

発泡ポリスチレンビーズを用いた超軽量 コンクリートの強度性状

松尾栄治¹・松下博通²・牧角龍憲³

¹正会員 工博 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒813 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

コンクリートの大幅な軽量化を図るために、比重が0.02以下である発泡ポリスチレンビーズを粗骨材とした超軽量コンクリートの乾燥収縮性状の評価と対策法を示し、超軽量域における圧縮強度を中心とした強度性状を把握し、さらに炭素繊維の短繊維を用いたモルタルマトリックス補強による強度改善効果と補強機構について論じた。

その結果、コンクリートの比重1.5~2.0程度の範囲では人工軽量細骨材の併用により、また比重1.2前後の超軽量域では短繊維補強により比強度的に有利な軽量コンクリートが得られた。また短繊維補強機構をモルタル強度との関係から考察した。

Key Words : *expanded polystyrene beads, compressive strength, specific gravity, artificial lightweight aggregate, carbon fiber reinforcement, volumetric strain*

1. まえがき

近年、土木建造物の大型化や、建設現場における省力化の促進などにより、コンクリートの軽量化のニーズはより一層顕著となっている。コンクリートの自重低減によって、構造物自体を軽量化する研究は過去数多くなされておき、構造用コンクリートに必要な強度を有する軽量骨材は人工軽量骨材によって実現されている^{1), 2)}。軽量骨材コンクリートは普通コンクリートと比較して、強度ならびに弾性係数が一般的に低下する。また、従来の軽量骨材コンクリートでは、比重が1.5~2.0前後の軽量化に留まっており、気泡コンクリートやポーラスコンクリートでは、比重1.0前後のコンクリートが実現されている。

しかし、一般に人工軽量骨材は、比重を軽減するために骨材粒の中に多量の気泡を含んでおり、通常はコンクリート中の水分が骨材の表面から浸透し、気泡の一部に吸水される。特に気泡核が連続している場合や、気泡径が大きい場合には多量の水分が吸水される³⁾。

また、近年その点を改善するために微細な独立気泡で構成される鉱物質の軽量骨材が開発されているが、その場合でも絶乾重量の5%程度を吸水する⁴⁾。

このように吸水率が大きい骨材を使用する場合、適

切なワーカビリティを確保するためには十分なプレウェットングが必要である。また気泡コンクリートでは気泡の均一な分散や、施工性の確保が困難であり、吸水作用も大きい⁵⁾ため、長期的に軽量化を保つことが難しい。

本研究では粗骨材として発泡ポリスチレンビーズ(発泡倍率50倍、以後EPSBと称す。)を用いて軽量化を図った。EPSBは比重が0.02程度であり、混入量によりコンクリート比重を変化させ得る。またEPSBの粒体中の約98%は空気であるが、表面が水を通しにくいスチロール樹脂で形成され、内部も微細な独立気泡で構成されているため、吸水量はほとんど皆無である。つまり従来の軽量骨材のようなプレウェットングによる水分管理が不要であり、長期間安定した軽量性を保つことができる⁶⁾。

また、EPSBはコンクリートの練混ぜ時に破碎することがなく、ビーズの特性をそのまま確保することができる。そのため、普通骨材と同様に骨材粒度を考慮した配合設計や練混ぜが可能であり、気泡コンクリートのように特殊な発泡剤やミキサを用いなくても、多量のEPSB(=気泡)をコンクリート中に均一に分散させることができる。

現実には土木分野において軽量盛土の材料、軟弱地

表-1 配合と材料分離

W/C (%)	ペースト体積比 (%)	増粘剤混入量	EPSB 粒径 (mm)	分離の程度
35	40	なし	6	○
40	40	なし	6	△
45	40	なし	6	×
40	30	なし	6	○
40	50	なし	6	×
40	40	標準量の1/2	6	○
40	40	標準量	6	○
40	40	なし	4.4	○
40	40	なし	4.8	△
40	40	なし	5.2	△
40	40	なし	5.6	△
○ : 分離を抑制 △ : やや分離 × : 分離傾向				

盤の地盤改良あるいは基礎工の支持材としてのEPSBの使用が実用化に至っており^{7),8)}、コンクリート分野においては緩衝材としての可能性についての研究もなされている。

EPSBコンクリートにおいては材料分離の問題が懸念されるところであるが、著者らの既に報告した研究結果⁹⁾によれば、実際にはハンドタンピング程度では分離はほとんど生じない。表-1は卓上パイプレータを5秒間加振させた場合の、独自の判定基準により判定した分離の程度である。増粘剤の使用は分離抑制には有効であり、表中の「やや分離」の配合でも、増粘剤の併用により分離は抑制できる。

また、一般に軽量コンクリートの乾燥収縮量は、普通コンクリートと比較して初期材齢において小さく、材齢の経過に伴って持続的に増大し、終局収縮ひずみでは普通コンクリートよりも大きくなる¹⁰⁾。このことは軽量骨材の保水特性によるところが大きいと考えられている。EPSBコンクリートでは、EPSBが極めて低強度かつ低弾性係数の材料であることより、収縮量は普通コンクリートよりかなり大きくなると予想される。またEPSBの非吸水特性から、収縮は初期材齢において大きくなると考えられる。

本研究は、EPSBコンクリートの圧縮強度及び乾燥収縮性状を中心とした諸物性について実験的検討を行ったものである。

2. 実験方法

(1) 実験概要

まず、EPSB混入率と乾燥収縮量の関係を実験的に求め、EPSBコンクリートの収縮量を普通コンクリートの

収縮量にまで低減することを目的に、収縮低減剤の混入率の影響等について調べた。その際、土中あるいは水中構造物としてのEPSBコンクリートのプレキャスト部材を想定し、乾燥期間は部材の作成後から運搬・施工時までの短期間を対象とした。その場合、普通コンクリートでは材齢30日における乾燥収縮ひずみは 800×10^{-6} であった。

コンクリートの軽量化手法については、比強度の大きいEPSBコンクリートが得られる配合選定を目的に、EPSB混入率による比重、圧縮強度、曲げ強度、静弾性係数の関係を明らかにした。すなわち軽量化の限界と強度低下の関係から効率的な軽量化を図りつつ、マトリックス強度とコンクリート強度の関係を中心にした強度物性について述べた。

さらに人工軽量骨材を使用した場合にも同様の手法を用いて、比強度的に有利な材料選定を行った。またマトリックス強度とコンクリート強度の関係を明らかにし、軽量化の限界や強度改善の可能性について論じた。比重と圧縮強度の目標値として、比重1.0、圧縮強度を10~15MPaと設定した。

またマトリックスの高強度化による比強度増進策として炭素繊維の短繊維補強に着目し、混入の可能性や、その強度改善効果及び補強機構について検討した。

短繊維補強については、引張補強や靱性向上に関する研究は活発に行われているが、圧縮強度の改善に関する報告や研究成果はほとんどない。これは圧縮強度の改善が比較的效果が小さいということが原因である。鋼繊維補強の場合では圧縮強度の改善報告の例はみられるものの、炭素繊維や他の繊維に関しては逆に強度や静弾性係数の低下が生じるという報告もある。

しかし、それらは普通コンクリートやモルタルが対象であり、EPSBコンクリートの場合は、その破壊メカニズムや破壊応力レベルがやや異なることから、その補強性状もまた異なったものになる。すなわち応力を受けるEPSBコンクリート内部には、普通コンクリートよりかなり低い応力レベルにおいて微細ひび割れが発生し、発生によって解放されるひずみエネルギーも、EPSBコンクリートの場合は小さいと考えられるため、圧縮応力下においても短繊維による補強効果が期待できる。

よって、EPSBコンクリートの圧縮強度に及ぼす繊維補強の影響を、その補強メカニズムを考えることで明らかにした。すなわち繊維混入率、水セメント比を変化させたときの繊維混入率と圧縮強度の関係等を把握し、応力ひずみ曲線から求めた臨界点¹¹⁾から、短繊維補強機構を明らかにした。

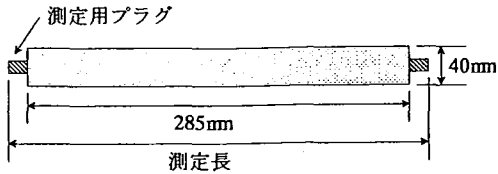


図-1 供試体寸法及び測定長

表-2 配合要因

	粗骨材種類	W/C (%)	S/C	V_g (%)	収縮低減剤混入率 (%)
①	EPSB	40	1.0	0	
②	EPSB	40	1.0	20	
③	EPSB	40	1.0	40	
④	EPSB	40	1.0	50	
⑤	EPSB	40	1.0	40	
⑥	普通骨材	40	1.0	40	
⑦	ESPB	40	1.0	40	4
⑧	EPSB	40	1.0	40	6

(2) 乾燥収縮試験

a) 使用材料

- ①収縮低減剤：標準使用量はセメント重量比の4%
- ②粗骨材：EPSB（平均粒径6.0mm，比重0.014）及び碎石（最大寸法15mm，表乾比重2.90）
- ③その他：普通ポルトランドセメント（比重3.15）及び海砂（表乾比重2.56，粗粒率2.74）

b) 練混ぜ方法

セメント，細骨材及び水をオムニミキサに投入して3分間練り混ぜ，EPSB（又は普通粗骨材）を投入して3分間練り混ぜた。他の試験においても同様とした。

c) 供試体

4×4×28.5cmの角柱3連型枠に詰めて24時間後脱型し，7日間水中養生を施した後乾燥を開始するとともに，この時点初期値として測定を開始した。測定長は，供試体の両端に取り付けたプラグの先端間距離とした（図-1参照）。保管条件は，温度20±2℃，湿度50±10%とした。

d) 配合要因

本実験における配合要因を表-2に示す。モルタルの配合は，水セメント比を40%，砂セメント比（重量）を1.0とした。またEPSB混入率 V_g を40%とし，収縮低減剤を無混入とした③⑤の配合を標準配合とした。

ここで V_g とはコンクリート中に占めるEPSBの割合を体積比で表したものであり， V_g が40%の場合は，モルタルがコンクリート中に約60%の体積を占めることになる。また普通骨材を使用した場合も，同様に V_g は粗骨材がコンクリート中に占める体積の割合を

表-3 シリーズIの配合条件一覧

配合	細骨材種類	W/C (%)	V_g (%)	s/c
1	シラスバルーンと海砂の混合砂	30	40	1.5
2		35		
3		40		
4		45		
5		50		
6		40		
7	30			
8	40			
9	50			
10	40	40	1.0	
11			1.5	
12			2.0	
13			2.5	
14			30	1.5
15	35			
16	40			
17	45			
18	50			
19	人工軽量細骨材A	40	0	1.5
20			5	
21			10	
22			20	
23			30	
24			40	
25	50			
26	海砂	40	30	1.5
27			35	
28			40	
29			45	
30			50	
31	40	40	0	1.5
32			5	
33			10	
34			20	
35			30	
36			40	
37			50	

表す。①～④ではEPSB混入率の違いを，⑤～⑥では粗骨材の種類による違いを，⑦～⑧では収縮低減剤混入率の違いを調べた。

(3) 強度試験

a) 使用材料

本実験では比強度を合理的に高めるために，EPSB以外にも汎用性の高い人工軽量骨材を使用した。

- ①人工軽量細骨材A：表乾比重1.98，粗粒率2.71
- ②シラスバルーン：粒径0.85～3.35mm（平均粒径1.6mm），表乾比重0.98，粗粒率3.72

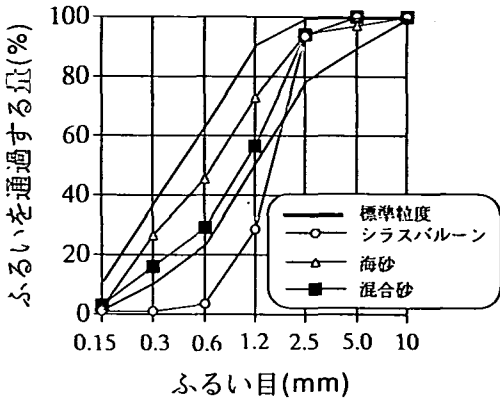


図-2 細骨材の粒度分布

表-4 シリーズIIの配合条件一覧

配合 No.	細骨材種類	粗骨材種類	W/C (%)	V_g (%)	S/C
1	海砂	EPSB	40	0	1.0
2				10	
3				20	
4				30	
5				40	
6				軽量骨材 F	
7	人工軽量細骨材 A	EPSB	40	0	1.0
8				10	
9				20	
10				30	
11				40	
12				軽量骨材 F	

③人工軽量粗骨材 F : 表乾比重1.67, 粗粒率6.57

④混和剤 : モルタルの流動性が不足する場合は, 高性能AE減水剤によりほぼ一定のスランプ値を得た.

b) シリーズ I

細骨材種類が強度へ及ぼす影響を検討するため, 水セメント比が40%, 砂セメント体積比が1.5, EPSB混入率 V_g が40%のモルタルを基本配合とし, 表-3のように各要因を変化させた. セメントは早強ポルトランドセメントを用い, 細骨材種類は, (A) シラスパルーンと海砂の混合砂, (B) 人工軽量細骨材A, (C) 海砂の3種類である. (A)は標準粒度内に収まるように, シラスパルーンの海砂に対する比を4:6(重量比, 図-2参照)とした. 供試体は $4 \times 4 \times 16$ cmの角柱である. 標準養生を施した後, 材齢3日にて強度試験を行った.

c) シリーズ II

このシリーズはEPSB混入率と静弾性係数の関係を中心に検討するものである.

普通ポルトランドセメント, 海砂及び人工軽量細骨材Aを用いW/Cを35%, S/Cを1.0(重量比)と一定にして, EPSB混入率 V_g を0, 10, 20, 30, 40%とした.

供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱で, 材齢1日で脱型, 標準養生を行い材齢7日, 28日で試験に供した. 測定項目は比重, 圧縮強度, 静弾性係数である.

(4) 短繊維補強

a) シリーズ III

①使用材料

早強ポルトランドセメントと人工軽量細骨材Aを用いた. EPSBの粒径は3~8mmである. 用いたCFは, 平均長が3mm, 繊維径18 μ m, 引張強度600MPaであり, 分散性を良好にするために予めCF中にシリカフュームが混合されたものである.

②配合

W/Cを50%, s/cを1.5(体積比)と一定にし, EPSBの混入率 V_g を0~50%の範囲で, CF混入率を0~3%の範囲で変化させた. 水中不分離性混和剤は常に標準使用量の1/4, 高性能AE減水剤はCF1%の混入につき0.005C(C:セメント重量)添加した.

③供試体

$4 \times 4 \times 16$ cmの角柱を作成し, 24時間後脱型して標準養生を施した後, 材齢3日にて圧縮試験, 曲げ試験を行った.

b) シリーズ IV

①使用材料

普通ポルトランドセメントと海砂を用いた. EPSBも粒径が4~6mmと前シリーズより平均粒径が小さいものである. CFは, 平均長さ25mm, 繊維径18 μ m, 引張強度800MPa, 引張弾性率 4.0×10^6 MPaである.

②配合

EPSB混入率 V_g を40%と一定にし, モルタルはW/Cを30, 40, 60%と3段階に変化させた. なお, S/C(重量比)は1.5であるが, W/Cが30%のモルタルの場合は流動性が不足するため, S/Cを1.0として他配合とほぼ同等のスランプ値を得た. 各々についてCFをモルタルに対する体積比で0~2%(外割り計算)混入させた.

③供試体

$\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体を作成し, 材齢1日で脱型後水中養生を施し, 材齢7, 28日にて圧縮試験に供した. 試験時には側面中央部分に2方向に30mmゲージを貼付し, 縦ひずみ, 横ひずみを測定した.

3. EPSBコンクリートの乾燥収縮性状

図-3に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す. EPSBコンクリートのひずみは, 普通骨材コンクリートに比べて2倍近く大きくなる. また収縮は乾燥材齢24時間以内の極めて初期段階に大きくなる. EPSB混入率 V_g に着

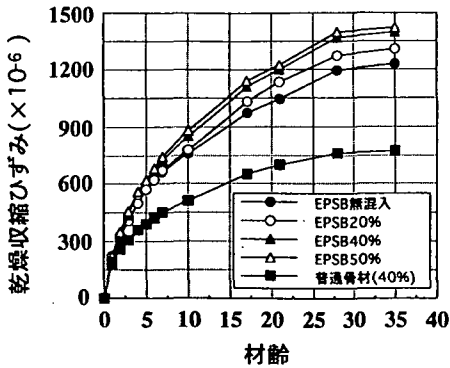


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

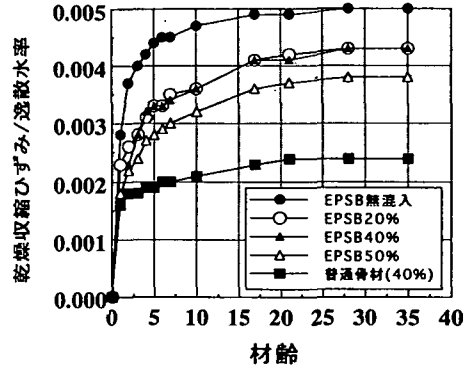


図-5 (乾燥収縮ひずみ/逸散水率)の経時変化

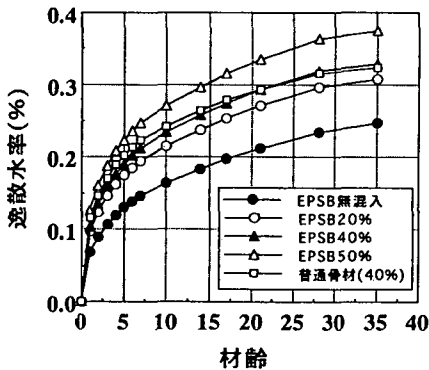


図-4 逸散水率の経時変化

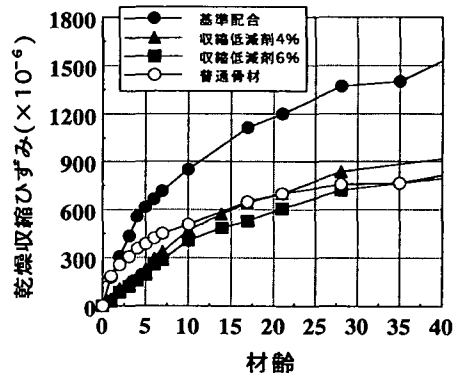


図-6 ひずみの経時変化 (収縮低減剤の影響)

目すると、その差は小さいものの明らかに0% (モルタル)、20%、40%、50%の順にひずみは大きくなる。

このようにEPSB混入率の増加にともなって収縮ひずみが大きくなることは、機械的抵抗が小さいこと以外にも何らかの収縮を促す原因があるためと考えられる。

そこで水分の逸散しやすさを比較するため、逸散水率 (=逸散水量/供試体中の全水量)の経時変化を図-4に示す。モルタルの逸散水率が最も小さく、モルタル体積比が少なくなるにつれて逸散水率は増加する。普通骨材コンクリート (粗骨材容積比は40%) と、 V_g が40%のコンクリートは、ほぼ同様の逸散水率を示し、骨材種類が逸散水率に及ぼす影響は小さい。

図-5は (収縮ひずみ/逸散水率)の経時変化である。すなわち単位逸散水率に対する収縮ひずみの大きさであり、供試体により単位水量等の配合条件が異なることの影響を除去して収縮抵抗力を比較するものである。

EPSBコンクリートは普通コンクリートには及ばないものの、モルタルと比較すると単位逸散水率に対する収縮ひずみを抑えている。またその抑制量もEPSB混入量に伴い増加する。すなわち、EPSBにも骨材自体の弾性係数が低い割には機械的抵抗力を有しており、EPSBコンクリートの収縮ひずみは、逸散水率が大きいこと

によると考えられる。

EPSBコンクリートにおいて逸散水率が大きくなる理由は、乾燥面積はいずれの供試体も 488cm^2 と一定であり、EPSB混入率が大きくなればモルタル体積に対する乾燥面の割合が大きくなるためと推察される。

図-6に収縮低減剤の効果を示す。収縮低減剤の働きで毛管水の界面張力が小さくなり、逸散水率は大きくなるものの、収縮ひずみは抑制される。

また標準使用量以上用いることで、収縮ひずみを普通骨材を用いたコンクリートと同程度 (材齢30日において 800×10^{-6} 前後) にまで抑制することができる。

4. EPSBコンクリートの強度性状

(1)EPSB混入率と比重

図-7~8にEPSB混入率 V_g と比重の関係を示す。いずれの場合も混入率に伴って比重は直線的に減少する。EPSB混入率が増加すると、EPSB表面に付着するモルタル量も増加し、空隙を充填する流動モルタルが不足する。その場合は高性能AE減水剤などの使用によりモルタルに流動性を付加させ付着モルタル厚を減じることで、ワーカビリティの良いコンクリートが得られる。

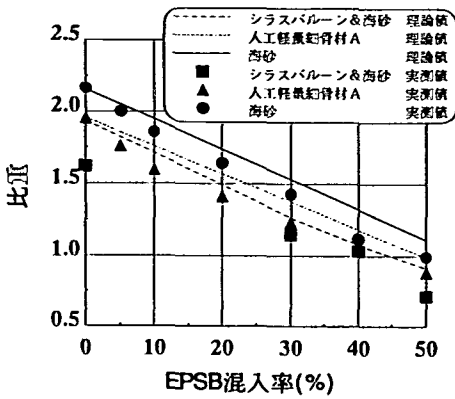


図-7 EPSB混入率と比重の関係：シリーズI
(W/C=40%, S/C=1.5 (体積比)
早強ポルトランドセメント，材齢3日)

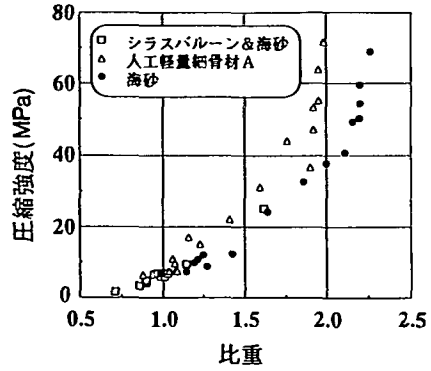


図-9 比重と圧縮強度の関係：シリーズI
(W/C=40%, S/C=1.5 (体積比)
早強ポルトランドセメント，材齢3日)

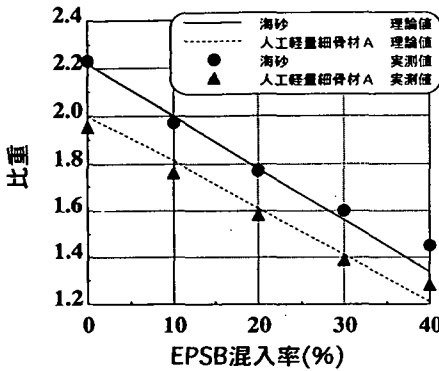


図-8 EPSB混入率と比重の関係：シリーズII
(W/C=35%, S/C=1.0 (重量比)
普通ポルトランドセメント，材齢7日)

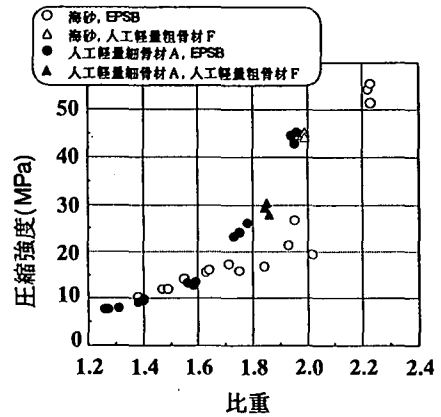


図-10 比重と圧縮強度の関係：シリーズII
(W/C=35%, S/C=1.0 (重量比)
普通ポルトランドセメント，材齢7日)

しかしその場合も限界があり，単一粒度の場合で V_g が約65%，混合粒度の場合も V_g が約70%になると流動モルタルが著しく不足する．すなわち軽量化の限界と考えられ，コンクリートの比重では0.8前後になる．

(2) 比重と圧縮・曲げ強度

図-9～10に比重と圧縮強度の関係を示す．圧縮強度の増加率は比重の増加率より大きくなり，細骨材種類では，海砂よりも人工軽量細骨材Aが比強度的に有利である．またその傾向は比重が大きい領域で強くなる．すなわちEPSB混入率が大きくなるにつれ，欠陥部としてのEPSBが強度への支配を強めていくと考えられる．シリーズIIでも同様な傾向がみられ，人工軽量細骨材の比強度的な有利さが確認できる．

(3) EPSB混入率と圧縮強度

図-11～12にシリーズI及びシリーズIIのEPSB混入率と圧縮強度の関係を示す．EPSB混入率と比重の関係とは異なり，凹型の曲線関係になる．このことは，EP

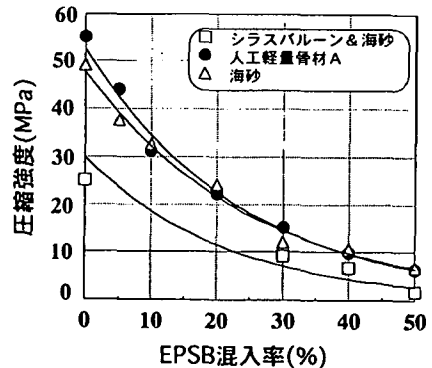


図-11 EPSB混入率と圧縮強度の関係：シリーズI
(W/C=40%, S/C=1.5 (体積比)
早強ポルトランドセメント，材齢3日)

SBをコンクリート内部の欠陥部とみなすとEPSB混入率の増加によって欠陥部が増加することになり，欠陥部

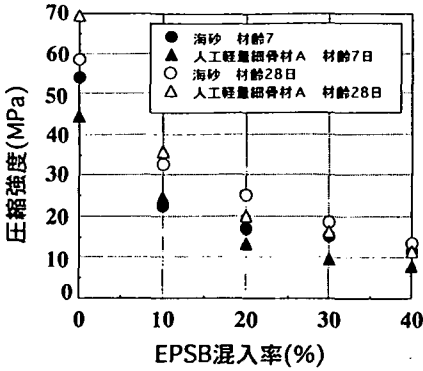


図-12 EPSB混入率と圧縮強度の関係：シリーズII (W/C=35%, S/C=1.0 (重量比) 普通ポルトランドセメント，材齢7日及び28日)

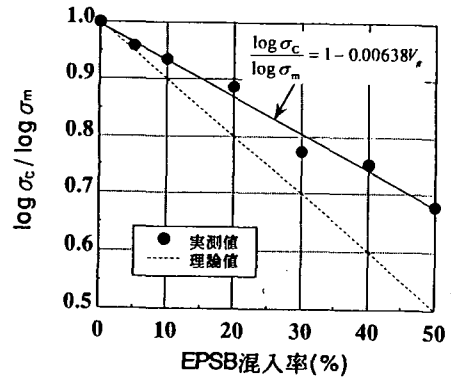


図-14 EPSB混入率と $\log \sigma_c / \log \sigma_m$ の関係：シリーズII (細骨材；海砂)

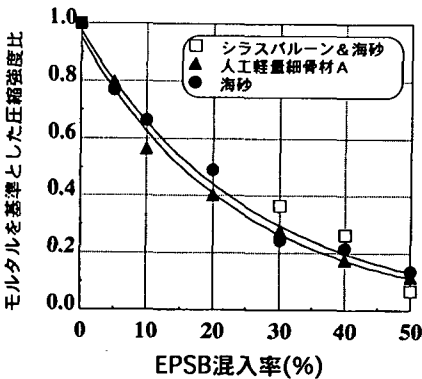


図-13 EPSB混入率と強度比の関係：シリーズI (W/C=40%, S/C=1.5 (体積比) 早強ポルトランドセメント，材齢3日)

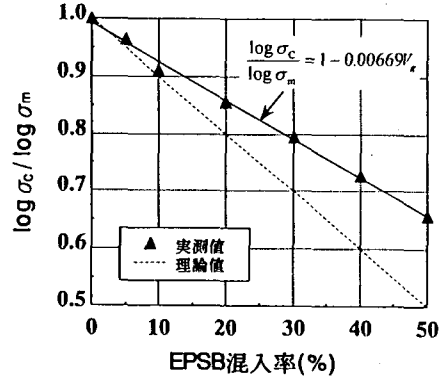


図-15 EPSB混入率と $\log \sigma_c / \log \sigma_m$ の関係：シリーズII (細骨材；人工軽量細骨材A)

間の平均距離が短くなる。その結果欠陥部から発生したクラックが伝播，連結しやすくなり強度低下を助長するためと考えられる。次にEPSB混入率 V_g と強度比の関係を図-13に示す。これは V_g が0%の圧縮強度を基準にした強度比である。 V_g と強度低下の関係は凹型の曲線関係であり， V_g が30~50%の間での強度変化は緩やかになる。 V_g と圧縮強度の関係が直線関係でないことは，単純に

$$\sigma_c = \sigma_m (1 - V_g) + \sigma_{EPSB} \cdot V_g \quad (1)$$

ここで

- σ_m : モルタルの圧縮強度 (MPa)
- σ_c : EPSBコンクリートの圧縮強度 (MPa)
- σ_{EPSB} : EPSBの圧縮強度 (ほぼ零, MPa)
- V_g : EPSB体積混入率

の関係式は成立しないことを意味している。

マトリックスより弱い骨材を用いたときの強度式としてBacheは次式¹²⁾を示している。

$$\sigma_c = \sigma_{EPSB}^{V_g} \cdot \sigma_m^{1-V_g} \quad (2)$$

$$\therefore \frac{\log \sigma_c}{\log \sigma_m} = V_g \left(\frac{\log \sigma_{EPSB}}{\log \sigma_m} - 1 \right) + 1 \quad (3)$$

ここで V_g と $(\log \sigma_c / \log \sigma_m)$ の関係を図-14~15に示す。これはほとんど直線関係を表しており，すなわち関係式 (2) は成立するといえる。

図中の計算値は $\sigma_{EPSB} = 0.1 \text{ MPa}$ ， $\sigma_c = 70 \text{ MPa}$ (表-7参照) から推定したものであるが，実測値はそれよりかなり大きくなっており，回帰式からは海砂の場合で $\sigma_{EPSB} = 0.94 \text{ MPa}$ ，人工軽量細骨材Aの場合で $\sigma_{EPSB} = 0.84 \text{ MPa}$ が得られる。

シリーズIで細骨材に人工軽量細骨材Aまたは海砂

表-5 シリーズIに用いたモルタルの強度

配合 No.	細骨材 種類	W/C (%)	V_g (%)	圧縮強度 (MPa)
1	人工軽量 細骨材A	30	0	71.8
2		35		63.9
3		40		53.3
4		45		47.3
5		50		36.5
6	海砂	30	0	68.8
7		35		59.5
8		40		54.3
9		45		50.2
10		50		40.5

表-6 直線回帰結果

	海砂		人工軽量細骨材A	
	$V_g = 0\%$	$V_g = 40\%$	$V_g = 0\%$	$V_g = 40\%$
A	19.6	3.4	25.8	7.4
B	4.0	0.09	-12.0	-8.8
r	0.98	0.90	0.98	0.93

を用いた場合について $V_g = 0, 40\%$ におけるC/Wと圧縮強度の関係を図-16~17に示す。またこれらを直線回帰した結果を表-6に示す。

普通コンクリートと同様にEPSBコンクリートもC/Wと圧縮強度は直線関係になる。その傾きは人工軽量細骨材Aを細骨材に用いた方が大きくなり、マトリックス強度を大きくする際の比強度増加率は海砂より期待できる。しかしマトリックス強度に対するEPSBコンクリート強度の割合はほぼ一定であり効率的ではない。よってEPSBコンクリートの比強度を上昇させるためにはマトリックス強度以外に体系の異なる複合材料的な工夫が必要と考えられる。

(4) 比重と静弾性係数及び算定複合体モデル

比重と強度が凹型の曲線関係になるのに対して、図-18のように静弾性係数は比重の増加に伴って直線的に増加する。ここではEPSB混入率と静弾性係数比の関係をモデル化することを検討した。

EPSBコンクリートを、EPSBと母材モルタルから成る二層複合材料と考えると、静弾性係数 E_c はEPSBと母材モルタルの静弾性係数 E_g 及び E_m 、ならびにEPSB混入率 V_g を用いて数式表示できる。その場合種々の複合体モデルが想定されるが、EPSBコンクリートの場合、図-19のモデル (Countoの提案モデル¹³⁾) による関係に近似している。図-20にモデル式(5)による理論値と実験値を比較するが、よい近似性が認められる。

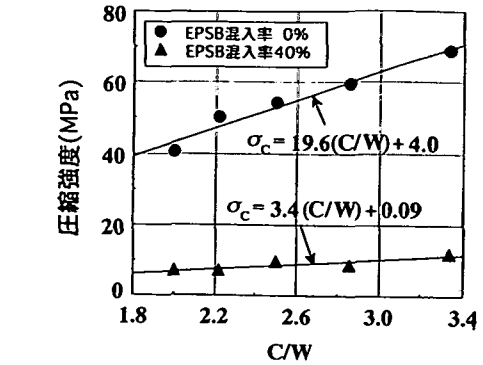


図-16 C/Wと圧縮強度の関係：シリーズII (細骨材；海砂)

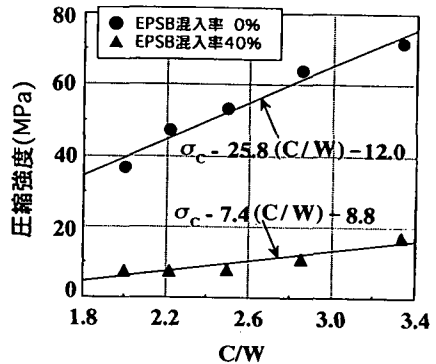


図-17 C/Wと圧縮強度の関係：シリーズII (細骨材；人工軽量細骨材A)

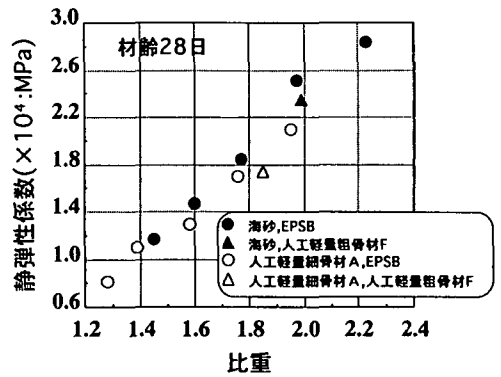
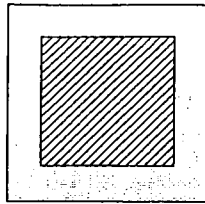


図-18 比重と静弾性係数の関係 (W/C=35%, S/C=1.0 (重量比) 普通ポルトランドセメント, 材齢28日)

$$E_c = 1 / \left[\left((1 - \sqrt{V_g}) / E_m + \sqrt{V_g} / \left\{ \sqrt{V_g} E_g + (1 - \sqrt{V_g}) E_m \right\} \right) \right]$$

$$\approx 1 / \left[\left((1 - \sqrt{V_g}) / E_m + \sqrt{V_g} / \left\{ (1 - \sqrt{V_g}) E_m \right\} \right) \right] \quad (5)$$





 EPSB
 モルタルマトリックス

図-19 複合体モデル図

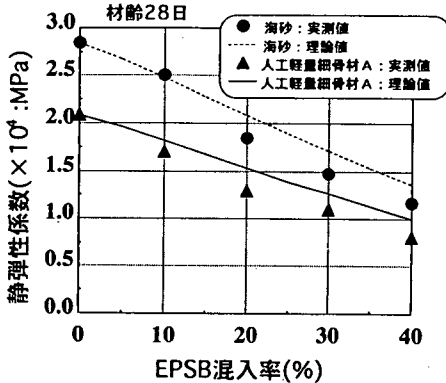


図-20 静弾性係数の理論値と実測値：シリーズII (W/C=35%, S/C=1.0 (重量比) 普通ポルトランドセメント, 材齢28日)

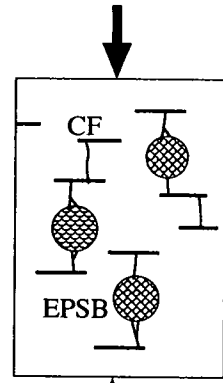


図-21 ひび割れモデル図

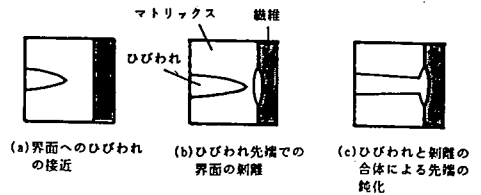


図-22 Cook-Gordon機構モデル図

5. EPSBコンクリートの短繊維補強

(1) 圧縮応力下における短繊維補強機構

EPSBのような低強度低弾性骨材を用いたコンクリートにおいては、かなり低い応力下でモルタルクラックが生じると想定し、そのような場合にはクラックの進展をCFで抑制することにより圧縮応力下においても強度増加が得られると考えられる。

モルタルマトリックス強度よりも骨材強度が弱く、骨材が球形の場合には、微細ひび割れは、最大圧縮応力方向と平行な角度の界面から発生する。

また、CFによるクラックアレスト効果はひび割れ応力や付着強度に影響されると考えられ、本研究ではCFによる補強機構には2つの効果があるとして、その性状を調べた。すなわち

①圧縮応力下においてEPSB界面から発生する微細ひび割れがまだ小数のうちに、それらが連結してモルタルクラックへと急成長しないように、CFの存在により微細ひび割れを分散させる。

つまり圧縮応力により蓄えられたひずみエネルギーが解放される際、それらを分散した多数の微細ひび割れが進展することによって吸収でき、微細ひび割れが

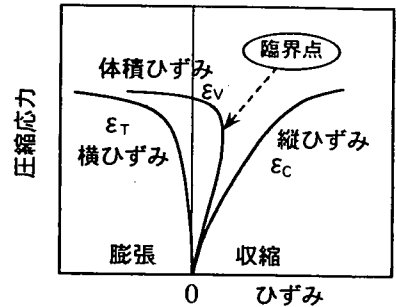


図-23 縦, 横, 体積ひずみ曲線

安定した状態で進展することができる。そのためモルタルクラックの発生を遅らせる効果（以下**微細ひび割れ分散効果**と称する。）

②発生したモルタルクラックの進展を、ひび割れ間のCFによる架橋的な抵抗や引き抜け抵抗によるエネルギーの消費によって妨げる効果（以下**モルタルクラック進展抑制効果**と称する。）の2つである。

このうち①の微細ひび割れ分散効果はCook-Gordon機構¹⁴⁾と呼ばれる概念によっても説明できる。すなわち図-21に示すように、EPSB界面から発生した微細ひび割れは、そのまま応力方向へ進展しようとする。

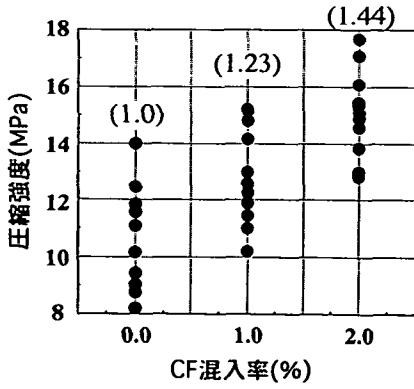


図-24 CF混入率と圧縮強度の関係
(W/C=40%, EPSB混入率40%, 材齢7日)

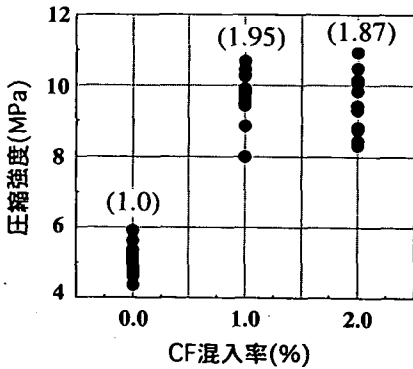


図-25 CF混入率と圧縮強度の関係
(W/C=60%, EPSB混入率40%, 材齢7日)

その前方に短繊維が存在するとマトリクス中のひび割れが繊維に到達する前に繊維とマトリクスの剥離が発生する。この剥離部分の空隙と進行してきたひび割れが合体し、結果的にひび割れ先端が鈍化する。同時にこの界面領域に沿ってひび割れが進行し擬脱着を生じるという機構である。

EPSBコンクリートの場合、欠陥部とみなせるEPSBが多数存在する。その場合、界面領域に沿う方向に新たな断面を形成するよりも、他のEPSB界面から最大圧縮応力方向にクラックを発生させる形でのエネルギー解放確率が高いと考えられる。このように短繊維の存在により微細ひび割れを断面全体に分散させるという概念を筆者らは考えている。

圧縮応力下のコンクリートにおいては荷重方向に微細ひび割れが発生し、応力の増大に伴ってその数と大きさが増大し、それらが連結してモルタルクラックへと成長する。その際、体積ひずみ ($\varepsilon_v = \varepsilon_c + 2\varepsilon_t$, ただし ε_c : 縦ひずみ, ε_t : 横ひずみ) が、収縮から膨張に転じる (図-23参照) とされている¹⁵⁾。そこで、

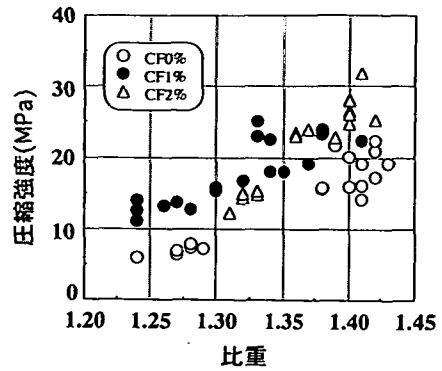


図-26 比重と圧縮強度の関係
(W/C=30~60%, S/C=1.0~1.5
EPSB混入率40%, 細骨材:海砂
普通ポルトランドセメント, 材齢28日)

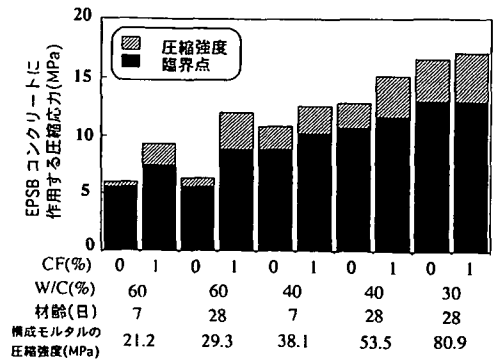


図-27 構成モルタルの圧縮強度とEPSBコンクリートの臨界点応力及び圧縮強度

その臨界点における応力ならびにその応力以降の挙動に着目した。

微細ひび割れ分散効果があれば臨界点応力が増大し、モルタルクラック抑制効果は臨界点から圧縮破壊までの強度の伸びを大きくすると考えられる。

(2) 結果及び考察

図-24~25にシリーズIVにおけるCF混入率と圧縮強度の関係の一例を示す。図示するように同一CF混入率でも、圧縮強度のばらつきは大きい。図中 () 内の数値は、CF無混入を基準とした平均値の強度比である。これらからもCF混入による圧縮強度の改善効果が認められる。ただし、CF2%については必ずしも加算的には増加していない。その原因は、今回の繊維混入量が、アスペクト比によって異なるとされる最適繊維混入率より過多であったため、CFの分散が不良となることによる影響であると考えられる。

図-26に比重と圧縮強度の関係を示す。これは、同一配合につき6本の供試体の平均値を示したものであ

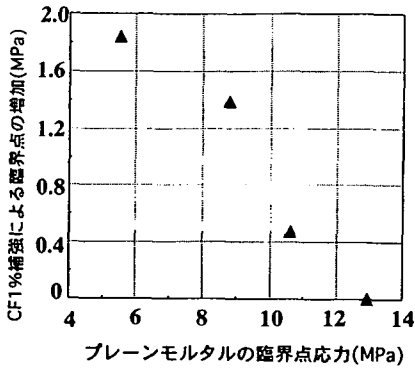


図-28 CF 1%混入による臨界点応力の上昇

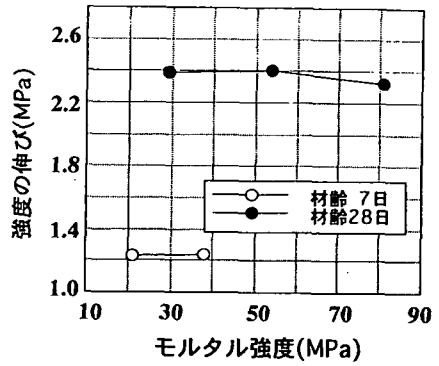


図-30 CF無混入のモルタル強度と Δf_{c-cr} の関係

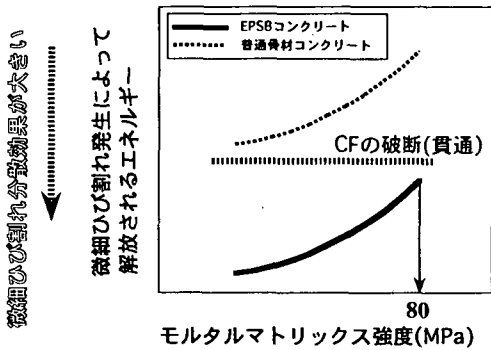


図-29 微細ひび割れ分散作用が効果的な範囲の概念図

り、比重の増大による強度増大の傾向は大きいものの、CFによる強度改善も確認できる。特に比重が小さい範囲における改善効果が著しく、同じ比重で約2倍の強度が得られている。

(3) 短繊維補強機構

CF混入と臨界点応力及び圧縮強度の関係を図-27に示す。この図から臨界点応力及び圧縮強度がCFの混入によって増加することが明らかである。また増加の程度は、モルタル強度により異なる。すなわちモルタル強度によって強度改善機構が異なることが考えられる。

まず微細ひび割れ分散効果について検討した。EPSBコンクリートの臨界点応力は、CFを1%混入することによって増加する。図-28は、その値を縦軸にとり、横軸にはCF無混入の場合の臨界点応力をとっている。この図から、臨界点応力が小さいほど、CFによる改善効果が大きくなることがわかる。

モルタル強度が大きい場合には、微細ひび割れの発生エネルギーも大きくなり、CFの存在によっても微細ひび割れは分散できずに、モルタルクラックへ進展してしまうものと思われる。また臨界点応力の改善量は、

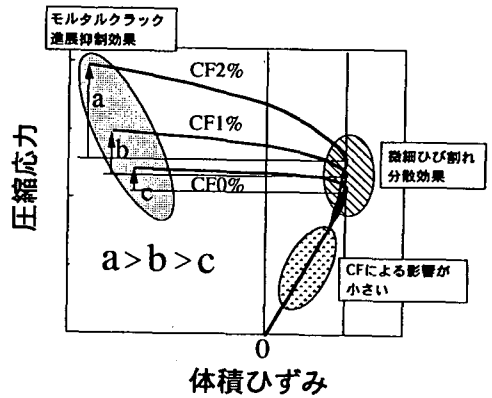


図-31 圧縮応力と体積ひずみの関係のモデル図

プレーンモルタルの臨界点応力の増加にともなって直線的に減少する傾向があり、図-28において(臨界点応力の増加量)が0となる(臨界点応力) = 12.9MPa ときのモルタル強度は約80MPaであった。

モルタルにおいて補強効果が小さい理由としては、臨界点応力や破壊時の強度がEPSBコンクリートと比較すると4~5倍と大きく、CFがこのような高応力状態で発生するひび割れを抑制するだけの強度を有していないことが考えられ、図-29のような概念図が描ける。

次に臨界点以降の補強効果について考察した。

圧縮強度から臨界点応力を差し引いた値を f_{c-cr} とする。CFを1%混入することによるこの値の増加量(Δf_{c-cr})について着目した。CF無混入の構成モルタル強度と(Δf_{c-cr})の関係を図-30に示す。モルタル強度の違いによる明確な傾向はみられないものの、CFによる強度改善が確認できる。またその改善量は、臨界点応力の伸びに比べてかなり大きいことから、CFによる補強は連続モルタルひび割れの進展を抑制する段階において特に有効であるといえる。また、ある程度のモルタル強度を有しておれば、モルタルクラック進

展抑制効果は発揮され、その効果はモルタルの圧縮強度よりも、材齢の経過によって大きくなる。

これは、モルタルとCFの付着力がモルタルクラック進展抑制には必要不可欠であり、その付着力とはCFがすり抜けずに破断する程度であることを意味する。

この機構は、曲げや引張破壊において、CFが破断せずに引き抜け抵抗することでひずみエネルギーを消費し、強度増加や靱性向上につながる性状を示すこととは異なっている。

CF混入による静弾性係数の変化には明確な傾向はみられなかった。

すなわち、弾性域の挙動に及ぼすCFの影響は小さく、臨界点以降においてCFの影響は大きくなる。つまり臨界点が上昇し、臨界点から破壊までの伸びも大きくなり、強度改善効果が発揮される(図-31)。

6. 結論

得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) EPSBコンクリートの乾燥収縮ひずみ量はEPSB混入率に伴い増加し、普通骨材コンクリートの1.6~2倍程度になる。
- (2) 収縮低減剤の使用により、乾燥収縮ひずみ量を普通コンクリート程度に抑えることが可能である。
- (3) EPSBコンクリートでは比重0.8程度の超軽量コンクリートの作成が可能となる。
- (4) EPSBコンクリートにおいては、細骨材にも人工軽量細骨材を用いることで比強度は大きくなるが、EPSB混入率を大きくなり軽量化が進むにつれて、細骨材種類が強度へ及ぼす影響は小さくなる。
- (5) EPSBコンクリートにおいては、比重が大きくなると圧縮強度は凹型の曲線関係で大きくなる。
- (6) 比重と静弾性係数は直線関係になり、Countoの提案した複合体モデルと良い近似性が認められる。
- (7) EPSBコンクリートのような超軽量低強度骨材コンクリートにおいて、短繊維補強は曲げ強度だけでなく

圧縮強度の改善にも大きな効果がある。またモルタル強度が小さいほどその効果は大きい。

(8) 補強機構には「微細ひび割れ分散効果」と「モルタルクラック進展抑制効果」があり、後者による強度改善効果は特に大きい。

参考文献

- 1) 橋 他：高品質人工軽量骨材の製造とその品質，土木学会第47回年次学術講演会，1992. 9.
- 2) 内藤 他：高品質人工軽量骨材を使用した高強度軽量コンクリート，土木学会第47回年次学術講演会，1992. 9.
- 3) 牧角：発泡ポリスチレンビーズを用いた軽量コンクリートの性状，セメント・コンクリート，No. 579，1995.
- 4) 米田俊一 他：低吸水性無機質軽量発泡体を用いた高強度軽量コンクリート，セメント・コンクリート，No. 506，1989.
- 5) 細田，大森，古谷：気泡セメント・モルタルの吸水特性，土木学会第47回年次学術講演会，1992. 9.
- 6) Bagon, C. and Yannas, S.F.: *Marine floating concrete made with polystyrene expanded beads*, Magazine of Concrete Research, Vol.28, No.97, 1976.
- 7) 森 範行 他：発泡ビーズ混合軽量土の現場強度，第28回土質工学研究発表会，1993.
- 8) 鈴木義英 他：発泡スチロール混合補強土の現場品質管理方法，土木学会第47回年次学術講演会，1992.
- 9) 松尾栄治，牧角龍憲，阪本好史：ポリスチレンビーズコンクリートにおける材料分離の抑制について，セメント・コンクリート論文集 No. 49，1995.
- 10) 近藤，坂 監修：コンクリート工学ハンドブック，p. 641，朝倉書店，1981.
- 11) 松下博通，牧角龍憲：一軸圧縮応力下におけるコンクリートの微細ひびわれの発生と伝播，九大工学集報第50巻第3号，pp. 169-176，1977.
- 12) Bache, H.H.: Proc. RILEM Int'l Symp. *Testing and Design Methods of Lightweight Aggregate Concretes*, Budapest, 1967. 9.
- 13) 近藤，坂 監修：コンクリート工学ハンドブック，p. 467，朝倉書店，1981.
- 14) 五十嵐心一：繊維補強セメント系複合材料における界面領域の組織と付着機構に関する研究，pp. 41-42，京都大学博士論文，1993. 8.
- 15) コンクリートひび割れ対策研究会：コンクリートひび割れ資料集，p. 7，経営開発センター出版部，1977.

(1996. 5. 22 受付)

PROPERTY OF SUPER LIGHTWEIGHT CONCRETE USING EXPANDED POLYSTYRENE BEADS AS COARSE AGGREGATE

Eiji MATSUO, Hiromichi MATSUSHITA and Tatsunori MAKIZUMI

In regard to expanded polystyrene beads concrete, that is able to reduce the specific gravity of concrete evidently, this paper describes the evaluation and the countermeasure of the property of drying shrinkage, the strength property in super lightweight area, the effects and the mechanism of the compressive strength improvement by chopped carbon fiber (CF) reinforcement.

As the results, it is effective in lightweight area, that the specific gravity of concrete of 1.5~2.0, to use the artificial lightweight fine aggregate, and it is effective in super lightweight area, specific gravity of under 1.2, to reinforce the mortar matrix by the CF.