

論文

[1161] アルカリ骨材反応劣化コンクリートの補修工法に関する
実験的研究

正会員 宮本征夫 (鉄道総合技術研究所)

正会員 堀 孝廣 (日産化学工業中央研究所)

正会員 長尾之彦 (新日鐵化学セメント部)

今西昭裕 (太平工業技術統括部)

1. はじめに

アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の補修方法については、種々検討されてきているが、構造物の形態、劣化の程度、期待される耐用年数などに応じて、適切な補修材料、補修工法が選定されるまでには至っていない。本研究は、アルカリ骨材反応に対して抑制効果を有するアルカリ骨材反応抑制剤（亜硝酸リチウム）と、注入性、耐久性にすぐれた高炉スラグ微粉末を主材とした無機質注入材とを使用して、アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の補修工法確立を目的として、注入材の注入性、接着性、亜硝酸リチウム水溶液の含浸方法について検討し、その結果を踏まえてアルカリ骨材反応抑制効果試験を実施したものである。

2. 試験概要

2. 1 注入材の性能試験

コンクリート構造物のひびわれ補修用注入材としては、一般にエポキシ樹脂系のものが多く使用されている。一方、無機質系注入材については、エポキシ樹脂系注入材に比べて被着体の乾燥状態の影響を受けにくく注入性、耐久性にすぐれているとされるが、エポキシ樹脂系注入材より接着強度が低く、乾燥収縮によりひびわれが再発することがある等の問題があった。本節では、高炉スラグ微粉末を主材とする無機質系注入材として、従来からある注入材（従来タイプ）、高流動化・収縮低減成分を配合して改良した注入材（改良タイプ）、改良タイプに亜硝酸リチウム（ LiNO_2 ）を添加した注入材について基本物性を比較検討した。

(1) 使用材料

使用した注入材の化学成分を表1に示す。水結合材比は、従来タイプは0.7、改良タイプは亜硝酸リチウムを添加したものも含めて0.6とした。改良タイプへの亜硝酸リチウムの添加は、コンクリート躯体内へできるだけ多くのリチウムイオンを供給するためには多い方が望ましいが、添加量が多くなると注入材の流動性を低下させる。そこで流動性を低下させない範囲内の添加量として、結合材と亜硝酸リチウムの比率は100:3とした。

(2) 試験項目と方法

a. 流動性試験 土木学会規準に準拠して、Pロートを用いて流下時間を測定した。試験温度は5、20、35℃で実施した。

b. 圧縮強さ、曲げ強さ試験

4×4×16cmの型枠に成形し、1日湿空養生の後脱型し、各材令まで水中及び封緘養生を行い、JIS R 5201に準拠して

表-1 注入材の化学成分

単位 %

注入材の種類	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	その他
従来タイプ	29	13	1	46	5	6
改良タイプ	25	9	2	52	4	8

強さ試験を実施した。

c. 長さ変化試験 4×4×16cmの型枠に成形し、1日湿空養生の後脱型し、基長を測定した。その後各材令まで封緘養生し、コンパレーターを用いて長さ変化率を測定した。

d. 接着強さ試験 28日間以上水中で養生したセメント/砂比 1/2の 4×4×8cmのモルタル供試体を用意し、その端面をサンディングし接着面とした。この被着体を接着層の厚さが1mmとなるように鋼線をスペーサーとして挟み、注入材が流出しないように周囲を粘着テープでシールした。この隙間に注入材を注入した後、20℃で1日湿空養生し、試験材令まで水中養生及び封緘養生を行い、支点間距離12cm、載荷点間距離4cmの4点曲げ載荷試験により接着強さを測定した。

(3) 試験結果と考察

図1、表2に注入材の試験結果を示す。改良された注入材は、従来から有る注入材に比べて水結合材比が小さいにもかかわらず、従来タイプとほぼ同等の流動性を保ち、圧縮強さ、曲げ強さ、接着強さが向上していることが認められた。とくに接着強さ試験において、水中養生の材令7日以降は基材破壊となり、注入材と基材の接着力は十分に確保されているものと思われる。

長さ変化率は、従来タイプが初期から収縮する傾向を示したのに対し、改良タイプは初期には若干膨張し、その後徐々に収縮している。注入材の収縮が小さいことが、接着力の改善に寄与しているものと考えられる。

亜硝酸リチウムを添加した改良タイプの注入材は、初期強度が一様に高くなる傾向が認められた。

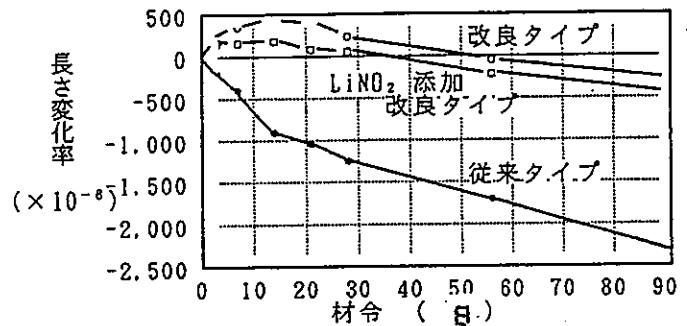


図-1 注入材の長さ変化

表-2 注入材の試験結果

試 験 項 目			注 入 材 の 種 類		
			従来タイプ	改良タイプ	LiNO ₂ 添加改良タイプ
流 下 時 間 (秒)	5℃	直後	10.0	11.9	12.6
		30分後	11.0	12.7	20.6
		60分後	11.0	13.4	30.3
	20℃	直後	9.5	11.7	12.9
		30分後	10.3	11.9	13.9
		60分後	10.4	12.2	15.1
	35℃	直後	9.4	11.0	12.2
		30分後	11.8	11.2	13.4
		60分後	11.5	11.5	14.2
圧縮強さ (上段)		1日後	8 (8) 3 (3)	31 (31) 3 (3)	51 (51) 8 (8)
曲げ強さ (下段)		3日後	78 (99) 22 (34)	167 (222) 38 (62)	287 (353) 54 (71)
() 内は封緘養生		7日後	227 (253) 51 (62)	267 (298) 55 (72)	408 (437) 103 (83)
(kgf/cm ²)		28日後	362 (366) 56 (62)	443 (422) 84 (85)	528 (511) 105 (89)
接着強さ		1日後	2 (2)	4 (4)	6 (6)
() 内は封緘養生		3日後	3 (4)	21 (23)	52* (55*)
(kgf/cm ²)		7日後	12 (16)	49* (35)	59* (59*)
* : 基材破壊		28日後	18 (20)	66* (40)	71* (65*)

これは、リチウムイオンが高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激剤として作用した結果と思われる。その他の物性については、低温時に流動性の低下が早いことを除けば、改良タイプの注入材とはほぼ同等の物性を有している。

2. 2 アルカリ骨材反応抑制剤含浸方法の検討

亜硝酸リチウム水溶液を表面から塗布含浸させて、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張を抑制する方法は、促進試験の場合のようにコンクリートの膨張速度が大きく、リチウムイオンが拡散してコンクリート内に行き渡らない間に膨張が進行するような場合には、その効果を十分発揮できないことがある。従って、亜硝酸リチウムをできるだけ速やかにコンクリート内に含浸する方法が必要とされるが、本試験では、注入材の注入に先立って、亜硝酸リチウム水溶液のみを注入材用注入口から注入し、その後注入材を注入する方法について検討を行った。ひびわれからの注入は、コンクリート内部まで直接リチウムイオンを供給できるが、ひびわれが必ずしも対象となるコンクリート全体を処理するのに適した場所にあるとは限らないため、実験では効果的にコンクリート内に亜硝酸リチウム水溶液を含浸する方法として、コンクリートにドリルで所定の深さに穿孔し、加圧注入する方法について検討した。

(1) 使用材料

亜硝酸リチウム水溶液は、浸透性を阻害しない範囲で高濃度化したものとして、40%水溶液を使用した。注入器具は、5kgf/cm²程度まで圧力を加えられる高炉スラグ微粉末注入材用注入器具と圧力は1kgf/cm²程度と低い長時間圧力をかけられる低圧注入用器具を用いた。以下、一般的な注入器具を用いた注入方法を一般注入、低圧注入用器具を用いた注入方法を低圧注入とする。

(2) 試験用供試体

試験に用いたコンクリートの配合と物性を表3に示す。供試体は、10×10×40cmに成形し打設2日後脱型、26日水中養生した後、40℃と80℃の恒温槽内で48時間乾燥し、飽水状態のコンクリート重量の1.5, 4.5%の水分を蒸発乾燥させた。次に、打込み面の中央に8cm間隔で、φ4.8×50mmの孔を空け、注入用供試体とした。

(3) 浸透域の確認方法

注入終了後48時間を経過してから、孔の位置を通るように打込み面と底面に△状の鋼材を挟み上下から加圧して試験体を割裂した。この割裂面に、亜硝酸イオンの呈色液を吹付け着色した部分を測定した。この呈色液は、亜硝酸イオン0.1%以上で明らかな着色が見られる。

(4) 試験結果と考察

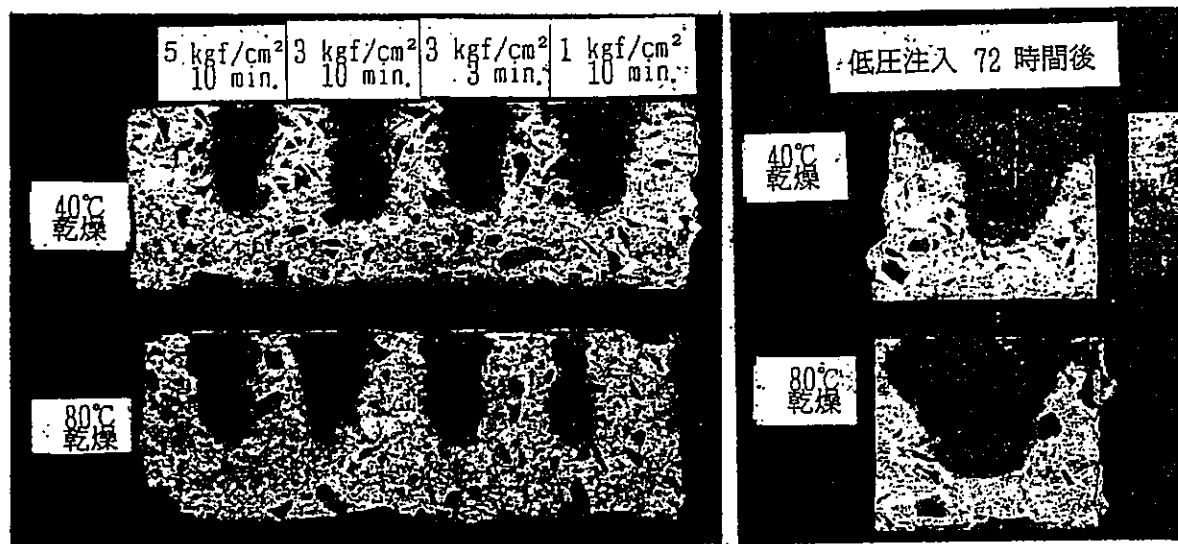
試験結果を表4、写真1に示す。一般注入は、実験した範囲内では経過時間による液の含浸が認められなかった。呈色液が着色した部分は、孔の中に充填された液が徐々に浸透したものと考えられる。低圧注入方法は、含浸量も多く、浸透域を拡大する上で効果的であった。注入時間を長く設定したことが、有効に働いたものと思われる。この方法によれば、コンクリートの品質にも影響されるが、注入口(ひびわれ)の周囲20~50mmまで、亜硝酸リチウムを浸透させることが可能である。

表-3 注入試験用コンクリートの配合と物性

W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単位量 (kg/m ³)				28日強度 kgf/cm ²
				W	C	S	G	
53	39	3.5	7.5	160	302	775	1210	308

表-4 注入試験結果

注入 方法	圧力 — 時間 kgf/cm ² -min. (hrs.)	40℃乾燥試験体			80℃乾燥 試験体		
		含浸量 g	浸透幅 mm	浸透深さ mm	含浸量 g	浸透幅 mm	浸透深さ mm
一般	1 - 10	1.2	35	65	1.2	25	55
	3 - 3	1.2	35	60	1.2	30	55
	3 - 10	1.2	30	65	1.2	35	55
	5 - 10	1.2	35	60	1.2	30	55
低圧	1 - (72)	32	40~100	65	28	40~100	75

写真-1 一般注入によるLiNO₂の含浸状態写真-2 低圧注入によるLiNO₂の含浸状態

今回の試験では、コンクリートの含水率の違いが亜硝酸リチウムの浸透に与える影響については、明瞭に差が表れなかった。含水率の高い試験体では、含浸部と非含浸部の境界が滲んでいることから、コンクリート内の孔隙水に亜硝酸リチウムが溶け込む形で浸透が進んでいるものと考えられる。

2. 3 アルカリ骨材反応抑制効果確認試験

本試験は、アルカリ骨材反応により被害を受けたコンクリート構造物の補修として、穿孔し亜硝酸リチウム水溶液の低圧注入、高炉スラグ微粉末を主材とした改良タイプの注入材の注入という補修方法の有効性を確認するために、コンクリートバー供試体を用いて試験を行ったものである。

(1) 試験用供試体

試験用供試体の配合を表6に示す。反応性粗骨材として豊島産輝石安山岩碎石を、非反応性粗骨材として大井川産骨材を使用して、ベシマムとなるようにその比率を定めた。細骨材には、大井川産の非反応性細骨材を使用した。供試体の大きさは、10×10×40cmとし、打設後、2週間湿空養生し、1.5年室内に放置した。この時点においてひびわれは観察されなかったため、更に40℃の湿空条件下で1カ月プレ促進膨張を行い試験用供試体とした。

(2) 補修方法

供試体への穿孔数は、4、8、16とし、打込み時の上面より底面に向かって $\phi 4.8 \times 80\text{mm}$ の孔を設けた。この孔を通じて亜硝酸リチウム水溶液を48時間低圧注入し、その後改良タイプの注入材を注入した。穿孔状態を図2に示す。比較として穿孔数8個のものについて、無注入、注入材の注入のみの供試体を用意した。また、亜硝酸リチウム水溶液を表面から塗布した供試体についても試験を実施した。

(3) アルカリ骨材反応促進試験

促進膨張試験は、供試体を注入材注入後2週間室内で養生した後、JCI AAR-3「コンクリートのアルカリシリカ反応性試験方法(案)」に示される方法に従って実施した。

(4) 試験結果

亜硝酸リチウム水溶液の含浸量を表6に示す。穿孔数と含浸量に比例関係が認められないのは、供試体にひびわれが生じていたため、ひびわれを通じて液が含浸したためと考えられる。含浸状態を図3に示す。これは、亜硝酸リチウム水溶液の注入終了後モニター用供試体を注入口を通るように割裂し呈色液を吹きつけ、亜硝酸リチウムの含浸状態を観察したものである。注入口を中心として周囲に数十mm抑制剤が含浸していることが認められた。図4に促進膨張試験の結果を示す。プレ促進膨張を行った4週間に、平均0.17%と大きな膨張を示し、最大0.2mm程度のひびわれが入った。これは、供試体を室内に保管していた間(1.5年)にアルカリ骨材反応が穏やかに進み吸水膨張し易いゲルが生成し、湿潤下で膨張し易い状態になっていたものと推定される。その後の促進養生に於いて無処理の供試体では、28週で膨張率が0.35%に達した。穿孔しただけの供試体、注入材を注入処理したのみの供試体の膨張率は無処理の供試体に比べて10~20%程度小さくなっている。これは穿孔したことによる膨張圧の散逸、注入材の物理的抵抗等の影響が考え

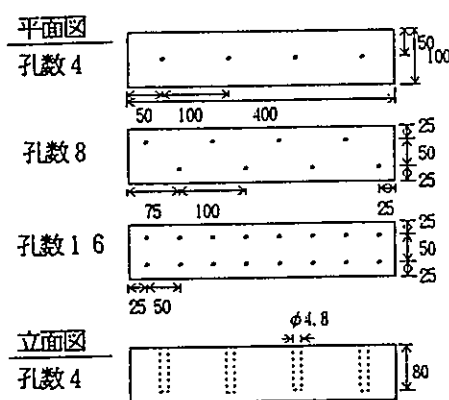


図-2 供試体の穿孔状態

表-5 促進膨張試験用供試体の配合

W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G		アルカリ* (as R ₂ O)
							非反	反応	
55	47	4±1	8±1	193	350	807	375	531	8.0

* NaCl, 11.8kg/m³ 添加

表-6 亜硝酸リチウム水溶液の含浸

処 理 内 容	含浸量 g/本	Na/Li モル比
LiNO ₂ 低圧注入 孔数 4	115.7	0.84
LiNO ₂ 低圧注入 孔数 8	129.3	0.94
LiNO ₂ 低圧注入 孔数16	168.5	1.22
LiNO ₂ 塗布	133.0	0.97

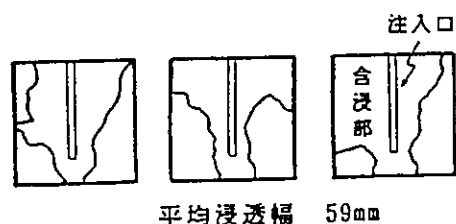


図3 亜硝酸リチウムの含浸状態

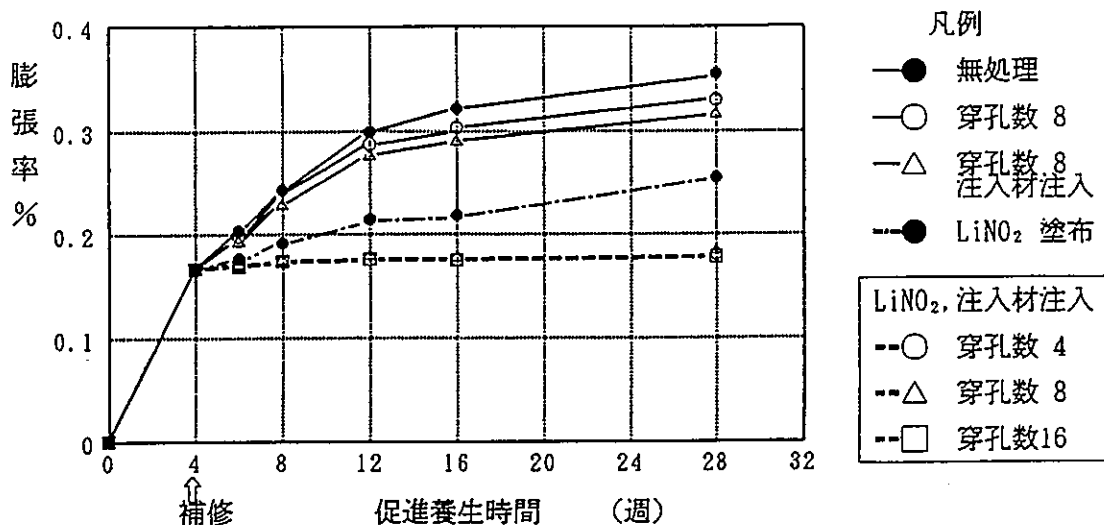


図-4 アルカリ骨材反応膨張抑制効果

られる。亜硝酸リチウム水溶液の注入後注入材を注入処理した供試体では、穿孔数にかかわらず膨張は殆ど認められなかった。これは、含浸量に穿孔数に応じた差が見られなかったように、ひびわれを通じてリチウムイオンが供試体全体に含浸したためと考えられる。一方、亜硝酸リチウム水溶液を表面から塗布した供試体の膨張率は、無処理の1/3～1/2であった。亜硝酸リチウム水溶液の含浸量は、低圧注入処理した供試体と大差なかったことから、塗布したリチウムイオンが供試体表面から、内部までまだ十分拡散浸透していなかったことによるものと思われる。既往の文献において内添の場合ではLi/Na モル比0.5程度で十分な膨張抑制効果が認められるのに対して、補修の場合にはそのモル比が1.5以上でないと効果が認められなかったことが報告されている[1],[2]。これは、補修が表面からの塗布で行われているためリチウムイオンの拡散と膨張速度との間にタイムラグが生じたためと思われる、今回の試験では孔隙を通じての低圧注入という方法を採用したために、内添に近いモル比で十分な効果が認められたものと推定される。

3. まとめ

改良された高炉スラグ微粉末を主材とする無機質注入材は、従来からある注入材に比べて収縮が小さく、高い接着力を有していることが認められた。無機質注入材への亜硝酸リチウムの添加は、3%以内であれば低温時を除いて注入性を損なわず、初期の強度を高める効果がある。

亜硝酸リチウムをコンクリート内に含浸させる方法として、穿孔した注入口から低圧注入する方法が効果的であり、アルカリ骨材反応促進膨張試験の結果、適当な間隔で穿孔した注入口から亜硝酸リチウムを低圧注入により含浸させ、ついでその注入口から、無機質注入材を注入する方法の有効性が確認された。

なお、本論文は(財)鉄道総合技術研究所、新日本製鐵㈱、新日鐵化学㈱、太平工業㈱、日産化学工業㈱の共同研究の成果をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 中村裕二ほか：リチウム化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制効果、日本建築学会大会学術講演梗概集、A、pp 555～556、1991.9
- 2) 北川明雄ほか：亜硝酸リチウムの含浸によるコンクリートのアルカリ骨材反応膨張抑制効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp 117～122、1989