

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1153 June 2007

鉄鋼スラグ水和固化体の空港舗装適用へ向けた基礎物性の検討

高橋 良輔

濱田 秀則

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 鉄鋼スラグ水和固化体	5
3. 実験概要	5
3.1 本研究での検討実験項目	5
3.2 使用材料	6
3.3 配合	7
3.4 実験方法	7
4. 実験結果および考察	9
4.1 圧縮強度	9
4.2 曲げ強度	9
4.3 静弾性係数	11
4.4 乾燥に関わる特性	11
4.5 熱膨張係数	13
4.6 曲げ疲労強度	14
5. 結論	15
参考文献	15
記号表	16
付録（掲載データ集）	17
付-1 圧縮強度とすり減り係数の関係	17
付-2 曲げ強度と圧縮強度の関係	17
付-3 28日圧縮強度と有効粉体水比の関係	18
付-4 圧縮強度と静弾性係数の関係	19
付-5 曲げ強度と乾燥率の関係	20
付-6 乾燥収縮ひずみと乾燥材齢，重量減少率の関係	21
付-7 各温度における膨張ひずみ	21
付-8 曲げ疲労強度	21

Investigations of Basic Properties of Steel - Making Slag Concrete For Application into Airport Pavement

Ryosuke TAKAHASHI*
Hidenori HAMADA**

Synopsis

A steel-making slag concrete is a recycled concrete material consisted with blast furnace slag powder as binder and steel – making slag as aggregate. This material is expected to use as airport pavement because it has the same basic mechanical properties as normal concrete and a good abrasion resistance. However, there is a possibility of difference characteristics from normal concrete caused by using of the steel-making slag aggregate. The basic characteristics in the 5N/mm² flexural strength are not clarified. This strength value is Japanese specificity strength of airport pavement concrete. Moreover, properties about the shrinkage strain, the thermal expansion coefficient, and the flexural fatigue strength, which are basic mechanical performances required to the material of airport pavement, are not cleared. Therefore, some tests are carried out in this study to clarify these basic mechanical properties.

In this study, followings are cleared

- 1) The flexural strength of the steel-making slag concrete is higher than that of the normal concrete in same compressive strength.
- 2) The Young's modulus of steel-making slag concrete is higher than that of normal concrete in the same compressive strength.
- 3) The shrinkage strain of steel-making slag concrete is less than that of normal concrete.
- 4) There is a possibility that amount of cement contained in steel-making slag concrete affects amount of shrinkage strain.
- 5) The thermal expansion coefficient of steel-making slag concrete is in the lower level within the range of that of normal concrete.
- 6) The flexural fatigue strength of steel-making slag concrete is higher than that of normal concrete. The same intension is observed in the flexural strength.

Key Words: steel-making slag concrete, flexural strength, young's modulus, shrinkage, thermal expansion coefficient, flexural fatigue strength

* Researcher of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Associate professor, Faculty of engineering, Kyusyu University (former head of Materials Division)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5061 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:takahashi-r@pari.go.jp

鉄鋼スラグ水和固化体の空港舗装適用へ向けた基礎物性の検討

高橋 良輔*

濱田 秀則**

要 旨

鉄鋼スラグ水和固化体は高炉スラグ微粉末を結合材とし製鋼スラグを骨材とする材料である。強度特性が普通コンクリートと同等で、すり減り抵抗性が高いことから空港舗装への適用が期待される。既往の研究においてはその基本物性はコンクリートと同等とされているが、空港舗装において基準となる曲げ強度 5 N/mm² クラスの基本特性はまだ明らかとなっていない。本材料は製鋼スラグを骨材として利用することから、既往の研究での強度領域での基本特性がそのまま曲げ強度 5 N/mm² クラスの基本特性に当てはまらない場合も考えられる。また、乾燥収縮、熱膨張係数、曲げ疲労強度など空港舗装で必要とされる基本物性については既往の研究でも明らかとなっていない。

そこで本研究では曲げ強度 5 N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体に対して、空港舗装で要求される基本物性について調べるとともに、普通コンクリートとの比較を行った。

その結果、主に以下のことが明らかとなった。

- 1) 曲げ強度は同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートに対して若干高い値を示す。
- 2) 静弾性係数関係は同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートに対して高い値を示す。
- 3) 乾燥収縮量は普通コンクリートに比べ低い。
- 4) セメント量が乾燥収縮に何らかの影響を与えられられる。
- 5) 熱膨張係数は普通コンクリートの範囲で低い領域側の傾向を示す。
- 6) 曲げ疲労強度は普通コンクリートに比べ若干高く、曲げ強度と同様の傾向である。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体、曲げ強度、弾性係数、乾燥収縮、熱膨張係数、曲げ疲労強度

* 地盤・構造部材料研究室

** 九州大学大学院 工学研究院 准教授 (前材料研究室室長)

1. まえがき

地球環境への関心が高まり社会全体が環境負荷の少ない循環型社会構築を目指している昨今、多量の材料を消費・廃棄する土木・建設分野が担う役割はきわめて大きく、空港施設もその例外ではない。現在、再生骨材やゴミ焼却や火力発電時の焼却灰、製鉄時のスラグなどの多くの建設リサイクル材が開発されており、これらを広大な空港コンクリート舗装の代替材料として有効利用できれば、空港施設建設・補修において新たな資源発掘の抑制と、循環型社会構築の一端を担うことができる。

これら建設リサイクル材料のうち鉄鋼スラグ水和固化体と呼ばれる固化体材料は、高炉スラグ微粉末を結合材とすることでセメントをほとんど利用せず、セメントコンクリートに比べ CO₂ 排出量が極めて少ない。さらに、これまであまり建設材料として有効利用されてこなかった製鋼スラグを骨材とすることで、副産物のさらなる有効利用と天然資源の消費抑制を担おうとする固化体材料である。

本材料に関しては既に盛んな研究開発が行われており、その成果として各構成材料の品質標準や製造方法、材料性能の照査方法などが（財）沿岸開発技術研究センターにより技術マニュアル¹⁾としてとりまとめられている。現在、港湾ブロック材料として既に実用が始まっており、本固化体の普及への期待が高まっている。

技術マニュアル¹⁾や既往の研究結果²⁾では、本材料はコンクリートとほぼ同等の力学性能を有するとしている。これらの力学性能は主に港湾ブロック構造物を対象として検討されたものであり、対象となる強度は圧縮強度で

10~30 N/mm²程度、曲げ強度では3~4 N/mm²程度である。航空機による重荷重を対象とする空港コンクリート舗装においては曲げ強度を 5 N/mm² 以上とするよう規定³⁾されているが、曲げ強度が 5 N/mm² を超えるような場合における本固化体の材料性能（圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数）はこれまでにほとんど検討されていない。本固化体で使用する骨材は普通セメントコンクリートで 사용되는天然骨材に比べ物性が異なると考えられるが、それに関しては前述の技術マニュアルにおいても明らかにされていない。そのため、これまで示されていた普通セメントコンクリートと同等という低強度域での傾向が、曲げ強度が 5 N/mm² 程度での材料性能にそのまま当てはまらない場合も考えられ、既に明らかとなっている材料性能についても検討が必要である。

また空港舗装材として要求される性能であると考えられる収縮性や疲労耐久性については、これまで低強度域においてもほとんど検討が行われていない。

そこで本研究においては、空港舗装に対して必要とされ未だ検討が行われていない、曲げ強度が 5 N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の基本的な材料性能（圧縮強度、曲げ強度などの強度特性、弾性係数、収縮特性、曲げ疲労特性）について各種実験を行い、その強度レベルでの材料性能を調べると共に普通セメントコンクリートとの比較を行った。

なお本資料においては、以後、普通セメントコンクリートを普通コンクリートと略記する。

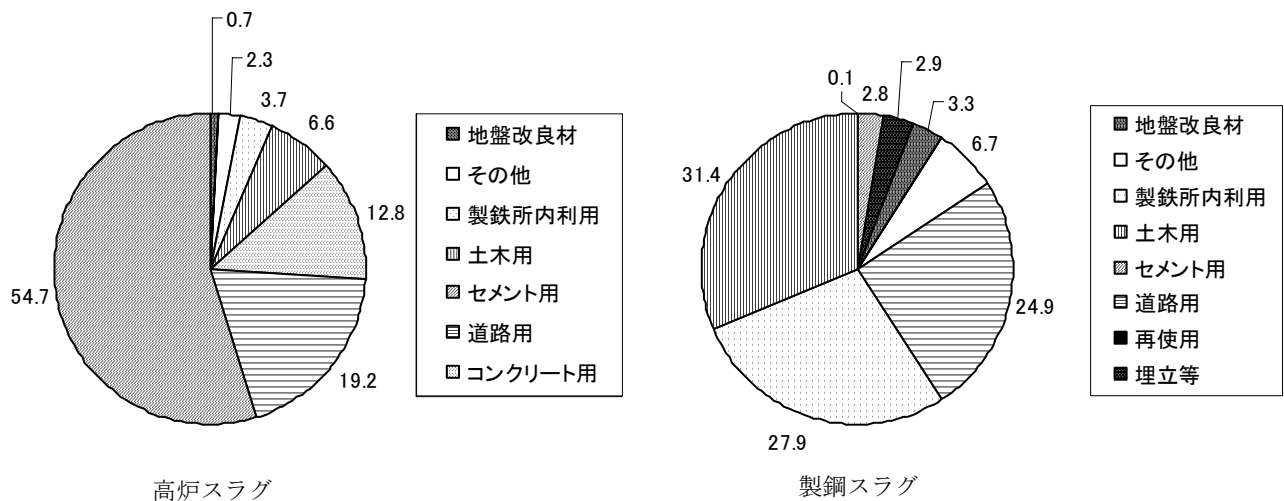


図-1 鉄鋼スラグの用途

2. 鉄鋼スラグ水和固化体

ここで鉄鋼スラグ水和固化体について簡単に説明する。鉄鋼スラグ水和固化体は高炉スラグ微粉末を主な結合材とし、製鋼スラグを主な骨材とする材料である。製鋼スラグは細骨材、粗骨材の両方として利用される。さらに消石灰や普通ポルトランドセメントなどをアルカリ刺激材として高炉スラグ微粉末重量の10%程度添加する。これは高炉スラグ微粉末の強度発現は遅行性であることから、早期の強度発現を促すためである。これらの他に、長期強度とワーカビリティ向上の目的でフライアッシュを、細骨材として高炉水砕スラグを利用する場合がある。

本固化体はその大部分が高炉スラグと製鋼スラグから構成される。そのうち高炉で生成される高炉スラグは、強度的に優れ、品質も安定している。さらにコンクリートに有用な性質も持ち合わせていることから、混和材や骨材などのコンクリート材料として以前から利用されてきた。一方、製鋼スラグは、高炉で製造された溶銑から鋼にする製鋼工程で転炉や電気炉から回収されるスラグで、品質にばらつきがあり、スラグ中の遊離石灰や遊離酸化マグネシウムが水と反応して膨張する性質を示すことなどから、コンクリートに利用されることはほとんど無かった。図-1は高炉スラグ、製鋼スラグの利用内訳である。上記のような理由から、高炉スラグではセメントやコンクリートへの利用が7割弱に達している。一方、製鋼スラグは裏込材、製鉄所内利用や埋め立て等の割合などが高い。

このように、特に水和膨張性により有効利用されてこなかった製鋼スラグであるが、現在、事前に水和膨張させるエージング技術の確立と、技術マニュアルに膨張安定性評価試験方法などが提案されたことで、無筋コンクリート部材に適用可能となるに至っており、既に高知港で消波ブロックへ適用されるなど、実用が始まっている。

現在明らかとなっている鉄鋼スラグ水和固化体の主な特徴としては、

- ・コンクリートと同程度の力学特性
- ・コンクリートに比べ大きな比重(2.3~2.6)
- ・コンクリートに比べ高いすり減り抵抗性
- ・コンクリートに比べ遅く長期的な強度発現
- ・コンクリートに比べ少ないブリーディング
- ・コンクリートに比べ大きい粘性と少ない材料分離
- ・含有鉄分による良好な生物付着性

などが挙げられる¹⁾。

特に比重が大きいという点から、主に港湾施設の各種ブロック材料への適用を念頭に開発されてきた材料であ

るため、現在明らかとなっている基礎物性の適用範囲も、港湾施設として要求される性能の範囲に一致している。

本固化体は今後さらなる普及が期待されるが、その為には適用分野の拡大を目指してより広範囲の基礎物性を検討する必要があるといえる。

3. 実験概要

3.1 本研究での検討実験項目

本研究では空港無筋コンクリート舗装への適用を目的とした各種基礎物性検討を行う。空港無筋コンクリート舗装において要求される基礎物性の主なものとしては、以下が考えられる。

- ・材齢28日曲げ強度が5 N/mm²以上
- ・施工時ひび割れ抑制のための小さい乾燥収縮
- ・温度ひび割れ抑制のための小さい熱膨張係数
- ・交通荷重（繰返し曲げ）に対する耐久性
- ・タイヤ等の作用に対する耐摩耗性

一方、圧縮強度、静弾性係数などの基礎物性は品質管理や設計において利用される。そこで本研究においては表-1に示す各基礎物性について実験を行い、考察を行った。

表-1 本研究で検討した材料基礎物性

検討物性	主な適用対象
圧縮強度	品質管理・設計
曲げ強度	品質管理・設計（基準）
静弾性係数	品質管理・設計
乾燥収縮	ひびわれ抑制
熱膨張	ひびわれ抑制
曲げ疲労強度	疲労耐久性
すり減り抵抗性*	耐摩耗性

*考察のみ

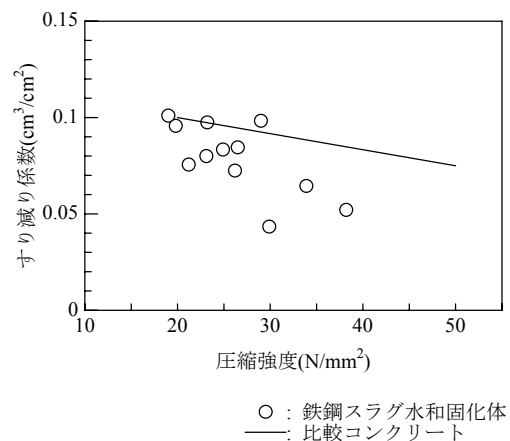


図-2 すり減り抵抗性試験結果

表-2 使用材料

材料名	規格 (品名)	密度 (g/cm ³)
製鋼スラグ	鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル準拠, 溶銑予備処理スラグ, 蒸気エージング	表-2
高炉スラグ微粉末	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末, 4000 ブレーン	2.88
アルカリ刺激材	JIS R 5210 普通ポルトランドセメント	3.16
	JIS R 9001 工業用消石灰 特号	2.23
フライアッシュ	JIS A 6201 IV種相当 原粉	2.23
混和剤	JIS A 6204 AE剤, 主成分: 高級脂肪酸及び非イオン系界面活性剤, フライアッシュ用	1.00~ 1.04
	JIS A 6204 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種), 主成分: カルボキシル基含有ポリエーテル系	1.03~ 1.10

表-3 製鋼スラグの品質

	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粉化率 (%)	化学成分 (質量%)		粗粒率	実績率 (%)	
					MgO	S		-5mm	5-20mm
S シリーズ	3.32	3.48	4.02	1.43	1.8	60.0	4.47	60.0	51.2
規格値 ¹⁾	2.6 以上	—	—	2.5 以下	8.5 以下	2.0 以下	—	—	—

耐摩耗性については既往の研究等で、砂の吹きつけに対するすり減り抵抗性が低強度域において普通コンクリートに比べ高いことが明らかとなっている。図-2は過去港湾空港技術研究所において行われた鉄鋼スラグ水和固化体のサンドブラストショットを用いたすり減り抵抗性試験結果⁴⁾であるが、圧縮強度が高くなるほどすり減り抵抗性が上昇するなどの傾向が普通コンクリート同様であることが示されている。そのため本研究の対象範囲である強度域においても、普通コンクリートと少なくとも同等以上のすり減り抵抗性があるとして、すり減り抵抗に関する実験は行わなかった。

3.2 使用材料

供試体に使用した材料について表-2に示す。

結合材にはJIS A 6206で規定されている高炉スラグ微粉末を、骨材には細骨材、粗骨材ともに製鋼スラグを用いた。製鋼スラグには蒸気エージング処理を行った溶銑予備処理スラグを用いた。製鋼スラグの詳細な品質について表-3に詳細を示す。各製鋼スラグの品質は鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル¹⁾の規準を全て満たしている。製鋼スラグは25mmふるいにかけ通過したものを利用した。このときのJIS A 1102による粒度分布は図-3に示すとおりであり、コンクリート標準示方書⁵⁾で定められる最大寸法は10mmであった。

鉄鋼スラグ水和固化体のアルカリ刺激材には基本的に消石灰を用いるとされているが、今回は工業用消石灰の

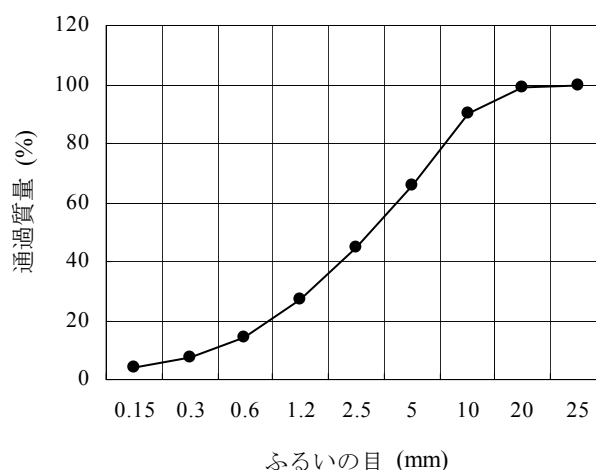


図-3 製鋼スラグ骨材の粒度分布曲線 (S シリーズ)

他に普通ポルトランドセメントも使用した。これについては後に詳述する。

他にはフライアッシュを混和材として用いた。鉄鋼スラグ水和固化体の基本定義に則れば使用する必要はない。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体は粉体量が比較的多いうえ製鋼スラグ骨材に微粒成分が多く含まれることから、フレッシュ時の粘性が高く、流動性の改善を目的としてフライアッシュを混入することが一般的である。そこで本研究においても同様の目的でフライアッシュを用いることとした。

表-4 配合

配合 No.	強度の指標 ($\frac{BP+AA+0.35FA}{W}$)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (g/m ³)		
		水 W	高炉スラグ 微粉末 BP	アルカリ刺激材 (AA)		フライ アッシュ FA	製鋼 スラグ SS	高性能 AE 減水剤	AE 剤
				セメント NP	消石灰 CH				
SNP-1	2.00	244	300	139	0	141	1791	0	0
SNP-2	2.21	194	325	75	0	85	2053	3863	36
SNP-3	2.03	207	325	75	0	59	2048	2757	46
SNP-4	1.96	202	300	50	0	130	2013	3357	48
SCH-1	1.96	202	300	0	50	130	1996	5282	24
FNP	2.57	173	325	75	0	125	1916	2100	30

3.3 配合

表-4に本研究で用いた配合を示す。配合名の頭文字は試験シリーズ名を表す。Sシリーズは圧縮・曲げ強度試験および乾燥収縮、熱膨張試験の供試体に用いた。またFシリーズは圧縮、曲げ強度、疲労強度試験の供試体に用いた。

配合は、試験配合と強度試験を繰り返して目標圧縮強度とスランプ値を満足するものを採用した。強度の指標に曲げではなく圧縮強度を用いたのは、水と粉体の重量で計算される指標と圧縮強度との間に相関があることが明らかとなっていること、試験値のばらつきや試験の簡便性等を考慮したためである。

既往の研究¹⁾⁴⁾から鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ強度-圧縮強度関係はコンクリートと同等であると言われている。そこで、これまでコンクリート標準示方書⁶⁾で用いられてきた普通コンクリートの圧縮強度-曲げ強度関係の実験回帰式を用い、曲げ強度5 N/mm²を有する場合の圧縮強度を推定した。

$$f_{bd} = 0.42 f_c^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここに、 f_{bd} ：曲げ強度(N/mm²)、 f_c ：圧縮強度(N/mm²)

このときの圧縮強度は41 N/mm²と推定される。一方、図-4に示す既往の鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度-曲げ強度関係においては、圧縮強度が30 N/mm²程度で曲げ強度が5 N/mm²程度となる傾向があるように見える。そこで目標圧縮強度は材齢28日で30 N/mm²以上とした。目標スランプ値は打込み可能な範囲を考慮し、5.5～20.5cmとした。

本研究では、主に普通ポルトランドセメントをアルカリ刺激剤として用いた。スラグ固化体の実用に際しては、やはりレディーミクストコンクリートとして利用するのが一般的であると考えられる。このときアルカリ刺激剤として消石灰を利用すると、コンクリートプラントにお

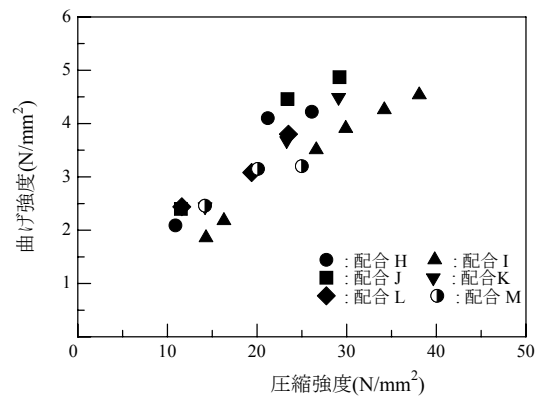


図-4 曲げ強度-圧縮強度関係

いて消石灰用のサイロを新たに確保する必要がある。一方、アルカリ刺激剤としてセメントを用いれば、セメント用サイロとして運用中のものをそのまま利用できる。

鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルにおいては、アルカリ刺激材として消石灰、セメントが挙げられているものの、セメントによる強度への寄与や他の問題点などについてはほとんど研究されていない。そこでそれらの影響を確認するために、配合SNP-4のセメントを消石灰で等重量置換した配合SCH-1についても検討を行った。

3.4 実験方法

試験項目と試験方法について表-5に示す。

圧縮強度および曲げ強度試験は、JIS A 1108とJIS A 1106にそれぞれ従って行った。また弾性係数の測定はJIS A 1149に従った。

乾燥収縮試験においては、100×100×400mmの角柱供試体を材齢7日まで20℃水中で養生した後、気温20℃、湿度60%の環境下での長さ変化を、JIS A 1129-2に定められているコンタクトゲージを用いる方法で測定した。ゲージプラグは埋め込み型とし、基長は300mmとした。

表-5 試験項目と試験方法

試験項目	準拠 JIS	環境条件	試験材齢
圧縮強度	JIS A 1108	—	28, 91 日
曲げ強度	JIS A 1106	—	28, 91 日
静弾性係数	JIS A 1149	—	28, 91 日
乾燥収縮	JIS A 1129-2	気温 20℃ 湿度 60%	材齢 7 日ま で標準養 生後
熱膨張係数	JIS A 1129-2	0, 10, 20, 30, 40℃ 水中	材齢 28 日 以降
曲げ疲労強度	JIS A 1106	—	材齢 91 日 以降

温度膨張試験においては、材齢28日まで20℃水中で養生したφ100×200mmの円柱供試体を、0℃、10℃、20℃、30℃、40℃の水中に浸漬し、じゅうぶん時間を経た後、乾燥収縮試験と同様にコンタクトゲージによる方法で長さ変化量を測定した。ゲージラグは貼付け型とし、基長は100mmとした。

曲げ疲労強度試験はJIS 1106に規定されている曲げ強度試験の供試体・荷重方法に準拠し、100×100×400mm供試体を3等分点荷重して行った。図-5には疲労荷重試験の概要図を、写真-1には荷重状況を示す。

荷重装置にはサーボパルサーを使用し、荷重波形は交通荷重を想定したハーバーサイン波で荷重速度は1Hzとした(図-6)。

荷重面は打設時の仕上げ面とした。これは打設時の最下層が引張り側となる舗装部材の環境を考慮したものである。このことから試験体の荷重面は平滑ではなく、試験体と荷重装置の密着性が損なわれる恐れがある。そこで、厚さ2mm、幅20mm×長さ100mm程度の鋼板を荷重版として用い、石膏によって試験体に固着することで供試体と荷重装置との密着性を確保した。また境界部での拘束が曲げ疲労強度に及ぼす影響を極力低減するため、荷重

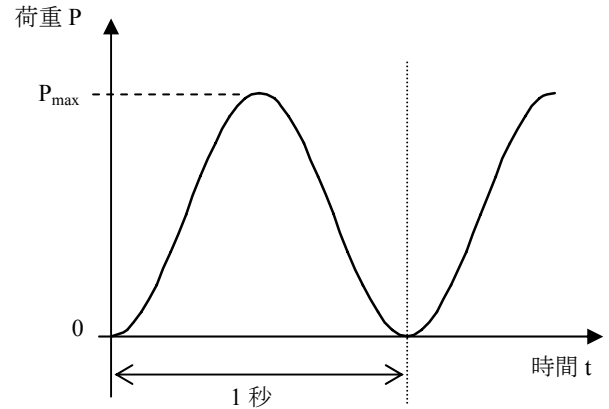


図-6 荷重条件

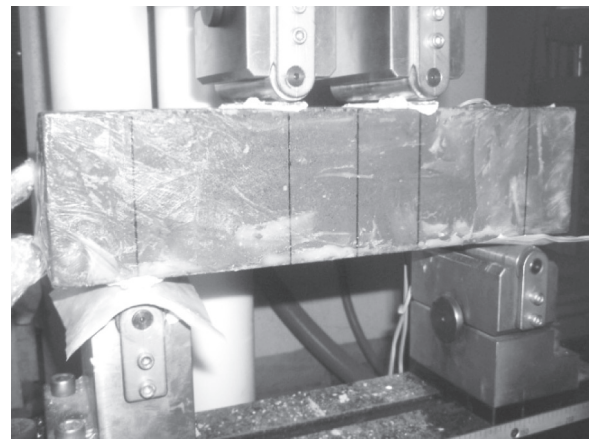
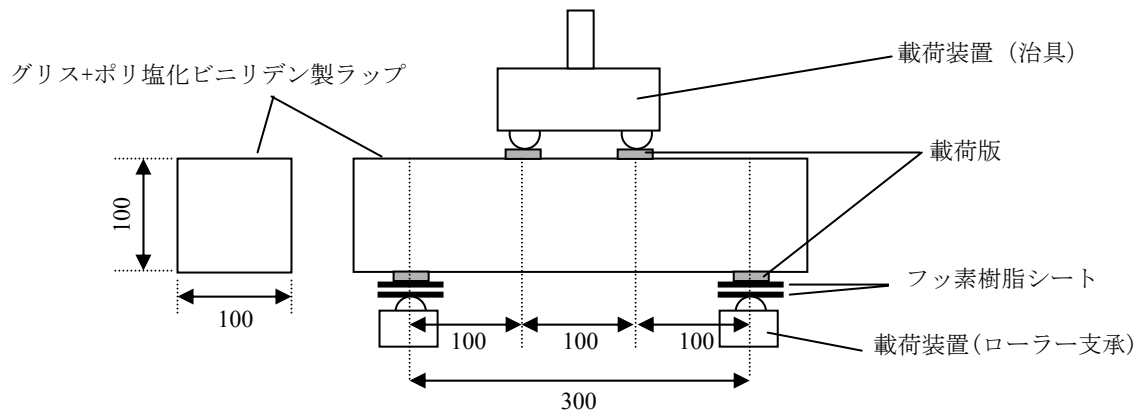


写真-1 疲労荷重試験状況

治具および支承と試験体の間には、摩擦係数が極めて低いフッ素樹脂シートを2枚ずつ挿入した。

鉄鋼スラグ水和固化体は長期的な強度発現が特徴であるため、疲労荷重試験中に大きな強度変化が起こる可能性がある。そこで、その影響を出来るだけ少なくするため、試験体は材齢91日以上のものを使用した。

養生は20℃の水中養生で、試験開始直前まで続けた。これは、舗装部材における引張り側は地中にあることから、



単位：mm

図-5 疲労荷重試験概要図

実環境はいわゆる気乾状態ではなく、湿潤状態に近いと判断したためである。

既往の研究⁷⁾ではコンクリートの疲労強度には含水率が大きく影響を与えられている。鉄鋼スラグ水和固化体においてもその影響が同様であるかは明らかではないが、その可能性を排除するため、養生水槽より試験体を取出した後、速やかにグリスを試験体表面に塗布し、さらにポリ塩化ビニリデン製ラップで試験体全体を覆って供試体の含水率が試験期間中に変化しないようにした。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度

(1) 圧縮強度-有効粉体水比関係

既往の知見¹⁾によると、配合における単位高炉スラグ微粉末量、単位アルカリ刺激材量、単位フライアッシュ量と単位水量を用いて次式で計算される指標は、材齢28日における圧縮強度と相関を示すとされている。

$$R = \frac{BP + AA + 0.35FA}{W} \quad (2)$$

ここに、BP:単位高炉スラグ微粉末量、AA:単位アルカリ刺激材量、FA:単位フライアッシュ量、W:単位水量で単位は全てkg/m³

ここではこの指標を便宜上、有効粉体水比と呼ぶことにする。図-7に既往の実験と本実験から得られた有効粉体水比と材齢28日圧縮強度の関係を示す。なおここでの圧縮強度は、供試体3体の実験結果の平均値である。本実験結果は、既往の実験に比べて同一の有効粉体水比に対する圧縮強度が大きく、既往のプロット集団から離れる結果となった。一方、本実験結果を用いて直線回帰分析を行った結果、骨材種やパラメータ数が少ないため相関係数は小さいものの、有効粉体水比と圧縮強度は既往の研究結果と同様の傾向を示した。すなわち、材齢28日圧

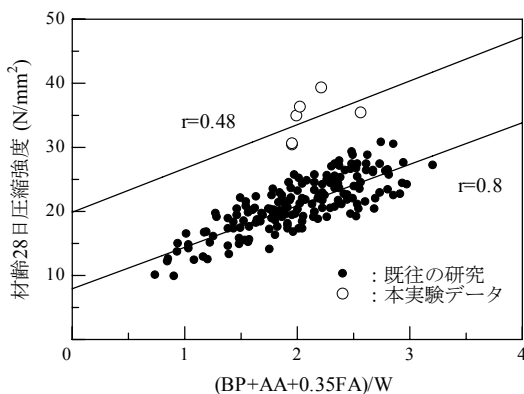


図-7 材齢 28 日圧縮強度と有効粉体水比の関係

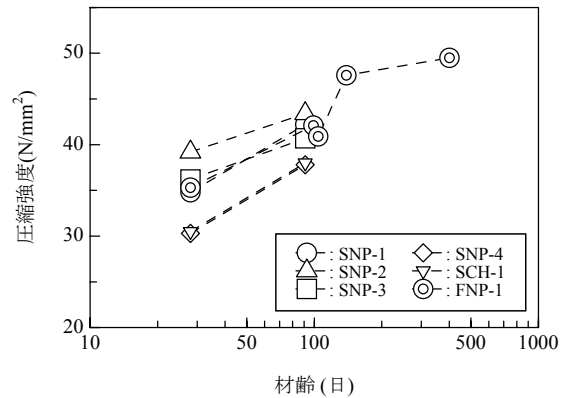


図-8 圧縮強度-材齢関係

縮強度が30 N/mm²以上の強度領域においても圧縮強度30 N/mm²以下の鉄鋼スラグ水和固化体や普通コンクリート同様に粉体と水の量によって強度管理をすることが可能である。

(2) 圧縮強度-材齢関係

図-8に本実験での圧縮強度と材齢関係を示す。ここでの圧縮強度値も供試体3本の試験値の平均である。なお長期材齢までの傾向を捉えるため、材齢軸は常用対数表記とした。どの配合についても、材齢28日以降も強度は増加し続け、材齢100日付近では材齢28日強度の20~25%増となる。しかしながら100日以降では強度の増加量はそれほど小さくなく、材齢400日では材齢100日強度の5%増に過ぎなかった。

またこれらの関係において、アルカリ刺激材の種類と普通ポルトランドセメントの混入量の影響は見ることができなかった。本研究のような有効粉体水比2.0程度、結合材に対するセメントの質量比が0.3程度の配合では、セメントが強度に与える影響は消石灰と同程度であると言える。

4.2 曲げ強度

(1) 曲げ強度-材齢関係

図-9に曲げ強度-材齢関係を示す。曲げ強度、圧縮強度はそれぞれの配合、材齢での供試体3体の試験値の平均である。ここでも材齢軸は常用対数表記とした。本研究で用いた配合のうち、SNP-2、SNP-3およびFNPにおいて材齢28日で5N/mm²以上の曲げ強度が得られ、鉄鋼スラグ水和固化体が空港舗装材として強度的に満足できることが明らかとなった。

材齢28日以降の曲げ強度は、強度の増加がない配合もみられるものの、全体として増加傾向であり圧縮強度と同様な傾向であると言える。ただし増加の割合は最大でも15%程度と、圧縮強度程の増加率ではなかった。一方、

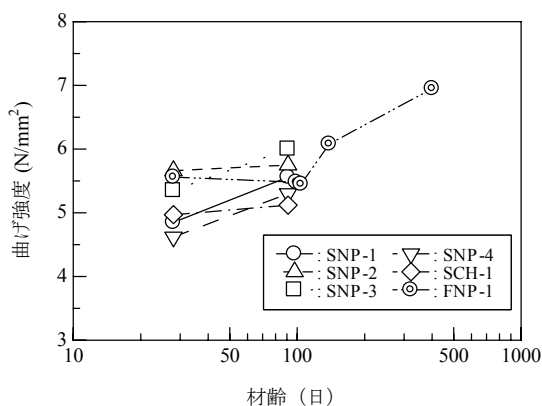


図-9 曲げ強度-材齢関係

材齢100日以降も曲げ強度は増加を続け、材齢400日の曲げ強度は材齢100日での曲げ強度の14%増となり、圧縮強度とは異なる傾向を見せた。製鋼スラグ骨材には多孔質な粒が多くみられ、本研究で用いた製鋼スラグにもこれは当てはまる。そのため、多孔質骨材による骨材とペースト界面での多数の空隙の存在が、この原因の一つとして推測される。すなわち、材齢初期においては骨材とペースト界面で空隙が多数存在するが、材齢が進むにつれて密実化し、その影響が圧縮強度に比べ引張強度に対して敏感に現れたとするものである。しかし本研究の範囲では、この原因について明らかとするには至らなかった。

アルカリ刺激材として消石灰を用いたSCH-1と普通ポルトランドセメントを用いたSNP-4の比較では、セメントが消石灰に比べ長期強度の発現性において有利な傾向が見られる。これは圧縮強度での傾向とは異なっており、アルカリ刺激剤の種類が引張強度に何らかの影響を与えている可能性がある。しかし、よりセメント量の多いSNP-1で強度の増加率がSNP-4よりも大きくなるなどの傾向は見られず、本研究においてその影響を説明することはできなかった。

(2) 圧縮強度-曲げ強度関係

図-10は圧縮強度-曲げ強度関係を示したものである。図には本研究で得られた結果と共に既往の実験結果¹⁾を併せて示した。実験結果は、それぞれの配合、材齢において同時に圧縮、曲げ強度試験を行った3供試体の結果の平均である。

図中の実線はこれまでコンクリート標準示方書⁶⁾に用いられてきた普通コンクリートの圧縮強度-曲げ強度関係の実験式(前出の式(1))である。

普通コンクリートの圧縮強度-曲げ強度関係は、用いる材料の物性の違いなどにより当然大きなばらつきを見せるが、本式は非常に多くの実験結果を回帰した式である

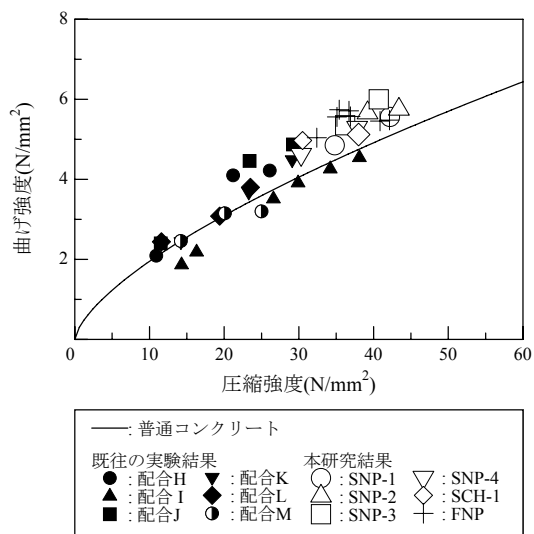


図-10 圧縮強度-曲げ強度関係

ことから、本式による値を普通コンクリートの平均的な値と見なして比較を行うこととした。

曲げ強度 5 N/mm²の領域である本研究結果では、全ての結果が同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートの曲げ強度を上回った。既往の研究結果¹⁾を併せると、圧縮強度 20 N/mm²を境界として低強度領域では普通コンクリートと同等の曲げ強度、高強度領域では普通コンクリートよりも高い曲げ強度となり、コンクリートと同様な関係を適用できないことが示されている。

そこで本実験結果を回帰分析することにより鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度-曲げ強度関係式を得ることとした。圧縮強度-曲げ強度関係における線形形状自体は普通コンクリートと同様な傾向が見られた為、普通コンクリートと同じく曲げ強度は圧縮強度の累乗関数であるとして実験結果の回帰分析を行った。その結果得られた圧縮強度-曲げ強度関係式は次のようになる。

$$f_{bd} = 0.32f_c^{1.078} \quad (\gamma = 0.89) \quad (3)$$

ここに、

γ : 相関係数

(3) 破壊性状

次に破壊性状について考察を行った。写真-2はFNP供試体の曲げ強度試験における破壊面であるが、破壊面は製鋼スラグ粗骨材を貫通しており、製鋼スラグ骨材界面での破壊は見られなかった。また破壊面において空隙が多数存在する製鋼スラグ骨材も観測された。このため、鉄鋼スラグ水和固化体と普通コンクリートでは破壊機構における骨材の影響の仕方が異なり、それが本実験での傾向の違いとして現れていると推測される。

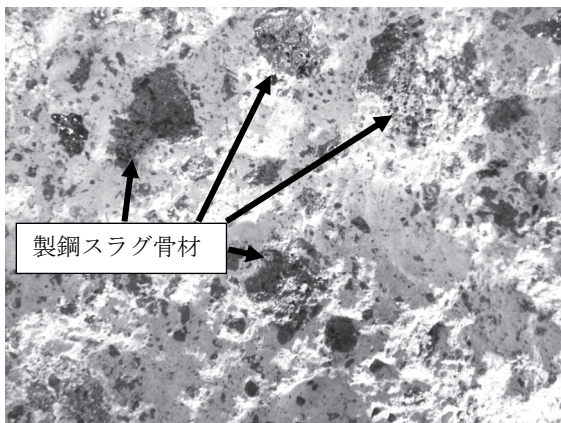


写真-2 破壊面の状況

4.3 静弾性係数

図-11に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図には本実験結果の他、既往の実験結果¹⁾と土木学会標準示方書による推奨値⁸⁾を示した。圧縮強度と静弾性係数は1つの試験によって同時に計測できる。そのため、本実験結果はそれぞれの供試体での測定値をプロットしている。土木学会標準示方書による推奨値は、多数の実験値に基づくものであり、曲げ強度-圧縮強度関係と同様、普通コンクリートの平均を表すものとして比較の対象とした。

図から、鉄鋼スラグ水和固化体は普通コンクリートと同様に静弾性係数と圧縮強度が強い相関を示す。既往の実験値の強度領域である圧縮強度30 N/mm²未満においては、鉄鋼スラグ水和固化体の静弾性係数は同一の圧縮強度をもつコンクリートに比べ低い傾向を示している。一方、30~50 N/mm²程度でより高い圧縮強度の本研究結果で

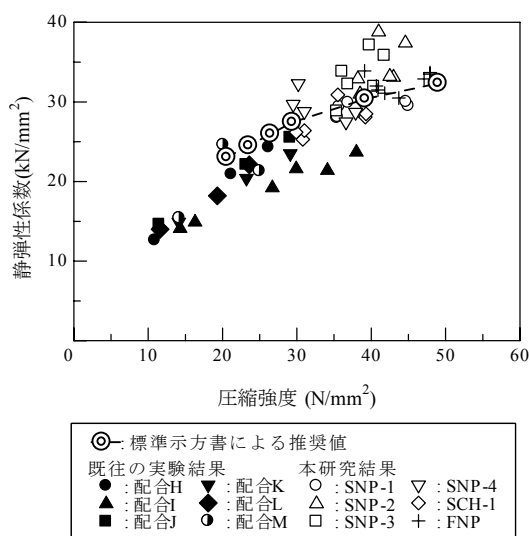


図-11 圧縮強度-弾性係数関係

は、示方書の値にほぼ等しいかまたは静弾性係数が若干上回る傾向を示している。

本研究での実験値の圧縮強度域は、既往の実験結果のうち配合Iにほぼ等しいが、その圧縮強度-静弾性係数関係は大きく異なっている。一般的に骨材の物性はコンクリートの弾性係数に大きく影響を与えている⁹⁾。前述のように、産地によって製鋼スラグの物性が大きく異なる可能性を考えれば、このように圧縮強度-静弾性係数関係が大きく変わる可能性があると言える。

4.4 乾燥に関わる特性

(1) 乾燥状態が強度に与える影響

普通コンクリートの曲げ強度が乾燥状態によって強く影響を受けることは、既往の研究により明らかにされてきた¹⁰⁾。例えば水中養生後、気中状態に置かれた部材は、部材表面が乾燥状態となるのに対し部材内部は湿潤状態のままであるから、部材において乾燥収縮量に勾配が生じる。これにより部材表面に引張ひずみが導入されるため、水中養生後に曲げ試験を行った場合に比べ、乾燥後に曲げ試験を行った場合は曲げ強度が大幅に低下する。

定量的な差はあるにせよ、このメカニズム自体は鉄鋼スラグ水和固化体においても同じであると考えられる。そこで本研究においては、この強度低下について確認するため、乾燥状態を変化させた曲げ強度試験を行った。

検討を行う乾燥状態としては、水中養生の後、養生水槽から取り出した直後に曲げ試験を行ったもの、標準状態 (20℃, 60%RH) で一定の時間乾燥させたもの、乾燥炉 (105℃) で重量変化が無くなるまで乾燥させたものの3種類とした。なおここでは各状態を便宜上、みかけ飽水状態、気乾状態、みかけ絶乾状態と呼ぶことにする。また乾燥率として、

$100 \times (\text{みかけ飽水重量} - \text{乾燥後重量}) / \text{飽和含水量}$ (4) を定義し、これを各状態の指標として用いた。ここで飽和含水量は全ての供試体で一定とし、みかけ飽水重量-みかけ絶乾重量とした。この指標は各状態の乾燥率を正確に表すものではないが、今回のように大きく異なる3つの乾燥水準を比較する場合にはある程度の判断基準とすることができる。ここで計算される乾燥率はそれぞれの状態に対し、0%, 8.4%, 100%であった。本試験において使用する供試体は、それぞれの状態に対して1体ずつである。

図-12に圧縮強度、曲げ強度、弾性係数と乾燥率の関係を示す。圧縮強度は表面の乾燥により一旦上昇するものの、みかけ絶乾状態ではみかけ飽水状態の83%と大幅に減少する。一方、曲げ強度は表面の乾燥により急激かつ大幅に減少する。気乾状態ではみかけ飽水状態の80%、

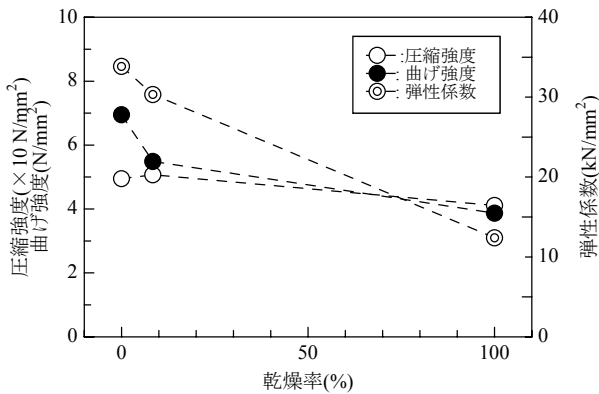


図-12 圧縮強度，曲げ強度-乾燥率関係

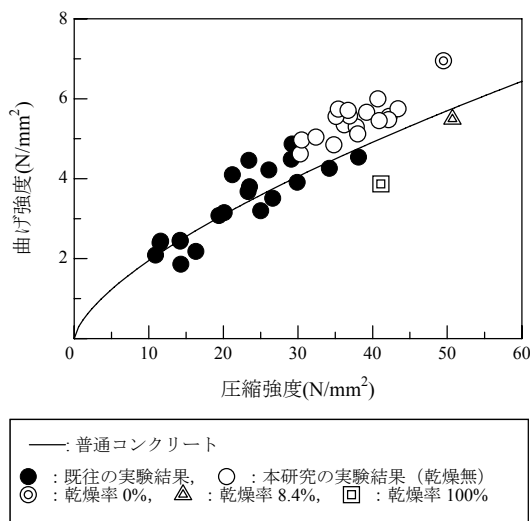


図-13 曲げ強度-圧縮強度関係

みかけ絶乾状態ではみかけ飽水状態の 56%にまで減少する。このような曲げ強度の大幅な減少は誤差範囲とは言えず、既往の研究による普通コンクリートと同様に乾燥によって曲げ強度が減少すると言える。また乾燥率がわずか8%程度であって、表面付近が乾燥する程度であってもその程度は大きいと言える。図-13 は乾燥状態の違いによる圧縮強度-曲げ関係を、図-10 に追記したものである。気乾状態では曲げ強度は大幅に減少するが、圧縮強度の減少がほとんど無いため、圧縮強度-曲げ強度関係は普通コンクリートとほぼ同じとなる。引張側が気中に露出していない舗装部材を考えれば、実環境は見かけ飽水状態と本試験での気乾状態の範囲にあると言える。よって乾燥状態を考慮しても、圧縮強度が 30 N/mm² を超える強度域における鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ強度は、同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートと同等以上であると言える。

弾性係数も乾燥と共に低下する。気乾状態ではみかけ飽水状態の 90%程度であるが、みかけ絶乾状態では、み

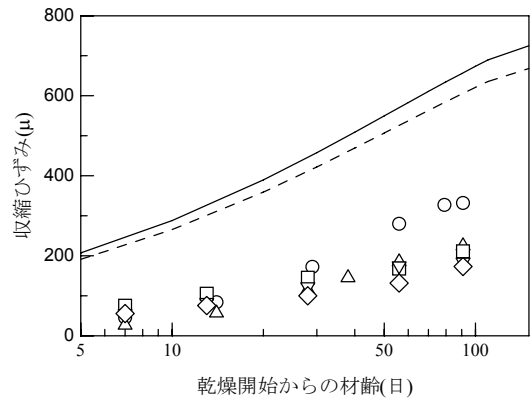


図-14 乾燥収縮ひずみ

かけ飽水状態の 37%にまで低下する。弾性係数の減少は固化体内部の破壊程度を示すと考えられるため、乾燥によって部材内部の微視ひび割れが増大したものと考えられる。ただし、これが乾燥によって発生する内部応力に起因するものであるかは本研究の範囲では判断できない。

(2) 乾燥収縮

SNP-1～SNP-4, SCH-1の乾燥開始時からの経過時間と収縮ひずみの関係を図-14に、経過時間と重量減少率((乾燥開始時の重量-乾燥中重量)/乾燥開始時の重量)の関係を図-15に示す。普通コンクリートの乾燥収縮量は、使用する材料や部材の寸法によって大きく異なる。そこで普通コンクリートとの比較のため、実験結果に基づき構築され、比較的精度の高い阪田らの普通コンクリートの乾燥収縮量予測式¹¹⁾による計算値を、普通コンクリートの平均的な値として図-14に併せて示した。なお予測式は次のとおりである。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (5)$$

ここに、

$$\varepsilon'_{sh} = -60 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5[\log_e(V/S)]^2 + 4 \log_e t_0 \quad (6)$$

ε'_{sh} : 乾燥収縮ひずみの最終値 (×10⁻⁵)

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみの予測値 (×10⁻⁵)

RH : 相対湿度 (%)

W : 単位水量 (kg/m³)

V : 体積 (cm³)

S : 外気に接する表面積 (cm²)

- V/S : 体積表面積比 (cm)
 t_0 : 乾燥開始時材齢 (日)
 $t_0 \geq 28$ のとき $t_0 = 28$
 $t_0 \leq 7$ のとき $t_0 = 7$
 t : 乾燥期間 (日)

ここで計算における単位水量は、本試験で用いた配合とおおむね等しい、 $W = 240\text{kg/m}^3$, 200kg/m^3 とした。なお本実験に対する適用性であるが、 V/S と RH の値が阪田らの実験と同一であるため、適用範囲内であると見なした。

乾燥100日で一般的な普通コンクリートが $600 \sim 700 \mu$ の収縮量を示すのに比べ、鉄鋼スラグ水和固化体の収縮量は乾燥100日で概ね 300μ 以下となり、普通コンクリートよりも明らかに低い結果となった。これは、鉄鋼スラグ水和固化体と同じく高炉スラグ微粉末を含む高炉セメントコンクリートの乾燥収縮が普通コンクリートよりも大きく、またスラグ置換率が高いほど乾燥収縮が大きくなる

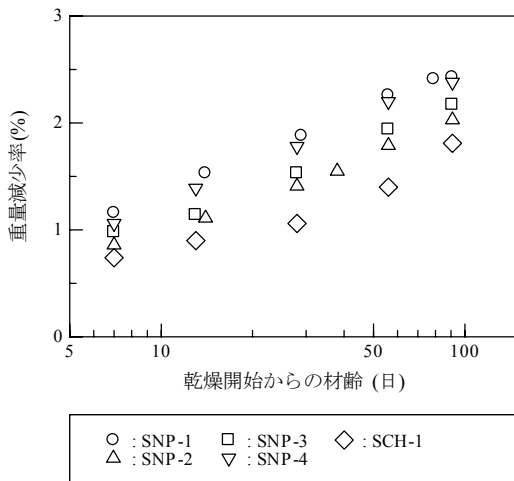


図-15 乾燥開始からの重量減少率変化

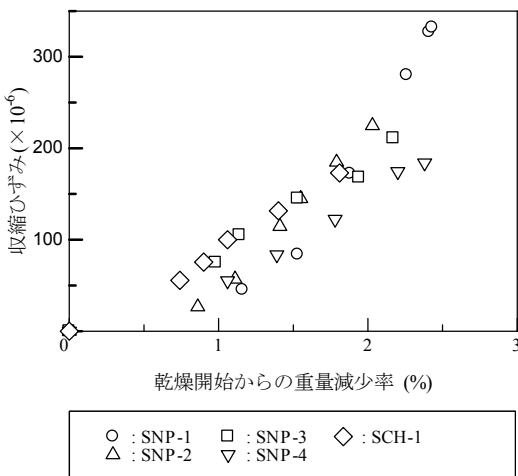


図-16 収縮ひずみ-重量減少率関係

という既往の実験等で示されている結果¹²⁾と異なるものである。また収縮挙動については普通コンクリートと異なる顕著な傾向は見られなかった。

鉄鋼スラグ水和固化体の各配合間で比較すると、乾燥20日目まで収縮ひずみの差はほとんど見られない。一方、20日以降はSNP-1のみ異なった傾向を示し、収縮ひずみ値とその増加率は全ての配合中で最大値を示す。SNP-1と他の配合との乾燥材齢100日における収縮量の差はおよそ 100μ 程度となる。

乾燥開始からの重量減少率で比較すればSNP-1のみ突出して異なる傾向は見られない。また図-16に示す、収縮ひずみと乾燥開始からの重量減少率の関係においても、顕著に異なった傾向は見られない。これらのことから、水分移動のしやすさや乾燥収縮機構そのものについては、各配合間でほとんど変わらないことが言える。

SNP-1が他の配合と異なるのはセメント量と単位水量である。各単位水量は前述のように収縮ひずみにおいて主要な影響因子の一つとされ、最終収縮ひずみ予測式に考慮されているが、セメント量については考慮されていない。SNP-1の単位水量は 244kg/m^3 であり、他の試験体の単位水量がほぼ 200kg/m^3 前後であるのに対し比較的大きい。ここでの単位水量差が乾燥材齢100日の予測ひずみ値に与える影響は 50μ 程度の差となる。実験におけるスラグ固化体間の差は 100μ でこれよりも小さい。また実験におけるスラグ固化体の全収縮ひずみが普通コンクリートの平均に比べ非常に少ない事を考慮すれば、単位水量の影響によるひずみ差はさらに小さい可能性がある。よって単位水量のみが 100μ のひずみ差の要因であるとは考えにくく、セメント量も鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮に何らかの影響を与えている可能性があると言える。

4.5 熱膨張係数

供試体温度が 20°C である時の供試体長さを基準とした、各温度における供試体長さ変化に伴うひずみ値を図-17に示す。ここでひずみと温度はほぼ線形の関係を示したため、最小二乗法を用い各配合における熱膨張係数を求めた。算出した熱膨張係数を表-6に示す。

熱膨張係数は配合により若干のばらつきを伴い、 $6.6 \sim 9.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の範囲を示し、その平均値は $7.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であった。一般に言われている普通コンクリートの熱膨張係数は $7.0 \sim 13.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の範囲⁸⁾⁹⁾であり、本研究において示された鉄鋼スラグ水和固化体の熱膨張係数はこの範囲内の低い領域側の値を示している。従って、空港舗装への適用には問題ないことがわかった。

高炉スラグによって形成されるマトリクス部の熱膨張

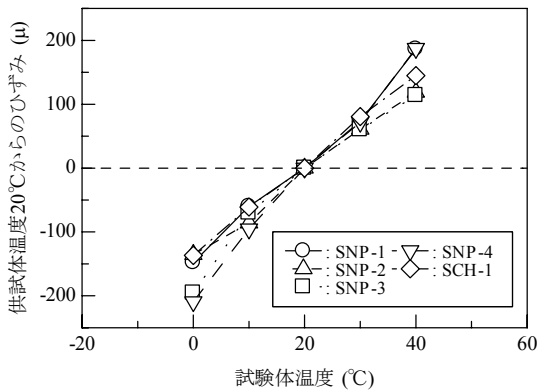


図-17 温度ひずみ

表-6 熱膨張係数

配合	SNP-1	SNP-2	SNP-3	SNP-4	SCH-1
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.0	6.6	7.5	9.6	7.1

係数は、高炉スラグ微粉末を混和材として利用したコンクリートの熱膨張係数が普通コンクリートと大きな差がないことが実験¹³⁾で示されていることから、普通コンクリートと同等であるといえる。一方、製鋼スラグの熱膨張係数については現在明らかとなっていないが、高炉スラグによって形成されるマトリクス部の熱膨張係数と、本実験結果が普通コンクリートの範囲内であることから天然骨材と大きな差は無いと推定される。しかし製鋼スラグは生産過程や炉によって品質が変動するため、今後これらを考慮した検討が必要である。

4.6 曲げ疲労強度

表-7 に曲げ疲労強度の試験結果を示す。本研究においては舗装部材を対象としていることから、曲げ強度 f_{bd} と最大曲げ引張応力 σ_{max} の比で定義される応力比、 $S = \sigma_{max}/f_{bd}$ のみを考慮し、最小応力は 0 N/mm^2 とした。

表-7 曲げ疲労試験結果

試験体名	最大応力 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	応力比 S	疲労寿命 (回)
FNP-90-1	4.93	5.43	0.91	296
FNP-90-2	4.93	5.45	0.91	2602
FNP-90-3	4.93	5.62	0.88	76
FNP-85	5.30	6.24	0.85	384
FNP-80-1	4.97	6.21	0.80	121413
FNP-75-1	4.38	5.75	0.76	42068
FNP-75-2	4.38	5.87	0.75	131561
FNP-75-3	4.38	5.90	0.74	422663
FNP-65-1	4.17	6.42	0.65	871837
FNP-60-1	3.65	6.08	0.60	636118

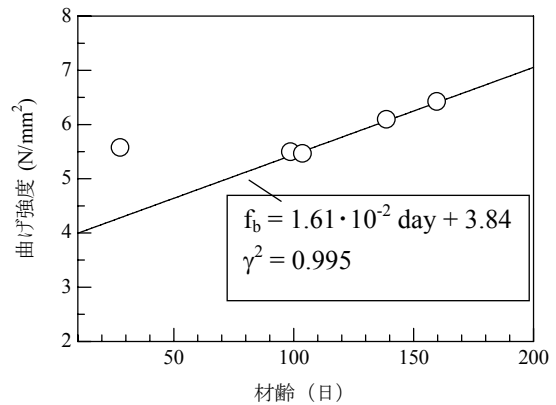


図-18 FNP の曲げ強度-材齢関係

また応力比の算出には疲労载荷開始時の曲げ強度を用いることとした。疲労载荷開始時の曲げ強度は、供試体 3 体の曲げ強度試験結果の平均値、あるいは材齢 91 日以降の曲げ強度-材齢関係(図-18)から算出した値を用いた。

コンクリート標準示方書⁸⁾では普通コンクリートの疲労強度を次式で表している。

$$f_{rd} = k_1 f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d} \right) \left(1 - \frac{\log N}{K} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

f_{rd} : 設計疲労強度, f_d : 静的設計強度, σ_p : 永久荷重
 K : 材料特性値 ($K = 10$: 水中コンクリート, 軽量コンクリート, $K = 17$: 普通コンクリート)

k_1 : 支配応力の特性値 ($k_1 = 0.85$: 圧縮, 曲げ圧縮, $k_1 = 1.0$: 引張, 曲げ引張)

ここで、 f_{rd} を上限応力、 f_d を静的曲げ強度とし、永久荷重 $\sigma_p = 0$ とすれば次式を得る。

$$\log N = K(1 - S) \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$S = \sigma_{max}/f_{bnd}$: 上限応力比, σ_{max} : 上限応力, f_{bnd} : 静的曲げ強度

この $S-N$ 関係について、上式で $K=17$ として計算した普通コンクリートの関係と本実験結果を図-19 に示す。

図-19 から鉄鋼スラグ水和固化体の $S-N$ 関係は普通コンクリートと定性的に等しい傾向であると考えられる。式(8)の材料特性値 K を未知数として回帰分析を行うと、 $K=19$ が得られる。この値は曲げ強度 5 N/mm^2 クラスにおける鉄鋼スラグ水和固化体の曲げ疲労強度が普通コンクリートに比べやや大きいことを示し、曲げ強度で示される傾向にはほぼ一致する。

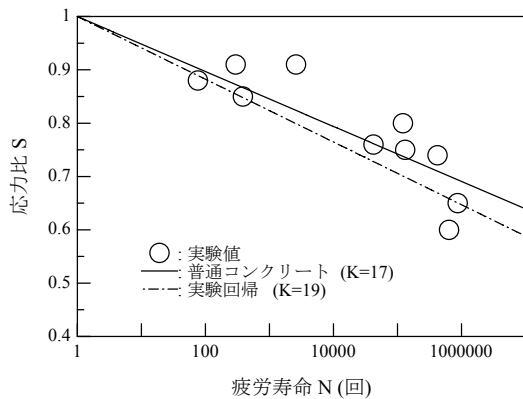


図-19 S-N 関係

5. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 鉄鋼スラグ水和固化体は曲げ強度 5 N/mm^2 を実現可能であることがわかった。
- 2) 少量の範囲ではセメント量が圧縮強度に与える影響は見られない。
- 3) 曲げ強度 5 N/mm^2 クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性として以下のことが明らかとなった。
ただし、本結論では多数の実験に基づく実験値あるいは実験式で示される値や傾向を平均的な普通コンクリートと見なす。
 - ・湿潤状態における圧縮強度-曲げ強度関係は同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートに対して若干高い曲げ強度を示す。表面が乾燥した状態を考慮しても、普通コンクリートと同等以上の曲げ強度を示す。
 - ・圧縮強度-静弾性係数関係は同一の圧縮強度を持つ普通コンクリートに対してやや高い静弾性係数を示す。
 - ・乾燥収縮量は普通コンクリートに比べ低い。
 - ・セメント量が乾燥収縮に何らかの影響を与えると考えられる。
 - ・熱膨張係数は普通コンクリートの範囲で低い領域側の傾向を示す。
 - ・曲げ疲労強度は普通コンクリートに比べやや高く、曲げ強度と同様の傾向である。
- 4) 本研究で明らかとなった基本特性より、力学特性の観点からは鉄鋼スラグ水和固化体は空港舗装への適用が可能であると言える。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル, (財)沿岸開発技術センター, 沿岸開発技術ライブラリー No. 16, 2003
- 2) 松永久宏, 小菊史男, 高木正人, 谷敷多穂: 鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発, コンクリート工学, Vol. 41, No. 4, pp. 47-54, 2003. 4
- 3) 空港舗装構造設計要項, (財)港湾空港建設技術サービスセンター, 1999
- 4) 小菊史男, 濱田秀則, 山路徹, 松永久宏: 鉄鋼スラグを用いた固化体の基礎的性状および港湾構造物への適用性に関する研究, 港湾技研資料, No. 990, 港湾空港技術研究所, 2001
- 5) コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2002
- 6) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 1996
- 7) 小梁川雅, 国府勝郎, 福田正, コンクリート舗装版の曲げ疲労に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 372 号, V-5, pp. 131-137, 1986
- 8) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, 2002
- 9) 例えば, A. M. Neville: ネビルのコンクリートの特性, 技報堂出版, 1979
- 10) 例えば, 日高重徳, 二羽淳一郎, 田辺忠顕: 乾燥を伴うコンクリートはりの初期応力分布と曲げ強度, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 501-506, 1995
- 11) 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 244-249, 1989
- 12) 例えば, コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, 耐久性専門委員会ひび割れ分科会報告, H-23, p18, セメント協会, 1992
- 13) 例えば, 高耐久性PC構造物開発検討委員会: 高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストコンクリート構造物の開発, p36, 日本材料学会, 1998

記号表

AA	: 単位アルカリ刺激材量 (kg/m^3) *
BP	: 単位高炉スラグ微粉末量 (kg/m^3)
CH	: 単位消石灰量 (kg/m^3)
cm^3/cm^2	: すり減り係数の単位で, 単位面積当たりのすり減りによる体積減少量を表す
FA	: 単位フライアッシュ量 (kg/m^3)
f_{bd}	: 曲げ強度 (N/mm^2) (= 静的曲げ強度)
f_{bnd}	: 静的曲げ強度
f'_c	: 圧縮強度 (N/mm^2)
f_d	: 静的設計強度
f_{rd}	: 設計疲労強度
K	: 疲労強度における材料特性値
k_I	: 疲労強度における支配応力の特性値
NP	: 単位普通ポルトランドセメント量 (kg/m^3)
RH	: 相対湿度 (%)
S	: 外気に接する表面積 (cm^2)
S	: 応力比
SS	: 単位製鋼スラグ量 (kg/m^3)
t	: 乾燥期間 (日)
t_0	: 乾燥開始時材齢 (日)
V	: 体積 (cm^3)
V/S	: 体積表面積比 (cm)
W	: 単位水量 (kg/m^3)
ϕ	: 直径
γ	: 相関係数
μ	: 10^{-6} を表す無次元数
ϵ'_{sh}	: 乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)
$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみの予測値 ($\times 10^{-5}$)
σ_{max}	: 上限応力
σ_p	: 永久荷重により生じる応力

付録. 本資料の図表で掲載した測定データ集

付-1 圧縮強度とすり減り係数の関係 (図-2)

材料名	圧縮強度 (N/mm ²)	すり減り係数 (cm ³ /cm ²)	備 考
鉄鋼スラグ水和固化体	29.9	0.043	参考文献(4)からの 読み取り値
	38.2	0.052	
	33.9	0.065	
	26.5	0.085	
	24.9	0.083	
	19.8	0.096	
	23.1	0.080	
	29.0	0.098	
	26.2	0.073	
	21.2	0.076	
	23.2	0.098	
普通コンクリート	20.0	0.100	
	50.0	0.075	

付-2 曲げ強度と圧縮強度の関係 (図-4, 図-10, 図-13)

著者らによる実験データ					既往のデータ			
配合	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	備 考	配合	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	備 考
SNP1	34.8	4.85	28	試験時湿潤状態	H	10.9	2.09	参考文献(1)からの 読み取り値
	42.2	5.56	91			21.2	4.10	
SNP2	39.2	5.66	28			I	26.1	
	43.4	5.75	91		14.3		1.86	
SNP3	36.2	5.35	28		16.3		2.18	
	40.7	6.00	91		26.6		3.51	
SNP4	30.3	4.62	28		29.9		3.91	
	37.8	5.30	91		34.2		4.26	
SCH1	30.5	4.97	28		38.1	4.54		
	38.0	5.12	91		J	11.5	2.40	
FNP	36.9	5.57	28			23.4	4.46	
	35.4	5.74	28	29.2		4.87		
	36.7	5.71	28	K	14.2	2.44		
	32.4	5.04	28		23.3	3.68		
	35.1	5.56	28	29.1	4.49			
FNP	42.1	5.48	99	L	11.6	2.44		
	40.9	5.45	104		19.4	3.08		
	—	6.08	139		23.5	3.80		
	49.5	6.95	401	M	14.2	2.46		
	50.7	5.49	401		20.1	3.15		
	41.1	3.87	401					

付-3 28日圧縮強度と有効粉体水比の関係 (図-7, 図-8)

既往のデータ (参考文献(1)からの読み取り値)

有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)	有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)	有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)
0.74	10.0	1.78	22.4	2.20	22.4
0.85	12.1	1.78	18.8	2.23	20.4
0.86	12.5	1.79	23.4	2.23	24.1
0.91	9.8	1.79	19.7	2.23	22.8
0.94	13.6	1.80	20.1	2.23	21.6
0.95	14.9	1.81	16.2	2.25	22.4
1.02	16.4	1.81	18.5	2.27	19.0
1.04	14.7	1.83	17.5	2.27	24.9
1.04	14.1	1.83	19.2	2.27	25.5
1.09	12.3	1.84	21.3	2.30	20.4
1.17	12.8	1.85	22.8	2.30	24.3
1.18	16.6	1.85	20.0	2.31	26.9
1.20	16.7	1.87	21.8	2.33	24.9
1.21	12.4	1.87	22.4	2.34	20.6
1.23	15.0	1.87	19.0	2.34	23.5
1.26	16.0	1.90	20.2	2.34	25.4
1.28	19.6	1.90	20.9	2.34	27.3
1.29	19.0	1.90	19.4	2.37	21.6
1.39	14.5	1.92	18.0	2.37	24.2
1.39	17.2	1.92	17.7	2.38	23.5
1.39	18.8	1.92	17.2	2.38	27.8
1.40	13.2	1.92	20.5	2.38	27.0
1.44	17.2	1.93	24.4	2.39	25.2
1.44	18.2	1.94	21.6	2.40	21.0
1.47	19.3	1.95	22.0	2.42	22.6
1.47	20.3	1.95	23.5	2.43	26.3
1.49	14.8	1.96	19.3	2.45	21.7
1.49	15.7	1.97	16.7	2.45	22.5
1.50	17.3	1.98	25.6	2.48	19.5
1.50	22.0	1.99	19.5	2.48	26.5
1.53	18.4	2.01	23.1	2.49	27.3
1.54	15.4	2.01	20.2	2.49	29.2
1.55	21.4	2.02	17.2	2.50	21.9
1.55	20.7	2.02	25.1	2.50	28.7
1.57	15.1	2.03	21.1	2.51	23.8
1.57	19.7	2.05	17.2	2.53	19.1
1.58	15.5	2.05	21.9	2.53	26.6
1.58	17.5	2.05	18.3	2.54	21.0
1.61	20.1	2.05	24.2	2.54	23.8
1.63	20.4	2.06	19.1	2.54	25.3
1.64	18.1	2.08	21.7	2.54	27.3
1.64	22.2	2.09	24.7	2.55	20.3
1.65	18.6	2.14	21.0	2.56	23.4
1.68	18.3	2.15	19.0	2.57	24.4
1.69	19.6	2.16	19.8	2.61	21.4
1.70	19.3	2.16	24.4	2.62	27.3
1.75	20.3	2.16	25.6	2.62	26.3
1.76	14.0	2.16	23.2	2.63	28.7
1.76	17.1	2.19	18.7	2.68	26.0
1.77	20.2	2.19	21.9	2.68	26.3

既往のデータ（参考文献(1)からの読み取り値）

有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)	有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)	有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)
2.69	20.3	2.81	23.3	2.94	24.3
2.70	21.9	2.81	26.4	2.95	27.5
2.74	22.8	2.82	25.6	2.98	24.1
2.74	27.3	2.86	22.4	3.21	27.1
2.75	30.7	2.86	30.4		
2.79	26.2	2.92	22.6		

著者らの実験データ

有効粉体水比*	28日圧縮強度 (N/mm ²)
2.00	34.8
2.22	39.2
2.03	36.2
1.96	30.3
1.96	30.5
2.57	35.1

* $(BP+AA+0.35)/W$ で計算される値

ただし、 BP :単位高炉スラグ微粉末量、 AA :単位アルカリ刺激材量、 FA :単位フライアッシュ量、 W :単位水量

付-4 圧縮強度と静弾性係数の関係（図-11）

既往のデータ（参考文献(1)からの読み取り値）

配合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	配合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
H	10.9	12.6	K	14.1	14.9
	21.2	20.9		23.2	20.4
	26.2	24.3		29.1	23.5
I	14.3	14.1	L	11.6	14.0
	16.3	14.9		19.3	18.2
	26.7	19.2		23.6	22.1
	29.9	21.6	M	14.2	15.4
	34.1	21.4		20.1	24.6
38.0	23.7	25.0	21.3		
J	11.5	14.6			
	23.2	22.1			
	29.1	25.5			

著者らの実験データ

配 合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	配 合	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
SNP-1	35.4	28.0	SNP-4	31.0	28.8
	35.5	28.1		29.5	29.7
	35.7	29.4		30.2	32.3
	36.9	29.9		38.9	29.8
	45.0	29.5		37.9	28.7
	44.7	30.0		36.6	27.5
SNP-2	38.5	31.0	SCH-1	30.8	25.3
	38.2	32.9		31.0	26.4
	41.0	38.8		29.9	26.2
	43.0	33.1		39.2	28.1
	42.5	33.2		35.5	30.9
	44.6	37.4		39.3	28.5
SNP-3	36.9	32.2	FNP	43.7	30.5
	36.1	33.8		40.9	31.5
	35.4	28.8		41.8	31.1
	41.8	35.8		40.7	32.0
	40.4	31.9		39.1	33.9
	39.8	37.1		47.9	33.7
		47.1		32.9	
		49.4		33.9	
		50.7		33.8	
		50.7		29.7	
		50.4*		32.2*	
		51.1*		29.1*	
		40.8**		12.2**	
		40.7**		11.8**	
		41.9**		13.1**	

一部を除き全て湿潤状態(水中養生直後)での値

* RH60%, 20℃環境下の乾燥により, 重量が8%減少した時の値

** 乾燥炉 (105℃)にて重量変化が無くなるまで乾燥させた時の値

付-5 曲げ強度と乾燥率の関係 (図-12)

乾燥率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
0	49.5	6.95	33.9
8.4	50.7	5.49	30.3
100	41.1	3.87	12.4

*乾燥率 = 100 × (みかけ飽水重量-乾燥後重量) / 飽和時の含水量

付-6 乾燥収縮ひずみと乾燥材齢、重量減少率の関係 (図-14, 図-15, 図-16)

配合	乾燥材齢* (日)	重量減少率** (%)	収縮ひずみ (μ)	配合	乾燥材齢* (日)	重量減少率** (%)	収縮ひずみ (μ)
SNP-1	0	0.00	0	SNP-4	0	0.00	0
	7	1.16	45		7	1.06	55
	14	1.53	84		13	1.39	83
	29	1.88	172		28	1.78	122
	56	2.26	280		56	2.20	175
	79	2.41	327		91	2.38	184
	91	2.43	332				
SNP-2	0	0.00	0	SCH-1	0	0.00	0
	7	0.86	27		7	0.74	56
	14	1.11	57		13	0.90	76
	28	1.41	115		28	1.06	100
	38	1.55	145		56	1.40	132
	56	1.79	185		91	1.81	173
	91	2.03	225				
SNP-3	0	0.00	0				
	7	0.98	75				
	13	1.14	105				
	28	1.53	145				
	56	1.94	168				
	91	2.17	211				

* 材齢7日より乾燥開始

** $100 \times (\text{乾燥開始からの重量の減少量}) / (\text{乾燥開始時の重量})$

付-7 各温度における膨張ひずみ (図-17)

温度 (°C)	20°Cにおける供試体長さを基準とした時の膨張ひずみ				
	SNP-1	SNP-2	SNP-3	SNP-4	SCH-1
0	-148	-135	-196	-209	-137
10	-60	-86	-70	-95	-61
20	0	0	0	0	0
30	73	61	60	72	81
40	187	119	114	188	145

付-8 曲げ疲労強度 (図-19)

試験体名	最大応力 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	応力比 S	疲労寿命 (回)
FNP-90-1	4.93	5.43	0.91	296
FNP-90-2	4.93	5.45	0.91	2602
FNP-90-3	4.93	5.62	0.88	76
FNP-85	5.30	6.24	0.85	384
FNP-80-1	4.97	6.21	0.80	121413
FNP-75-1	4.38	5.75	0.76	42068
FNP-75-2	4.38	5.87	0.75	131561
FNP-75-3	4.38	5.90	0.74	422663
FNP-65-1	4.17	6.42	0.65	871837
FNP-60-1	3.65	6.08	0.60	636118

港湾空港技術研究所資料 No. 1153

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。