

エトリングタイトの遅延生成 (DEF) による コンクリート製品の劣化に関する報告

藤兼雅和* 中原浩慈** 仲村哲男***

1. はじめに

平成20年4月、山梨県南都留郡山中湖村地先の国道138号において、歩道と車道の境に設置しているコンクリート二次製品（以下「側溝」）の上面が劣化しているのが発見された（写真-1,2）。この側溝は、平成17年3月に設置し、設置後3年の経過で、寒冷地において想定される通常の劣化よりも進行が早い部分があり、その原因について調査を実施したものである。



写真-1 現地状況



写真-2 劣化状況

2. 劣化の状況

山中湖村山中地先において平成17年3月に側溝を設置した区間は2箇所あり、設置した側溝製品は同じ工場で同時期に製作されたものである。劣化の程度を状態により「劣化小」、「劣化中」、「劣化大」の3つに区分し、規模を表-1に示す。

表-1 劣化の規模

劣化分類	状態	A工事	B工事	合計	率(%)
劣化小	上部表面にスケールリングが認められるが、ひび割れは発生していない。	48基	59基	107基	48
劣化中	上部表面にスケールリング、ひび割れが認められる。主に製品端部に剥離が見られる。	36基	32基	68基	31
劣化大	上部の全体に剥離、剥落が認められる。	11基	36基	47基	21
合計		95基	127基	222基	100

3. 周辺の環境

側溝の劣化が発生した箇所の標高は約990mあり、付近の12月上旬から2月下旬の平均気温は-3.2℃~1.7℃、最低気温は-15℃くらいまで下がることもある。積雪時には路面凍結防止のため塩化ナトリウムを散布しており、冬期では塩分を含む雪が常に路肩部に堆積している状況になることが多い。

4. コンクリート二次製品（側溝）

劣化が発生した側溝の概要は以下のとおりである。

①示方配合：コンクリートの示方配合を表-2に示す。

表-2 示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	設計基準強度 (N/mm ²)	配合強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)				
							セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
20	30.0	39.0	15.0±2.5	4.5±1.5	44.5	39.4	373	166	694	1074	4.05

A report about the deterioration of the concrete product by Delayed Ettringite Formation (DEF) .

②使用材料

コンクリートの使用材料を以下に示す。

- ・セメント：普通ポルトランドセメント
- ・細骨材：砕砂（大月市初狩町産 安山岩）
- ・粗骨材：碎石2005（大月市初狩町産 安山岩）
- ・混和剤：AE減水剤 標準型（I種）
- ・鉄筋：主筋D10、配力筋D6

③側溝の形状

形状を図-1に示す。

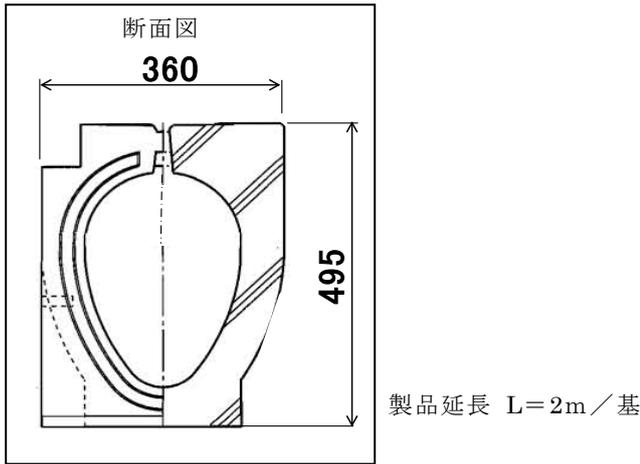


図-1 側溝形状

④養生方法

養生は養生槽において蒸気養生を実施している。養生方法のイメージを図-2に示す。製作時は型枠を5台セットしていた。蒸気パイプは側面下と奥下の3方向に設置されており、吹き出し口から蒸気が噴出する仕組みであった。温度は奥の底面から40cm～50cmの位置に温度センサーを取り付けて管理している。

型枠5台のうち、最奥下段の製品は全体的に蒸気噴出口に近く温度が高くなった可能性が高い。更に、下段のブロックの両端部も高温の蒸気を直接受ける位置にあり、表-1の「劣化中」で製品端部に剥離が見られる位置と一致する。

5. 原因調査

劣化の原因について、側溝製品の設置箇所が寒冷地であり、冬期に凍結防止剤を散布していることから、凍結融解、鉄筋腐食による劣化の可能性

を調査することに加え、劣化している製品の割裂破片に白い結晶物が見られ、製造時に蒸気養生を行っていることから、最近欧米で問題になっているエトリンタイトの遅延生成（DEF：Delayed Ettringite Formation）についても調査を行った。

調査は、劣化小と劣化中の側溝からコアを採取し、以下の項目の調査を実施した。

- ・側溝外観観察：目視観察
- ・鉄筋探査：鉄筋かぶり（電磁波法）
- ・コアの外観観察：目視観察（劣化小、劣化中箇所から採取）
- ・圧縮強度：JIS A 1107
- ・中性化深さ測定：JIS A 1152
- ・塩分含有量：JIS A 1154
- ・配合分析：単位セメント量、単位骨材量を推定
- ・SEM・EDS分析：走査型電子顕微鏡（SEM）による割裂面の形態観察、エネルギー分散型X線分析（EDS）による組成分析

6. 調査結果

6.1 側溝外観観察

外観観察の結果、以下の劣化現象が認められた。劣化の分類と数量の関係は表-1のとおりであった。

劣化小：軽微なスケーリングが天端全体に認められ、ひび割れは認められない。

劣化中：スケーリング、微細ひび割れ、剥離が認められる。特にブロック端部で剥離が認められる。

劣化大：剥離、剥落が認められる。

6.2 鉄筋探査

主筋、配力筋のかぶり、間隔をレーダにより測定した結果を表-3に示す。ほぼ設計どおりの配筋がなされている。

表-3 鉄筋探査結果

	主筋		配力筋	
	かぶり (mm)	間隔 (mm)	かぶり (mm)	間隔 (mm)
設計値	20	220	30	115
測定値	18～30	210～235	24～39	90～100

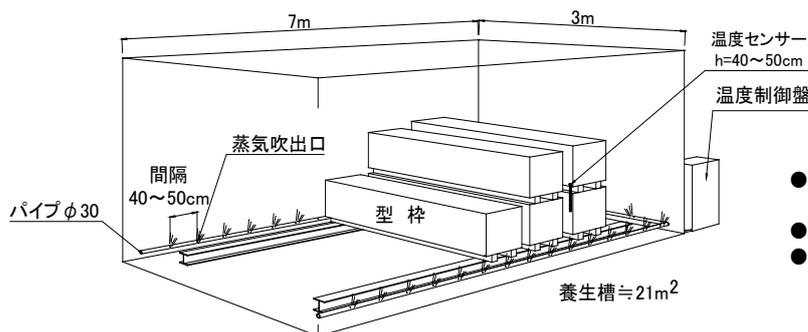


図-2 養生方法

- 蒸気導入は打設後2時間以上経過してからおこなう
- 蒸気温度は20℃/h以内とする
- 養生槽内の温度は60±5℃とする

6.3 コアの外観観察

劣化小の箇所から採取したコアには、ひび割れ等の変状が認められなかった。劣化中の箇所から採取したコアには、かぶりコンクリートに水平方向を主体とした微細ひび割れが認められ、鉄筋より内部にかけて斜めひび割れの発生が認められた。また、鉄筋位置からのひび割れの発生は認められなかった。

崩壊したコアでは、水平方向のひび割れがコア断面に連続的に発生していたと推察する。また、崩壊したコアに含まれていた切断鉄筋には腐食が認められなかった。

6.4 圧縮強度

コアの圧縮強度の結果は表-4のとおりであった。劣化小がやや低い傾向にあるが、いずれも設計基準強度 30N/mm^2 及び配合強度 39N/mm^2 を上回っている。

表-4 コアの圧縮強度の結果

設計基準強度 (N/mm^2)	配合強度 (N/mm^2)	劣化の程度	コアの圧縮強度 (N/mm^2)	
			本数 (本)	強度の 平均値
30	39	小	3	58.0
		中	3	64.5

6.5 中性化深さ

中性化深さは、劣化小、劣化中ともに 0mm であり、中性化の進行が認められなかった。中性化が鉄筋の腐食に及ぼす影響はないと判断される。

6.6 塩分含有量

側溝天端コンクリートの全塩化物イオン量は、図-3に示すとおり分析位置 $0\sim 70\text{mm}$ において $5.70\sim 0.65\text{kg/m}^3$ の範囲であった。塩化物の濃度が表面から内部にかけて減少しており、冬期において道路に散布された凍結防止剤（塩化ナトリウム）が浸透したものと判断できる。

また、主筋、配力筋位置での塩化物イオン量は、土木学会コンクリート示方書で示されている鉄筋の腐食限界塩化物イオン量 1.2kg/m^3 を上回っているが、主筋の腐食によるひび割れは認められなかった。

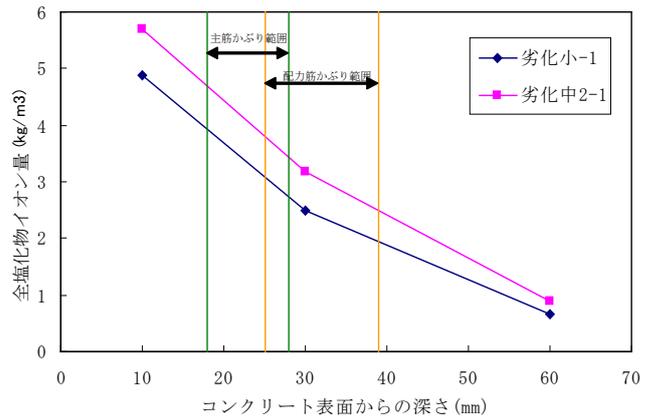


図-3 全塩化物イオン量

6.7 配合分析

配合分析の結果は表-5のとおりであった。示方配合と比べ多少バラツキがあるものの、損傷程度に影響するほどではなかったと推察する。

6.8 SEM・EDS分析

走査型電子顕微鏡（SEM）による割裂面の形態観察、エネルギー分散型X線分析（EDS）による組成分析を行った。SEM観察結果から、観察位置（表面からの深さ）に関係なく、セメントペースト割裂面、粗骨材界面のセメントペースト等に針状結晶が観察された（写真-3）。観察された針状結晶は、成分の分子量から「エトリンガイト」と判断される。これらのエトリンガイトは水和初期のエトリンガイトが分解された後、再（遅延）生成されたエトリンガイト（DEF）と考えられ、セメントペーストの割裂面、崩壊面、粗骨材界面およびマイクロクラックに生成されていることから膨張性を有するエトリンガイトと考えられる。

7. 劣化原因の推定

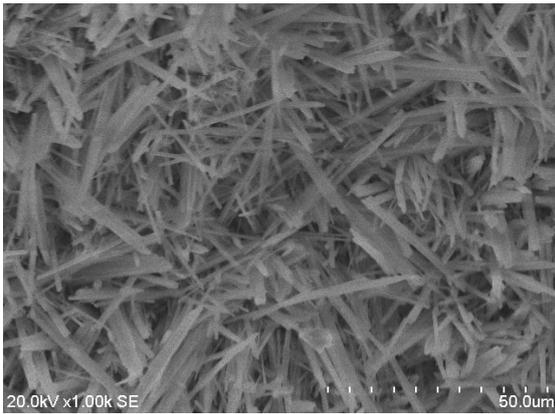
調査の結果、以下の原因が推定される。

側溝のひび割れは、その発生形態からコンクリートの乾燥収縮、中性化や塩化物による鉄筋腐食に起因したものではなく、初期のエトリンガイトが分解された後に再生成されたエトリンガイト（DEF）による膨張の可能性が高い。

表-5 配合分析の結果

施工箇所	劣化区分	コア記号	表乾単位 容積質量 (kg/m^3)	絶乾単位 容積質量 (kg/m^3)	吸水率 (%)	配合推定結果		備考
						セメント量 (kg/m^3)	骨材量 (kg/m^3)	
	劣化小	劣化小-3	2450	2311	6.0	340	1913	—
	劣化中 (箇所2)	劣化中2-3	2456	2327	5.5	389	1905	—
示方配合			—	—	—	373	細骨材694 粗骨材1074 合計1768	単位水量 166

劣化小



劣化中

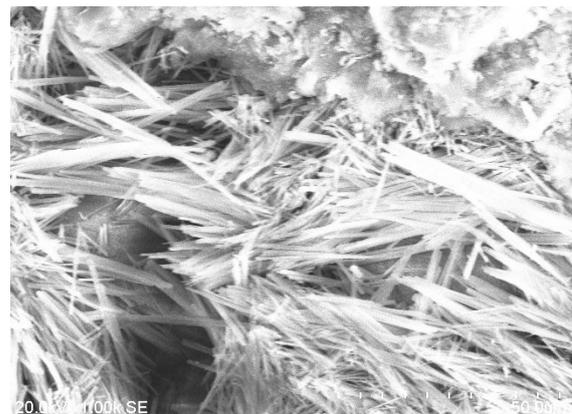


写真-3 割裂面で観察された針状の結晶 (1,000倍)

文献調査 (コンクリート工Vol.44, No.7, 2006) によると、DEFによる膨張を起こす要因は、養生条件、配合条件等数多くあり、その影響が未だ不明瞭なものもあるが、その発生においてコンクリート製品の養生が約70~90℃以上と高温であること、及びその後の湿潤環境への暴露が必要条件であるという点ではほとんどの報告が一致している。本側溝製品については、蒸気養生時に表面が全体的に蒸気の噴き出し部分に近かった(蒸気温度が高かった)製品は全体の20%であり、劣化が著しかった製品の比率がほぼ一致していた(表-1)。更に、「劣化中」で剥離が見られたブロック端部についても、蒸気の噴き出し口の位置と対応するものであった。

ひび割れの発生は、コンクリート内部への水の浸透を容易にし、冬期において凍結融解作用により、さらにひび割れは進展したと推察される。また、コンクリート内部に浸透した凍結防止剤による塩化物を含んだ水は、その飽和度を高め、浸透圧と水圧を大きくしてスケーリングの発生を助長したことも十分に考えられる。

8. まとめ

国道138号山中湖村地先で発生したコンクリート二次製品の劣化は、今回の調査により製作時に蒸気養生された製品が寒冷地の湿潤環境に暴露され、エトリンタイトの遅延生成(DEF)により

発生した膨張ひび割れに、凍結防止剤による塩化物を含んだ水が浸透し、凍結融解作用を起こして発生した複合的な劣化の可能性が高いことが判った。

DEFによる劣化現象は、ヨーロッパを中心に海外では広く知られているが、国内での報告はほとんど無く、想定し得なかったものとする。

今後、本報告がエトリンタイトの遅延生成(DEF)による劣化の防止に向けた研究推進のきっかけになれば幸いである。

末筆ながら、今回の調査を実施するにあたり、ご助言をいただいた土木研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チームの森濱総括主任研究員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平尾 宙：硫酸劣化事例—エトリンタイトの遅延生成(DEF)に関する研究—、文献調査委員会コンクリート工学、vol.44、No.7、2006。

藤兼雅和*



国土交通省河川局砂防部
保全課 総合土砂企画官
(前 甲府河川国道事務所
所長)
Masakazu FUJIKANE

中原浩慈**



国土交通省関東地方整備局
企画部技術調査課 課長補
佐(前 甲府河川国道事務
所 交通対策課長)
Kouji NAKAHARA

仲村哲男***



国土交通省関東地方整備局
甲府河川国道事務所 交通
対策課長
Tetsuo NAKAMURA