

高炉スラグ細骨材を用いた RC はりのせん断耐力評価

東京工業大学 学生会員 ○山崎 隆朗
 東京工業大学 学生会員 木原 亮太
 東京工業大学 正会員 千々和 伸浩

1. 現状および課題

近年、産業副産物として排出されるスラグの有効活用が課題となっている。また、海砂採取規制や海外砂の輸入停止を契機に、天然骨材枯渇への対応という社会的ニーズが高まっており、コンクリート用スラグ骨材の販売量は急増している¹⁾。しかしながら、スラグ細骨材の有効利用の用途としては、セメント原料やサンドブラスト材などが主体なのが現状である。更なるスラグ有効活用率の増加のため、コンクリート用細骨材としての用途拡大が望まれている。

既往研究^{2),3)}の多くではスラグ細骨材を用いたコンクリートの品質が普通コンクリートと同様となるように品質改善を行うといった方策が取られてきた。例えば、スラグ細骨材はガラス質であることや高密度であることから、コンクリートのブリーディングが増加する。ブリーディングがコンクリートの各種性能に及ぼす影響については十分に明らかにされていないが、ブリーディング量を普通コンクリートと同等量まで軽減するためにスラグ細骨材の混合率を変化させる、もしくは混和材等を用いることで粉体量を増加させる、などの方策が経験的に取られてきた。これが結果的にコンクリートの製造段階におけるコストや手間の増大に繋がり、必ずしも効果的な方策とはなっていない。スラグ細骨材の有効利用拡大のためには、スラグ細骨材を普通細骨材と全置換したコンクリートを、品質改善しなくとも適切な構造物に適用できる可能性を追求する必要があると思われる。

2. 目的

鐵鋼スラグ協会では材料性能の観点から高炉スラグ細骨材の普通細骨材との置換率を20~60%とす

ることを推奨している。本研究では更なるスラグ有効活用を図るべく、細骨材を100%高炉スラグ細骨材に置換したRCはりがあるせん断耐力について、一般的なコンクリートで構築されることを前提に提案されている各種の耐力評価式と比較し、構造性能を確認することとした。なお現在コンクリート用細骨材としてJIS規格化されているスラグ細骨材は銅スラグ骨材、高炉スラグ骨材、フェロニッケル骨材、電気炉酸化スラグ骨材、熔融スラグ骨材の5種類となっているが、本研究では高炉スラグ骨材、中でも急速冷却された高炉スラグ細骨材を対象とする。

3. 実験概要

a) 配合および使用材料

本実験のRCはりおよび強度試験用供試体、乾燥収縮測定用供試体で用いたコンクリートの配合および使用材料を表-1に示す。AE剤および消泡剤は100倍希釈液での使用量である。なお本配合は、載荷実験時(材齢14日)において、2012年度土木学会コンクリート標準示方書せん断耐力照査式に設定できる強度上限である55N/mm²となることを目標に決定したものである。

b) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-2に示す。ワーカビリティは普通コンクリートに比べて低く、十分な締め固めが必要な状況であった。またブリーディングも多く見られた。

c) 材料強度

圧縮試験用にφ100mm×200mm円柱供試体3体、割裂引張試験用にφ150mm×150mm円柱供試体3体を作成した。養生条件は1日封緘養生後13日気中養生である。はり載荷時点における圧縮強度は

キーワード スラグ細骨材, はり, せん断耐力評価

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-1 TEL : 03-5734-3767 E-mail : chijiwa@cv.titech.ac.jp

表-1 コンクリートの配合および使用材料

単位量(kg/m ³)						
W	C	S	G	SP	AE	T
160	385	807	997	3.08	7.69	7.69

W: 水道水

C: 早強セメント, 密度 3.13 g/cm³S: 高炉スラグ細骨材, 表乾密度 2.73 g/cm³G: 砕石, 表乾密度 2.65 g/cm³

SP: 高性能減水剤, マスターグレニウム 6520

AE: AE 剤, AER-50

T: 消泡剤, シーカアンチフォーム W

表-2 コンクリートのフレッシュ性状

スランプ	空気量
6.2 cm	3.1 %

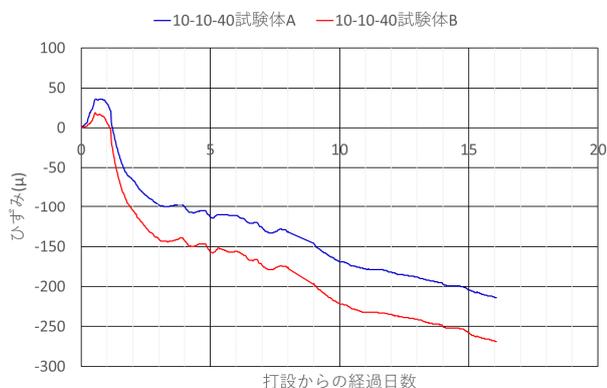


図-1 材料のひずみ経時変化

52.9N/mm², 引張強度は 3.18N/mm²であった. 圧縮強度から予測される引張強度は 3.24N/mm²であり, 得られた試験値と近い値が得られた.

d) 材料の収縮量

100mm×100mm×400mmの角柱供試体2体を用い, 材料の乾燥収縮ひずみを測定した. 図-1に2体の供試体において実測された収縮量の変化を示す. 今回の実験では強度発現をコントロールするため, 標準養生ではなく1日封緘養生後, 13日間気中で養生を行った. 一般に, 高炉スラグ細骨材の置換率が大きくなるにつれコンクリートの乾燥収縮は比較的小さくなることが知られている.

e) RCはり試験体

荷重試験に用いるRCはりとして, せん断スパン内にせん断補強筋を配置したものと配置していないものの2体を作製した(図-2). 断面は高さ200mm, 有効高さ165mm, 幅150mmであり, はりの全長2000mmである. 引張主鉄筋には強度685N/mm²

のD19鉄筋2本を, 圧縮主鉄筋には強度345N/mm²のD10鉄筋2本を用いた. なお引張主鉄筋に高強度鉄筋を用いたのは, 確実にせん断破壊を起こさせるためである. せん断補強筋を有するはりでは, 強度295N/mm²のD4鉄筋をせん断補強鉄筋として用いた. せん断補強鉄筋の配置間隔は700mmである.

はりと材料試験体の養生条件は完全に同じものとし, 1日封緘養生後, 13日間気中で養生を行ったに荷重を行った. はりの荷重は一点荷重とし, 変位制御により荷重を行った. 荷重時には10kNごとに変位増加を停止し, 3分間程度でひび割れ進展を観察した.

荷重重, スパン中央と支点での鉛直変位, 引張主鉄筋スパン中央部ひずみ, 荷重点直下のコンクリート圧縮緑ひずみ, せん断補強筋ひずみ, ひび割れパターンを計測, 記録した(図-2). スパン中央の鉛直変位から2つの支点での鉛直変位の平均値を引くことでスパン中央でのたわみを算出する.

4. 実験結果および考察

a) 曲げひび割れ発生荷重

実験から得られた荷重-たわみ関係を図-3に示す. 曲げひび割れはいずれのはりでも約20kNで発生した. 材料強度から推定される曲げ強度と弾性計算による曲げひび割れ発生荷重は20.9kNであり, 試験での曲げひび割れ発生荷重とほぼ一致する結果となった.

a) せん断耐力

実験では, せん断補強筋のないはりの斜めひび割れ発生荷重は110kN, 最大耐力は114kN(たわみ3.80mm)となり, せん断補強鉄筋のあるはりの斜めひび割れ発生荷重は110kN, 最大耐力は194kN(たわみ9.77mm)という結果が得られた. この結果を各種式による耐力評価値と比較し, 設計式の妥当性について考察する. せん断耐力へのコンクリート寄与分(V_c)の予測には, 土木学会コンクリート標準示方書式⁵⁾($V_{c,jsc}$)と二羽らの提案式⁵⁾($V_{c,niwa}$)を用い, せん断補強筋寄与分(V_s)はトラス理論に基づいて評価し, これらの和によってはりの予測せん断耐力を評価する. なお V_c が評価しようとするのは, 斜めひび割れが発生する時のせん断力, V_s が評価しようとするのはせん断補強鉄筋が降伏する時のせん断耐力への

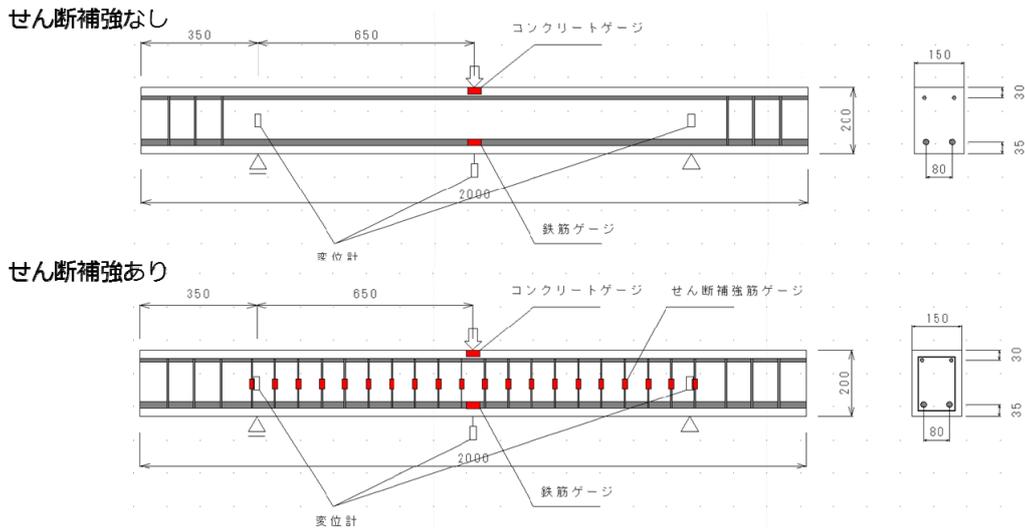


図-2 RCはり供試体概要

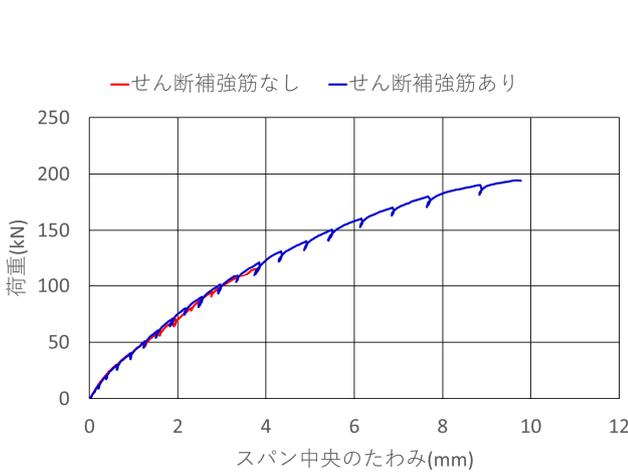


図-3 荷重-たわみ関係

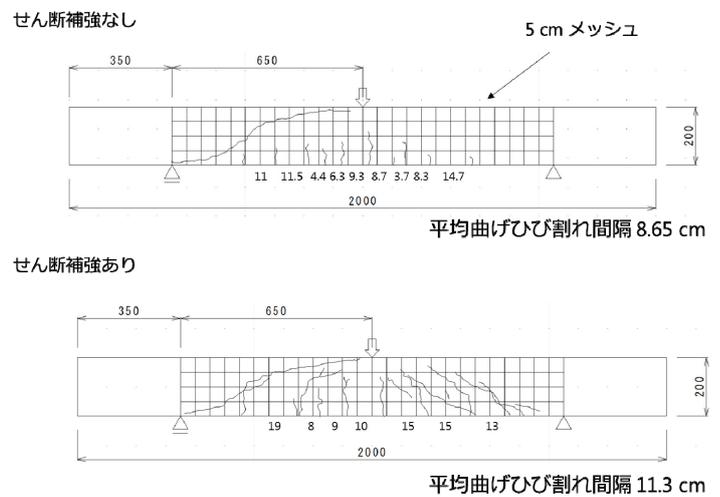


図-4 ひび割れパターン

せん断補強鉄筋の寄与分である。また実際のはりの中ではせん断補強鉄筋とコンクリートとの間には相互作用があるため、耐荷機構の観点からこのような負担の分解は機構を完全に説明するものではないが、本稿の目的は設計式の評価であることから、この単純な加算則に倣うこととした。

各種式による予測値は $V_{c,jsc}$ =27.1kN と $V_{c,niwa}$ =42.5kN, V_s =13.0kN となった。なおこの値の算出にあたり、土木学会式を用いる場合には標準的な安全係数を適用し、二羽らの式を用いる時には各安全係数は 1.0 としている。各種式に基づく耐力の評価値と実験値の比較を表-3に示す。はりの最大耐力と予測評価式による評価値の比はいずれも 1.0 を上回っており、予測評価式により安全側の評価が得られることが確認された。

さらに、より高精度な評価を検討するという観点

から各式の適用条件を厳密に考慮した評価を行った。これはコンクリートの寄与分としての評価を、斜めひび割れが発生したときの荷重とし、せん断補強鉄筋の寄与分をせん断補強鉄筋の降伏時の荷重に基づいて評価するものである。コンクリートの寄与分については、実験で斜めひび割れが観察されたのが 110kN であったのに対し、土木学会式は 51.8kN、二羽らの提案式では 85.0kN という評価となり、実験値と式評価値の比はそれぞれ 2.22 と 1.35 となった。二羽らの提案式と実測値との間には、最大 30% 程度のばらつきがあることを踏まえれば、妥当な評価結果であると考えられる。せん断補強を有するはりの実験結果において、圧縮縁を貫通したななめひび割れと交差するせん断補強鉄筋のひずみを確認したところ、この鉄筋が降伏ひずみに達したのは荷重が 129kN であった(図-5)。この荷重を評価式の比

表-3 実験値と各種式による評価値との比較

	実験値(kN)			式評価値(kN)			最大耐力/ 式評価値	式条件を考慮した 耐力/式評価値
	斜めひび割れ発生荷重	せん断補強鉄筋降伏時荷重	最大耐力	①コンクリート寄与分	②せん断補強鉄筋寄与分	①+②		
せん断補強なし (土木学会式)	110	-	115	51.8	-	51.8	2.22	2.12
せん断補強なし (二羽らの式)				85.0	-	85.0	1.35	1.29
せん断補強あり (土木学会式)	110	129	194	51.8	26.0	77.8	2.49	2.49
せん断補強あり (二羽らの式)				85.0	28.6	113.6	1.71	1.14

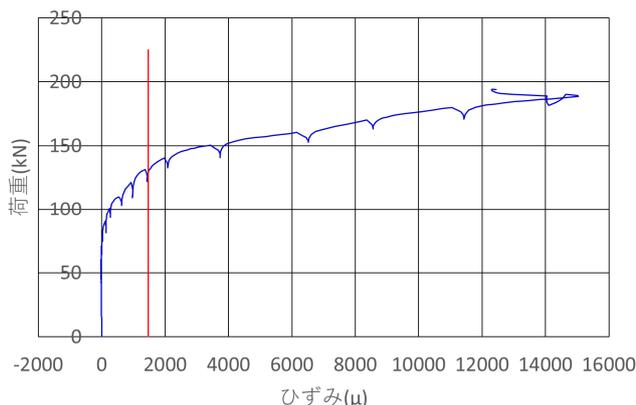


図-5 破壊に至った斜めひび割れと交差するせん断補強筋の荷重 - ひずみ関係

較対象値として、予測評価式に対する比を計算したところ、土木学会式をベースにしたものでは1.29、二羽らの式をベースにしたものでは1.14という評価結果となった。

b) ひび割れ間隔

せん断補強筋なし、ありのそれぞれのRCはりの載荷試験後の目視観察におけるひび割れ間隔とコンクリート標準示方書の最大ひび割れ間隔算定値の比較結果を表-4に示す。実測されたひび割れ間隔は算定値よりも小さく、付着が確保できていることが確認できた。

5. 結論

本研究は細骨材を高炉スラグ細骨材に100%置換したRCはりに対して載荷試験を行い、得られた耐力について、各種耐力評価式との比較を行い、以下の結果を得た。

- (1) 高炉スラグ細骨材RCはりが保有するせん断耐力について、土木学会示方書式による耐力算定

表-4 ひび割れ間隔

	最小ひび割れ間隔	最大ひび割れ間隔	平均ひび割れ間隔	最大ひび割れ間隔の算定値
せん断補強なし	40 mm	147 mm	87 mm	141 mm
せん断補強あり	80 mm	190 mm	113 mm	141 mm

結果は、せん断補強鉄筋を用いない場合に2.22倍、せん断補強鉄筋を用いない場合に2.49倍の耐力を有している結果となり、示方書式により安全側の評価を行えることが確認できた。

- (2) せん断耐力評価式の適用条件に最も近い時点での実験応答値を用いて、耐力評価式の結果と比較したところ、応答値/評価値はせん断補強鉄筋を用いない場合で1.29、せん断補強鉄筋を用いた場合で1.14となることがわかった。

参考文献

- 1) 鐵鋼スラグ協会：高炉スラグ利用統計表，鐵鋼スラグ統計年報
- 2) 土木学会：高炉スラグ骨材コンクリートを用いたコンクリートの設計・施工方針（案），コンクリートライブラリー，No.110，2004
- 3) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2013
- 4) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2012
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No372，p.167-176，1986