

論文 曲げ強度 5N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の力学特性

高橋 良輔^{*1}・濱田 秀則^{*2}

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り、すり減り抵抗性の高さから空港舗装への適用性が検討されている。本材料は製鋼スラグを骨材として利用することから基本特性が普通コンクリートと異なる可能性がある。既往の研究において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 5N/mm² クラスの基本特性はまだ明らかとなっていない。そこで本研究では曲げ強度 5N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の各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。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体, 圧縮強度, 曲げ強度, 弾性係数, 疲労強度

1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体は高炉スラグ微粉末を結合材、製鋼スラグを骨材とする固化体であり、副産物を極力利用することで副産物の有効利用と循環型社会の構築、環境の保護を担おうとする材料である。本材料の基本特性に関しては既に研究が行われ、その成果として各材料の品質基準規準や製造方法、材料性能の照査方法などが技術マニュアル¹⁾としてとりまとめられるなど、利用拡大と普及への期待が高まっている。

鉄鋼スラグ水和固化体はすり減り抵抗性に優れていることから空港舗装への適用が期待できる。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では 28 日曲げ強度を 5N/mm² 以上と規定している²⁾。しかしながら、既往の研究¹⁾³⁾では曲げ強度が 5N/mm² を超えるような場合における材料性能はほとんど検討されていない。

製鋼スラグ骨材は、遊離石灰を予め水和、膨張させるエージング処理中の比較的小さな遊離石灰の溶脱¹⁾による多数の微細空隙により骨材自体の強度が低い可能性が考えられる。また弱い水硬性¹⁾による界面特性への影響も考えられ、本水和固化体への力学性能に影響する強度特性

や界面特性が天然骨材とは異なることが予想される。また藤井らは製鋼スラグの吸水率がスラグ固化体の強度や耐久性に影響を与えることを明らかにしており⁴⁾、骨材の物性が各製鉄所により大きく変化することから、骨材品質による力学性能への影響が考えられる。既往の研究¹⁾³⁾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が、本材料のこれらの性質を考えれば、高強度域での性質がコンクリートと同等とは限らない。

そこで本研究においては、未だ検討が行われていない曲げ強度が 5N/mm² クラスの鉄鋼スラグ水和固化体の基本性能について実験を行い、その強度レベルの基本物性を調べると共に普通コンクリートとの比較を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および検討配合

結合材には JIS A 6206 で規定されている高炉スラグ微粉 4000(密度：2.88 g/cm³)を、骨材には大気エージング処理を行った溶鉄予備処理脱りんスラグ(表-1)を用いた。製鋼スラグの最大粒径は、膨張安定性を考慮して 20mm とした。また

*1 港湾空港技術研究所 地盤・構造部材料研究室 工博 (正会員)

*2 港湾空港技術研究所 地盤・構造部材料研究室室長 工博 (正会員)

フライアッシュには JIS A 6201 II種相当の原粉 (密度: 2.23 g/cm³) を、アルカリ刺激材として JIS R 9001 に規定されている工業用消石灰特号 (密度: 2.23 g/cm³) および普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm³) を用いた。

表-2 に本研究で用いた試験体の配合を示す。S シリーズ試験体は圧縮・曲げ強度試験および乾燥収縮、熱膨張試験に用いた。また F シリーズ試験体は疲労強度試験に用いた。これまでの検討では、圧縮強度-曲げ強度関係はほぼ普通コンクリートにおける関係に等しい¹⁾としている。その場合、曲げ強度 5N/mm² での圧縮強度は 40N/mm²、粉体水比は概ね 5.0 となり、配合が現実的ではなくなる。しかし既往の実験結果¹⁾から圧縮強度 30N/mm² 以上の高強度域においては曲げ強度 5N/mm² 程度となる傾向があるように見える。そこで材齢 28 日圧縮強度 30N/mm²、スランプ 5.5~20.5cm の確保を目標に試験配合と強度試験を繰り返して決定した。

S シリーズ試験体のうち CH 試験体はアルカリ刺激材として消石灰を、NP 試験体は普通ポルトランドセメントを用いたものである。アルカリ刺激材に消石灰を用いることは、生コンクリートプラントのサイロの問題などにより、現実的には難しい。そこでアルカリ刺激材としてセメ

ントを用いた場合の基本物性への影響についても調べることにした。

2.2 実験方法

本研究においては、圧縮および曲げ強度試験、乾燥収縮試験および温度膨張試験、曲げ疲労載荷試験を行っている。

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。

乾燥収縮試験は、10×10×40cm の角柱試験体を材齢 7 日まで 20℃水中養生を行った後、室温 20℃、湿度 60% の環境下で測定した。

温度膨張試験は、材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った φ10×20cm 円柱試験体を、それぞれ 0℃、10℃、20℃、30℃、40℃水中に浸漬し、十分時間を経た後、基長 150mm に対する長さを測定した。乾燥収縮と温度膨張の測定は JIS A 1129-2 に準拠した。

曲げ疲労強度試験は、曲げ強度試験同様に 10×10×40cm 試験体を 3 等分点載荷して行った。試験体は材齢 91 日以上のもを使用し、試験開始まで 20℃水中養生を続けた。含水量の変化が試験結果に影響を与えないよう保管水槽より取出した後、速やかに表面にグリスを塗布し、さらにポリ塩化ビニリデン製ラップで覆った。載

表-1 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
3.46	3.32	4.02	1.43	1.8	60.0	4.47	60.0	51.2

表-2 配合

配合 No.	粉体水比 $\frac{(BP+C+0.35FA)}{W}$	単体量 (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 (C)		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

荷波形はハーバーサイン波とし、載荷速度は 1Hz とした。また拘束の影響を極力低減するため、載荷治具および支承と試験体間にテフロンシートを挿入した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

粉体水比と材齢 28 日圧縮強度、および材齢と圧縮強度関係を図-1, 2 に示す。ここで粉体水比は、(高炉スラグ微粉末+アルカリ刺激材+0.35×フライアッシュ) / 水¹⁾とした。

材齢 28 日における粉体水比-圧縮強度関係はほぼ直線となる関係が得られ(相関係数 $\gamma=0.79$)、既往の結果¹⁾と定性的にほぼ一致した。一方、材齢 91 日の関係においては、その相関性は低下する(相関係数 $\gamma=0.64$)。これはフライアッシュ混入量の増加に応じて強度増進の割合が増加する結果が見られることから、フライアッシュの影響が大きく出てきている為であると言える。一方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事ができなかった。本研究のような粉体水比 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。

3.2 曲げ強度

図-3 に曲げ強度-材齢関係について示す。セメントを刺激剤として用いた配合のうち、SNP-2 および SNP-3 において材齢 28 日で 5N/mm^2 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わかった。アルカリ刺激材として消石灰を用いた場合と普通ポルトランドセメントを用いた場合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、刺激剤の種類が引張り強度に何らかの影響を与えている可能性がある。しかしセメント量の増大による長期強度発現性の増加傾向は見られず、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。

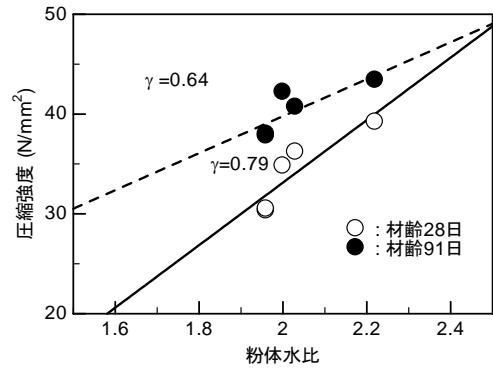


図-1 圧縮強度-粉体水比関係

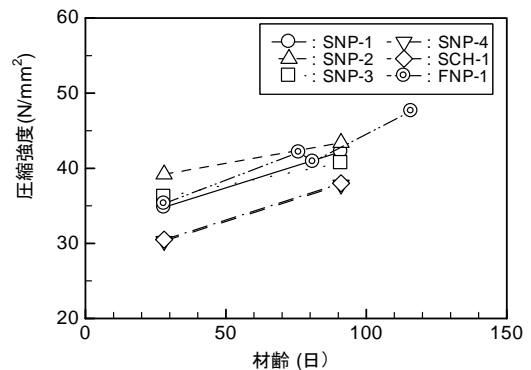


図-2 圧縮強度-材齢関係

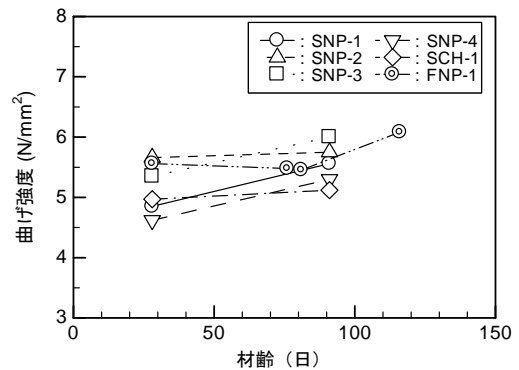


図-3 曲げ強度-材齢関係

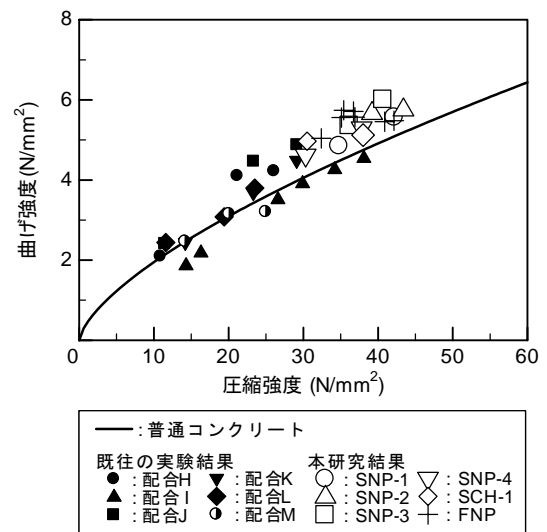


図-4 圧縮強度-曲げ強度関係

図-4 は本研究での圧縮強度と曲げ強度関係を示したものである。図には既往の実験結果¹⁾を併せて示した。図中の実線はこれまでコンクリート標準示方書⁶⁾に用いられてきたコンクリートの圧縮強度-曲げ強度関係式であり、次式で示される。

$$f_{bd} = 0.43f_c'^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 f_{bd} ：曲げ強度(N/mm²)、 f_c' ：1軸圧縮強度(N/mm²)。

一方、本実験結果および既往の実験結果を回帰して得られた圧縮強度-曲げ強度関係式は次のようになる。

$$f_{bd} = 0.32f_c'^{0.78} \quad (\gamma = 0.89) \quad (2)$$

ここに、 γ ：相関係数。

本研究結果では曲げ強度 5N/mm² 付近において、同一の圧縮強度に対して曲げ強度はコンクリートに比べスラグ固化体の方が高い値を示し、コンクリートとは異なる傾向が示されている。

図-5 は FNP 試験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粒も観測された。このため、前述のように本実験においては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いて骨材の影響の仕方が異なると推測され、それが傾向の違いとして現れていると考えられる。

3.3 弾性係数

図-6 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に、既往の実験結果¹⁾と土木学会標準示方書による推奨値⁵⁾を併せて示した。図から鉄鋼スラグ水和固化体は普通コンクリート同様、静弾性係数が圧縮強度と強い相関を示す。しかし、圧縮強度が比較的低い 30N/mm² 未満の領域においては、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、より圧縮強度が高く 30~50N/mm² 程度である本研究結果は、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すなど、その関係は普通コンク

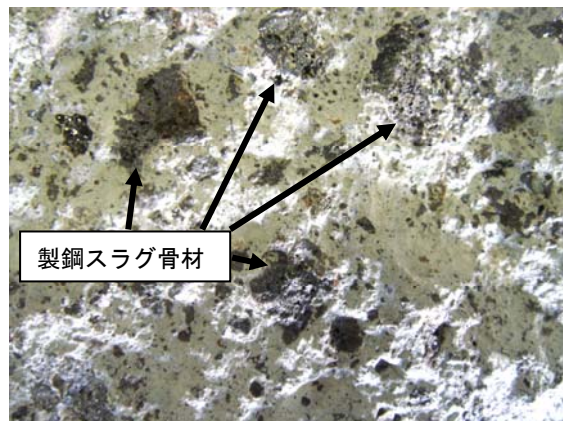


図-5 破壊面の状況

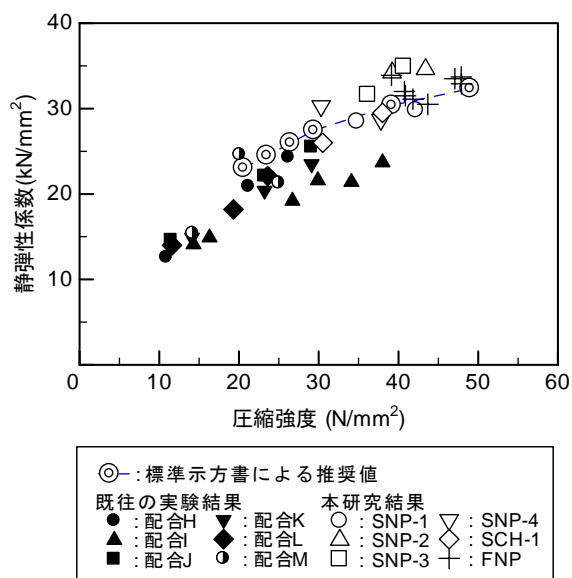


図-6 圧縮強度-弾性係数関係

リートとは異なるものであった。

本研究は既往の実験結果のうち、配合 I の圧縮強度領域にほぼ等しいが、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弾性係数に大きく影響を与えられている⁷⁾。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-弾性係数関係が大きく変わる可能性があると言える。

3.4 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を図-7 に示す。収縮量は乾燥 100 日で概ね 300 μ 以下となり一般的な普通コンクリートに比べ低い値を示すが、特に本研究の強度域において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。

各配合を比較すると、乾燥 20 日目まで収縮量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、収縮量とその増加率は全ての配合中で最大値を示す。単位水量はコンクリート標準示方書中のコンクリートの最終収縮ひずみ予測式⁵⁾において最終ひずみの項 $38 \log_e W$ として考慮されており、収縮ひずみにおいて主要な影響因子の一つとされている。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。しかし、ここでの単位水量差は単純に予測式を考えれば収縮ひずみの最終値において 10μ 程度のオーダーにしかならず、乾燥 100 日目における 100μ の差の主要因であるとは考え難い。このため、本研究結果ではセメント量が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と言える。

3.5 熱膨張

20°C を基準としたときの各温度における長さ変化量を図-8 に示す。長さ変化量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-3 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。一方、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一般に言われている普通コンクリートの熱膨張係数、 $7 \sim 13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ の範囲⁵⁾ にほぼ収まるが、低い領域側の傾向を示す。既往の文献⁶⁾において高炉スラグ骨材の熱膨張係数が $8.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度であることが示されており、本結果の値はこれに近い。製鋼スラグ骨材の熱膨張係数が高炉スラグ骨材に近いものと仮定すれば、本固化体が主に高炉スラグ微粉末と製鋼スラグで構成されていることにより本固化体の熱膨張係数がこのような傾向を示すと言える。だが生産過程や炉によって品質が変動する製鋼スラグ骨材の熱膨張係数については詳細が明らかとなっておらず、今後のさらなる検討が必要である。

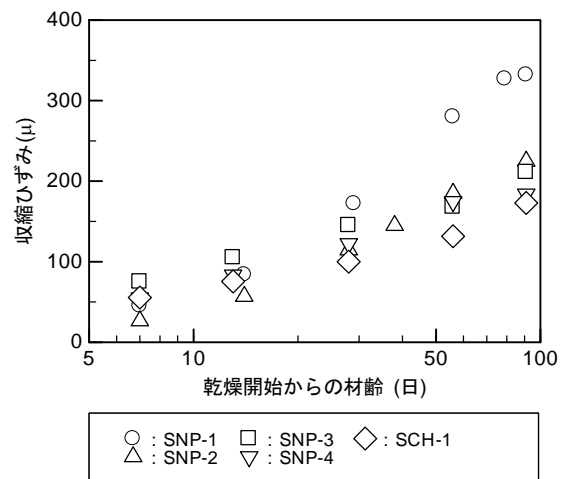


図-7 乾燥収縮ひずみ

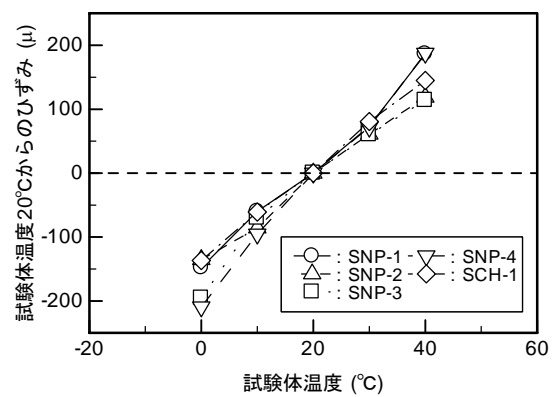


図-8 温度ひずみ

表-3 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

3.6 曲げ疲労強度

配合 FNP に対して曲げ疲労試験を行い、曲げ疲労強度を求めた。表-4 に試験結果を示す。本研究においては曲げ強度 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 0N/mm^2 とした。また応力比の算出には疲労載荷開始時の曲げ強度を用いた。

本結果の S-N 関係を図-9 に示す。また図中の実線はコンクリート標準示方書の普通コンクリートの疲労強度式⁵⁾から導かれる S-N 曲線であり、下限応力を 0 としたとき次式で表される。

$$\log N = K(1-S) \quad \text{ただし } S = f_{rd} / f_d \quad (3)$$

ここで $K=17$ (普通コンクリート)、設計疲労強度 f_{rd} は応力振幅、静的設計強度 f_d は曲げ強度とした。この式中の材料定数 K を未知数として本

疲労試験結果を回帰すると $K=19$ が得られる。この値は曲げ強度 5N/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若干大きいことを示すが、軽量コンクリート、水中コンクリートの場合が $K=10$ であることを考えれば、ほぼ普通コンクリートの曲げ疲労強度に等しいと言え、曲げ強度での傾向にほぼ一致する。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 鉄鋼スラグ水和固化体は曲げ強度 5N/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 5N/mm^2 クラスの基本特性として以下のことが明らかとなった。
 - ・ 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。
 - ・ 圧縮強度-弾性係数関係は普通コンクリートにほぼ等しい。
 - ・ 乾燥収縮性は普通コンクリートに比べ著しい差は見られない。ただし、セメント量が乾燥収縮性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ほぼ等しい。

5. あとがき

本研究の結果はあくまで同一の骨材種によるものである。品質のばらつきが大きく、強度への寄与の仕方が天然骨材とは異なる製鋼スラグ骨材は、その物性が鉄鋼スラグ水和固化体の各基本特性に大きく影響を与える可能性がある。よって製鋼スラグの正しい利用のため、今後さらに骨材物性に着目した検討を行い、データを蓄積していく予定である。

表-4 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

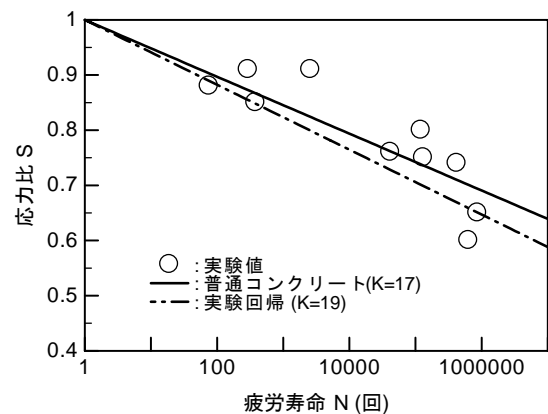


図-9 S-N 関係

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.16，2003.3
- 2) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要項，1999.4
- 3) 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
- 4) 藤井隆史，藤木昭宏，綾野克紀，阪田憲次：製鋼スラグの吸水率が鉄鋼スラグ水和固化体の耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，2005
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編]，2002
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，1996
- 7) A.M.Neville：ネビルのコンクリートの特性，技報堂出版，1979