設計圧入圧力が保持されていることを確認する。圧力を保持できない場合は圧入孔に不具合がある可能性があるため、圧入孔およびその周辺の状況を再確認しなければならない。コンプレッサーの圧力ゲージを目視にて読み取り、0.5MPa～上限圧入圧力以内にあることを確認する（コンプレッサー毎/毎日）。

② 抑制剤圧入量：設計で定めた抑制剤必要量を確実にコンクリート躯体内へ圧入していることを確認する。リハビリカプセルの目盛を目視で読み取り、リハビリカプセル内の抑制剤減量を確認する（全圧入孔毎/毎日）。また、1孔あたりの設計抑制剤量を全て圧入完了したことを確認する（全圧入孔毎/圧入完了時）。

③ 圧入時間：抑制剤が一定の速度でコンクリート内部に浸透しているかどうかを確認する。圧入孔毎の抑制剤減量に要している時間を把握することで、一定の圧入速度で圧入がなされているかを確認する（全圧入孔/毎日）。

④ 躯体からの漏出の有無：抑制剤を圧入している間、圧入孔の口元または圧入孔周辺の躯体表面からの抑制剤の漏出の有無または表面シール材の変状の有無を目視で確認する（全圧入孔/毎日）。

5.5 安全管理

(1) 本工事の施工にあたっては、工事に従事する作業者の安全はもとより、第三者災害の防止、公害防止などの社会的影響に十分配慮しなければならない。

【解説】

(1) について

本工事の施工にあたっては、使用材料の製品安全データシート（SDS）の内容を熟知し、その特性を十分把握したうえで適切な保護具を着用して作業を行うこととする。