

[1019] 高炉スラグ微粉末を混和した RC はりの曲げおよびせん断性状

正会員 ○ 辻 幸和 (群馬大学工学部)

正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学建設系)

1. まえがき

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの性状については、これまでも数多くの貴重な研究成果が報告されているが、これまでの報告は、そのほとんどがコンクリート自体に関するものである。実際には、鉄筋コンクリート (RC) として用いられることが大部分であるにもかかわらず、RC 部材に用いて、その力学的性状を検討した研究はほとんど公表されていない。

本研究では、既に報告した結果^{〔1〕,〔2〕}に加えて、材令1年までの実験結果に基づき、高炉スラグ微粉末を、その粉末度と置換率を変えて RC はりに用いた場合における曲げ性状およびせん断性状について、検討した結果を報告するものである。高炉スラグ微粉末は、ブレン値で8000 cm^2/g クラスまで微粉碎したものも用いた。

2. 実験方法

2.1 はり供試体 および 強度試験方法

鉄筋コンクリート (RC) はりは、図-1 に断面諸元を示すように、鉄筋を上段と下段の2段に配置した矩形断面である。そして、下段の引張鉄筋比が0.827%のA断面、および同じく2.30%のB断面の2種類である。A断面は曲げ引張破壊が、またB断面はせん断圧縮破壊が、それぞれ生じることを想定した。なお、軸方向鉄筋のみを配置し、スターラップ等は用いなかった。

強度試験は、図-2 に示すように、スパンが60 cm で、せん断スパンと有効高さの比 a/d を2.0 にとって行った。また、コンクリートの圧縮強度試験は、JIS 試験方法に準じて行った。

2.2 使用材料

高炉スラグ微粉末 (以下スラグと略す) の物理的性質を表-1 に示す。ブレン値が3290 cm^2/g から7860 cm^2/g まで変化

表-1 高炉スラグ微粉末およびセメントの物理的性質

種類	ブレン値 (cm^2/g)	比重	
高炉スラグ 微粉末	B 3	3290	2.89
	B 4	4500	2.89
	B 8	7860	2.90
普通ポルト ランドセメント	C 1	3350	3.16
	C 2	3210	3.17
	C 3	3420	3.13

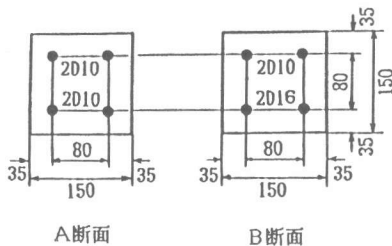


図-1 はり供試体の断面諸元

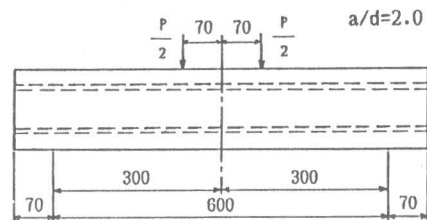


図-2 載荷方法

させている。セメントは、同じく表-1に示す3銘柄の普通ポルトランドセメントを均等に混合して用いた。AE減水剤は、ボゾリスNo.70を空気量調整剤No.303Aとともに用いた。骨材は渡良瀬川産の川砂および川砂利を用いた。比重は、それぞれ2.60および2.66、粗粒率はそれぞれ2.72および7.12(最大寸法25mm)であった。

鉄筋は、図-1に示したように、呼び名がD10およびD16の異形棒鋼を用いた。降伏強度はそれぞれ40.0kgf/mm²および38.3kgf/mm²、引張強度はそれぞれ57.5kgf/mm²および57.3kgf/mm²であった。

2.3 配合

コンクリートの配合は、スラグとセメントの合計である結合材の単位量(C+Sg)が270, 320および370kg/m³の3種類、スラグ置換率Sg/(C+Sg)が0, 35, 55および70%の4種類、ならびに、スラグの種類が表-1に示す3種類の組み合わせのうち、合計20種類を用いた。

基準配合としては、スラグを用いないコンクリートについて、スランプが8cm、空気量が4%を目標に、単位水量および単位AE減水剤量等の単位量を、表-2のように定めた。

2.4 練りませ および 養生方法

コンクリートの練りませには容量が100ℓの強制練りミキサを用い、約80ℓのコン

クリートを3分間練りませた。供試体は材令2日で脱型後、湿布を被覆して室内で強度試験の材令28日まで養生した。また、材令9日まで室内で湿布養生を行ったもの、および、材令9日以降材令1年まで戸外に放置したRCはりも、実験に加えた。

3. 曲げ性状

低引張鉄筋比のA断面のRCはりについて、曲げモーメントとひずみの関係を示したのが図-3および図-4である。下段と上段の鉄筋およびコンクリート圧縮縁のそれぞれのひずみを示している。

材令1年のRCはり、スラグを70%置き換えても、図-3に示すように、曲げ引張破壊を生じた。すなわち、曲げひびわれ発生後、曲げモーメントが小さい範囲では、主として下段の鉄

表-2 基準コンクリートの配合

配合名	W C (%)	s a (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	AE*			
							減水剤	助剤		
a	59.3	40	160	270	783	1204	0.844	0.810	8.5	4.2
b	50.0	36	160	320	692	1258	1.000	0.960	9.0	4.6
c	43.8	34	162	370	637	1266	1.156	1.332	8.0	3.8

* 単位はg/m³

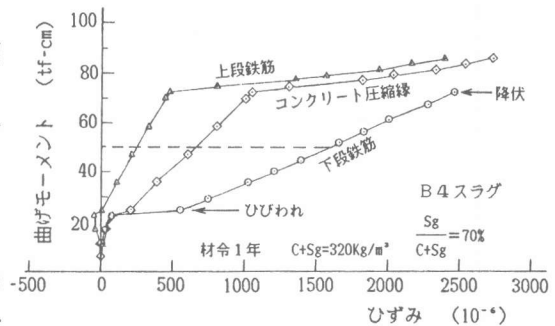


図-3 鉄筋およびコンクリートのひずみ (材令1年)

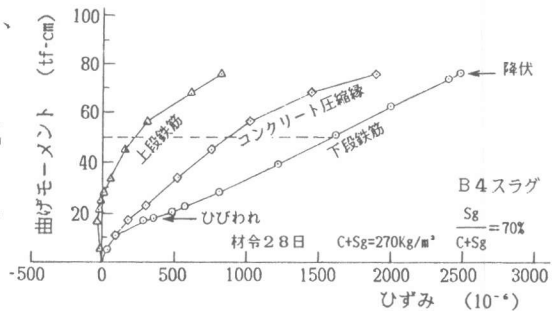


図-4 鉄筋およびコンクリートのひずみ (材令28日)

筋が引張力を負担し、曲げモーメントの増加とともに中立軸も上昇して、上段の鉄筋が一部引張力を負担するようになる。しかしながら、下段の鉄筋が降伏するまでは、その引張力は小さい。下段の鉄筋が降伏すると、上段の鉄筋が負担する引張力も急激に増加し、上段の鉄筋も降伏した後、コンクリートの圧縮縁が終局ひずみに達して、曲げ引張破壊を生じたのである。なお、この破壊時には、5に述べるように下段の鉄筋のひずみは、降伏域を過ぎて、ひずみ硬化域に入り、引張強度に相当する応力状態になっていたと推測される。

これに対して、同じスラグ置換率が70%のコンクリートを用いた、材令28日におけるRCはりを示す図-4からは、下段の鉄筋が降伏した後、上段の鉄筋が降伏する前に、斜めひびわれが発達して、せん断圧縮破壊を生じた。材令28日においても、スラグを混和しないRCはりでは、図-3と同様な曲げ引張破壊を生じている。スラグの混入によりコンクリートの強度が低下したため、曲げ引張破壊時より小さい荷重で、せん断圧縮破壊を生じたのである。

材令28日におけるA断面のRCはりの破壊曲げモーメントを、図-5に示す。この図より、1) プレーン値が3000cm²/gクラスのB3を混入した場合を除き、セメントの35%あるいは55%をスラグと置き換えても、曲げ引張破壊モーメントにはほとんど変化がないこと、2) それ以上にスラグ置換率を増加すると破壊曲げモーメントは低下し、特に、セメントの70%をスラグと置き換えると、いずれのスラグを用いても破壊曲げモーメントの低下は免れず、著しい場合には約35%低下していること、3) B3を混入したRCはりの場合が、スラグの置き換えによる破壊曲げモーメントの低下は著しく、35%の置換率でも約10%低下していること、4) 粉末度の高いスラグを用いるほど、このような破壊曲げモーメントの低下が軽減されることが、それぞれ認められる。

なお、図中に示す破線の丸印で記号を囲んだものは、上述のように、せん断圧縮破壊を生じた。このため、前述のように、破壊曲げモーメントが最大で約35%低下したのである。

材令91日まで室内で湿布養生を行い、その後材令1年まで戸外に放置した場合を、図-6に示す。B3のスラグを用いた場合である。材令28日と比較すると、55%あるいは70%のスラグ置換率では、材令91日まで養生しても、スラグの置き換えに伴う曲げ引張破壊モーメントの低下はまだ認められるものの、その低下率は軽減されている。例えば、B3を70%置き換えても、曲げ引張破壊を生じて破壊型式が改善され、スラグを用いない場合に対して、約10%の強度低下までに回復している。

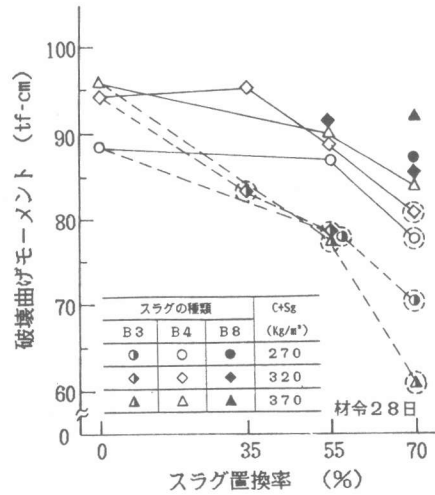


図-5 A断面の破壊曲げモーメント (材令28日)

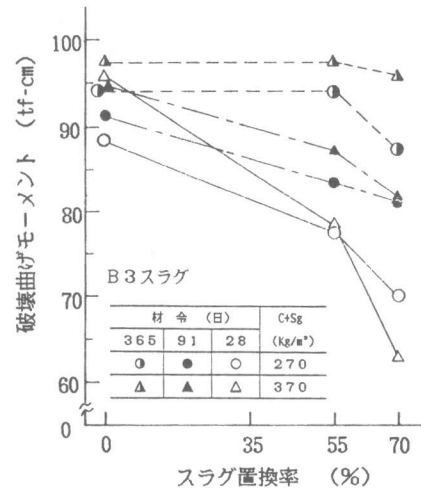


図-6 各材令におけるA断面の破壊曲げモーメント

材令が経過して、材令1年のRCはりでは、スラグを55%置き換えても、破壊曲げモーメントの低下は認められない程度まで回復している。70%置き換えると、結合材量の多いはりでは強度がほぼ回復しているのに対し、単位結合材量が少ない270kg/m³のはりでは、まだ曲げ引張破壊モーメントの低下は存続しているのである。

4. せん断性状

引張鉄筋比が2.30%のB断面のはりでは、いずれも斜めひびわれが発生し、これが発達した後、下段の鉄筋が降伏する前に最終的にせん断圧縮破壊を生じた。

材令28日について、スラグの種類をパラメータにとり、破壊時に対応するせん断応力度を表示したのが、図-7である。一般に、スラグ置換率の増加とともに、せん断圧縮破壊耐力は減少している。この減少の程度は、B8、B4、B3の順に、スラグの粉末度が粗いほど、一般に著しくなっている。

B4を用いたRCはりで、材令1年までの斜めひびわれ発生時およびせん断破壊時に対応するせん断応力度を図-8に示す。材令91日まで湿布養生を行い、その後戸外に放置すると、材令28日について図-7に述べた、スラグ置換率の増加に伴うせん断圧縮破壊耐力の低下する現象が軽減されている。特に、スラグを70%置き換えたはりの、材令の経過に伴う耐力増加が大きく、材令28日では30%の耐力低下が、91日では15%まで、また材令1年ではスラグの置き換えに伴うせん断圧縮破壊耐力の低下は認められなくなったのである。

斜めひびわれ発生時のせん断応力度についても、図-8に破線で示している。この図より、斜めひびわれ耐力も、スラグの置換率の増加とともに減少している。そして、材令の経過とともに斜めひびわれ耐力も増加しているが、その増加の程度は、せん断圧縮破壊耐力に比べて小さい。

5. コンクリートの圧縮強度と曲げおよびせん断耐力

スラグの置き換えによるRCはりの破壊耐力の低下が、特に材令初期に生じる原因は、コンクリート自体の強度が低下するためである。スラグを置き換えないコンクリートの圧縮強度に対する各スラグ置換率をもつコンク

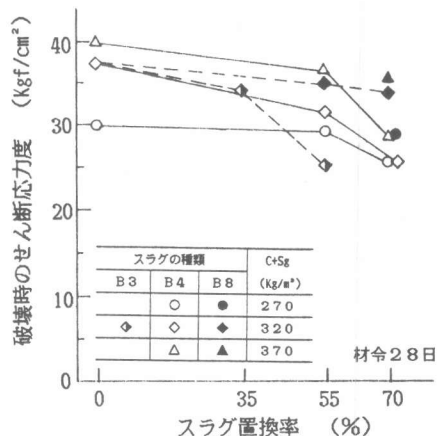


図-7 破壊時のせん断応力度 (材令28日)

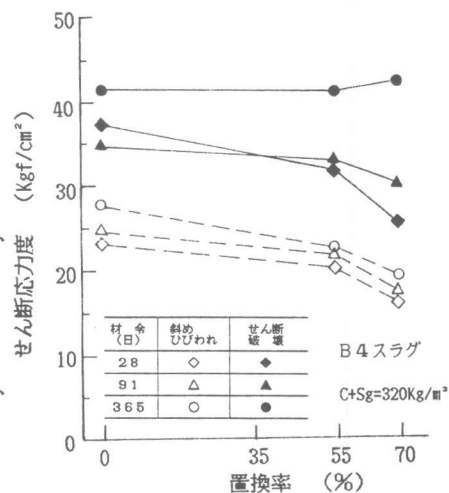


図-8 各材令におけるせん断耐力

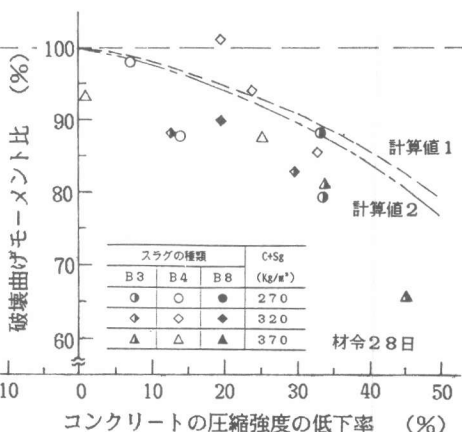


図-9 破壊曲げモーメント比 (材令28日)

リートの圧縮強度の低下量との比率を、コンクリートの圧縮強度の低下率と称して、横軸にとり、縦軸には、スラグを用いないRCはりの耐力に対する比率をとって示したのが、図-9から図-12である。

図-9は、A断面のRCはりの材令28日における破壊曲げモーメントの比を示している。図中には、コンクリートの圧縮強度が350kgf/cm²のRCはりにおける曲げ引張破壊モーメントの計算値を基準にとり、これに対するコンクリートの圧縮強度が低下した場合の破壊モーメントの比率を示している。

計算値1は、下段および上段の鉄筋とも降伏強度の応力度が生じているとした計算方法で、基準の破壊モーメントは71.0tf・cmである。計算値2は、上段の鉄筋は降伏強度としたが、その時の下段の鉄筋は、降伏域を超えて引張強度に達しているとして破壊モーメントを求めた方法による。基準の破壊モーメントは92.0tf・cmと計算された。この値は、図-3、図-5、図-6に示す実測値にほぼ等しい値を示している。なお、いずれの計算方法によっても、破壊曲げモーメントの比の値に大きな相違はない。

図-9より、材令28日における破壊曲げモーメントの比は、実測値のほうが計算値に比べて一般に小さい値を示している。なお、せん断圧縮破壊を生じたはりでは実測値の低下は顕著であることは当然である。しかしながら、材令91日、1年と経過するにしたがい、コンクリートの圧縮強度の低下率も小さくなるため、実測値と計算値は近づいてきていることは、図-10より明瞭である。スラグの置き換えによるRCはりの曲げ耐力が、計算により評価できるようになることを示している。

B断面の材令28日におけるせん断圧縮破壊耐力の比を図-11に示す。計算値は、土木学会昭和61年制定、コンクリート標準示方書設計編に規定されている、せん断補強鉄筋を用いない棒部材のせん断耐力の算定式を用いた。コンクリートの圧縮強度の1/3乗に比例するもの

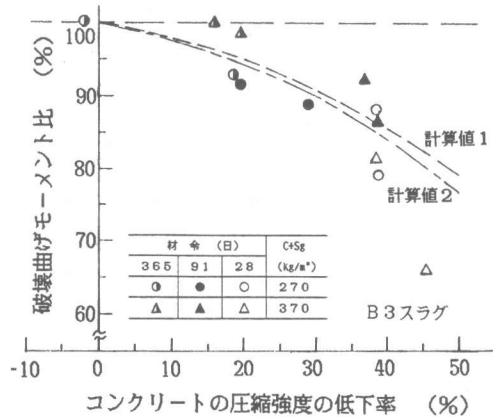


図-10 各材令における破壊曲げモーメント比

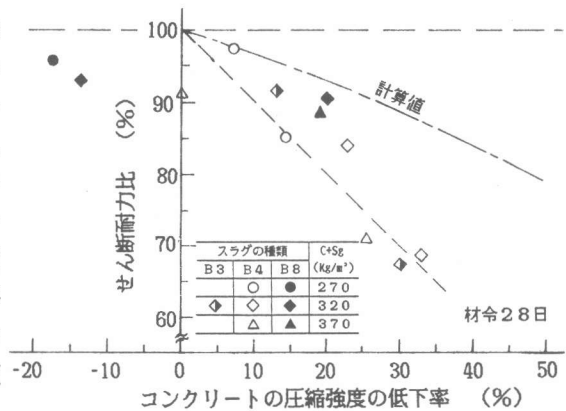


図-11 せん断耐力比 (材令28日)

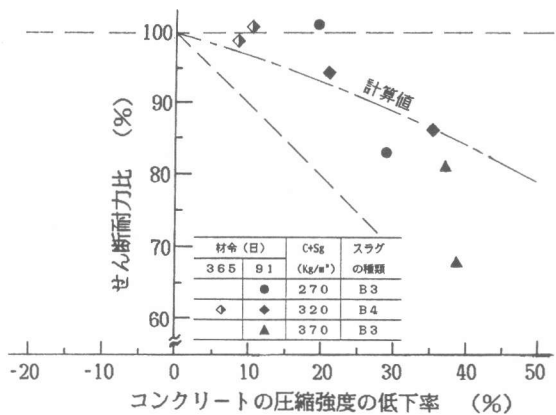


図-12 材令91日と1年におけるせん断耐力比

である。計算値に比べて、実測値の低下が大きくなっている。著しい場合には、破線で示した、コンクリートの圧縮強度の低下率に比例して、せん断耐力が低下している。

材令1年までのせん断破壊の実測値は、B4を用いた場合しかないため、材令91日におけるB3を用いた場合も含めて、図-12に示す。材令28日に比較して、材令91日まで湿布養生したRCはりのせん断耐力比は、一般に増加して、コンクリート標準示方書による計算値まで近づいてきたものの、単位結合材量が $370\text{kg}/\text{cm}^3$ の場合のように、まだ上述の圧縮強度に比例して低下しているものもある。材令1年になると、圧縮強度が20%低下してもせん断耐力はほとんど低下していない結果が得られた。実験値が少ないため明確なことはいえないが、スラグを70%置き換えても、材令が1年程度のRCはりでは、せん断耐力をコンクリート標準示方書の式で算定できると考えてよいと思われる。

6. 結論

本研究は、これまでにほとんど公表されていない、ブレン値で $3000\sim 8000\text{cm}^2/\text{g}$ に変えた高炉スラグ微粉末が、鉄筋コンクリートRCはりの曲げ性状およびせん断性状に及ぼす影響を、材令1年までについて求めたものである。本研究の範囲内で次のことがいえると思われる。

1) 一般に曲げ引張破壊が優先する低引張鉄筋比のRCはりでも、材令28日において、粒度の粗いスラグを多量に置き換えた場合には、コンクリート自体の強度が低下したことにより、せん断圧縮破壊が生じ、異なる破壊型式に移行することがある。

2) 材令が91日、1年を経過すると、スラグの置き換えによるコンクリートの強度低下が改善されるため、材令28日でせん断圧縮破壊を生じたものも、曲げ引張破壊を生じるようになる。また、破壊耐力の実測値も計算値に近づき、RCはりの曲げ耐力式が適用できるようになる。

3) せん断破壊耐力も、材令28日では一般にスラグの置き換えにより低下する。その低下の程度は、コンクリートの圧縮強度に比例するとしたほうが安全である。

4) 材令が1年になると、せん断破壊耐力も改善され、耐力の算定も、土木学会コンクリート標準示方書のように、コンクリートの圧縮強度の $1/3$ 乗に比例すると考えることができる。

本研究は、土木学会、コンクリート委員会、高炉スラグ混和材研究小委員会の委員会活動の一環として実施したものである。研究の実施に際しては、小林信一（小野田セメント（株））、大塚義則（静岡県庁）、富岡和正（太田市役所）の各氏に多大な御協力を頂いた。付記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- [1] 辻 幸和：高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリートはりの曲げおよびせん断特性、土木学会第41回年次学術講演会 講演概要集、pp.441-442、1986。
- [2] 辻 幸和：高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリートはりの力学的性状、土木学会、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム（投稿中）1987年、3月。