

転炉スラグのコンクリート骨材としての適用性について

Utilization of Converter-Furnace Slag as Fine and Coarse
Aggregates for Cement Concrete

堀口 敬*

By Takashi HORIGUCHI

1. はじめに

コンクリート用骨材の枯渇化が叫ばれて久しい今日において、産業副産物である各種スラグの骨材としての有効利用は一つの有望な対応策であり、省資源対策としても重要な位置を占める。すでに高炉スラグについては、この種の実用化が開始され多方面に積極的に利用されているが、製鋼によって産出する転炉スラグあるいは電気炉スラグについては、スラグ中に未溶化状態で存在する遊離石灰 ($f \cdot CaO$) 相の水和反応による膨張現象が主要原因とみられる風化崩壊の問題¹⁾等があり、セメント系材料の骨材としては実用化に至っていない現状にある。この膨張現象を軽減する方法としてスラグを野外において一定期間放置するエイジング処理が有効とされ^{2), 3)}、このための指針⁴⁾が既に作製されている。こうしたエイジング処理をした転炉スラグを骨材として用いた各種のアスファルト舗装の試験施工が各所で実施され、特に耐摩耗性に対する優れた効果が報告されている^{5), 6)}。

本論文は、この転炉スラグをセメントコンクリート用の骨材として使用するために必要な資料について、既に報告した一連の研究結果^{7), 8), 9)}と、その後新たに得られた成果をまとめたものである。本論文ではまず、エイジング処理を施した転炉スラグを骨材として用いたセメントコンクリート（以下転炉スラグコンクリートと呼ぶ）の基礎的性状を把握し、その安定性に対する問題を検討し、さらに転炉スラグを細骨材あるいは粗骨材として用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行った。さらに、16種類の配合による各種転炉スラグコンクリートの摩耗試験を行ない、転炉スラグが耐摩耗性に及ぼす影響を詳しく検討したものである。

2. 試験方法

2.1 試験の概要

本論文で検討した試験の内容は以下に述べる3種類に要約される。

第一は転炉スラグコンクリートの基礎的性状を把握することを目的とした試験であり、長さ変化、単位容積重量および力学的強度について、それぞれの特性を検討した。なお、長さ変化試験と圧縮強度および曲げ強度試験については、その性状を供試体の材令一年まで継続して検討したものである。

第二に、転炉スラグコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行った。ここでは、転炉スラグを粗骨材として用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について、連行空気量の変化による影響を中心に普通コンクリートと比較検討したものである。

第三の試験は摩耗試験であり、細骨材及び粗骨材に転炉スラグを用いた16種類の配合について、その摩耗特性を把握することを目的としたものである。

2.2 使用材料と配合

本研究で使用した転炉スラグは、3カ月のエイジングを行なった溶融転炉スラグで、水浸膨張比が2%以下の規準値を満足しているものを使用した。その化学成分の主なものは表-1のようである。

使用した供試体の配合をまとめたものが表-2である。基礎的性状を把握するための試験では、シリカフェームを混入していないものを中心に使用し、摩耗試験ではA~Dシリーズの4種類の配合を設定し、転炉スラグの混入によるコンクリートの耐摩耗性の向上効

表-1 転炉スラグの主な化学成分 (%)

CaO	SiO ₂	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	FeO	Fe ₂ O ₃	T.Fe	f-CaO	Ca(OH) ₂
43.8	14.4	5.9	6.0	1.2	2.7	16.5	9.4	19.4	3.6	1.9

表-2 転炉スラグコンクリートの配合

配合 NO.	セメント量 C, kg/m ³	シリカフェーム SF, kg/m ³	骨材の種類	
			細骨材	粗骨材
A-1	400	-	川砂	川砂利
A-2	360	40		
A-3	320	80		
A-4	280	120		
B-1	400	-	スラグ	川砂利
B-2	360	40		
B-3	320	80		
B-4	280	120		
C-1	400	-	川砂	スラグ
C-2	360	40		
C-3	320	80		
C-4	280	120		
D-1	400	-	スラグ	スラグ
D-2	360	40		
D-3	320	80		
D-4	280	120		

*) 北海道工業大学工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区手稲前田 419-2)

果とともにシリカフェームの代替率が摩耗に及ぼす影響についても検討した。4種類の配合の基本的な違いは、Aシリーズが通常の細骨材と粗骨材を使用した配合であるのに対して、Bシリーズは細骨材を転炉スラグで置換した配合、Cシリーズは粗骨材を転炉スラグで置換した配合とした。さらに、Dシリーズでは細骨材、粗骨材とも転炉スラグを使用した配合とした。また、混和材としてシリカフェームをセメント量の割合で10%から30%まで各シリーズにおいて混入し、無混入のコンクリートとの比較を行なった。

セメントは普通ポルトランドセメントを中心に使用したが、凍結融解試験に用いた供試体に高強度特殊セメント（高炉スラグ微粉末の混和されたもの）を用いた。転炉スラグ骨材との比較に用いた川砂・川砂利は北海道静内産のものである。また、摩耗試験においては、予備試験の結果から、転炉スラグコンクリートにシリカフェームを混入したコンクリートの力学的性状が良好であったため、国産のドライパウダー状シリカフェームを添加し、その影響についても検討した。

2.3 基礎的性状に関する試験

長さ変化試験および単位容積重量の測定、力学的強度試験に用いた供試体は、角柱供試体であり、75x75x400mmの寸法である。長さ変化試験には供試体の長さ方向に真鍮製の埋め込みプラグを打設時に挿入し、温度保証用基準棒との校正を行いながら長さ変化を測定した。曲げ強度試験はJIS A 1106に準じ、三等分点载荷で実施し、その折片を用いて圧縮強度試験を行った。

2.4 凍結融解試験

凍結融解試験は、ASTM C 666 のA法に準じて実施し、供試体中心部の温度で $-18^{\circ}\text{C}\sim+5^{\circ}\text{C}$ の範囲で、凍結行程に1時間、融解行程に2時間の計3時間を1サイクルとして300サイクルまで実施した。また、試験に用いた供試体の寸法は100x100x400(mm)の角柱供試体であり、これを同配合で3本用いた。

2.5 摩耗試験

本研究で使用した摩耗試験装置^{10), 11)}は、現道の摩耗損傷を推定することが可能な表面疲労摩耗試験機であり、8個の鋼球による鉛直方向の打撃作用によって供試体を摩耗させる構造を有している。試験は機械の振動周波数を8 Hzとし、1時間実施した。試験後の摩耗損失量の指標として、摩耗した全体の体積を摩耗面積で除した値を平均摩耗深さとして

定義し、この値を耐摩耗性に関する特性値とした。

3. 試験結果とその考察

3.1 長さ変化および単位容積重量

図-1から図-3は、普通コンクリートと転炉スラグコンクリートのそれぞれの長さ変化を材令1年まで測定した結果を、水中で供試体を養生した場合と、気乾養生の場合とで示したものである。図から、転炉スラグの長さ変化は、適切なエイジング処理を行った場

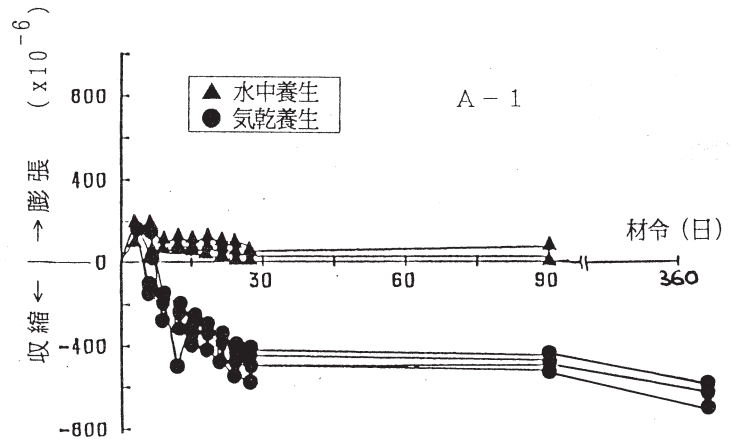


図-1 普通コンクリートの膨張収縮特性

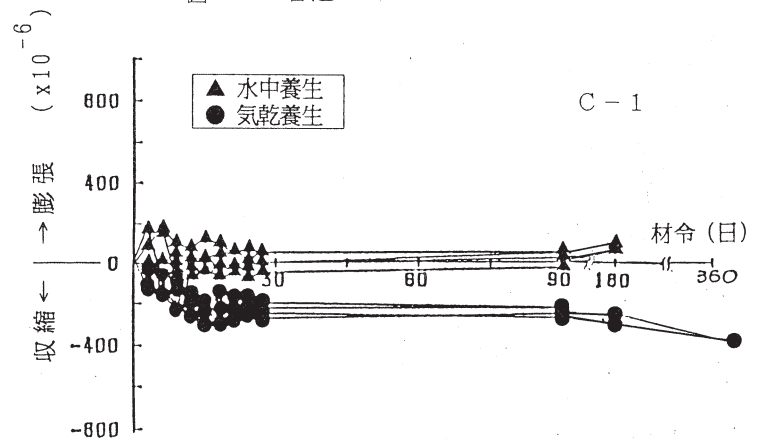


図-2 転炉スラグコンクリートの膨張収縮特性
(粗骨材：転炉スラグ、細骨材：川砂)

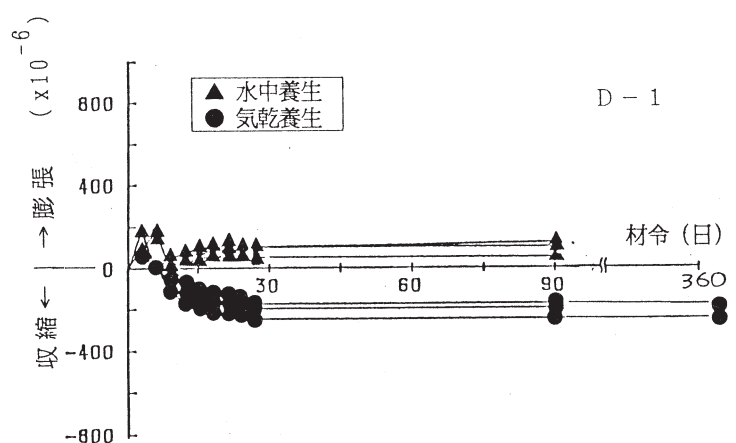


図-3 転炉スラグコンクリートの膨張収縮特性
(粗骨材：転炉スラグ、細骨材：転炉スラグ)

合には普通コンクリートのそれとほぼ同程度の長さ変化を示し、危惧された異常膨張の傾向は認められないことが明らかとなった。むしろ逆に、気乾養生の場合に普通コンクリートで問題とされる乾燥収縮の傾向が転炉スラグコンクリートの場合は少なくなることを示している。

図-4および図-5は、気乾・水中養生における転炉スラグコンクリートの単位容積重量と粗骨材として使用した転炉スラグの単位重量との関係を示したものである。図から、転炉スラグコンクリートの単位容積重量が普通コンクリートのそれに比較して高い値をとり、転炉スラグの混入量の増加にともない単位容積重量が直線的に増加することがわかる。このような転炉スラグコンクリートの特性は、消波ブロックに代表される海岸構造物などの安定性を要求される重量コンクリートへの適用が考えられる。

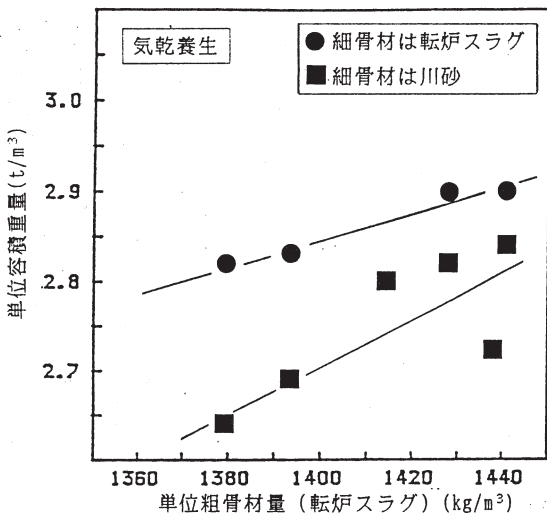


図-4 転炉スラグコンクリートの単位容積重量

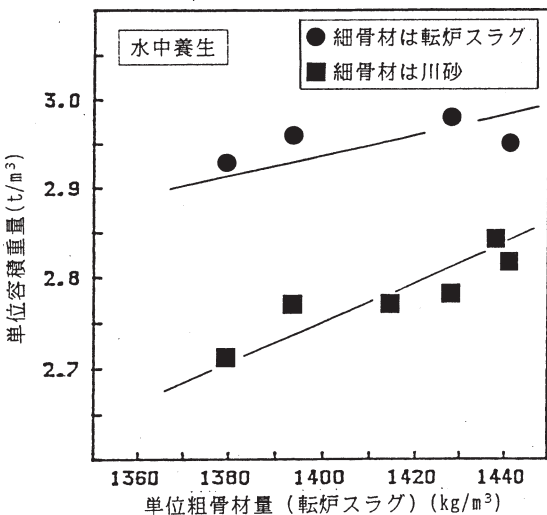


図-5 転炉スラグコンクリートの単位容積重量

3.2 圧縮強度および曲げ強度

転炉スラグコンクリートの圧縮試験および曲げ試験の結果を示したものがそれぞれ図-6、および図-7である。図-6より、転炉スラグコンクリートの圧縮強度は材令28日の時点で600kgf/cm²程度の値をとり、普通コンクリートに比較して高い値をとることがわかる。また、材令1年までの長期強度についても普通コンクリートに比較して緩やかに向上する傾向を示していることがわかる。このような傾向は、図-7に示す曲げ強度についても同様であることがわかる。すなわち、これらの結果から転炉スラグコンクリートは適切なエイジング処理を施すことにより、普通コンクリートに比較して高強度で力学的にも安定したコンクリートとなることが明らかとなった。

細骨材として用いた転炉スラグが力学的強度に及ぼす影響を把握するため、図-6および図-7には転炉スラグを細骨材と粗骨材とに用いたコンクリートと粗骨材のみに転炉スラグを使用したコンクリートのそれぞれの結果を示している。図より、細骨材としての転炉スラグの効果は、圧縮強度よりも曲げ強度の向上に見受けられ、短期的にも長期的にも高い強度を示すことがわかる。

シリカフェームの混入に関しては、特に転炉スラグコンクリートの曲げ強度の向上に対して効果的であることが推察されるが、圧縮強度に関しては顕著な効果は認められないようである。

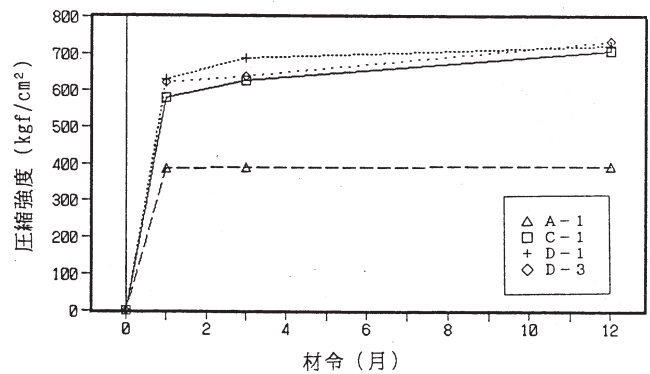


図-6 転炉スラグコンクリートの圧縮強度と材令との関係

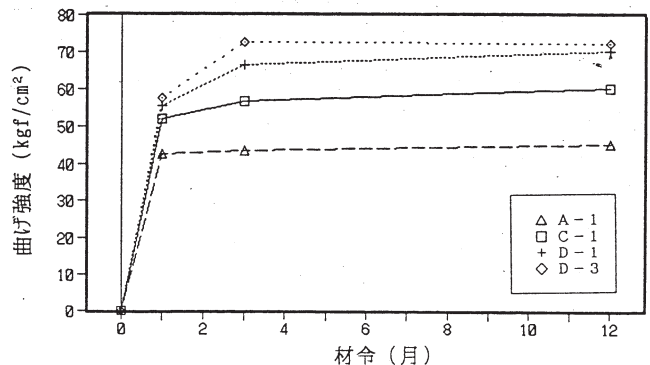


図-7 転炉スラグコンクリートの曲げ強度と材令との関係

3.3 凍結融解抵抗性

図-8は、転炉スラグコンクリートの凍結融解抵抗性を示す一つの尺度として用いた相対動弾性係数と凍結融解回数との関係を普通コンクリートとともに示したものである。図中には、AE剤を用いない普通コンクリートと転炉スラグコンクリートの試験結果についても併せて示した。図から、AE剤を用いない普通コンクリートについては170~180サイクル以降から急激に相対動弾性係数が低下する傾向を示しているが、転炉スラグコンクリートの場合は普通コンクリートに比較してやや緩やかであり、耐久性も40~60サイクル程度長持ちするようである。

AE剤を混入したコンクリートについては全てのコンクリートで相対動弾性係数の顕著な低下は認められなかった。以上の結果から、適切な空気連行を実施することにより、転炉スラグコンクリートは高い凍結融解抵抗性を示すことがわかる。また、AE剤を用いなかった転炉スラグコンクリートでも普通コンクリートに比較して多少凍結融解抵抗性に優れていることが判明した。

図-9は、耐久性指数と供試体打設時に測定した連行空気量との関係を示したものである。この図から、普通セメントを用いた場合では、転炉スラグコンクリートにおいても適切な空気連行の必要性が認められ、普通コンクリートと同様に4~5%程度の連行空気量が必要であるものと推察される。しかしながら、高強度コンクリートを用いることにより、非常に少ない連行空気量においても凍結融解抵抗性は著しく改善されることがわかる。

3.4 耐摩耗性

A~Dシリーズの平均摩耗深さをシリカフェームの添加率別にまとめたものが図-10である。全体的な傾向としてはAシリーズである普通コンクリートの平均摩耗深さが最も高い値を示し、ついでB、C、Dシリーズの順に低い値を示すことがわかる。Aシリーズの平均摩耗深さの平均値を100%とすると、BCDシリーズでは、それぞれ96%,73%,73%となり、転炉スラグの混入によりコンクリートの耐摩耗性が明確に向上することが判明した。また、転炉スラグを粗骨材として使用した場合はコンクリートの耐摩耗性に関して著しい効果を示すこと、細骨材としての転炉スラグの適用はそれほど大きな効果が期待できないことが判明した。

図-11は転炉スラグを粗骨材として用いたコンクリートの摩耗試験結果をシリカフェームの添加率によって示したものである。図から、シリカフェームの添加率が20%までは摩耗量が低下すること、30%では逆に増加することがわかる。従って、適

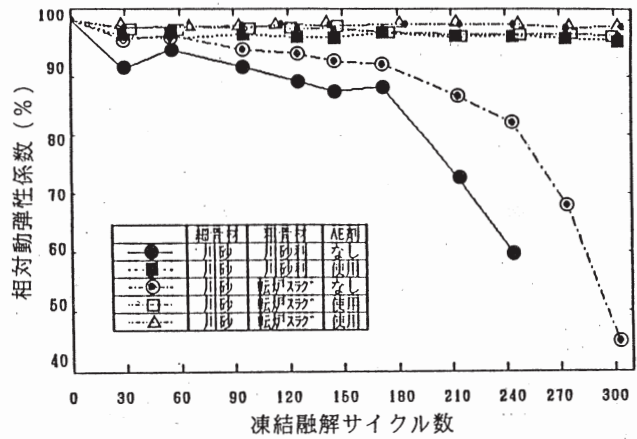


図-8 転炉スラグコンクリートの凍結融解抵抗性

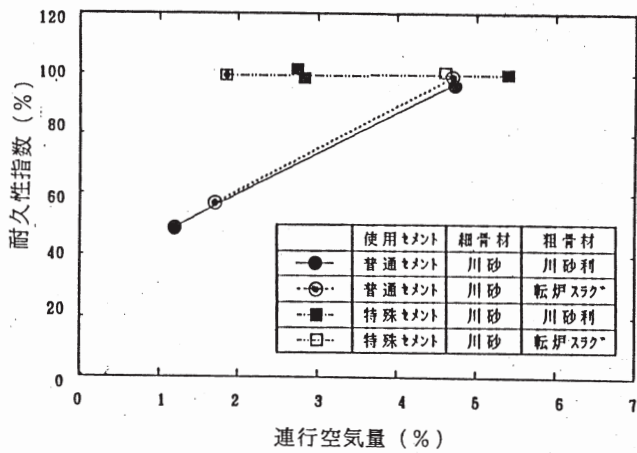


図-9 凍結融解試験における連行空気量と耐久性指数との関係

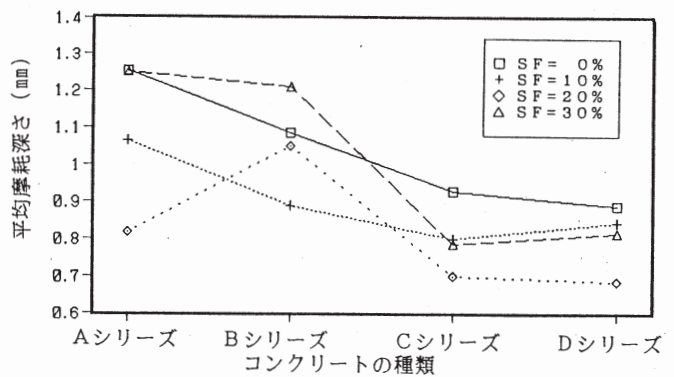


図-10 転炉スラグコンクリートの摩耗試験結果

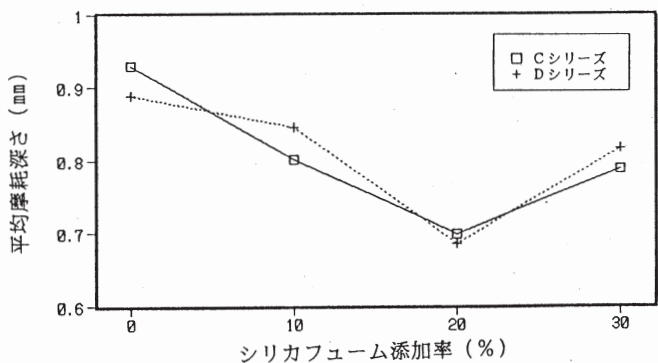


図-11 転炉スラグコンクリートの摩耗量とシリカフェーム添加率との関係

量のシリカフェームの添加により、転炉スラグコンクリートの耐摩耗性が明確に向上することが明らかとなった。

4. まとめ

本研究の結果から、転炉スラグをコンクリートの骨材として使用した転炉スラグコンクリートの性状に関して得られた知見をまとめると以下ようになる：

- 1) 材令1年までの長さ変化試験の結果、適切なエイジング処理を施した転炉スラグを骨材としたコンクリートでは懸念された異常膨張は認められず、普通コンクリートに比較して乾燥収縮の少ない良好なコンクリートが作製可能である。
- 2) 転炉スラグコンクリートの単位容積重量は普通コンクリートのそれに比較して高い値をとり、比較的容易に重量コンクリートが製作できる。
- 3) 転炉スラグを骨材として用いたコンクリートの力学的強度は普通コンクリートに比較して高い値を示すことが判明した。さらに、長期的強度についても安定していることが明らかとなった。
- 4) 転炉スラグコンクリートの凍結融解抵抗性は、普通コンクリートのそれと同程度かあるいはそれ以上であることが判明した。
- 5) 転炉スラグコンクリートの耐摩耗性は、普通コンクリートのそれと比較して優れていることが判明した。とくにその傾向は、転炉スラグを粗骨材として使用した場合に顕著であり、その摩耗損失量は普通コンクリートの約70%程度の値をとる。また、シリカフェームの添加は、転炉スラグコンクリートに対して有効であり、耐摩耗性に関しては顕著な向上効果を示すことが判明した。

5. あとがき

転炉スラグコンクリートは所定のエイジング処理を行なうことにより力学的にも安定した性状を示し、さらに通常のコンクリートに比較して単位容積重量が高く耐摩耗性に優れていることなど多くの特徴を有していることが明らかとなり、現在その応用分野についても検討中である。

近年注目されている転圧コンクリートにおける骨材としての適用に関しても、表層の耐摩耗対策として有効なものと考ええる。

なお、本研究の遂行に際しては関口光永氏および山田浩氏をはじめとする日特建設株式会社の方々の多大な協力を得た。ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居 他:材料, Vol.34, No.379, pp.17-22,1985
- 2) 川村 他:セメント技術年報, No.36, pp.136-139, 1982
- 3) 成田 他:鉄と鋼, Vol.64, No.1558-1567, 1978
- 4) 製鋼スラグ共同研究委員会:製鋼スラグ設計施工指針, pp.65-73, 1985
- 5) 鎌倉 他:土木学会第37回年次学術講演会, pp.497-498, 1982
- 6) 尾崎 他:第17回日本道路会議論文集, pp.426-427, 1987
- 7) 関口 他:第18回日本道路会議論文集, pp.690-691, 1989
- 8) 堀口 他:第18回日本道路会議論文集, pp.692-693, 1989
- 9) 堀口 他:資源・素材学会秋季大会文科研究会資料, D, pp.13-15, 1990
- 10) T.Horiguchi: Proc. of RILEM 1st Int. Cong., Chapman and Hall, pp.406-413, Vol.2, 1987
- 11) T.Horiguchi:Proc. of 4th Int. Conf. on Durability of Building Materials and Components, Pergamon Press, Vol.2, pp.166-172, 1987