

# 論文 高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの破壊性状に関する研究

山本 知範\*1・矢島 哲司\*2・勝木 太\*3・平間 昭信\*4

**要旨**：資源の有効利用の観点から、石炭灰を主原料とした高強度フライアッシュ人工骨材が開発され、その実用化が試みられている。この種の骨材を用いる場合、コンクリートの破壊機構が通常のコンクリートと異なる可能性があり、コンクリート構造物の安全性を確保する上でも破壊機構を明確にする必要がある。そこで、本研究では高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートについて破壊機構の観点から圧縮強度、点載荷圧裂強度、破断面積率及びAEにより影響を比較検討した。

**キーワード**：高強度フライアッシュ人工骨材、破壊機構、点載荷試験、AE法

## 1. はじめに

近年、良質な骨材の枯渇が懸念されている。一方、石炭灰の発生量が将来とともに増加することが予想され、大量の石炭灰が埋立て処分の対象になっており、その有効利用の一つとして石炭灰を主原料とした高強度フライアッシュ人工骨材が開発された。この骨材を用いることにより産業廃棄物の有効利用の促進は地球環境の保護、資源のリサイクルといった観点から重要であり、骨材の品質を確認し多く使用されることが期待される。この骨材を用いたコンクリートの破壊特性について破壊エネルギーや引張軟化曲線といった破壊力学的特性については、既に幾つか報告されているが、本研究では破壊機構の観点から高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの破壊性状について比較検討を行った。

## 2. 高強度フライアッシュ人工骨材

高強度フライアッシュ人工骨材(以下HFA骨材と略す)はフライアッシュを主原料とし、人工的に造粒、焼成して製造した粗骨材であり、

球状粒、軽量(絶乾密度 $1.79\text{g/cm}^3$ )、また普通骨材と同程度に近い吸水率や強度などの特徴を有しているといわれている<sup>1)</sup>。

### 2.1 HFA骨材の強度評価

#### (1) 実験概要

非整形の岩石をほぼ最短距離にある2点で挟んで岩石の一軸圧縮強度を推定する点載荷試験により、コンクリートに及ぼす粗骨材の影響の評価としてHFA骨材自体の強度評価を行った。今回の実験では「岩の調査と試験」の平松ら<sup>2)</sup>の方法で引張強度 $St$ を求めた。これによると、点載荷法によって供試体は引張破壊で破壊され、その引張強度 $St$ は荷重 $F$ と骨材径 $d$ によって表されるとし、近似的に式(1)で算出される。

$$St = 0.9 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

なお、試験の個数は100個である。試料は5~20mmの粒径範囲の試料(HFA骨材, 碎石)について100~110°Cで定質量となるまで乾燥後、室温まで冷却してから試験を行った。

\*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

\*3 芝浦工業大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

\*4 飛鳥建設(株) 技術研究所 材料研究室 主任研究員 (正会員)

(2) 点載荷試験結果

試験結果を表-1, 引張強度の確率密度分布を図-1に示す。引張強度は HFA 骨材の方が小さい傾向を示しており, 砕石と比べると約 20% 程度強度が低下している。砕石の方が骨材自体の内部は緻密であり, 逆に HFA 骨材は多孔質であるため強度が小さくなったと考えられる。一方, 強度のばらつきに関しては HFA 骨材が砕石より均質なためばらつきが若干小さい結果となった。砕石においては骨材が完全球形ではないことによる荷重軸のズレおよび形状等もばらつきに影響したと考えられる。

表-1 試験結果

骨材種類	平均荷重距離 (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	砕石に対する引張強度比
HFA	15.7	9.3	37.6	0.77
砕石	13.3	12.1	41.2	1.00

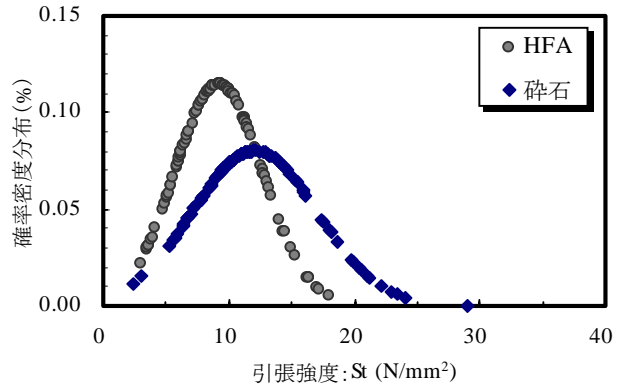


図-1 引張強度の確率密度分布

3. 実験概要

3.1 使用材料およびコンクリートの配合

実験に使用した材料を表-2に示す。また, コンクリートの配合を表-3に示す。すべての配合において単位水量 (165kg/m<sup>3</sup>) ならびに単位粗骨材絶対容積 (0.380m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) を一定とした。スランプおよび空気量は, 高性能 AE 減水剤ならびに AE 剤により調整し, 目標スランプを 12 ± 2cm, 空気量を 5.0 ± 1% とし, 水粉体比は 30,

35, 40, 60% の 4 水準とした。HFA 骨材コンクリートにおいては水粉体比 25% の配合も行い, 25, 35% においてはセメントの一部を高炉スラグ微粉末 (内割で 30%), シリカフューム (内割で 10%) を容積置換した配合 (記号; HFA35B, HFA25B) も行った。

供試体は, φ10×20cm 円柱供試体, 15×15×15cm 立法供試体を作製し標準養生を行った。

表-2 使用材料

使用材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3300cm <sup>2</sup> /g
細骨材	鬼怒川産陸砂	S	表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.34%, 粗粒率: 2.37
粗骨材	高強度フライアッシュ人工骨材	HFA	絶乾密度: 1.79g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 1.88g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 5.25%
	山口県美弥市産砕石	NA	絶乾密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.88%, 粗粒率: 6.64
混和材	高炉スラグ微粉末	Bs	密度: 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 6100cm <sup>2</sup> /g
	シリカフューム	SF	密度: 2.20g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 200000cm <sup>2</sup> /g
混和剤	高性能AE減水剤	SP	成分: ポリカルボン酸エーテル系
	AE剤	AE	成分: アルキルアリルスルホン酸系

表-3 コンクリートの配合

配合記号	骨材種類	Gmax (mm)	W/P (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	Bs	SF	S	G	
HFA60	HFA 骨材	20	60	46	165	275	—	—	—	828	711
HEA40			40	42		413	—	—	—	713	
HFA35			35	41		472	—	—	—	663	
HFA35B			35	39		300	137	35	—	635	
HFA30			30	38		550	—	—	—	601	
HFA25			25	35		660	—	—	—	504	
HFA25B			25	33		420	192	48	—	473	
NA60			砕石	20		60	46	275	—	—	
NA40	40	42			413	—	—	—	713		
NA35	35	41			472	—	—	—	663		
NA30	30	38			550	—	—	—	601		

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 圧縮強度および弾性係数

各種水粉体比における材齢 28 日の試験結果を表-4, 粉体水比と圧縮強度の関係を図-2 に示す。各コンクリートともに粉体水比と圧縮強度に比例関係が得られた。HFA 骨材コンクリートにおいても  $80\text{N/mm}^2$  程度まで強度の低下はみられなかったが、砕石コンクリートに比べ高強度領域において若干強度が低い傾向にあり、これは骨材との付着強度が砕石に比べ弱いためと考えられる。また HFA 骨材コンクリートにおいては粉体水比 2.9 (水粉体比 35%) の高炉スラグ微粉末, シリカフェームで置換した配合 (HFA 置換) では強度が増加している。これはマトリックス自体の強度が粒子の非常に細かい高炉スラグ微粉末やシリカフェームを混入することによって緻密化し、マトリックス強度および骨材との付着強度が大きく増進したものと考えられる。同様に置換した粉体水比 4.0 (水粉体比 25%) においては強度の差が殆どみられなかったのは、マトリックス強度と骨材の強度との差が少ないためと考えられる。

##### 4.2 点載荷圧裂強度

###### (1) 実験概要

本研究では、コンクリートにおいても点載荷圧裂試験を行い、立方法供試体において点載荷圧裂強度、破断面積を測定し破壊に及ぼす影響について検討を行った。点載荷圧裂試験においては、載荷方法による破壊の影響が少なく上下の載荷点による軸を中心とした任意の放射面のうち、弱部で破断する可能性をもつと考えられる。また、骨材破壊状況を把握するために、マイクロ스코プで微視観察を行い、付着破壊面積と骨材破壊面積を測定して比較検討した。

###### (2) 試験結果

点載荷圧裂強度は、岡ら<sup>3)</sup>の引張強度を求める提案式の  $k$  を 1.4 とした式(2)により求めた。

$$St = k \frac{2P}{\pi h^2} \quad (2)$$

$$k = 1.4$$

表-4 試験結果

種類	種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
HFA 骨材	HFA60	29.4	25.4	2.003
	HFA40	48.2	26.3	2.013
	HFA35	45.7	29.5	2.017
	HFA30	57.0	31.0	2.047
	HFA25	77.3	31.9	2.051
	HFA35B	62.0	29.6	1.996
	HFA25B	80.3	32.2	2.007
砕石	NA60	32.8	31.0	2.358
	NA40	53.6	37.7	2.399
	NA35	55.9	34.1	2.372
	NA30	64.4	38.5	2.364

※各種 3 本の平均値

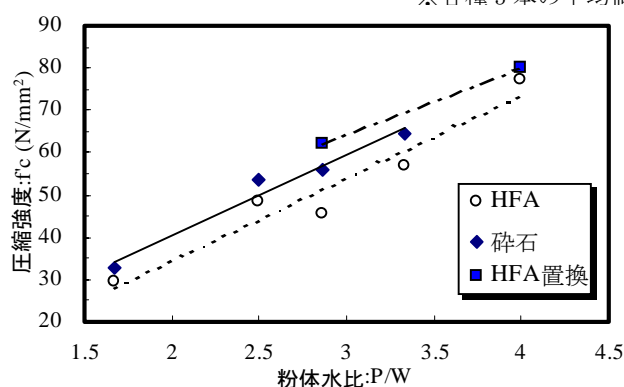


図-2 粉体水比と圧縮強度の関係

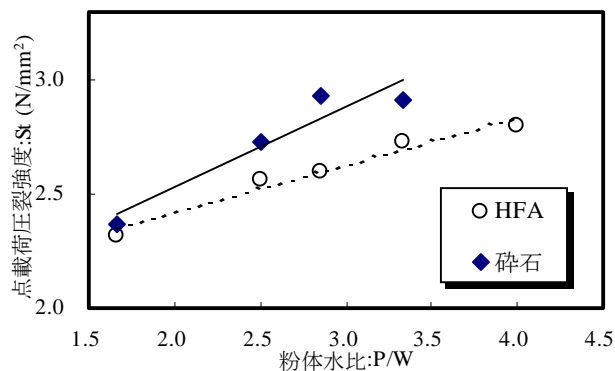


図-3 粉体水比と点載荷圧裂強度の関係

粉体水比と点載荷圧裂強度の関係を図-3 に示す。モルタル強度が比較的小さい粉体水比 1.5 (水粉体比 60%) においては、コンクリートの強度の差が小さい。粉体水比が大きくなると、モルタルの強度が大きくなり、骨材自体の影響により砕石よりも HFA 骨材コンクリートの強度が低くなったと考えられる。

###### (3) 破断面積の測定結果

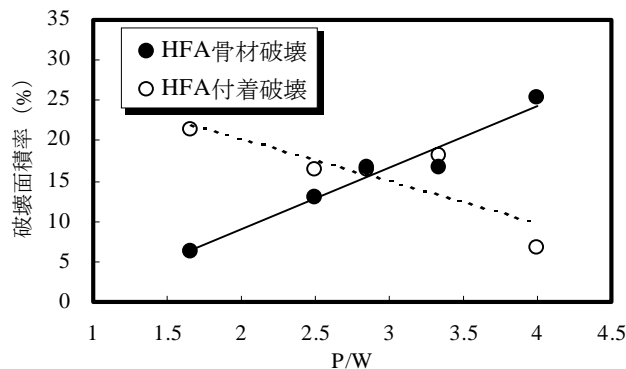
粉体水比 (P/W) と骨材の破壊面積率 (骨材の面積/コンクリートの全破断面積) の関係を図

— 4, 図— 5 に示す。粉体水比が大きくなると骨材破壊の割合が両者とも多くなっており, HFA 骨材コンクリートは粉体水比 1.5 (水粉体比 60%) において HFA 骨材の形状が球形であるため付着破壊が骨材破壊よりも多くなった。粉体水比 2.5, 2.9, 3.3 (水粉体比 40, 35, 30%) とマトリックスの強度が増加するにつれて, 骨材破壊面積が増加し, 付着破壊面積が減少している。圧縮強度が  $40\sim 60\text{N/mm}^2$  (粉体水比 2.5~3.3) の範囲においては, 両者がほぼ同一の面積を示した。粉体水比が 4.0 (水粉体比 25%) では 1.5 (水粉体比 60%) と異なり, 付着破壊面積と骨材破壊面積は逆転している。図— 5 の砕石コンクリートにおいては筆者らの予想に反し, 粉体水比 1.5 (水粉体比 60%) において骨材破壊の方が付着破壊に比べ大きくなった。これは, 砕石コンクリートは HFA 骨材コンクリートと比べてモルタル部で破壊しているために, 全体の破壊率 (全面積中骨材の面積の占める割合) が小さくなっている。また, 点載荷試験においては圧縮試験と異なり引張応力が集中することにより, 形状が角ばり, 付着が大きい砕石は, 結果として骨材破壊したと考えられるが, 今後さらに検討が必要であろう。

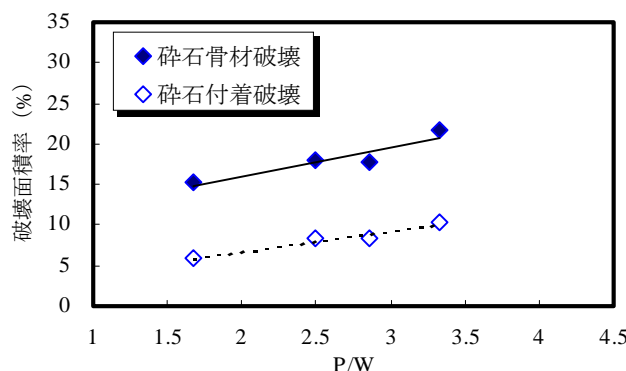
#### 4.3 骨材量の違いによる影響

コンクリートの破壊に及ぼす粗骨材の影響としてコンクリート中の HFA 骨材の粗骨材量を変化させた。ここでは, 3.1 における水粉体比 35% において, 砂セメント比を一定とし, 単位粗骨材絶対容積を 0.150, 0.300, 0.380,  $0.450\text{m}^3/\text{m}^3$  と変化させた 4 配合について圧縮強度, 弾性係数, 点載荷圧裂強度試験を行った。

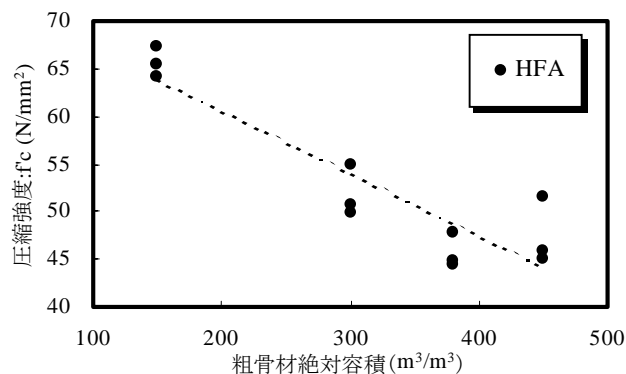
骨材容積と圧縮強度の関係を図— 6 に, 骨材容積と点載荷圧裂強度の関係を図— 7 に示す。圧縮強度は粗骨材量が多くなるにつれ低くなった。これは, 粗骨材量が多くなると骨材間の界面に応力が集中して強度が低くなったためと考えられる。点載荷圧裂強度は粗骨材量の多少にかかわらず, それほど大きい強度の差はみられ



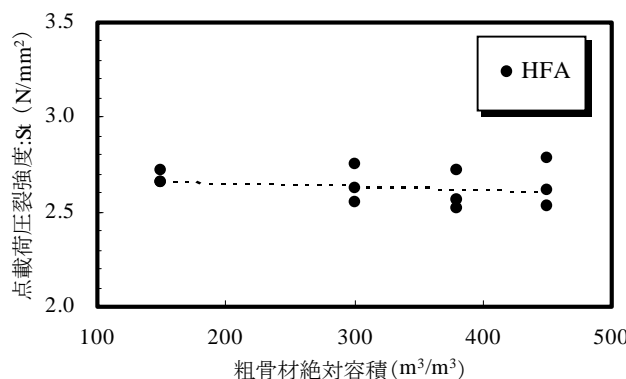
図— 4 粉体水比と破壊面積率 (HFA) の関係



図— 5 粉体水比と破壊面積率 (砕石) の関係



図— 6 コンクリート中の粗骨材量と圧縮強度の関係



図— 7 コンクリート中の粗骨材量と点載荷圧裂強度の関係

なかった。これは、図-2、図-3の比較と同様に点載荷圧裂強度は引張に依存しているためと考えられる。しかし、粗骨材量が多くなるにつれ強度のばらつきが大きくなっており、付着破壊、骨材破壊両方の影響ではないかと考えられる。

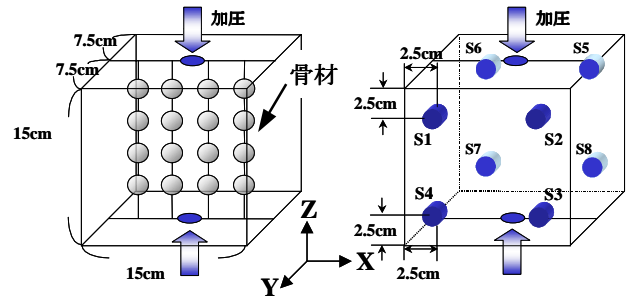


図-8 供試体

図-9 AE センサの配置

## 5. AEによるひび割れ進展過程の検証

### 5.1 実験概要

内部でのひび割れの発生位置の評価を行うために骨材を一面に配置したモデルを作製し、水セメント比の異なるモルタルを3水準(30, 40, 60%), 骨材を4種類(モルタル(骨材無し), HFA骨材, 砕石, 鋼球)とした12供試体の実験を行った。モルタルの配合は、3.1のコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルの容積比から決定した。流動性においては、フロー180±20mmとなるように高性能AE減水剤を添加した。実験に用いた供試体を図-8に示す。供試体は15×15×15cmの立方体供試体を用い、その中央一列に4×4個の骨材を配置し、その中にモルタルを流し込み点載荷試験によってAEの発生挙動について検討した。AEセンサの配置図を図-9に示す。共振型周波数60kHzのAEセンサ8個(S1~S8)を供試体に配置し、40dBのプリアンプを介してMISTRAS AE計測システムによりAEの発生挙動を計測した。試験結果を表-5に示す。

### 5.2 計測結果

一例として、水セメント比30%におけるモルタル、HFA骨材のX-Y断面のAE発生位置を図-10、図-11に示す。AE発生数に関しては、センサ配置の内側に位置標定されたAEイベントを評価対象とした。また、荷重の増加(最大荷重の0-30%, 30-70%, 70-90%, 90-100%)に伴うAE発生数の増加によって進展状況の評価した。X-Y断面によるAEの発生位置に関してはモルタル、HFA骨材とも載荷点付近から放射状にAEが発生しており、最大荷重の90-100%に

表-5 試験結果

W/C (%)	種類	点載荷圧裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性波伝播速度 (m/sec)
60	モルタル	1.95	3610
	HFA骨材	1.35	
	砕石	1.48	
	鋼球	1.62	
40	モルタル	2.47	3830
	HFA骨材	1.89	
	砕石	1.91	
30	モルタル	2.50	4098
	HFA骨材	2.21	
	砕石	2.38	
	鋼球	1.91	

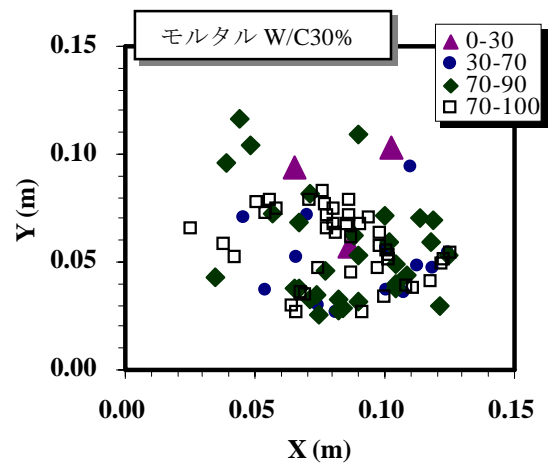


図-10 X-Y断面のAE発生位置(モルタル)

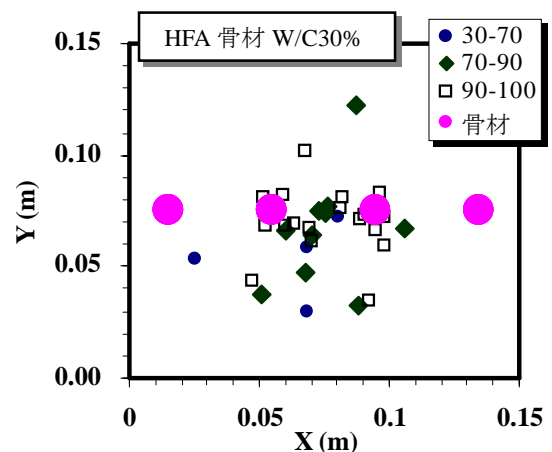


図-11 X-Y断面のAE発生位置(HFA)

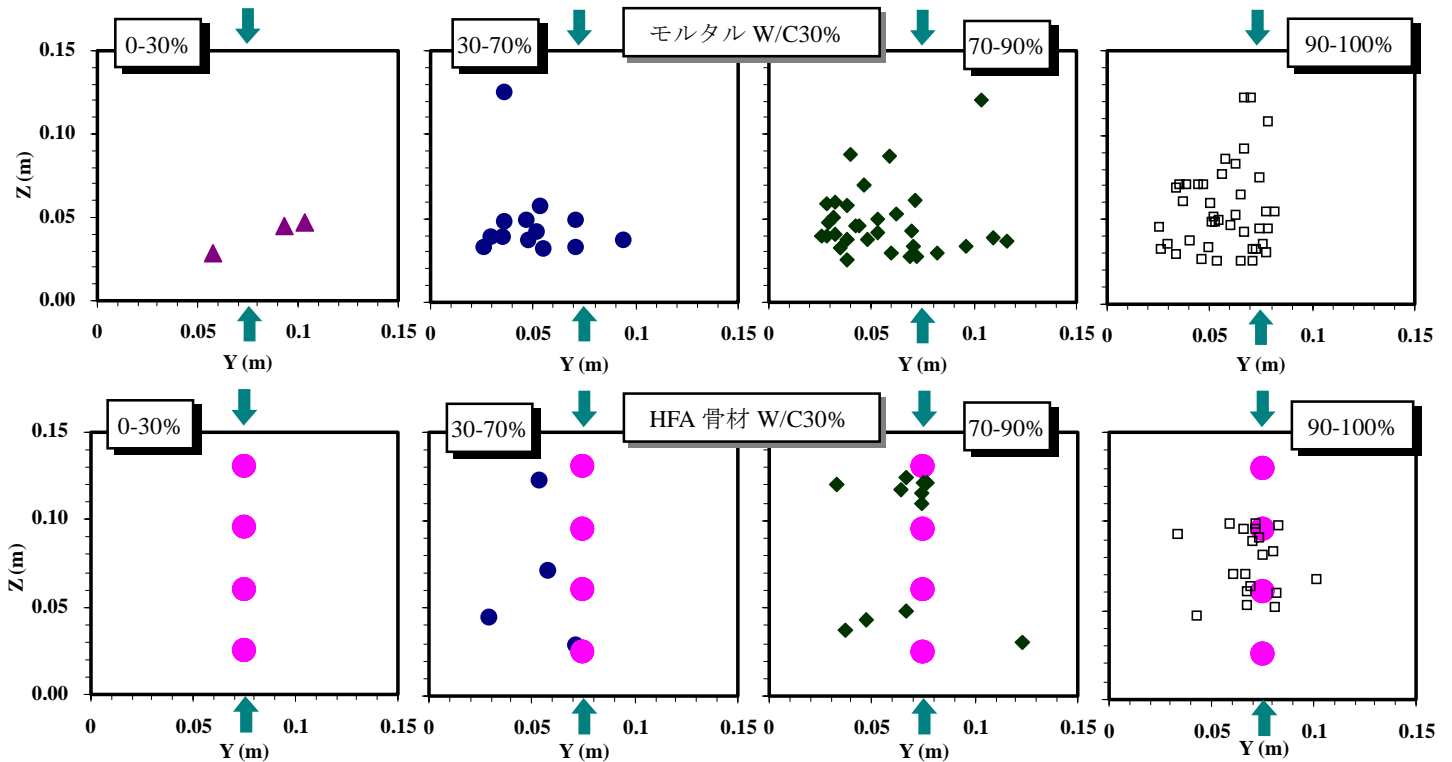


図-12 Y-Z断面のAE発生位置（上 モルタル，下 HFA）

においては中央部にAEが発生している。また、Y-Z断面の荷重段階におけるAEの発生位置を図-12に示す。荷重初期には荷重点近傍からAEが発生しているのが見られ、中心に向かってAEが発生している。最大荷重近傍で中心にAEが発生し最終的に破断したものと考えられる。また、HFA骨材においては、中央部にAEが集中していること、破断面が骨材面から破断していることから、モルタルと異なり、弱点部と考えられる骨材近傍で破壊したと考えられる。

## 6. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) HFA骨材コンクリートの圧縮強度においては、混和材等でマトリックスとの付着を高めると超高強度領域(80N/mm<sup>2</sup>)程度まで強度の増進がみられた。
- (2) HFA骨材コンクリートの点荷重圧裂強度、破壊面積の観察結果は、低強度領域ではマトリックスとの付着破壊を示し、粉体水比の増加に伴い骨材自体の破壊面積が大きくなり、

粉体水比4.0では粉体水比1.5と逆転した。

- (3) 点荷重試験により計測されたAE発生位置は、初期段階においていずれも荷重点近傍に応力が集中し、さらに荷重が大きくなるにつれ最大荷重近傍では中央部までAEが発生してくる。また、骨材が配置されていると骨材近傍にAEが集中して弱点部となり、コンクリートの破壊と関係すると考えられる。

**謝辞** 本研究にあたり、AEに関して測定および測定機械において、御指導を頂いた飛鳥建設(株) 津崎淳一氏、沼田淳紀氏、岩城圭介氏、中西康博氏、カワシマ計測工業(株) 安藤郁夫氏に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 曾根徳明：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材、コンクリート工学, Vol.36, No.12, pp.3-10, 1998.12
- 2) 平松良雄, 岡行俊, 木山：非整形試験片による岩石の引張強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, Vol.81, No.932, pp.1024-1030, 1965.12
- 3) 岡行俊, 木山英郎, 平松良雄：点荷重圧裂試験によるコンクリートの引張強度の決定, 材料学会誌, Vol.18, No.191, pp.70-76, 1969.8