

中国産フライアッシュを用いた舗装コンクリートの耐久性
Durability of Concrete Pavements with Fly Ash from China

満都拉

2009年



The United Graduate School of Agricultural
Sciences, Tottori University

鳥取大学大学院連合農学研究科



中国産フライアッシュを用いた舗装コンクリートの耐久性

Durability of Concrete Pavements with Fly Ash from China

鳥取大学大学院連合農学研究科（博士後期課程）

生物環境科学専攻

生産環境工学講座

満都拉

2009年

中国産フライアッシュを用いた舗装コンクリートの耐久性

目 次

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究と研究動向	7
1.2.1 日本と中国の利用状況	7
1.2.2 コンクリート混和材としての使用効果	12
1.2.3 コンクリート舗装および構造物における耐久性	16
1.3 本論文の構成	23
第2章 フライアッシュについて	24
2.1 フライアッシュの生産	24
2.2 フライアッシュの規格	26
2.3 化学的性質	29
2.4 物理的性質	30
第3章 簡易な摩耗試験機による舗装コンクリートの摩耗抵抗性の評価 34	
3.1 緒論	34
3.2 摩耗試験の概要	37
3.2.1 摩耗試験機の概要	37
3.2.2 摩耗試験用の供体の作製	41
3.2.3 試験方法	43
3.3 試験結果および考察	44
3.3.1 モルタル供試体	44
3.3.2 コンクリート供試体	47
3.4 結論	52
第4章 凍結融解作用を受けた中国産フライアッシュを混入した 舗装コンクリートの耐摩耗性	53

4.1 緒論	53
4.2 実験材料および方法	54
4.2.1 供試材料	54
4.2.2 実験方法	55
4.3 実験結果および考察	59
4.3.1 密度と曲げ強度	59
4.3.2 耐凍結融解性	61
4.3.3 耐摩耗性	65
4.4 結論	67
第5章 ポリプロピレン繊維を用いたフライアッシュコンクリート 舗装の曲げ強度および耐摩耗性	69
5.1 緒論	69
5.2 材料および供試体	70
5.3 試験方法	73
5.3.1 曲げ試験方法	73
5.3.2 摩耗試験方法	73
5.4 試験結果および考察	73
5.5 結論	79
第6章 総括	80
引用文献	86
謝辞	90
SUMMARY	92
摘要	95
公表論文リスト	98

第 1 章 緒言

1.1 研究の目的と背景

中国の現状、特に電力について考察すると、中国は 1998 年時点で発電設備容量は 2 億 7700 万 kW、発電電力量は 11 億 5000kWh に達する世界 2 位の発電大国である。火力発電機は発電設備容量で 76%、発電電力量で 81%を占めている。発電設備は 2010 年には現在の約 2 倍の 5 億 kW に達し、この増設分の約 70%は石炭火力を予定している¹⁾。中国では一次エネルギーを主に石炭に依存し、電力の 76%は石炭を燃焼する火力発電所に頼っており、毎年 4 億 t 以上の石炭が発電に使用され、石炭年消費量と比べると 1/3 を占める。石炭生産に関する第九次五か年計画と 2010 年発電計画によると、2000 年は 14 億 5000 万 t に、2010 年は 18 億 t に達することを目標にしており、2020 年までに 21 億 t になると予想されている。その中で内蒙古は中国の石炭生産量第二位で、石炭発電量も一番大きい地域であり、また、「西電東送」計画により将来中国のエネルギー基地になることを目標にしており、石炭火力発電所が益々増えている。したがって、多量の石炭灰の産出は避けられない。内蒙古では石炭灰をセメント、コンクリート、レンガ、路盤安定材料として最近利用してきているが、石炭灰の利用率が 20%に達しない状況である。採掘された石炭およびレンガ壁の様子を **Fig.1-1** に示す。**Fig.1-2** に示すように残った石炭灰を発電所からスチールパイプやコンクリートパイプで水流を利用して数キロ離れた野外に排出している。石炭灰の再生資源としての利用が、中国における経済と社会発展および環境に対して重大な課題となっており、ひいては地球環境保全に関する問題となっている。このような社会情勢の変化から、石炭灰のコンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を格段に増加させることが緊急の課題となっている。



Fig.1-1 石炭置き場およびレンガ
Coalhole and brick



Fig.1-2 火力発電所から野外に排出された石炭灰
Fly ash drained from a thermal power station

一方、近年中国内陸部の内蒙古自治区では、中国政府の西部大開発「西部地域の交通建設は西部開発の第一要務」方針に基づいて交通網の建設が優先的に実施されている。第11次5カ年計画（2006～2010年）を **Fig.1-3** に示す。その発展要領では、農業資本不足の問題を解決し、農村の生産と生活の条件を改善し、農民の医療、教育、交通などの公共サービスのレベルを引き上げることを目的とした「社会主義新農村建設」が方針として打ち出されており、農村におけるインフラ整備の強化に基づいた農村道路の整備が進められている²⁾。

寒冷地である内蒙古自治区では、**Fig.1-4** に示したように冬期におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用によって道路舗装が摩耗を受ける。加えて、農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことから、摩耗の進行も著しい。コンクリート舗装の摩耗量は、アスファルト舗装の1/2程度と小さく、高い耐摩耗性を有することから、寒冷地におけるコンクリート舗装の割合は温暖地域よりも多い傾向にある。したがって、寒冷地である内蒙古自治区では、交通車両の特徴の面からも、摩耗に対する抵抗性の高いコンクリート舗装により農村道路の整備が行われることになる。

中国北西部におけるほとんどの地域では、気温の年較差、日較差が大きく、降水量が少なく、蒸発量、日照が多いなど典型的な乾燥や半乾燥地の気候を示している。例としては、黄河に三方を囲まれたオルドス高原（標高1,000～1,500m）の毛烏素砂地のほぼ中心にある烏審召気象観測所の20年間（1960～1980年）の平均最高、最低気温はそれぞれ13.7℃、-0.9℃であり、最暖月は7月、最寒月は1月で日本と比較するといずれも1ヶ月早い。記録によれば、本統計期間内の最高気温と最低気温は36.4℃（7月）、-31.4℃（1月）であり、日較差が24℃にも達することもある10月～3月まで土壌は凍結し、深さ30cmの平均的凍土期間は11月29日～3月15日である。最大凍土深さは2月に150cmが記録されている。**Fig.1-5** に示すように、中国の北西部一帯は、ほぼ同様またはこれより厳しい寒冷地である³⁾。

"三横九纵十二出口"公路布局示意图



Fig.1-3 内蒙古自治区第11次5年计划 (2006~2010年)
Inner Mongolia Autonomous Region 11th 5-year plan



Fig.1-4 冬期における道路舗装が摩耗を受けた状況

The situation that road pavement in the winter season caught the abrasion

この過酷な気象条件下では、コンクリートとその構造物に凍害が発生しやすく、問題視されている。これらの問題を解決するには、コンクリートに石炭灰の一種類であるフライアッシュの混入が考えられる。フライアッシュをコンクリートに混入することで、

- ① 流動性の改善及び単位水量の減少
- ② 水和熱の低減
- ③ 長期強度の増進
- ④ 乾燥収縮の減少
- ⑤ 水密性及び耐久性の向上
- ⑥ アルカリ骨材反応の抑制

などの効果を持つことが、これまでの多くの調査や研究によって明らかにされてきている。フライアッシュコンクリートの耐凍害性については、「AE コンクリートとして、かつ十分な養生を行えば、通常のコンクリートと同等となる。」ことが示されている⁴⁾。

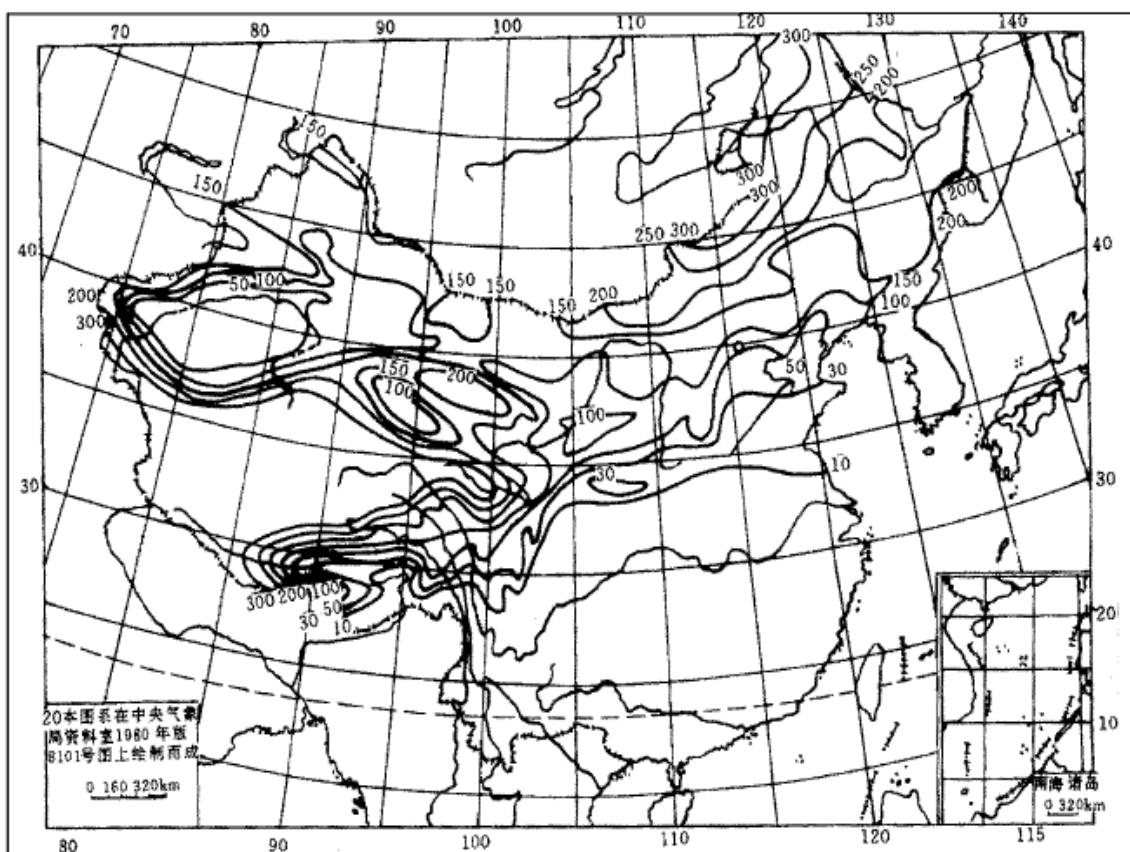


Fig.1-5 標準凍結深さ等値線図 (単位 : cm) 5)

Chart of the Contour Line of Freezing Depth in China

本論文は、今までの研究成果を踏まえ、簡易な摩耗試験機による舗装コンクリートの摩耗抵抗性の評価を行った上で、中国産フライアッシュでセメントの一部を置換したコンクリートの耐摩耗性、凍結融解作用を受けたフライアッシュを混入した舗装コンクリートの耐摩耗性、ポリプロピレン繊維を用いたフライアッシュコンクリート舗装の曲げ強度および耐摩耗性などの耐久性を明らかにし、特に中国北西部の気象条件を配慮した舗装コンクリートの耐摩耗性、凍結融解性およびフライアッシュを 50%置換した繊維補強舗装コンクリートの実用性（室内試験）に着目し、検討した結果をまとめたものである。

1.2 既往の研究と研究動向

ここでは、循環型社会の推進を目指し、大量に発生する石炭灰を資源として有効活用するため、様々な分野で積極的に取り組まれている研究開発や普及、コンクリート舗装における実用性、コンクリート構造物における耐久性、変状および性能低下に関する既往の研究の成果と動向を示す。

1.2.1 日本と中国の利用状況

コンクリートは土、鋼鉄と共に、近代の建設事業になくてはならない基幹材料であり、セメント、水、骨材、そして混和材料から構成されている。その使用量は莫大なものであり、容易に他のものにとって代えられない重要な材料である。20世紀は、コンクリートの技術が画期的に進歩し、この進歩と共にコンクリートの使用量が爆発的に増加してきたと言える。コンクリートを構成する混和材料は、添加量の多少によって混和剤と混和材に区分されている。この区分には必ずしも明確な境界があるわけではなく、使用量が比較的多く、それ自体の容積がコンクリートの配合に算入されるものを混和材と呼んでいる⁶⁾。

混和材の種類には、

- ① ポゾラン作用のあるもの：フライアッシュ、シリカフェーム、火山灰、珪酸白土
- ② 潜在水硬性のあるもの：高炉スラグ微粉末
- ③ 硬化過程において膨張を起こさせるもの：コンクリート用膨張材
- ④ オートクレーブ養生によって高強度を生じさせるもの：珪酸質微粉末
- ⑤ その他：増量材、着色材、石灰石微粉末、砕石微粉末、スラッジ、下水汚泥微粉末、ポリマー、エトリングイト系高強度混和材、超早強混和材などが挙げられる。その中において、最も安価で実用性が高く多量に使われる

のがフライアッシュである。

フライアッシュはポゾランを代表する良質な混和材である。ACI Committee226によれば、ポゾランの歴史はきわめて古く、2000年前のローマ時代にまでさかのぼることができる。当時は火山噴出物の天然灰を石灰と混合して、モルタルとセメントを造ったようである。“pozzolana”は“pulvis puteolanus”から来た呼び方である⁷⁾。ポゾランはそれ自体に水硬性がないが、石灰と水の存在のもとで、徐々に水硬性を発揮するものである。

フライアッシュを人工ポゾランとして、ポルトランドセメントコンクリートに利用するための研究が始められたのは1930年頃である。その時代、アメリカでは火力発電所から排出されるフライアッシュが多量になったからである。1937年に、R.E.Davisは彼の助手らとカリフォルニア大学でフライアッシュを混入したコンクリートの研究結果を発表した。これは早期のフライアッシュに関する規格、実験方法及び利用における基礎として貢献した⁷⁾。同時期に、アメリカ開拓局ではHungry Horse, Canyon Ferry, Yellowtail等のダムの工事にフライアッシュを本格的に使用し、実用性の高いことを示した。これらの工事で注目を集めた利点は、ワーカビリティの向上、長期強度・耐久性・水密性等の性能の増進、温度ひび割れ抑制、アルカリ骨材反応の緩和、工事費の低減等であった⁸⁾。フライアッシュの大規模利用に関する研究がさらに盛んになったのは1950年代以降で、特に1970年代の石油危機の後、アメリカ、カナダ、日本等諸国では石炭を燃料とする発電所の建設が急速に進められ、多量に生産される石炭灰の再利用や用途の開発がより一層進められた^{9~11)}。

日本におけるフライアッシュの有効利用は、アメリカ、ドイツ、イギリス、フランス、イタリア、デンマーク等の国と並ぶ世界有数の普及水準となっており、フライアッシュの利用が活発に行われるようになったのは1951年の頃か

らである。1952年着工の宇部港岸壁の水中コンクリート工事，1953年打込み開始の須田貝ダム（群馬県）が実用化の始まりとされている^{12,14}。

フライアッシュの用途を区別すると以下の通りである¹⁵。

◆フライアッシュセメント；セメントにフライアッシュを混合すると，モルタルまたはコンクリートの各種性質が改善され，その使用方法は，現地で混合する方法（現地混合）とフライアッシュセメントとして使用する方法（工場混合）が代表的なものである。

主な用途としては，生コンクリートおよびコンクリート製品のセメントに置換され，ダム，道路，橋梁，港湾，上下水道，一般土木工事，建築基礎等に使用する。

○3成分系低発熱セメント；ポルトランドセメントに高炉スラグとフライアッシュを混合したもので，セメントの水和発熱を抑制する効果が大きく，建物，橋梁基礎等大型構造物用マスコンクリートとして使用されている。

○コンクリート混和材；フライアッシュは，その特徴を活かしコンクリート混和材として多方面に利用されており，工法としてはRCD工法，グラウチング工法，プレキャスト工法，高流動コンクリート工法がある。

○セメント混合材；普通ポルトランドセメントJISR5210に規定する普通ポルトランドセメントにおいては，JISA6201に規定するフライアッシュを単独に他の材料と組み合わせてセメント質量の5%以下で混合して良いとされている。フライアッシュは，1975年頃からセメントの原料として粘土代替に用いられるようになった。

○道路材；1998年に「アスファルト舗装要綱」（Table1-1に示す）が改訂され，石炭灰が道路材料として有効利用されるようになった。アスファルト舗装施工様子を Fig.1-6 に示す。

- アスファルトフィラー材

Table1-1 アスファルト舗装要綱
Asphalt Paving Scheme

アスファルト舗装要綱		
	フライアッシュ	クリンカーアッシュ
表層	使用可	
基層	使用可	
上層路盤	使用可*	
下層路盤	試験中	使用可
路床		使用可



Fig.1-6 アスファルト舗装施工
Asphalt pavement construction

*セメント安定処理のひび割れ防止用として使用できる。

○建材；石炭灰の物理的性質や化学成分が，従来の建築材と類似していることから，広く利用され資源リサイクルに貢献している。

●建築用内外装材；フライアッシュを使用した建材は，断熱性，消音性および寸法安定性等の向上に効果を発揮する。**Fig.1-7**にフライアッシュ建材の建築を示す。

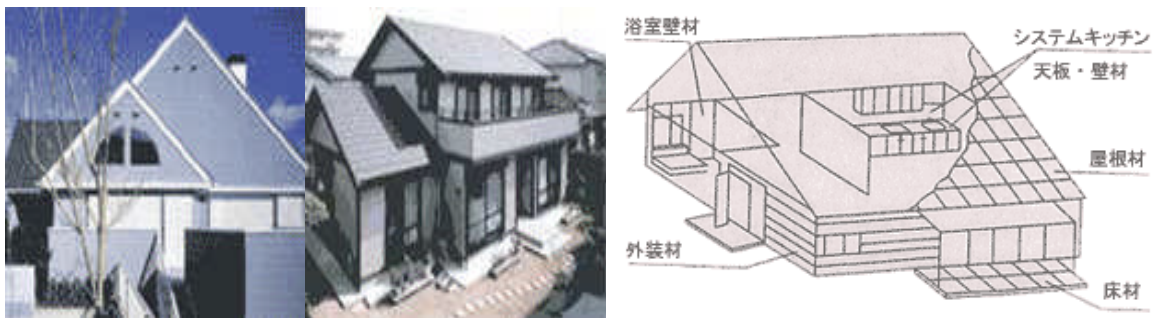


Fig.1-7 フライアッシュ建材の建築
Fly ash building materials

●フローアボード；フライアッシュを主原料（60%）とし，火山礫などその他ガラス繊維を強化材として加え，フェノール樹脂を添加しプレス加工されたもので，加工性に富み，かつ不燃性のフローア材として実用化されている（**Fig.1-8**）。

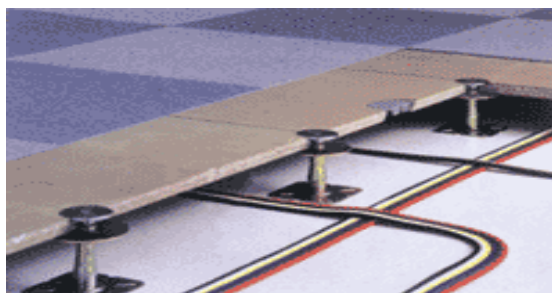


Fig.1-8 フライアッシュのフロー材
Fly ash as a floor material

●窯業材；耐火煉瓦・瓦・タイル・ブロック等、窯業原料の粘土の一部代替材として、フライアッシュが利用されている。

○農水産用；

●肥料；フライアッシュに含まれる難溶性のケイ酸を利用するために、苛性カリ、塩基性苦土を添加して焼成したもので、雨水による溶脱が少なく効用が長続きし、根を丈夫に育て病虫害の抵抗性も高い肥料である。フライアッシュを使用した農業肥料で育てた植物の写真を **Fig.1-9** に示す。



Fig.1-9 フライアッシュを使用した農業肥料
Agricultural fertilizer use of fly ash

●人工魚礁材；フライアッシュは人工魚礁コンクリートにも利用されている。フライアッシュ人工魚礁材の様子を **Fig.1-10** に示す。

◇マウンド漁場造成システム (社)マリノフォーラム 21 の沿岸漁場造成技術開発研究会のマウンド漁場造成システム開発で、石炭灰を多量に使用したブロックを大量に沈設しマウンドを造成し、人工湧昇流漁場を構築する技術が研究開発された。

◇FGC硬化体 (財)石炭利用総合センターが主体となってFGC (フライアッシュ、石こう、セメント) 硬化体の漁礁を開発した。

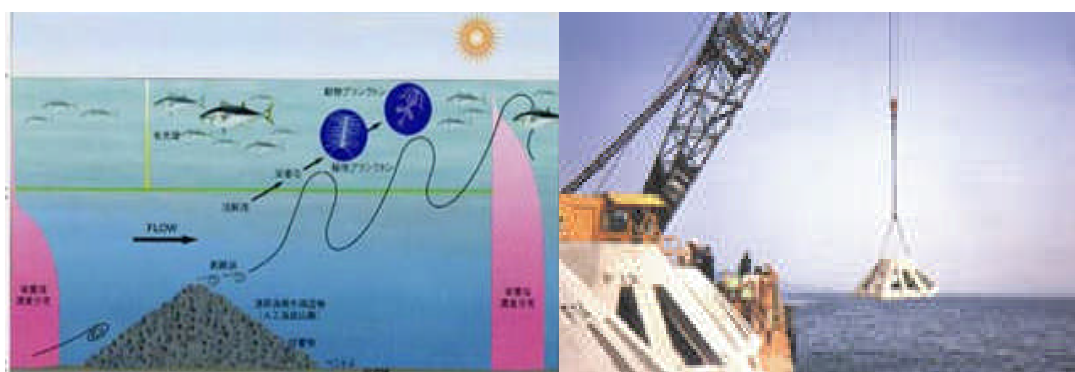


Fig.1-10 フライアッシュを利用した人工魚礁材
Artificial fishing reef material using fly ash

○その他の用途：トンネル裏込材，港湾工事岸壁裏込材，コンパクションパイル中詰材，スラリー材（中詰材），酸化防止剤，排煙脱硫剤，水処理剤，汚泥等の固化処理剤，高分子材料の混和充填剤（ゴム充填剤；プラスチック混和剤）

1.2.2 コンクリート混和材としての使用効果

フライアッシュに関しては、コンクリートの混和材として利用する研究が多く、一般土木構造物などに使用された実績も多い。フライアッシュのコンクリート混和材としての使用効果は、日本土木学会の「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」と日本材料学会の「コンクリート混和材料ハンドブック」によって、以下のように要約される^{16,17)}。

- ① フライアッシュはコンクリート中での分散性が良好であるので、通常のコンクリートと同等の練混ぜを行うことより、コンクリートの均質性を確保することができる。
- ② フライアッシュは一般に球状の微粒子であるため、フライアッシュを用いたコンクリートの流動性は向上する。したがって、フライアッシュを用いたコンクリートの単位水量は、同一スランプの通常のコンクリートに比べて、少なくなる傾向にある。
- ③ 単位体積質量については、フライアッシュの密度はポルトランドセメントに比べて小さいが、その差がコンクリートに与える影響は比較的小さいので、コンクリートの単位容積質量は、フライアッシュを用いない通常のコンクリートと同等と考えてよい。
- ④ フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現は、フライアッシュの種類や置換率、養生条件等の影響を大きく受ける。一般に、フライアッシュをセメントの一部と置換すると、若材齢ではその置換率の増加とともに強度が低下するが、長期材齢ではフライアッシュを用いない通常のコンクリートと同等かまたは大きくなる。これはフライアッシュのポゾラン活性によるものである。

しかし、ポゾラン反応の速度はセメントの水和反応に比べ緩慢なため、無混和コンクリートよりも湿潤養生期間の影響を大きく受ける。即ち、長期強度の増進を目的にフライアッシュを使用する場合は、無混和コンクリートよりも湿潤養生期間を長くする必要がある。

⑤ フライアッシュを用いたコンクリートの発熱特性は、フライアッシュの種類と置換率の影響を受ける。フライアッシュをセメントの一部と置換して使用したコンクリートの発熱量は、置換率にほぼ比例して低減し、発熱量の低減と同時に発熱速度の減少も認められる。

しかし、フライアッシュを使用したコンクリートは置換率の増加とともに強度発現が遅れるため、設計基準強度を得るための材齢を若材齢とすると、強度から必要な結合材量が少なくなるので、結果的にコンクリートの温度上昇量を低減できなくなることがある。したがって、水和熱の低減を目的にフライアッシュを使用する。つまり水和熱低減効果を有効にするためには、可能な範囲で設計基準強度を得るための材齢を長期にすることが肝要である。

⑥ フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性は、AE コンクリートとして、且つ十分な養生を行えば、通常のコンクリートと同等となる。しかしながら、ポズラン反応が十分に進行しておらず水和組織が緻密になっていない場合があるので、初期凍害には十分注意しなければならない。

適切な空気量を有する AE コンクリートとした場合、圧縮強度が 5N/mm^2 以上になれば数回の凍結では、凍害を受けることが比較的少ないとされている。また、圧縮強度が 10N/mm^2 を超えると、水で濡れているコンクリートが継続して激しい気象作用を受けた場合であっても、コンクリートはほとんど凍害による劣化を受けないと言われている。

⑦ 水密性、耐硫酸塩性、耐海水性が向上する。フライアッシュを用いたコンクリートの水密性は、初期材齢の数日間は無混和のコンクリートより小さくなることがあるが、材齢 28 日程度以降の十分な強度が確保される段階になると同等以上となる。これは、フライアッシュのポズラン反応生成物の析出により細孔組織が緻密化されるためである。

これに加え、海水に侵食されやすい水酸化カルシウムがポズラン反応により減少することから耐海水性が向上し、さらに水酸化カルシウムの減少によってコンクリートの pH が低下し、膨張性水和物が生成しにくくなるため耐硫酸塩性が向上する。これらの効果を十分に期待するためには、長期強度の増進の場合と同様に、適切な養生が重要となる。

⑧ アルカリ骨材反応の抑制効果がある。フライアッシュにはアルカリ骨材反応による膨張を抑制する効果があることが知られている。その効果は、フライアッシュの置換率が高いほど、非晶質シリカ分が多いほど、平均粒径が小さいほど大きくなることが明らかになっている。

そのメカニズムとしては、ポズラン反応によるコンクリート中の水酸化カルシウム量の低減に伴う細孔溶液中の水酸化物の低減、比表面積の大きい低カルシウム型けい酸カルシウム水和物（CSH）の生成と、それによるアルカリイオンの吸着、及び硬化セメントペーストの緻密化による水の移動速度と Na^+ や K^+ の拡散速度の低下、などが考えられる。

⑨ 乾燥収縮、自己収縮については、フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮と自己収縮は小さくなる。これらの効果は、特に粉体量が多くなる高流動コンクリートや高強度コンクリートで顕著になる。

フライアッシュを混和材として用いることによって、上記の効果が得られ、コンクリートの性能を向上させることができる。一方、このような効果が得られる反面、フライアッシュを混入することによる負の影響もいくつか見られる。即ち、

- a) 初期強度発現が遅延すること、
- b) AE 剤がフライアッシュ中の未燃炭素に吸着されるため、所要の空気量を得るための AE 剤使用量が多くなること、
- c) 空気量の変動が大きいこと、
- d) 時間経過に伴って空気量が低下すること、

といったコンクリートの品質上好ましくない影響である。

AE 剤を使用する場合は、その品質を確かめるだけでなく、空気連行性、経時変化等のフレッシュコンクリートの性状についても確認しておくことが必要である。減水剤、AE 減水剤及び高性能 AE 減水剤にとっても、これと同様な扱いでよい。なお、通常の AE 剤では、所要の空気量が確保しにくい場合や空気量の

経時変化が大きくなる場合には、フライアッシュ用 AE 剤の使用が勧められている。

また、フライアッシュは産地、生産時期及び燃焼方式によって性質が異なり、いわゆる性質に多様性があるため、コンクリートの混和材として利用する場合、フライアッシュとフライアッシュを用いたコンクリートの特性を理解した上で、材料の取り扱い、コンクリートの施工、品質管理及び検査について十分な検討を加えて施工計画を立案することが必要である。

1.2.3 コンクリート舗装及び構造物における耐久性

舗装の種類は表層の材料、工法あるいは機能や場所によってそれぞれの呼称があり、画一的に分類することは難しい、実用的な面からはアスファルト舗装とセメントコンクリート舗装に大別できる。

アスファルト舗装とは表層がアスファルト混合物の舗装であり、セメントコンクリート舗装は、表層がセメントコンクリートの舗装をいう。両者は表層材料が異なるだけでなく荷重伝播の考え方すなわち設計思想も相違している。

アスファルト舗装では、各層が応力を分担し、順次荷重を分散するという考え方である。それだけに上層ほど負担する応力も大きいため高品質の材料を使用する。

一方、セメントコンクリート舗装では載荷重による応力は剛性の高い表層のコンクリート版がほとんど負担することになる。版の下の路盤は表層を均等に支えることと施工性の確保を主な役割としている。

これらのことからセメントコンクリート舗装を剛性舗装と呼び、アスファルト舗装をたわみ性舗装と呼称している。また、配合や工法、舗装に期待する機能などによっても **Table1-2** に示すような多くの種類分けがなされる。

舗装コンクリートの摩耗現象は、対象とする構造物の種類によって作用する外

力が異なるため、コンクリートの摩耗機構を実際の現象に相似して再現するための試験装置としては、床材料摩耗試験機、ラベリング摩耗試験機 (Fig.1-11)、ホイールトラッキング試験機、掃流試験機、衝撃摩耗試験機など、多種多様の試験装置が提案されている¹⁸⁾。したがって、コンクリートの摩耗試験を行う際には、Table1-3 に示すような摩耗の分類²⁴⁾を踏まえて、対象とする摩耗機構を明確にし、試験方法を選択しなければならない。

日本道路公団試験研究所では、高速道路における舗装の材料・構造設計技術を確立するため、直径 6m、幅 90cm の円形走路をトラックタイヤが走行する大型回転式舗装試験機を室内に設置し、昭和 45 年度から昭和 61 年度にわたり、「コンクリート舗装のすりへり抵抗に関する室内試験」、「コンクリート舗装のすりへり・すべり抵抗に関する室内試験」および「雪氷路面における各種タイヤ・すべり止め装置の性能試験」を実施した。さらに、これらの試験研究の結果から、コンクリート舗装の摩耗（わだち掘れ）の推定法を提案した。また、豊福は、舗装コンクリートの摩耗特性を解明するため、基礎的な実験によって検討を進めてきて、1997 年に、積雪寒冷地域でタイヤチェーン等のタイヤ滑り止め装置による作用を受けて損傷する過酷な条件下にあるコンクリート舗装の摩耗現象を解明することにより、コンクリートにおよぼす外力と摩耗との関係を明らかにした¹⁸⁾。

Table1-2 舗装の種類 ²⁰⁾

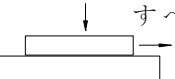
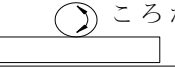
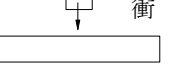
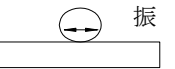
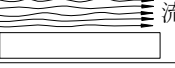
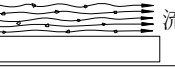
Classification of the pavement

表層材種類の分類	配合・工法分類	機能分類	用途・箇所分類
アスファルト舗装	改質アスファルト舗装	耐流動性舗装	車道舗装
	ゲースアスファルト舗装	耐摩耗性舗装	橋面舗装
	ロードアスファルト舗装	半たわみ性舗装	トンネル内舗装
	フォームドアスファルト舗装	排水性舗装	岩盤上の舗装
	再生アスファルト舗装	低騒音舗装	空港舗装
	マスチックアスファルト舗装	明色舗装	滑走路舗装
	路上再生舗装工法	着色舗装	エプロン舗装
	フルデプス舗装工法	すべり止め舗装	歩行者系道路舗装
	サンドイッチ舗装工法	凍結抑制舗装	歩道(橋)舗装
	コンポジット舗装工法	応力緩和舗装	自転車道舗装
セメントコンクリート舗装		透水性舗装	園路舗装
		弾力性舗装	スポーツ施設舗装
	無筋コンクリート舗装		テニスコート舗装
	鉄網コンクリート舗装		陸上競技場舗装
	連続鉄筋コンクリート舗装		
	転圧コンクリート舗装		水利施設舗装
樹脂・その他の舗装	プレキャストコンクリート舗装		斜面舗装
	プレストレストコンクリート舗装		ライニング舗装
	ニート舗装工法		
	樹脂系混合物舗装		
	ブロック系舗装		
	二層構造系舗装		
	その他の舗装		



Fig.1-11 ラベリング摩耗試験の様子¹⁹⁾
Labeling abrasion test machine

Table 1-3 摩耗の分類
Classification of abrasion

作用要素	摩 耗 機 構		応力が主となる相互作用	
	相 対 運 動 の 種 類		表面 疲労	アブレ イジョン
固体/固体 (金属, ポリマー, 鉱物など) 潤滑材の有無			すべり摩耗	
			ころがり摩耗	
			衝撃摩耗 *1	
			フレットニング摩耗 *2	
固体/液体			キャビテーション 摩耗	
固体/液体+粒子			液体エロ ジョン *3	

*1 固体と固体との間の衝突による摩耗

*2 軸受が微小振動を受けて凹痕を生じる摩耗や、繰返し荷重が作用するボルト・リベット結合部にわずかなすべりが繰返し作用することによって生じる摩耗

*3 固体と土粒子などの粒子を含む液体との間の摩耗

コンクリート構造物における変状および性能低下に関しては、これまでに種々の研究が報告されている。その中でも、道路用コンクリート構造物における研究の方向性としては、コンクリートの化学的侵食に関する研究、コンクリートの凍結融解作用に関する研究、構造物の凍上に関する研究、コンクリートの摩耗に関する研究、コンクリートからの成分溶脱に関する研究、コンクリートのアルカリ骨材反応（ASR）に関する研究、鉄筋コンクリートにおける鉄筋腐食に関する研究、道路としての性能低下に関する研究などに概ね大別される。特に、コンクリートの化学的侵食、凍結融解作用、アルカリ骨材反応に関する研究は膨大に

なされており，そうした研究成果の活用による示方書，指針，基準書，技術書，マニュアルなどが多数整備されてきている。

コンクリートの摩耗に関する研究としては，道路施設における交通車輛の走行による舗装路面のすり減り現象に関する研究が多い。また舗装路面以外でも，工場や倉庫など床面における人の移動やフォークリフトなどの走行によるアブレイジョン摩耗や表面疲労摩耗，建築物の屋上駐車場の防水層における車輛走行によるすり減り損傷や剥離損傷などに関する研究成果が報告されている。一方，水利構造物における摩耗に関する研究としては，ダムコンクリートや水路系構造物における水流による磨き作用および砂礫による転がり摩擦作用により生じるすり減りや洗掘損傷に関する研究が多く，その他，高速の水流や水圧差が原因で生じるキャビテーションによる浸食作用や，海水地域における氷による構造物のすべり摩耗などに関する研究成果が報告されている。

道路施設における舗装路面のすり減り現象は，通行する交通車輛の重量や速度などが原因で生じる。舗装路面では，通行する交通車輛によるモルタル分と骨材は面的かつ均等にすり減り，平滑性が増し路面の摩擦抵抗が低下し，通行車輛の制動に支障をきたすなどの問題を生じている²¹⁾。赤井ら²²⁾は，舗装路面のすり減り現象は，粗骨材の混入率の増加によって，すり減りの進行を低下させることができることを示している。コンクリート標準示方書[舗装編]²³⁾によれば，[舗装コンクリートは，大きいすり減り作用を受ける。場合によって舗装版のすり減り減量によって走行性が損なわれることもある]ことを示唆した上で，一般に粗骨材の堅硬さ(JIS A 1121「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすり減り試験法」により得られる粗骨材の「すりへり減量」値)とコンクリートのすり減り抵抗性は相関性が高いとしている。堀口²⁴⁾は，工場や倉庫などの建物の床面のすり減り現象は，2形態の接触状態により生じるとしている。2 物体間接触によるすり減りはアブレイジョン摩耗が支配的となり，3 物

体間接触によるすり減りはアブレイジョン摩耗と押し込み作用による表面疲労摩耗とが複合的に作用することにより生じることを示している。

コンクリート舗装におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用、および農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことによって生じるすり減り摩耗現象は、**Fig.1-12**に示すように、その進行を3段階の過程により表すことができる²¹⁾。

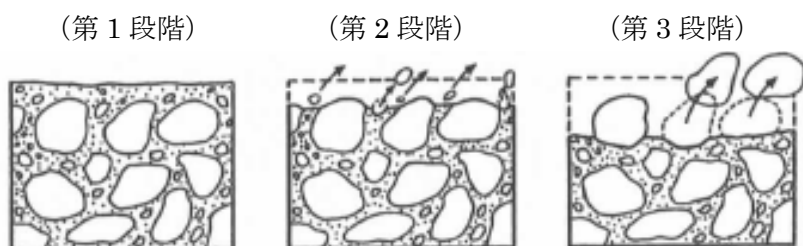


Fig.1-12 コンクリート舗装におけるすり減り現象の進行過程²¹⁾
Progress process of the decrease phenomenon in the pavement

- ① 最初の過程では、躯体表面付近のセメントペースト分およびモルタル分がすり減る。
- ② 次の過程では、モルタル分がすり減った後、粗骨材が露出し、粗骨材自体のすり減りも発生する。
- ③ 最後の過程では、粗骨材の剥離や脱落が発生し、躯体の断面欠損へと進展する。

舗装コンクリートの摩耗現象では、通常は表面に多数の硬質な摩耗粉が存在し、3物体間の接触による押し込み作用が発生する。スパイクタイヤによる摩耗現象であるタイヤと路面の相対運動はころがり運動になるが、一つのスタッドピンはサイクロイド運動をする。したがって、鉛直方向の外力による表面疲労摩耗が路面に発生し、このときの衝撃力は**Fig.1-13**で示されるように、接触直後に最大値を示す²⁵⁾。同時にアブレイジョン摩耗も発生するが、その影響因子（スタッドピンのフランジや先端部の形状とその硬度、ピンの突起量やアンダートレッドの値、タイヤの種類等）によってその値は複雑に変化する。

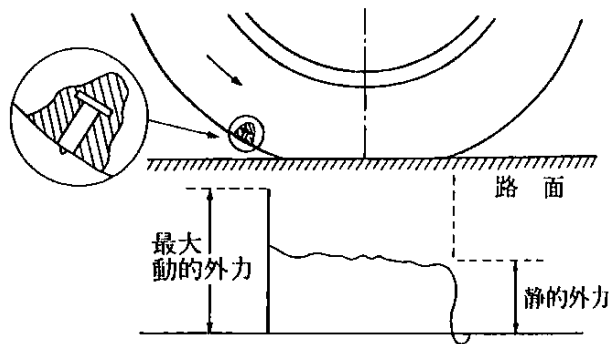


Fig.1-13 接触直後が最大値を示す衝撃力の分布 ²⁴⁾

The distribution of the crash force that the contact direct back shows the maximum

1.3 本論文の構成

本論文の第 2 章では、主にフライアッシュについて、その産出、規格、基本的性質などについて述べる。特に、本論文を構成する研究テーマに関連したフライアッシュの分析結果とその基本性状を述べる。

第 3 章では、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための簡易な摩耗試験機を中国の国家標準である GB/T 16926-1997 を踏まえて作製し、その実用性を評価した結果を述べる。

第 4 章では、中国内蒙古自治区の気候およびコンクリート舗装としての特徴を踏まえ、内蒙古自治区の石炭火力発電所で排出されたフライアッシュを混入した舗装コンクリートの実用性を検証することを目的として、中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性を述べる。

第 5 章では、補強用繊維として近年注目されているポリプロピレン繊維を用いた異なるフライアッシュ置換率の舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について述べる。

第 6 章は、本論文の総括である。

第2章 フライアッシュについて

2.1 フライアッシュの生産

火力発電所における石炭灰の生産過程を Fig.2-1 に示す。

フライアッシュは石炭火力発電所等で、石炭を粉砕した微粉炭を燃焼した際に排出される石炭灰の一部として、クリンカーアッシュ（炉底炭）および粗粒アッシュ（シンダーアッシュ）とともに副産される。フライアッシュは煙道の集塵器で排煙中から採取した微粉末状のアッシュであり、石炭灰の70～85%を占める。

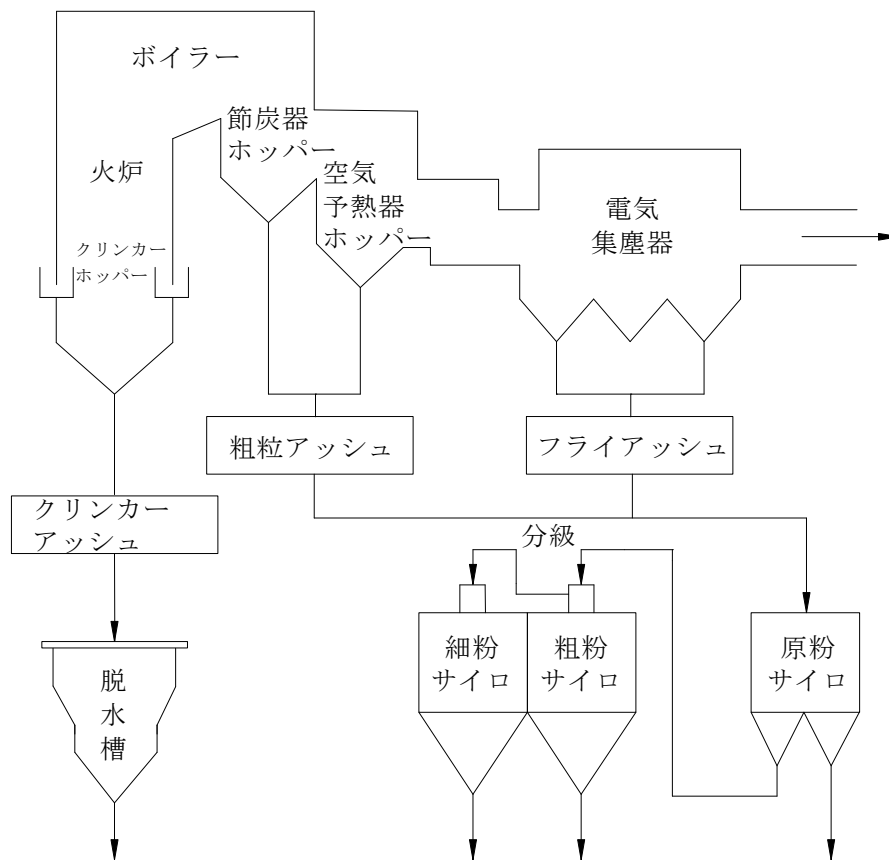


Fig.2-1 石炭灰の生産過程

The schematic diagram of coal ash production procedure

集塵器の集塵方式は乾式（電気集塵器）及び湿式の二種類があり、日本の場合はほとんど電気集塵であるが、中国では近年電気集塵器の乾式に変わりつつあり、70年代以前に建設された発電所及び小規模な発電所の大部分は湿式である²⁷⁾。シンダーアッシュはボイラーに属する節炭器、空気予熱器のホッパーから回収されるもので、全体の約5%に過ぎないが、細粒（0.1mm程度以下）であり、微粉も多く含まれている。

近年、途上国である中国では、環境問題および資源再利用などの原因でフライアッシュの分級、粉碎は再生産としてすべての企業で着実に実施されている。回収されたフライアッシュ及びシンダーアッシュの利用分野は、混和材、セメント製造用材料等さまざまであるが、使用目的に適合した粒度に調整して、両者を合わせた分級処理を行っているのがほとんどである。中国内蒙古自治区通遼市の石炭火力発電所におけるフライアッシュ分級システム風景を **Fig.2-2** に示す。



Fig.2-2 通遼市石炭火力発電所におけるフライアッシュ分級システム²⁸⁾
Grade system for fly ash in the charcoal thermal power station in Tongliao

2.2 フライアッシュの規格

フライアッシュをコンクリートの混和材として利用する場合、その粉末度と強熱減量を主体に、品質を分類して利用するのが主流である。

粉末度はポゾラン反応ならびにコンクリートのワーカビリティに著しく影響を及ぼす因子である。分級された良質なフライアッシュはガラス質の球形粒子が多いため、セメントの一部を置換することで、同一スランプを得るための単位水量を低減することができる。その理由はボールベアリング作用によってセメントペーストの流動性が向上するためだと考えられている。例えば、JIS規格のI種は、粉末度が大きく、強熱減量が低いもので、ポルトランドセメントと置換することにより、コンクリートの流動性を著しく改善できるとともに、強度発現も通常のコンクリートとほぼ同等のもの造ることができる。

強熱減量は炭素含有量の目安で、フライアッシュの品質管理の重要な指標である。炭素含有量の大きいフライアッシュを用いても、コンクリートの強度、水密性等への影響はほとんどないが、AE剤の吸着により空気量が著しく低下し、ワーカビリティの管理が難しくなる恐れがある²⁹⁾。特に、連行空気量の低減によりコンクリートの耐凍結融解性が影響されることが心配される。

コンクリート用フライアッシュの規格は、国によってさまざまであるが、粉末度と強熱減量は重要な基本項目となっている。日本のJIS規格については、1956年大ダム規格から今の1999年版まで5回にわたって見直されており、しかも詳細に規定されている。それに比べ、中国の規格(GBJ)は制定されたのが1991年と遅く、しかも規定された項目が少ない。日本の規格と中国の規格をそれぞれTable2-1とTable2-2に示す。

本研究では、日本のJIS規格を基準としている。

Table 2-1 フライアッシュの品質規格 (JIS A6201-1999)
Classes and quality of fly ash (JIS)

種 類		I 種	II 種	II 種	IV 種
項目					
	二酸化けい素 (%)	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上
	湿分 (%)	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下
	強熱減量 ⁽¹⁾ (%)	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
	密度 (g/cm ³)	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上
粉末度 ²⁾	45μm ふるい残分 ⁽³⁾ (%)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積(ブレン方法 : cm ² /g)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
	フロー値比 (%)	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

注： 1) 熱減量に代えて、未燃炭素含有率の測定を JISM8819 または JISR1603 に規定する方法で行い、その結果に対し強熱減量の規定値を適用してもよい。

2) 未度は、網ふるい方法又はブレン方法による。

3) 未度を網ふるい方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

Table 2-2 中国の GBJ 規格 フライアッシュの等級と品質
Classes and quality of fly ash (China)

順番	指標	等 級		
		I 級	II 級	III 級
1	粉末度 (45μm ふるい残分%)	≤12	≤20	≤45
2	強熱減量 (%)	≤5	≤8	≤15
3	単位水量比 (%)	≤95	≤105	≤115
4	三酸化イオウ (%)	≤3	≤3	≤3

注： 1) 乾式集塵の場合、湿分が≤0.1%；湿式集塵の場合、湿分が≤15%。

2) 単位水量比とは、一定のフロー値を得る必要な水量でフライアッシュを用いた場合と用いない場合との比によって表す。即ち、セメントの 30%をフライアッシュに置換したモルタルのフロー値が、置換しないモルタルフロー値に達するまで所要の水量と置換しないモルタル所要水量との比。

3) BJ：国家標準の略称。

日本土木学会では「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」において、**Table2-1** に示した 4 種類のフライアッシュをコンクリートに用いる場合、**Table2-3** に示す適用範囲を推奨している。その結果と用途は、下記のように示されている。

1) I種は、粉末度が大きく、強熱減量が低いもの、ポルトランドセメントと置換することにより、コンクリートの流動性を著しく改善できるとともに、強度の発現も通常のコンクリートとほぼ同等のものを作ることができるものである。

2) II種は、コンクリートの水和熱の抑制に効果があり、コンクリートの流動性の改善、アルカリシリカ反応の抑制にも効果が発揮されるものである。

3) III種は、強熱減量の大きいものを許容しており、コンクリートの空気連行性や流動性に配慮しなければならないが、水和発熱の抑制、アルカリシリカ反応の抑制及び強度発現はII種とほぼ同等の性状を示すものである。

4) IV種は、粉末度が小さく、早期強度の発現、コンクリートの流動性に配慮しなければならないが、水和熱の抑制にはII種とほぼ同等の性状を示し、置換率をやや多くする必要があり、II種と同等のアルカリシリカ反応の抑制効果を示すものである。

5) フライアッシュIII種とIV種は、混和剤としてフライアッシュ用 AE 剤を用いることが推奨されている。

フライアッシュを用いたコンクリートでは、ポルトランドセメント単体の場合に比べて湿潤養生期間を長くする必要があり、これが十分でないと、期待した効果が得られないばかりか、コンクリートの品質をかえって低下させることにもなりかねない。

Fig.2-3 フライアッシュの種類とセメント置換率
Classes and replacement rate for cement

	I 種	II 種	II 種	IV 種
流動性の向上	10～40%	10～30%	—	—
水和熱による温度 上昇の抑制	—	20～30%	20～30%	20～30%
アルカリシリカ 反応の抑制	15～40%	15～30%	15～30%	20～30%
耐硫酸塩性の向上	10～40%	10～30%	10～30%	—
耐海水（塩害含む）向上	10～40%	10～30%	10～30%	—
高流動化	20～40%	20～30%	—	—
高強度化	10～30%	—	—	—

2.3 化学的性質

フライアッシュの主成分は二酸化珪素 (SiO_2)、アルミナ (Al_2O_3) 及び酸化鉄 (Fe_2O_3) である。これらの物質はそれ自体に水硬性はないが、可溶性の珪酸等がセメントの水和する際に生成される水酸化カルシウムと常温のもとで徐々に化合し、不溶性の安定な珪酸カルシウム等を作る性質をもっている。この性質はポゾラン活性といわれ、コンクリートの長期強度、水密性や耐久性に効果がある。そのために、フライアッシュがコンクリートの混和材として使われている。

本研究では、まず内蒙古の通遼市、呼市、托県にある 3 基の火力発電所から採取したフライアッシュの無機元素定量の測定を蛍光 X 線分析装置 (PHILIPS-PW2400) で行った。測定した元素は Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Zr, Ba などである。各元素が酸化物で存在すると仮定し、それぞれの酸化物の含有量を算出した。ここでは主にコンクリートの性質に影響する成分を **Table 2-4** に示す。

Table 2-4 内モンゴル産フライアッシュの化学組成 (%)
Chemical composition of fly ash from Inner Mongolia (%)

項目 産地	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	MgO
通遼市	68.96	13.22	8.07	4.45	3.53	0.29	1.18	0.03	0.27
托県 A	45.47	33.04	9.73	6.70	0.89	0.25	3.77	0.13	
托県 B	41.52	34.43	12.30	5.05	0.93	0.31	3.80	—	0.21
呼市 A	51.00	31.97	9.14	4.14	0.76	0.18	2.72	0.10	—
呼市 B	45.53	28.09	17.87	5.13	0.87	0.21	2.45	0.06	—

二酸化珪素 (SiO₂) の含有率はコンクリートの混和材として最も重要な指標であり、通遼市産フライアッシュが 68.96% であり、最も高い値である。

2.4 物理的性質

フライアッシュの湿分・強熱減量 (JIS A 6201-1999), 密度 (JIS R 5201-1997), 比表面積・フロー値比・活性度指数 (JIS A 6201) の結果を **Table 2-5** に示す。物理的性質からは、本実験に使用したフライアッシュの品質は JIS II 種に属する。

Table 2-5 内モンゴル産フライアッシュの物理的性質
Physical properties of fly ash from Inner Mongolia

項目 産地	通遼市	托県 A	托県 B	呼市 A	呼市 B
湿分 (%)	0.2	0.4	0.5	0.2	0.6
強熱減量 (%)	0.4	1.3	2.1	1.1	2.6
密度 (g/cm ³)	2.1	2.0	1.89	2.05	1.85
比表面積 (cm ² /g) (ブレン法 : cm ² /g)	2,568	2,541	2,124	2,465	2,342
フロー値比 (%)	96	94	91	89	77.9
活性度 指数 (%)	材齢 28 日	86	—	—	—
	材齢 91 日	95	—	—	—

使用した顕微鏡機器および今回の研究で中国内蒙古自治区の3ヶ所（通遼市，呼市，托県）の石炭火力発電所から手入した5種フライアッシュを Fig.2-3 に示す顕微鏡機器で撮影した。得られた写真は Fig.2-4 のとおりである。Table 2-5 に示したように産地によって物理的性質が異なることに加えて，Fig.2-4 の電子顕微鏡写真からわかるように，フライアッシュの形状，サイズ，球状粒子も異なる。呼市 B 産は，サイズが大きくしかも空孔を持ち角張ったものが多い。

各産地のフライアッシュの湿分，強熱減量は JIS I 種の規格内にあるが，托県 B は SiO_2 の含有率が低い値を示し，呼市 A は粉末度が JIS IV 種に相当する低い値を示した。また，托県 A，呼市 B の両者ともに通遼市に比べ，低い粉末度と密度を示している。通遼市産フライアッシュは，フロー値比が II 種， SiO_2 の含有率が最も高く，比較的よい性状を持つため，本研究のコンクリート用混和材として使用するフライアッシュとした。



Fig.2-3 電子顕微鏡機器
The scanning electron microscope (SEM)

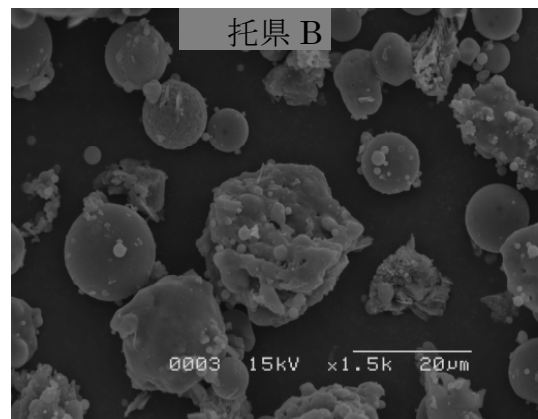
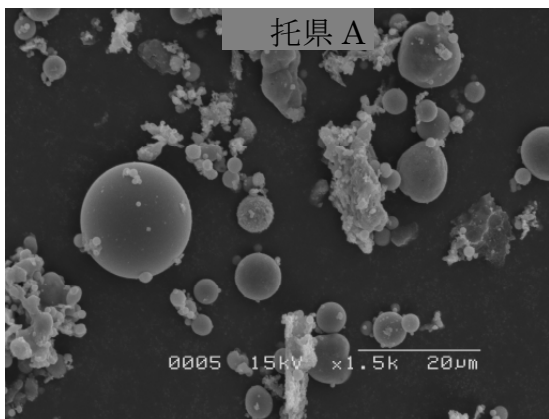
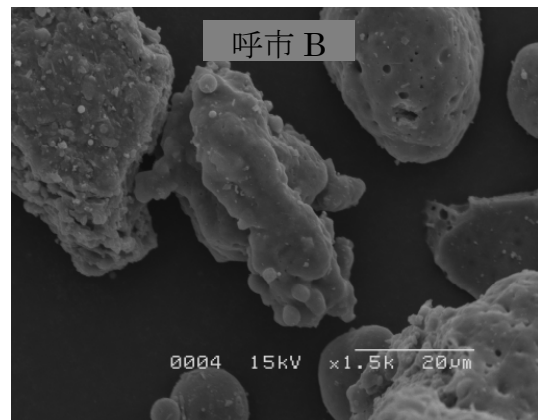
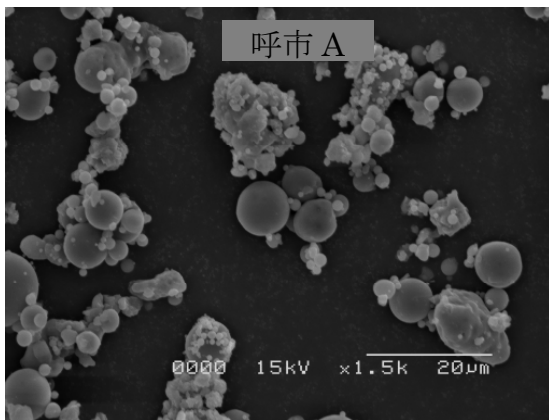
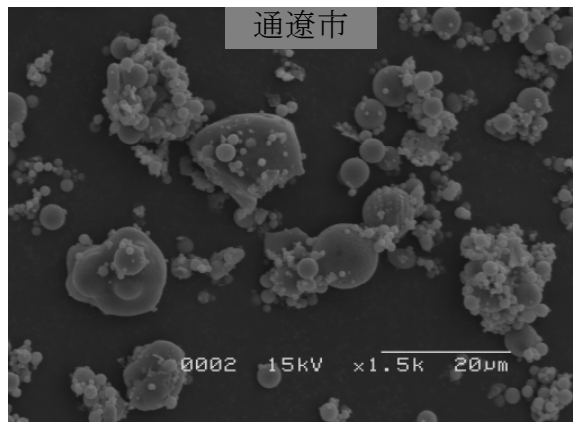


Fig.2-4 フライアッシュの電子顕微鏡写真
The scanning electron microscope (SEM) micrograph of fly ash

強熱減量試験後のフライアッシュの様子を **Fig.2-5** に示す。色が黒いほど未燃炭素の含有率高いと考えるが、通遼市産のフライアッシュの色が最も明るくて、未燃炭素が少ないと考える。



Fig.2-5 電気炉で強熱後のフライアッシュ
After the ignition of the electric furnace with fly ash

第3章

簡易な摩耗試験機による舗装コンクリートの 摩耗抵抗性の評価

3.1 緒論

第1章に述べたように、寒冷地である内蒙古自治区では、冬期におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用によって道路舗装が摩耗を受ける。加えて、農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことから、摩耗の進行も著しい。コンクリート舗装の摩耗は、アスファルト舗装の1/2程度と小さく、高い摩耗抵抗性を有することから、寒冷地におけるコンクリート舗装の割合が温暖地域よりも多い傾向にある³⁰⁾。したがって、交通車両の特徴の面からも、寒冷地の内蒙古自治区における農村道路の整備は、摩耗に対する抵抗性が高いコンクリート舗装により行われることになる。

コンクリートの摩耗現象は、対象とする構造物の種類によって作用する荷重が変わるため、摩耗機構が異なる試験機を用いた場合に異なる結果がでることもある。したがって、コンクリートの摩耗試験を行う際には、**Table 3-1**に示すような摩耗の分類³¹⁾を踏まえて、対象とする摩耗機構を明確にし、試験方法を選択しなければならない。

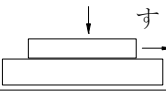
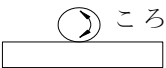
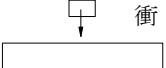
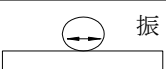
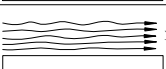
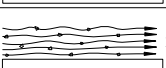
中国における従来のコンクリート舗装の設計は、強度評価のみで行われていたため、摩耗に対する耐久性の評価が欠けている。そのため、供用耐用年数の評価が明らかにされておらず、劣化した路面状態のまま使用され続けており、耐久性指標として摩耗抵抗性を加えた舗装の設計を確立することが急務になっている。

そこで中国では、GB/T 16926-1997「コンクリートおよびその製品の耐摩耗性の試験方法」が国家標準として定められ、1998年2月1日から正式に施行されるようになった³²⁾。中国交通部では、この方法でコンクリート供試体表面の摩耗深さを測定し、コンクリート舗装版の耐摩耗性を評価している。GB/Tは、カナダ標準MA20の「コンクリートの異形路面煉瓦」付録Dの耐摩耗試験方法およびアメリカASTM C779/C「コンクリート水平表面の耐摩耗試験方法」(Fig.3-1)に準拠して策定されたものである³³⁾。摩耗試験機は、回転するボールベアリングによって供試体を摩耗させるころがり摩耗構造である。

回転式舗装試験による各種タイヤのすりへり試験結果によると、普通トラックタイヤではほとんどすりへりが生じず、スパイクタイヤによる摩耗現象であるタイヤと路面の相対運動はころがり運動になる³⁴⁾。そのため、ころがり摩耗試験であるGB/T, MA, ASTMは、摩耗機構としては、回転式舗装試験のスパイクタイヤによる摩耗現象と見なすことができる。

中国では、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための摩耗試験の必要性およびその実施数が今後増す方向にあることから、GB/Tを踏まえつつも手軽に試験を行うことができる簡易な摩耗試験機が必要となっている。そこで本研究では、GB/Tよりも摩耗材である剛球数が少なく、回転速度が小さく、GB/Tでは一定にされている摩耗材の載荷力を0~120Nに変化させることができる簡易な摩耗試験機を作製し、材齢および養生条件を変えたモルタル供試体とコンクリート供試体による摩耗試験を実施することで、この摩耗試験機の実用性を評価した。

Table 3-1 摩耗の分類
Classification of abrasion

作用要素	摩耗機構	
	相対運動の種類	応力が主となる相互作用
		表面疲労 アブレージョン
固体/固体 (金属, ポリマー, 鉱物など) 潤滑材の有無	すべり 	すべり摩耗
	ころがり 	ころがり摩耗
	衝撃 	衝撃摩耗 *1
	振動 	フレットイング摩耗 *2
固体/液体	流れ 	キャビテーション摩耗
固体/液体+粒子	流れ 	液体エロージョン *3

*1 固体と固体との間の衝突による摩耗

*2 軸受が微小振動を受けて凹痕を生じる摩耗や、繰返し荷重が作用するボルト・リベット結合部にわずかなすべりが繰返し作用することによって生じる摩耗

*3 固体と土粒子などの粒子を含む液体との間の摩耗



Fig.3-1 摩耗試験 ASTM C 779 による試験の様子 ²⁶⁾

Situation of abrasion test ASTM C 779

3.2 摩耗試験の概要

3.2.1 摩耗試験機の概要

GB/T の摩耗試験機の構造は、**Fig.3-2** に示すとおりである。主な構造は、回転軸、注水口、摩耗材(剛球)からなる。GB/T の試験方法は、次のとおりである。

- 供試体を供試体保持金具でセットし、モーターで摩耗材を回転させ回転数が 30 回になった段階でモーターを停止し、摩耗深さを測定する。この摩耗深さを初期摩耗深さとする。
- 回転数が 1,000 回ごとに摩耗深さを測定し、摩耗深さが 1.5mm 以上あるいは回転数が 5,000 回に達したときに試験を終了する。

ここで、摩耗深さは、摩耗材で削られた摩耗溝の 4 箇所 (90°間隔) で測定した深さの平均値である。ただし、4 箇所で測定した摩耗溝の深さの測定精度は 0.01mm であり、同じ条件で作製した 3 体供試体間の摩耗深さの偏差 (試験許容偏差) が 15%以内でなければならない。また、注水口から水を噴入し、摩耗粉は常に除去する。

GB/T, MA, ASTM および本研究で作製した BBM の各摩耗試験機の特徴を **Table 3-2** に示す。GB/T を踏まえて作製した簡易な摩耗試験機である BBM の概略図を **Fig.3-3** に示す。BBM は、ジャッキ、ばね、供試体保持金具、摩耗材、モーター、加減速装置、扇風機、機体からなる。GB/T と BBM の主な相違は、次のとおりである。

- 回転速度は、GB/T (出力 1.2kW) が 1,000rpm と高速であるのに対して、BBM (出力 0.1kW) ではモーターを小型化したことから 70rpm と低速である (回転速度は本研究のモルタル供試体の試験結果を踏まえて決定

した)。

- GB/T では回転軸の重さが摩耗材の載荷力になることから一定値であるのに対して、BBM では供試体の下に配置したジャッキにより、摩耗材の載荷力を 0~120N に設定できる。
- 摩耗材は、GB/T と BBM とともに剛球であるが、GB/T が直径 16mm で 13 個であるのに対して、BBM では直径 20mm の剛球を 3 個としている。
- GB/T では摩耗溝に溜まる摩耗粉を除去するために注水口から水を噴入するが、BBM では扇風機で常時風を吹き付けて摩耗粉を除去している。

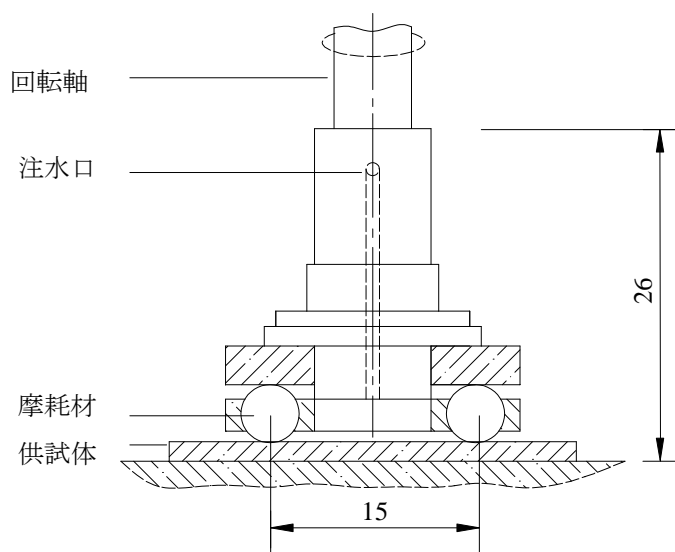


Fig.3-2 摩耗試験機の構造(GB/T)
Structure of test machine for abrasion resistance (GB/T)

Table 3-2 耐摩耗機の主要なパラメーターの比較
Comparison of various standards of abrasion testing

パラメーター	GB/T	ASTM	MA	BBM
回転数速度(rpm)	1,000	1,000	1,000	70
摩耗材(Ball bearing)				
剛球数×直径(mm)	13×15.875	8×18.25	12×15.875	3×20
摩耗材載荷力(N)	154	157	142	0~120

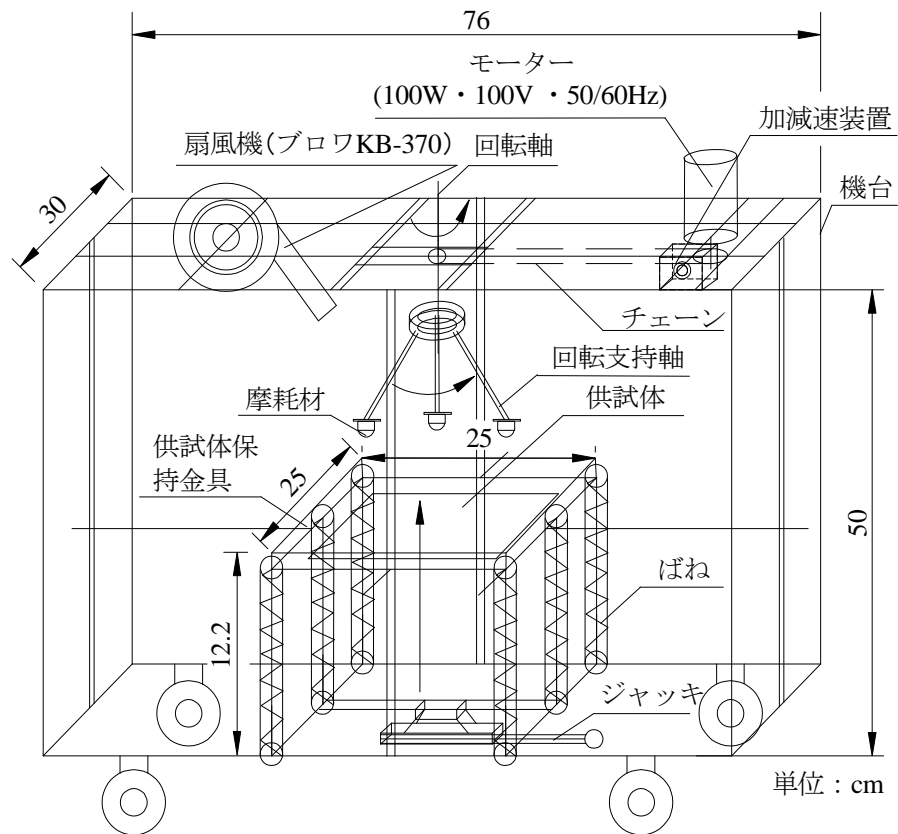


Fig.3-3 摩耗試験機の概略図(BBM)
Schematic diagram of test equipment for abrasion resistance(BBM)

摩耗材の載荷力は、ジャッキと供試体保持金具の間に設置されるコイルばねの収縮長さを測定し、式(1)で求める。

$$F = A \cdot K \cdot x \quad (1)$$

ここに、 F ：摩耗材の載荷力(N)、 K ：コイルばねの定数(N/mm)、 x ：コイルばねの収縮長(mm)、 A ：コイルばねの本数、である。

BBM では、長さ 122mm、コイル平均径 27.5mm、 $K=2\text{N/mm}$ の圧縮コイルばねを 6 本使用している。

このように本研究で作製した BBM は、GB/T に比べて小型、簡便、廉価になることをもとに設計している。

GB/T では、摩耗抵抗性の評価指標として摩耗深さを規定しているため、BBM においても摩耗深さを評価指標とする。摩耗深さは、GB/T と同様に摩耗材で削られた摩耗溝の 4 箇所（90°間隔）で測定した深さの平均値とする。BBM における供試体の形状・寸法と摩耗深さの測定箇所を **Fig.3-4** に示す。BBM に設置する供試体の寸法は、幅×長さ×厚さで 25×25×5cm である。

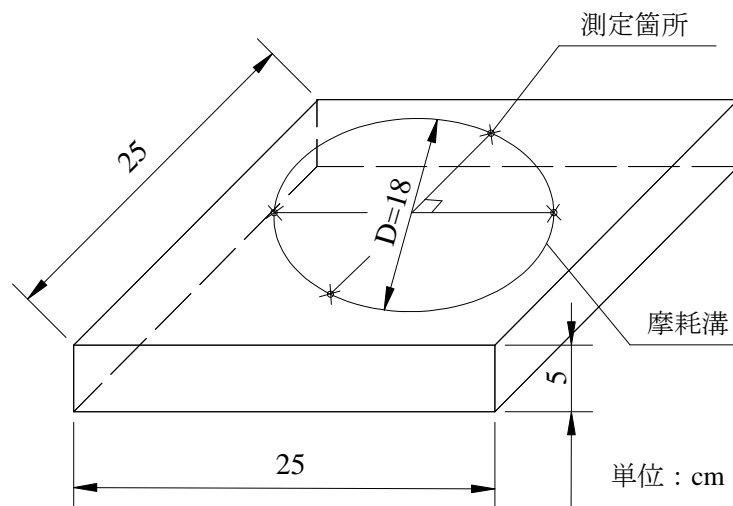


Fig.3-4 供試体の形状・寸法と摩耗深さの測定箇所
Points of measurement of abrasion depth

3.2.2 摩耗試験用の供試体の作製

簡易な摩耗試験機である BBM (Fig.3-5) の実用性の評価を行うために、モルタルおよびコンクリートの供試体を作製した。

作製したモルタル供試体は、摩耗試験用 (25×25×5cm) と強度試験用 (4×4×16cm) である。モルタルの配合は Table 3-3 に示すとおりである。セメントは、モルタルの強度と摩耗深さの関係を検討するために普通ポルトランドセメント (トクヤマセメント) と超速硬セメント (ライオンシスイ 115, 住友大阪セメント) の 2 種類とした。細骨材は標準砂を用いた。モルタル供試体は、JIS R 5201-1997「セメントの物理試験方法」に準拠して作製した。モルタル供試体は、両セメントとも摩耗試験用 2 体、強度試験用 3 体を作製し、試験開始材齢である 28 日まで 20±1℃一定の恒温水槽中での水中養生を行った。

作製したコンクリート供試体は、摩耗試験用 (25×25×5cm) と強度試験用 (10×10×40cm) である。コンクリートの配合は Table 3-4 に示すとおりである。セメントは普通ポルトランドセメント (トクヤマセメント) を使用し、細骨材は鳥取県産の山砂(表乾密度 2.59 g/cm³, 吸水率 1.59%, 粗粒率 1.84) , 粗骨材は鳥取県産の砕石(表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.62%, 粗粒率 6.69, 最大寸法 20mm)を使用した。混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。目標スランプは 2.5±1cm, 水セメント比は 45%である。コンクリートの摩耗抵抗性においては、粗骨材の種類および細骨材率が大きな影響を与えるが、本研究では粗骨材の種類および細骨材率をさまざまに変えて摩耗試験に供する供試体を作製せず、強度と摩耗深さの関係を検討するために供試体の養生条件および材齢を変えて摩耗試験を実施した。

Table 3-3 使用材料とモルタルの配合
Material and mix proportion of mortar

セメント種類	W/C (%)	フロー値 (mm)	細骨材
普通	50	108	標準砂
超速硬	50	191	標準砂

Table 3-4 コンクリートの配合
Mix proportion of concrete

粗骨材の最大寸法(mm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	45	4	39	144	320	722	1,133	1.92

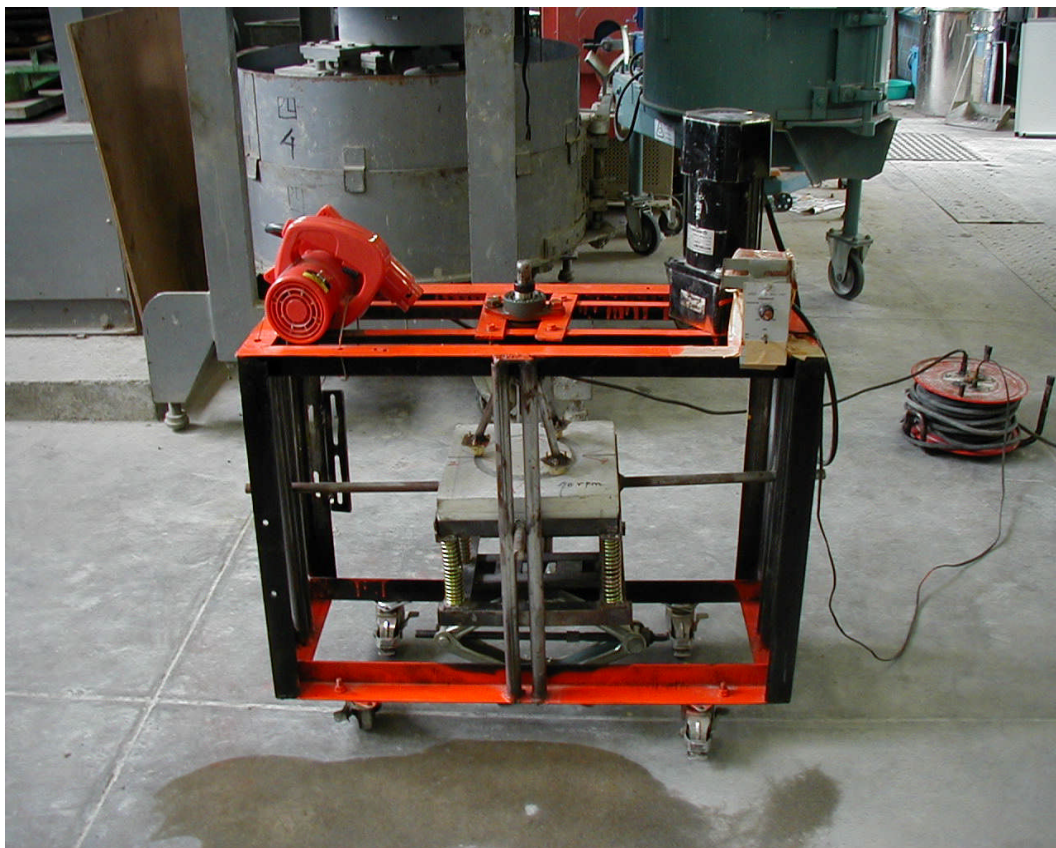


Fig.3-5 BBM 摩耗試験機の写真
Photograph of a BBM abrasion test machine

コンクリートの練混ぜには、パン型強制練りミキサ(容量 70L)を使用した。コンクリートの練混ぜ方法は、まず所定量の粗骨材、細骨材、セメントを投入し 30 秒間の空練り後、あらかじめ混和剤を溶かした水を加えてさらに 3 分 45 秒間の練混ぜによりコンクリートを作製した。

作製したコンクリート供試体は、材齢 1 日で脱型後、所定の試験開始材齢まで、 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 一定の恒温水槽中での水中養生(I)，材齢 28 日まで $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 一定の恒温水槽中での水中養生した後に試験開始材齢まで温度 20°C 一定にコントロールした恒温室内での気中養生(II)，の 2 方法で養生した。

3.2.3 試験方法

モルタル供試体の試験開始材齢は 28 日であるが、コンクリート供試体の試験開始材齢は 28 日、56 日、91 日の 3 材齢である。コンクリート供試体では摩耗試験前の養生も 2 方法あることから、各養生方法および各試験開始材齢の供試体を以降では次のように記す。養生が I で試験開始材齢が 28 日の供試体は 28 I，56 日は 56 I，91 日は 91 I，養生が II で試験開始材齢が 56 日の供試体は 56 II，91 日は 91 II である。コンクリート供試体数は、各養生方法および各試験開始材齢について 3 体ずつである。コンクリート供試体の摩耗試験には、全ての供試体とも表面仕上げ面を使用した。

摩耗抵抗性の評価指標である摩耗深さは、モルタルおよびコンクリート供試体の両者ともダイヤルゲージ(感量 $1/100\text{mm}$)で測定した。ここで、コンクリート供試体においては、摩耗深さに加えて摩耗体積も評価指標とする。これは、コンクリートの表面はモルタルで覆われており、BBM で対象にしているところがり摩耗において、摩耗材が粗骨材に達する前の表面のモルタルの影響を摩耗抵抗性の評

価に考慮するためである。摩耗体積は、摩耗材で削られた摩耗溝に一定粒度(0.4～0.6mm)の砂を注ぎ、その体積により測定した。

摩耗試験は 20 分間行い、5 分間ごとに供試体の摩耗深さと摩耗体積を測定した。摩耗材は 60 分の使用ごとに新しい剛球に取替えている。

モルタルおよびコンクリート供試体の載荷力は、前者の場合は 80N、後者の場合は 108N としている。この載荷力は、BBM への供試体の固定安定性を事前試験で検討した上で式(1)より求めた。

モルタル供試体における摩耗材の回転速度は、BBM のモーターの性能を考慮して回転速度を 3 段階(60, 70, 80rpm)に変えて摩耗試験を行った。コンクリート供試体においては、モルタル供試体の摩耗試験結果から、GB/T の試験終了条件である摩耗深さ 1.5mm を最も早く達成できると考えられる回転速度を設定することにした。また、載荷力を 108N とすることによって、摩耗時間 20 分で摩耗深さ 1.5mm を達成できることを事前試験で確認した。

3.3 試験結果および考察

3.3.1 モルタル供試体

モルタル供試体の摩耗試験に供した材齢 28 日における圧縮強度と曲げ強度は、3 体の供試体の平均値で普通ポルトランドセメントが 54.8, 8.7 N/mm², 超速硬セメントが 23.8, 6.6 N/mm²であった。

摩耗深さと経過時間の関係を普通ポルトランドセメントについては **Fig.3-6** に、超速硬セメントについては **Fig.3-7** に示す。各プロットとも 2 体の供試体の平均値である。**Fig.3-8** に摩耗深さの測定実験風景を示す。

摩耗深さと摩耗時間の関係は、普通ポルトランドセメントと超速硬セメントの両者とも線形を示し、摩耗時間が長くなるほど摩耗深さは大きくなった。摩耗時間 20 分における摩耗深さは、回転速度が 70rpm のときに、普通ポルトランドセメントで 1.1mm、超速硬セメントで 3.3 mm となった。回転速度が 60rpm のときは 0.8, 2.5 mm となり、回転速度が 80rpm のときは 0.5, 1.2 mm となった。回転速度が 80rpm のときの摩耗深さが、70rpm および 60rpm よりも小さくなった理由としては、今回の試験における載荷力が事前試験の結果を踏まえて回転速度に係わらず 80N 一定としており、回転速度が大きくなることで摩耗材に滑りが生じたためであると思われる。

モルタル供試体の摩耗試験結果からは、普通ポルトランドセメントの供試体が超速硬セメントのものよりも摩耗抵抗性が優れていることがわかる。モルタルおよびコンクリートの品質と摩耗抵抗性の関係については、圧縮強度および曲げ強度と高い相関性があることは多くの既往の研究により確認されている^{35,36,37}。本研究においても、普通ポルトランドセメントのモルタル供試体の圧縮強度および曲げ強度は超速硬セメントのものよりも大きく、既往の研究と同じ結果が得られている。このことから、本研究において作製した簡易な摩耗試験機である **BBM** は、ころがり摩耗の試験機としての実用性は十分にあることがわかる。

コンクリート供試体の摩耗試験における回転速度をモルタル供試体の試験結果を参考に決定する。コンクリート供試体は普通ポルトランドセメントで作製していることから、普通ポルトランドセメントの試験結果を参照すると、**GB/T** の試験終了条件である摩耗深さ 1.5mm を最も早く達成できると考えられる回転速度は 70rpm のときである。そこで、コンクリート供試体の摩耗試験における回転速度は、70rpm と設定する。なお、回転速度を 70rpm とし、載荷力を 108N にした場合、摩耗時間 20 分以内に摩耗深さ 1.5mm を達成できる。

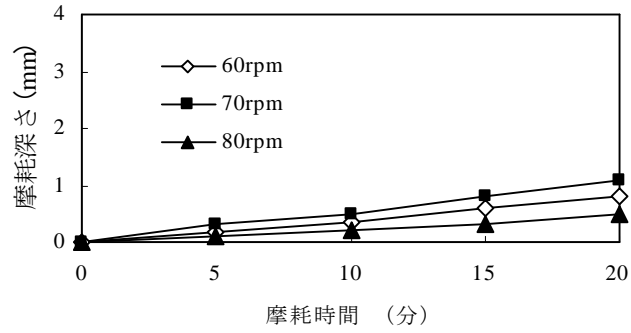


Fig.3-6 普通セメントを用いたモルタルの摩耗時間と摩耗深さ
Test time and abrasion depth of mortar with ordinary portland cement

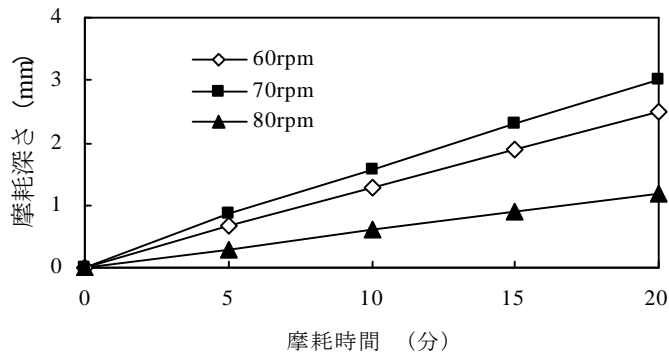


Fig.3-7 超速硬セメントを用いたモルタルの摩耗時間と摩耗深さ
Test time and abrasion depth of mortar with regulated set cement



Fig.3-8 摩耗深さの測定
Measurement of the abrasion depth

3.3.2 コンクリート供試体

角柱供試体で測定した圧縮強度の経日変化を **Fig.3-9** に示す。各プロットとも 3 体の供試体の平均値である。コンクリート供試体の圧縮強度は、水中養生である I および水中養生した後に試験開始材齢まで気中養生である II の両者とも材齢の進行とともに増加しているが、Iの方がIIよりも同材齢においてやや高い値を示している。

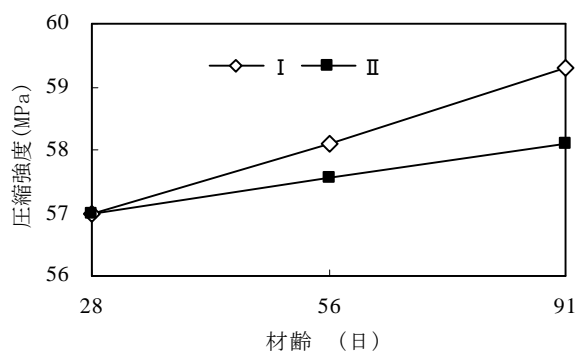


Fig.3-9 供試体の圧縮強度
Compressive strength of concrete specimen

摩耗深さと摩耗時間の関係を **Fig.3-10** に示す。各プロットとも 3 体の供試体の平均値である。摩耗深さは、養生方法および試験開始材齢に拘わらず同じような傾向を示すことがわかる。28 I を例に、摩耗深さと摩耗時間の回帰式を求めると図中に実線で示すように二次曲線で表すことができ、この非線形関係は養生方法および試験開始材齢に拘わらず同じである。摩耗時間の初期において摩耗深さが大きく、摩耗時間が経つほど小さくなるのは、コンクリートの表面にあるモルタルがまず速やかに摩耗し、その後に表れる粗骨材が摩耗材による摩耗に抵抗するからである³⁸⁾。また、摩耗深さと摩耗時間の関係が二次関数の非線形性関係になることは、**Fig.3-11** に示す堀口ら³⁹⁾が ASTM の摩耗試験で行った結果でも示

されており，図中の実線がその回帰曲線である。また，JIS A 1451-1970 に定められた摩耗試験機を用いて行われた吉岡ら(1975)の試験結果とも一致する。このように，本研究において作製した簡易な摩耗試験機である BBM でも，既往の研究と同様の摩耗現象を評価できることがわかる。

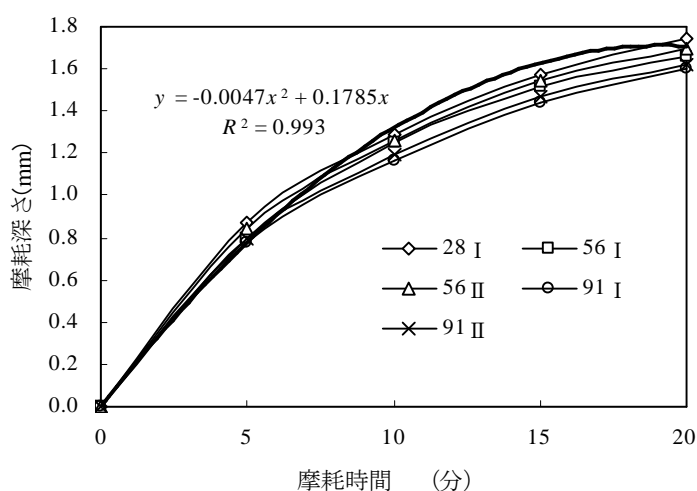


Fig.3-10 摩耗深さと摩耗時間の関係
Test time and abrasion depth of concrete

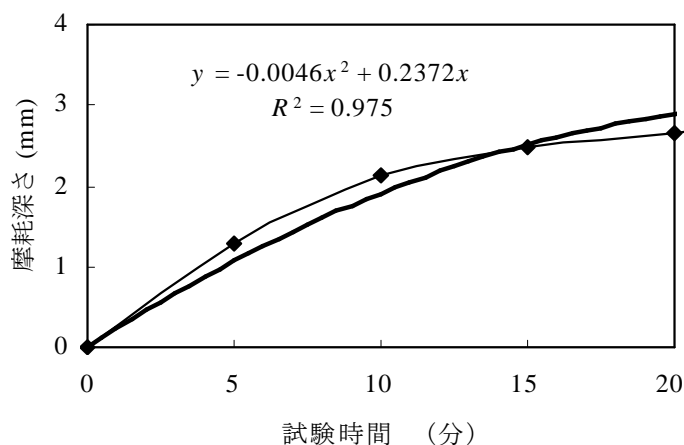


Fig.3-11 摩耗深さと摩耗時間の関係 (堀口ら, 1992)
Test time and abrasion depth of concrete

各供試体の摩耗深さは、摩耗材で削られた摩耗溝円形（D=18cm）の4箇所（90°間隔）で測定した深さの平均値であるが、Table 3-5 に示すようにいずれの供試体も偏差が2%以内であった。この結果は、楊⁴⁰がGB/Tの摩耗試験で得た2.21%よりも小さいことから、均一な摩耗という点でBBMはGB/Tと同程度以上の精度を有することがわかる。

Table 3-5 BBMの供試体の摩耗偏差
Abrasion deviation for BBM of specimens

供試体	28 I			56 I			56 II			91 I			91 II		
	測定値	平均値	偏差 (%)	測定値	平均値	偏差 (%)	測定値	平均値	偏差 (%)	測定値	平均値	偏差 (%)	測定値	平均値	偏差 (%)
A	1.74	1.74	0.63	1.71	1.69	1.47	1.71	1.73	1.03	1.60	1.56	1.73	1.64	1.63	1.66
	1.72			1.74			1.54								
	1.75			1.65			1.55								
	1.74			1.71			1.53								
B	1.71	1.72	0.41	1.65	1.66	0.68	1.75	1.72	1.59	1.65	1.63	0.97	1.65	1.63	0.97
	1.72			1.67			1.62								
	1.73			1.64			1.64								
	1.72			1.66			1.61								
C	1.77	1.75	0.86	1.62	1.62	0.93	1.65	1.66	1.09	1.65	1.61	1.60	1.62	1.59	1.18
	1.74			1.63			1.62								
	1.73			1.59			1.58								
	1.74			1.62			1.60								

コンクリート供試体の摩耗進行過程と摩耗時間の関係を摩耗体積から表したのが Fig.3-12 である。各プロットとも3体の供試体の平均値である。摩耗体積は、摩耗時間の経過とともに増加率が減少していることがわかる。これは、摩耗時間の初期で表面のモルタルが速やかに摩耗し、その後に表れる粗骨材はモルタルより摩耗されにくいからである。摩耗抵抗性の評価指標である摩耗深さの信頼性を補う指標として、摩耗体積の利用性は十分にあることがわかる。これは、計測する摩耗深さが特定の場所（点）のデータであることに對し、摩耗体積を精度よく計測できれば、摩耗深さの平均値データを正確に取得できるからである。

試験材齢である 28, 56, 91 日を横軸にとって、材齢と摩耗深さおよび摩耗体積の関係を示したのが Fig.3-13, Fig.3-14 である。各プロットとも 3 体の供試体の平均値である。Fig.3-9 に示したように材齢の進行とともに強度は増すことから、試験開始材齢が遅くなるほど摩耗深さおよび摩耗体積が小さくなる。摩耗試験後の様子を Fig.3-15 に示す。

ただし、摩耗試験に供する段階で乾燥状態にある II は、湿潤状態にある I よりも若干ではあるが摩耗が進行しており、摩耗作用を受ける際のコンクリートの乾湿が摩耗抵抗性に及ぼす影響を既往の研究^{41,42)}と同様に知ることができる。

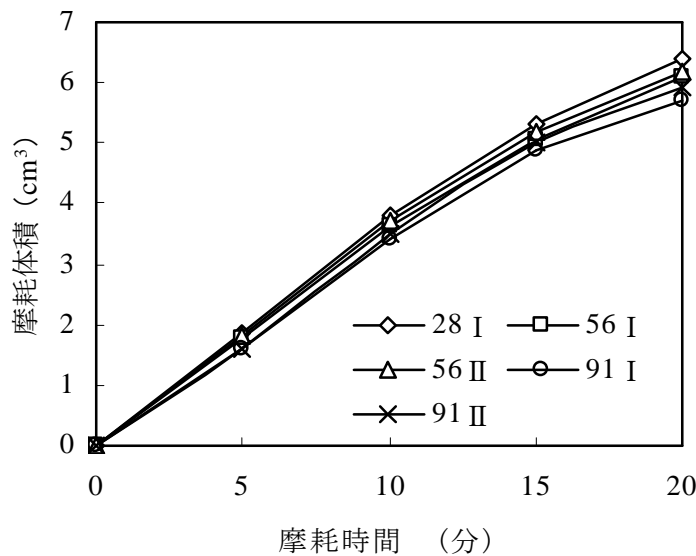


Fig.3-12 摩耗体積と摩耗時間の関係
Test time and abrasion volume of concrete

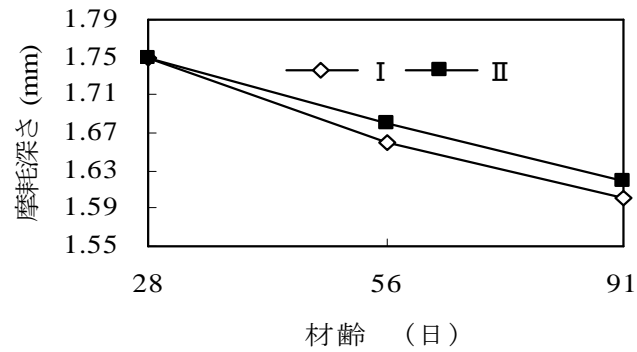


Fig.3-13 摩耗深さと材齢の関係
Abrasion depth and curing day

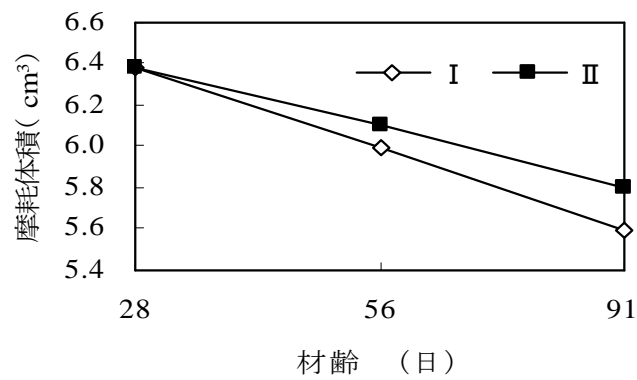


Fig.3-14 摩耗体積と材齢の関係
Abrasion volume and curing day



Fig.3-15 摩耗試験後の様子
State after the abrasion test

3.4 結論

本研究により得られた知見をまとめると、次のようになる。

- 1) 本研究で作製した GB/T よりも摩耗材である剛球数が少なく、回転速度が小さく、GB/T では一定にされている摩耗材の載荷力を 0~120N に変化することができる簡易な摩耗試験機(BBM)は、舗装コンクリートの摩耗抵抗性として重要になるころがり摩耗を評価することができる。
- 2) BBM の摩耗試験により測定される摩耗深さおよび摩耗体積は、既往の研究と同様な傾向を示し、摩耗深さおよび摩耗体積は摩耗時間と高い相関性を示す。
- 3) モルタル供試体の摩耗試験において、摩耗深さは摩耗時間と線形の関係にある。
- 4) コンクリート供試体の摩耗試験において、摩耗深さおよび摩耗体積は摩耗時間と二次関数で示される非線形性関係にある。
- 5) BBM によりコンクリート供試体の摩耗抵抗性を評価する上で、初期の表面のモルタルの摩耗とその後の粗骨材が露出した摩耗は、摩耗進行過程として区別される。
- 6) BBM における摩耗深さの偏差は 2.0%以内であり、GB/T の 2.21%以内よりも小さく、均一な摩耗という点で BBM は GB/T 同程度以上の精度を有する。

第4章

凍結融解作用を受けた中国産フライアッシュを 混入した舗装コンクリートの耐摩耗性

4.1 緒論

第1章に述べたように、近年、中国内陸部の内蒙古では、中国政府の西部大開発「西部地域の交通建設は西部開発の第一要務」方針に基づいて交通網の建設が優先的に実施されている。第11次5カ年計画（2006～2010年）の発展要領では、農業資本不足の問題を解決し、農村の生産と生活の条件を改善し、農民の医療、教育、交通などの公共サービスのレベルを引き上げることを目的とした「社会主義新農村建設」が方針として打ち出されており、農村におけるインフラ整備の強化に基づいた農村道路の整備が進められている²⁾。

寒冷地である内蒙古では、冬期におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用によって道路舗装が摩耗を受ける。加えて、農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことから、摩耗の進行も著しい。コンクリート舗装の摩耗量は、アスファルト舗装の1/2程度と小さく、高い耐摩耗性を有することから、寒冷地におけるコンクリート舗装の割合は温暖地域よりも多い傾向にある。したがって、寒冷地である内蒙古では、交通車両の特徴の面からも、摩耗に対する抵抗性の高いコンクリート舗装により農村道路の整備が行われることになる。

一方、多量に必要なコンクリート舗装の材料としては、西電東送計画に基づいて内蒙古自治区に建設されている石炭火力発電所から排出される石炭灰の利用を考えることができる。内蒙古では、石炭灰をコンクリート、レンガ、路盤

安定材料として利用しているが、利用率が 20%に達しない状況である。石炭灰をコンクリート舗装材料として利用するためには、舗装コンクリートとしての耐摩耗性に加えて、内蒙古の気候を踏まえた凍結融解作用による劣化も考えなければならない。つまり、凍結融解作用を受けた舗装コンクリートの耐摩耗性を調べることが内蒙古における農村道路の整備を図るためにも重要な課題となる⁴³⁾。

コンクリート舗装の荷重支持機構は、主にコンクリート版の曲げ強度と地盤反力に依存している。そのために、他の構造物が圧縮強度を指標に設計されるのに対し、舗装コンクリートは曲げ強度を指標に設計される。中国では、セメントコンクリート舗装の最低設計曲げ強度が日本の基準よりも 0.5N/mm^2 低い 4N/mm^2 とされている⁴⁴⁾。また、寒冷地である内蒙古の舗装コンクリートの特徴としては、荷重、摩耗、凍害に抵抗するために舗装コンクリート版厚の基準が 220mm 以上となっている。

本研究では、内蒙古の気候およびコンクリート舗装としての特徴を考慮し、内蒙古の石炭火力発電所で排出されたフライアッシュを混入した舗装コンクリートの実用性を検証することを目的として、中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性を検討した。

4.2 実験材料および方法

4.2.1 供試材料

実験に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ）、粗骨材が最大寸法 20mm の碎石、細骨材が山砂である（**Fig.4-1**）。骨材の物理的性質を **Table 4-1** に示す。また、混和剤はポリカルボン酸エーテル系の

高性能 AE 減水剤を使用した。水は 20℃にした水道水である。フライアッシュは第 2 章に述べた中国内モンゴル通遼市の石炭火力発電所で採取されたものである。

Table 4-1 使用骨材の物理的性質

Physical properties of aggregate

骨材種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	2.59	1.59	1.84
粗骨材	2.60	1.62	6.69



細骨材



粗骨材

Fig.4-1 粗骨材と細骨材
Coarse aggregate and fine aggregate

4.2.2 実験方法

基本的な示方配合を **Table 4-2** に示す。本実験では、舗装コンクリートが対象であるため、目標スランプが $2.5 \pm 1\text{cm}$ 、水結合材比が 45%、目標空気量が 4%、単位粗骨材容積が一定になるような配合条件とした。粗骨材量は一定であるが、目標スランプを得るために細骨材量は各配合で異なる。フライアッシュの置換はセメント質量の内割とし、置換率は 0、30、50%の 3 水準とした。

作製したコンクリート供試体は、舗装コンクリートの指標となる曲げ強度を求めするため、そして凍結融解試験 (JIS A 1148-2001) に供するために、 10×10

×40cm の角柱供試体とした。打設した供試体は、材齢 1 日で脱型後、所定の試験日まで 20℃恒温水槽中での水中養生を行った。

Table 4-2 示方配合
Mix proportion of concrete

配合種別	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単 位 量(kg/m ³)					
			水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤
F0	45	39	144	320	0	722	1,133	1.92
F3	45	38	144	224	96	705	1,133	2.88
F5	45	37	144	160	160	653	1,133	3.32

本実験では、中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートが凍結融解作用を受けたときの耐摩耗性を検討することが目的であることから、凍結融解試験を行った後に摩耗試験を行った。凍結融解試験は、JIS A 1148-2001 の水中凍結融解試験方法(A 法)であり、凍結融解試験開始材齢は標準の材齢 28 日とフライアッシュの長期材齢における強度発現特性を踏まえた材齢 91 日の 2 種類とした。凍結融解試験は 300 サイクルまで行い、途中 20 サイクルごとに質量、超音波伝播時間、共鳴周波数（動弾性係数）の測定を行った。凍結融解試験に供した供試体の数は、F0、F3、F5 の 3 水準とも 3 本である。JIS A の凍結融解試験機をそれぞれ Fig.4-2(A 法) と Fig.4-3(B 法)に示す。凍結融解試験終了後の供試体は水洗し、そのまま摩耗試験に供した。摩耗試験機は中国の国家標準である GB/T16926-1997「コンクリートおよびその製品の摩耗抵抗性の試験方法」を参考に試作したものである。

摩耗試験機の概略図を Fig.4-4 に示す。摩耗試験機 (BBM) は、ジャッキ、ばね、供試体保持金具、摩耗材、モーター、加減速装置、扇風機、機体からなる。

摩耗材である鋼球（直径 20mm）3 個を供試体表面成形部に載荷力 115N で接地し，回転速度 90rpm で回転させるものである。摩耗時間は GB/T に準じて 20 分間とし，5 分ごとにダイヤルゲージで摩耗位置の 4 箇所を測定して，その平均値を摩耗深さとした。摩耗試験に供した供試体の数は，凍結融解試験と同じである。また，凍結融解作用の有無が耐摩耗性に及ぼす影響を検討するために，凍結融解試験に供しない同配合・寸法（10×10×40cm）の供試体も作製し，摩耗試験を行った。

一方，舗装コンクリートの指標となる曲げ強度を求めるために，10×10×40cm の角柱供試体を作製し，材齢 7，28，56，91 日における密度と曲げ強度を測定した。供試体の数は，F0，F3，F5 の 3 水準とも 3 本である。

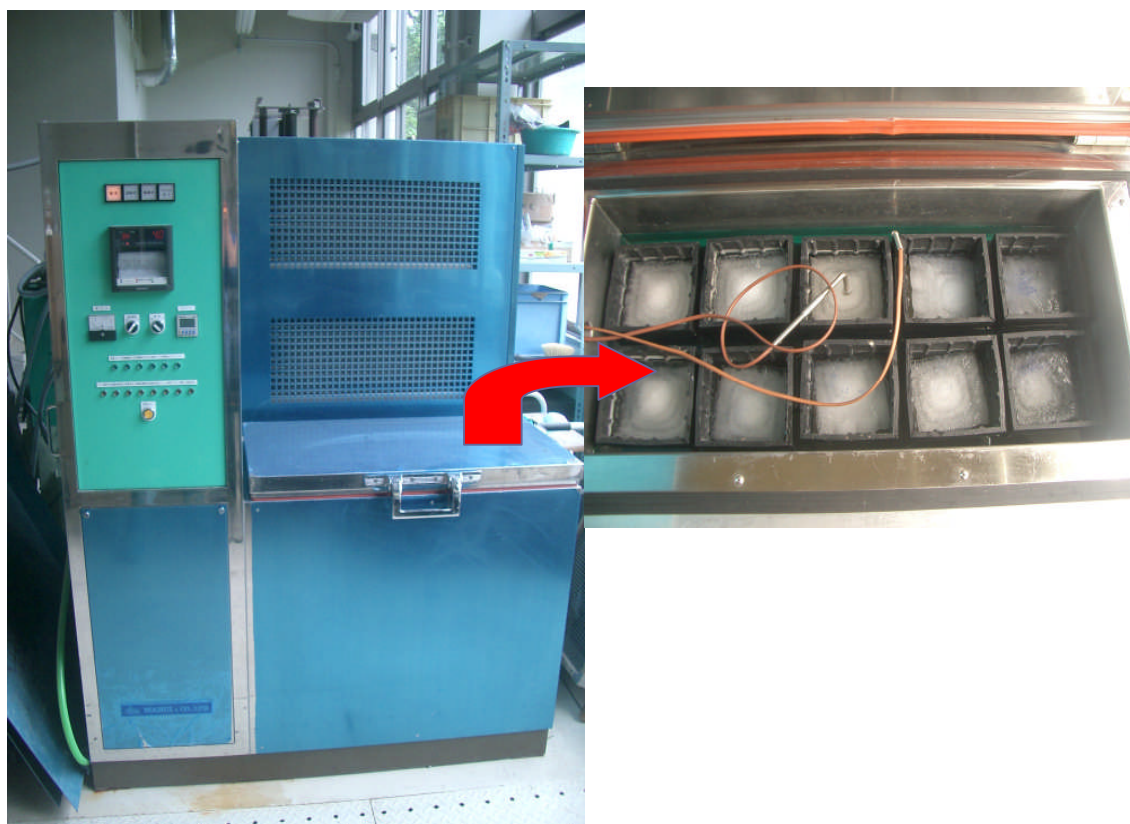


Fig.4-2 凍結融解試験機（A 法）
Freezing and thawing test (for A method)



Fig.4-3 凍結融解試験機 (B 法)
Freezing and thawing test (for A method)

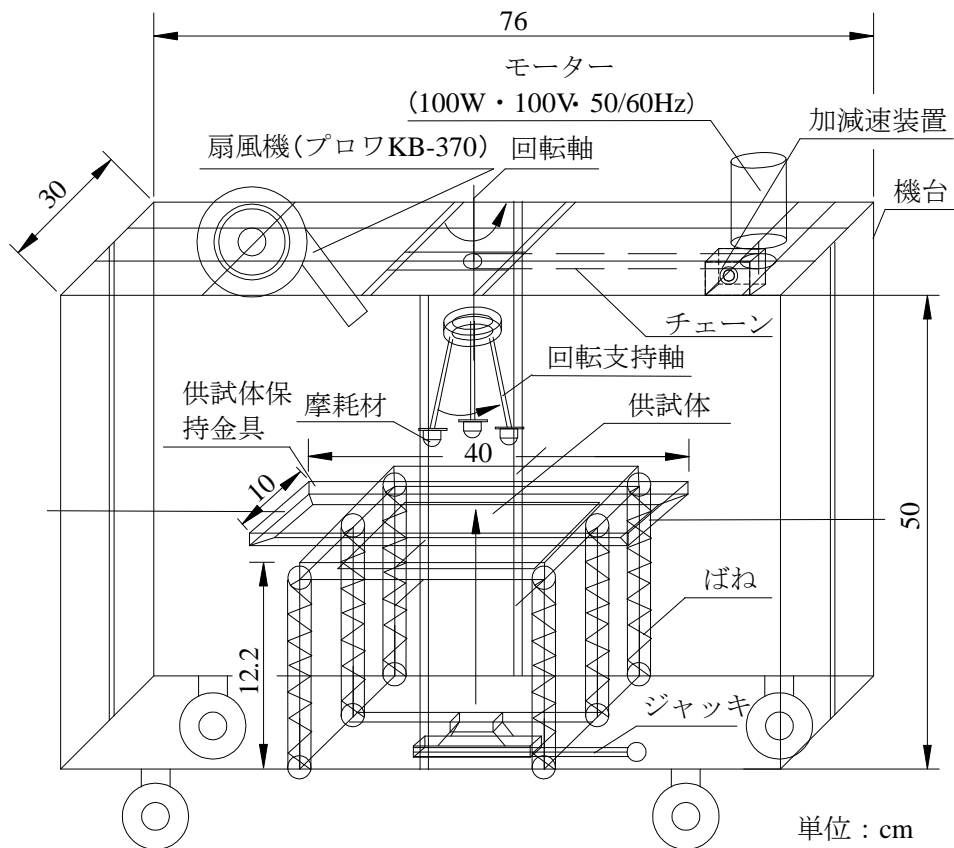


Fig.4-4 摩耗試験機の概略図
Schematic diagram of test equipment for abrasion resistance(BBM)

4.3 実験結果および考察

4.3.1 密度と曲げ強度

中国産フライアッシュを混入したコンクリートの密度と曲げ強度の結果を、それぞれ **Fig.4-5** と **Fig.4-6** に示す。また、材齢と曲げ強度の関係を曲げ強度比（各材齢の強度/28日強度）で表したものを **Fig.4-7** に示す。

フライアッシュの置換率の相違によるコンクリートの密度は、フライアッシュの密度が 2.1g/cm^3 とセメントより小さいため、フライアッシュの置換率が多くなるほど小さくなる ($F5 < F3 < F0$)。

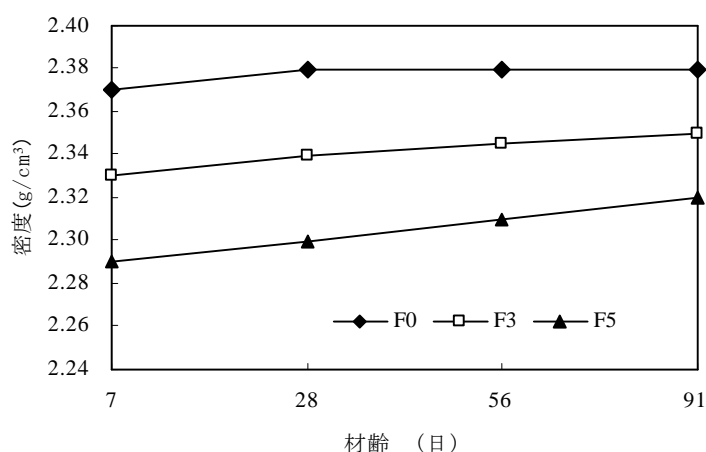


Fig.4-5 フライアッシュ置換率の異なる角柱供試体の密度
Density of cylindrical test piece with different replacement rate of fly ash

曲げ強度は、フライアッシュの置換率が多くなるほど小さくなる ($F5 < F3 < F0$)。これは、フライアッシュをセメント質量の内割で置換していることから、置換率が多くなるほどセメント量が少なくなるためであるが、材齢が進行するに従い F3 は F0 に近い値まで増加している。F5 も材齢の進行に伴い強度が増加し、材齢 28 日に対する曲げ強度比では F0 および F3 よりも大きくなっている

(F0<F3< F5)。F5 でも、曲げ強度の偏差は最大 3.28%であり、中国の一般的な舗装コンクリートの設計基準曲げ強度である 4N/mm²を材齢 28 日までに満たし、材齢 91 日では 6N/mm²を超えている。このことから、曲げ強度だけを考えれば、フライアッシュ置換率 50%以内の範囲であれば、舗装コンクリートへの適用が十分に可能であることがわかる。

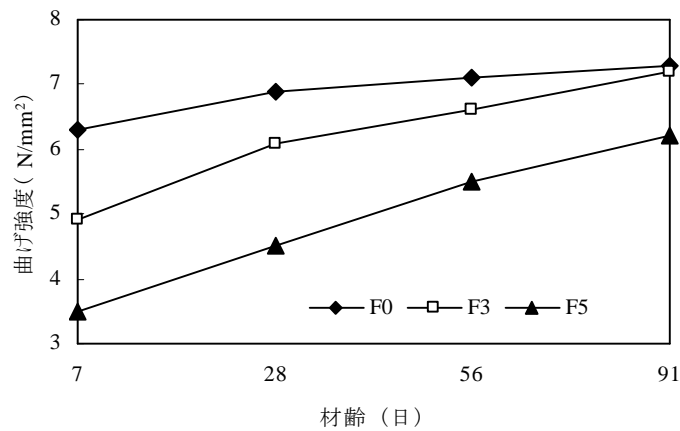


Fig.4-6 フライアッシュ置換率の異なる角柱供試体の曲げ強度
Flexural strength of prism test piece with different replacement rate of fly ash

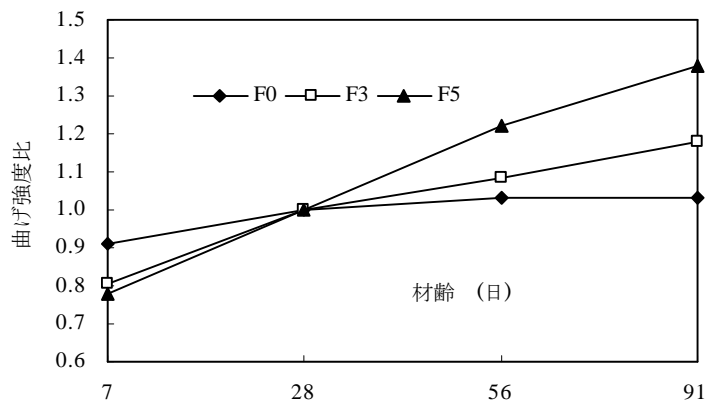


Fig.4-7 曲げ強度比
Flexural strength ratio

4.3.2 耐凍結融解性

凍結融解試験開始材齢が28日と91日の両者における相対動弾性係数を **Fig.4-8** に示す。試験開始材齢における F0, F3, F5 の 300 サイクルでの相対動弾性係数は 74.8, 74.3, 70.4%であり, 91 日の場合は 79.8, 84.2, 71.7%であった。F5 でも相対動弾性係数は 70%以上であり, 中国産フライアッシュを 50%置換しても十分な耐凍結融解性を有していることがわかる。試験風景を **Fig.4-9** に示す。

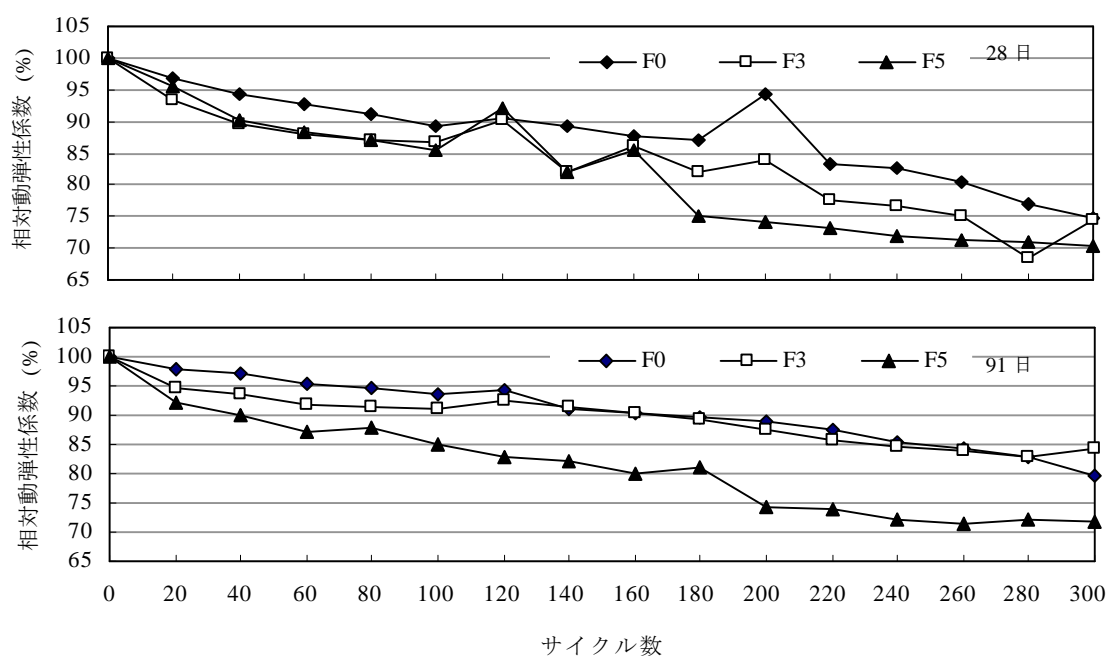


Fig.4-8 凍結融解試験における供試体の相対動弾性係数
Relative dynamic modulus of elasticity of specimens for freezing and thawing test

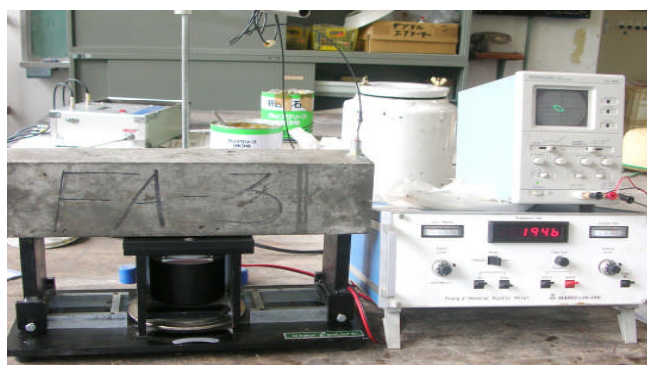


Fig.4-9 動弾性係数測定風景
Motion elasticity coefficient measurement scenery

角柱供試体の長さ方向（40cm）の超音波伝播速度を測定した結果を **Fig.4-10** に示す。フライアッシュの置換率が多くなるほど超音波伝播速度は小さくなる傾向にあるが、健全な普通コンクリートと同等な 4,000m/s 以上の値⁴⁵⁾を 300 サイクルまで保持していることから、供試体内部の凍結融解作用による劣化程度は小さいことがわかる。

質量減少率を **Fig.4-11** に示す。凍結融解サイクルの進行に伴い質量減少率は増加する。特にフライアッシュの置換率が多くなるほど増加する。試験開始材齢 28 日の F0, F3 は 80 サイクルから、F5 は 60 サイクルから供試体表面にスケーリングが生じ始め、質量減少率は 300 サイクルで F0 が 1.4, F3 が 3.1, F5 が 6.1% に達する。また、試験開始材齢 91 日の方は、材齢 28 日とほぼ同じサイクル数が進行した段階からスケーリングが生じ始め、質量減少率は 300 サイクルで F0 が 1.3, F3 が 2.1, F5 が 4.1% に達する。

凍結融解試験 300 サイクル終了後における供試体の様子を **Fig.4-12** に示す。試験開始材齢 28 日における F5 の 300 サイクル終了時の供試体表面は、ほぼ全面で均一にスケーリングが起こっており、質量減少率 6.1% は軽度なスケーリングではないことがわかる。試験開始材齢 91 日の F5 においても、300 サイクル終了時に供試体の面による相違はあるもののかなりのスケーリングが起こっており、質量減少率 4.1% も軽度なスケーリングではないことがわかる。

凍結融解サイクルの進行に伴い供試体の相対動弾性係数、超音波伝播速度は低下し、質量減少率は増加するものの、相対動弾性係数と超音波速度の関係⁴⁶⁾から供試体内部の大きな劣化は認められない。しかし、質量減少率および 300 サイクル終了時の供試体状況からは、供試体表面のスケーリングが進んでいることが認められる。このことから、本研究で作製した中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの耐凍結融解性については、スケーリングという形態で表面の劣

化は起こるが、凍結融解作用による微細なひび割れの進展によるコンクリート組織の緩みとしての内部劣化は深刻でないことがわかる。特に、内蒙古自治区の舗装コンクリート版厚の基準が 220mm 以上であることを考えると、凍結融解作用を受けたとしても剛性舗装としてのコンクリート舗装の耐力は十分に確保できることが示唆される。

凍結融解作用を受けた後における供試体の材齢 28 日と 91 日の曲げ強度を Fig.4-13 に示す。各供試体 F0, F3, F5 の 28 日で曲げ強度は 6.7, 6.1, 4.4 N/mm² であり、91 日の場合は 7.2, 7.1, 6.0 N/mm² と、凍結融解試験に供していない同配合供試体の同じ材齢との曲げ強度の差は約 0.2N/mm² であった。F5 でも、中国の一般的な舗装コンクリートの設計基準曲げ強度である 4N/mm² を材齢 28 日までに満たし、材齢 91 日では 6N/mm² となっている。

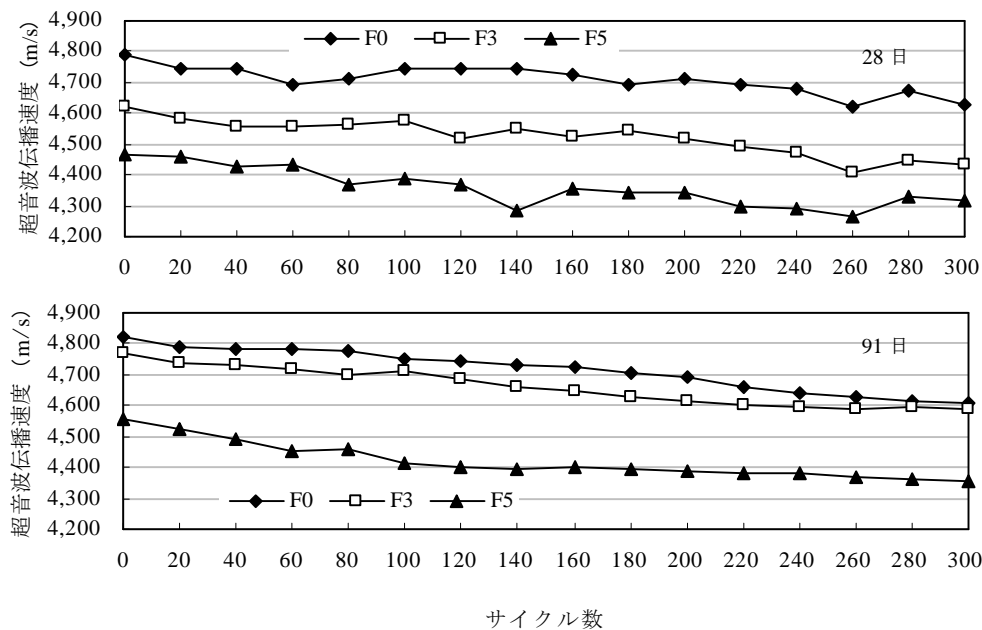


Fig.4-10 凍結融解試験における角柱供試体の超音波伝播速度
Pulse velocity ratings of specimens for freezing and thawing test

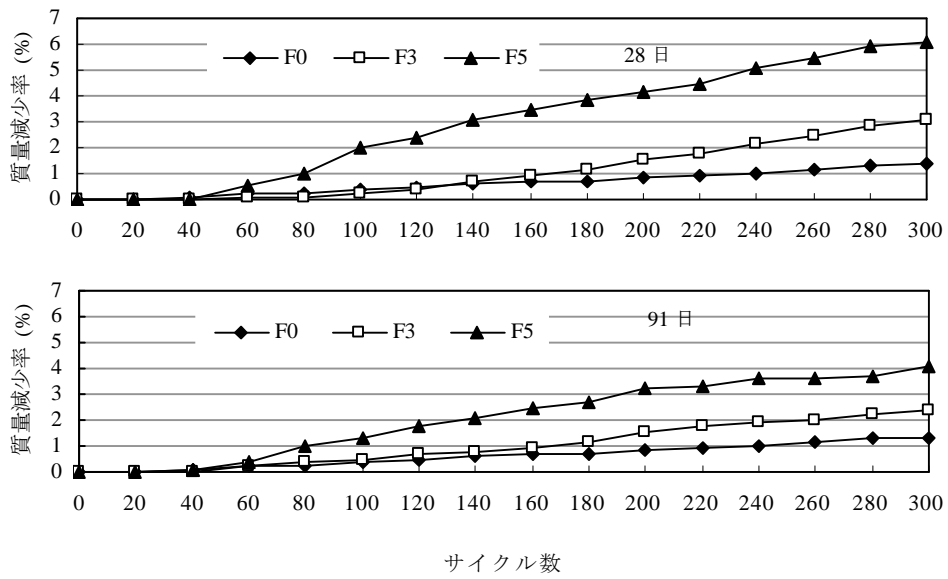


Fig.4-11 凍結融解試験における材齢 28 日と 91 日供試体の質量減少率
 Mass decrement rates of the specimens with age of 28 and 91 days
 for freezing and thawing test

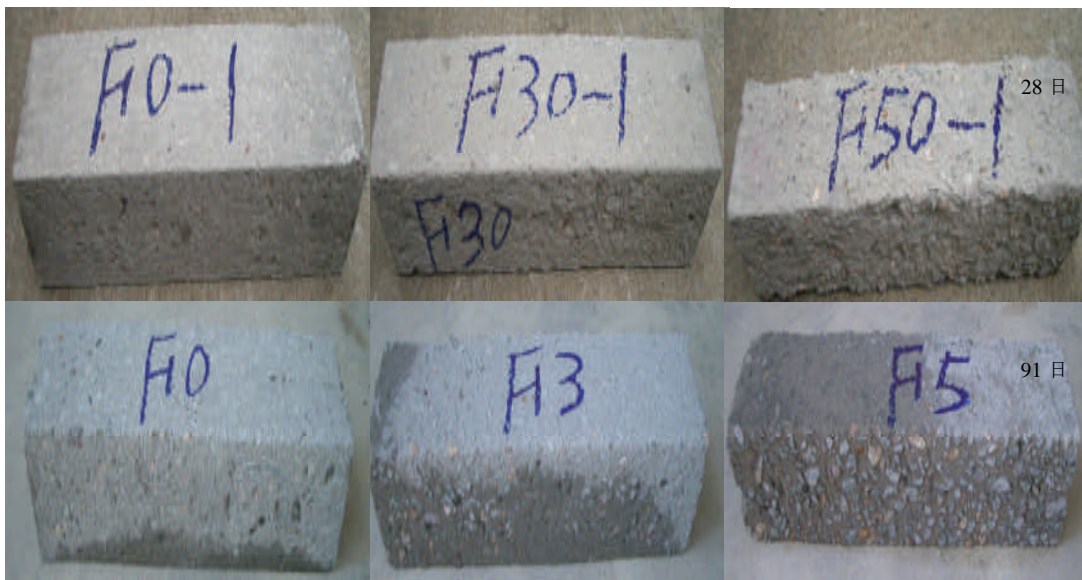


Fig.4-12 凍結融解試験終了後における供試体の様子
 Shape of the deteriorated specimens due to freezing and thawing test

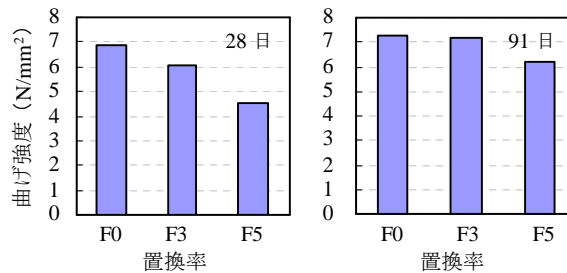


Fig.4-13 凍結融解作用を受けた後における材齢 28 日と 91 日供試体の曲げ強度
Flexural strength of the specimens with age of 28and 91days for freezing and thawing test

4.3.3 耐摩耗性

凍結融解作用の有無が耐摩耗性に及ぼす影響を明らかにするために、凍結融解試験終了後の供試体と凍結融解試験に供していない供試体の摩耗試験を行った。

凍結融解試験に供していない供試体の材齢 28 日、91 日における摩耗深さを **Fig.4-14** に示す。コンクリートの強度は、材齢の経過とともに増加するため若材齢ほど摩耗し易い傾向があり、材齢 91 日より材齢 28 日の方が摩耗深さは大きくなる。ただし、摩耗試験の時間が長くなるにつれて摩耗深さの増加率は徐々に小さくなる。これは、表面のモルタル層が摩耗により失われることで粗骨材が露出し、この粗骨材が摩耗に抵抗するためである⁴⁷⁾。

フライアッシュの置換と摩耗深さの関係については、置換率が多くなるほど摩耗深さは大きくなるものの、F3 と F5 の試験時間 20 分での摩耗深さの差は材齢 28 日で 0.6mm、材齢 91 日で 0.8mm と、その差は僅か 0.2mm であった。材齢 28 日の供試体の摩耗深さは、試験時間 20 分で F5 が F0 の 1.7 倍、F3 が F0 の 1.4 倍とフライアッシュの置換率が摩耗深さの増加に影響を及ぼしている。一方、材齢 91 日の供試体の摩耗深さは、F5 は F0 の 1.3 倍であるが、F3 は F0 とほとんど同じであり、長期間養生した場合はフライアッシュの置換率が摩耗深さの増加にあまり影響を及ぼしていない。

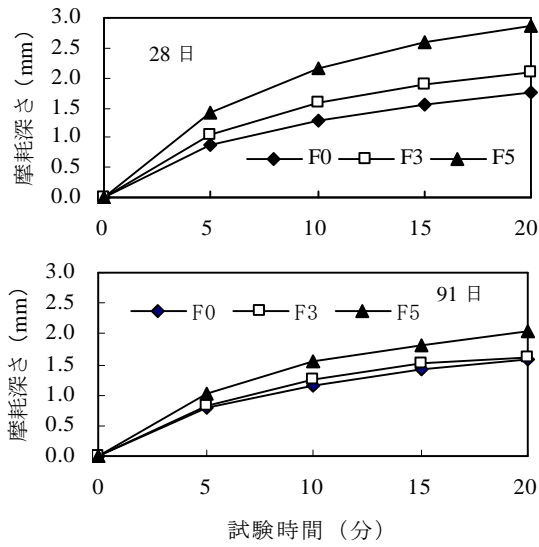


Fig.4-14 凍結融解試験に供していない供試体の材齢 28 日と 91 日における摩耗深さ
Abrasion depth of the specimens with age of 28 and 91days

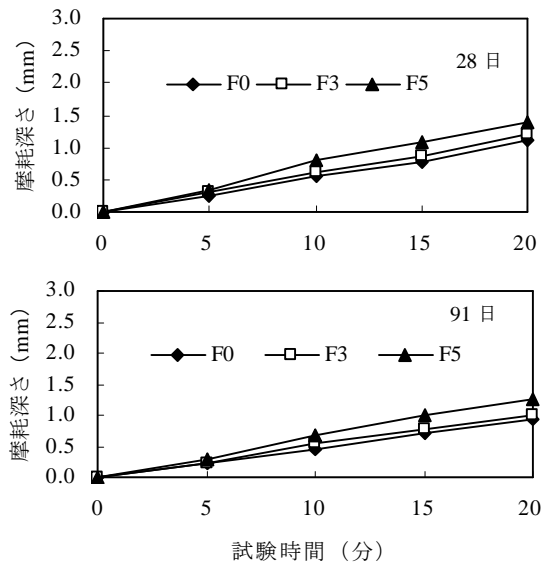


Fig.4-15 凍結融解試験を受けた材齢 28 日と 91 日供試体の摩耗深さ
Abrasion depth of the specimens with age of 28 and 91days after freezing and thawing test

凍結融解試験終了後の供試体の摩耗深さを試験開始材齢 28 日，91 日の両者について **Fig.4-15** に示す。摩耗試験に供した供試体は凍結融解試験終了後のものであるが，骨材が露出した供試体の摩耗深さは骨材の上を基準にして計測した。前節で考察したように本供試体は，スケーリングという形態で表面の劣化は起こっているものの，内部劣化は深刻でない。つまり，摩耗試験に供用した供試体は **Fig.4-8** に示したようにあくまでも相対動弾性係数が 70%に見られるようにスケーリングにより表面のモルタルが失われ粗骨材が露出した状態である。

凍結融解試験終了後の供試体の摩耗深さは，凍結融解試験に供していない供試体の摩耗深さに比べて，約半分近くまで小さくなっている。摩耗試験の時間が長くなるにつれて摩耗深さは徐々に大きくなり，置換率の影響はさほど大きなものとは言えない。これは，摩耗試験に供する前から供試体の表面には凍結融解作用のスケーリングによる粗骨材が露出した状態であり，この粗骨材が摩耗に抵抗したためである。

本研究で作製した中国産フライアッシュを混入したコンクリートは，凍結融解作用によるスケーリングという形態で表面の劣化は起こるものの，内部劣化は深刻でない。つまり，本研究で作製したコンクリートを実際の舗装コンクリートと想定した場合，凍結融解作用により表面のスケーリングは起こるが，摩耗との複合による舗装表面の欠損は深刻ではないことが示唆される。

4.4 結論

本研究では，中国内蒙古自治区通遼市の石炭火力発電所で採取されたⅡ種のフライアッシュを混入したコンクリートの舗装体への利用性，耐凍結融解性および凍結融解作用を受けたコンクリートの耐摩耗性について検討した。本研究

により得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 中国産フライアッシュをセメント質量の内割で 50%混入したコンクリートの曲げ強度は、中国の一般的な舗装コンクリートの設計基準曲げ強度である 4N/mm^2 を材齢 28 日までに満たす。
- 2) 中国産フライアッシュを混入したコンクリートの耐凍結融解性は、スケーリングという形態で表面の劣化は起こるが、凍結融解作用による微細なひび割れの進展によるコンクリート組織の緩みとしての内部劣化は深刻でない。
- 3) 凍結融解試験に供していないコンクリートの摩耗深さは、フライアッシュの置換率が多くなるほど大きくなる。
- 4) 凍結融解試験終了後のコンクリートの摩耗深さについて、フライアッシュの置換率は摩耗深さの増加にあまり影響を及ぼしていない。これは、摩耗試験に供する前から供試体の表面には凍結融解作用のスケーリングにより粗骨材が露出した状態であり、この粗骨材が摩耗に抵抗したためである。
- 5) 中国産フライアッシュの置換率が 50%以内の範囲であれば、中国の基準に基づいた舗装コンクリートへの適用は十分に可能である。

材齢 28 日の曲げ強度は F5 供試体（フライアッシュ置換率 50%）でも設計曲げ基準の 4N/mm^2 を満足していることが明らかになった。また、フライアッシュコンクリートの長期強度発現性を加えて考えれば、F5 供試体の 91 日以降の摩耗深さも無混入のコンクリート供試体を下回る可能性がある。凍結融解作用を受ける舗装コンクリートにおける中国産フライアッシュの置換率は、耐摩耗性を加味して決定しなければならないが、中国においては、中国の道路の分類と分級方法および内蒙古自治区におけるスパイクタイヤの通過数の実情にも合うようにしなければならない。

第5章

ポリプロピレン繊維を用いたフライアッシュコンクリート 舗装の曲げ強度および耐摩耗性

5.1 緒論

セメントコンクリートに各種繊維を混入することによりその特性を改良しようという試みが続けられている。その結果、(1) 引張強度、曲げ強度の増加、(2) 衝撃強度の増加、(3) ひび割れとひび割れ発生後の荷重保持などに効果の高いことが示され、その有効な利用が望まれている。セメント、コンクリート中に混入される繊維としては、鋼繊維、ガラス繊維、有機繊維、炭素繊維などがあるが、ポリプロピレンは、繊維の中で最も比重が軽く、耐衝撃性、耐摩耗性、耐疲労性、耐薬品性、耐光性、撥水性に優れた繊維である。また、ポリプロピレンの強みは、コストが低いことといわれている。しかし、アジア地域において、主要合繊とコスト比較すると、現実には、「安価なポリマー」といわれている割には、コスト優位性は、ポリエステルと比べてもわずか5パーセント程度である。このことは、ポリマー段階でのポリエステルとポリプロピレンのコスト格差を、製品段階でさらに狭めている可能性もある。

一方、繊維の開発・改良技術進化に伴い土木建設に関しては、2002年、鹿島(株)は萩原工業株式会社と共同で、コンクリート補強用波形ポリプロピレン短繊維「ポリウェーブ」を開発した。「ポリウェーブ」は、繊維の形状を波形に加工したコンクリート補強用繊維で、従来品に比べ繊維自身の強度および剛性が向上し、優れた補強効果を発揮する。このポリウェーブをコンクリートの剥落防止対策として橋梁上部工に適用した他、トンネルの吹付けコンクリートの補強用繊維として実工事に適用し、良好な結果を得ているとの報告もある。

ポリプロピレン繊維を道路に使用した様子を**Fig.5-1**に示す。

上述したように、繊維補強コンクリートは、コンクリートのじん性・耐摩耗性やひび割れに対する抵抗性を向上させた複合材料であり、コンクリート片の剥離・剥落防止やコンクリート構造物の補修補強等に広く使用されている。本研究では、補強用繊維として近年注目されている、ポリプロピレン繊維を用いた異なるフライアッシュ置換率の舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について検討した。



Fig.5-1 ポリプロピレン繊維を混入した道路舗装
Concrete pavement with polypropylene fibers

5.2 材料および供試体

使用した骨材の物理的性質を **Table 5-1** に、ポリプロピレン繊維の物理的性質お

よび外観写真をそれぞれ **Table 5-2**, **Fig.5-2** に示す。コンクリートの示方配合を **Table 5-3** に、投入順序および練混ぜ時間を **Fig.5-3** に示す。また、混和剤はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用し、水は 20°C にした水道水である。フライアッシュの品質は JIS II 種に属する。曲げ試験に用いた供試体は、100×100×400mm の角柱試験体である。本実験では、舗装コンクリートが対象であるため、目標スランプが 2.5±1cm、水結合材比が 45% で、目標スランプを得るために高性能 AE 減水剤量は各配合で異なる。打設した供試体は、材齢 1 日で脱型後、所定の試験日まで 20°C 恒温水槽中での水中養生を行った。フライアッシュの置換はセメント質量の内割とし、置換率は 0, 30, 50% の 3 水準と、繊維のコンクリート体積に対しての 0.0, 0.5, 1.0vol% とクロスデザインした。各配合の供試体は、FZfZ (Fly ash 0.0%, Fiber 0.0vol%), FZfH (Fly ash 0.0%, Fiber 0.5vol%), FZfO (Fly ash 0.0%, Fiber 1.0vol%, 以下同じ), FTFZ, FTFH, FTfO, FFFZ, FFFH, FFFO の 9 水準とも 3 本である。

Table 5-1 使用骨材物理的性質
Physical properties of aggregates

骨材種類	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	2.59	1.59	1.84
粗骨材	2.6	1.62	6.69

Table 5-2 使用繊維の物理的性質
Physical properties of fibers

密度	0.91g/cm ³	外観	グレー
厚さ×幅	0.5×0.9mm	形状	矩形断面
引張強度	530N/mm ²	繊維長さ	30mm
融点	160~165°C	耐薬品性	酸・アルカリに強い
標準混入率	0.50vol	ヤング率	10,500N/mm ²



Fig.5-2 ポリプロピレン繊維の外観写真
Polypropylene short fibers

Table 5-3 コンクリートの配合
Mix proportion of concrete

配合名	骨材最大寸法 (mm)	s/a (%)	細骨材率 (%)	単 位 量(kg/m ³)						
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	繊維 V _f	細骨料 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
FZfZ	20	45	39	144	320	0	0	722	1133	1.92
FZfH	20	45	39	144	320	0	4.550	722	1133	2.14
FZfO	20	45	39	144	320	0	9.110	722	1133	2.33
FTfZ	20	45	38	144	224	96	0	705	1133	2.88
FTfH	20	45	38	144	224	96	4.550	705	1133	2.97
FTfO	20	45	38	144	224	96	9.110	705	1133	3.10
FFfZ	20	45	37	144	160	160	0	653	1133	3.32
FFfH	20	45	37	144	160	160	4.550	653	1133	3.46
FFfO	20	45	37	144	160	160	9.110	653	1133	3.55

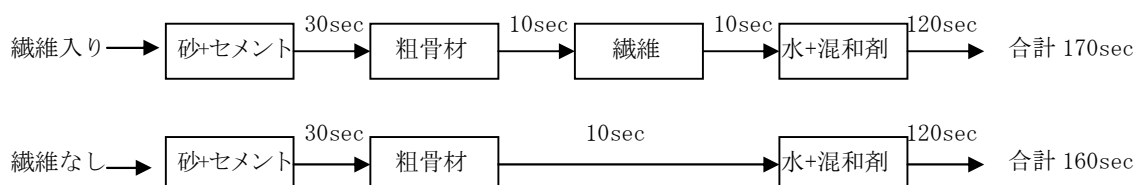


Fig.5-3 投入順序および練混ぜ時間
Mixing procedure

5.3 試験方法

5.3.1 曲げ試験方法

曲げ試験は、日本コンクリート工学協会が規定している、「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に従い、3等分曲げ載荷を行った。また、載荷は載荷点直下の鉛直変位（LPD）速度が0.05mm/minとなるように制御した。計測項目は、荷重、載荷点変位（LPD）とし、計測速度5Hzで計測を行った。

繊維を混入していないコンクリートでは、試験体が完全に破断するまで載荷を行ったが、繊維補強コンクリートでは、載荷点変位が3mmに至るまで載荷を行った。

5.3.2 摩耗試験方法

摩耗試験機は中国の国家標準であるGB/T16926-1997「コンクリートおよびその製品の摩耗抵抗性の試験方法」を参考に試作したものである⁴⁸⁾。第4章に述べたように、摩耗材である鋼球（直径20mm）3個を供試体表面成形部に載荷力115Nで接地し、回転速度90rpmで回転させるものである。摩耗時間はGB/Tに準じて20分間とし、5分ごとにダイヤルゲージで摩耗位置の4箇所を測定して、その平均値を摩耗深さとした。摩耗試験用供試体は25×25×5cmである。

5.4 試験結果および考察

曲げ強度結果をFig.5-4に示す。曲げ強度は、フライアッシュの置換率が多くなるほど小さくなる。これは、フライアッシュをセメント質量の内割で置換していることから、置換率が多くなるほどセメント量が少なくなるからであるが、繊維混入量の増加に伴い曲げ強度はある程度増大している。

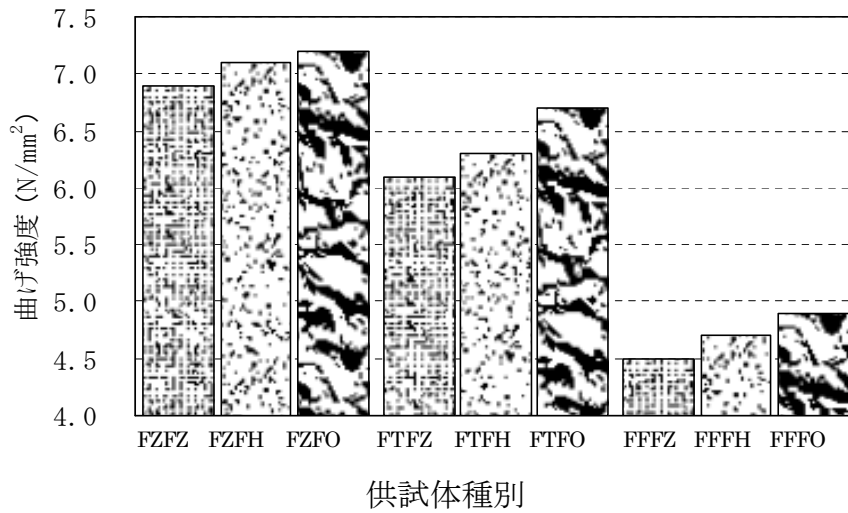


Fig.5-4 曲げ強度
Flexure strength

曲げ試験の荷重—変位曲線の結果をFig.5-5に示す。繊維の混入率 $V_f=0.0\%$ の試験体は曲げひび割れの発生により急激に荷重が低下して破壊に至る。 $V_f=1.0\%$ の試験体は曲げひび割れの発生によりピーク荷重の40%~50%まで荷重が低下するものの、その後は、繊維の架橋効果により徐々に低下する。このことから、ポリプロピレン繊維が曲げタフネスの改善に大きく寄与していることがわかる。

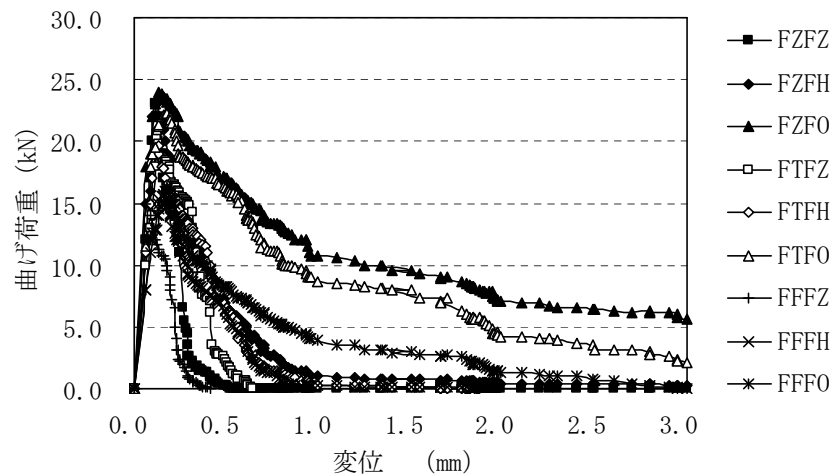


Fig.5-5 荷重-変位曲線
Load-deflection curves for the examined beams

土木学会が規定している式 (5-1) により，曲げじん性係数およびBanthiaら⁴⁹⁾が提案している式 (5-2) のポストクラック強度 (Fig.5-6) を用いて繊維混入率との関係を調べた。曲げじん性係数および曲げポストクラック強度をそれぞれ Fig.5-7, Fig.5-8 に示す。フライアッシュ置換率の増加に伴い同じ繊維混入率の曲げじん性係数が著しく低下しているが，繊維混入率がフライアッシュ置換率の低い供試体を上回る効果が現れている。また，繊維の混入率は曲げじん性係数および曲げポストクラック強度の影響に対して同じ傾向をしめしている。実験風景をFig.5-9に示す。

$$BTF = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (5-1)$$

ここに：BTF：曲げじん性係数 (N/mm²)

T_b ： δ_{tb} までの荷重—変位曲線下の面積 (N・mm)

δ_{tb} ：スパンの1/150 のたわみ (mm)

L ：載荷スパン (mm)

b ：破壊断面の幅 (mm)

h ：破壊断面の高さ (mm)

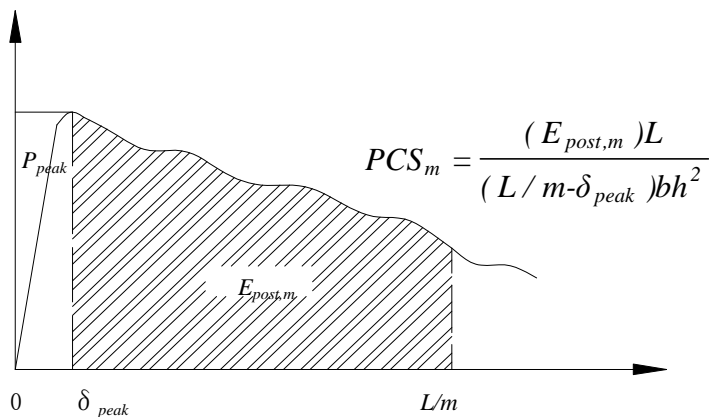


Fig.5-6 Post-crack 強度
Post-crack strengths

$$BPCS_m = \frac{(E_{post,m})}{L/m - \delta_{peak}} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (5-2)$$

ここに $BPCS_m$: 曲げポストクラック強度 (N/mm²)

$E_{post,m}$: L/m までの荷重-変位曲線下の面積から δ_{peak} までの荷重-変位曲線下の面積を引いた値 (N・mm)

δ_{peak} : ピーク荷重におけるたわみ (mm)

L : 載荷スパン (mm)

b : 破壊断面の幅 (mm)

h : 破壊断面の高さ (mm)

m : 任意のたわみを決定する係数

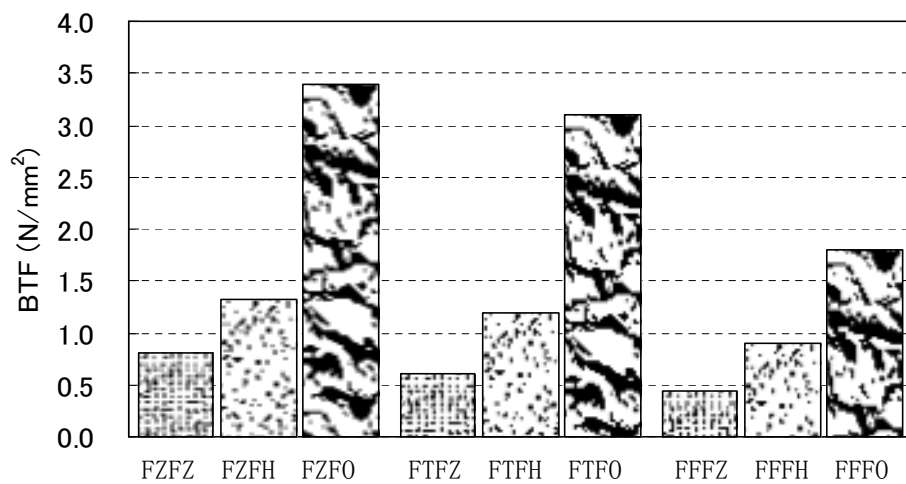


Fig.5-7 曲げじん性係数
Bending toughness index

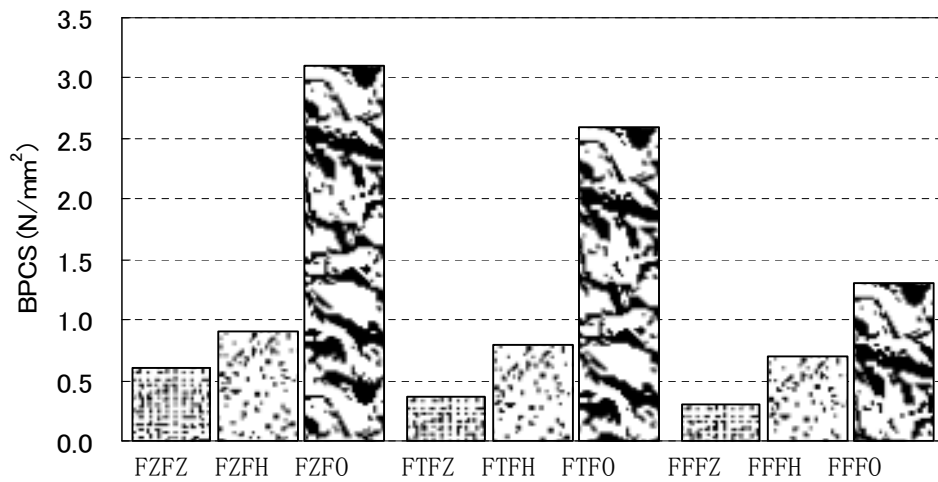


Fig.5-8 曲げ Post-crack 強度
Bending post-crack strength



Fig.5-9 荷重—変位試験
Load-deflection test configuration

供試体の摩耗試験結果を**Fig.5-10**に示す。フライアッシュの置換率が多くなるほど摩耗深さは大きくなる。ただし、 $V_f=1.0\%$ のとき、フライアッシュ置換率50%含めて、各供試体の摩耗深さが概ね同じになっていることがわかる。

つまり, 多量のフライアッシュを混入した供試体の摩耗抵抗比(各材齢の強度/28日強度)はフライアッシュ無混入の普通コンクリート供試体の摩耗抵抗比と比べ, 27%ほど上回っている。

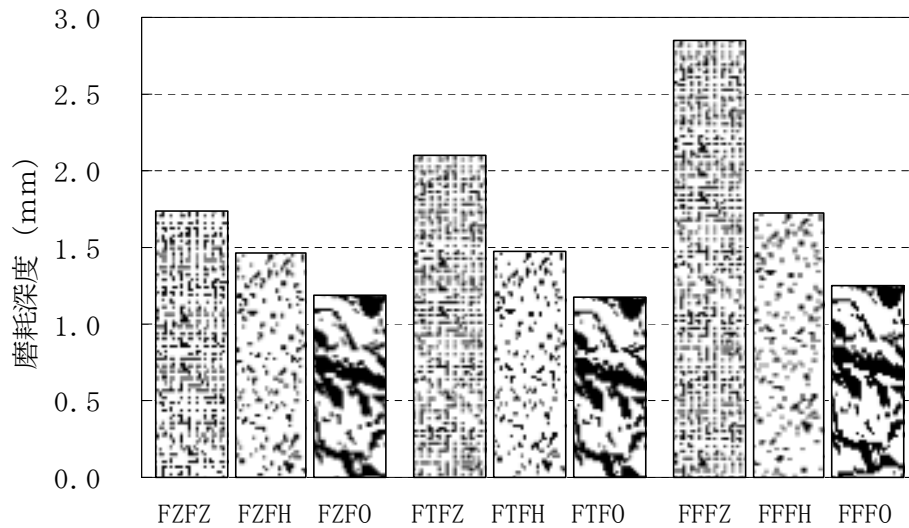


Fig.5-10 供試体摩耗深さ
Depression in specimens resulting from the abrasion test

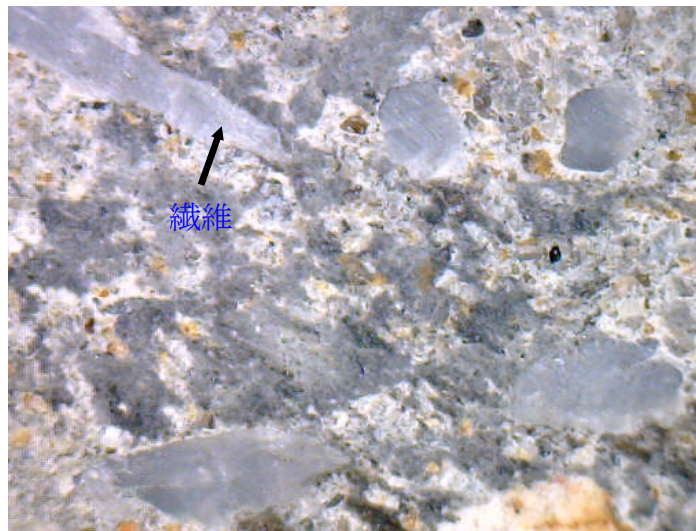


Fig.5-11 摩耗試験後の供試体表面
Specimen surface after abrasion test

5.5 結論

- 1) ポリプロピレン繊維の混入によってフライアッシュ置換率が異なるコンクリートの曲げ強度，曲げじん性が大きく改善されることが明らかになった。
- 2) 繊維の混入率は曲げじん性係数および曲げポストクラック強度の影響に対して同じ傾向を示す。
- 3) ポリプロピレン繊維を体積比で1%混入することによって，フライアッシュ置換率50%を含め，各供試体の摩耗深さが概ね同じになることが分かった。
- 4) 多量のフライアッシュを混入した供試体の摩耗抵抗比はフライアッシュ無混入の普通コンクリート供試体の摩耗抵抗比と比べ，27%ほど上回る。

第6章 総括

本論文は、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための簡易な摩耗試験機を中国の国家標準である GB/T 16926-1997 を踏まえて作製し、その実用性の評価と、中国内蒙古自治区の気候およびコンクリート舗装としての特徴を踏まえ、内蒙古自治区の石炭火力発電所で排出されたフライアッシュを混入した舗装コンクリートの実用性を検証することを目的として、中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性の検討し、また補強用繊維として近年注目されている、ポリプロピレン繊維を用いた異なるフライアッシュ置換率の舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について検討した結果をまとめたものである。

中国の現状、特に電力について考察すると、中国は 1998 年時点で発電設備容量は 2 億 7700 万 kW、発電電力量は 11 億 5000kWh に達する世界 2 位の発電大国である。火力発電機は発電設備容量で 76%、発電電力量で 81%を占めている。発電設備は 2010 年には現在の約 2 倍の 5 億 kW に達し、この増設分の約 70%は石炭火力を予定している。中国では一次エネルギーを主に石炭に依存し、電力の 76%は石炭を燃焼する火力発電所に頼っており、毎年 4 億 t 以上の石炭が発電に使用され、石炭年生産量の 1/3 を占め、石炭工業に関する第九次五か年計画と 2010 年発電計画によると、2000 年は 14 億 5000 万 t に、2010 年は 18 億 t に達することを目標にしており、2020 年までに 21 億 t になると予想されている。その中で内蒙古は中国の石炭生産量第二位で、石炭発電量も一番大きい地域であり、また、「西電東送」計画により将来中国のエネルギー基地になることを目標にしており、石炭火力発電所が益々増えている。その結果、多量の石炭灰の

産出は避けられない。

内蒙古では石炭灰をセメント、コンクリート、レンガ、路盤安定材料として最近利用してきているが、石炭灰の利用率が20%に達しない状況であり、残った石炭灰を発電所からスチールパイプやコンクリートパイプで水流を利用して数キロ離れた野外に排出されている。石炭灰の再生資源としての利用が、中国における経済と社会発展および環境に対して重大な課題となっており、ひいては地球環境保全に関する問題となっている。このような社会情勢の変化から、石炭灰のコンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を格段に増加させることが緊急の課題となっている。

近年、中国内陸部の内蒙古自治区では、中国政府の西部大開発「西部地域の交通建設は西部開発の第一要務」方針に基づいて交通網の建設が優先的に実施されている。第11次5カ年計画（2006～2010年）の発展要領では、農業資本不足の問題を解決し、農村の生産と生活の条件を改善し、農民の医療、教育、交通などの公共サービスのレベルを引き上げることを目的とした「社会主義新農村建設」が方針として打ち出されており、農村におけるインフラ整備の強化に基づいた農村道路の整備が進められている。したがって、多量のフライアッシュを舗装コンクリートの混和材として利用することが本研究の目的の一つである。

一方、寒冷地である内蒙古自治区では、冬期におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用によって道路舗装が摩耗を受ける。加えて、農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことから、摩耗の進行も著しい。また、中国における従来のコンクリート舗装の設計は、強度評価のみで行われていたため、摩耗に対する耐久性の評価が欠けている。そのため、供用耐用年数の評価が明らかにされておらず、劣化した路面状態のまま使用され続けて

おり、耐久性指標として摩耗抵抗性を加えた舗装の設計を確立することが急務になっている。

中国では、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための摩耗試験の必要性およびその実施数が今後増す方向にあることから、国家標準として定められた GB/T を踏まえつつも手軽に試験を行うことができる簡易な摩耗試験機が必要となっている。そこで本研究では、GB/T よりも摩耗材である剛球数が少なく、回転速度が小さく、GB/T では一定にされている摩耗材の載荷力を 0~120N に変化させることができる簡易な摩耗試験機(Ball Bearing Method)を作製し、材齢および養生条件を変えたモルタル供試体とコンクリート供試体による摩耗試験を実施することで、この摩耗試験機の実用性を評価した。

摩耗試験機の実用性の評価試験からは以下の結論が得られた。

- 1) 本研究で作製した GB/T よりも摩耗材である剛球数が少なく、回転速度が小さく、GB/T では一定にされている摩耗材の載荷力を 0~120N に変化させることができる簡易な摩耗試験機 (BBM) は、舗装コンクリートの摩耗抵抗性として重要になるころがり摩耗を評価することができる。
- 2) BBM の摩耗試験により測定される摩耗深さおよび摩耗体積は、既往の研究と同様な傾向を示し、摩耗深さおよび摩耗体積は摩耗時間と高い相関性を示す。
- 3) モルタル供試体の摩耗試験において、摩耗深さは摩耗時間と線形の関係にある。
- 4) コンクリート供試体の摩耗試験において、摩耗深さおよび摩耗体積は摩耗時間と二次関数で示される非線形性関係にある。
- 5) BBM によりコンクリート供試体の摩耗抵抗性を評価する上で、初期の表面のモルタルの摩耗とその後の粗骨材が露出した摩耗は、摩耗進行過程と

して区別される。

- 6) BBM における摩耗深さの偏差は 2.0%以内であり, GB/T の 2.21%以内よりも小さく, 均一な摩耗という点で BBM は GB/T 同程度以上の精度を有する。

次に, 今回の研究で中国内蒙古自治区の 3 ヶ所 (通遼市、呼市、托県) 石炭火力発電所から手入した 5 類フライアッシュを分析し, その中の通遼市産フライアッシュ品質が最も良質なことを確認した上で, 通遼市産フライアッシュを用いたコンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性を検討した。

実験の結果から以下の結論が得られた。

- 1) 中国産フライアッシュをセメント質量の内割で 50%混入したコンクリートの曲げ強度は, 中国の一般的な舗装コンクリートの設計基準曲げ強度である 4N/mm^2 を材齢 28 日までに満たす。
- 2) 中国産フライアッシュを混入したコンクリートの耐凍結融解性は, スケーリングという形態で表面の劣化は起こるが, 凍結融解作用による微細なひび割れの進展によるコンクリート組織の緩みとしての内部劣化は深刻でない。
- 3) 凍結融解試験に供していないコンクリートの摩耗深さは, フライアッシュの置換率が多くなるほど大きくなる。
- 4) 凍結融解試験終了後のコンクリートの摩耗深さについて, フライアッシュの置換率は摩耗深さの増加にあまり影響を及ぼしていない。これは, 摩耗試験に供する前から供試体の表面には凍結融解作用のスケーリングにより粗骨材が露出した状態であり, この粗骨材が摩耗に抵抗したためである。
- 5) 中国産フライアッシュの置換率が 50%以内の範囲であれば, 中国の基準

に基づいた舗装コンクリートへの適用は十分に可能である。

材齢 28 日の曲げ強度は F5 供試体（フライアッシュ置換率 50%）でも設計曲げ基準の 4N/mm^2 を満足していることが明らかになった。また、フライアッシュコンクリートの長期強度発現性を加えて考えれば、F5 供試体の 91 日以降の摩耗深さも無混入のコンクリート供試体を上回る可能性がある。凍結融解作用を受ける舗装コンクリートにおける中国産フライアッシュの置換率は、耐摩耗性を加味して決定しなければならないが、中国においては、中国の道路の分類と分級方法および内蒙古自治区におけるスパイクタイヤの通過数の実情にも合うようにしなければならない。

また、補強用繊維として近年注目されている、ポリプロピレン繊維を用いた異なるフライアッシュ置換率の舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について検討した。

実験の結果から以下の結論が得られた。

- 1) ポリプロピレン繊維の混入は、フライアッシュ置換率が異なるコンクリートの曲げ強度、曲げじん性の改善に大きく寄与する。
- 2) ポリプロピレン繊維の混入によってフライアッシュ置換率50%を含め、各供試体の摩耗深さが概ね同じになることを分かった。
- 3) 繊維の混入率は曲げじん性係数および曲げポストクラック強度に対し、同じ傾向の影響を与える。
- 4) 多量のフライアッシュを混入した供試体の摩耗抵抗比はフライアッシュ無混入の普通コンクリート供試体の摩耗抵抗比と比べ、27%ほど上回る。

以上で述べたように、本論文は博士課程の 3 年間の研究成果として、まとめたものであるが、いくつかの問題点が今後の課題として残っている。例えば、

中国産フライアッシュを混入したコンクリートは凍結融解試験終了後、スケールリングという形態で表面の劣化が起こり、粗骨材が露出した状態となる。ECC（Engineered Cementitious Composites：繊維補強セメント材）による表面の補修・補強が有効であると考えられるが、その最適を手法について明らかにしていくことが重要な課題である。

引用文献

- 1) 文部省科学技術政策研究所, 中国科学技術部科学促進發展研究中心 (2002) :
中国の環境問題と日本の技術移転—石炭燃焼炉の転換と脱硫技術
を中心として—, 文部省調査資料 No. 82 , 5-13.
- 2) 内蒙古自治区政府文件 (2004) : 公路交通改革意見, 30 号.
- 3) 神近牧男, 小林哲夫, 松田昭美 (1989) : 中国の乾燥地における砂漠化の機
構解明と動態解析, トヨタ財団助成研究報告書, 内蒙古砂漠研究会, P.22-23.
- 4) 土木学会 (1999) : フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案),
社団法人 土木学会, p.3.
- 5) 东北勘测设计研究院 (1998) : 水工建築物抗冰冻设计规范, p.9.
- 6) 日本材料学会 (2004) : コンクリート混和材料ハンドブック, 社団法人 日
本材料学会, P.276.
- 7) ACI Committee 226 (1987) : Use of Fly Ash in Concrete, Report by ACI
Committee 226, ACI MATERIALS JOURNAL, ACI 226. 3R-87, p.381-409.
- 8) 笠井芳夫, 小林正几 (1993) : セメントコンクリート用混和材料, 技術書院,
p.76.
- 9) ACI Committee 226 (1987) : Use of Fly Ash in Concrete, Report by ACI
Committee 226, ACI MATERIALS JOURNAL, ACI 226. 3R-87, p.382.
- 10) 日本材料学会 (2004) : コンクリート混和材料ハンドブック, 社団法人 日
本材料学会, P.285.
- 11) 韓懷強, 蔣挺大 (2001) : 粉煤灰利用技術, 化学工業出版社. P.1.
- 12) 笠井芳夫, 小林正几 (1993) : セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, P.
76.

- 13) 日本材料学会 (2004) : コンクリート混和材料ハンドブック, 社団法人 日本材料学会, P.282.
- 14) 韓懷強, 蔣挺大 (2001) : 粉煤灰利用技術, 化学工業出版社. P.2.
- 15) 日本フライアッシュ協会 : <http://www.japan-flyash.com/japan-flyash/you-to.html> (2007年5月5日閲覧).
- 16) 土木学会 (1999) : フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), 社団法人 土木学会, P.7-17.
- 17) 日本材料学会 (2004) : コンクリート混和材料ハンドブック, 社団法人 日本材料学会, P.289-289.
- 18) 豊福俊泰, 三和久勝, 村国誠, 豊福俊英, 宮崎都三雄, 村木宏行 (1997) : コンクリート舗装の摩耗に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, 87-98.
- 19) 北海道開発土木研究所 : <http://www.ceri.go.jp/shisetu20060518/work/ichiran20030411.htm> (2006年8月5日閲覧).
- 20) 土木学会(1996) : 舗装工学, 土木学会出版社, p.10.
- 21) (社)日本コンクリート工学協会 : コンクリート診断技術[基礎編], p.24-26, p.61-63, p.200-202(2001)
- 22) 例えば, 赤松公昭, 豊福俊泰 : すりへりを考慮したコンクリート舗装の構造設計法, 第13回日本道路会議論文集, p.299-300(1979).
- 23) (社)土木学会 : コンクリート標準示方書[舗装編], p.72-91(2002).
- 24) 堀口敬(1993): コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.31, No.10, 17-27.
- 25) (社)日本コンクリート工学協会 (2003) : コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2003-, p.95-104.
- 26) ALA-技術情報-08 : suites.is-assoc.co.jp/~ala/gijutu/gijutu_08.html (2006

年 5 月 5 日閲覧).

- 27) 陶有生 (2000) : 关于进一步扩大提高粉煤灰利用水平的思考 (Food for Thought of Further Enhancing Level of Fly Utilization), 粉煤灰, 2000(3), p.7.
- 28) 瀋陽隆達環保節能工程有限公司 (2006 年 5 月 29 日閲覧) : <http://www.ldhbjt.com/water/logo/43/20051215161936.htm>
- 29) 笠井芳夫, 小林正几(1993):セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, P. 84.
- 30) 土木学会(1996) : 舗装工学, 土木学会出版社, p.216.
- 31) 堀口敬(1993):コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.31, No.10, 17-27.
- 32) 杨斌(1998) : 混凝土及其制品耐磨耗性试验方法, 中国标准化, 第 5 期, 1-4.
- 33) ASTM(2004) : standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete, p. 380-384.
- 34) 土木学会 (1996) : 舗装工学, 土木学会出版社, p.216.
- 35) 中崎昭人, 篠和夫(1990) : フライアッシュセメント B 種を使用したモルタルの強度と耐久性, 農業土木学会誌, 58(2) , 91-96
- 36) 豊福俊泰, 三和久勝, 村国誠, 豊福俊英, 宮崎都三雄, 村木宏行(1997) : コンクリート舗装の摩耗に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, 98-99.
- 37) 堀口敬(1993):コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.31, No.10, 20-25.
- 38) 藤原忠司(1990) : コンクリート舗装の摩耗に及ぼすタイヤ種別の影響, コンクリート工学年次論文報告集 12-1, 937-942.
- 39) 堀口敬, 猪又稔(1992) : コンクリートに関する各種の摩耗試験法の特性に

- ついて、コンクリート工学論文集, Vol.4, No.1, 17-27.
- 40) 杨斌(1998) :混凝土及其制品耐磨耗性试验方法, 中国标准化, 第5期, 2-3.
 - 41) 奥田徹(1984): コンクリート構造物のすりへり摩耗による機能的寿命とその再生, セメント協会第57回コンクリート講演会テキスト, p.69.
 - 42) 豊福俊泰, 三和久勝, 村国誠, 豊福俊英, 宮崎都三雄, 村木宏行(1997) : コンクリート舗装の摩耗に関する研究, 土木学会論文集, No.557/V-34, 95-96.
 - 43) 中国公路网(2005) :[http://tc.sxhighway.gov.cn/technology read.gl?id=789](http://tc.sxhighway.gov.cn/technology/read.gl?id=789) (2005年11月3日閲覧).
 - 44) 中国交通部(2002) : 公路混凝土路面設計規範, 人民交通出版社, p.8.
 - 45) Jones,R.(1962) : Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge University press, London, p.104.
 - 46) 緒方英彦, 佐藤周之, 石井将幸, 高田龍一(2005) : 凍結融解作用によるコンクリートのスケーリングと劣化度の関係, コンクリート工学年次論文集 27(1), 739-744.
 - 47) 豊福俊泰, 三和久勝, 村国誠, 豊福俊英, 宮崎都三雄, 村木宏行(1997) : コンクリート舗装の摩耗に関する研究, 土木学会論文集 34(557), 95-96.
 - 48) 満都拉等, 簡易な摩耗試験機による舗装コンクリートの摩耗抵抗性の評価. 日本農業農村工学会論文集. 2008, 76(3) : 1-8.
 - 49) 50) N.Banthia et al.: Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some Concerns and a proposition, ACI Materials Journal, Vol.92, No.1, pp.48-57(1995).

謝 辞

本研究を行い、博士論文としてまとめることになり、まず、主指導教員である鳥取大学農学部 服部 九二雄 教授に深甚な感謝の意を表します。博士前期課程から博士後期課程に進む際に専門分野を変更したにも拘わらず、先生のご指導のお陰で 3 年間、充実した研究生活が過ごせたと思っております。また、実験の遂行、投稿論文の校閲、学位論文の執筆と、多大な御指導と貴重な御教示を賜りました。生活の面でも先生からいろいろご支援をいただき、研究に専念することができました。

次に、研究計画と投稿論文などに、ご指導と助言を受けました副指導教員である鳥取大学農学部 緒方 英彦 准教授に深く謝意を表します。副指導教員である島根大学生物資源科学部 長束 勇 教授には、大変肝要なご指導を頂きました。簡易な摩耗試験機の評価の中で、摩耗深さと摩耗エネルギーおよび摩耗材料との関係などに関するご見解は印象深いものでした。重ねて御礼申し上げます。本研究における摩耗試験機の作製にあたり、ご指導を頂いた鳥取大学農学部生物生産システム研究室 唐橋 需名誉教授に深謝の意を表します。

また、鳥取大学農学部の基盤構造科学研究室に外国人研究員として在籍された郭世文博士に深く謝意を表します。入学試験から、試験計画、実験の遂行などに知的アドバイスと労力提供のご支援を頂きました。3 年間でいろいろ便宜を図って下さいました JICA 集団研修実施事務局の事務員林麻美氏に深く謝意を表します。

研究の遂行にあたり、平成 19 年度の博士後期修了生の Muhammad Ashraf 氏、平成 20 年度の博士後期修了生の Ajay Goyal 氏、修士修了生の田中さやか氏、森弘至氏、岬善隆氏、学部卒業生の板垣あすか氏、林秀樹氏、福田敦史、道下雄大氏、邹文婷氏らと、現在修士 1 年生の山部詩穂氏、学部 4 年生の柳川絢氏と森田匡隆氏、エジプトからの留学生 A.M. Anwar 氏、

ジンバブエからの留学生 PANGANAYI CLEOPATRA 氏など，鳥取大学農学部生存環境学講座基盤構造学研究室の学生諸氏には，いろいろご協力を頂きました。ここに心からの謝意を表します。

Summary

In this research, the abrasion problem to roads in China was shown. Mitigation to the abrasion resistance was conducted by mixing the cement with fly ash and/or adding additional amount of fibers. The research also included the development of simple abrasion test equipment designed on the basis of the Chinese National standards GB/T 16926-1997. It was mainly designed to measure the abrasion resistance of pavement concrete.

In Inner Mongolia, there exist many thermal power plants which produce a huge amount of fly ash as a by-product. Recently these fly ashes along with the fibers are used to produce good quality pavement concrete with high durability to freezing and thawing, and with good abrasion resistance. However, the replacement rate of the fly ash to the cement and the optimum percentage of fibers to be added are still under investigation.

Currently, thermal power plants represent 76% of the total power generation in China. Every year, 400 million tons of coal are being used by these power plants. China is now planning to increase the total production from 1.8 billion tons to 2.1 billion tons by 2020. Consequently, a large amount of coal ash is remained after burning. The disposal of these remaining is considered a serious environmental problem and should be done in a proper way.

The use of large amount of fly ash as well as other additives to concrete pavements was highly recommended. The study shows the enhancement in the pavement physical properties after adding fly ash to the pavement concrete. The environmental impact was also studied as well.

In winter and particularly in the snowing period, many vehicles with different loads use chains to prevent skidding. This leads to the essential need of pavements with high abrasion resistance. The current Chinese pavement design standards concerns mainly with strength and durability of pavements. The standards are still in need to establish

extra provisions for the design of pavements with high abrasion resistance as well as adding some sort of abrasion indices.

The current work shows a development of simple abrasion equipment which was designed on accordance to the Chinese National Standards GB/T 16926-1997. The equipment was used to measure the abrasion resistance of pavement concrete. The new abrasion test equipment was called Ball Bearing Method (BBM). It consists of three strong arms connected to a rotary motor that provides different rotation speed. Each arm ended with a metallic ball made of different materials according to the desired resistance. The specimens can be fitted in a framed plate. The equipment had also a jack to apply different loading forces, 0 - 120 N, to the examined specimens.

The new equipment was able to examine a variety of concrete and mortar specimens. Moreover, it was highly recommended to use this assembly for checking the abrasion resistance of the runways at airports.

In Inner Mongolia, coal is brought mainly from three cities (Tongliao city, Huuhehaot city, and Tuo city). The chemical and physical analysis of the produced fly ashes from the power plants showed that ashes from Tongliao city was the best to be mixed with cement to produce concrete of high strength concrete with high shrinkage resistance.

In the current work, fly ashes were used to enhance the performance of concrete. The following results were obtained:

- ① Replacing 50% of the cement mass by fly ash imported from china was able to enhance the concrete flexure strength of the produced concrete. At 28 days, the flexure strength exceeded 4N/mm^2 (recommended strength in the Chinese standards).
- ② The produced concrete had good resistance to freezing and thawing cycles. Only fine cracks appeared on the surface without full deterioration of the whole specimens.
- ③ The results showed that the more the fly ash in the specimens, the more the abrasion (worn) depth, i.e. the abrasion resistance was decreased with increasing the fly ash amount.

- ④ Examining the abrasion resistance of specimens after conducting the freezing and thawing test did not show significant difference in the abrasion (worn) depth.
- ⑤ Replacement of cement by fly ash to a ratio of 50% was found good in enhancing the concrete pavements behavior.

Moreover, the addition of polypropylene fibers to concrete enhanced its flexure and abrasion resistance significantly. The following are among the main conclusions:

- ① The addition of polypropylene fibers and fly ash to concrete was effective in improvement the toughness significantly.
- ② A 50% cement replacement with fly ash with polypropylene fibers led slight variation to the diminished depth in the examined specimens.
- ③ It was noted that the addition of fibers has the same effect on both the bending toughness factor and the bending post-crack strength.
- ④ The abrasion resistance for concrete specimens with fly ash was 27% higher than the control specimen without fly ash.

和 文 摘 要

本論文は、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための簡易な摩耗試験機を中国の国家標準である GB/T 16926-1997 を踏まえて作製し、その実用性の評価をしたものである。そのために、筆者の出身である中国内蒙古自治区の気候およびコンクリート舗装としての特徴を踏まえ、内蒙古自治区の石炭火力発電所で排出されたフライアッシュを混入した舗装コンクリートの実用性を検証することを目的として、中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性を検討し、また補強用繊維として近年注目されている、ポリプロピレン繊維を用いたフライアッシュ置換率の異なる舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について検討した。

中国の現状、特に電力については、その 76%は石炭燃焼火力発電所に頼っており、毎年 4 億 t 以上の石炭が発電に使用されている。これは、石炭年生産量の 1/3 を占め、石炭工業に関する第九次五か年計画と 2010 年発電計画によると、2000 年は 14 億 5000 万 t に、2010 年は 18 億 t に達することを目標にしており、2020 年までに 21 億 t になると予想されている。その中で内蒙古は中国の石炭生産量第二位で、石炭発電量も一番大きい地域であり、多量の石炭灰の産出は避けられない。

内蒙古では石炭灰の利用率が 20%に達しない状況であり、残った石炭灰を発電所からスチールパイプやコンクリートパイプで水流を利用して数キロ離れた野外に排出している。石炭灰の再生資源としての利用が、中国における経済と社会発展および環境に対して重大な課題となっており、ひいては地球環境保全に関する問題となっている。このような社会情勢の変化から、石炭灰のコンクリート分野への用途を拡大し、その使用量を格段に増加させることが緊急の課題となっている。

近年、中国内陸部の内蒙古自治区では、中国政府の西部大開発「西部地域の交通建設は西部開発の第一要務」方針に基づいて交通網の建設が優先的に実施されている。第11次5カ年計画（2006～2010年）の発展要領では、「社会主義新農村建設」が方針として打ち出されており、農村におけるインフラ整備の強化に基づいた農村道路の整備が進められている。したがって、多量のフライアッシュが舗装コンクリートの混和材として利用可能となれば、環境保全からも意義深いものとなる。本研究もこの点にポイントを置いている。

一方、寒冷地である内蒙古自治区では、冬期におけるタイヤチェーンやスパイクタイヤの使用によって道路舗装が摩耗を受ける。加えて、農産物や石炭などを運搬するための大型自動車の交通量が多いことから、摩耗の進行も著しい。また、中国における従来のコンクリート舗装の設計は、強度評価のみで行われていたため、摩耗に対する耐久性の評価が欠けている。そのため、供用耐用年数の評価が明らかにされておらず、劣化した路面状態のまま使用され続けており、耐久性指標として摩耗抵抗性を加えた舗装の設計を確立することが急務になっている。

中国では、舗装コンクリートの摩耗抵抗性を評価するための摩耗試験の必要性およびその実施数が今後増す方向にあることから、国家標準として定められた GB/T を踏まえつつも手軽に試験を行うことができる簡易な摩耗試験機が必要となっている。そこで本研究では、GB/T よりも摩耗材である剛球数が少なく、回転速度が小さく、GB/T では一定にされている摩耗材の載荷力を 0～120N に変化させることができる簡易な摩耗試験機(Ball Bearing Method)を作製し、材齢および養生条件を変えたモルタル供試体とコンクリート供試体による摩耗試験を実施することで、この摩耗試験機の実用性を評価した。

次に、今回の研究で中国内蒙古自治区の 3 ヶ所（通遼市、呼市、托県）石炭火力発電所から手入した 5 種の類フライアッシュを分析し、その中の通遼市産フライアッシュ品質が最も良質なことを確認した上で、通遼市産フライアッシ

ユを用いたコンクリートの凍結融解作用後の耐摩耗性を検討した。その結果、以下の点を明らかにすることができた。

- ① 中国産フライアッシュをセメント質量の内割で 50%混入したコンクリートの曲げ強度は、中国の一般的な舗装コンクリートの設計基準曲げ強度である 4N/mm^2 を材齢 28 日までに満たす。
- ② 中国産フライアッシュを混入したコンクリートの耐凍結融解性は、スケーリングという形態で表面の劣化は起こるが、凍結融解作用による微細なひび割れの進展によるコンクリート組織の緩みとしての内部劣化は深刻でない。
- ③ 凍結融解試験に供していないコンクリートの摩耗深さは、フライアッシュの置換率が多くなるほど大きくなる。
- ④ 凍結融解試験終了後のコンクリートの摩耗深さについて、フライアッシュの置換率は摩耗深さの増加にあまり影響を及ぼしていない。
- ⑤ 中国産フライアッシュの置換率が 50%以内の範囲であれば、中国の基準に基づいた舗装コンクリートへの適用は十分に可能である。

また、補強用繊維として近年注目されている、ポリプロピレン繊維を用いた異なるフライアッシュ置換率の舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性について検討した。その結果以下の点がわかった。

- ① ポリプロピレン繊維の混入は、フライアッシュ置換率が異なるコンクリートの曲げ強度、曲げじん性の改善に大きく寄与している。
- ② ポリプロピレン繊維の混入によってフライアッシュ置換率50%を含め、各供試体の摩耗深さが概ね同じくらいになっていることを分かった。
- ③ 繊維の混入率は曲げじん性係数および曲げポストクラック強度の影響に対して同じ傾向を示している。
- ④ 多量のフライアッシュを混入した供試体の摩耗抵抗比はフライアッシュ無混入の普通コンクリート供試体の摩耗抵抗比と比べ、27%ほど上回る。

公表論文リスト

基礎となる学術論文

- 1) 満都拉, 服部九二雄, 緒方 英彦, 長東 勇, 郭 世文 (2008 年) : 簡易な摩耗試験機による舗装コンクリートの摩耗抵抗性の評価, 日本農業農村工学会論文集, 第 255 号, 第 76 巻, 第 3 号, P.1~8 (この論文は第 3 章の基礎となっている。)
- 2) 満都拉, 服部九二雄, 緒方 英彦 (2008 年) : 凍結融解作用を受けた中国産フライアッシュを混入した舗装コンクリートの耐摩耗性, 日本農業農村工学会論文集, 第 255 号, 第 76 巻, 第 3 号, P.15~22 (この論文は第 4 章の基礎となっている。)
- 3) 満都拉, 服部九二雄, 緒方 英彦, 郭 世文, Ajay Goyal, A.M. Anwar (2008 年) : 掺聚丙烯纤维粉煤灰道路混凝土的抗折强度与耐磨耗性研究 (ポリプロピレン繊維を用いたフライアッシュ舗装コンクリートの曲げ強度および耐摩耗性), Sciencepaper Online (Center for Science and Technology Development, Ministry of Education, P.R.China), (この論文は第 5 章の基礎となっている。)

http://highlights.paper.edu.cn/page_detail.php?id=309