

論文 高強度フライアッシュ人工骨材を使用したコンクリート部材のせん断特性

荒添 正棋^{*1}・鈴木 基行^{*2}・内田 裕市^{*3}・横田 弘^{*4}

要旨：現在、大量の石炭灰が埋立て処分の対象となっており、その有効利用が望まれている。一方では、良質な天然骨材の確保が難しくなっており、代替材料が必要とされている。このような背景のもと、高強度フライアッシュ人工骨材（以下 HFA 骨材とする。）が開発された。そこで、この骨材を用いたコンクリート部材の構造性能を検討する必要がある。ここでは構造性能の1つであるせん断特性を確認するために、梁のせん断試験および押抜きせん断試験を行った。この試験結果から、この部材のせん断特性の評価手法について考察した。

キーワード：HFA 骨材、梁のせん断試験、押抜きせん断試験

1. はじめに

石炭灰の産出量は、平成 11 年において約 700 万トンにのぼり、今後もその産出量は増大すると予想されている。これらの石炭灰の処理に関しては、土木・建築材料等に約 70%が有効利用されているが、残りは埋立て処分されている。一方、コンクリート用骨材に関しては、良質な骨材の確保が難しくなっており、この代替材料が必要とされている。

このような背景のもと、フライアッシュを主原料とした非発泡型骨材である HFA 骨材が、コンクリート用粗骨材（5～20mm）として開発された。この HFA 骨材の形状は、球形である。また、従来の人工軽量骨材と異なり、吸水率(2.60%)や骨材強度（圧かい荷重:2.35kN）が普通骨材に近く、普通骨材より軽量（絶乾密度：1.8g/cm³）である。

この新しい人工骨材をコンクリートに適用するためには、材料的観点¹⁾からの検討に加えて、構造性能の観点から検討する必

要がある。

そこで、本論文では構造性能の1つであるせん断特性を確認するために、梁のせん断試験と、面部材の押抜きせん断試験を行った。

これらの実験結果から、HFA 骨材を用いた鉄筋コンクリート部材のせん断特性の評価手法について考察したので、以下に述べる。

2. 実験概要

2.1 梁のせん断試験

(1) 試験体

表-1 に各試験体の諸元を示す。試験体は case1 ～case9 の 9 体である。図-1 に代表的な試験体の

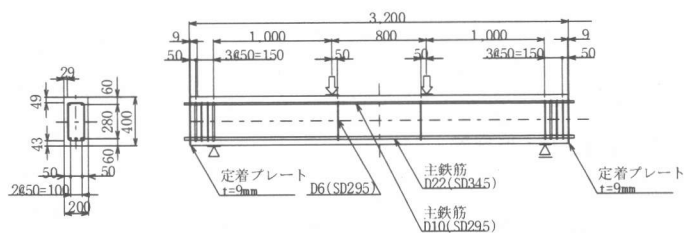


図-1 試験体形状・配筋（梁のせん断試験）

*1 佐藤工業（株）中央技術研究所土木研究部門（正会員）

*2 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*4 国土交通省港湾技術研究所構造強度研究室長 工博（正会員）

表－1 梁のせん断試験の諸元とコンクリートの材料特性結果

試験体	寸法(mm) 長さ×高さ×幅	コンクリ ート強度 (N/mm ²)	有効 高さ (mm)	せん断 スパン 比 (a/d)	粗骨材 種類	引張 鉄筋 比	せん断 補強 鉄筋比	f _c '	E _c	f _t						
case1	3200×400×200	30	340	3	HFA 骨材	1.71%	0.0%	28.5	20.3	2.51						
case2		50						52.4	24.2	3.20						
case3		80						76.2	29.5	3.01						
case4	4300×600×300	520	1.65%			78.1		29.7	2.90							
case5	7200×1070×500	1000	1.67%			78.1		29.7	2.90							
case6	3900×400×200	50	340	4		1.71%		54.7	24.8	3.61						
case7	3200×400×200			3	砕石 骨材			0.18%	52.8	24.4	4.05					
case8								0.0%	50.3	30.6	3.68					
case9								0.18%	56.3	32.6	4.64					

f'_c : 圧縮強度(N/mm²), E_c : 弾性係数(kN/mm²), f_t : 引張強度 : (N/mm²)

形状寸法および配筋状況を示す。

目標圧縮強度は30,50および80N/mm²の3種類、有効高さは340,520および1000mmの3種類、せん断スパン比3,4の2種類、粗骨材の種類はHFA骨材および碎石骨材の2種類、せん断補強鉄筋比は0および0.18%の2種類とした。

試験時の各コンクリートの材料特性結果を表－1に合わせて示す。目標強度50N/mm²の場合、碎石骨材のコンクリートに比べてHFA骨材を用いたコンクリートの弾性係数は2割程度低く、引張強度も、1～2割程度低い。また、HFA骨材の場合、圧縮強度の増加に対して引張強度の増加は頭打ちとなった。

(2) 載荷および計測

加力装置の概要を図－2に示す。

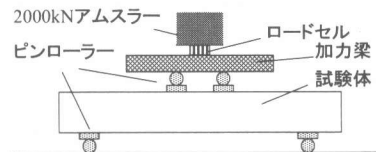
載荷は、一方向載荷とし、加力梁を介して試験体の回転を拘束しないように、両側をピンローラーにして試験体に加力した。反力も同様に回転を拘束しないように支承をピンローラーとした。

計測項目は、荷重、載荷点および梁中央部のたわみ、梁中央部の主鉄筋ひずみとした。

2.2 押抜きせん断試験

(1) 試験体

試験体は1200×1200×85mmの正方形スラブとし、配筋は道路橋床下を想定し、実橋と同程度に異方性を持たせることとして鉄筋比を2.19×1.73%の直交異方配筋とした。ただし、鉄筋量の絶対値についてはコンクリート強度が高い場合においても押抜きせん断破壊を生じるように高めに設定した。なお、鉄筋は降伏点強度390N/mm²の



図－2 加力装置の概要（梁のせん断試験）

D10 異形鉄筋を用いた。図－3に試験体の形状および配筋状況を示す。なお、せん断耐力の評価における異方性の取扱いについては、コンクリート標準示方書²⁾を準用して両方向の鉄筋比の平均値を使用することとした。

実験パラメータは、コンクリート強度と粗骨材の種類とした。目標圧縮強度を50N/mm²の碎石コンクリート（記号G50）、目標圧縮強度を30,50および80N/mm²の3種類に変えたHFA骨材コンクリート（記号HFA30,HFA50,HFA80）の合計4種類のコンクリートを用いた鉄筋コンクリートスラブを1条件につき2体ずつ製作した。

試験体は、打設後2～3週間湿布養生をし、その後載荷試験時まで実験室内で気中養生を行った。なお、試験時の材齢は7～8週である。試験時の各コンクリートの材料特性結果を表－2に示す。

(2) 載荷および計測

加力装置の概要を図－4に示す。荷重は載荷面積を100×100mmとした中央部分集中荷重とした。支持条件はスパンを1000mmとして、浮上りを許す四辺単純支持とした。なお、浮上りを許すことについては、本実験の支持条件ならびに試験体寸法は後述の土木学会コンクリート標準示方書の耐

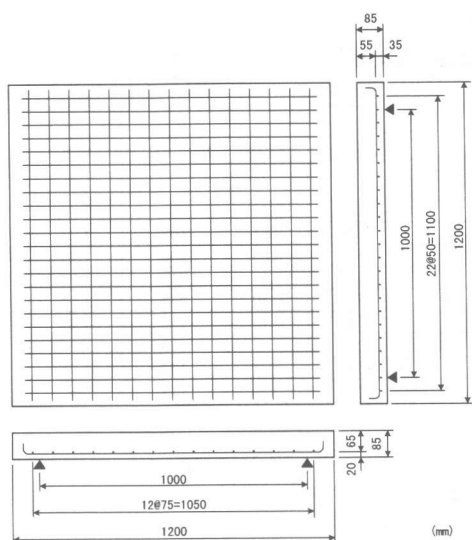


図-3 試験体形状・配筋（押抜きせん断試験）

力算定式の基礎データとなった角田らの実験³⁾で使用されたものとはほぼ同一であることから、押抜きせん断耐力に対する浮上りの影響はないものと考えた。載荷は最大荷重（押抜きせん断破壊）に達するまで、荷重制御により単調に加力した。

計測項目は、荷重、載荷点中央のたわみおよび載荷点中央の鉄筋ひずみとした。

3. 実験結果および考察

3.1 梁のせん断試験

(1) 破壊性状

実験結果を表-3 に示す。代表的な履歴曲線を図-5 に示す。破壊形態はせん断圧縮破壊と斜め引張破壊の2種類であった。

case1 の破壊形態はせん断圧縮破壊であった。まず等曲げ区間に曲げひび割れが発生した。さらに変位を加えると、載荷重の増加とともに、ひび割れがせん断領域にも発生し、次第にそのひび割れが進展した。その後、急激に大きな斜めひび割れが生じ、同時に載荷重も同時に低下した。しかし、さらに変位を与えると徐々に載荷重は増大した。そして、斜めひび割れ発生時に示した載荷重を大きく超えるとともに、せん断ひび割れ幅が増大し、大きな破壊音とともに急激に耐力が低下した。

表-2 コンクリートの材料特性結果

（押し抜きせん断試験）

試験体	f'_c	E_c	f_t
HFA80	85.3	32.1	2.57
HFA50	55.6	26.4	2.57
HFA30	32.7	22.0	2.90
G50	55.8	31.3	3.57

f'_c : 圧縮強度(N/mm²)、 E_c 弾性係数(kN/mm²)、

f_t : 引張強度 : (N/mm²)

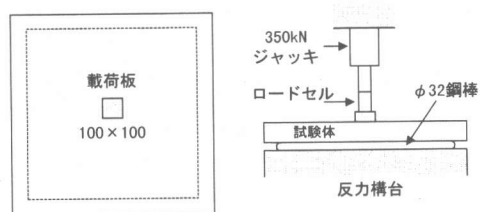


図-4 加力装置（押抜きせん断試験）

それに対し、case6 の破壊形態は斜め引張破壊であった。斜めひび割れ発生時までは case1 と同様であったが、その後、さらに変位を与えても、載荷重の上昇は見られなかった。

なお、case7、case9 試験体はせん断補強鉄筋を配置したため、斜めひび割れ発生時期が明確ではなかった。また、case7 試験体以外の主鉄筋ひずみは、降伏には至っていなかったことを確認している。

(2) 棒部材のせん断耐力算定式

表-3 にせん断耐力の算定値を合わせて示す。

また、実験値と算定値(V_{cd})との比較を図-6 に示す。

ここで、算定値は、土木学会コンクリート標準示方書²⁾の式を用いた。実験値との比較のため、材料係数 γ_m および部材係数 γ_b は1とした。また、算定式 V_{cd} は、斜めひび割れ時のせん断耐力に相当すると考え、算定値との比較には、せん断圧縮破壊をした供試体においても斜めひび割れ発生時の荷重の値を実験値として採用した。

この結果より以下のことが分かった。

- 1) 碎石骨材を用いた供試体の場合、実験値は算定値を上回るのに対し、HFA 骨材を用いた供試体の場合、実験値は算定値を下回る結果となった。(case2 と case8 の比較)

表-3 セン断耐力の実験値と算定値

	実験値			算定値						
	斜め ひび割れ 荷重 (A) (kN)	最大 荷重 (kN)	破壊 形態	$2V_{cd}$ (B)	$2V_{cd1}$ ($2 \times 0.7V_{cd}$) (C)	$2V_{sd}$	$2(V_{cd}+V_{sd})$	(A)/(B)	$2(V_{cd1}+V_{sd})$	(A)/(C)
case1	130	159	B	130	90	-	130	1.00	90	1.44
case2	133	211	B	154	108	-	154	0.86	108	1.23
case3	128	230	B	154	108	-	154	0.83	108	1.19
case4	211	235	A	312	218	-	312	0.68	218	0.97
case5	687	1685	B	854	598	-	854	0.80	598	1.15
case6	116	116	A	154	108	-	154	0.75	108	1.07
case7	不明確	391	B	154	108	70	224	—	178	—
case8	190	190	A	154	108	-	154	1.23	108	1.76
case9	不明確	330	B	154	108	70	224	—	178	—

破壊形態 斜め引張破壊：A セン断圧縮破壊：B

$$V_{cd} = \sqrt[3]{l/d} \cdot \sqrt[3]{100p_w} \cdot (1 + M_0/M_d) \cdot 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b, V_{cd1} = 0.7 \times V_{cd}, V_{sd} = A_w \cdot f_{wyd} \cdot d / 1.15 / s_s / \gamma_b$$

ここに、 V_{cd} ：せん断補強を行わない梁のせん断耐力、 V_{sd} ：せん断補強により受持たれるせん断耐力

d ：有効高さ、 p_w ：引張鉄筋比、 M_d ：設計曲げモーメント、 M_0 ：デコンプレッションモーメント

f'_{cd} ：コンクリートの圧縮強度、 b_w ：腹部の幅、 A_w ：区間 s_s 間のせん断補強鉄筋の面積

f_{wyd} ：せん断補強鉄筋の降伏強度、 s_s ：せん断補強鉄筋の配置間隔、 γ_b ：部材係数

- HFA 骨材を用いた供試体の場合、コンクリート強度が高い試験体ほど実験値が算定値を下回る割合が顕著であった。(case1,2,3 の比較)
- HFA 骨材を用いた供試体の場合、有効高さの違いによって実験値が算定値を下回る割合にばらつきはみられたが、有効高さの違いによる傾向は、確認できなかった。(case3,4,5 の比較)
- 示方書ではせん断スパン比の影響を考慮していないが、せん断スパン比を考慮している示方書のもとになる二羽式⁴⁾から求めた算定値(case2:195kN, case6:178kN)と実験値を比較した。その結果、せん断スパン比が3と4では、算定値と実験値の割合(case2:0.68, case6:0.65)は、ほぼ同等の値を示した。(case2,6 の比較)
- せん断補強筋を配置した供試体の場合、HFA 骨材を用いた供試体(case7)の最大荷重の値は、砕石骨材を用いた供試体(case9)の最大荷重の値およびその試験体の算定値($V_{cd}+V_{sd}$)より上回った。

以上の結果より、骨材の違いがせん断耐力に与える影響は、寸法効果の影響は小さく、強度の影響が大きいものと考えられる。つまり、普通骨材を用いたコンクリートの場合、せん断耐力は、圧縮強度の3乗根に比例するが、HFA 骨材ではそうなら

ない。これは、コンクリートの引張強度に起因するものと思われる。表-1 から HFA 骨材コンクリートの圧縮強度が増加しているのに対し、引張強度は、増加がみられない。また、砕石骨材を用いたコンクリートに比べ、2割程度引張強度が低い。そのため、HFA 骨材を用いた場合、せん断耐力式を低減する必要がある。

一方、示方書によると軽量骨材コンクリートの場合、 V_{cd} は通常のコンクリートの70%としてよいという記述がある。HFA 骨材も軽量骨材の一種である。この時の算定値(V_{cd1})と実験値の比較を図-7に示す。その結果、HFA 骨材の供試体の場合でも、実験値は、算定値を上回るかほぼ同等である結果が得られたため、HFA 骨材コンクリートのせん断耐力は V_{cd1} で評価できると考える。

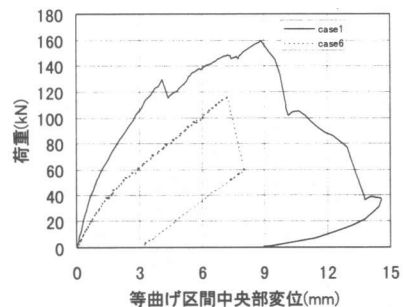


図-5 荷重-変位図 (case1, 6 試験体)

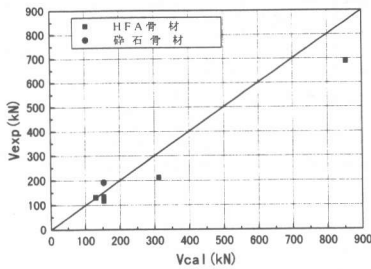


図-6 実験値と算定値(V_{cd})との比較

せん断補強筋を配置した供試体は、現行式で算定した算定値(V_{cd})よりも上回ったが、せん断補強筋を配置した供試体については、1体しか実験を行っていないことを考慮し、安全側の V_{cd} で評価する。

なお、せん断補強筋を配置した供試体は、斜めひび割れ発生荷重が明確でなかったため、図-6および図-7には示していない。

3.2 押抜きせん断試験

(1) 破壊性状

いずれの試験体も、曲げひび割れが発生・進展した後に、最大荷重点に達すると同時に載荷面の周辺からコーン状に押抜ける典型的な押抜きせん断破壊を示した。

図-8 に荷重と載荷点中央のたわみとの関係を示す。同図において、いずれの試験体の荷重変位関係も曲げひび割れ発生 (40kN 程度) 以降、最大荷重点 (押抜きせん断破壊) まではほぼ直線的に上昇しており、このことから曲げモーメントによる降伏線が十分に発達する前に押抜きせん断破壊が生じたことが伺える。ただし、いずれの試験体においても、載荷点直下の鉄筋は押抜きせん断破壊を生じる以前に降伏していたことを確認している。

HFA 骨材を用いた試験体について押抜きせん断破壊後の破壊面を観察したところ、強度の低い HFA30 では破壊面はモルタルと骨材の界面に沿って形成されているのに対して、高強度の HFA80 では骨材が割れ、破壊面が骨材を貫通していた。HFA50 の破壊面は HFA30 と HFA80 の中間的な状況であった。

HFA 骨材を用いた押抜きせん断耐力は、コンク

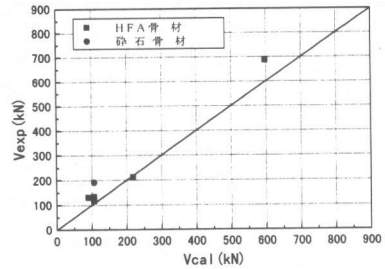


図-7 実験値と算定値(V_{cd1})との比較

リート強度の増加とともに大きくなった。しかし、圧縮強度を 80N/mm^2 とした場合 (HFA80) でも、圧縮強度が 55N/mm^2 の砕石コンクリートを用いた場合 (G50) と同程度の耐力しか得られなかった。また、圧縮強度が 55N/mm^2 程度で比較すると (HFA50 と G50)、HFA 骨材を用いた場合には砕石骨材を用いた場合の 85% 程度の耐力となった。

(2) 面部材の押抜き耐力算定式

表-4 に各試験体の押抜きせん断耐力の実験値とコンクリート標準示方書²⁾による算定値の一覧を示す。なお、実験値は各条件 2 体の試験体の平均値である。

コンクリート標準示方書による算定値は、いずれの試験体の場合も実験値を上回る結果となった。とくに強度が高い HFA50 と HFA80 ではその差が大きくなった。なお、コンクリート標準示方書の算定式では有効高さの影響を表す係数 β_d ($=\sqrt[3]{1/d}$) に上限値 (1.5) が設定されているが、表-4 中の値はこの上限値を無視しているため、砕石コンクリート (G50) の場合でも算定値が実験値を上回った。ちなみに、G50 において $\beta_d=1.5$

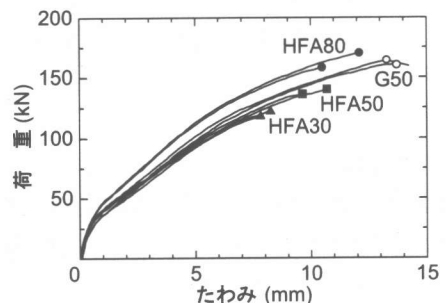


図-8 荷重変位曲線

表一4 押抜きせん断耐力の実験値と算定値

試験体	Pu (kN)	$\frac{Pu}{Pu_{HFA50}}$	JSCE1 (kN)	$\frac{JSCE1}{JSCE1_{HFA50}}$	JSCE2 (kN)	$\frac{JSCE2}{JSCE2_{HFA50}}$	$\frac{JSCE2}{JSCE1}$	$\frac{Pu}{JSCE2}$
HFA80	163.4	1.19	226.8	1.24	178.4	1.15	0.79	0.92
HFA50	137.5	1	183.1	1	154.7	1	0.85	0.89
HFA30	120.0	0.87	140.4	0.77	129.6	0.84	0.92	0.93
G50	162.3		183.4					

$$JSCE1 \text{ (現行式)} : = 0.2 \sqrt{f'_c} \sqrt[3]{1/d} \sqrt[3]{100p} \{1 + 1/(1 + 0.25u/d)\} u_p d$$

$$JSCE2 \text{ (提案式)} : = 0.33 \sqrt{f'_c} \sqrt[3]{1/d} \sqrt[3]{100p} \{1 + 1/(1 + 0.25u/d)\} u_p d$$

ここに、 f'_c :コンクリートの圧縮強度、 d :有効高さ、 p :鉄筋比、 u :載荷面の周長、 u_p :設計断面の周長

とした場合の算定値は実験値の85%程度となる。

HFA 骨材を用いた場合の押抜きせん断耐力の算定式を検討するに当たり、以下ではコンクリート強度の影響のみを考慮することとし、その他の影響因子（有効高さ、鉄筋、載荷面積）はすべて現行のコンクリート標準示方書と同じとした。なお、コンクリート標準示方書の算定式は圧縮強度が50N/mm²程度までを対象としたもので、高強度コンクリートには適用できないとされているが、高強度域まで拡張できるものとした。

圧縮強度55N/mm²のHFA50の耐力を基準とした場合のHFA30とHFA80の耐力比を実験値と示方書の算定値で比べると、実験値はコンクリート強度に対するせん断耐力の増加割合が小さくなっている。そこで、押抜きせん断耐力が圧縮強度の平方根に比例するとした現行式に対して、圧縮強度が30~80N/mm²のHFA 骨材コンクリートを対象として、押抜きせん断耐力が圧縮強度の3乗根に比例するとした式を提案する。なお、圧縮強度が55N/mm²の場合、HFA50の耐力はG50の85%であったことから、算定式中の定数を定めた。表一4に示す通り、いずれの試験体も実験値と提案式による算定値の比は0.9程度となり、碎石コンクリートの場合の実験値と現行式による算定値との比(0.88)と同程度となっている。

4. まとめ

HFA 骨材コンクリートのせん断特性を把握するために梁のせん断試験および押抜きせん断試験を行ない、以下のことがわかった。

1) HFA 骨材コンクリートのせん断補強鉄筋が配

置しない梁部材のせん断耐力は、同条件の碎石骨材の場合より小さい値を示した。ただし、現行のコンクリート標準示方書の算定式（軽量骨材用）と比較すると、実験値は算定値を上回るか同程度の結果が得られた。

2) HFA 骨材コンクリートの押抜きせん断耐力に関して、現行のコンクリート標準示方書の算定式に対する修正式を提案した。

謝辞

本研究は、(財)石炭利用総合センターの補助事業（被補助者：太平洋セメント（株））の一部であり、「高強度人工骨材コンクリート研究会」（会長：電源開発（株））の成果を取りまとめたものである。また、本文は高強度人工骨材コンクリート設計施工指針案を取りまとめている土木学会高強度人工骨材コンクリート調査研究小委員会に資料として提出された一部であり、ご助言をいただいた皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 石川、早川、笹原、安田：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材を用いた硬化コンクリートの性質、軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集、pp.17-22, 2000
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書平成8年制定
- 3) 角田、井藤、藤田：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、229号、pp.105-115, 1974
- 4) 二羽、山田、横沢、岡村：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、土木学会論文報告集、372号、pp.167-176, 1986