

低炭素型のコンクリートの収縮特性および 床スラブに対する頭付きスタッド接合のせん断特性

大 橋 直 明 浅 井 英 克
神 代 泰 道 田 中 寛 人

Shrinkage Characteristics of Low-Carbon Concrete and Shear Properties of Headed Studs to Floor Slabs

Naoaki Ohashi Hidekatsu Asai
Yasumichi Koshiro Hiroto Tanaka

Abstract

To reduce CO₂ emissions during building construction, there is a demand for low-carbon concrete for steel-frame construction. Among these, blast furnace slag concrete exhibits different shrinkage properties from ordinary concrete; therefore, the shear characteristics of the head studs may differ from those of ordinary concrete. In this study, we conducted tests to measure the length rate of concrete with blast furnace slag replacement rates ranging from 0% to 75% as well as push-out tests on headed studs. The test results showed that the length change rate was equivalent to or lower than that of ordinary concrete for all the blast-furnace slag concretes, and the maximum shear capacity was confirmed to be equivalent to that of ordinary concrete.

概 要

建物建設時の CO₂ 排出量を削減するため、低炭素型のコンクリートの鉄骨造地上躯体への利用拡大が求められている。そのうち高炉スラグコンクリートは収縮特性が普通コンクリートと異なるため、鉄骨部材とコンクリートを一体化させる頭付きスタッドのせん断特性が普通コンクリートと異なる可能性がある。そこで、本報では高炉スラグ置換率を 0～75%としたコンクリートを対象として、長さ変化試験、頭付きスタッドの押抜き試験を実施した。長さ変化試験の結果、乾燥収縮ひずみはいずれの高炉スラグコンクリートにおいても普通コンクリートと同等以下となり、スタッドのせん断耐力への影響が小さいことが確認された。押抜き試験の結果、最大せん断耐力に大きな差はみられず、普通コンクリートを対象とした既往式で評価可能であることが確認された。

1. はじめに

地球温暖化の原因となる CO₂ の排出量削減は重要な課題であり、産業界では様々な施工プロセスで CO₂ 削減が求められている。鉄骨造建物について見ると、文献 1) に示される試算では、躯体工事が工事全体で排出する CO₂ の 36～58% を占めており、さらに躯体工事で排出する CO₂ の過半が鉄骨工事とコンクリート工事によるものである。そのため、両工事における CO₂ 排出量の削減が建物建設時の CO₂ 削減において重要である。

大林組は自社の電炉鋼材使用標準を 1993 年に発行し、CO₂ 排出量の少ない電炉鋼材の有効利用を図るとともに、高炉鋼材に比べて品質のばらつきが大きいことが懸念される電炉鋼材に関しては個別に試験等で品質を確認した上で使用している。一方、コンクリートに関しては、高炉スラグ微粉末を高含有した「クリーンクリート®」²⁾を開発し、低発熱性の特長を活かして地下躯体のマスコンクリートなどへの適用を進めてきた。しかしながら、セメントを高炉スラグ微粉末に置換したコンクリート（以下、高炉スラグコンクリート）は普通ポルトランドセメ

ントを 100% 使用したコンクリート（以下、普通コンクリート）に比べて中性化が進行しやすく、地上躯体に使用するにはかぶり厚さを普通コンクリートより大きくする必要があるなどの課題があった³⁾。

その後、2022 年に改定された JASS 5⁴⁾では、屋内など腐食環境とならない部分については中性化による耐久設計を適用しない規定が盛り込まれた。鉄骨造の躯体は外装材に覆われるため、躯体が雨水に直接触れるケースが少なく、JASS 5 の改定で鉄骨造地上の床スラブへの適用拡大に向けた課題の一部が緩和された。一方、高炉スラグコンクリートの自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみは普通コンクリートと異なる特性があると指摘されている⁵⁾。鉄骨とコンクリートを一体化させる頭付きスタッド（以下、スタッド）のせん断特性はコンクリートの充填性に影響されるため⁶⁾、高炉スラグコンクリートと普通コンクリートの収縮特性の違いにより、スタッドのせん断特性が異なる可能性が考えられる。

以上を踏まえ、本報では高炉スラグコンクリートを鉄骨造地上の床スラブに利用した場合の構造性能について検討するため、まず高炉スラグコンクリートの長さ変化

試験を実施し、収縮特性について確認した。次いで、「各種合成構造設計指針・同解説」⁷⁾に示されるスタッドの押抜き試験⁹⁾を実施し、スタッドに対するせん断特性および鉄骨とコンクリートの付着特性について確認した。

2. コンクリートの収縮特性

2.1 試験計画

高炉スラグコンクリートの収縮特性を把握するため、JIS A 1129-2 による長さ変化試験を行った。パラメータは収縮への影響が考えられる高炉スラグ置換率（以下、置換率）および養生方法とした。置換率は0%、25%（高炉セメントA種相当）、43%（高炉セメントB種）、75%（クリーンクリート）の4種類であり、それぞれの配合をTable 1に示す。コンクリートはいずれも呼び強度24、目標スランプ値18cm、粗骨材最大寸法20mmとし、全てのコンクリートは出荷実績のあるプラントで製造した。置換率43%の高炉スラグコンクリートには高炉セメントB種を使用し、置換率25%、75%の高炉スラグコンクリートは普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を混

合して所定の置換率とした。水結合材比はプラントの出荷実績に基づいて置換率0%、25%、43%は60%とし、置換率75%は文献2)を参考に51%とした。試験体は同一配合につき3体ずつとし、環境条件による影響を考慮するため、それぞれ別の方法で養生した。養生方法をTable 2に示す。(a)[標水7D室内気乾]はJIS A 1129-2に示される養生方法であり、材齢7日目より測定開始した。(b)[現封7D屋外気乾]は押抜き試験の試験体を模擬した養生方法であり、打設後7日間は現場封かん養生し、その後に測定開始した。(c)[0D屋外気乾]は打設日翌日まで現場封かんした養生方法であり、その後に測定開始した。測定期間は2024年9月～2025年3月までの打設後27週とした。

2.2 試験結果

本報では文献8)に従い、長さ変化試験の結果を乾燥収縮ひずみと呼ぶ。材齢189日目（打設後27週目）までの乾燥収縮ひずみの推移をFig. 1、材齢189日目の乾燥収縮ひずみをFig. 2に示す。Fig. 1中〔 〕内は、材齢189日目の乾燥収縮ひずみを示している。すべての養生方法

Table 1 コンクリートの配合

Concrete Mixing

配合	置換率 (%)	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)					
			セメント	高炉スラグ微粉末	水	細骨材	粗骨材	化学混和剤
A	0	60	307	0	185	855	922	2.92
B	25	60	230	77	185	847	922	2.92
C	43	60	306※	-	184	855	915	2.91
D	75	51	89	269	182	810	912	3.58

※高炉セメントB種使用

Table 2 養生方法

Methods of Preservation

種別	方法
(a)標水7D室内気乾	打設翌日脱型後、標準水中養生し、材齢7日目より水中から出し、恒温恒湿室内(温度20℃、湿度60%)にて計測開始
(b)現封7D屋外気乾	打設翌日脱型後、現場封かん養生し、材齢7日目に養生終了後、直射日光の当たらない屋外にて計測開始
(c)0D屋外気乾	打設翌日脱型後、直射日光の当たらない屋外にて計測開始

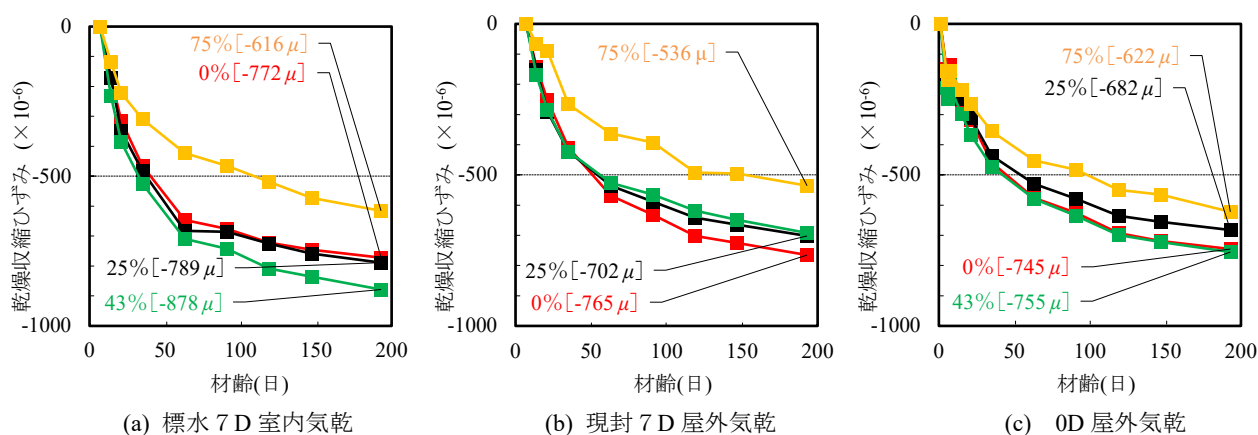


Fig. 1 乾燥収縮ひずみの推移

Progression of Drying Shrinkage Strain

において置換率の違いを見ると、置換率 75% の乾燥収縮ひずみは他の置換率と比べて小さいことが分かる。次いで水結合比の等しい置換率 0%, 25%, 43% の乾燥収縮ひずみを比較すると、置換率 25%, 43% の乾燥収縮ひずみは置換率 0% の乾燥収縮ひずみと概ね $\pm 10\%$ (Fig. 2 中、赤破線) 以内となっている。高炉スラグコンクリートの乾燥収縮ひずみは概ね普通コンクリートと同等以下となっているため、スタッドのせん断耐力への影響は小さいと推察される。

3. スタッドのせん断特性

3.1 試験計画

3.1.1 試験体 スタッドの押抜き試験方法は「頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状」⁶⁾を参考にすることとした。試験体形状を Fig. 3、試験体一覧を Table 3 に示す。試験体は置換率と鉄骨付着面への剥離剤の有無をパラメータとした全 8 体とした。置換率は 0%, 25%, 43%, 75% とし、Table 1 で示したコンクリートの配合と同様であり、試験体数は同一配合につき 2 体ずつとした。そのうち 1 体は鉄骨に剥離剤を塗布してコンクリートの付着を低減させた。スタッドの寸法は軸径 19mm、呼び長さ 80mm で全試験体共通とした。試験体の製作方法において、スタッドは下向きで鉄骨 (CT-100x200x8x12、鋼種: SN490B) のフランジ面に溶接し、コンクリートは鉄骨のフランジ面を水平にして打設した。打設後は散水養生を 7 日間行い脱型し、Fig. 3 (a) に示す部材①と部材②を鉄骨の材軸方向が鉛直となるように接続させた。

3.1.2 载荷及び計測 载荷は単調载荷 (最大速度 0.05mm/s) とし、スタッドが破断するまで行った。試験体と载荷盤、試験体と底板の間には、スタッド 4 本に荷

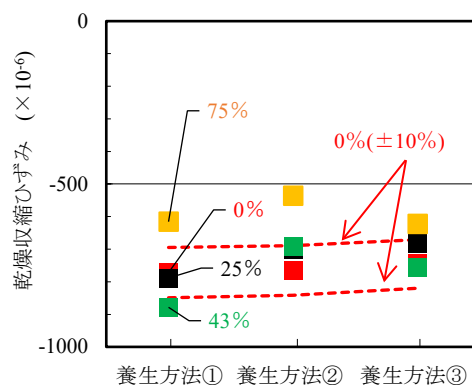


Fig. 2 材齢 189 日目の乾燥収縮ひずみ
Drying Shrinkage Strain at 189 Days

Table 3 試験体一覧
List for Specimens

List of specimens					
No.	スタッド寸法	コンクリート	置換率	床スラブ厚	剥離剤
1	軸径 19mm 呼び長さ 80mm (4 本)	24-18-20	0% [配合 A]	150mm	有
2					無
3			25% [配合 B]		有
4					無
5			43% [配合 C]		有
6					無
7			75% [配合 D]		有
8					無

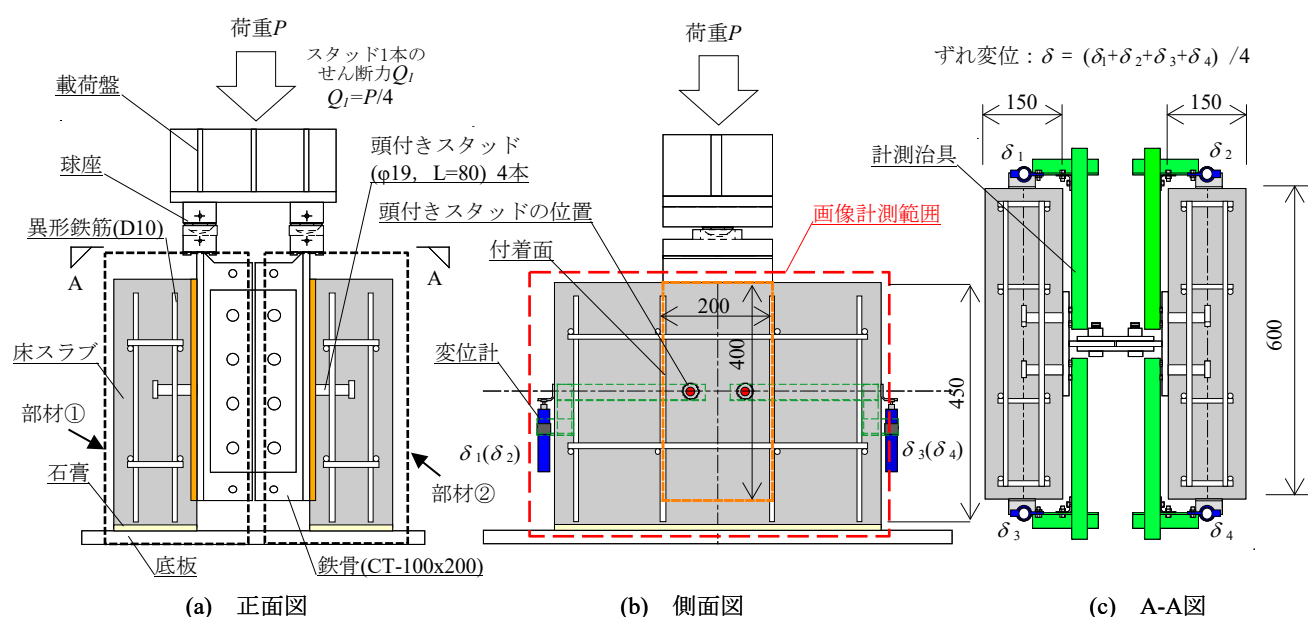


Fig. 3 試験体形状
Shape of Specimens

Table 4 圧縮試験結果
Compression Test Results

置換率 (%)	材齢 (日)	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	既往式 ¹¹⁾ $E_{c,cal.}$ (N/mm ²)
0	33	33.5	2.73×10^4	2.58×10^4 [1.06]*
25	35	36.7	2.85×10^4	2.65×10^4 [1.08]*
43	35	37.8	2.79×10^4	2.62×10^4 [1.07]*
75	33	33.4	2.90×10^4	2.60×10^4 [1.12]*

※ []内はヤング係数の計算値に対する実験値の比率

重 P が均等に作用するように、球座や石膏を設置した。スタッド1本に作用するせん断力 Q_1 は荷重 P をスタッド本数の4で除した値とし、ずれ変位 δ はスタッド溶接した近傍の鉄骨フランジと床スラブの相対変位 $\delta_1 \sim \delta_4$ の平均値とした。床スラブ片面はデジタル画像相関法⁹⁾ (以下、DIC) により、ひび割れ状況を観察した¹⁰⁾。

3.1.3 圧縮試験 コンクリートの材料特性把握のためコンクリートの圧縮試験を行った。供試体寸法は $\phi 100 \times 200$ mm、養生方法は現場封かん養生とし、押抜き試験の当日に圧縮強度 σ_c とヤング係数 E_c を測定した。圧縮試験の結果を Table 4 に示す。ヤング係数 E_c は $2.73 \times 10^4 \sim 2.90 \times 10^4$ N/mm²、圧縮強度 σ_c は $33.4 \sim 37.8$ N/mm² であり、すべての置換率で概ね同様の値となっている。「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹¹⁾ に従い圧縮強度等から求めたヤング係数 E_c の評価値を Table 4 の最右列に示す。ヤング係数の計算値に対する実験値の比率 [$E_c / E_{c,cal.}$] は 1.06~1.12 であり、既往式により+10%程度の精度で評価できることが分かる。

3.2 試験結果

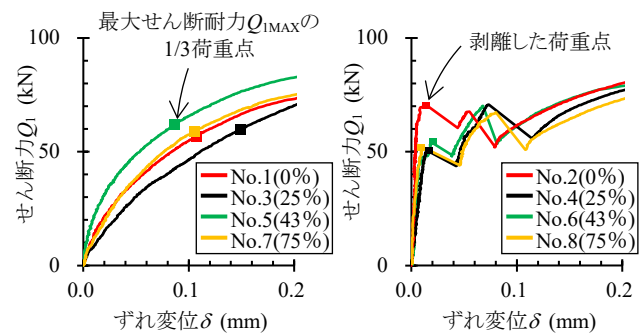
3.2.1 試験結果の概要 押抜き試験の結果概要を Table 5, せん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4, Fig. 5 は剥離剤の有無に分けてせん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係を示している。

Fig. 4 より載荷初期のせん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係を見ると、剥離剤ありの試験体は単調にせん断力が増加している(Fig. 4(a))。一方、剥離剤なしの試験体は初期剛性が高いものの、鉄骨と床スラブの剥離に伴ってせん断力が一時的に減少している(Fig. 4(b))。剥離剤の有無で初期性状が異なるため、Table 5 では剥離剤ありの試験体の初期剛性を最大せん断耐力 Q_{1MAX} の 1/3 荷重点における割線剛性⁷⁾、剥離剤なしの試験体の初期剛性を鉄骨と床スラブが剥離した荷重点における割線剛性としている。Table 5 より同一置換率で比較すると、剥離剤なしの試験体は剥離剤ありに比べて 3.7~8.4 倍の初期剛性であり、初期剛性に及ぼす付着の影響は大きい。一方、剥離剤なしの試験体同士、もしくは剥離剤ありの試験体同士を比較し

Table 5 試験結果概要
Outline for Test Results

No.	置換率	剥離剤	破壊性状	初期剛性 (kN/mm)	最大せん断耐力 Q_{1MAX} (kN)
1	0%	有	スタッド破断	5.29×10^2	170 [1.33]*
2		無	スタッド破断	43.6×10^2	163 [1.27]*
3	25%	有	スタッド破断	4.02×10^2	180 [1.41]*
4		無	スタッド破断	33.7×10^2	168 [1.31]*
5	43%	有	スタッド破断	7.16×10^2	186 [1.45]*
6		無	スタッド破断	26.2×10^2	175 [1.37]*
7	75%	有	スタッド破断	5.59×10^2	176 [1.38]*
8		無	スタッド破断	43.1×10^2	171 [1.34]*

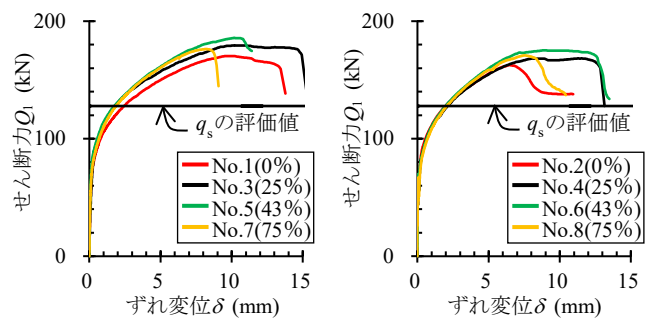
※ []内は終局せん断耐力の評価値 q_s に対する最大せん断耐力 Q_{1MAX} の比率



(a) 剥離剤あり (b) 剥離剤なし

Fig. 4 せん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係 (0~0.2mm)

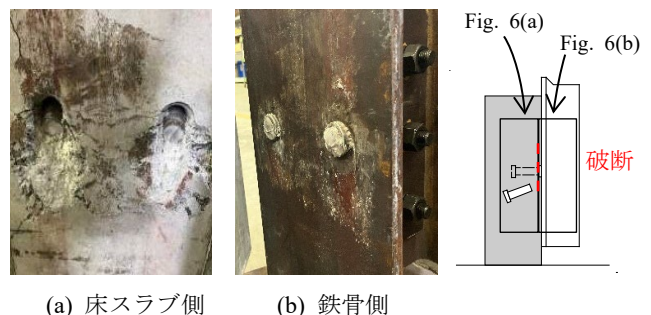
Shear Strength Q_1 - Relative Slip δ Relationships (0~0.2mm)



(a) 剥離剤あり (b) 剥離剤なし

Fig. 5 せん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係 (0~15mm)

Shear Strength Q_1 - Relative Slip δ Relationships (0~15mm)



(a) 床スラブ側 (b) 鉄骨側

Fig. 6 スタッドの破壊性状
Destructive Property of Studs

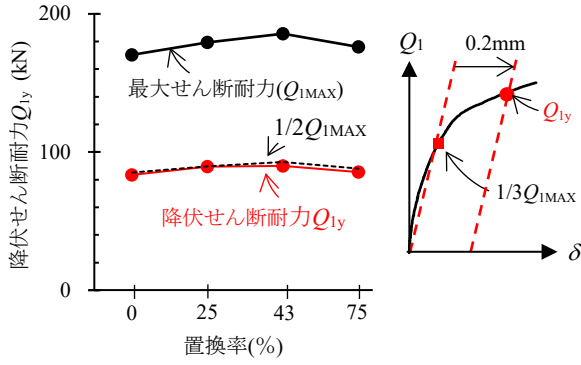
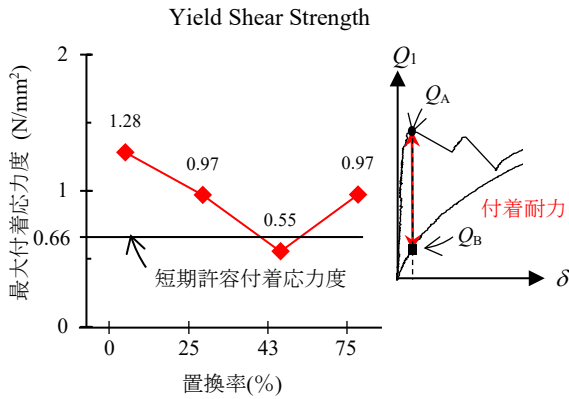
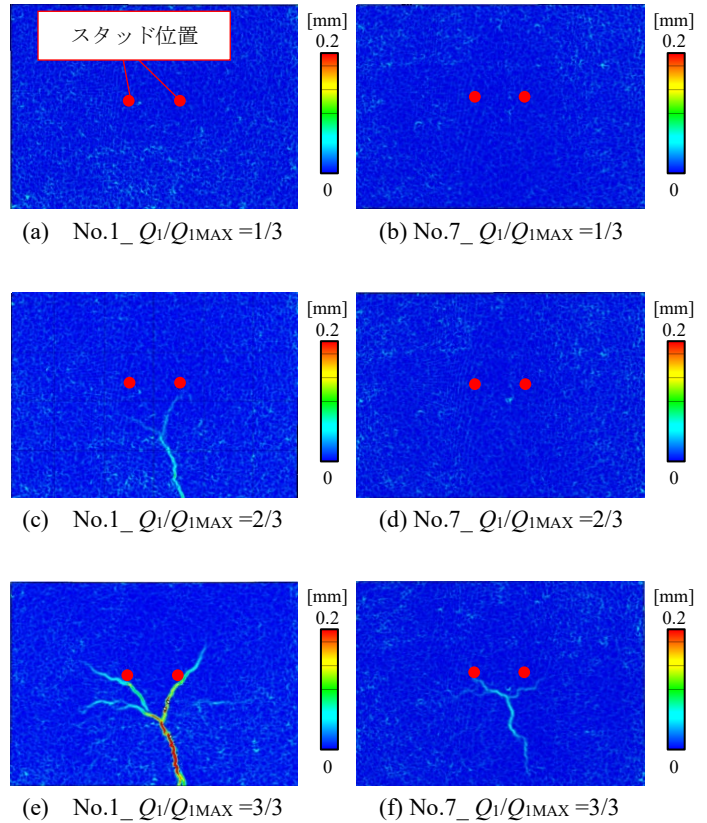


Fig. 7 降伏せん断耐力 (剥離剤あり)


 Fig. 8 最大付着応力度
Maximum Bond Stress

 Fig. 9 コンクリートのひび割れ状況 (剥離剤あり)
Cracked Concrete Conditions

た場合、置換率と初期剛性に有意な相関はみられない。

Fig. 5 より荷重全体のせん断力 Q_1 -ずれ変位 δ 関係を見ると、いずれの試験体においても、荷重初期の 0.02mm 以降では、ずれ変位 δ の増加に伴って、せん断力 Q_1 の増加率は緩やかになっている。その後、最大せん断耐力 Q_{IMAX} に達し、スタッド軸部が破断して破壊に至っている (Fig. 6)。Table 5 に示す通り、全試験体の最大せん断耐力 Q_{IMAX} は、平均値 (173kN) に対して 0.94 ~ 1.07 倍となっており、剥離剤の有無 (付着の大小) が最大せん断耐力 Q_{IMAX} に及ぼす影響は小さいことが分かる。

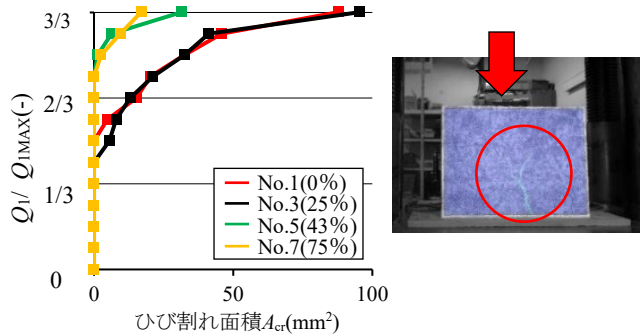
3.2.2 最大せん断耐力 文献 7) に基づく終局せん断耐力 q_s の評価式を式 (1)、評価値を Fig. 5 中に黒線にて示す。

$$q_s = 0.5 a_s \sqrt{\sigma_c \cdot E_c} \quad (1)$$

なお、 $\sqrt{\sigma_c \cdot E_c} \geq 900$ の場合、 $\sqrt{\sigma_c \cdot E_c} = 900$ とする。

式 (1) の a_s はスタッド軸部の断面積、 σ_c と E_c は材料試験の圧縮強度とヤング係数とした。本試験ではいずれの試験体も $\sqrt{\sigma_c \cdot E_c} \geq 900$ となるため、 $q_s = 128 \text{ kN}$ となる。Table 5 の最右列 [] 内に示す通り、最大せん断耐力 Q_{IMAX} は終局せん断耐力 q_s の 1.27 ~ 1.45 倍となっている。

3.2.3 降伏せん断耐力 降伏せん断耐力 Q_{ly} と置換率の関係を Fig. 7 に示す。降伏せん断耐力 Q_{ly} は文献 7)


 Fig. 10 ひび割れ面積の推移
Incremental Crack Area

に基づき最大せん断耐力 Q_{IMAX} の 1/3 荷重点から 0.2mm オフセットした耐力としている (Fig. 7 右図)。なお剥離剤なしの試験体は最大せん断耐力 Q_{IMAX} の 1/3 荷重点で概ね剥離が発生しており、0.2mm オフセットの基準となる荷重点が明確でないため算出していない。Fig. 7 左図では降伏せん断耐力 Q_{ly} を赤実線、最大せん断耐力 Q_{IMAX} を黒実線、最大せん断耐力 Q_{IMAX} の 1/2 を黒破線で示している。降伏せん断耐力 Q_{ly} は最大せん断耐力 Q_{IMAX} のおよそ 1/2 となっており、置換率とは相関がみられないことが分かる。

3.2.4 最大付着応力度 最大付着応力度と置換率の関係を Fig. 8 に示す。ここでは鉄骨とコンクリートの付着

がスタッドのせん断耐力に及ぼす影響を確認するため、最大付着応力度についての検討を行う。最大付着応力度の算出方法について、Fig. 8 右図を例に説明する。同一置換率の試験体から床スラブと鉄骨が剥離した時のせん断力の差($Q_A - Q_B$)を求めてこれを付着耐力とし、床スラブと鉄骨の接触面積で除して最大付着応力度とする。Fig. 8 左図の黒線は「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹²⁾から求めた試験体の短期許容付着応力度(0.66 N/mm^2)である。Fig. 8 より、最大付着応力度は $0.55 \sim 1.28 \text{ N/mm}^2$ でばらつきが大きく、置換率やせん断耐力と有意な相関は見られない。また短期許容付着応力度に対する最大付着応力度の比は $0.83 \sim 1.93$ となっており、最大付着応力度の下限値は概ね短期許容付着応力度と近い傾向がある。

3.2.5 ひび割れ性状 置換率 0%, 75%の剥離剤ありの試験体(No.1, No.7)について、DIC で求めた床スラブ表面のひび割れ幅¹⁰⁾を Fig. 9 に示す。図では最大せん断耐力 Q_{IMAX} に対するせん断力 Q_i の比 Q_i/Q_{IMAX} が $1/3$, $2/3$, $3/3$ となる時のひび割れ幅を示している。 $Q_i/Q_{\text{IMAX}} = 1/3$ ではひび割れを確認できないが(Fig. 9 (a), (b)), $Q_i/Q_{\text{IMAX}} = 2/3$ では置換率 0%のみひび割れを確認できる(Fig. 9 (c), (d))。 $Q_i/Q_{\text{IMAX}} = 3/3$ では、置換率 0%, 75%の両方でひび割れを確認できる(Fig. 9 (e), (f))。また置換率 0%のひび割れは床スラブ下部から、置換率 75%のひび割れはスタッド近傍から発生しているが、両者ともにスタッドと床スラブ下部との間にひび割れが集中していることが分かる。剥離剤ありの試験体について Q_i/Q_{IMAX} とひび割れ面積 $A_{\text{cr}}^{10)}$ の関係を Fig. 10 に示す。 $Q_i/Q_{\text{IMAX}} \geq 2/3$ では、すべての試験体でひび割れが大きく進展しているが、 $Q_i/Q_{\text{IMAX}} = 1/3$ では、全試験体でひび割れ面積が 0 であり、試験体の初期剛性の範囲では、ひび割れが発生していないことが分かる。

4. まとめ

高炉スラグコンクリートを鉄骨造地上躯体へ適用するため、高炉スラグ置換率(0%, 25%, 43%, 75%)をパラメータとしたコンクリートに対して、長さ変化試験および頭付きスタッドの押抜き試験を実施した。本試験の範囲で得られた知見を以下に示す。

1) 乾燥収縮ひずみ

いずれの養生方法においても置換率 75%の乾燥収縮ひずみは、他の置換率と比べて小さい傾向を示した。また置換率 25%, 45%の乾燥収縮ひず

みは、置換率 0%の概ね $\pm 10\%$ 程度となった。高炉スラグコンクリートの乾燥収縮ひずみは普通コンクリートと同等以下であることから、スタッドのせん断耐力への影響は小さいと考えられる。

2) スタッドのせん断特性

いずれの置換率においても、スタッドの最大せん断耐力に大きな差はなく、コンクリートの圧縮強度やヤング係数から求めた既往式で安全側に評価できる。

3) 鉄骨とコンクリートの付着特性

鉄骨と床スラブの最大付着応力度の下限値は概ね短期許容付着応力度と近い傾向がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築分野のカーボンニュートラル、2022 年度日本建築学会大会（北海道），総合研究協議会資料，2022.9
- 2) 小林利充ほか：低炭素型のコンクリート「クリーンクリートTM」の開発，大林組技術研究所所報，No.75，pp.1-8，2011
- 3) 神代泰道ほか：流動性を高めた「クリーンクリート[®]」の地上構造物への適用，大林組技術研究所所報，No.85，pp.1-6，2023
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2022.11
- 5) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造構造物の設計・施工指針（案）・同解説，2017.9
- 6) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押し抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート，No.35，1996.11
- 7) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2023.6
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針・同解説，2023.2
- 9) ARAMIS / Acquisition Basic, GOM Software, 2022
- 10) 穴吹拓也ほか：画像計測及び非線形 FEM による RC 構造物のひび割れ性状評価，大林組技術研究所所報，No.83，pp.1-8，2019
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2024.12
- 12) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2014.8