

論文 早期交通開放を目指した舗装用コンクリートの開発および LCC/LCA の評価

長川 善彦^{*1}・増山 直樹^{*2}・岡本 享久^{*3}・須藤 裕司^{*4}

要旨：コンクリート舗装では長期養生が必要となることから、普及への最大の弊害となっている。そこで、早期強度を得つつ、良好な作業時間を確保できる混和剤の開発を行なった。そこで総経セメントを使用し、亜硝酸カルシウム、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤とメラミン系高性能減水剤を併用することで、作業性・強度発現性をともに確保できることが明らかとなった。また、本研究で開発を行ったコンクリートを使用した舗装とアスファルト舗装などについて LCC および LCA について検討したところ、本研究により開発を行った舗装がコンクリート舗装と比較し安価で、CO₂ 排出量も低減できるという結果が得られた。

キーワード：コンクリート舗装、早期強度、可使時間、硬化促進剤、減水剤、早強ポルトランドセメント

1. はじめに

コンクリートの早期強度発現を必要とする場合の一例として、コンクリート舗装が挙げられる。コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べて耐久性に優れ、日本でも一部の地域では交差点などに採用されているが、舗装道路全体の約 5% しかないのが現状である。その原因として、コンクリート舗装は、交通開放可能となる強度に達するまでに 24 時間以上の時間を必要であり、長期養生が必要となる。これがコンクリート舗装普及の最大の弊害となっている。また、超速硬セメントのように数時間で目標強度を得られるものもあるが、コストが非常に高くなるのが難点である。よって、比較的安価で、早期強度を得られるコンクリートの開発が求められている。

そこで本研究では、硬化促進剤(亜硝酸カルシウム 30% 水溶液。以下、CN30 と表記)を使用し、より早期に目標強度を得ることのできる新型コンクリート用硬化促進剤の開発を行った。これまでの研究¹⁾により、W/C=40%、普通ポルトランドセメント(以下、普通セメントと表記)を使用し、CN30・ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(以下、Pc 減水剤と表記)・メラミン系高性能減水剤(以下、Me 減水剤と表記)を併用することによって、30 分程度の可使時間と、練混ぜ後 12 時間において交通開放の目標値と設定した曲げ強度 3.2N/mm² に近い値を得ることができた。

本研究では、目標曲げ強度を満足するために、早強ポルトランドセメント(以下、早強セメントと表記)を使用し、実験的検討を行った。LCC(ライフサイクルコスト)および LCA(ライフサイクルアセスメント)を計算し、コストおよび CO₂ 排出量の算出も行った。

2. 本研究の目標値および測定項目

早期交通開放を目指すため、「目標スランプ 10.0±1.0cm、モルタルにおいては、目標モルタルフロー 200±10mm、可使時間として 1 時間程度固まらない時間を確保(コンクリートでは 2cm 以上、モルタルでは 150mm 以上)し、強度についてはモルタル・コンクリートにおいて練混ぜ後 12 時間で設計曲げ強度(曲げ強さ) 4.5N/mm² の 70%として 3.2N/mm² 以上」を目標値とした。

測定項目については、モルタルフローおよびスランプの経時的变化の計測、練混ぜ後 12 時間、24 時間、7 日(モルタルのみ)、28 日(モルタルのみ)の強さ・強度測定を行った。さらに、モルタルによる乾燥収縮および質量減少率の測定を行い、硬化促進剤が長さ変化に及ぼす影響を明らかにした。

LCC および LCA については、アスファルト舗装、普通コンクリート舗装、転圧コンクリート舗装、本研究により開発を行ったコンクリートを補修に使用した転圧コンクリート舗装の 4 種類について検討を行った。

3. 強度およびフレッシュ性状の確認

3.1 モルタル試験

(1) 試験概要

普通セメント・早強セメントを使用したモルタルにおいて、硬化促進剤として CN30 を用い、Pc 減水剤および Me 減水剤を併用した場合のモルタルフロー経時変化、モルタル強さの測定を行った。

強さ測定用供試体の作製方法は、JIS R 5201 に従って作製した。モルタルを型枠に打込んだ後、恒温恒湿室(20±1℃, RH=90%)で養生し、練混ぜ水投入後 12 時間、

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部環境システム工学科

*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博 (正会員)

*4 日産化学工業株式会社 化学品事業本部 機能材料事業部 博士(工学) (正会員)

24 時間，7 日（早強セメントのみ），28 日（早強セメントのみ）のモルタル曲げ強さおよび圧縮強さの測定を行った。供試体寸法は $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ とした。

モルタルフロー経時変化は，目標フローを $200 \pm 10\text{mm}$ とし，練混ぜ直後，30 分後，60 分後にモルタルフローの測定を行った。練りあがったモルタルは恒温恒湿室（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ， $\text{RH}=90\%$ ）に保管し，測定する直前に練り返してモルタルフローの測定を行なった。

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通セメント（密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ）および早強セメント（密度： $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ ）を使用した。細骨材には，砕砂（密度： $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ ）を用いた。減水剤は P_c 減水剤・ Me 減水剤を併せて用いた。また，すべての材料を 24 時間以上 20°C の環境下で保管し，材料温度を一定として実験を行った。

配合は表—1 のとおりである。著者らの研究¹⁾より， $W/C=40\%$ 前後， $CN30$ の添加量を 10% 程度とすることにより目標強度が得られることが分かっているため， $W/C=40\%$ ， $CN30$ の添加量を 0, 7.5, 10.0 ($C \times \%$) とした。また， $CN30$ の亜硝酸塩分 30% は細骨材と置換し，内割として配合した。二種類の減水剤の添加量は，練混ぜ直後のモルタルフロー $200 \pm 10\text{mm}$ ，60 分経過時でもモルタルフローを 150mm 以上確保できる量を，試験練りを行い決定した。

(3) 試験結果

図—1 にモルタルフロー経時変化を，図—2，図—3 にモルタル強さ試験結果を示す。

モルタルフローの経時変化はどれもほぼ同等という結果となった。しかし，同等のフローを得るためには $CN30$ の添加量の増加に伴い， P_c 減水剤および Me 減水剤の添加量を増加させなければならない。また，普通セメントを使用した場合よりも，早強セメントを使用した場合のほうが両減水剤の添加量を増加させなければならないという傾向が得られた。

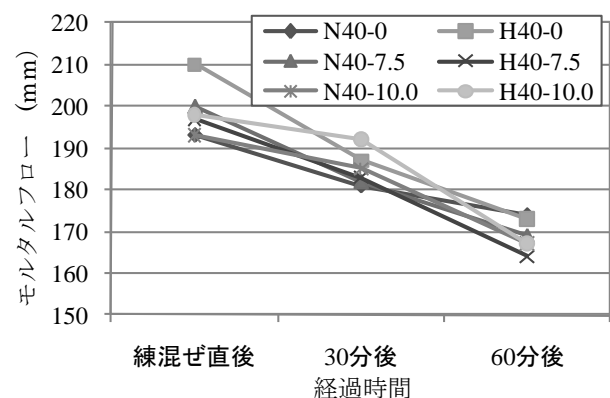
モルタル強さについては，図—2 および図—3 のとおりである。目標値を満足したものは早強セメントを使用し， $CN30$ を添加した 2 種類の試験体である。 $CN30$ の添加に着目すると，特に早強セメントへ使用した場合，12 時間強さでは $CN30$ の添加による強さの差が顕著に現れるが，24 時間強さでは $CN30$ の添加に関わらず同等の結果が得られた。また，7 日および 28 日モルタル強さは，曲げ・圧縮強さに $CN30$ 添加による影響はほぼないという結果となった。 $CN30$ の硬化促進効果は 24 時間以内の硬化にのみ影響を及ぼしている事がわかる。

以上より，早強セメントを使用し $CN30$ 添加量を 7.5% 程度使用することで，流動性および強さの目標を確保する事ができた。

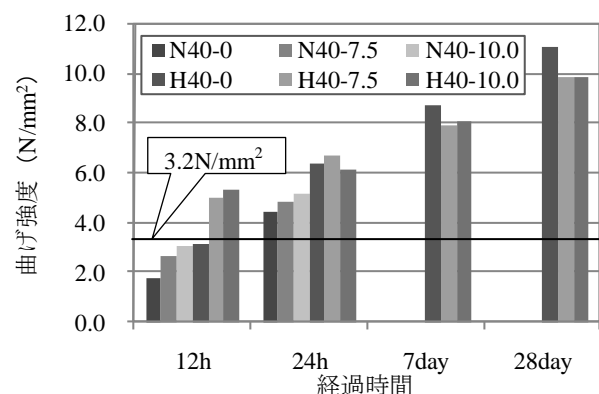
表—1 モルタル配合表

配合名*	%	kg/m^3			$C \times \%$		
	W/C	W	C	S	CN30	P_c	Me
N40-0	40	257	644	1350	0	0.0	0.6
N40-7.5					7.5	0.6	1.1
N40-10.0					10.0	0.8	1.5
H40-0		257	643	1348	0	0.0	0.8
H40-7.5					7.5	0.7	1.4
H40-10.0					10.0	1.0	1.8

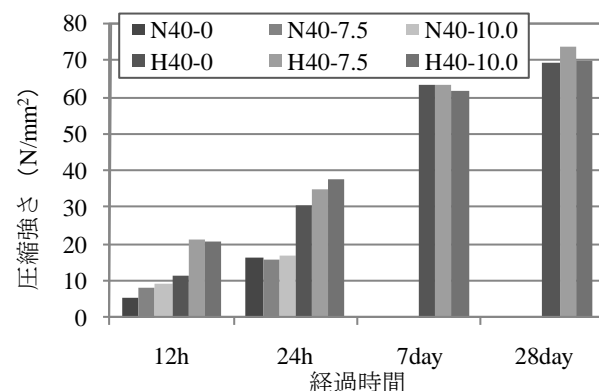
*配合名は[使用セメント(N:普通, H:早強)]-[$CN30$ 添加量]とする



図—1 モルタルフロー経時変化



図—2 モルタル曲げ強さ



図—3 モルタル圧縮強さ

3.2 コンクリート試験

(1) 試験概要

3.1 節に述べたとおり、早強セメントを使用し、W/C=40%、CN30 添加量 7.5%とすることにより、初期モルタルフローおよび 1 時間程度の可使時間および目標強度を確保することができた。そこで、コンクリートにより普通セメントと早強セメントを使用し、曲げ・圧縮強度およびスランブ試験を行った。供試体寸法は、曲げ供試体 10×10×40cm、圧縮試験体 φ10×20cm とした。

(2) 使用材料および配合

表—2 に使用材料を示す。セメント、細骨材、硬化促進剤および減水剤は 3.1 で使用したものと同様である。粗骨材については碎石（密度：2.66g/cm³）を使用した。

配合については表—3 のとおりである。普通セメントと早強セメントを使用した場合を比較するため、両セメントを使用した。また、3.1 より CN30 添加量を普通セメントの場合は 0%および 10%とし、早強セメントの場合は 0%および 7.5%とした。また、CN30 を添加していない普通セメントを使用した配合を基本配合とし、スランブ値 10±1.0cm を目標として減水剤添加量を決定した。しかし、それ以外の配合では減水剤のみで目標のスランブ値を得ることが困難であったため、単位水量を補正して配合を行った。粗骨材は 1150kg/m³で一定とした。

(3) 試験結果

表—4 に練混ぜ直後、30 分後、60 分後のスランブ値を、図—4 に曲げ・圧縮強度の測定結果を示す。
スランブ値については、2 種類の減水剤を併用した方が、若干スランブロスにくい傾向が得られた。

表—4 スランブ値

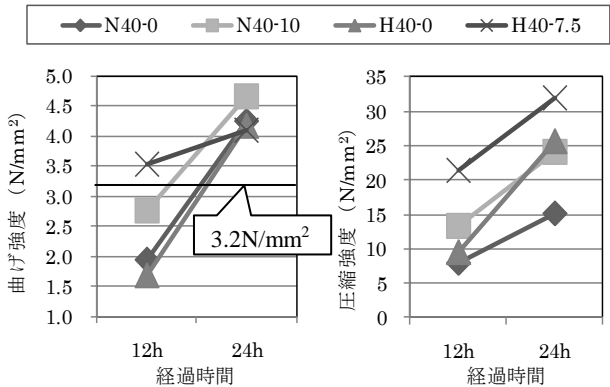
配合名	スランブ値 (cm)		
	練混ぜ直後	30 分後	60 分後
N-0	10.5	1.5	0.0
N-10	11.0	4.5	1.5
H-0	9.0	3.0	1.0
H-7.5	10.0	5.0	2.5

強度については、12 時間において目標曲げ強度 3.2N/mm² 以上を得ることができた配合は、H-7.5 のみであった。また、3.1 と同様 24 時間強度では、曲げ強度ではほぼ差はなかったものの、圧縮強度は、N-0 は 15N/mm² 程度であるのに対し、H-7.5 では 30N/mm² 以上と、2 倍以上の圧縮強度を得ることができた。

以上より、早強セメントを使用し、CN30 添加量を 7.5% 程度とすることにより、スランブ保持、強度面において目標値を得ることができた。

表—2 使用材料

材料	主な特性
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³ 早強ポルトランドセメント 密度：3.14g/cm ³
細骨材 (S)	砕砂，表乾密度：2.64g/cm ³
粗骨材 (G)	碎石，表乾密度：2.66g/cm ³
硬化促進剤 (CN30)	密度：1.26～1.33g/cm ³
高性能 AE 減水剤 (Pc)	主成分：ポリカルボン酸 エーテル系化合物
高性能減水剤 (Me)	主成分：メラミンスルホン酸



図—4 曲げおよび圧縮強度

表—3 コンクリート配合表

配合名	%		単位量 (kg/m ³)							
	W/C	s/a	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		CN30	Pc	Me
						5-13 (mm)	13-20 (mm)			
N40-0	40	38.8	150	375	722	575	575	0.0	4.2	0.0
N40-10		37.1	160	400	671	575	575	40.0	8.1	6.0
H40-0		37.1	160	400	673	575	575	0.0	3.0	0.0
H40-7.5		37.1	160	400	673	575	575	30.0	7.0	4.8

4. 乾燥収縮および質量減少率測定

4.1 試験概要

3章では、2.1に示した目標値を満足することができた。しかし、初期強度向上のために硬化促進剤を多量に添加したことにより、体積変化に影響をおよぼすことが懸念される。

そこで、モルタルにより、CN30の乾燥収縮および質量減少に及ぼす影響について比較検討を行った。

4.2 使用材料および配合

使用材料および配合については3.1モルタル試験の表—1と同様とした。すなわち、セメントは普通セメント、早強セメントを使用し、CN30添加量を0%、7.5%、10%として配合を行った。

供試体寸法は $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ であり、恒温恒湿室内($20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{RH}90 \pm 5\%$)で作製を行った。そして材齢7日まで水中養生した後、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{RH}60 \pm 5\%$ の環境下で保管し、乾燥収縮ひずみおよび質量変化率の測定を行った。乾燥収縮ひずみの測定は、ダイヤルゲージ法で行った。

4.3 試験結果

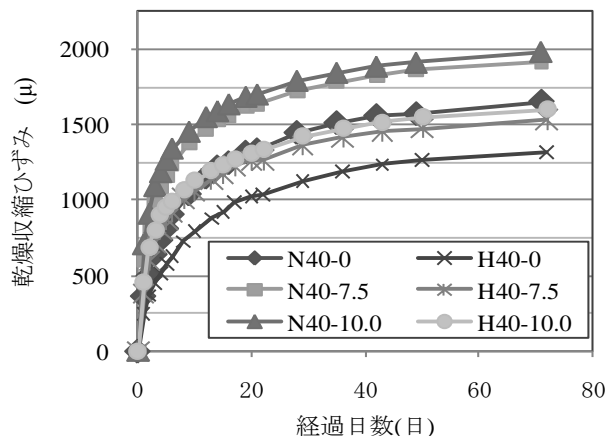
図—5、図—6に乾燥収縮ひずみ測定結果および質量減少率測定結果を示す。

乾燥収縮ひずみ量は、使用したセメントの種類に着目すると、普通セメントを使用した場合よりも早強セメントを使用した方が低減される傾向が得られた。CN30の添加量が同じものと比較して、どれも $300 \sim 400\mu$ 程度、早強セメントを用いた供試体の方が低減されている。CN30の添加に着目すると、両セメントにおいて、CN30の添加量の増加に伴い、乾燥収縮ひずみ量も増加する傾向にある。CN30を添加したものは、添加していないものと比べ、乾燥材齢70日の時点で約 300μ 増加する傾向が見られた。

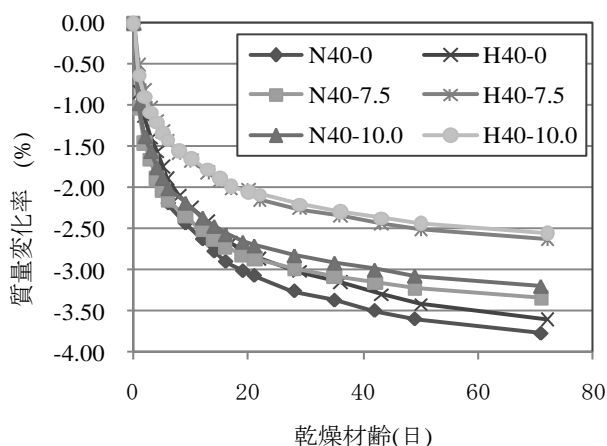
次に質量変化率である。こちらは、早強セメントを使用し、CN30を添加した2種類の供試体が最も質量減少量が抑えられた。この2種類の供試体では乾燥材齢70日の時点で、約2.5%質量が減少したのに対し、その他の供試体では3.2~3.8%減少した。また、CN30を添加していない2種類の供試体の質量減少率が最も高くなった。

図—7は、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を示したグラフである。このグラフよりCN30を添加した4種類の供試体は、ほぼグラフの傾きが同等である。つまり、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係が同じであるが、早強セメントを使用することにより、その進む速さを抑えられると考えられる。

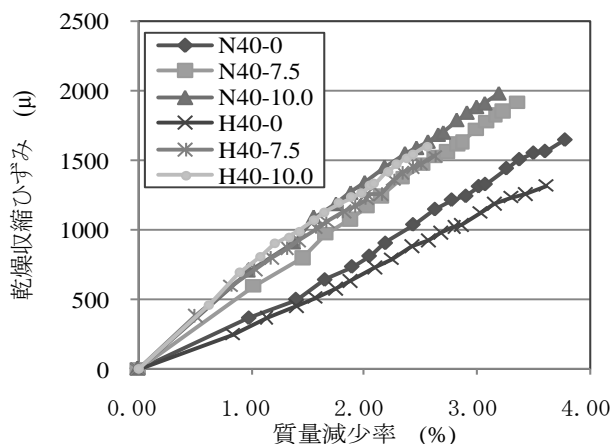
以上より、CN30を添加した場合、普通セメントよりも早強セメントを使用することにより容積変化および質量変化において良好な結果を得ることができると考える。



図—5 乾燥収縮ひずみの経時変化



図—6 乾燥材齢と質量減少率の関係



図—7 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

5.LCC/LCA の検討

5.1 概要

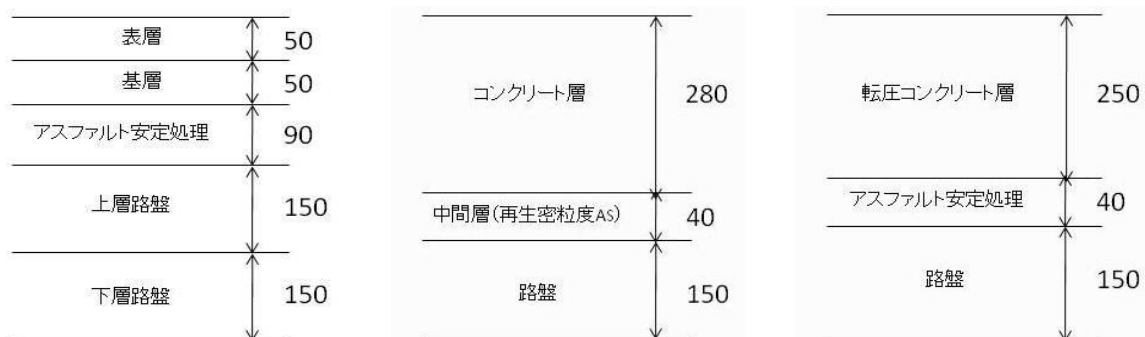
コンクリート舗装が耐久性に優れていることは周知の事実となってきた。つまり、アスファルト舗装に比べ長期供用が可能であると考えられる。そこで、コンクリート舗装とアスファルト舗装の舗設・管理・補修などライフサイクルでのコスト、CO₂排出量を算出し評価することにより、個々の舗装を比較できると考えた。しかし、コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べ、長期養生が必要であり、補修を行った場合、交通開放までにかかなりの時間を要する。そこで、ここでは時間損失についても考慮し計算を行った。また、今回の計算では、補修以外の道路管理などにより発生する費用およびCO₂排出量については考慮しないものとする。

本研究では、施工場所を滋賀県西大津バイパス（国道161号線）の2車線500m（3,780m²）を新設舗装すると想定した。初期施工を通常のアスファルト舗装・普通コンクリート舗装・転圧コンクリート舗装とし、維持補修を考慮してライフサイクル評価を行った。また、LCCおよびLCAの検討範囲は、資源採取から補修までとして比較した。

5.2 LCC/LCA 算定条件

(1) 舗装構造

アスファルト舗装は、排水性アスファルト舗装（以下、As舗装と表記）とした。コンクリート舗装は、普通コンクリート舗装（以下、Con舗装と表記）と転圧コンクリート舗装（以下、RCCPと表記）とした。それぞれの舗装断面は図—8のとおりである。また、各舗装の施工資材や配合、施工方法、施工機械、インベントリデータ²⁾などは、実データを基に設定した。



図—8 舗装断面（左から、アスファルト舗装・コンクリート舗装・転圧コンクリート舗装）

(2) 補修計画

表—5 に各舗装の補修計画を示す。これは滋賀国道事務所の舗装履歴表および舗装技術専門委員会報告³⁾を基に設定した。

補修工法は、アスファルトの場合は、8年毎に切削オーバーレイ工法、24年毎に打換えを行うこととした。コンクリート舗装については、24年毎に路盤を整備し、コンクリート版を打換えることとした。また、RCCPについては、普通セメントを使用したものと、本研究で開発を行ったCN30、Pc減水剤およびMe減水剤の三成分を使用した配合のコンクリート（以下、NAConと表記。NACon: New Admixture Concrete）を適用したものの2種類で算定した。

(3) 時間損失

時間損失については、表—5の工事期間と設定した日数を交通規制するという条件とした。交通規制日数はAs舗装が30日間、Con舗装が100日間、RCCPが85日間、RCCP(NACon使用)を75日間とした。また、交通規制中は、国道と並走している県道を迂回することとした。

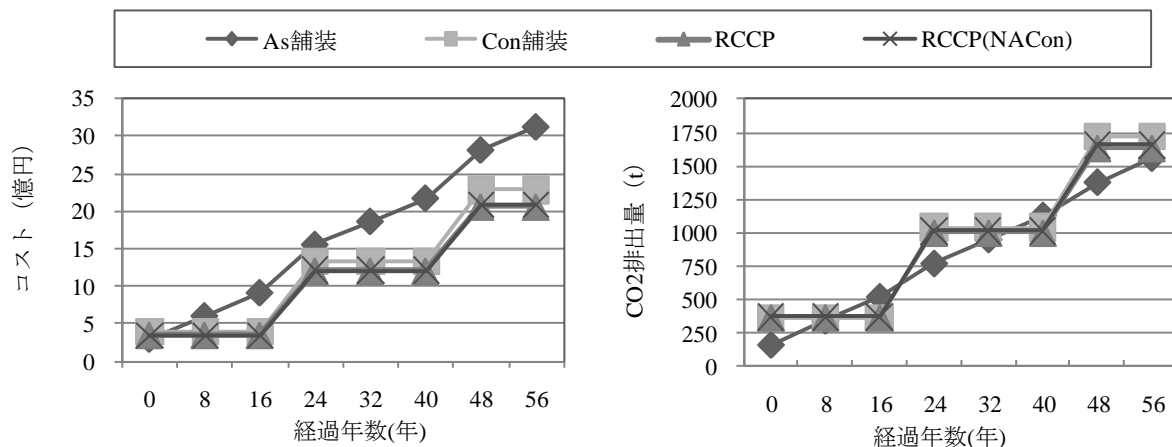
時間損失費用⁴⁾については、路上工事による交通規制の経済的影響のうち大部分を占める、規制待ちによる時間損失費用を算出した。算出方法は、車種別時間損失費用原単位に交通量と規制による超過走行時間、さらに交通規制日数を乗じた値とした。

CO₂排出量も同様に、車種別時間あたりCO₂排出量に交通量と超過走行距離（=400m）、さらに交通規制日数を乗じた値とした。

以上より算定した時間損失費用およびCO₂排出量を、それぞれの舗装で設定した補修時期に工事により発生する費用、CO₂排出量に足し合わせ、LCC/LCAとした。

表—5 維持修繕計画

	As 舗装	Con 舗装	RCCP	
補修工法	切削オーバーレイ および打換え工法	打換え工法 (普通セメント使用)		打換え工法 (NACon 使用)
標準耐用年数	8 年毎にオーバーレイ 24 年毎に打換え	24 年		
工事期間	30 日	100 日	85 日	75 日



図—9 LCC および LCA の算定結果

5.3 LCC および LCA 算定結果

図—9 に LCC および LCA の算定結果を示す。LCC の算定結果より、初期コストは As 舗装が最も安価となるが、一度でも補修が行われると、コンクリート舗装の 3 種類の方がコストを抑えることができた。その中でも RCCP の 2 種類が最も経済的である。LCA の算定結果では、コンクリート舗装 3 種類では、セメントを使用するため初期の CO₂ 排出量が高くなるが、ライフサイクル CO₂ 排出量ではどれもほぼ同じ程度となった。

以上の結果より、ライフサイクル評価により、アスファルト舗装とコンクリート舗装の比較を行うと、コンクリート舗装の方が優位であることが分かった。さらに、コンクリート舗装の中でも Con 舗装よりも RCCP がコストおよび CO₂ 排出量の面で優位となることがわかった。つまり、RCCP とし、NACon を用いることにより工期短縮も図れるため、NACon を使用した RCCP が最も優位であると考えられる。

6.まとめ

CN30、Pc 減水剤、Me 減水剤を使用したモルタル、コンクリートによる各種強度試験、および LCC/LCA の算定より得られた結果を以下にまとめる。

1)硬化促進剤として CN30 を使用し、減水剤に Pc 減水剤、Me 減水剤を使用した場合、早強セメントを使用することにより、目標スランプ、60 分程度の可使時間および材齢 12 時間における目標曲げ強度 3.2N/mm²を満足することができた。その際、CN30 の添加量は 7.5(C×%)程度とすることが最も良いと思われる。

2)CN30 を添加することにより、添加していないものと比べ、乾燥収縮ひずみが増加してしまう。しかし、早強セメントを使用することにより、乾燥収縮ひずみを抑えることが可能である。

3)質量減少率は、CN30 を添加し、早強セメントを使用したものが、最も低下率を抑えることができる。

4)乾燥収縮ひずみと質量減少率との関係は、CN30 を添加したもの 4 種類で比較すると、早強セメントを使用した方が、乾燥収縮ひずみ、質量減少率ともに進む速度を抑えることができる。

5)LCC および LCA は、舗装工法を RCCP とし、NACon を使用することにより、工期短縮、コストおよび CO₂ 排出量の低減が可能である。

以上の結果より、早強セメントを使用し、CN30 添加量 7.5%程度、Pc 減水剤および Me 減水剤を併用することにより、早期交通開放を目指した舗装用コンクリートとして使用することが可能であると考えられる。

謝辞

本論文作成に当たり、卒論生の井下のぞみさんには多大なる協力を得ました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長川善彦ほか：早期交通開放を目指した舗装用コンクリートのフレッシュ性状および初期強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.799-804，2009.6
- 2) 河合研至ほか：コンクリートの環境負荷評価（その 2），社団法人土木学会，pp.39-40，2004.9
- 3) 小梁川雅ほか：舗装技術専門委員会 R-24 既存コンクリート舗装のライフサイクルコスト調査結果，舗装技術専門委員会，pp.18-24，2009.1
- 4) 石田樹，岳本秀人：路上工事による交通規制の経済的影響評価，北海道開発土木研究所月報，第 612 号，pp 57-60，2004.5