

論文 高炉スラグ微粉末混入モルタルの直接引張強度特性

半井 健一郎^{*1}・Surapong UTTAMA^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末混入モルタルの直接引張強度の時間依存特性について検討するため、十分な養生により収縮の影響を排除した上で試験を行い、置換率を変えたスラグ混入モルタルの直接引張強度、割裂引張強度、圧縮強度から算定した引張強度の3種類の引張強度を比較した。その結果、材齢14日ではスラグ置換率が大きくなるに従い、直接引張強度は割裂引張強度及び圧縮強度からの換算強度よりも低下した。この傾向は材齢28日ではみとめられず、3種類の引張強度はほとんど一致した。この現象の要因として、高炉スラグ微粉末の反応境界面における剥離の影響が考えられた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、直接引張強度、割裂引張強度、置換率、剥離

1. はじめに

高炉スラグの有効利用は、コンクリートの品質改善のみならず、資源の再利用等の観点からも今後益々推進していくことが望ましいことは改めて言うまでもない¹⁾。しかし近年、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートにおいて、自己収縮が大きいこと²⁾やひび割れ抵抗性が劣る³⁾などの指摘がなされ、高炉スラグの使用には十分な検討が求められる状況になっている。その一方で、高炉スラグ微粉末を使用した自己充填コンクリートでは、凍結融解抵抗性が著しく向上されるという報告もある⁴⁾⁵⁾。このように、高炉スラグ微粉末の影響に関する断片的な情報が蓄積されながらも包括的な評価が定まらない状況では、その利用促進を積極的に進めていくことは難しく、コンクリートの諸性状に及ぼす高炉スラグ微粉末の役割とその影響を包括的に捉えるべき時期に来ていると考えられる。そこで、高炉スラグ微粉末を用いた場合の引張強度特性についての認識を深めることから着手することとし、本研究では、高炉スラグ微粉末混入モルタルの各種引張強度試験を実施し検討を行

った。

那須は、各種低熱型混合セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する詳細な検討を行い、混合セメントに含まれる高炉スラグ微粉末の粉末度と置換率の増加がひび割れ感受性（内部欠陥等に起因するひび割れに対する感度）を高めることを指摘し、ひび割れ感受性を割裂引張強度と直接引張強度の比（引張強度比）で評価している³⁾。ひび割れに対する感度を表す指標として引張強度比に着目したことは重要であり、更に興味深いことは、材齢の進行と共に1以上の値をとっていた引張強度比が次第に減少し、割裂引張強度が直接引張強度に漸近していくことを示したことである。那須は、この原因として、高炉スラグ微粉末混入コンクリートの硬化収縮（反応収縮）が大きいことにより、構造欠陥の程度が大きくなることを上げている。しかし、収縮量は水結合材比や養生条件に大きく影響されるものであり、水結合材比55%で実験室において20℃標準養生を行った供試体であれば硬化収縮はほとんど生じないものと考えられる。また、那須の研究では、

*1 東京大学 工学部土木工学科 (正会員)

*2 Alumnus, Asian Institute of Technology

*3 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 博(工) (正会員)

ポルトランドセメント、高炉スラグ、フライアッシュの混合比が異なる 12 種類のコンクリートにおける結果から、単相関分析及び重回帰分析によって影響因子の検討を行っており、高炉スラグ微粉末の混入量や粉末度を系統立てて変化させているわけではない。そこで筆者らは、より直接的に高炉スラグ微粉末の置換率が引張強度比に与える影響を確認するために、水中養生を行った高炉スラグ微粉末混入モルタルを作成し、直接引張試験、割裂引張試験、及び圧縮試験を実施し、圧縮強度からの換算引張強度を含む各引張強度特性に及ぼすスラグ置換率の影響とその時間（材齢）依存性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体および養生

実験に使用したモルタルは、ベースとなる普通ポルトランドセメントのみを粉体として使用したものに加えて、セメント重量の 20, 40, 60, 80%を高炉スラグ微粉末で置換したものである。配合は、水結合材体積比(2.16)、単位ペースト量、単位細骨材量を一定とした。水結合材比を、質量ではなく体積で一定としたのは、密度が異なるポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の混合割合を変化させた場合の強度を比較する

表-1 使用材料の化学成分(%)

種類	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
OP	65.30	20.50	6.00
BF	43.32	33.77	15.20
種類	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
OP	1.00	3.20	2.74
BF	6.22	0.37	0.13
種類	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.loss
OP	0.16	0.60	0.80
BF	0.24	0.36	0.53

OP：普通ポルトランドセメント，BF：高炉スラグ微粉末

ためである。使用材料の化学成分を表-1 に、物性を表-2 に、モルタル供試体の配合を表-3 に示す。供試体の養生は収縮の影響を排除するため、硬化後直ちに脱型し水中養生を行った。試験は材齢 14 日及び 28 日で行った。

表-2 使用材料の物性値

使用材料	粉末度(cm ² /g)	比重
普通ポルトランドセメント	3217	3.15
高炉スラグ微粉末	4650	2.92

表-3 モルタルの配合

配合 種別	W/(C +BF) (%)	BF/(C +BF) (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	BF	S
O	40.0	0	297	742	—	1485
S2	40.7	20	302	594	148	1485
S4	41.2	40	306	445	297	1485
S6	41.9	60	311	297	445	1485
S8	42.6	80	316	148	594	1485

W：水，C：セメント，S：細骨材

BF：混和材として用いた高炉スラグ微粉末

2.2 実験項目

材齢 14 日及び 28 日の供試体について、次の 3 種類の試験を行った。なお、各供試体は試験前に 6 時間の気中乾燥をしている。

(1) 直接引張試験

供試体は最小断面 2.54×2.54cm のひょうたん型である。各条件につき 6 体の試験を行いその平均を取った。試験機はオートグラフを用いた。

(2) 割裂引張試験

供試体寸法はφ5×10cm である。試験方法は JIS A 1113 に準じて行った。

(3) 圧縮強度試験

供試体の寸法はφ5×10cm である。試験方法は JSCE-G505 に準じて行った。

2.3 圧縮強度からの引張強度の算定

圧縮強度からの引張強度の算定には、岡村が提案した式⁶⁾を単位変換した次式を用いた。

$$f_{t_cal}=0.269f'_c{}^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 f_{t_cal} ：圧縮強度から算定した引張強度(MPa)、 f'_c ：圧縮強度(MPa)

3. 実験結果と考察

3.1 強度に及ぼす高炉スラグ置換率の影響

材齢14日及び28日の各強度試験結果を表-4、表-5に示す。また、高炉スラグ微粉末によるセメント置換率（スラグ置換率）に対する引張強度変化を図-1に示す。なお、直接引張強度を f_{td} 、割裂引張強度を f_{ts} で表すことにする。

材齢14日では、実験したいずれの配合においてもスラグ置換率の増加に合わせて強度が低下する傾向がみとめられる。特にスラグ置換率が60%以上における強度の低下が著しい。ただし、スラグ置換率60%と80%では余り差がない。一方、材齢28日では置換率20%において圧縮強度、引張強度共に最大値を示し、その後、スラグ置換率の増加と共に緩やかな減少傾向がみとめられる。

今回の実験で確認されたスラグ置換率に対する強度変化の傾向は、大よそ従来からの報告の通りである⁷⁾。材齢14日程度の初期材齢において、スラグ置換率と共に強度が減少する傾向は、普通ポルトランドセメントの反応に比べて高炉スラグ微粉末の反応が若干遅いことによると考えられる。ただし、この傾向は、スラグ置換率が増えるほど顕著というわけではなく、置換率60%と80%の強度には、5%未満の相違しかない。これは単に高炉スラグの反応性を考えるだけでは、解釈しづらい現象であり、スラグ置換率80%の配合では、十分に反応が進行していない高炉スラグ微粉末がポルトランドセメントの反応に対して鉱物微粉末効果をもたらし、セメントの反応を促進しているものと考えている。現時点では客観的な裏付けはないが、混和材を多量に添加した混合セメントの水和反応を評価

表-4 材齢14日の各強度試験結果 (MPa)

配合種別	f_{td}	f_{ts}	f'_c	f_{t_cal}
O	3.14	3.19	41.2	3.21
S2	3.14	3.16	39.6	3.12
S4	2.83	3.14	36.2	2.94
S6	1.94	2.33	24.1	2.24
S8	1.63	2.13	23.2	2.18

f_{td} ：直接引張強度、 f_{ts} ：割裂引張強度、 f'_c ：圧縮強度、 f_{t_cal} ：圧縮強度から算定した引張強度

表-5 材齢28日の各強度試験結果 (MPa)

配合種別	f_{td}	f_{ts}	f'_c	f_{t_cal}
O	4.37	4.66	59.4	4.09
S2	4.85	4.87	62.2	4.22
S4	4.31	4.44	56.2	3.95
S6	3.95	4.22	54.6	3.87
S8	3.76	3.93	50.0	3.65

f_{td} ：直接引張強度、 f_{ts} ：割裂引張強度、 f'_c ：圧縮強度、 f_{t_cal} ：圧縮強度から算定した引張強度

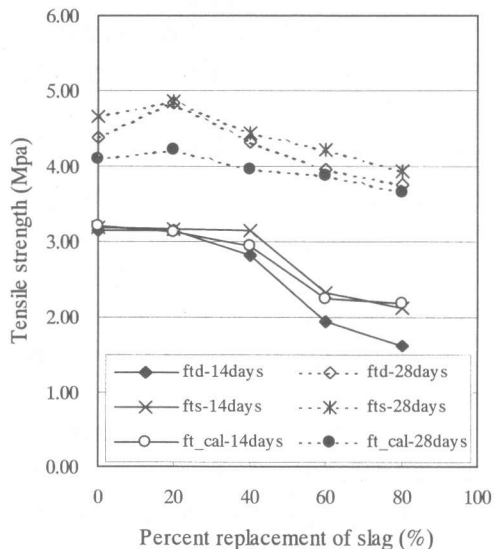


図-1 置換率による各引張強度の変化
材齢14日および28日

する場合には、セメントからの反応刺激不足によって反応停滯を起す混和材の鉱物微粉末効果を考慮する必要性を示唆している可能性がある。材齢 28 日では、高炉スラグ微粉末の反応が普通ポルトランドセメントの反応に次第に追いつき、結果としてスラグ置換率の相違による強度の差は、かなり解消されている。スラグ置換率 80% においても高炉スラグを含まない基準モルタルの約 84% の圧縮強度に達している。また、高炉スラグ微粉末を適量混入した配合において、最大の強度を示すという傾向も従来の報告に見られる通りである。

3.2 各引張強度間の相対比較

割裂引張強度、直接引張強度、および圧縮強度から換算した引張強度を比較するために、相互に比を採り、スラグ置換率に対して表したものが図-2 (材齢 14 日)、図-3 (材齢 28 日) である。割裂強度や圧縮強度から換算した引張強度は、応力解析におけるひび割れ発生基準として一般的に用いられているものであり、一軸引張状態における直接引張強度とほぼ一致することが期待されている。

(1) 割裂引張強度と圧縮強度からの算定強度

材齢 14 日における割裂引張強度と圧縮強度からの算定引張強度は、スラグ置換率に関わらず、ほぼ一致していることがわかる。式(1)に示した圧縮強度からの換算式は、基本的に普通コンクリートに対して求められた経験式であり、高炉スラグを多量に添加したケースにまで適用できることを保証するものではないが、幸いにもスラグ置換率 80% までは、割裂引張強度と同程度の引張強度を算定している。材料としてのコンクリートの強度特性は圧縮強度自体に反映されており、式 (1) の換算式は局所ブリージングなどの微視的機構の影響を含めて圧縮強度と引張強度の関係を表しているものと考えられる。したがって、圧縮強度試験と割裂引張強度試験における応力状態の関係が、スラグ置換率が高い場合であっても普通モルタルと同様であることを間接的に表すものと考えられる。

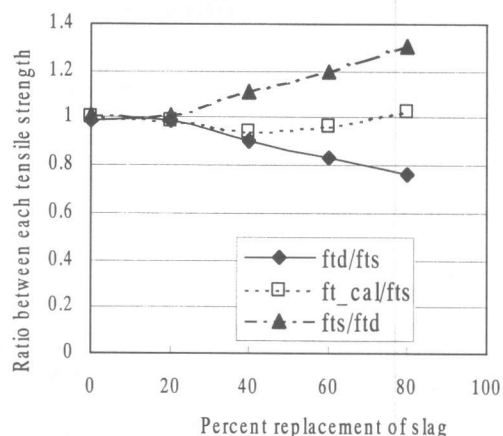


図-2 各引張強度の比 材齢 14 日

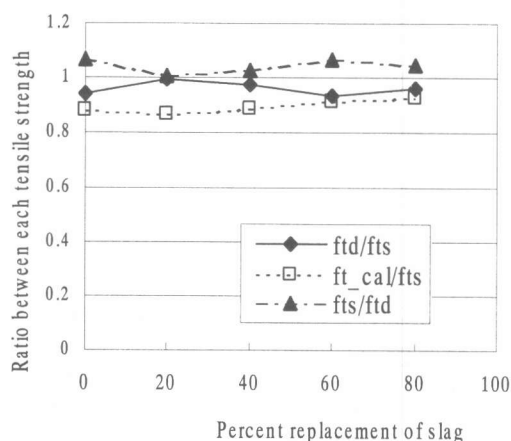


図-3 各引張強度の比 材齢 28 日

(2) 割裂引張強度と直接引張強度

一方、直接引張強度と割裂引張強度の比は、材齢 14 日においては、スラグ置換率の増加に伴い減少している様子が見てとれる。スラグ置換率 80% では、直接引張強度が割裂引張強度の 76% にまで低下している。那須³⁾が重回帰分析の結果として示唆した通り、スラグ置換率が高い場合には、直接引張強度が割裂引張強度に対して相対的に低下する(引張強度比が増加する)ことが直接確認されたことになる。

割裂引張強度が圧縮作用下での 2 次元応力状

態において計測された引張強度であるのに対して、直接引張強度は一軸引張状態における引張強度である。両者の応力状態の違いが引張強度に与える影響は現時点では定かでないが、スラグ置換率が高い場合にみとめられる特徴的な現象と言える。一般的には、割裂引張強度や圧縮強度から換算した引張強度を以って、部材のひび割れ発生基準としているが、高炉スラグをある程度混入した場合には、ひび割れ抵抗機構が割裂引張強度による評価よりも低くなる懸念がある。

3.3 直接引張強度の経時変化

材齢 28 日になると、割裂引張強度に対して直接引張強度が若干低いものの、材齢 14 日の時点で見られたようなスラグ置換率に応じて直接引張強度が低下する傾向はみとめられない。つまり 14 日という初期材齢における引張強度比に及ぼすスラグ置換率の影響が、硬化がある程度進行した材齢 28 日において消失したことを意味している。実験供試体は、試験材齢まで全て水中養生を行っており、また水結合材比も重量比で約 40% (体積比で 2.16) であることから、硬化収縮の影響はほとんど無視できると考えられる。

このような現象は高炉スラグ混入モルタルに特有な現象であることから、スラグ置換率に応じて引張強度比が上昇することの原因は高炉スラグ微粉末の反応に関係があると考えられる。今回試験を行った材齢での強度の発現状況から、材齢 14 日では高炉スラグ微粉末の反応は進行途上にあるが、材齢 28 日ではほぼ普通ポルトランドセメントの反応と肩を並べる程度まで進行していることが伺える。また、那須の実験結果においても、材齢 3 日では、割裂と直接の引張強度に差がなく、その後に引張強度比が大きくなる傾向を示した後、再び長期材齢では両者の差が減少傾向に向かう様子が示されている。以上の状況から、直接引張強度と割裂引張強度が異なる現象には高炉スラグ微粉末の未反応部分もしくはその境界面が関与しており、反応の進

行による未反応部分の消失と共に、直接引張強度と割裂引張強度の差も小さくなるものと考えられるに至った。

4. 引張強度の相違に関する一考察

まず、直接引張試験と割裂引張試験の関係について考えてみたい。割裂引張試験では、破断面直交方向に圧縮力が作用していることが特徴である。直交圧縮力が存在した場合、圧縮抵抗機構が向上することは容易に想像がつくが、引張耐力が向上することは考え難い。むしろ引張抵抗機構がある程度の直交圧縮力の存在では、ほとんど劣化することはないと考える方が妥当である。したがって通常は、円板に集中荷重が作用するときの弾性解析から求めた割裂引張強度と直接引張強度が、ほぼ一致するものと考えられる。

次に、高炉スラグ微粉末の挙動について考えると、割裂引張試験供試体と直接引張試験供試体では寸法が異なるものの、水和の進行状況は同じと考えられるため、高炉スラグ微粉末の未反応部分の残存状況はほぼ同じと考えられる。したがって、スラグ未反応部分とその界面が、直交圧縮力の存在によってどのような挙動を示すかについて理解を深めることが現象解明の鍵を握ると考えられる。ここで、筆者らは高炉スラグ微粉末の反応界面に剥離に対して弱い層が形成されると仮定することにより次のような考察を試みた。

高炉スラグ微粉末が混入された供試体に引張力が加わると、直接引張試験と割裂引張試験のどちらにおいても仮定したスラグ反応界面において剥離が起こるはずである。この剥離によって一軸引張状態である直接引張試験では、未反応スラグ粒子が引張抵抗機構として十分には機能しなくなり、実質的な引張抵抗機構が低下するものと考えられる (図-4a)。これに対して、割裂引張試験では直交圧縮力の存在により、未反応スラグ粒子とマトリックスの間でせん断伝達が行われ、未反応スラグ粒子も引張抵抗機構

に取り込まれるものと考えられる (図-4b)。この結果、実質的な引張応力抵抗機構が低下している直接引張試験では、割裂引張試験よりも小さな値を示すものと考えられる。一方、水和が進行した材齢 28 日においては、未反応のスラグが微小になるか消失しているために実質的な引張抵抗機構の変化がほとんど起こらず、直接引張強度と割裂引張強度はほぼ一致するものと考えられる。

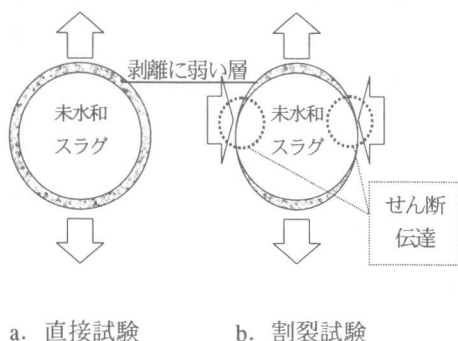


図-4 引張試験時のスラグ粒子の微視的機構

以上は、剥離に弱い層に包まれた粒子を含む仮想的なシステムでの引張抵抗機構を論じたものであるが、本研究でも認められた高炉スラグ微粉末を含むコンクリートの特徴的な引張特性を包括的に説明するためには、その微視的機構に立脚した解釈が不可欠であると認識している。なお、コンクリート中の不連続面としては骨材周りの遷移帯も考えられるが、本研究で想定しているものは、容易に剥離を起す極めて弱い層である。本研究での検討内容との関係は定かでないが、田中らは、走査電子顕微鏡を用いた観察⁸⁾によって、板状再熔融スラグの未反応部分と水和による内部生成層の間に、構成原子が溶脱したと考えられる空隙に富む特徴的な中間層(溶脱層)が存在するという興味ある報告をしている。

5. まとめ

高炉スラグ微粉末混入コンクリートのひび割れに対する抵抗性を評価するために、異なる試

験方法による引張強度を検討した。その結果、以下の内容を確認した。

- 1) 14 日という若材齢においては、高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるほど割裂引張強度と圧縮強度から算定した引張強度に比べて、直接引張強度が相対的に低下する。
- 2) 材齢 28 日になると材齢 14 日の時点で確認された 1) の傾向は認められなくなり、各試験による引張強度は置換率ごとにほぼ一致した。

また、以上のような傾向をもたらす要因として未反応スラグ粒子界面での剥離に弱い層の存在を仮定することで、現象の説明を試みた。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用について、1988
- 2) 三浦智哉ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.1, pp.359-364, 1995.6
- 3) 那須清吾：マスコンクリートの耐ひび割れ特性をその低発熱型セメント成分特性に着目した評価方法、博士論文、東京大学、1998.3
- 4) 山宮浩信、石田良平、下村匠：各種粉体を用いたコンクリートの細孔構造と凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.573-578, 1994.6
- 5) 佐藤文則ほか：超高性能コンクリートの長期凍結融解抵抗性の評価、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.110-111, 1999.9
- 6) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法、共立出版, pp.17-19, 1978.11
- 7) 高炉スラグ微粉末研究小委員会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針、土木学会、1996.6
- 8) 田中弘文、戸谷陽一、斎藤 豊：ガラス状高炉スラグおよび合成スラグの水和、セメント技術年報 35, pp.53-56, 1981.12