

高性能セメント系複合材料の 材料設計手法開発に関する基礎的研究

(研究課題番号 09650616)

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))
研究成果報告書

平成11年3月

研究代表者 三橋 博三
(東北大学工学研究科教授)

東北大学図書



00010175614

附属図書館

第1章 序論

近年、建築を構成する材料は、より一層の軽量化、高強度化そして高靱性化が求められている。中でもコンクリートは、その資源が豊富であり、従って比較的安価に、しかもどこにでも容易に供給されうるものである。さらには、種々の素材と複合することが容易であり、今後の新素材の開発に伴い新しい性能を有するコンクリートの開発の期待が高まっている。従って、コンクリートにそのような3つの性能を兼ね備えることが出来るのであれば、経済的にも有利になることは言うまでもない。

本研究は、セメント系複合材料の軽量化、高強度化そして高靱性化に着目し、それらの性能を兼ね備え得るような材料の条件、それらの適切な組み合わせの条件及び有効な作製プロセス等を実験的に検討するものである。更にマイクロメカニクス的に考察を重ね、そのような性能を有する材料の開発並びに設計方法の検討を目的としたものである。

第2章 セメント系複合材料の高性能化及び材料設計の現状と課題

2.1 序

本章の第2節から第4節までは、それぞれセメント系複合材料の軽量化、高強度化そして高靱性化に関する知見や実験的研究成果についてまとめると共に、抱える問題点について整理した。第5節では、セメント系複合材料の材料設計的な考え方及びその現状を示した。

2.2 セメント系複合材料の軽量化

2.2.1 軽量コンクリートの種類

一般に、材料の軽量化を図る方法として、密度の小さい素材を用いる方法、もしくは空隙を取り込んだ内部構造にする方法等が考えられる。現在、軽量なセメント系複合材料として挙げられるものには、セメントペースト中に細かな気泡を混入して作製された気泡コンクリート、軽量骨材を混入した軽量コンクリート、もしくは、それらを複合したコンクリート等がある。

気泡コンクリートの代表的なものの一つとしてALC(Autoclaved Lig Concrete)が挙げられる。これは、石灰質原料（例えば、石灰、ポルトランドセメント、高炉セメント等）とけい酸質原料（例えば、けい砂、けい石、高炉スラグなど）を主原料とし、発泡剤として金属アルミ粉末が用いられ、さらに、水熱反応によって強固なトバモライトを生成させるために180℃、10気圧という高温高压養生を施して製造される。ALCの絶乾比重は0.5、圧縮強度は40kgf/cm²、曲げ強度は10kgf/cm²と、普通コンクリートに比べると非常に軽いものではあるが、強度はかなり低い。しかし、鉄筋と組み合わせることにより、断熱性の優れたパネルとして床材や壁材として利用されている。しかしながら、構造用材料として用いられることは稀である。

一方、軽量骨材を用いた軽量コンクリートは、ALCに比べ強度が高く構造用材料としても用いられる。ただし、その性能は軽量骨材の物性に大きく依存することが知られている。軽量骨材は、JIS A 5002（構造用軽量コンクリート骨材）によって軽量骨材の種類を分類しているが、高い強度を必要とする場合には、品質、強度などの点で優れている人工軽量骨材や副産軽量骨材（工業副産物を示し、膨張スラグや膨張ガラスがこれに相当する）が用いられている。

2.2.2 軽量コンクリートの力学的特性と高強度化

軽量コンクリートの力学的特性や高強度化については、これまでも様々な研究がなされているが、いずれの研究においても、大凡軽量粗骨材とマトリックスの強度は同程度である方が好ましいという意見は一致しているようである。つまり、これは普通コンクリートの場合には、マトリックスと骨材の付着が十分であれば、マトリックスより強度の高い骨材が応力を負担し、最終的に骨材とマトリックスの境界でボンドひび割れが発生し、そして伝播することで破壊に至る。一方、軽量コンクリートの場合には、軽量骨材の強度と剛性はマトリッ

クスのそれよりも低く、従って、骨材とマトリックスとの境界付近での剛性の違いがマトリックスに応力の集中を引き起こし、マトリックスの局所的な引張破壊が、また、十分な付着を有していれば骨材の割裂引張破壊が生じる。その結果、強度の低下や脆性的な破壊を引き起こすこととなる。

以上のことから、一般に軽量コンクリートの強度を高くするためには、なるべく強度の高い軽量骨材を用いる必要があることが理解できる。そのための一つの方法として、人工軽量骨材の造粒、焼成という過程において、骨材内部にできるかぎり細かい気泡を取り込む製造技術が求められる。実際に、内藤等⁷⁾や大森等⁸⁾は、抗火石（多孔質黒雲母流紋岩）微粉末を焼成して作製される人工軽量骨材の内部構造をより緻密にすることで、比重1.4で圧縮強度が350kgf/cm²を越えるコンクリートの作製を可能とした。また、他にも骨材とマトリックスの境界付近での応力集中を緩和する方法として、1)軽量骨材の外郭に硬質の皮膜を成形させる、2)微細かつ硬質な中空体を用いる、3)繊維によりひび割れ進展を抑制する、などが考えられよう。

2.3 セメント系複合材料の高強度化

セメント系複合材料の高強度化における方法については、大濱⁹⁾によりまとめられている（図2.1）。この図からも分かるように、要するに内部構造をできるだけ緻密な構造にすることがセメント系複合材料の高強度化には必要不可欠となる。例えば、Roy等¹⁰⁾はホットプレス成形により、圧縮強度が約665MPaという結果を実現し、その空隙率も非常に小さいことを明らかにした。しかし、内部構造を出来るだけ緻密にして高強度化を促した場合、その破壊挙動はより脆性的になることが知られている¹¹⁾。

先述したように、軽量化にはどれだけ気泡もしくは空隙を内部に取り込むかが重要となる。従って、セメント系複合材料に高強度と軽量双方を同時に満足させることは、相矛盾した要求であることが分かる。

2.4 セメント系複合材料の高靱性化

2.4.1 高靱性化の機構

軽量化及び高強度化を実現した場合には、その材料の脆性化が顕著になる。つまり、ひび割れ先端近傍に形成される破壊進行領域（fracture process zone）の小さいことがその要因として挙げられる。従って、靱性を高めるにはひび割れ先端近傍に如何に大きな破壊進行領域を形成させるかということが問題となる。三橋¹²⁾は、セメント系複合材料の破壊靱性向上のメカニズムとして主に3つの機構を挙げている（図2.2）。(a)は、クラックアレスト効果と言い、ひび割れの進展を骨材などの介在物が阻止する、もしくはひび割れの進展する道筋をジグザクにすることによってひび割れ伝播のエネルギー吸収の増大を狙ったものである。これに関しては、三橋等¹³⁾は、種々の寸法の骨材を用いたコンクリートの破断面を画像解析により

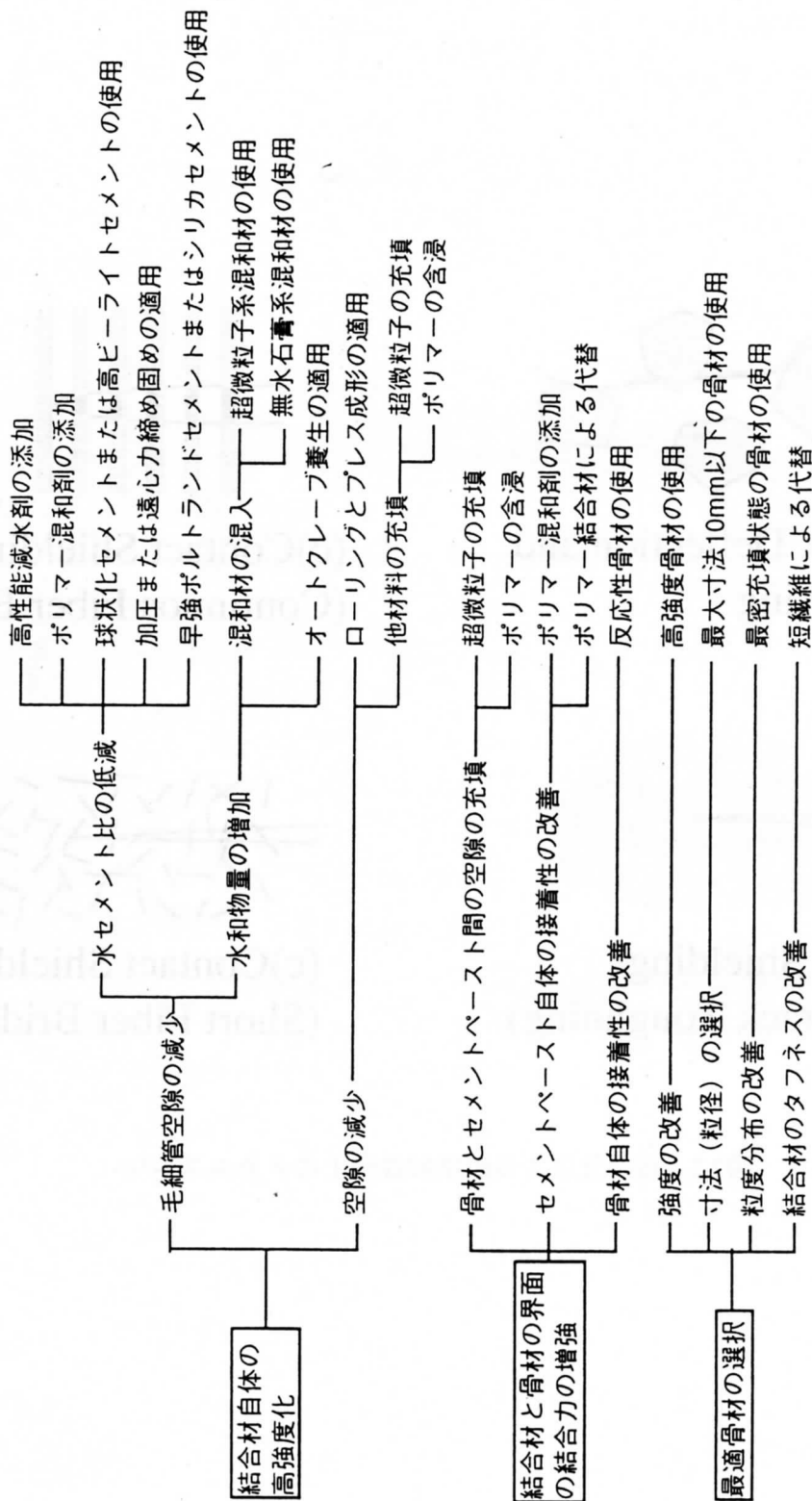
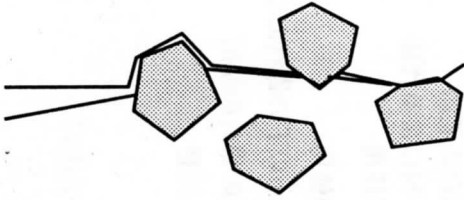
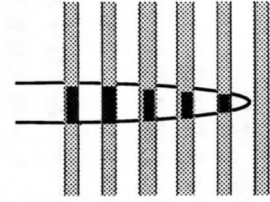


図2.1 セメント系複合材料の高強度化に関する幾つかの手法⁹⁾

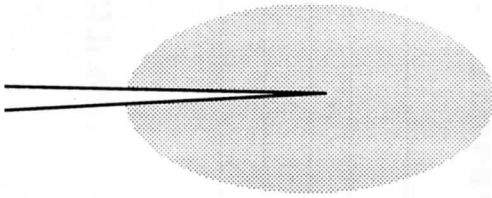
図2.1 セメント系複合材料の高強度化⁹⁾



(a) Crack Deflection and Meandering



(c) Contact Shielding
(Continuous Fiber Bridging)



(b) Zone Shielding
(Microcrack Toughening)



(c) Contact Shielding
(Short Fiber Bridging)

図2.2 複合化による破壊靱性向上のメカニズム¹²⁾

定量的に解析評価し、破断面の起伏が激しい程高い破壊エネルギーを示す傾向にあることを明らかにしている。(b)は、微細なひび割れを分散混入させることによって応力の集中を緩和させようというものであるが、高強度化を目的とする場合には、この微細ひび割れは必ずしも有利にはならないものと考えられる。(c)は、ひび割れの進展を繊維によって抑制しようとするものである。以上挙げた3つの機構の中で、高強度化をも考慮して最も効果的に靱性を増加させるには、繊維を混入させることが適切であると考えられる。

2.4.2 靱性の評価方法

軽量は単位容積質量により、また、強度特性は、圧縮載荷試験もしくは割裂引張、曲げ試験など共通した試験方法によってその性能が明確に表されるので、要求に合った性能であるかどうかの判断が容易に行える。一方、靱性に関する性能評価については、ACI¹⁴⁾、JCI¹⁵⁾、ASTM¹⁶⁾等で種々の試験方法が提案されている。また、靱性とは弾性時に蓄えられた歪みエネルギーがひび割れ進展によってどのような機構で解放されるのかという破壊力学からの視点に立って提案された靱性指標も幾つかある^{17)~22)}。

しかし、今現在靱性に関する様々な指標がこのように多数存在することからも、靱性を適切に評価するパラメータは未だ明確に確立されてはいないということも出来る。しかし、破壊力学の今後の進展によって、より合理的な破壊力学パラメータが材料としての特性評価に取り入れられ、さらには構造設計に取り入れられることが期待される。

2.4.3 繊維補強セメント系複合材料の適用と問題点

繊維補強複合材料としては、プラスチックをマトリックスとするFRP (Fiber Reinforced Plastic) が代表的であり、主に航空材料の分野で多く利用されている²³⁾。一方、セメント系複合材料への繊維の混入は、土木分野ではトンネルのライニング、山の法面、広い土間などに多用されてきた。建築分野では構造部材に用いられることはなく、主にプレキャストとしてのパネル材に用いられる程度でその適用はそれほど多くない。これは、建築部材では部材寸法が比較的小さく、また鉄筋が多く配筋されているため、繊維が混入された場合にはワーカビリティが悪くなることから締め固めに多大な労力が課せられ、また、繊維の補強効果もまだ定量的に把握されていないこと、さらに、高分子繊維を用いた場合には耐火性の問題も考慮しなければならないためである。しかし、最近では、不燃の高分子繊維も開発されるようになってきたり、コンクリートの内部に取り込むのではなく、カーボンシートを柱回りや梁の下面に接着させることで補修もしくは一層の抵抗力を保持させようという方法が実用化されている。今後、建築の分野でも繊維との複合化は益々盛んになると思われる。

問題点を整理すると、以下のようなだろう。

1) 繊維が混入されることでワーカビリティが低下し、その結果、練り混ぜ、打ち込み並びに成形が難しくなる。

- 2) 繊維の分散が適当であるかどうかの確認が難しく、また、巻き込み空気の増大も懸念され品質の管理が難しい。
- 3) 繊維の種類が多く、それぞれに異なった力学的特性を示すことから、コストだけではなく性能を見込んだ繊維の選択が難しい。
- 4) 力学的特性もしくはひび割れ抵抗性能の定量的な予測がまだ不完全であり、膨大な実験による検討が必要である。

2.4.4 これからの繊維補強セメント系複合材料

繊維を混入することによるワーカビリティの低下は、非常に重要な問題である。しかし、繊維の混入が多ければ多いほどそのひび割れに対する抵抗力が増大する傾向があることも確かである。施工性を重視して繊維の混入を出来る限り少なくし、かつ繊維の補強効果を最大限発揮させるには、やはり、マイクロメカニクスを考慮した理論を十分理解して必要なパラメータを算出し、そして必要な特性を備えた材料の用意をする必要がある。また、その一方で適切な寸法や形状を提供できるような繊維メーカー側の努力も求められている。

逆に、SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete)²⁴⁾やSIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete)²⁴⁾のように繊維混入によるワーカビリティの低下を作製プロセスの工夫によってカバーし、非常に性能の高い製品を開発することも有効である。ただし繊維を混入したことによるコストアップを十分説得しうる性能改善の定量的評価も必要になる。

2.5 材料設計方法

2.5.1 材料設計に対する考え

一般に今入手できる材料の多くは少なくとも2つ以上の要素から構成される複合材料であろう。複合化することの意義は、単一では得られない有効な機能を得るためである。しかし、複合化することで良い特性が得られてもそれらの関係、つまり構成する各素材の特性と複合体の特性との関係を明らかにしなければ、工学的に一層の材料発展は望み難い。そこで、複合体の特性を予測するための複合則といった、ある関係を示す決まりが必要になるのは当然である。しかし、実際には素材間の境界面の影響が、複合体の特性の予測を複雑にしていることが多々ある。

近年においては、各分野での技術の進歩が目覚ましく、種々の新素材が世の中に出回り、その結果、新しい複合材料も世に出現することとなる。セメント系複合材料もその例外ではない。しかし、その複合する材料の組み合わせが極めて数多いことから、やみくもに複合化して実験的に検討するのではなく、「材料を設計する」という立場から複合化を考えていかなければならない。さて、材料設計に関して幾つかの意味付けがある。文献²⁵⁾によれば、「ある要求仕様に基づいて、それを満足する材料の”構造”を示すこと」とし、「対象のモデルを表現し、モデルに基づく解析を通して、構造とそれがもつ性質の関係を見いだすこと」をそのプロセスとしている。また、一方、材料の分野における”構造”とは、結晶構

造、原子配置、微細構造、電子構造、欠陥構造、等を示しているが、これは対象とする材料の種類によって異なってくる。一方、文献[26]では、材料設計の定義を「有用あるいは必要な材料を製造（合成）する、あるいは、選択することによって世の中に供給するための科学的手法とか指導原理」とし、特に「有用」、「必要」という言葉を強調しており、ニーズに対してただそれに応じるだけではなく、今までにない新しいかつ有用な材料を製造し、供給するという積極的な意味を持たせている。

2.5.2 セメント系複合材料への材料設計の適用

セメント系複合材料の寸法によるレベル分けを行えば、図2.327)のようになろう。最も大きなレベルとして建築構造物、そして、最も小さいレベルではセメント水和物のレベルという具合に分けられる。しかし、セメント系複合材料に携わる多くの研究者は、これら全てのレベルにおいての知識を持ち合わせていることは少なく、実際にはそれぞれの研究対象とするレベルとその一段階マイクロもしくはマクロな方向のレベルとの関係を把握しているに過ぎないと思われる。ところが、最近ではそういった異なるレベル間での対応を関連づけるべく、研究の対象とするレベルの違う研究者を募った委員会活動が行われている。例えば、1994年には、水和による経時変化（水和生成物の構造特性の変化）、物質（水、CO₂など）の移動による微細構造の変化、それに伴う強度発現への影響、という分類を行い、それらの繋がりを定量的に把握しようとする「JCI反応モデル解析委員会」が開かれた²⁸⁾。一方、同じく1994年に、建設省建築研究所が先導的立場をとって「高性能セメント材料のハイブリッド構造への有効利用に関するフィージビリティスタディ委員会」を開き、既存技術を改良、発展させて構造への有効利用及び新材料を発掘するという観点から、材料側と設計側との結びつきを高めるような活動が行われている。このような活動が盛んになりつつあるのは、セメント系複合材料の研究の発展により、異なるレベル間の定量的な結び付けが期待されているためと考えられる。

2.5.3 V. C. Liのマイクロメカニクスモデルによる短繊維補強セメント系複合材料の設計

ミシガン大学のV. C. Li教授は、短繊維の1本の引き抜きの挙動から複数の繊維が引張りび割れに抵抗する挙動を力学モデルにより構築し、さらに高い変形性能を示す諸条件を明らかにした。セメント系複合材料の引張挙動について、理論的にマイクロなレベルからメゾレベルへのモデルを構築した研究例は極めて少ない。このように材料設計というマイクロな現象を如何に力学的にモデル化しマクロな挙動を推測できるかがこれからの材料設計には必要不可欠となるものと考えられる。

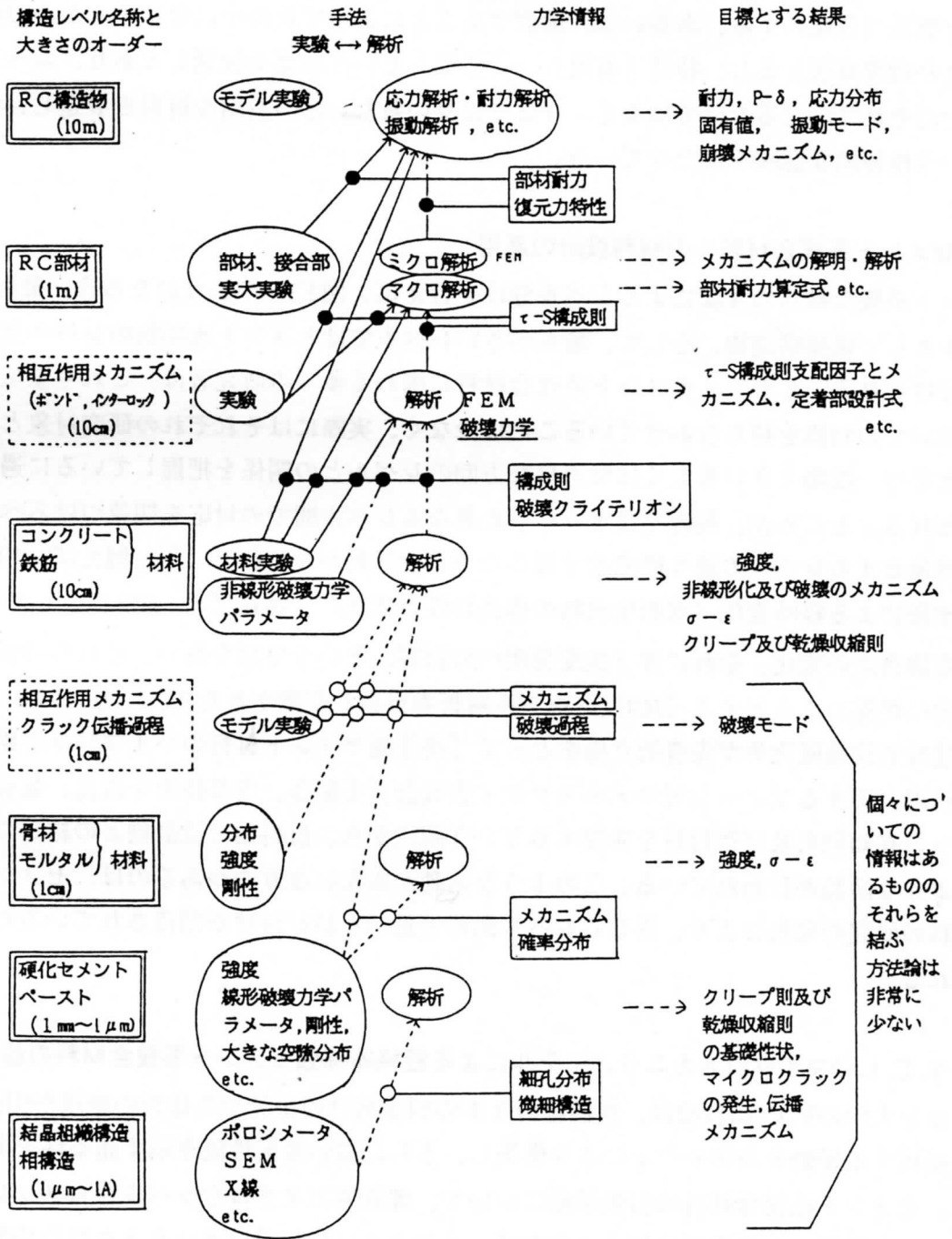


図2.3 コンクリート工学の立場から見た材料の力学的挙動の情報の流れ²⁷⁾

2.6 結び

軽量であることと高強度であることを同時に満足させるためには、出来る限り比重の小さい、かつ、強度の高い軽量骨材の開発が強く望まれる。さらに高い靱性を付与させるためには、繊維の混入が必要不可欠である。しかし、求める性能を効率よく実現させる、もしくは、さらに高い性能を実現させるためには、素材単体だけではなく、それを取り囲む他の全ての素材との相互関係を明らかにしなければならない。そのためには、実験的検討とマイクロメカニクスによる予測とを合わせて取り込む必要がある。さらに、新しい作製プロセスをも同時に考慮するという3つの視点から複合材料を開発することが重要となる。

本研究は、このような3つの視点を考慮に入れながら、既往のモデルを利用し材料の設計及び開発を行うものであり、本報告書はそのために取り組んだ一連の研究成果を示すものである。

参考文献

- 1) 岡田清, 六車熙編集: 改訂新版 コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981.
- 2) 文献調査委員会 (担当: 伊藤祐二): 高強度軽量コンクリートの材料特性に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol.32, No.5, pp.57-61, 1994.5.
- 3) 日本建築学会: 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 1992.12.
- 4) 小坂義夫, 谷川恭雄: 人工軽量骨材コンクリートの力学的特徴について, 日本建築学会論文報告集, 第240号, pp.21-29, 1976.2.
- 5) 藤原浩巳, 下山善秀, 内田昌勝: 軽量コンクリートの強度特性に関する研究, 第45回セメント技術大会講演集, pp.358-361, 1991.
- 6) 田中敏嗣, 下山善秀, 藤原浩巳: 軽量コンクリートの高強度化に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.352-357, 1989.
- 7) 内藤憲一, 九々正武, 篠崎明夫, 中西正俊, 木村吉一: 抗火石微粉末の焼成骨材を使用した超軽量コンクリートの開発および実用化に関する研究 その7 骨材の改良による高強度化の試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.933-934, 1990.10.
- 8) 大森淑孝, 熊沢憲一, 渡辺英之, 篠崎明夫, 中西正俊: 超軽量骨材を用いたコンクリートの強度特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.46, pp.494-497, 1992.
- 9) 大濱嘉彦: 手段を尽くせばここまで高強度になる - 高強度コンクリートの限界, セメント・コンクリート, No.546, pp.64-69, 1992.
- 10) D. M. Roy and G. R. Gouda: Porosity Strength Relation in Cementitious Materials with Very High Strengths, Journal of the American Ceramic Society Discussions and Notes, Vol.56, No.10, pp.549-550, 1973.10.
- 11) 例えば、野村希晶, 三橋博三, 鈴木篤, 和泉正哲: 非線形破壊力学手法に基づく

- 高強度コンクリートの脆性化機構の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp.9-16, 1990.
- 12) 三橋博三: セメント系複合材料設計への破壊力学の応用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.1175-1180, 1990.
 - 13) 三橋博三, 梅岡俊治: 骨材粒径を変えたコンクリートの破面解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.1-7, 1993.11.
 - 14) ACI Committee 544, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, J. American Concrete Institute, 75, 283-9, 1978.
 - 15) 日本コンクリート工学協会: 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法 JCI-SF4, 繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準, pp11.-14, 1983.
 - 16) C. D. Johnston: Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete, Cem. Concr. Agg., 4, pp.53-60, 1982.
 - 17) RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams, Materials and Structures, Vol.18, pp.285-290, 1985.
 - 18) A. Hillerborg: Analysis of Single Crack, in Fracture Mechanics of Concrete, ed. F. H. Wittmann, Elsevier Science, Amsterdam, pp.223-249, 1983.
 - 19) A. Carpinteri, A. Di Tommaso and M. Famelli: Influence of Material Parameters and Geometry on Cohesive Crack Propagation, in 'Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete', ed. F. H. Wittmann, Elsevier Science, Amsterdam, pp.117-136, 1986.
 - 20) Y. S. Jenq and S. P. Shah: A Two Parameter Fracture Model for Concrete, J. of Engineering Mechanics, Vol.111, ASCE, pp.1227-1241, 1985.
 - 21) Z. P. Bazant and P. A. Pfeiffer: Determination of Fracture Energy from Size Effect and Brittleness Number, ACI Material J., No.84, pp.463-480, 1987.
 - 22) 三橋博三: コンクリートの強度特性が破壊力学パラメータに及ぼす影響, コンクリート工学論文集, 第6巻第1号, pp.81-88, 1995.1.
 - 23) 日本複合材料学会編: 複合材料を知る事典, 1982.
 - 24) High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC 2), proceedings of the Second International RILEM Workshop, ed. A. E. Naamni and H. W. Reinhardt, 1996.
 - 25) 日本材料科学会編: 材料先端シリーズ 材料の設計, 裳華房, 1995.
 - 26) 猪瀬博 編: 東京大学工学セミナー 工学における設計, 東京大学出版会, 1987.
 - 27) 三橋博三: コンクリートの力学的特性と破壊力学, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.1, pp.77-85, 1988.
 - 28) 社団法人日本コンクリート工学協会: 反応モデル解析委員会報告書(I) -セメントコンクリートの反応モデル解析の現状と今後の展望, 1996.5.

3章 セメント系複合材料の軽量化及び高強度化の検討

3.1 序

本章では、セメント系複合材料の軽量化と高強度化を目的として、2種類の実験を行い、それらに関する知見をまとめたものである。

3.2 最密充填を考慮した高強度軽量セメント系複合材料の開発

3.2.1 はじめに

一般的なコンクリートでは、コンクリート中の粗骨材の量をできる限り高くとることは強度、剛性のみならずクリープ、乾燥収縮そして水分等の浸透性に関しても有利に働くことが知られている。しかし、軽量骨材に関しては、コンクリートの軽量化を担うものの、強度の低下は否めないという問題を抱えている。また、軽量な建築部材の利用において、多様な軽量骨材コンクリートが開発されており、特に新しい人工軽量骨材の開発が目覚ましい。現在では、普通コンクリートの半分程度の比重のものでも、20MPa以上の強度を持つ軽量コンクリートの作製が可能となっている²⁾。さらに、コンクリート構造物の総重量を低減するために、より軽くて強いコンクリートの開発が望まれている。

このような現状を踏まえ、さらに軽量かつ高強度なセメント系複合材料を開発するために、1)軽量かつ十分な強度を有する新しいタイプの微細な骨材を使用し、2)理論的に骨材、セメント粒子及び混和材の充填率ができるだけ高くなるようにそれら粉体の量を決定する、という考え方で実験を行った。

つまり、セメント系複合材料の軽量化は第2章でも記述したようにどれだけ強いかつ微細な軽量骨材を用いるかに依り、また、高強度化はどれだけ内部の空隙を減らす、もしくは小さくするかに依存する。ここで、用いる微小中空セラミックス骨材は直径が175 μm 及び115 μm であり、かつ外側は非常に薄い殻で覆われたシェル構造である。従って、目標とする単位容積質量に達する適切な量を混入し軽量化を施し、さらに強度の低下を最小限に抑えることが出来るものと期待できる。さらに、高強度化を促すために非常にマイクロなレベル、つまり、骨材間もしくはセメント粒子間の毛細管空隙といったレベルの空隙を最小限にするために粉体の充填理論を用いて、適切な粉体の構成比を推測し調合を選定した。

充填率は、その固体に占められる体積比として表わされる。そこで問題となるのが、存在する大きな空隙を小さな粒子で満たすために、粉体の大きさの比がどの程度であれば適切なのか、ということである(図3.1)。

次項では本実験で利用した粉体の充填特性の理論を説明し、行った実験方法並びに結果について記述する。

3.2.2 粉体の充填特性

幾つかの充填モデルがある中で、本研究では、簡易に求められるLeeのモデル³⁾を適用することとし、以下にその内容について簡単に記述する。

(a) 2成分の充填モデル

McGeary⁴⁾は実験的研究を行い、2成分における最大充填率は、図3.2に示すように大きい粒子と小さい粒子の直径の比で表わされることを示した。各々の同一粒径の粒子の充填率をはじめに求め、(3.1)式にそれらの充填率を代入することで、2成分の粒子が混合された場合の充填率が最大になるような、大きな粒子の体積比、 $X_{L,max}$ が算出される。

$$X_{L,max} = \frac{\phi_L}{\phi_L + \phi_S - \phi_L \phi_S} \quad (3.1)$$

ここで、 ϕ_L 、 ϕ_S は、それぞれ大きい方及び小さい方の単一粒子の充填率である。そして、図3.2より求められた2成分の最大充填率 ϕ_{max} と先の(3.1)式より求められた大きい方の粒子の体積比を以下に示す4つの式に代入し、 X_L （大きい粒子の体積比）もしくは X_S （小さい粒子の体積比）の関数として2成分の充填特性が求められる。ただし、 $(\phi_p)_S$ と $(\phi_p)_L$ のどちらか小さい方が、実際の充填特性に相当する（図3.3中の太線）。

$$\phi_{SL} = \phi_S + \frac{(\phi_{max} - \phi_S)}{X_{L,max}} \quad (3.2)$$

$$\phi_{LS} = \phi_L + \frac{(\phi_{max} - \phi_L)}{1 - X_{L,max}} \quad (3.3)$$

$$(\phi_p)_S = \phi_S \cdot X_S + \phi_{SL} \cdot X_L \quad (3.4)$$

$$(\phi_p)_L = \phi_{LS} \cdot X_S + \phi_L \cdot X_L \quad (3.5)$$

ただし、 $X_S + X_L = 1.0$

(b) 3成分の充填モデル

3成分系の充填特性も、2成分系の充填モデルと同様に求めることができる。つまり、3成分系の3つの構成物から、粒子の体積比と充填率の組み合わせを3つ作ることができる。そして、それぞれのペアによってその粒子の体積比と充填率との関係が計算されることにな

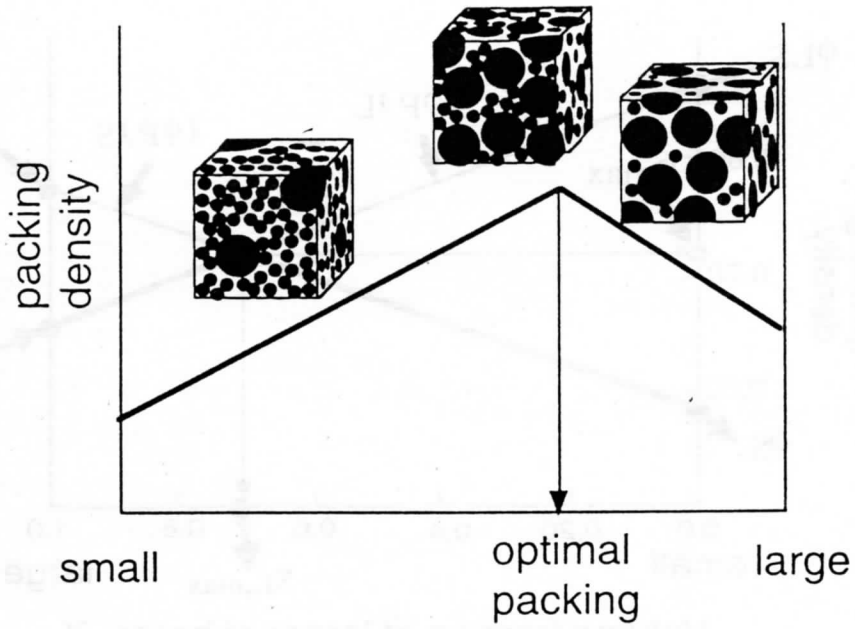


図3.1 内部構造を緻密にする適切な粉体の構成比

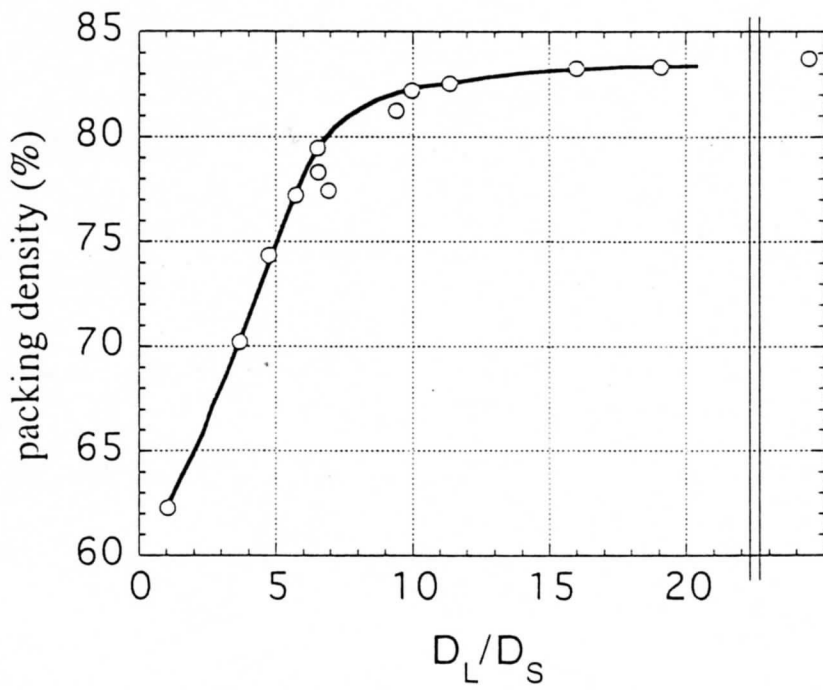


図3.2 2成分系における粉体の最大充填率⁴⁾

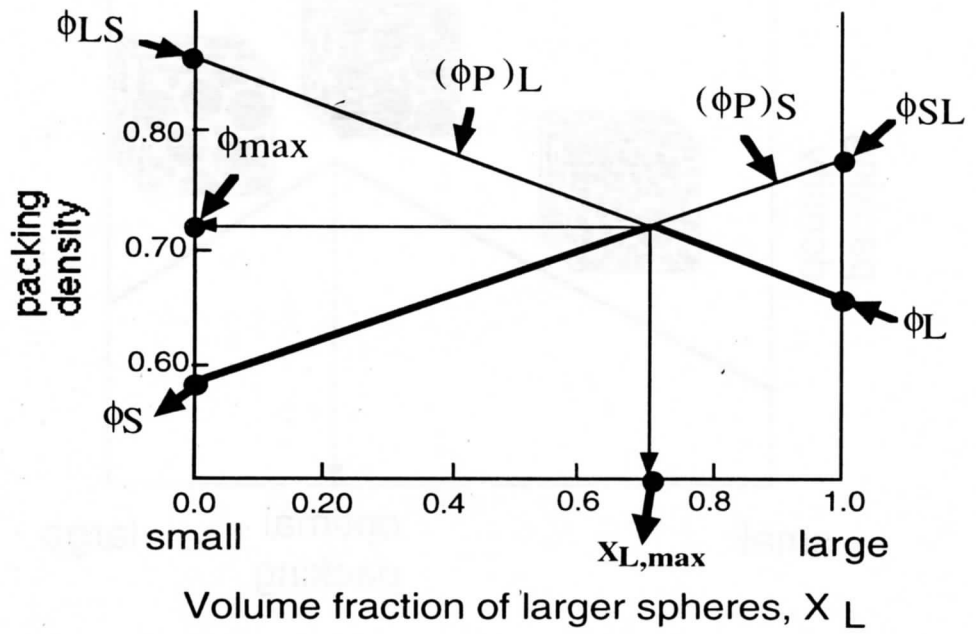


図3.3 2成分系における充填マップ

る。ただし、3成分系の場合は、粒子の体積比と充填率との線形的な関係を示すものは、(3.6), (3.7), (3.8)式の最小値をとることとする。

$$(\phi_p)_S = \phi_S \cdot X_S + \phi_{SM} \cdot X_M + \phi_{SL} \cdot X_L \quad (3.6)$$

$$(\phi_p)_M = \phi_{MS} \cdot X_S + \phi_M \cdot X_M + \phi_{ML} \cdot X_L \quad (3.7)$$

$$(\phi_p)_L = \phi_{LS} \cdot X_S + \phi_{LM} \cdot X_M + \phi_L \cdot X_L \quad (3.8)$$

ここで、 $X_S + X_M + X_L = 1.0$

以上のような一連の流れに沿って、実際の粉体の構成割合を定めた。図3.2から分かるように、おおよそ10倍程度の直径比でさえあれば、十分に高い充填率を実現できるものと思われる。本研究における使用材料に関しては、セメント、中空セラミックス骨材、シリカフェームのそれぞれの直径比は約10倍もしくはそれ以上の直径比を確保している。

3.2.3 実験方法

セメントと2種類の異なった中空セラミックス骨材との3成分系とセメント、中空セラミックス骨材及びシリカフェームの3成分系と2種類の調合を作成し、どの程度の軽量化と高強度化が可能であるかを検討すると共に、それぞれの充填特性の違いが力学的特性に及ぼす影響について検討した。

3.2.3.1 使用材料

本実験で用いた材料は、表3.1に示す通りである。

表3.1 使用材料

	記号	比重	平均粒径 (μm)	単位容積質量 (t/m^3)	備考
早強ポルトランドセメント	C	3.14	13.7	0.4171	
シリカフェーム	SF	2.60	0.15	0.1866	
中空セラミックス骨材	C175	0.7	175	0.6166	
	C115	0.7	115	0.6284	
高性能AE減水剤	sp	1.1	—	—	主成分: 芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物

表中の単位容積重量はJIS A 1104に準じて計測した値である。

3.2.3.2 調合

C-C115-C175の3成分から構成された混合体（以降 調合Bと称する）とさらに高い充填率を示すC-C175-SFの3成分から構成される混合体（以降 調合Aと称する）を準備した。これらの3成分系の充填率(=全粒子の体積/容器の容積)を前項で記述したLeeによる充填理論を用いて求め、各成分の体積比（粉体の間隙を考慮していない実体部のみの体積比）を3つの軸にとり、それらに対する充填率を等高線として実線で図3.4、図3.5に示す。また、粒子の間隙に水が埋まるものとして算出される単位容積重量を図3.4、図3.5に加えて破線で示す。試験体は、調合Aでは、a～eの5種類、調合Bでは、f～jの5種類を作製した。それぞれの3つの成分の構成割合と算出された充填率 ϕ 並びに粉体の間隙に水が入り込むと仮定した場合の水結合材比W/Bを表3.2に示す。

3.2.3.3 練り混ぜ及び試験体の作製

所要の各3種類の粉体をオムニキサー（最大容量5リットル）に投入し、空練りを1分間行い、その後、粒子の間隙（1-充填率）に相当する量の水を投入し3分間、続いて適当量の減水剤を投入しさらに3分間練り混ぜた。ただし、調合Bについては、このような方法ではセメント量が約40vol.%以下のものの試験体の作製が困難であったため、十分なワーカビリティが得られたもの（f～j）のみを作製した。調合Aについては、同じような方法では打ち込むことができなかつたので、打ち込みが可能となるまでさらに水を加えて練り混ぜた。その結果得られた各材料の単位容積重量、充填率 ϕ' と水結合材比W/B'を表3-2に加えて示す。

尚、試験体は1種類につき $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱試験体を6本作製した。

3.2.3.4 養生

打ち込んだ翌日に脱型し、その後蒸気養生（80℃、5時間継続）を行った。さらに強度試験日（材令7日）まで再び養生室内にて湿空養生（20℃、90%[RH]以上）を行った。

3.2.3.5 強度試験

作製した6本の円柱試験体のうち、3本で圧縮強度並びに静弾性係数の測定を行い、残りの3本で割裂引張強度を測定した。動弾性係数は、6本全ての試験体について測定した。

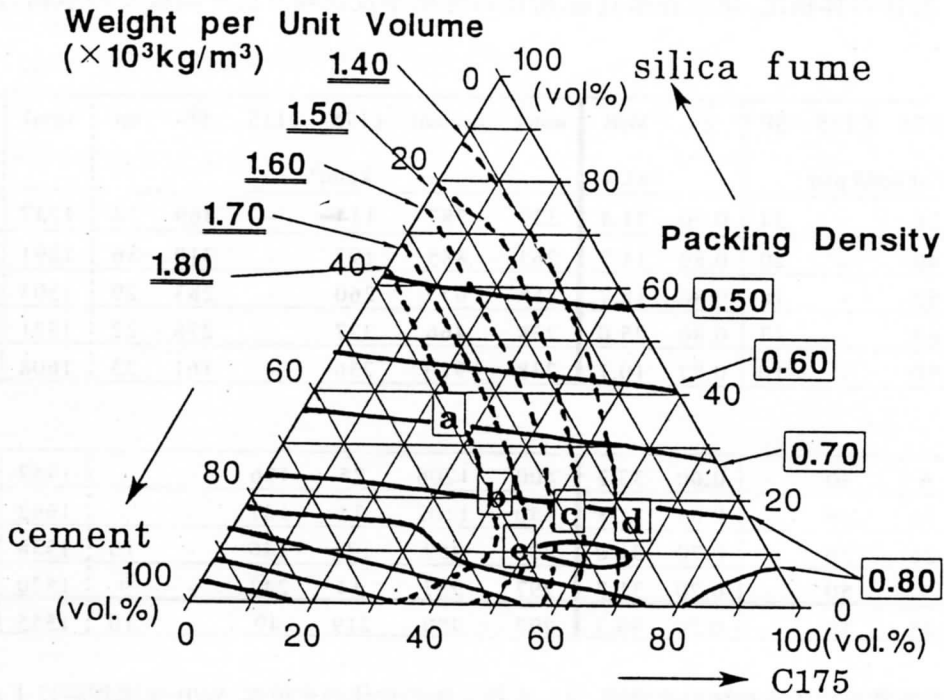


図3.4 調合 Aにおける推定された充填特性と単位容積質量

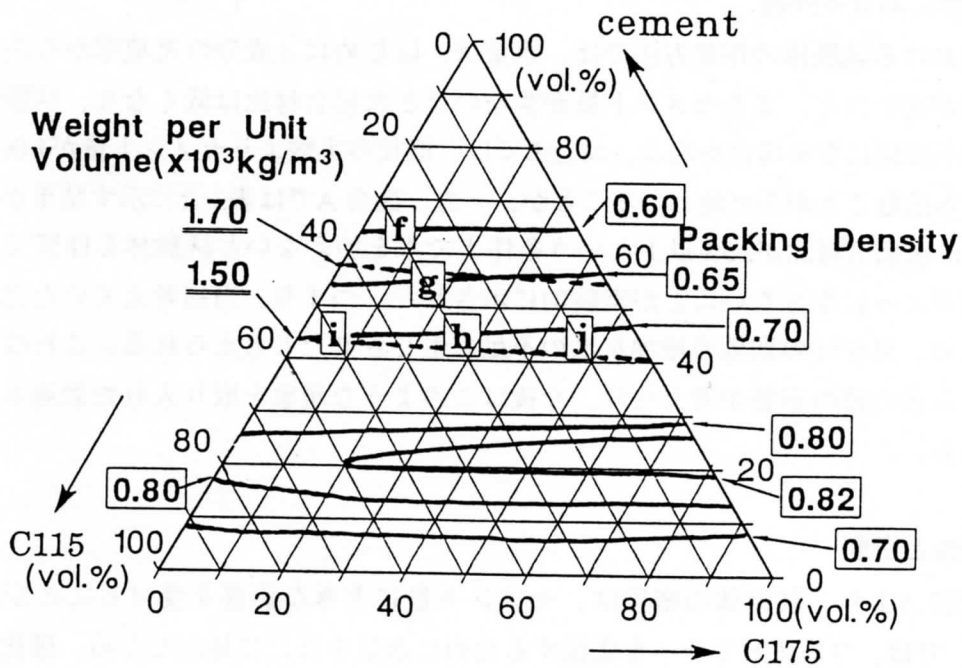


図3.5 調合 Bにおける推定された充填特性と単位容積質量

表3.2 粉体の体積比, 単位容積質量, 粉体の充填率及び練り混ぜ前後での水結合材比

調合 A

	cement	C175	C115	SF	ϕ	W/B	water	cement	c175	c115	SF	sp	total	ϕ'	W/B'
	Vol.% of solid part				wt.%										
a	40	26	-	34	0.70	21.4	339	787	114	-	469	38	1747	0.625	30.0
b	40	40	-	20	0.80	11.7	263	885	197	-	310	36	1691	0.702	25.0
c	30	52	-	18	0.80	18.7	258	673	260	-	283	29	1503	0.714	30.0
d	20	63	-	17	0.80	25.0	238	466	327	-	278	22	1331	0.741	35.0
e	40	50	-	10	0.87	10.1	238	920	256	-	161	33	1608	0.731	25.0

調合 B

f	64	6	30	-	0.60	33.2	400	1206	25	126	-	-	1757	0.60	33.2
g	54	16	30	-	0.65	31.8	350	1102	73	137	-	-	1662	0.65	31.8
h	44	26	30	-	0.70	31.0	297	959	126	146	-	10	1538	0.693	32.0
i	43	7	50	-	0.70	31.7	297	937	34	243	-	9	1520	0.693	32.7
j	45	45	10	-	0.70	30.3	297	980	219	49	-	10	1555	0.693	31.3

ここで、 ϕ : 充填理論による粉体の充填率, ϕ' : 水投入後の粉体の充填率, W/B: 充填理論による水結合材比, W/B': 水投入後の水結合材比

3.2.4 実験結果及び考察

1) 練り混ぜにおける問題

本実験における試験体の作製方法では、水量は、はじめに3成分の充填率から決定されるが、充填率が高いほど、またセメント量が少ないほど水結合材比は低くなり、試験体を作製することが不可能になる場合がある。調合 B では、既往の実験よりセメント量が40 vol.%以下になると打ち込むことが不可能となることが、一方、調合 A では表3.2に示す結果から充填率が70%以下、水結合材比が25%以上という条件まで水を加えないと試験体を作製できる程のワーカビリティにならないことが実験的に示された。つまり、当初考えていた充填構造が乱されたため、見かけの間隙の増加が水の不足を生じさせたと考えられる。これは、粒子表面に付着する水の膜の影響が考えられ、今後はこのような現象を取り入れた最適水量の決定が必要である。

2) 充填特性と密度

図3.4、図3.5より、試験体の密度は、セメント量に大きな影響を受けることが理解できる。調合 A では、ワーカビリティを確保するために水量を新たに加えたため、硬化後の試験体の密度は、図3.4で示した値より若干低い傾向を示すようになるが、密度と各構成要素の混入割合を検討するためには、図3.4や図3.5は有効な目安となり得る。

3) 密度と力学的特性

各調合における密度と圧縮強度、引張強度そして静弾性係数との関係を図3.6に示す。尚、各試験体を表す記号は、図3.6～図3.8内で統一させてある。

密度と圧縮強度との関係については、調合Aと調合Bとで明確な差が表れ、調合Aの各試験体の圧縮強度は、調合Bのそれらよりも約2倍前後の増加が見られた。これは、骨材を除いた部分のマトリックスの緻密さが増加したためと考えられる。また、特に調合Aで示された各シリーズの圧縮強度の特性を見ると、bやcはaに比べて密度が低減しているにも拘わらず、圧縮強度が増加していることが分かった。これは、マトリックス部分をセメントとシリカフュームの2成分系で考えた場合、最も充填率が高くなる組み合わせに近いことがその要因と考えられる。つまり、セメントとシリカフュームの容積比が4:1の時、最も充填率が大きくなり、セメント:シリカフューム=4:1に相当するラインに近い程、高い強度が期待できると思われる(図3.7)。例えば、図3.7中の3つの点、 α, β, γ を考えれば、 α と β では、骨材量が同一であることから、強度の関係は、 $\alpha < \beta$ と考えられる。一方、 β と γ というマトリックスの充填率が同一の場合には、強度の関係は、骨材量の関係から $\beta > \gamma$ と考えられる。しかし、 α と γ という場合には、セメントマトリックスの緻密さと骨材量の相互の影響が考えられ、強度の比較は簡単にはできない。従って、全体を通した強度の予測については、マイクロメカニックスの適用が必要とされる。

一方、密度と引張強度との関係については、調合Bの方では、ばらつきが非常に大きく明確な特徴は見られなかったが、骨材量が多いほど高い強度を示す傾向があった。調合Aでは、圧縮強度と類似した傾向を示し、cシリーズはaシリーズに比べて低密度で高い引張強度が得られた。

密度に対する静弾性係数については、2つの調合では、特に大きな違いは見られなかった。これは、骨材量がほとんど変わらないこと、また、シリカフュームの混入による充填効果は、静弾性係数の増加に寄与しないことなどがその要因と考えられる。

このような密度と力学的特性の結果から、高強度化と軽量化を図るには、まず、「軽量骨材をどの程度充填することで目標とする密度に近づけることができるのか」、を充填理論によって求め、更に「同一単位容積重量の条件下で、各成分の混合比をどのようにすれば強度の改善ができるのか」を明らかにしていくというように分けて考えながら調合の選定を行うのが望ましいと言える。

4) 圧縮強度と静弾性係数との関係

一般に、軽量コンクリートでは、骨材の弾性係数や密度が小さいことから強度の割には弾性係数は小さいことが知られている。圧縮強度と静弾性係数との関係には日本建築学会RC規準式が用いられてきたが、コンクリートの高強度化に伴い、その補正が必要となってきた。そこで、高強度コンクリートに対応するようなNewRC式が友澤等⁵⁾により提案されている。

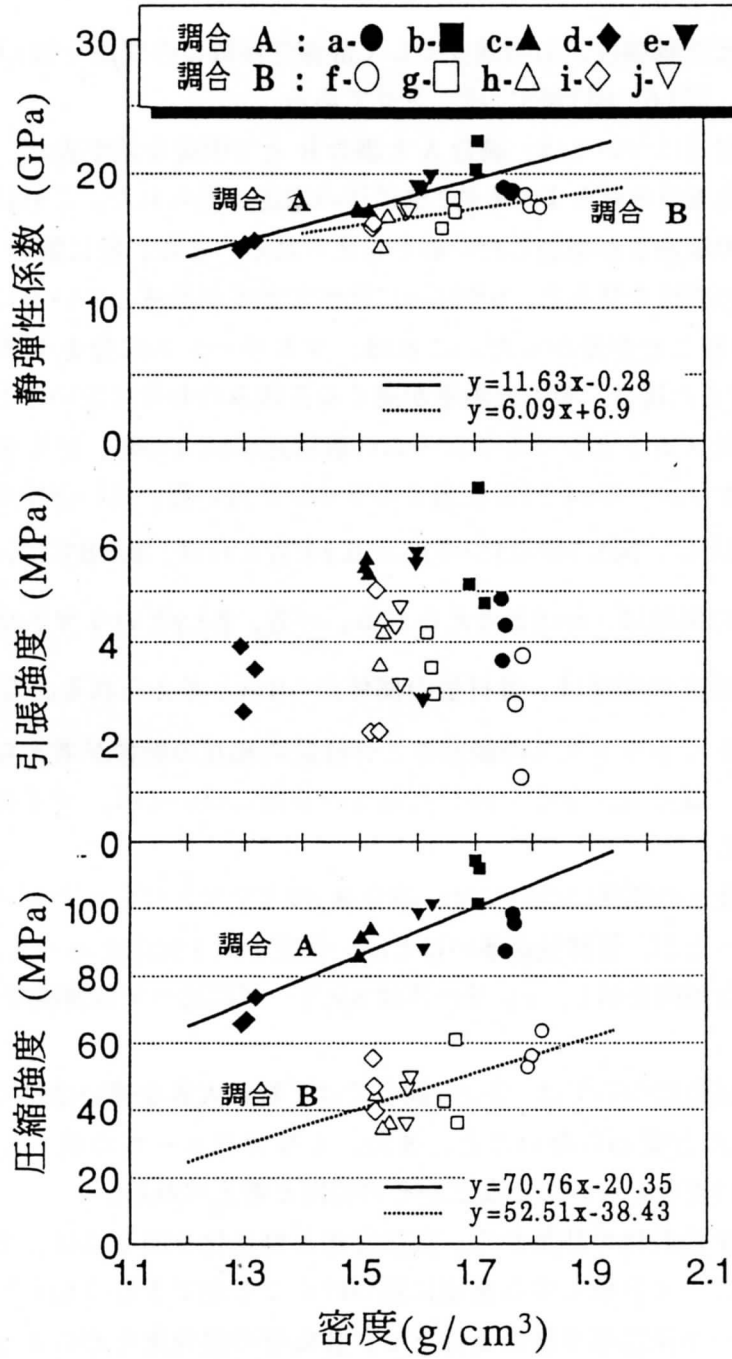


図3.6 単位容積質量と圧縮強度、割裂引張強度及び静弾性係数との関係

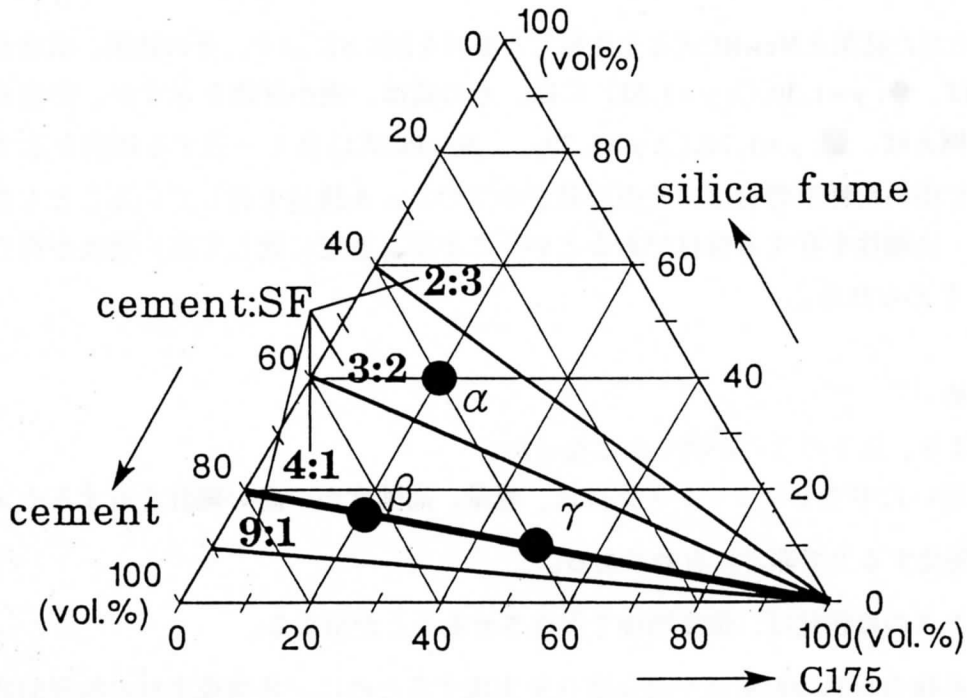


図3.7 強度特性の比較

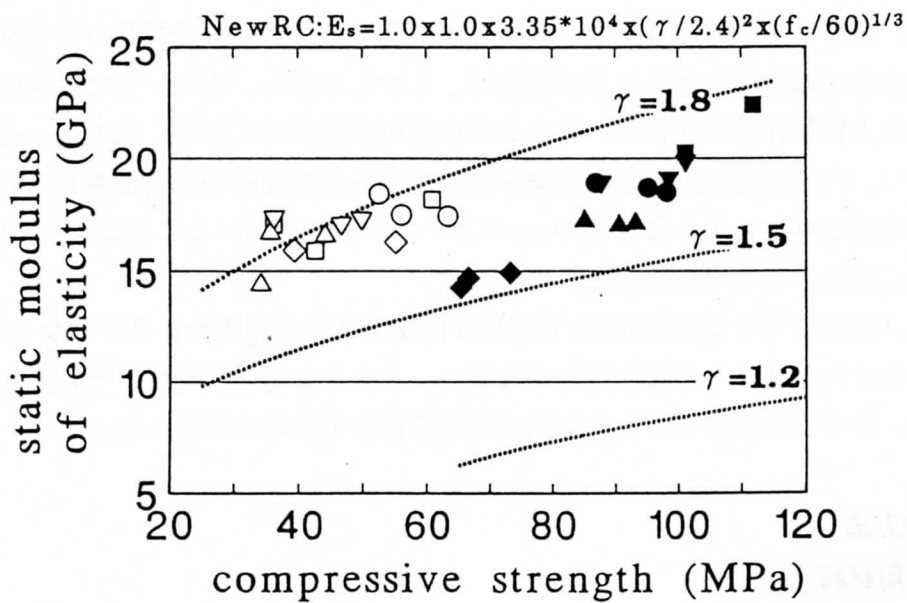


図3.8 圧縮強度と静弾性係数との関係

本実験で得られた結果とNewRC式とを比較したものを図3.8に示す。その結果、密度が小さい場合（例えば、◆： $\gamma=1.30$, ◇： $\gamma=1.52$ ）には、その式は、過小評価を示すが、密度が大きくなるほど（例えば、■： $\gamma=1.70$, ○： $\gamma=1.79$ ）、NewRC式に良く一致する傾向を示す。従って、本実験で用いた軽量骨材は、その形状が中空のシェル構造を有していることも含めて非常に高強度・高剛性を有する骨材であるということが、密度に比して高い強度が得られた要因であると考えられる。

3.2.5 まとめ

本実験により、以下のことが明らかになった。

- (1)本実験で用いた中空セラミックス骨材は、軽量、高強度かつ高い剛性を有するセメント系複合材料を開発する上で非常に有効である。
- (2)マトリックスの緻密化は、強度増加を促進させることが出来る。
- (3)セメント系複合材料の軽量化や高強度化を実現するために、各構成素材の物理的特性を考慮しながら、充填特性を検討することが望ましい。

3.3 鋼繊維補強軽量コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究

3.3.1 はじめに

前節では、微小な中空セラミックス骨材を用いることで、従来の軽量コンクリートを上回る非常に大きな圧縮強度を得ることが出来た。しかしながら、その一方で産業廃棄物により作製された人工軽量骨材も存在し、その有効な活用が望まれている。ただし、そのような人工軽量骨材は、内部に比較的大きな空隙を含んでいるため強度の低下は否めない。そこで、ひび割れの進展を抑制しようと長さ30mmのスチール繊維を用いることによって強度の低下を抑え、同時に靱性の増加を期待した。

本節では、密度の異なる3種類の人工軽量骨材及び繊維の形状や長さが異なる幾つかの鋼繊維を組み合わせたセメント系複合材料を作製し、これらの力学的特性、せん断を受けたRC梁の変形性能、並びに引張に対するひび割れ抵抗性能を実験的に検討した。

3.3.2 実験方法

3.3.2.1 使用材料

実験において使用した材料は、以下の通りである。早強ポルトランドセメント（比重:3.14）、人工軽量粗骨材〔Type A（絶乾比重:0.82、粒径:10-15mm）、Type B（絶乾比重:0.94、粗粒率:6.52）、Type C（絶乾比重:0.52、粒径:10-15mm）〕、中空セラミックス細骨材（比重:0.7、平均粒径:175 μ m）、シリカフューム（比重:2.20、平均粒径:0.15 μ m）、鋼繊維〔両

端フック型鋼繊維（比重:7.5、寸法: $\phi 0.6 \times 30\text{mm}$ ）、インデント型鋼繊維（比重: 7.85、寸法: $\phi 0.6 \times 30\text{mm}$ 及び $\phi 0.7 \times 50\text{mm}$ ）、異形鉄筋（SD30A、直径:10mm）、高性能減水剤（比重:1.1、主成分:芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物）。

3.3.2.2 試験体の調合

コンクリートの調合を表3.3に、また、作製した試験体の種類並びにその表記を表3.4に示す。ただし、粗・細骨材の投入量は、比重の最も高いTypeBの骨材と2vol.%の鋼繊維を組み合わせる場合、その単位容積質量が 1.5t/m^3 となるように定めた。

表3.3 軽量コンクリートの調合

W/B	SF/(C+SF)	細骨材率	単位容積容量(m^3/m^3)					
			W	C	SF	細骨材	人工軽量粗骨材 (TypeA,B,C)	減水剤
22.2wt.%	14.9wt.%	43%	154	188	47	254	337	19

W: 水, C: セメント, SF: シリカフェーム

表3.4 作製した試験体の調合

粗骨材の種類	鋼繊維の種類と試験体の表記			
	Plain (P)	Hooked(H)	Indented(I)	
		30mm (2vol.%)	30mm (2vol.%)	50mm (1.2vol.%)
Type A(A)	A-P	A-30H	A-30I	A-50I
Type B(B)	B-P	—	B-30I	—
Type C(C)	C-P	—	C-30I	—

3.3.2.3 練り混ぜ

練り混ぜは、容量5リットルのオムニミキサーを用いた。練り混ぜは、セメント、シリカフェーム、中空セラミックス細骨材、そして人工軽量粗骨材をミキサーに投入し、1分間空練りを行い、その後、水と高性能減水剤を加え3分間練り混ぜた。そして、鋼繊維を入れる場合は、ここで鋼繊維を投入しさらに2分間練り混ぜた。また、人工軽量粗骨材は絶乾状態のものを使用した。

3.3.2.4 試験体の作製並びに養生

圧縮強度、割裂引張強度並びに静弾性係数測定用の試験体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱試験体とし

た。RC梁のせん断実験は、10x10x40cmの鋼製型枠に図3.9に示すように鉄筋を配置させ、そこに練り上がったコンクリートを打設して作製した。また、切り欠き梁の曲げ実験は、10x10x40cmの角柱試験体とし、実験前日にコンクリートカッターで断面の半分の高さまで切り欠きを設けた。ただし、締め固めは3~5層に分け、各層についてテーブルバイブレータを用いて行った。

脱型後、試験日（材令7日）まで養生室内にて湿空養生(20℃、90%RH以上)を行った。

3.3.2.5 各種実験方法

圧縮強度、割裂引張強度並びに静弾性係数は、それぞれJIS A 1108、JIS A 1113、そして、JIS原案に準じて測定を行った。

RC梁のせん断実験は、図3.10に示される大野式せん断加力実験⁶⁾に準じた。試験体側面に π 型ゲージを取り付け、試験体中央部の引張及び圧縮方向の変形を測定した。また、変位計を用いて試験体中央部の載荷方向の変形を測定した。最大荷重時の見掛けのせん断応力度（以降、これをせん断強度と呼ぶこととする） τ は、次式により算出した。

$$\tau[\text{N/mm}^2]=Q/bj \quad (3.9)$$

ただし、Q: 最大荷重値[N]、j: 曲げ材の応力中心間距離(=7d/8)[mm]、b: 幅[mm]、d: 有効せい[mm]（ここでは80mm）。切り欠き梁の曲げ試験は、図3.11に示すように荷重とひび割れ肩口開口変位（以降、CMODと称する）を測定した。

3.3.3 実験結果及び考察

単位容積質量と圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数及び動弾性係数との関係を図3.12に、単位容積質量とRC梁のせん断強度との関係を図3.13に、また、RC梁のせん断試験において計測された荷重-相対変位曲線（載荷方向について測定した2つの変位の差をここでは相対変位とする）を図3.14に、荷重-ひずみ曲線を図3.15に、並びに荷重-CMOD曲線を図3.16にそれぞれ示す。

尚、図3.13中の記号の意味は図3.12に用いられているものと同様である。

1) 単位容積質量と圧縮強度並びに割裂引張強度との関係

用いた人工軽量粗骨材の特徴について定性的に記述すればTypeBの軽量骨材は、骨材表面が非常に硬く、また骨材の内部は細かい空隙で構成されている。一方、TypeCの軽量骨材は、骨材表面は柔らかく、骨材の内部は粗大な空隙が多数存在する。TypeAの軽量骨材はこれらの中間的な性質を有している。実験により求められた圧縮強度は、このような軽量骨材の特性の違いが明確に現れている。しかし、鋼繊維の混入が、圧縮強度に与える影響は、ど

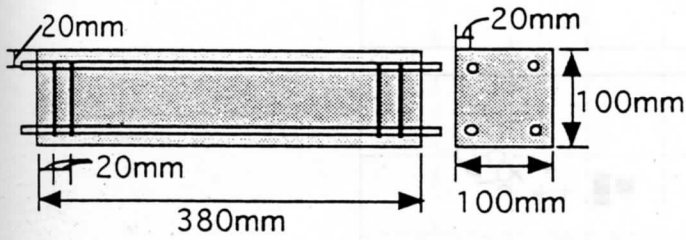


図3.9 せん断試験用試験体

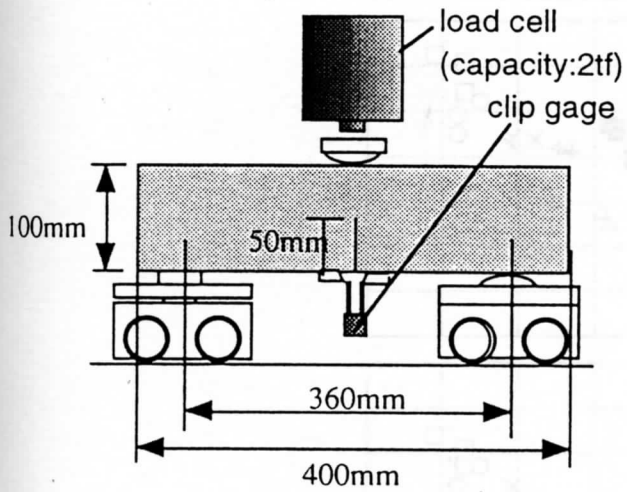
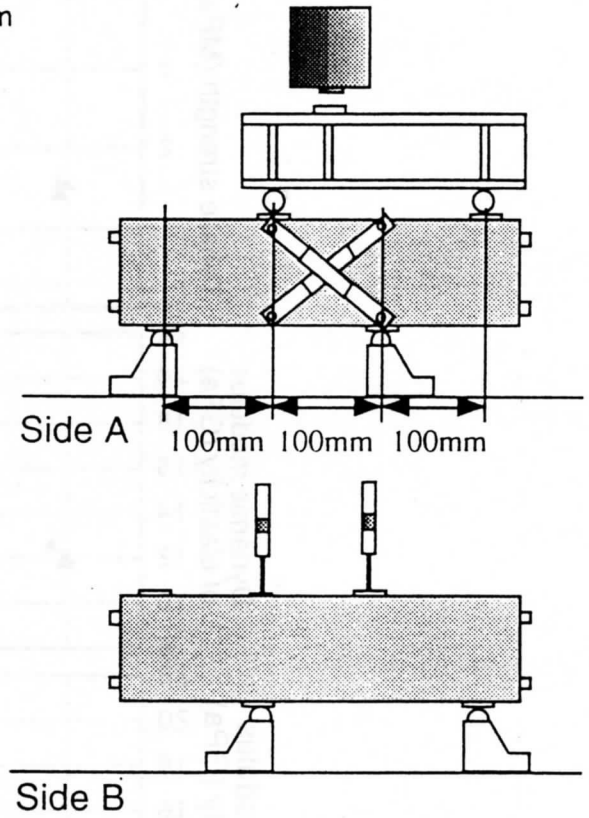
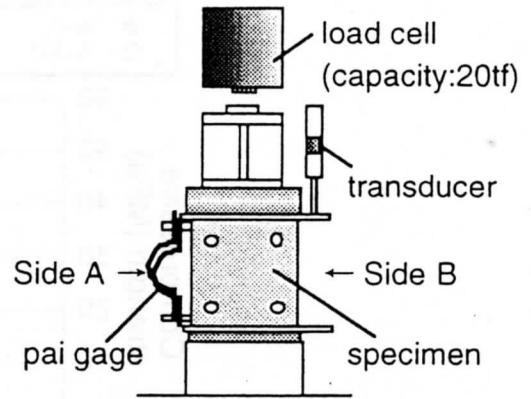


図3.11 切り欠き梁の曲げ試験 略図

図3.10 大野式せん断加力実験略図

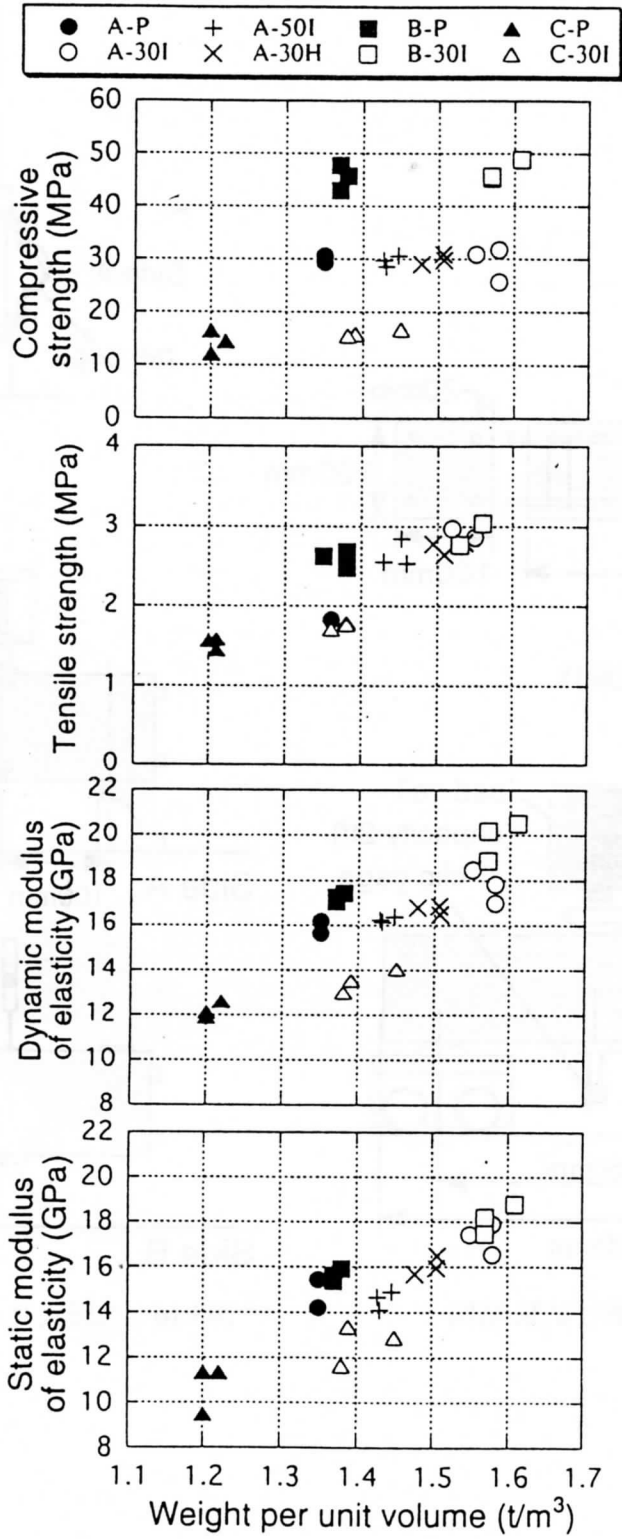


図3.12 単位容積質量と力学的特性

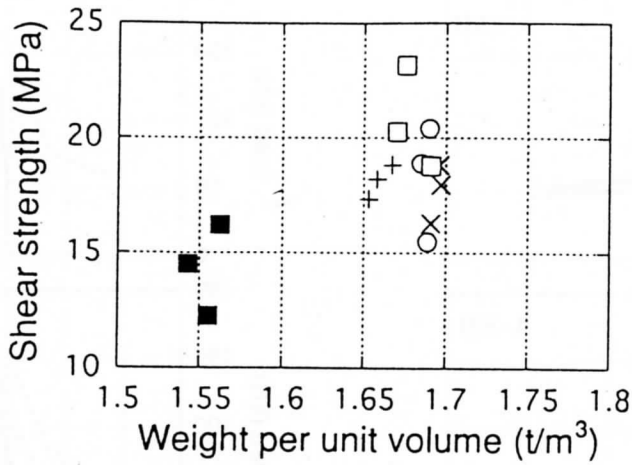


図3.13 単位容積質量とせん断強度

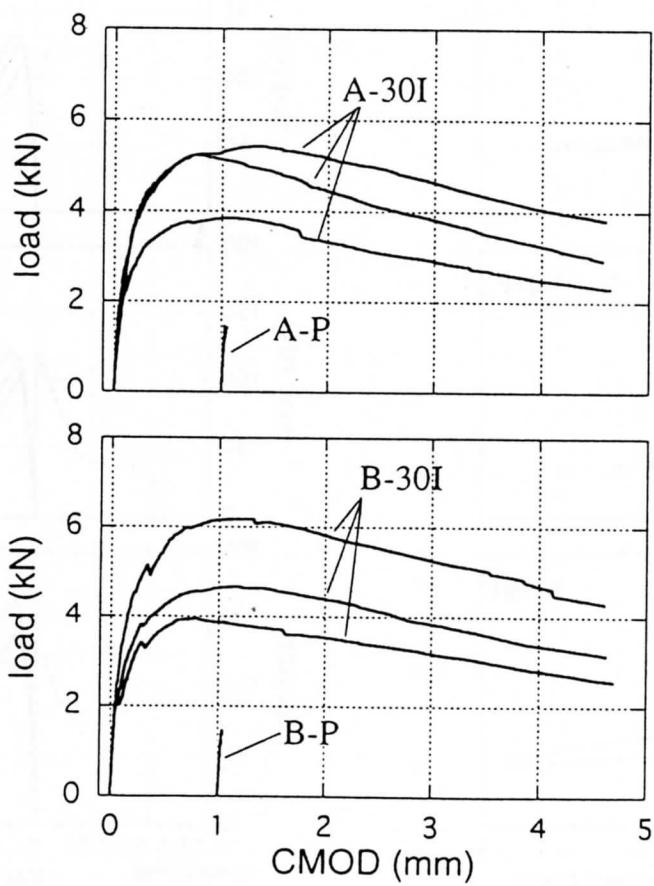


図3.16 荷重-CMOD曲線

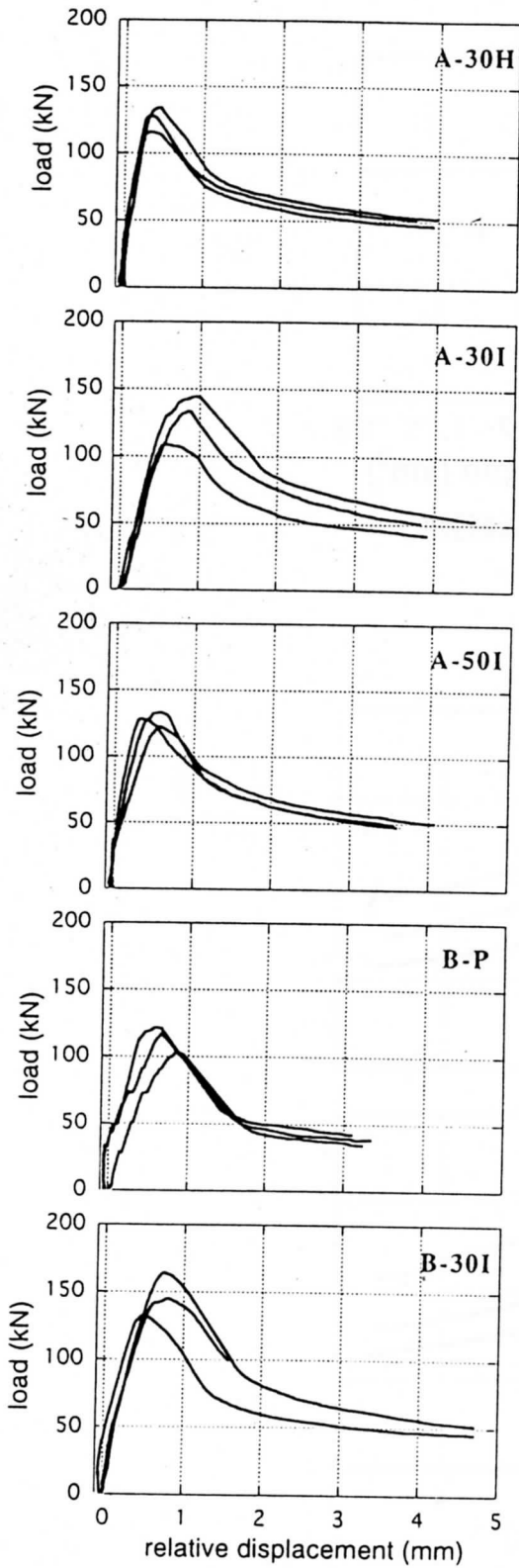


図3.14 荷重-相対変位曲線

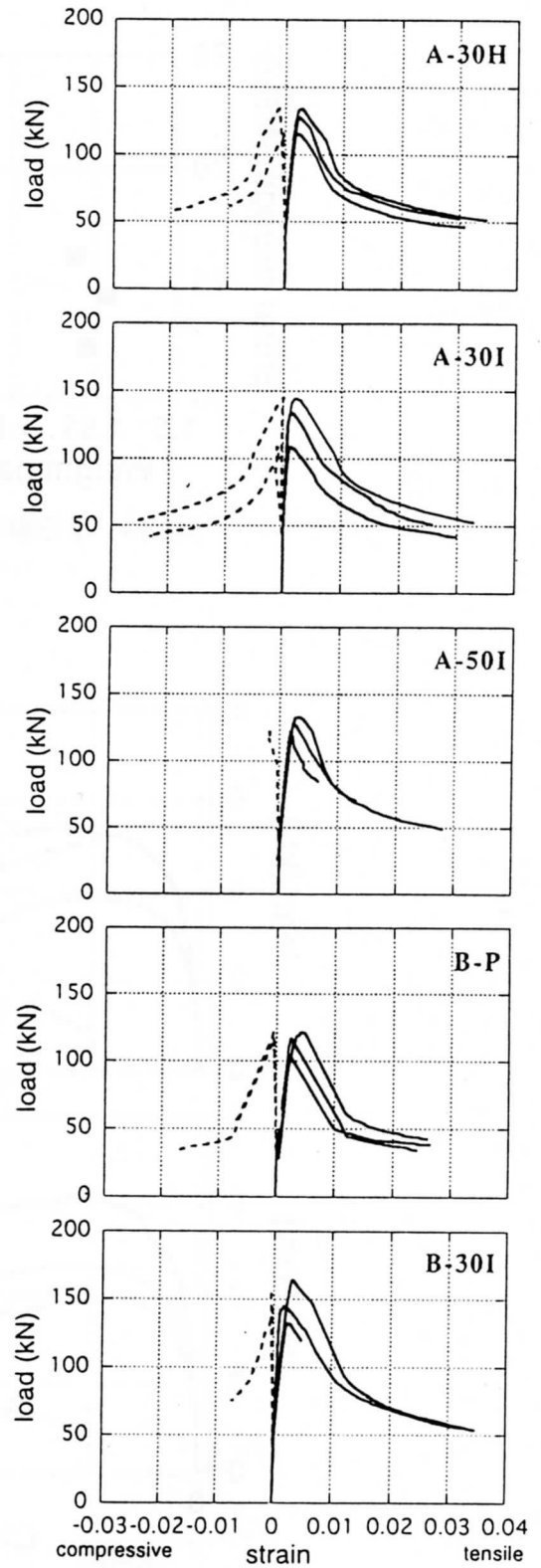


図3.15 荷重-ひずみ曲線

の軽量骨材を用いた場合でも殆どない。

一方、割裂引張強度に対する骨材による影響は、圧縮強度よりも大きくはない。また、繊維の混入により若干の増加が見られた。鋼繊維の形状の違いが割裂引張強度に及ぼす影響を見れば、フック型よりもインデント型の方が若干高い傾向を示し、また、繊維長さの違いを見れば、繊維長さの長い方が、少ない混入率で大きな効果を得ていることが認められた。

2) 単位容積質量と動弾性係数並びに静弾性係数との関係

動弾性係数と静弾性係数とは、類似した傾向を示している。鋼繊維が混入されることにより動弾性係数並びに静弾性係数は増加する傾向にあることが認められた。

3) セン断強度とせん断による変形性能に関して

RC梁のせん断試験は、C-P、C-30I、A-Pを除いたシリーズで行った。B-PとB-30Iとを比較することにより、繊維の混入は、せん断強度を高めるために有効な手段であることが分かる。さらには、A-30IとB-30Iとを比較すれば、骨材の影響も見受けられ、せん断強度を増加させるにはなるべく強固な骨材が必要とされる。また、A-50Iの結果からも、繊維長さが長い繊維を用いることで、少ない混入率でも優れたせん断強度を示すことが明らかになった。

B-Pは、ピーク荷重に達すると不安定な破壊が生じた。しかし、繊維が混入されたものは、ピーク荷重に至るまで、微小なひび割れが生じても、それに伴う荷重の低下は見られなく、ピーク荷重以降はなだらかに下降する挙動が見られ、繊維の高靱性化への有効性が示された。A-30IとA-50Iとで繊維長さの違いを見れば、A-50Iの方は、滑らかな曲線を描いており、少ない繊維混入率でも十分な靱性を確保していることが分かる。同様に、試験体中央部で計測されたせん断変形による引張歪みの挙動からも、上記にあるような特性を示していることが分かる。しかしながら、A-30IとA-30Hとを比較すれば、ピーク以降の挙動には、その繊維の形状による違いはあまり明確には現れなかった。

4) ひび割れ抵抗性能に関して

切り欠き梁の曲げ試験は、A-P、A-30I、B-PそしてB-30Iについて行い、軽量骨材の種類による影響とインデント型繊維の補強効果について検討した。A-PとB-Pについて比較すれば、軽量骨材の違いによる影響は殆どないことが分かった。また、A-PとA-30I及びB-PとB-30Iとを比較すれば、どちらの軽量骨材の場合でも、繊維の混入によってひび割れ抵抗性能（広義の破壊靱性値）は極めて大きく増大した。A-30IとB-30Iとを比較すれば、TypeBの軽量骨材を用いた方が、若干高い傾向を示しており、ひび割れ抵抗性能は、若干ではあるが軽量骨材の強さの影響を受けている。

3.3.4 まとめ

本実験により、以下のことが明らかになった。

- 1) 圧縮強度は骨材の特性に大きく依存し、鋼繊維の混入はその増大にはほとんど影響を及ぼさない。
- 2) 鋼繊維の混入は、割裂引張強度、剛性、せん断強度並びに変形性能を高める上で有効である。また、繊維長さが長いものは、少ない混入量でも十分に靱性の改善を可能とする。
- 3) 鋼繊維はひび割れ抵抗性能を極めて大きく向上させることができる。

3.4 結び

以上、セメント系複合材料の軽量化と高強度化を目的とした2つの実験を行い、その知見をまとめた。

中空セラミックス骨材は、その微細かつ強い殻を有する中空構造であるため、複合材料の密度を十分小さく、そしてかなりの高強度化を可能にさせることが認められた。一方、10～15mm径の人工軽量骨材を用いた場合、その強度特性は骨材の特性に強く依存する。また、繊維の混入による強度の増加は圧縮よりも引張やせん断において有効に働くことが、さらにひび割れ抵抗力は繊維の混入により極めて大きく改善されること等が明らかとなった。

今後、さらに軽量化と高強度化を図る場合には、やはり軽量骨材の性能改善が必要であると考えられる。また、繊維の混入は、圧縮強度の増加における貢献は少ないが、引張、曲げ及びせん断に対するひび割れ抵抗力の増大には非常に有効であるためより軽量の、繊維の混入も考慮してセメント系複合材料の開発を行う必要がある。

参考文献

- 1) V. Johansen and P.J. Andersen, Particle Packing and Concrete Properties. in Materials Science of Concrete II (ed. J Skalny and S. Mindess), ACE, Inc., Westerville, OH, pp.111-147, 1991.
- 2) 内藤憲一, 九々正武, 篠崎明夫, 中西正俊, 木村吉一: 抗火石微粉末の焼成骨材を使用した超軽量コンクリートの開発および実用化に関する研究 その7 骨材の改良による高強度化の試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.933-934, 1990.10.
- 3) D.J.Cumberland and R.J.Crawford, The Packing of Particles, Elsevier, pp.41-62, 1987.
- 4) R.K.McGeary: Mechanical Packing of Spherical Particles, J. ACS, 44, pp.513-522, 1961.
- 5) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.1-10, 1995.

- 6) 荒川卓ほか, 新載荷方法による鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗について, 日本建築学会論文報告集、第57号, pp.581-584, 1957.

4章 セメント系複合材料の高靱性化の検討

4.1 序

セメント系複合材料の高靱性化を図るには、繊維を混入することが最もその効果が大きい。要するに繊維を混入することで、ひび割れを架橋することができるため引張強度や曲げ強度だけでなくピーク荷重以降のひび割れ抵抗性能が改善されるのである。しかし、繊維補強セメント系複合材料の変形性能は、繊維やマトリックスの性質によって大きく異なることがよく知られている。そのため要求性能に応えるような繊維補強複合材料を開発するためには、適切な繊維とマトリックスの組み合わせを見出すことが非常に重要な課題となる。しかしながら、既往の繊維補強セメント系複合材料に関する研究においては、同一のマトリックスに対する種々の繊維の評価を行ったものはあまり見られていない。つまり、種々の繊維を横並びに評価したものは少なく、データの蓄積が待たれている。

繊維補強されたセメント系複合材料の最大耐力を上げるには繊維とマトリックスの強固な付着特性かつ引張強度の高い繊維の使用が必要である。一方、ひび割れに対する抵抗力をできる限り長く維持できるような優れた変形性能を実現するためには、繊維が破断せずに引き抜けるという挙動が必要である。しかし、繊維とマトリックスの付着特性は、繊維やマトリックスの物理的特性の影響を大きく受ける。

また、Liは、マイクロメカニクスと破壊力学パラメータを駆使し、そして繊維とセメントマトリックスの界面特性を評価するパラメータを実験的に得、短繊維補強セメント系複合材料の疑似歪み硬化や複数ひび割れの発生条件式を提示した。しかし、繊維が引き抜けるということが前提とされておりどのような繊維やマトリックスにもその理論が適用できるとは限らない。従って、現実的には繊維とマトリックスのどのような組み合わせが要求される性能を引き出すのに適切であるか、またどのような因子が破壊挙動に影響を及ぼすのかを実験的に検討することが必要であろう。また、繊維補強セメント系複合材料の引張や曲げに対する強度や変形性能が大きく注目される一方、圧縮挙動に関する検討は、あまりなされていない。

以上のような背景を踏まえて、本研究では素材、寸法、強度等が異なる種々の短繊維と水結合材比を変えた3種類のモルタルとを組み合わせ、供試体を作製し、繊維の種類及びモルタルの特性の違いが、曲げ挙動や圧縮挙動に及ぼす影響について検討を行った。

4.2. 実験の概要

4.2.1 使用材料

使用した材料は以下の通りである。早強ポルトランドセメント（比重:3.14）、シリカフェーム（比重:2.20）、7号硅砂(表乾比重:2.61)、増粘剤（比重:1.3、水溶性メチルセルロースエーテル）、高性能減水剤（比重:1.05、主成分:ポリカルボン酸エーテル系の複合物）、及び繊維（表-4.1参照）である。

表-4.1 使用した繊維の物理的特性

繊維の種類	記号	比重	直径 (μm)	長さ (mm)	長さ/直径	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
炭素繊維(PITCH系)	PIT	1.90	17	18	1059	1900	190
炭素繊維(PAN系)	PAN	1.80	7	6	857	4410	235
アラミド(Technora)	ARA6	1.39	12	6	500	3400	72.5
	ARA12	1.39	12	12	1000	3400	72.5
スチール	STE	7.85	100	6	60	980	240
ポリエチレン(A type ^{*1})	PE・A	0.98	38	12.7	334	2700	120
(B type)	PE・B	0.97	12	12	1000	2940	98
(C type)	PE・C	0.97	12	15	1250	2940	98
(D type ^{*2})	PE・D	0.97	12	15	1250	2490	76
ポリプロピレン	PP	0.91	40	12	300	482	2.61
ポリアリレート(Vectran)	PA	1.41	16	6	375	3234	75
PVA	PVA	1.30	37	12	324	1960	47

*1:プラズマ処理,*2:コロナ処理

4.2.2 供試体の作製

(1)調合

水結合材比(以下、W/Bと記述する)は、50、60及び70wt.%を用意した。ただし、B、C、Dタイプのポリエチレン繊維、ポリプロピレン繊維、ポリアリレート繊維及びPVA繊維においてはW/B=60%のみを作製した。また、水結合材比50wt.%に対しては減水剤を結合材の2wt.%、60及び70wt.%に対しては減水剤を結合材の0.75wt.%を混入した。また、砂結合材比を重量比で1.0、セメント重量に対するシリカフェーム置換率を20%、増粘剤水比を0.6wt.%、そして繊維混入率を、3vol.%とした。

(2)練り混ぜ

練り混ぜは容量5リットルのオムニミキサーを用いた。水、シリカフェーム及び増粘剤をミキサーに投入し30秒間空練りを行い、そして水と減水剤を投入し2分間練り混ぜる。その後砂を入れ1分間、さらに繊維を入れて2分間練り混ぜる。そして30秒間程度かきおとしを行い、最後に1分間練り混ぜた後、打設した。

(3)養生

打ち込んだ翌日に脱型し、7日材齢まで標準養生とした。

(4)成形

各シリーズにおいて、40x40x160mmの角柱供試体を3本、f50x100mmの円柱供試体を3本作製した。尚、締め固めは突き棒と木槌を用いて行った。

4.2.3 試験項目及び方法

(1) 切り欠き梁の曲げ試験

角柱供試体の中央部に深さ10mmの切り欠きをコンクリートカッターで載荷試験前日に設けた。そして、スパンを150mm、クロスヘッドの載荷速度を0.2mm/minとして中央集中載荷を行い、荷重と載荷点の変位を測定した。

(2) 圧縮試験

コンプレッソメータを円柱供試体に取り付け、圧縮応力とひずみを測定した。尚、クロスヘッドの載荷速度は0.2mm/minとした。

4.3. 実験結果及び考察

切り欠き梁の曲げ試験から得られた荷重-載荷点変位曲線を実線で、及び圧縮試験から得られた圧縮応力-ひずみ曲線を破線で図-4.1に併せて示す。尚、図中の供試体記号の後の数値は水結合材比を表す。

4.3.1 曲げ挙動に関して

PITCH系炭素繊維：ピーク荷重の平均値は、 $W/B=60\%$ の時に最大となった。また、ピーク以降の荷重の低下勾配は水結合材比が高くなるに従い小さくなっている。

PAN系炭素繊維：PITCH系炭素繊維と同様にピーク荷重の平均値は、 $W/B=60\%$ の時に最大となった。また、PITCH系炭素繊維と比較すれば、PAN系炭素繊維の方がピーク以降のひび割れ抵抗は大きい。

アラミド繊維：繊維長さ6mmと12mmとを比較すれば、ばらつきが大きいものの、明らかに12mmの方が高いピーク荷重を示し、かつピーク以降のひび割れ抵抗性能も優れている。また、ピーク荷重の平均値は水結合材比が低くなるほど増大する傾向を示したが、それらに大きな違いはない。また、他の繊維に比べてばらつきが非常に大きいのは、繊維の分散が不十分であったことを示すものである。

スチール繊維：水結合材比に拘わらず、ピーク付近では先鋭的な挙動を示し、またピーク荷重は、水結合材比が低いほど高い値を示した。

ポリエチレン繊維：Aタイプの繊維は、非常に塑性に富む挙動を示した。特に水結合材比が低いもの程、高いピーク荷重と優れたひび割れ抵抗性能を示した。また、供試体側面のノッチ先端近辺には水結合材比に拘わらず細かいひび割れが多数発生した。同様にB、C、Dタイプも塑性的な挙動を示し、細かいひび割れが供試体側面に多数発生した。ただし、B、C及びDタイプでの細かいひび割れが発生した領域はAタイプのものよりも小さかった。PE・BとPE・Cの比較から、繊維長さが長い方が優れたひび割れ抵抗性能を得るためには効果的であることが分かる。また、PE・CとPE・Dとの比較から、明らかに繊維に表面処理を施し繊維とマトリックスとの付着を高めた方が、高いピーク荷重と優れたひび割れ抵抗性能を得るには有効であることが分かった。

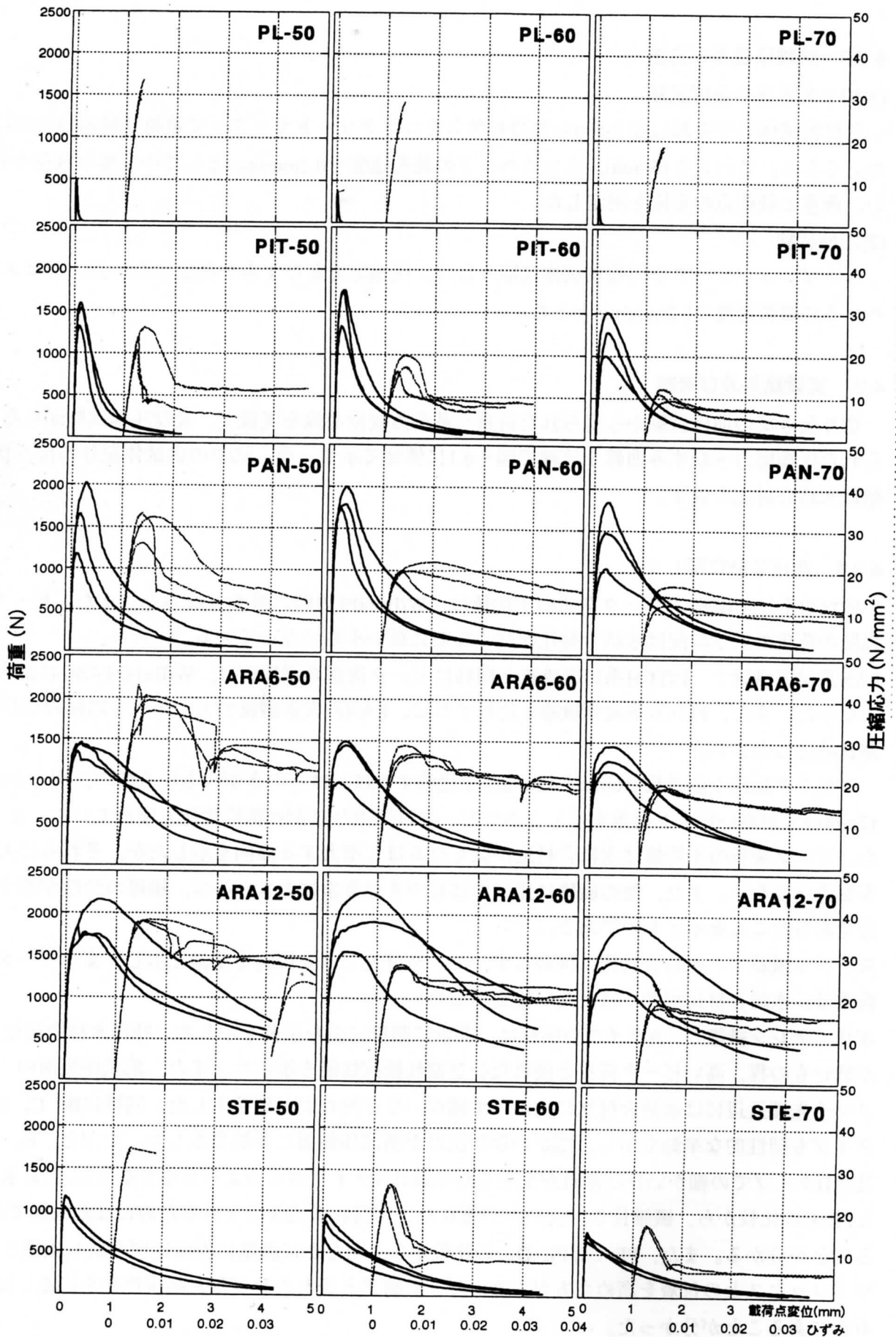


図-4.1 荷重-載荷点変位曲線及び圧縮荷重-ひずみ曲線

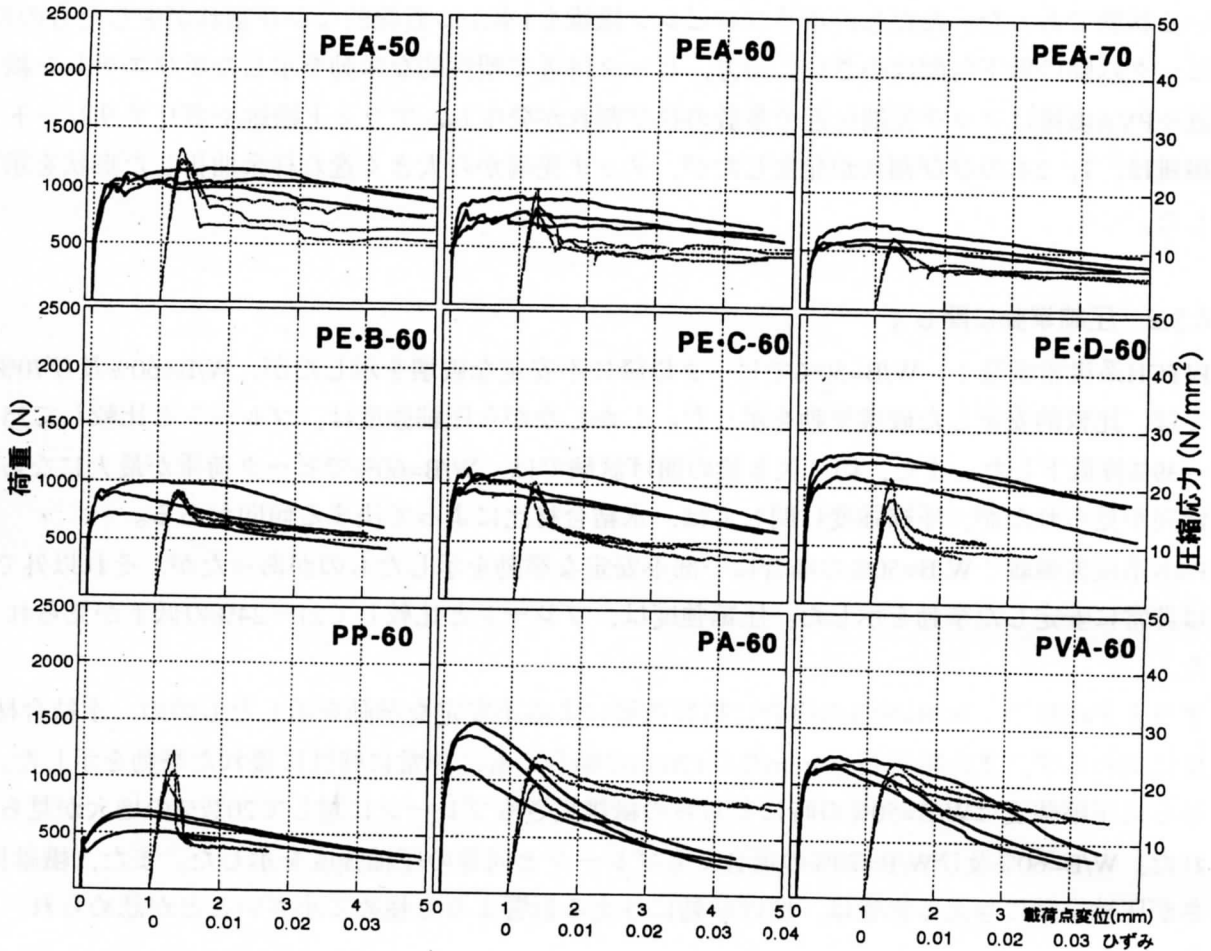


図-4.1 荷重-載荷点変位曲線及び圧縮荷重-ひずみ曲線 (続き)

ポリプロピレン繊維： ひび割れが生じると同時に荷重の低下を示したが、直ぐに繊維の架橋により荷重は増大した。ピーク荷重は比較的低い値をとったが、ピーク以降は、非常になだらかな曲線を描いた。

ポリアリレート繊維： ピーク荷重は比較的高い値を示したが、ピーク以降は安定した挙動を示した。この挙動は、W/B=60%における繊維長さ6mmのアラミド繊維が示した挙動とよく類似している。これは繊維の物理的特性が類似していることがその要因の一つと考えられる。

PVA繊維： その挙動はポリエチレン繊維と同様にピーク付近で塑性的な挙動を示し、また、供試体側面のノッチ先端近辺に複数の細かなひび割れが生じた。しかし、載荷点変位が1mmを越えるとポリエチレン繊維よりも大きな勾配で荷重が低下した。

それぞれの供試体におけるノッチ先端から進展したひび割れ性状をまとめれば、ピーク以

降の荷重の低下勾配が大きいPITCH系炭素繊維、PAN系炭素繊維及びスチール繊維はいずれも1本かつ直線的なひび割れが生じた。特に両炭素繊維は破断し、スチール繊維は引き抜けている状態であった。ただし、ポリプロピレン繊維も1本かつ直線的なひび割れが生じたもののピーク以降の低下勾配は小さい。一方、ピーク付近で塑性的な挙動を示したポリエチレン繊維やPVA繊維はノッチ先端付近で多数のひび割れが発生し、アラミド繊維やポリアリレート繊維は、1、2本のひび割れが発生したが、ノッチ先端から大きく逸れ紆余曲折した形状を示した。

4.3.2 圧縮挙動に関して

PITCH系炭素繊維： W/B=50%でピーク以降に不安定な破壊を示したが、W/B=60%及び70%では、比較的安定した破壊挙動を示した。しかしながら圧縮強度は、プレーンと比較して25～39%程低下した。また、切り欠き梁の曲げ試験では、W/B=60%でピーク荷重が最大になる傾向が見られたが、圧縮強度に関しては、水結合材比によって決まる傾向がある。

PAN系炭素繊維： W/B=50%の場合に一部不安定な挙動を示したものがあったが、それ以外では非常に安定した挙動を示した。圧縮強度は、プレーンと比較して21～24%の低下が見られた。

アラミド繊維： W/B=50%の場合に亀裂進展による不安定な挙動を示したものの、水結合材比に拘わらず、また繊維長さ6mm及び12mmの場合でも、非常に靱性に優れた挙動を示した。さらに圧縮強度はW/B=50%の時にどちらの繊維長さもプレーンに対して20数%の増大が見られた。W/B=60%及びW/B=70%の場合でもプレーンと同等の圧縮強度を示した。また、繊維長さが圧縮挙動に与える影響は、曲げ挙動に与える影響よりも極めて小さいことが認められた。

スチール繊維： 水結合材比に拘わらず、ピーク直後に不安定な破壊挙動を示した。圧縮強度はW/B=50%で数%の増加が見られたが、それ以外の水結合材比では10数%の低下が見られた。

ポリエチレン繊維： ピーク直後に不安定な挙動を示すものが多くあった。圧縮強度はプレーンに対して20～39%の低下割合を示した。また、繊維長さや表面処理の有無が圧縮挙動に与える影響は小さい。

ポリプロピレン繊維： ピーク直後に急激な荷重の低下が見られた。曲げではひび割れ架橋に優れていたものの、圧縮に対してはひび割れを架橋する特性に極めて劣ることが分かった。

ポリアリレート繊維及びPVA繊維： ピーク以降の挙動は、比較的安定したものであった。

圧縮挙動とひび割れ性状との関係をまとめれば、圧縮靱性に劣るシリーズ、例えば、PITCH系炭素繊維、スチール繊維、ポリプロピレン繊維などの破壊性状は、供試体を二つに分断するような斜め亀裂が入るものが多く、一方、圧縮靱性に優れたPAN系炭素繊維、アラミド繊維、ポリアリレート繊維及びPVA繊維などは、供試体中央部でめり込むような状態

で、そして亀甲状の亀裂が発生するようなものであった。これは各繊維のせん断ひび割れに対する抵抗の違いが現れたものと考えられる。

また、繊維によって曲げに対するひび割れ抵抗性能と圧縮に対するひび割れ抵抗性能が異なった。例えば、ポリエチレン繊維は、曲げに対する抵抗力が有効に発揮されたものの、圧縮に対しては繊維の補強効果はあまり現れなかった。一方、アラミド繊維は、圧縮挙動においても韌性に優れた挙動を示した。このように繊維の種類によって曲げと圧縮とでその挙動が異なったのは、曲げでは繊維が主に引き抜かれるのに対し、圧縮ではひび割れがずれるようなせん断型の挙動を示すために、繊維に局所的なせん断が負荷されるメカニズムであったためと考えられる。その結果、圧縮挙動は繊維自体のせん断特性に依存したため、繊維長さや繊維の表面処理の影響が小さくなったものと推察される。このような曲げと圧縮における破壊機構の違いについての解明は今後の課題としたい。

また、ほとんどの繊維で圧縮強度がプレーンよりも大きく低下した理由として、繊維を分散させるために投入した増粘剤の付与により非常に多くの巻き込み空気が混入されたことが挙げられる。

4.4. まとめ

本実験の結果得られた知見を以下にまとめる。

曲げ挙動に関して

- (1)ピーク荷重以降に大きな低下勾配を示した繊維は、PITCH系炭素繊維、PAN系炭素繊維、スチール繊維であった。しかし、両炭素繊維は、比較的高いピーク荷重を示した。
- (2)ピーク荷重付近またはそれ以降にピーク荷重と同程度の荷重を保ちながら変形を示す繊維は、ポリエチレン繊維、PVA繊維であった。
- (3)繊維の長さが長い方が、そして表面処理を施した方が、高いピーク荷重と高いひび割れ抵抗性能を示した。
- (4)水結合材比がピーク荷重や変形性能に与える影響は繊維の種類によって異なる。

圧縮挙動に関して

- (1)圧縮韌性に優れた繊維は、PAN系炭素繊維、アラミド繊維、ポリアリレート繊維及びPVA繊維であった。
- (2)圧縮韌性に劣る繊維はPITCH系炭素繊維、スチール繊維、ポリエチレン繊維、ポリプロピレン繊維であった。
- (3)繊維長さや繊維の表面処理の有無が圧縮挙動に与える影響は小さい。
- (4)圧縮強度は、水結合材比に大きく依存する。

参考文献

- 1) S. Gracia, A.E. Naaman and J. Pera: Experimental investigation on the potential use of poly(vinyl alcohol) short fibers in fiber-reinforced cement-based composites, *Materials and Structures*, Vol. 30, pp.43-52, 1997.
- 2) V.C. Li, D.K. Mishra and H. Wu: Matrix design for pseudo-strain-hardening fiber reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, Vol.28, pp.586-595, 1995.
- 3) V.C. Li and C.K. Leung: Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, *J. Engineering Mechanics*, Vol.118, No.11, pp.2246-2264, 1992.

5章 セメント系複合材料の作製プロセスの検討

5.1 序

一般に、セメント系複合材料の高強度化のためには、水セメント比の低減やシリカフェュームやフライアッシュなどのようなポゾラン反応を示す混和材を混入することが、また、靱性を向上させるためには、繊維を混入することが有効とされている。しかし、その結果、練り混ぜ時のフレッシュ状態のワーカビリティや各材料の分散性が粗悪になり、成型時に粗大な空隙が巻き込まれる可能性が高くなり、期待する性能を出すことが出来ない。従って、たとえ理想とする構造特性を明示できたとしても、その構造を実際に実現できるかどうかは作製プロセスに依存するところが大きい。

本章では、1)押し出し成形および、2)流し込み成形によって、どの程度の軽量、高強度そして高靱性を有するセメント系複合材料の作製が可能かについてを実験的に検討する。

5.2 押し出し成形された繊維補強軽量セメント系複合材料の諸特性

5.2.1 はじめに

押し出し成形が行える材料の条件として、可塑性、つまり、その材料に外力を与えて弾性限界を越えた変形を与えた時、外力を取り除いても歪みそのまま残るといった性質が必要になる。要するに、押し出し成形で作製される製品の形状は、その押し出し機の先端に取り付けられた口金（ダイ）の形状に依存するため、ダイを通り過ぎた後に、歪みの回復が起こり必要とされる寸法・形状にならないと、製品の開発という意味で、無意味なものとなってしまう。

そのような可塑性を示す材料の一つとして、塩化ビニルが挙げられ、実際に種々の製品が多量に作られている。しかしながら、押し出し成形には高度の熟練を要する技巧が必要とされ、試行錯誤的な加工がなされている。また、塩化ビニルだけではなくセメントを主とした材料の押し出し成形においてもその開発は進められているが、同様に押し出し成形に適した可塑性を有する材料や調合の選択には困難を要している。

このような問題を抱えてはいるが、セメント系複合材料の作製プロセスに押し出し成形を利用することで得られる利点は多々ある。守等は、セメント系複合材料の押し出し成形の有効性を下記のように示すと共に、押し出し成形における製造プロセス制御方法を一連の研究^{2)~7)}により実験的に明らかにしている。

- 1)混練水量の小さいセメント系材料を緻密化することにより曲げ強度の大きい材料・部材を得ることができる。
- 2)製造が連続的に実施されるので製造工場を自動化・省人化へと適合させやすい。
- 3)ダイ（口金）の開口形状を選択することにより、様々な断面形状をもつ部材の製造が可能である。

4)材料・調合の選択により焼成セラミックスの曲げ比強度に匹敵する材料・部材を焼成せずして製造できるので、寸法精度の良い長尺製品を容易に得ることが出来る。

5)空洞構造を含む各種断面形状の選択により曲げ比強度の飛躍的な改善が可能であるので、部材の飛躍的な軽量化のみならず施工の合理化に貢献できる。

5.2.2 押し出し成形実験の概要

5.2.2.1 はじめに

セメント、シリカフェームそして中空軽量骨材の構成割合を、Leeの充填理論（第3章参照）に従い幾つか選定し、それに対してポリプロピレン繊維を4vol.%及び6vol.%混入したものを作製した。また、養生方法は、湿空養生を行った後にオートクレーブ養生を行ったものと湿空養生のみを行ったものとを用意した。ただし、オートクレーブ養生はポリプロピレン繊維の融点より低い温度で行った。以上のような条件の下に試験体を作製し、その強度特性、曲げ変形性能及びひび割れ抵抗性能について実験的に検討を行った。

5.2.2.2 実験方法

a) 使用材料

使用した材料は以下に示す通りである。

セメント : 早強ポルトランドセメント (比重:3.14)

混和材 : シリカフェーム (比重:2.20、エルケムマイクロシリカ940U-7)

骨材 : 中空軽量骨材 (比重:0.7)

繊維 : ポリプロピレン繊維 (比重:0.91、寸法:φ40μm×6mm、引張強度: 482MPa
弾性係数: 2.61GPa)

混和剤 : 高性能減水剤 (比重:1.1、主成分:アミノスルホン酸系高分子化合物)

成形助剤 : メチルセルロース (比重:1.27)

b) 調合

試験体の作製にあたり、各粉体の混入割合は以下の方法によって選定した。

(i). 粒子の平均粒径及び単一粒子の充填率の算出

本実験で用いたセメント、シリカフェーム並びに軽量骨材の比重と平均粒径は、各販売業者から送付された試験表の値を用いた。粒子の充填率は、JIS A 1104(骨材の単位容積重量及び実績率試験方法)に従い求めた。その結果をまとめて表5.2.1に示す。

表5.2.1 各粉体の比重、平均粒径及び充填率

	比重	平均粒径(μm)	充填率
軽量骨材	0.7	115	0.6284
セメント	3.14	13.68	0.4171
シリカフューム	2.20	0.15	0.1886

(ii) 2成分系における充填特性の算出

次に各2成分の充填特性を求める。ここで、Lサイズを中空軽量骨材、Mサイズをセメント、Sサイズをシリカフュームとした。

中空軽量骨材及びセメントの充填率はそれぞれ0.6284、0.4171であることから、この2成分系で最も高い充填率を示す場合の大きい方の粒子の体積比、 $X_{L,max}$ は、2章の(1)式から次のように求められる。

$$X_{L,max} = \phi_L / (\phi_L + \phi_S - \phi_L \times \phi_S) = 0.6284 / (0.6284 + 0.4171 - 0.6284 \times 0.4171) = 0.802$$

ただし、 $X_{L,max}$ ：中空軽量骨材の体積比、 Φ_L ：中空軽量骨材の充填率、 ϕ_S ：セメント粒子の充填率。

また、このときの充填率はMcGarlyの実験値（図3.2）より粒径の比から推測され、

$$dL/dM = 115/13.68 = 8.41$$

従って、充填率 ≈ 0.8156 となる。従って、L-M系の充填特性は、図5.2.1のようになる。

L-S系、M-S系についても同様な作業を行った結果を図5.2.2、図5.2.3に示す。

こうして得られた3つの系の充填マップから、 Φ_{LM} 、 Φ_{ML} 、 Φ_{LS} 、 Φ_{SL} 、 Φ_{MS} 、 Φ_{SM} の6つの係数が求められ、これらの係数を(3.6)、(3.7)、(3.8)式に代入し、 X_L 、 X_M 、 X_S のそれぞれの値が $X_L + X_M + X_S = 1.0$ となるようにパラメトリックに変えることにより、図5.2.4に示すような3成分系の充填マップが得られる。

表5.2.2 選択された各マトリックスにおける各粉体の体積割合、充填率及び単位容積質量

マトリックスの種類	セメント	シリカフューム	軽量骨材	充填率	単位容積質量* (kg/m ³)
A	0.2	0.05	0.75	0.891	1.23
B	0.2	0.2	0.6	0.784	1.38
C	0.3	0.1	0.6	0.866	1.50

* 空隙が水で埋まるものと仮定した場合の単位容積質量

今回選択したマトリックスの調査は、図5.2.4及び表5.2.2中に示すようにA,B,Cの3種類とした。A調査は、充填率が最も高い。しかしながら、骨材の割合が高いため、単位容積質

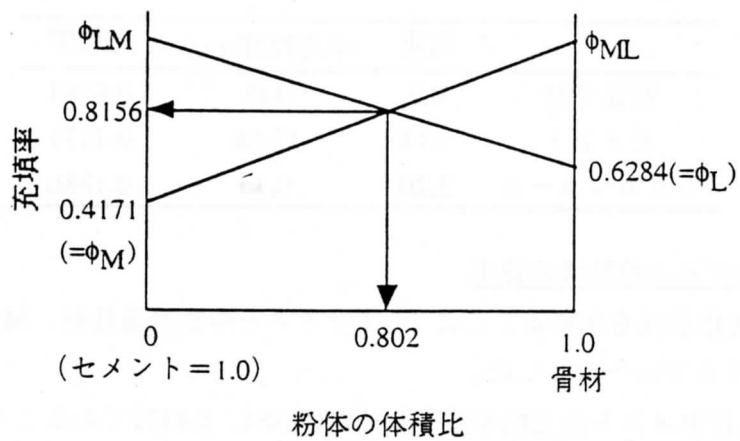


図5.2.1 L-M系における充填マップ

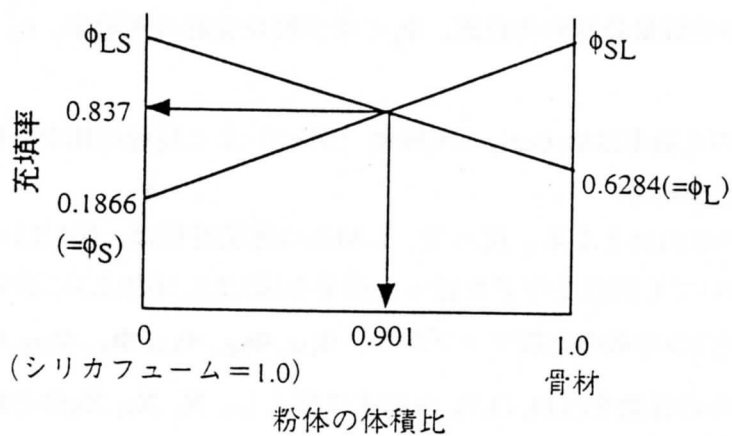


図5.2.2 L-S系における充填マップ

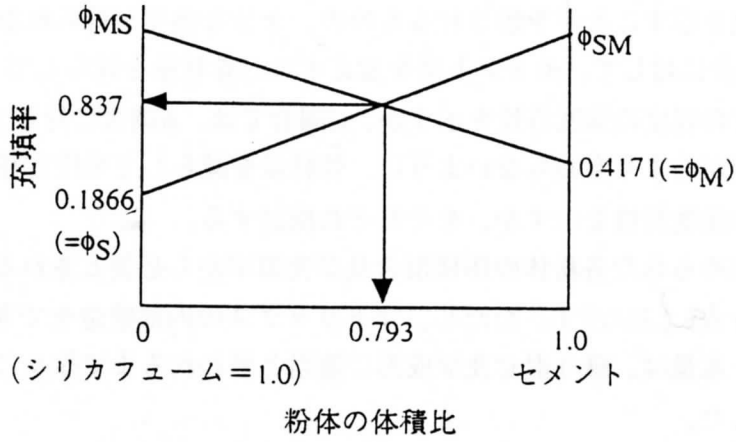
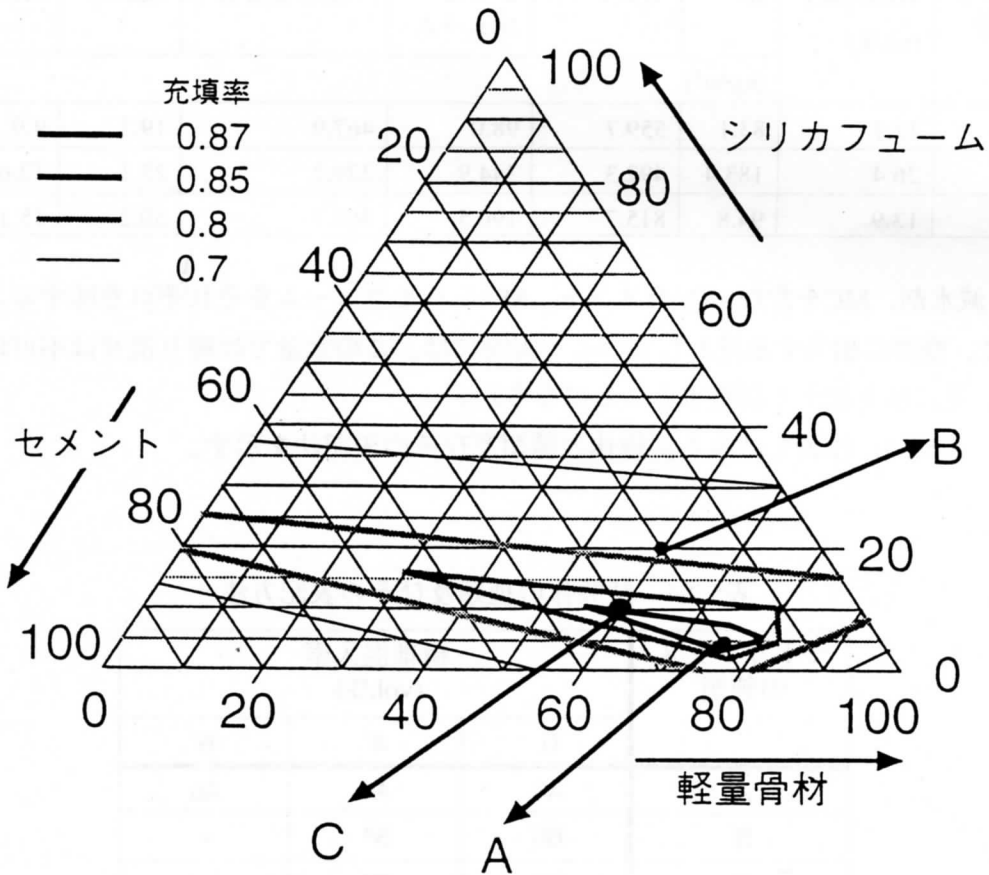


図5.2.3 M-S系における充填マップ



A→セメント:シリカフェーム:軽量骨材=2:0.5:7.5

B→セメント:シリカフェーム:軽量骨材=2:2:6

C→セメント:シリカフェーム:軽量骨材=3:1:6

図5.2.4 セメント-シリカフェーム-軽量骨材の3成分系における充填マップ

量は最も低い値を示すことが予想されるものの、十分な強度が得られない可能性がある。B調合では、A調合に対して、セメント量を変えずに、骨材量を減らして単位容積質量を大きくした場合にどの程度の強度特性を示すか、C調合では、A調合に対してセメントとシリカフュームの割合があまり変わらないように、骨材量を減らして単位容積質量を大きくした場合にどの程度の強度特性を示すか、をそれぞれ検討する。

表5.2.2から求められた各粉体の体積割合及び充填率から必要とされる各粉体の単位体積当たりの質量を表5.2.3に示す。ただし、マトリックスの内部構造をできる限り緻密に保ちたいことから、水量は、練り混ぜ及び成形に適当と思われるまで徐々に加えることにより決定することとした。

表5.2.3 各マトリックスにおける単位容積質量

マトリックスの種類	W/(C+SF) (wt.%)	水*	セメント	シリカ フューム	中空軽量骨材	減水剤	MC	total
		(kg/m ³)						
A	17.1	83.1	559.7	98.0	467.9	19.7	9.9	1,238
B	26.4	183.4	492.3	344.9	329.2	25.1	12.6	1,386
C	13.9	94.8	815.7	190.5	363.7	30.2	15.1	1,510

W: 水、減水剤、MCを含む、C: セメント、SF: シリカフュームをそれぞれ意味する。

* 水量は、空隙に相当する量としている（実際には、この水量では練り混ぜは不可能であったため、更に水を加えて調整することになる）。

また、表5.2.4に作製を試みる試験体の種類及びその表記法を示す。

表5.2.4 試験体の種類及びその表記方法

マトリックス の種類	繊維混入率 (vol.%)		
	0	4	6
A	A0	A4	A6
B	B0	B4	-
C	C0	C4	-

c) 試験体の作製

試験体の作製は、新日本製鐵株式会社で行われた。以下に、練り混ぜ手順を記述する。

セメント、シリカフューム、メチルセルロースを3分間空練りし、水と減水剤を投入し、4

分間練り混ぜる。その後、繊維を投入し4分、最後に所要の骨材を投入後さらに、4分間練り混ぜ、押し出し成形を行う。

しかしながら、表5.2.4に示すような理想とされる調合では十分に練り混ぜるには水量が不足したため、練り混ぜられるまで水と減水剤をさらに添加した。その結果得られた最終的な調合を表5.2.5に示す。また、繊維を混入していないA0, B0及びC0のものは、せん断力の不足により、押し出し成形は不可能であった。

試験体は、15mmx40mmx170mmの板状の試験体及びφ50mmx100mmの円柱試験体を各試験体種類当たり12本ずつ作製した。

表5.2.5 練り混ぜ及び成形に必要とされた各試験体種類の単位容積質量と水結合材比

種類	W/(C+SF) (wt.%)	水	セメント	SF	軽量骨材	繊維	減水剤	MC	total
		(kg/m ³)							
A4	60.8	238.1	422.8	74.0	353.5	28.6	56.4	7.5	1,181
B4	45.9	271.6	409.3	286.8	273.8	31.5	37.1	10.5	1,321
C4	46.4	251.6	599.3	140.0	267.1	27.9	80.2	11.1	1,377
A6	60.8	234.1	415.7	72.9	347.5	43.1	55.8	7.3	1,176

d) 養生方法

押し出し成形後、作製された全ての試験体種類に対し、湿空養生を施し、24時間後、以下の2つの養生方法に分けて養生を行った。

1. 150℃で8時間オートクレーブ養生を施し、材令7日まで湿空養生を行う、
2. そのまま材令7日まで湿空養生を行う

尚、試験は、上記の7日間の養生が終了した後、試験体はシールされたままで、試験日まで恒温恒湿室（温度20℃、相対湿度49%）の中で保存した。

e) 載荷試験方法

円柱試験体について

作製した6本の試験体の内、3本を圧縮試験に、残りの3本を割裂引張試験に用いた。また、載荷する前に全ての円柱試験体について、縦振動の一次共鳴振動数を測定し動弾性係数を測定した。圧縮試験は、長さ30mmの歪みゲージを貼り付け、載荷速度約3kgf/cm²/sにて行い、応力-歪み曲線を測定し、圧縮強度並びに静弾性係数を測定した。割裂引張試験については、載荷速度約5kgf/cm²/minとして載荷し、引張強度を測定した。

板状試験体について

作製した6本の板状の試験体の内、3本を図5.2.5のように設置し、スパンを160mm、載荷速度を0.5mm/minとして載荷し、荷重－載荷点変位の関係及び曲げ強度を測定した。そして、残り3本は、試験前日に試験体中央に20mmの切り欠きを設け、スパン150mm、載荷速度を0.2mm/minとして載荷し、荷重－載荷点変位、ひび割れ肩口開口変位(CMOD)そしてひび割れ先端開口変位(CTOD)を測定した(図5.2.6)。

5.2.2.3 実験結果及び考察

円柱試験体から求められた単位容積質量、動・静弾性係数、割裂引張強度、圧縮強度、及び板状試験体から求められた曲げ強度の結果を図5.2.7に、単位容積質量と動弾性係数との関係を図5.2.8に、各試験体の比強度を図5.2.9に、曲げ試験における荷重－載荷点変位曲線を図5.2.10に、切り欠き梁の曲げ試験における荷重－CMOD曲線を図5.2.11に、CTOD－J積分値曲線を図5.2.12にそれぞれ示す。

尚、図中においてACと記述してあるのはオートクレーブ養生を、ACが記述されていないものは湿空養生のみを行ったことを意味する。

1) 単位容積質量に関して

投入された材料のトータルの単位容積質量と実際に押し出し成形された試験体の単位容積質量とは、マトリックスの調合によってかなりの違いが見られた。A4シリーズやA6シリーズでは、投入量から計算された単位容積質量に対して、養生後の実際の試験体の単位容積質量は、およそ1.2倍程度の値をとった。しかしながら、B4シリーズでは、ほぼ同一の値をとった。従って、マトリックスの粉体の構成比で異なるものの、ニーダーによる練り混ぜや押し出し成形される過程に於いて、マトリックスの内部構造が変えられたと考えられる。一方、A4シリーズとA6シリーズとで比較した場合、比重の小さい繊維の混入率が增大したにも拘わらず、実際の作製された試験体の単位容積質量は増加した。従って、繊維の混入量も、マトリックスの内部構造に変化をもたらすものと推察される。

養生の違いに於いては、オートクレーブ養生を行ったものの方が、行わないものよりも若干高い値を示した。これは、オートクレーブ養生により水和反応が促進され、内部構造が緻密化されたことがその要因と考えられる。

2) 動弾性係数及び静弾性係数に関して

それらの大きさは、単位容積質量と同じような傾向を示した。従って、単位容積質量と動弾性係数並びに静弾性係数との間には高い相関関係があるものと予想できる。それらの関係を図5.2.8に示す。その結果、それらの関係は試験体種類に依らずある直線上に集中しているのが認められ、動弾性係数は、単位容積質量が1.3～1.5t/m³の範囲で14～16GPaの値をと

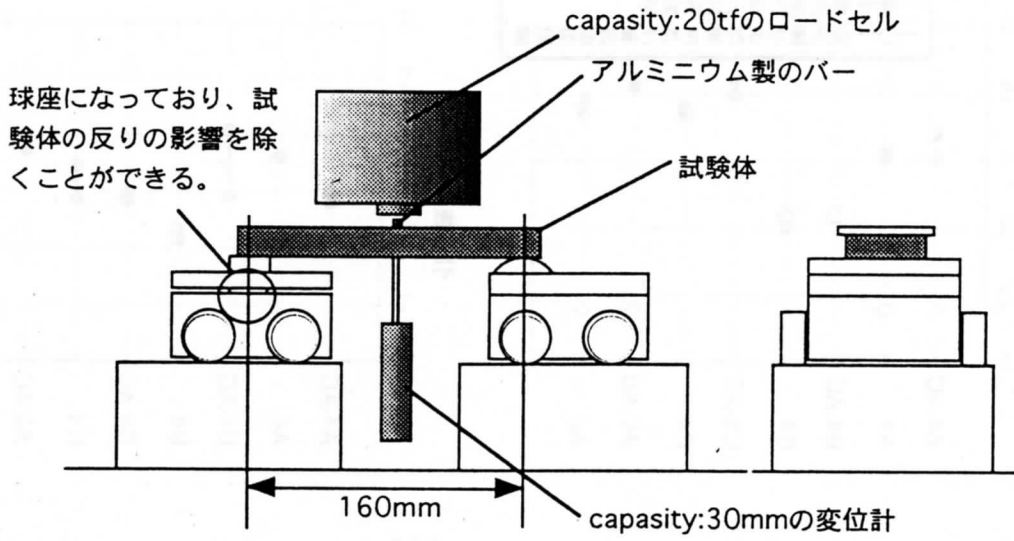


図5.2.5 曲げ試験略図

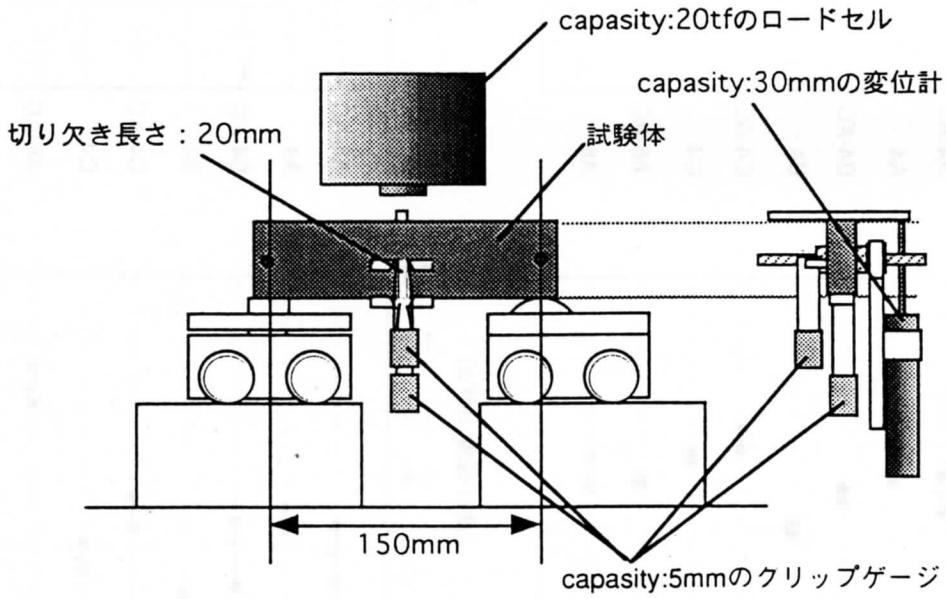


図5.2.6 切り欠き梁曲げ試験略図

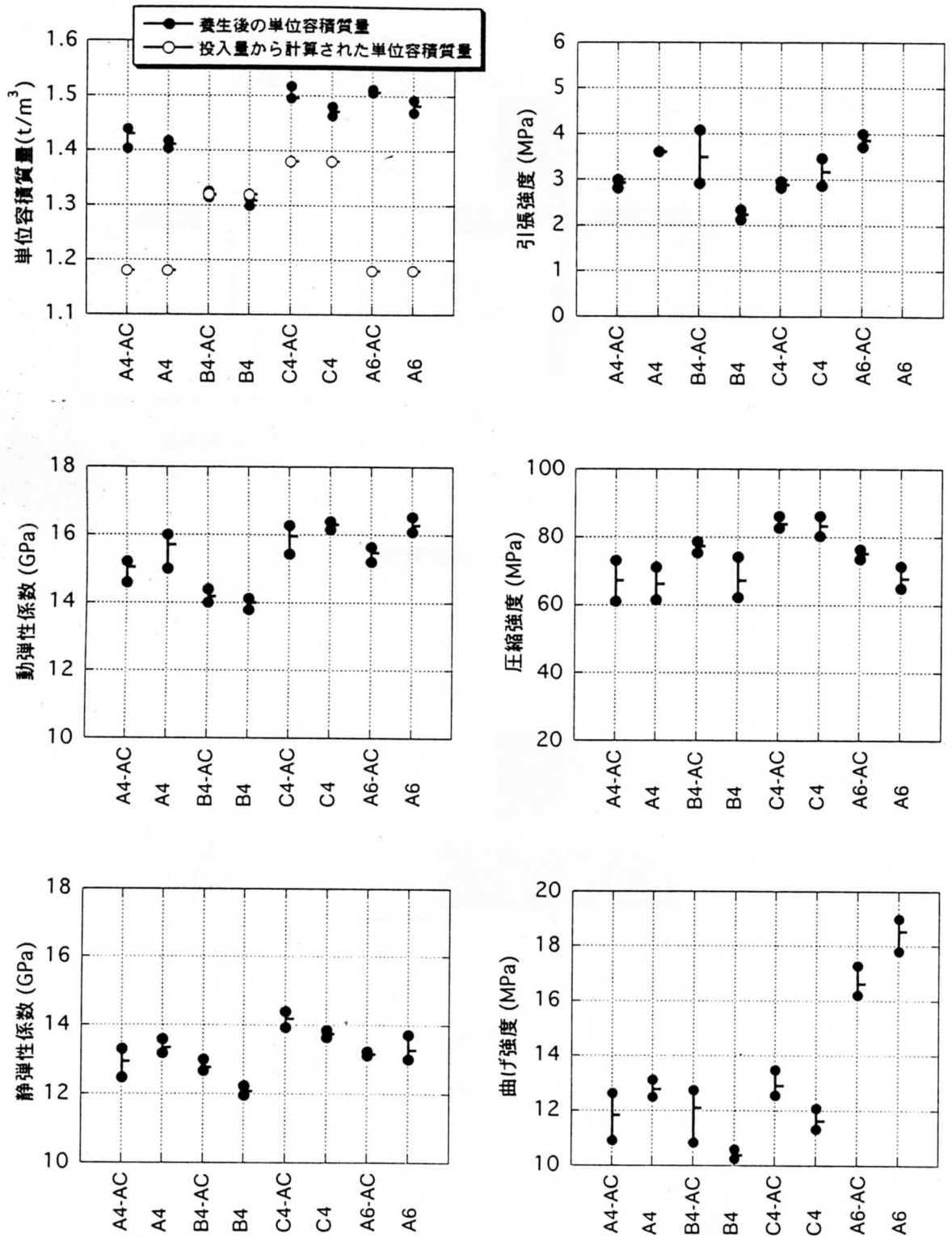


図5.2.7 各試験体における単位容積質量、静・動弾性係数、割裂引張強度、圧縮強度及び曲げ強度

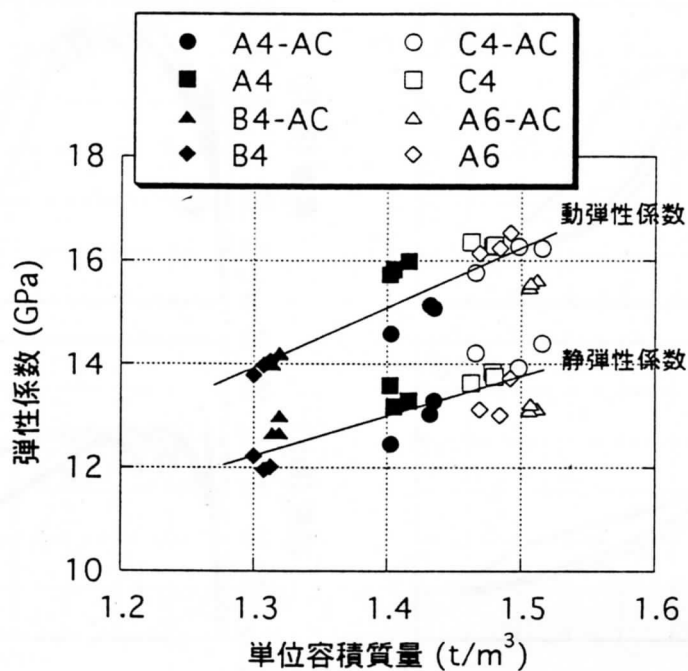


図5.2.8 単位容積質量と動・静弾性係数との関係

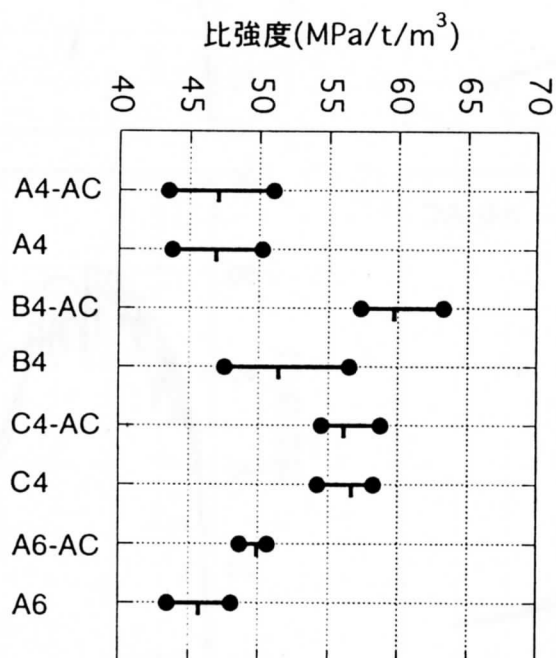


図5.2.9 各試験体における比強度 (圧縮強度/単位容積質量)

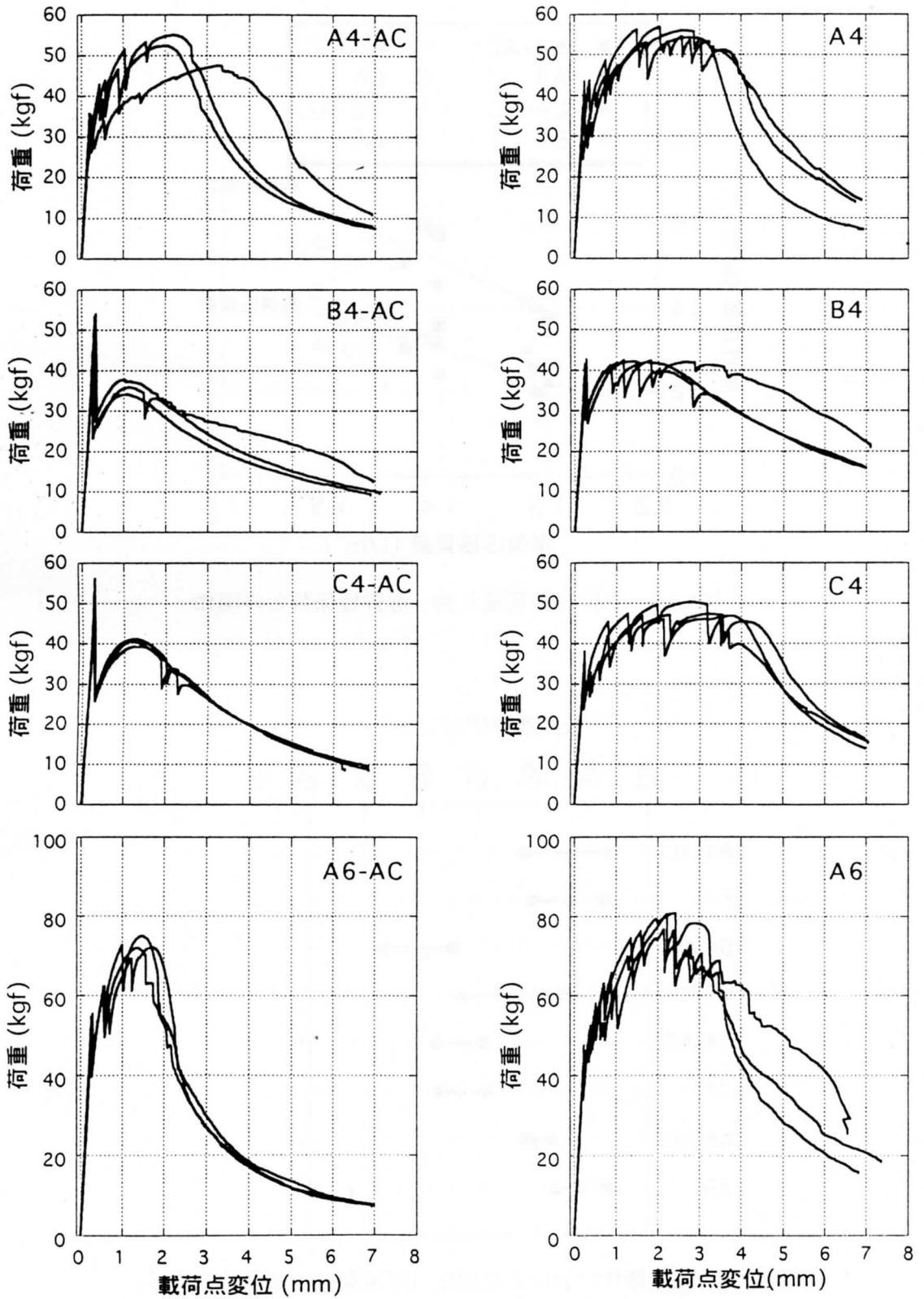


図5.2.10 曲げ試験における各試験体の荷重-載荷点変位曲線

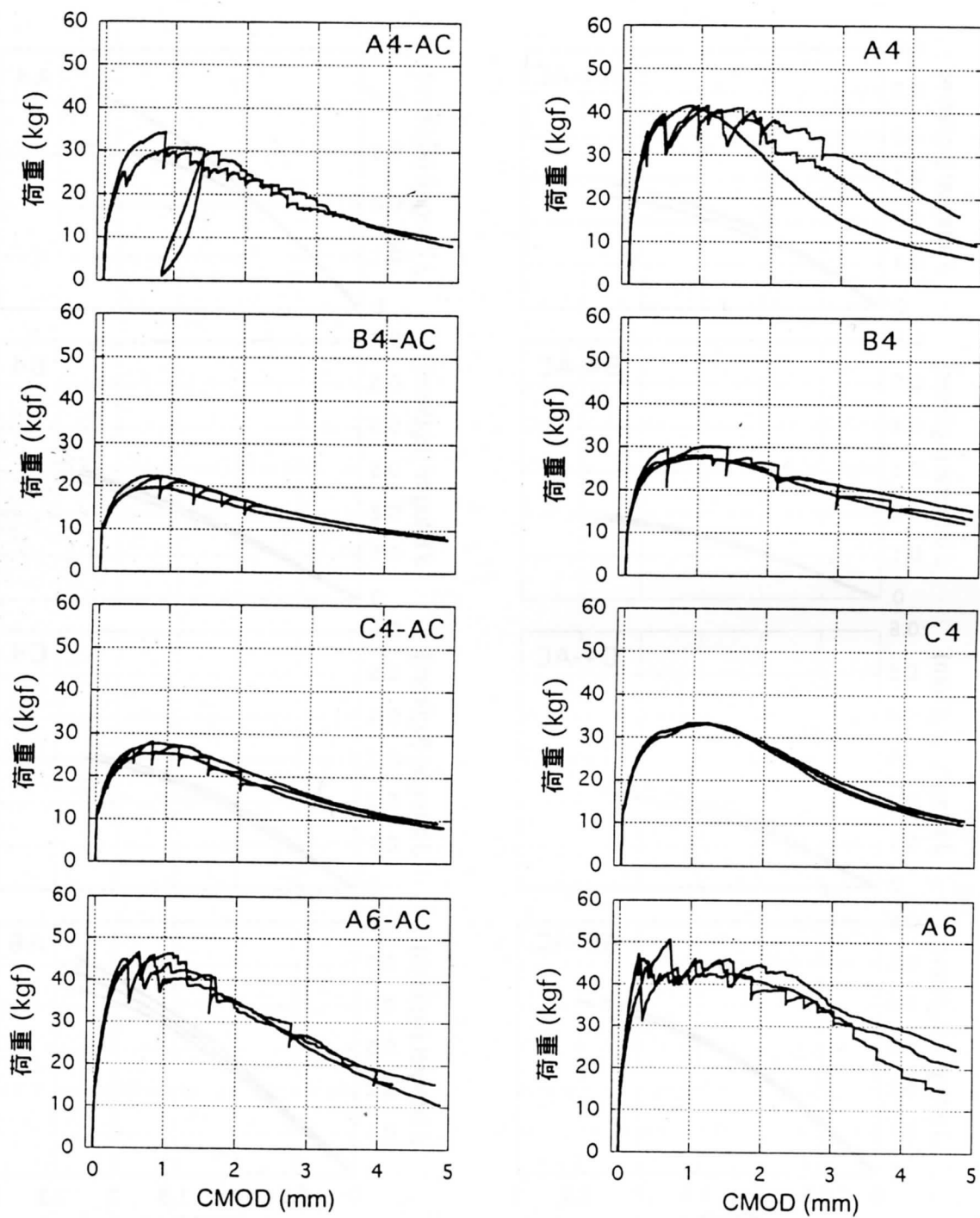


図5.2.11 切り欠き梁の曲げ試験における各試験体の荷重-CMOD曲線

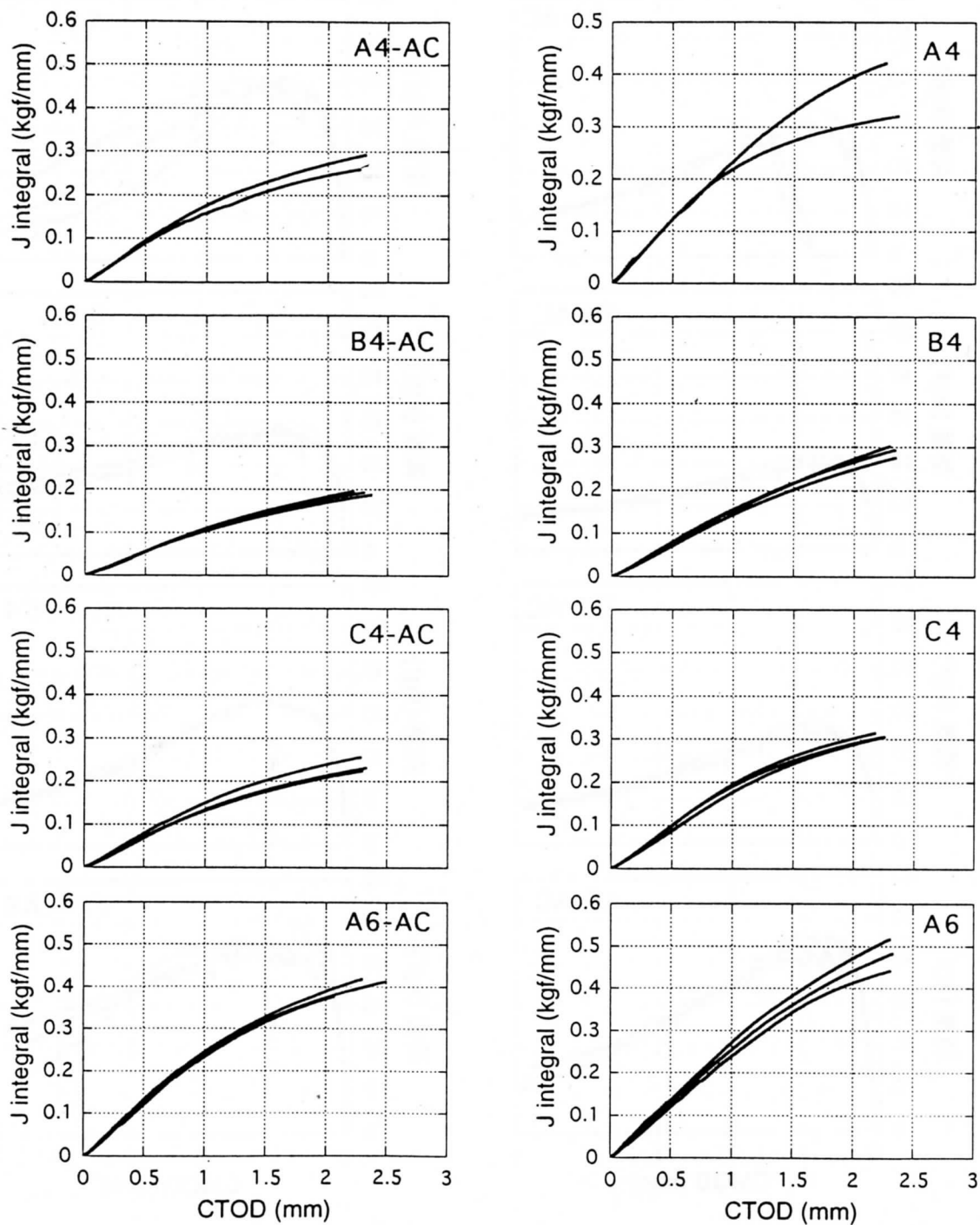


図5.2.12 切り欠き梁の曲げ試験における各試験体のJ積分値-CTOD曲線

り、一方、静弾性係数は、12~14GPaの値をとることが示された。

3) 割裂引張強度、圧縮強度及び比強度に関して

割裂引張試験は、載荷中に試験機の針が一瞬戻ったその時の荷重値を用いて算出した。しかし、中には試験機の針が戻ることなく、円柱試験体のひび割れ抵抗機構が引張から圧縮に移行してしまい、適切な引張強度を求められなかったものも多々あった。従って、その計測方法については問題があるため、ここでは参考値として扱うに留める。

圧縮強度は、どのシリーズも60MPaを越える、非常に高強度なものとなった。各シリーズの水結合材比は、A4シリーズが60.8%と最も高く、B4,C4シリーズは、それぞれ45.9%,46.4%と比較的低い値をとっている。しかし、そのような水結合材比の違いが明確に圧縮強度に反映されてはいない。特にB4、B4-ACは、他のシリーズに比べて単位容積質量が低いにも拘わらず、比較的高い圧縮強度を示した。そこで、比強度で評価してみると、B4-ACが最も優れていることが認められた。また、B4シリーズに於いて、オートクレーブ養生による圧縮強度の増加割合が高く出たのは、シリカフェームの混入率が他の調合と比べて高かったためと思われる。

4) 曲げ強度について

A4-AC,B4-AC,C4-AC並びにA4,B4,C4とで同一繊維混入率におけるマトリックスの影響を見る。はじめにオートクレーブ養生を行ったものでは、C4-ACが最も高い曲げ強度を示し、次にB4-AC、そしてA4-ACという順になった。これは、圧縮強度で示した傾向と類似している。一方、オートクレーブ養生を行わなかったものに関しては、水結合材比が最も高かったA4が最も高い曲げ強度を示し、続いてC4,B4という順序であった。このような違いは、曲げ変形挙動の影響を大きく受けており、そのことについては、次項で考察することとする。

養生方法の違いに関しては、以下のような違いが見られた。B4,C4シリーズでは、オートクレーブ養生を行ったものの方が、非常に大きな曲げ強度を示した。一方、A4,A6シリーズでは、オートクレーブ養生を行わなかったものの方が、高い曲げ強度を示した。このような違いは、圧縮強度についても記述したように、シリカフェームの置換率の大きさが影響しているものと思われる。

また、A4シリーズとA6シリーズとを比較すると繊維の混入率の増加は、曲げ強度を増加させる上で、非常に大きな貢献を示すことが明らかとなった。

5) 曲げ変形挙動に関して

曲げ変形挙動は、全てのシリーズに於いて養生方法によりその挙動は大きく異なった。まずオートクレーブ養生を行ったものに関して記述する。B4-AC,C4-ACでは、初ひび割れが発生した荷重値は、A4-ACに比べて非常に高い値をとったが、その後、急激かつ大きな抵抗力の低下を示した。以降、40kgf程度まで抵抗力が回復するものの、そのピークを過ぎるとな

だらかに軟化する挙動を示した。一方、A4-ACは、30～35kgf程度で初ひび割れが生じたが、B4-AC,C4-ACのような大きな抵抗力の低下は見られず、載荷点変位が2mm程度でピークを迎え、それ以降なだらかに軟化する挙動を示した。ところが、オートクレーブ養生を行わなかったものは、特にB4シリーズやC4シリーズに於いて、オートクレーブ養生を行ったものと大きな違いが見られた。つまり、B4,C4は、B4-AC,C4-ACと比べて、初ひび割れ時の荷重が大きく低下するが、その後の挙動は、非常に高い変形性能を示した。マトリックスによる違いを比較すれば、A調合が最も優れた曲げ変形性能を示したことが確認できた。

このような曲げ変形性能の大きさは、ひび割れの発生状況と良く対応していることが認められる。つまり、高い変形性能を示したA4,A4-AC,B4-AC,C4-ACは、複数のひび割れが生じ、B4,C4は一本のひび割れしか生じていない。ただし、A6については、高い変形性能を示したのにも拘わらず、複数のひび割れは見られなかった。従って、この結果のみを見れば複数ひび割れは、高い変形性能を実現させる十分条件ではあるが、必要条件ではないのかもしれない。

6) ひび割れ抵抗性能に関して

ここでは、切り欠きを設けた試験体の曲げ試験の結果について考察する。また、この試験では、予め試験体に切り欠きを設けているため、その荷重-CMOD曲線から得られる性能をひび割れ抵抗性能と称することとする。

おおよそ全てのシリーズにおいて、荷重値がおおよそ10kgfを越えたところで曲線の傾きが変わっているため、この時に初ひび割れが生じているものと推測される。しかし、曲げ試験で見られたような不安定なひび割れ進展は、どのシリーズに於いても見られなかった。しかし、養生、調合、繊維混入率の違いがひび割れ進展挙動に及ぼす影響は、曲げ試験で得られた結果と非常に類似している。また、ひび割れ性状においては、A4,A4-AC,A6,A6-ACの試験体の一部でひび割れの分散や分岐が見られ、ひび割れ抵抗性能の大きさと対応していることが認められた。

あるCTODに対応する載荷点変位を求め、その載荷点変位までの荷重-載荷点変位曲線に囲まれた面積をリガメント面積で除した値をJ積分値とする。即ちこれがひび割れ進展における破壊エネルギー量の累積経時変化と理解できる(図5.2.12)。例えば、CTODが2mmまでのJ積分値を見れば、その値はA6が最も高いことが分かる。

5.2.2.4 まとめ

本項の実験結果は、以下のようにまとめられる。

- 1)押し出し成形後の試験体の単位容積質量は、マトリックスによっては、投入した材料のトータルの単位容積質量と全く異なる値を示した。従って、押し出し成形では充填理論から求められる内部構造を実現することは難しいと思われる。
- 2)圧縮強度において、マトリックスの種類の影響を見れば、C4シリーズが高い傾向に

あったが、比強度（圧縮強度／単位容積質量）で評価してみれば、B4-ACが最も優れた結果となった。

3)ひび割れ抵抗性能は、繊維混入率を6%、そしてオートクレーブ養生を行わず、湿空養生のみを行ったものが最も高い値を示した。

4)オートクレーブ養生は、マトリックスの強度特性を増加させるが、ひび割れ抵抗性能に関しては、むしろ低下させる傾向にある。

5.3 流し込み成形実験の概要

5.3.1 はじめに

前項の押し出し成形実験において比較的優れた調合であると判断されたものに対して、成形方法を押し出し成形から流し込みによる方法に変えて作製し、成形方法の違いが強度特性、曲げ変形性能及びひび割れ抵抗性能に及ぼす影響について検討した。ただし、養生方法は全て湿空養生とした。

5.3.2 実験方法

a) 使用材料

使用した材料は以下に示す通りである。

セメント : 早強ポルトランドセメント (比重:3.14)

混和材 : シリカフェーム (比重:2.20、エルケムマイクロシリカ940U-7)

骨材 : 中空軽量骨材 (比重:0.7)

繊維 : ポリプロピレン繊維(比重:0.91、寸法:φ40μm×6mm、引張強度: 482MPa、弾性係数: 2.61GPa)

混和剤 : 高性能減水剤 (比重:1.1、主成分:アミノスルホン酸系高分子化合物)

b) 調合

マトリックスの調合は、押し出し成形試験（実験1）で選択したA、Bシリーズ（表5.2.2参照）を用意した。繊維との組み合わせは、表5.3.1に示す通りである。A4とB4とで押し出し成形されたものと比較を行い、B6とB4とで繊維混入率の影響を検討する。

表5.3.1 マトリックスと繊維の組み合わせ及びその表記方法

マトリックスの種類	繊維混入率 (vol.%)		
	0	4	6
A	A0	A4	-
B	B0	B4	B6

c) 試験体の作製

容量5リットルのオムニミキサーを用いて練り混ぜを行った。練り混ぜの手順は、セメント、シリカフューム及び中空軽量骨材をミキサーに投入し1分間空練りを行い、その後、練り混ぜ及び打ち込みが可能となるまで、結合材（セメントとシリカフュームを加えた）重量の3%に相当する減水剤と水を少量ずつ加えて練り混ぜた。その結果、必要とされた各使用材料の単位容積質量と結果的に得られた水結合材比を表5.2.7に示す。

表5.3.2 練り混ぜ及び成形に必要とされた各シリーズに単位容積質量と水結合材比

種類	W/(C+SF) (wt.%)	水	セメント	SF	軽量骨材	繊維	減水剤	Total
		(kg/m ³)						
A0	51.8	261.0	454.9	79.7	380.3	-	16.0	1,191
A4	66.8	306.2	408.4	71.5	341.4	27.6	14.4	1,170
B0	31.1	225.7	472.5	331.1	316.0	-	24.1	1,369
B4	36.1	246.1	437.4	306.5	292.6	33.7	22.3	1,339
B6	36.1	241.4	429.0	300.6	286.9	50.6	21.9	1,330
B6'	41.1	268.1	413.9	290.0	276.8	48.8	21.1	1,319

B6'は、B6において締め固めが不良と思われたため、W/(C+SF)を変えて再度作製を試みたものである。

試験体は、各シリーズについて、φ5×10cmの円柱試験体を6本、15×40×160cmの板状試験体を3本作製した。

d) 養生

7日間湿空養生（20℃、90R.H.%以上）を行ったあと、試験まで恒温室にて静置した。

e) 載荷試験方法

載荷試験は、押し出し成形実験と同様である。ただし、静弾性係数の測定や曲げ試験は行わなかった。

5.3.3 実験結果及び考察

円柱試験体から求められた単位容積質量、動弾性係数、割裂引張強度、及び圧縮強度の結果を図5.3.1に、単位容積質量と動弾性係数との関係を図5.3.2に、各試験体の比強度を図5.3.3に、切り欠き梁の曲げ試験における荷重-CMOD曲線を図5.3.4にそれぞれ示す。

押し出し成形実験で得られた結果と比較しながら、成型方法の違いによる影響を検討する。

1) 単位容積質量に関して

流し込みによる成型方法は、押し出し成型方法とは異なり、ある水量以上でその成型は可能となる。従って、押し出し成型のように、セメントモルタルにあるせん断力が働かないと成型ができないということはない。こうして、本実験では、繊維無混入のシリーズの作製が可能となった。流し込み成型に必要とされる水量は、A0以外は、押し出し成型に比べて少ない量となった。しかしながら、その軽さのために打ち込みや締め固めが十分でなく、粗大な空隙の混入が懸念される。実際に投入量から計算される単位容積質量は計測された値に比べて高い値をとっているため、空隙を含んでいる可能性がある。しかし、押し出し成型された試験体で得られた結果と比べれば、計算された単位容積質量と硬化後のそれとは、ほぼ同じ値をとったと言える。従って、押し出し成型によって内部構造が大きく変えられることが、この結果からも明らかとなった。

2) 動弾性係数に関して

単位容積質量が低く抑えられた結果、動弾性係数は押し出し成型されたものに比べて低い値をとった。単位容積質量と動弾性係数をプロットすれば、図5.3.2のようになる。

3) 引張強度及び圧縮強度に関して

繊維が混入されていないシリーズでは、割裂引張強度は明確に求められる。その結果、圧縮強度が非常に高い一方で、引張強度はかなり低いことが明らかとなった。一方、疑似歪み硬化を生じさせるためには、概してマトリックスの引張強度が低いことが必要とされる。従って、このような素材を用いることは、高圧縮強度かつ高靱性なセメント系複合材料の開発への大きな貢献に繋がると考えられる。

比強度（圧縮強度／単位容積質量）について、押し出し成型されたものと比較するためにB4に着目する。押し出し成型されたものと流し込み成型されたものとは、水結合材比の値が異なっているが、単位容積質量が同程度なので十分に比較対象になる。その結果、押し出し成型されたものの方が、流し込み成型されたものよりも6.5%大きな値を示した。

4) ひび割れ抵抗性能に関して

繊維が混入されていないものは、繊維を混入したものに比べて、極めて低いひび割れ抵抗性能を示した。A4とB4とを比較すると、水結合材比は、A4の方が、B4に比べて約30%も高い。しかし、A4とB4のひび割れ抵抗性能は、両者ともばらつきが大きいものの、ほとんど変わりがないと言える。従って、繊維補強複合体の初ひび割れ強度はマトリックスの強度に大きく依存するものの、その後のひび割れに抵抗する繊維の引き抜き抵抗力は、マトリックスの強度に係わらずある一定の値をとると推察される。しかし、そのひび割れ性状を見れば、B4にはひび割れの分岐が見られたが、A4にはそれが見られなかった。従って、その変形挙動が酷似していても、破壊性状は異なる可能性があることを示している。

B4とB6とで繊維の混入率の影響を見れば、明らかに繊維混入率の高いB6が高いひび割れ抵抗性能を示す結果となった。ひび割れ性状を見れば明らかなように、B4ではひび割れが分岐するという現象を示したが、B6では細かいひび割れが平衡に多数発生する複数ひび割れ現象が現れた。

B6は、B6の試験体作製に於いて、その締め固めが不十分で粗大な空隙が混入されているという懸念があったため、水結合材比を5%割り増しして作りなおしたものである。その結果、水を加えても更に高いひび割れ抵抗性能を示すものが現れた。これは、ひび割れ性状を見る限りでは、どちらも微細なひび割れが発生しており、その違いは認められないが、水結合材比を大きくしてマトリックスの強度を落とした結果、ひび割れの分散を一層促進させたためではないかと思われる。

押し出し成形されたA4,B4と流し込み成形されたA4,B4とを比較する。A4,B4どちらの場合も、水結合材比は異なるものの、そのひび割れ抵抗性能は押し出し成形したものの方が、極めて優れた性状を示した。また、流し込みを行った方は、ばらつきが大きい。

以上から、押し出し成形を行うことで、流し込み成形より優れたひび割れ抵抗性能や品質を兼ね備えるセメント系複合材料を作製できることが確認された。ただし、流し込み成形においても繊維の混入量を高くすることで複数ひび割れを引き起こす高いひび割れ抵抗性能を有するものが作製できることも確認された。

5.2.3.4 まとめ

以上の結果から、作製プロセスの影響については以下のようにまとめられる。

- 1)作製されたマトリックスは圧縮強度が非常に高い一方で、引張強度はかなり低いことが明らかとなった。一方、疑似歪み硬化を生じさせるためには、概してマトリックスの引張強度が低いことが必要とされる。従って、このようなマトリックスを用いることは、高圧縮強度かつ高靱性な軽量セメント系複合材料の開発への大きな貢献に繋がると考えられる。
- 2)流し込みによる成形は、押し出し成形のようにある程度の粘性を必要とすることがないため、試験体の作製が容易である。しかし、強度特性、ひび割れ抵抗性能、並びに品質の点で押し出し成形の方が、非常に優れた性能を示すことが確認された。

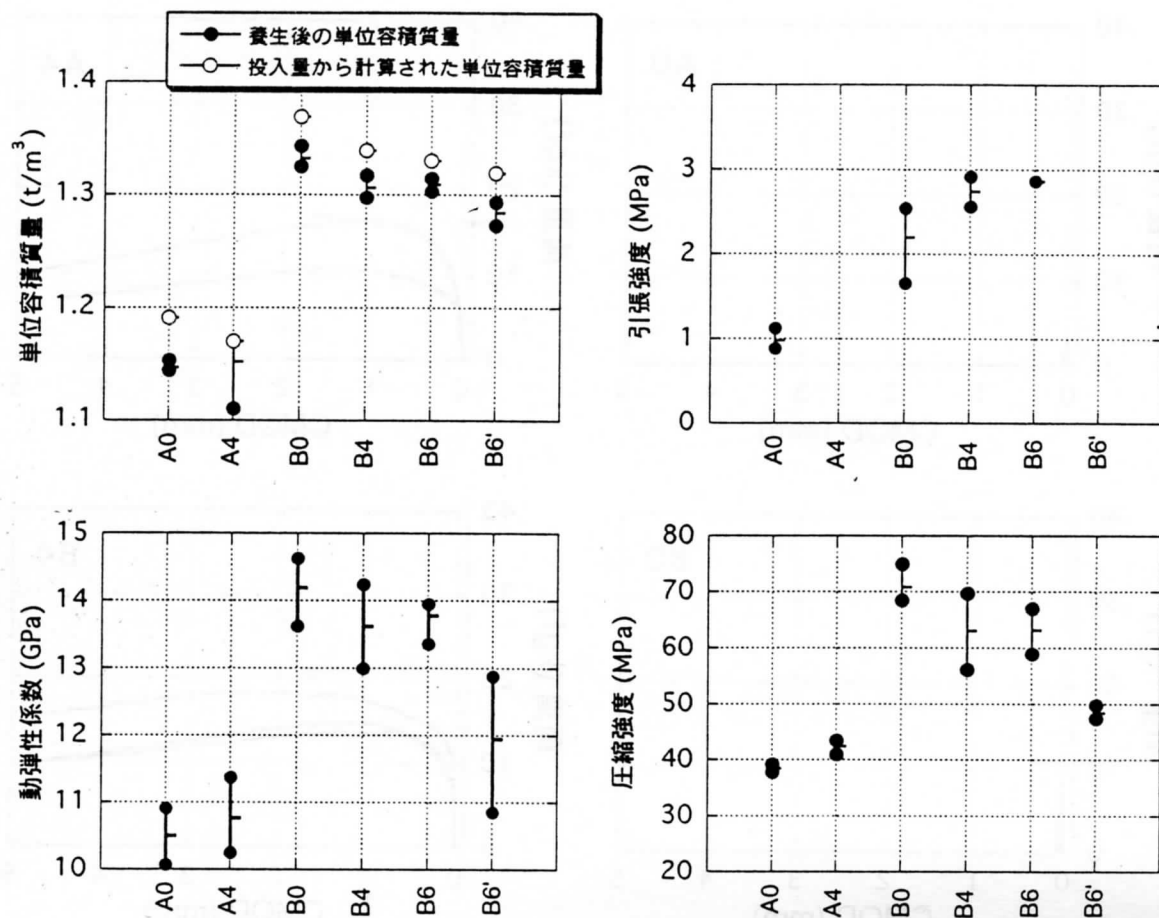


図5.3.1 各試験体における単位容積質量、動弾性係数、割裂引張強度及び圧縮強度

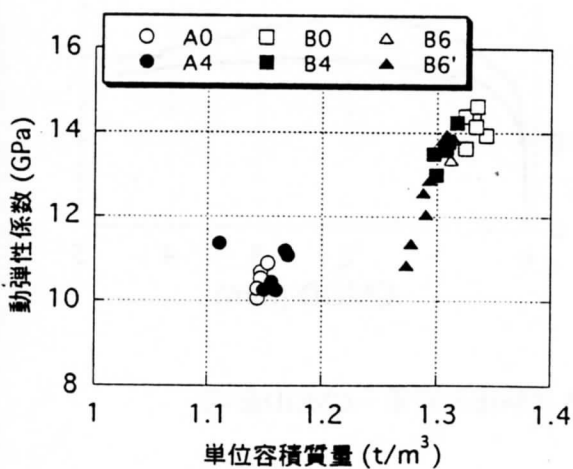


図5.3.2 単位容積質量と動弾性係数との関係

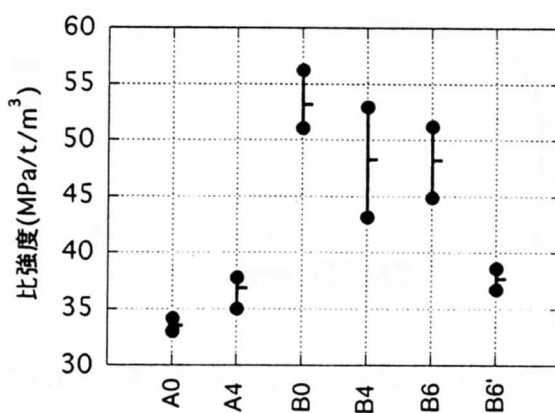


図5.3.3 各試験体における比強度 (圧縮強度/単位容積質量)

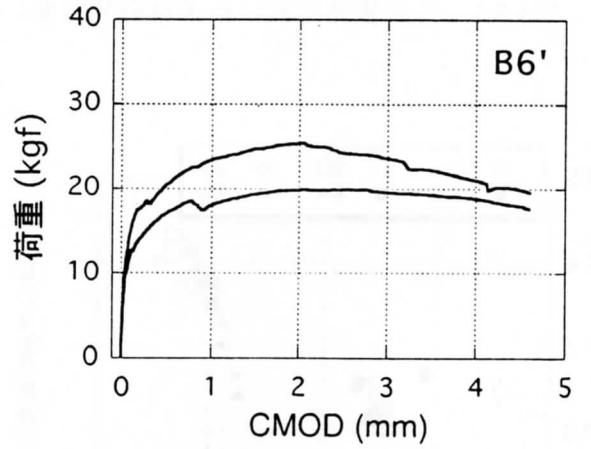
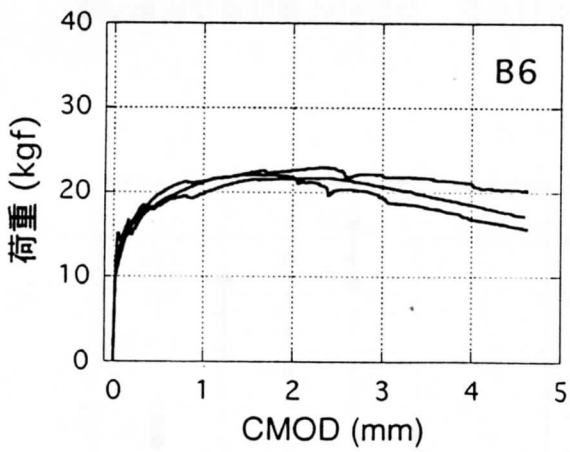
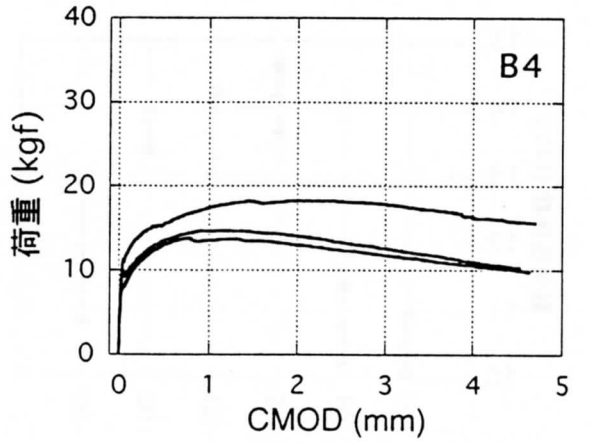
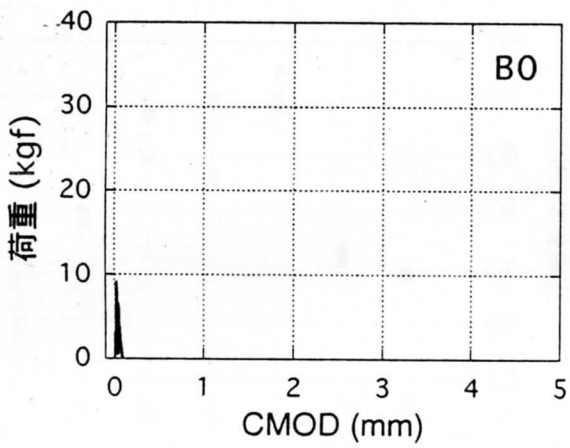
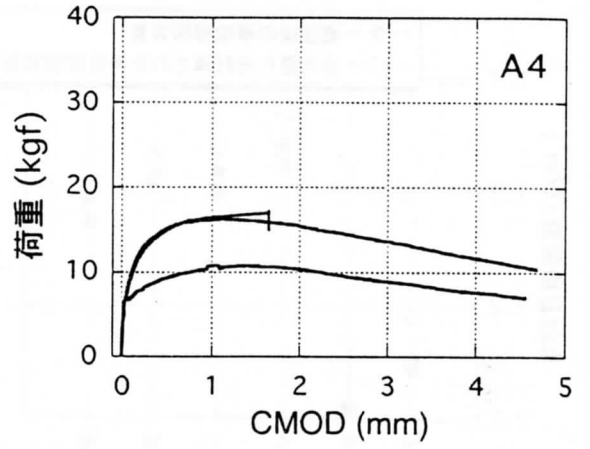
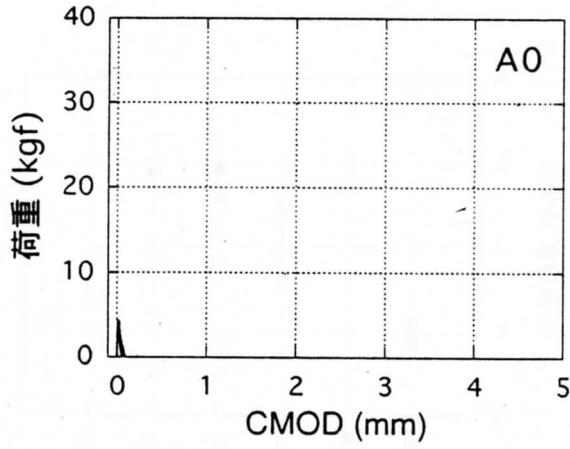


図5.3.4 切り欠き梁の曲げ試験における各試験体の荷重-CMOD曲線

6章 重回帰分析を用いた性能評価式と材料設計

6.1 序

繊維補強複合材料の引張挙動もしくは曲げ挙動は、繊維やマトリックスの特性のみならず、繊維とマトリックスの界面特性によっても大きな影響を受ける。従って単純なモデルによる材料の諸性能の評価には限界がある。

そこで、本章では繊維の各種パラメータとモルタルマトリックスの各種パラメータ、並びにそれらに対して切り欠き梁の曲げ試験から計測された荷重-載荷点変位曲線の形状から抽出した5つのパラメータ（図6.1参照）との対応をそれぞれ重回帰分析を用いて解析する。そして、繊維補強モルタルの曲げ挙動に影響を及ぼすパラメータを、Liのマイクロメカニクスモデルと比較検討することによって明らかにする。尚、重回帰分析はマイクロソフト社のエクセルアドインソフト「エクセル統計 ver.1.1」を用いて行った。

6.2 解析方法

繊維及びモルタルマトリックスのパラメータは、以下に示す13個を抽出した。

繊維に関するパラメータ

- d_f : 繊維の直径
- d_f^2 : 繊維の断面積に相当
- d_f^4 及び $d_f^4 E_f$: 繊維の曲げ剛性に相当
- L_f : 繊維の長さ
- L_f/d_f : アスペクト比
- $L_f d_f$: 繊維の表面積に相当
- f_t : 繊維の引張強度
- E_f : 繊維の剛性

モルタルマトリックスに関するパラメータ

- $f_{c,m}$: モルタルマトリックスの圧縮強度
- $f_{t,m}$: モルタルマトリックスの割裂引張強度
- E_m : モルタルマトリックスの静弾性係数
- K_{IC} : モルタルマトリックスの破壊靱性値

目的関数とするパラメータ

図6.1に示した次の5つの値を目的関数とした。

- P_{max} : 切り欠き梁の曲げ試験から得られた荷重-載荷点変位曲線の最大荷重
 d_{max} : P_{max} 時の載荷点変位
 W_{pe} : 最大荷重までの荷重-載荷点変位曲線下の面積をリガメント面積で割った値
 θ : 最大荷重値とその90%に相当する最大荷重値以降の点とを結ぶ軟化勾配
 $W_{0.9^2}/W_{pe}$: 最大荷重に到達して以降に吸収する破壊エネルギーを W_{pe} との相対値として定量化する靱性パラメータ

各シリーズにおける繊維のパラメータ、モルタルマトリックスのパラメータ及び目的関数の値を表6.1に示す。

6.3 解析結果及び考察

全てのパラメータに対して得られた相関行列を表6.2に示す。

1) P_{max} に関して

表6.2の相関行列により、 P_{max} に対して最も高い相関を示したものは繊維の引張強度 f_t であった。相関係数が0.4以上のものを示すパラメータは、 f_t の0.62、 $L_f \cdot d_f$ の-0.48、 d_f の-0.47 として L_f/d_f の0.47という4つであった。ここで L_f のマイクロメカニクスモデルから構築されたブリッジング応力とひび割れ幅との関係におけるピーク値 σ_0 とそのときのひび割れ幅 δ_0 は、各々(6.1)、(6.2)式で与えられる。

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} g \tau V_f \left(\frac{L_f}{d_f} \right) \quad (6.1)$$

$$\delta_0 = \frac{\tau L_f^2}{(1 + \eta) E_f d_f} \quad (6.2)$$

ただし、 g : スナッピング係数、 τ : 繊維とマトリックスの摩擦強度、 V_f : 繊維の混入率、 L_f , d_f , E_f : それぞれ繊維の長さ、直径、剛性、 $\eta = (V_f E_f / V_m E_m)$ 、 V_m , E_m : それぞれマトリックスの体積比 ($1 - V_f$)、マトリックスの剛性。

表6.1 各試験体における目的関数と繊維のパラメータ及びモルタルマトリックスのパラメータ

繊維の種類	試験体の番号	目的関数					繊維に関するパラメータ					マトリックスに関するパラメータ							
		F _{max} (kgf)	W _{pe} (kJ/m ²)	d _{max} (mm)	W _{0.9} (kJ/m ²)	d _{0.9} (mm)	df (mm)	df ² (mm ²)	df ⁴ (mm ⁴)	(df ² /E)f (mm ² Pa)	Lf (mm)	Lf/df (mm ²)	L ² df (mm ²)	ft (MPa)	Ef (GPa)	f _{c,m} (MPa)	f _{t,m} (MPa)	E _m (GPa)	K _{ic} (MPa m ^{0.5})
PITCH系カーボン	PIT-50	151.03	0.109	0.111	0.200	0.188	0.017	0.000289	8.352E-08	15868.99	18	1059	0.3060	1900	190	31.35	2.75	15.18	0.294
	PIT-60	164.55	0.159	0.150	0.261	0.229	0.017	0.000289	8.352E-08	15868.99	18	1059	0.3060	1900	190	27.00	2.59	12.97	0.228
	PIT-70	129.07	0.166	0.200	0.311	0.345	0.017	0.000289	8.352E-08	15868.99	18	1059	0.3060	1900	190	18.10	1.93	8.91	0.190
PAN系カーボン	PAN-50	165.17	0.214	0.186	0.359	0.296	0.007	0.000049	2.401E-09	564.235	6	857	0.0420	4410	235	31.35	2.75	15.18	0.294
	PAN-60	188.00	0.234	0.234	0.513	0.374	0.007	0.000049	2.401E-09	564.235	6	857	0.0420	4410	235	27.00	2.59	12.97	0.228
	PAN-70	148.42	0.256	0.256	0.477	0.452	0.007	0.000049	2.401E-09	564.235	6	857	0.0420	4410	235	18.10	1.93	8.91	0.190
アラミド	ARA6-50	145.10	0.238	0.237	0.672	0.622	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	6	500	0.0720	3400	72.5	31.35	2.75	15.18	0.294
	ARA6-60	133.97	0.266	0.278	0.541	0.536	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	6	500	0.0720	3400	72.5	27.00	2.59	12.97	0.228
	ARA6-70	132.13	0.345	0.362	0.762	0.764	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	6	500	0.0720	3400	72.5	18.10	1.93	8.91	0.190
ARA12-50	ARA12-50	196.03	0.690	0.493	1.416	0.956	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	12	1000	0.1440	3400	72.5	31.35	2.75	15.18	0.294
	ARA12-60	195.12	1.032	0.699	2.039	1.348	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	12	1000	0.1440	3400	72.5	27.00	2.59	12.97	0.228
	ARA12-70	151.88	0.712	0.606	1.235	1.235	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	12	1000	0.1440	3400	72.5	18.10	1.93	8.91	0.190
ARA18-60	ARA18-60	224.15	1.233	0.735	2.588	1.461	0.012	0.000144	2.074E-08	1503.36	18	1500	0.2160	3400	72.5	27.00	2.59	12.97	0.228
	STE6-50	112.05	0.049	0.070	0.148	0.181	0.1	0.01	0.0001	24000000	6	60	0.6000	980	240	31.35	2.75	15.18	0.294
	STE6-60	85.42	0.035	0.060	0.098	0.150	0.1	0.01	0.0001	24000000	6	60	0.6000	980	240	27.00	2.59	12.97	0.228
STE6-70	STE6-70	72.80	0.030	0.068	0.094	0.184	0.1	0.01	0.0001	24000000	6	60	0.6000	980	240	18.10	1.93	8.91	0.190
	STE3-50	126.13	0.063	0.101	0.141	0.180	0.05	0.0025	6.25E-06	1500000	3	60	0.1500	980	240	31.35	2.75	15.18	0.294
	STE3-60	93.75	0.029	0.065	0.085	0.131	0.05	0.0025	6.25E-06	1500000	3	60	0.1500	980	240	27.00	2.59	12.97	0.228
STE3-70	STE3-70	76.27	0.029	0.063	0.060	0.115	0.05	0.0025	6.25E-06	1500000	3	60	0.1500	980	240	18.10	1.93	8.91	0.190
	PE*A-50	110.47	0.856	1.038	2.867	3.367	0.038	0.001444	2.085E-06	250216.32	12.7	334	0.4826	2700	120	31.35	2.75	15.18	0.294
	PE*A-60	86.57	0.490	0.765	1.174	1.763	0.038	0.001444	2.085E-06	250216.32	12.7	334	0.4826	2700	120	27.00	2.59	12.97	0.228
PE*A-70	PE*A-70	65.60	0.330	0.681	0.913	1.860	0.038	0.001444	2.085E-06	250216.32	12.7	334	0.4826	2700	120	18.10	1.93	8.91	0.190
	PE*B-60	88.93	0.423	0.598	1.164	1.644	0.012	0.000144	2.074E-08	2032.128	12	1000	0.1440	2940	98	27.00	2.59	12.97	0.228
	PE*C-60	108.87	0.433	0.545	1.401	1.695	0.012	0.000144	2.074E-08	2032.128	12	1000	0.1440	2940	98	27.00	2.59	12.97	0.228
PE*D-60	PE*D-60	123.30	0.583	0.631	2.143	2.242	0.012	0.000144	2.074E-08	1575.936	15	1250	0.1800	2940	98	27.00	2.59	12.97	0.228
	PE*E-60	81.33	0.197	0.333	0.640	1.037	0.012	0.000144	2.074E-08	2032.128	18	1500	0.2160	2940	98	27.00	2.59	12.97	0.228
	PE*F-60	119.98	0.585	0.686	1.918	2.027	0.012	0.000144	2.074E-08	1575.936	18	1500	0.2160	2940	98	27.00	2.59	12.97	0.228
PE*G-60	PE*G-60	78.21	0.192	0.355	0.727	1.203	0.012	0.000144	2.074E-08	2695.68	15	1250	0.1800	3560	130	27.00	2.59	12.97	0.228
	PE*H-60	106.09	0.491	0.635	1.582	1.582	0.021	0.000441	1.945E-07	17114.328	15	714	0.3150	3230	88	27.00	2.59	12.97	0.228
	PE*I-60	75.17	0.349	0.653	0.838	1.472	0.021	0.000441	1.945E-07	3500.658	15	714	0.3150	1090	18	27.00	2.59	12.97	0.228
ポリプロピレン	PP6-60	56.67	0.201	0.479	0.558	1.283	0.04	0.0016	2.56E-06	6681.6	6	150	0.2400	482	2.61	27.00	2.59	12.97	0.228
	PP12-60	63.39	0.384	0.851	0.800	1.698	0.04	0.0016	2.56E-06	6681.6	12	300	0.4800	482	2.61	27.00	2.59	12.97	0.228
	PP18-60	68.74	0.518	1.070	1.207	2.352	0.04	0.0016	2.56E-06	6681.6	18	450	0.7200	482	2.61	27.00	2.59	12.97	0.228
ポリリート	PA-60	135.03	0.389	0.394	0.829	0.799	0.016	0.000256	6.554E-08	4915.2	6	375	0.0960	3234	75	27.00	2.59	12.97	0.228
	PVA5-60	104.22	0.339	0.435	0.951	1.189	0.014	0.000196	3.842E-08	1763.2944	5	357	0.0700	2156	45.9	27.00	2.59	12.97	0.228
	PVA12-60	121.83	0.514	0.568	1.310	1.393	0.037	0.001354	1.894E-06	86196.401	12	326	0.4416	1960	47	27.00	2.59	12.97	0.228
PVA15-60	PVA15-60	111.49	0.631	0.800	1.916	2.269	0.037	0.001354	1.894E-06	86196.401	15	408	0.5520	1960	47	27.00	2.59	12.97	0.228
	PVA18-60	99.68	0.826	1.036	1.433	1.730	0.037	0.001354	1.894E-06	86196.401	18	489	0.6624	1960	47	27.00	2.59	12.97	0.228

表6.2 5つのパラメータを各々目的関数とした場合の相関行列

	explanation variable													
	on fiber										on matrix			
	d_f	d_f^2	d_f^4	$d_f^4 E_f$	L_f	L_f/d_f	$L_f \times d_f$	f_t	E_f	$f_{c,m}$	$f_{t,m}$	E_m	K_{IC}	
d_f	1.00													
d_f^2	0.96	1.00												
d_f^4	0.87	0.97	1.00											
$d_f^4 E_f$	0.86	0.97	1.00	1.00										
L_f	-0.33	-0.35	-0.32	-0.32	1.00									
L_f/d_f	-0.71	-0.58	-0.44	-0.42	0.66	1.00								
$L_f \times d_f$	0.68	0.58	0.49	0.47	0.35	-0.39	1.00							
f_t	-0.69	-0.54	-0.40	-0.39	0.03	0.56	-0.60	1.00						
E_f	0.38	0.46	0.46	0.48	-0.42	-0.17	-0.09	0.02	1.00					
$f_{c,m}$	-0.04	-0.05	-0.05	-0.05	0.08	0.05	0.02	-0.02	-0.12	1.00				
$f_{t,m}$	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	0.13	0.08	0.04	-0.04	-0.20	0.98	1.00			
E_m	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	0.07	0.04	0.02	-0.02	-0.11	1.00	0.98	1.00		
K_{IC}	0.03	0.04	0.04	0.04	-0.06	-0.04	-0.02	0.02	0.10	0.89	0.79	0.90	1.00	
P_{max}	-0.47	-0.34	-0.23	-0.22	0.04	0.47	-0.48	0.62	0.14	0.19	0.15	0.20	0.28	
d_{max}	-0.23	-0.35	-0.40	-0.42	0.56	0.15	0.38	0.02	-0.76	0.10	0.16	0.08	-0.08	
W_{PE}	-0.37	-0.39	-0.37	-0.38	0.49	0.38	0.07	0.33	-0.59	0.12	0.16	0.11	0.00	
θ	0.16	0.19	0.18	0.19	-0.31	-0.12	-0.19	-0.11	0.79	0.09	0.01	0.10	0.26	
$W_{0.9}^2/W_{PE}$	-0.28	-0.31	-0.30	-0.31	0.47	0.35	0.10	0.23	-0.49	0.22	0.26	0.21	0.10	

この値が、実験により得られた P_{max} と対応があるものとして、(6.1)式と得られた相関係数の結果との関係を考察する。 g 及び τ は、マトリックスに埋め込まれた1本の繊維を引き抜くという特殊な実験から得られるパラメータである。また、 V_f は、全てのシリーズに於いて3%一定としてある。従って、 g や τ を無視すれば σ_0 は、 L_f/d_f の増大によって増加する傾向を示すものと期待される。実際に重回帰分析によって得られた P_{max} に対する L_f/d_f の相関係数は、0.47と比較的高い値を取っており、(6.1)式は、実際の現象とよく対応しているものと思われる。また、特に L_f/d_f は、繊維長さよりも繊維の直径の影響を大きく受けていることが、 P_{max} に対する L_f や d_f の相関係数から理解できる。また、 $L_f \cdot d_f$ の相関係数が高くなったのは d_f の影響によるものと考えられる。つまり、 d_f が小さくなることで繊維とモルタルマトリックスとの接触する総表面積が増大し、その結果、繊維からマトリックスへの力の伝達が改善され、 P_{max} が増加したものと推察される。

一方、 P_{max} との相関が最も高く現れたのは、(6.1)式には含まれていない繊維の引張強度 f_t である。(6.1)式に繊維の引張強度が含まれないのは、(6.1)式は繊維が引き抜かれるという前提で構築されているため、繊維の引張強度を考慮していないからである。しかし、実際には、種々の繊維を用いた場合には、全ての繊維について繊維が引き抜ける挙動になっているとは限らず、繊維が破断しているケースも勿論あり得る。つまり、 P_{max} が繊維の引張強度と高い相関を得たのは、繊維が破断しているという現象を捉えたものと推察される。また、その傾向は、マトリックスの緻密化と関連があると考えられるが、実際にはマトリックスの破壊靱性値 K_{IC} で0.28という相関係数を得られた他は、マトリックスの諸特性に対しては低い相関係数を示した。

以上から、荷重-載荷点変位曲線のピークを増加させるには、引張強度が高く、かつ繊維の直径がなるべく小さいものを用いることが有効であると判断できる。

各パラメータの偏回帰係数と各パラメータの値を掛け合わせるにより算出される目的関数の値(推定値)と実験により得られた目的関数値(実験値)との関係を図6.2に示す。得られた重相関係数は、0.748という値をとった。推定値に対して大きな実験値を示したのはアラミド繊維が多く、一方、推定値に対して小さな実験値を示したのはポリエチレン繊維が多かった。これは、ポリエチレン繊維が、比較的高い引張強度や剛性を保持しながら、低い最大荷重、 P_{max} を示した、つまり、繊維とマトリックスとの付着が小さかったことがその要因の一つと思われる。

2) W_{pe} に関して

表6.2の相関行列より W_{pe} に対して最も高い相関係数を示したのは、繊維の剛性、 E_f であった。ただし、-0.59と負の相関であるため、繊維の剛性が小さければ小さいほど、 W_{pe} が大き

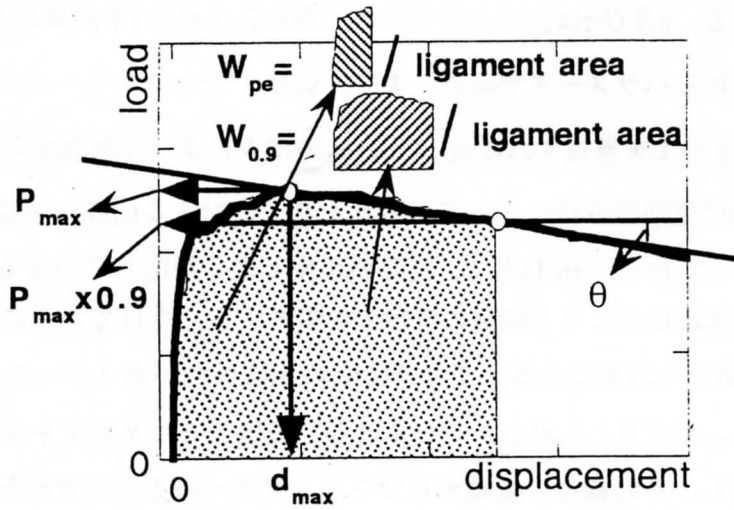


図6.1 繊維補強セメント系複合材の強度及び靱性性能パラメータ

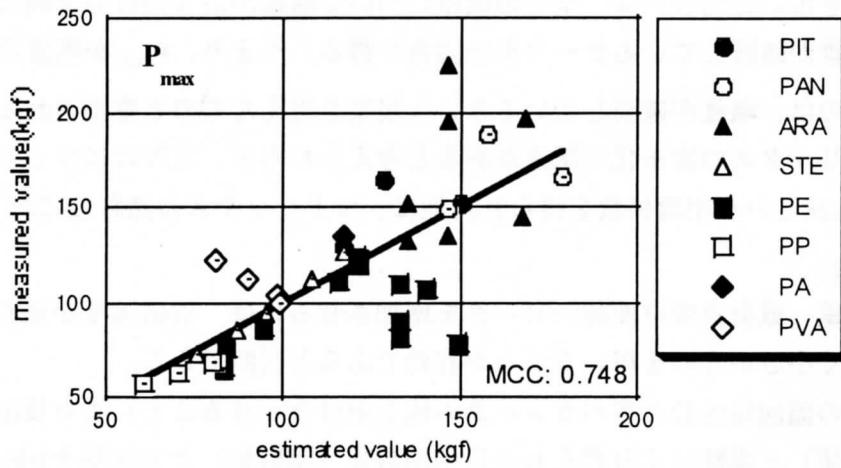


図6.2 P_{max} に関する推定値と実験値の関係

くなるという傾向を示す。次に大きな相関を示したのが、繊維長さ, L_f の0.49、そして繊維の直径の2乗, d_f^2 の-0.39である。一方、Li¹⁾のマイクロメカニクスモデルによる繊維のブリッジング応力のピークに至るまでの吸収エネルギー, G_r は、次式のように表される。

$$G_r = \frac{5}{12} \frac{g\tau^2 V_f L_f}{(1+\eta) E_f} \left(\frac{L_f}{d_f} \right)^2 \quad (6.3)$$

ただし、 $\eta = (V_f E_f) / \{(1 - V_f) E_m\}$ であり、 E_m はマトリックスの剛性である。

ここに示した値が、 W_{pe} と対応するものとして考察をする。 g 、 τ そして V_f については、前述した通りである。(6.3)式から、 G_r は、 L_f 、 L_f/d_f や E_m の増加、もしくは、 E_f の減少に伴って増加する傾向にあることが期待される。実際に、 W_{pe} に対する E_f の相関が、負の高い相関を示し、また、 W_{pe} に対する L_f や L_f/d_f の相関が、正の相関を示したことから、得られた相関係数は、このLiのモデルとよく対応した結果であることが示された。

推定値と実験値との関係を図6.3に示す。重相関係数は0.827となった。その結果によれば、アラミド繊維に対し、推定値よりも高い実験値を得る傾向にあり、ポリエチレン繊維に対して、推定値よりも低い実験値を示す傾向にあった。これは、 P_{max} と類似した傾向にある。つまり、 P_{max} の増加が W_{pe} の増加を引き起こしていることがその要因と思われる。従って、繊維の付着特性が、このような繊維による違いを生じさせたものと推察される。一方、推定値に対する残差の割合に関しては、PITCH系カーボン繊維やスチール繊維で大きく現れた。これは、PITCH系カーボン繊維やスチール繊維の W_{pe} が非常に小さいことによるものである。従って、評価する数値の大きさを考慮に入れて適切な評価をする必要があることを、このことは示唆している。

3) d_{max} に関して

表6.2に示す相関行列より、最も高い相関係数を示したのは、繊維の剛性, E_f で-0.76、続いて、繊維長さ, L_f の0.56、繊維の曲げ剛性, $d_f^4 \times E_f$ の-0.42である。Li¹⁾のマイクロメカニクスモデルによれば、繊維のブリッジング応力が最大になる時の変位量は、(6.2)式によって表される。この式に従えば、最大応力時の変位量を増加させるためには、 L_f 及び E_m を大きく、また、 E_f や d_f を小さくする必要がある。得られた相関係数は、そのような要求に対して十分満足できるような結果を示している。さらに、繊維の曲げ剛性, $d_f^4 \times E_f$ に対して負の高い相関が見られた。これは、繊維の曲げ剛性が高い場合には、引き抜かれる繊維とマトリックスとの接

触部分に大きな力が加えられる。この時、繊維は、マトリックスを剥離させてしまい、その結果、繊維のブリッジング力が低下し d_{max} を減少させる傾向にあるものと推察される。

推定値と実験値との関係を図6.4に示す。重相関係数は0.944と非常に高い値を示した。また、残差を見る限りに於いては、繊維の種類による違いは殆ど見られず、同一の素材の繊維の場合でも、実験値が推定値に対して高い値を示したり、低い値を示したりと、決まった傾向は見られない。

4) θ に関して

表6.2の相関行列より高い相関を示したのは、繊維の剛性 E_f の-0.79であり、続いて繊維長さ L_f の-0.31、繊維の曲げ剛性 $d_f^4 \times E_f$ の0.19等である。従って、 E_f と比べると、他のパラメータの寄与率は低い。 θ は、荷重-載荷点変位曲線のピーク荷重からその荷重値の90%まで低下するまでの耐力減少速度であり、この値が小さければ小さいほど塑性的な変形に優れていると言えることができる。 θ が小さくなるためには、少なくとも繊維が破断せずに引き抜けることが必要条件である。また、Li¹⁾のマイクロメカニクスによる繊維の引き抜けにおけるエネルギー吸収量 G_c は、次式のように書ける。

$$G_c = \frac{1}{12} g\tau V_f L_f \left(\frac{L_f}{d_f} \right) \quad (6.4)$$

(6.4)式にも記述されているように、繊維が引き抜かれる過程で吸収されるエネルギーには繊維の剛性が含まれていない。しかし、繊維の剛性と高い相関が現れたのは、 d_{max} の増大によるためや繊維の剛性が低いことによる繊維の伸びの影響を含んでるためであると考えられる。つまりLiの理論式より、繊維の剛性が d_{max} は低い方が大きくなるという傾向を示すことが明らかになっており、重回帰分析の結果からもその傾向は本実験結果においても当てはまることが分かった。しかし、荷重-載荷点変位曲線の形状からも d_{max} が大きければ $d_{0.9}$ も大きい傾向にあるため、 d_{max} を大きくする要因の影響を $d_{0.9}$ においてもそのまま引き続いて受けているものと考えられる。また、繊維長さとの相関が高いことから、多くの繊維がピーク以降に於いても繊維が破断せずに引き抜ける挙動を示したことが推察される。

推定値と実験値との関係を図6.5に示す。重相関係数は、0.936と高い値を示した。残差はポリエチレン繊維で理論値よりも大きな値を示す傾向にあった。また、残差の割合を見れば、PITCH系カーボン繊維とポリエチレン繊維が大きな値を示した。PAN系カーボン繊維とスチール繊維は、推定値と実験値が比較的良く合っているものの、 θ の値が非常に大きく、脆性的である事を示している。

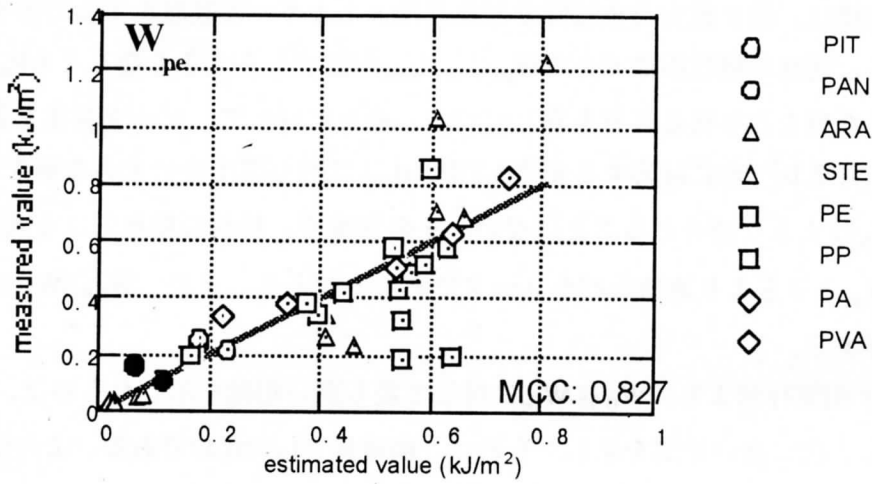


図6.3 W_{pe} に関する推定値と実験値の関係

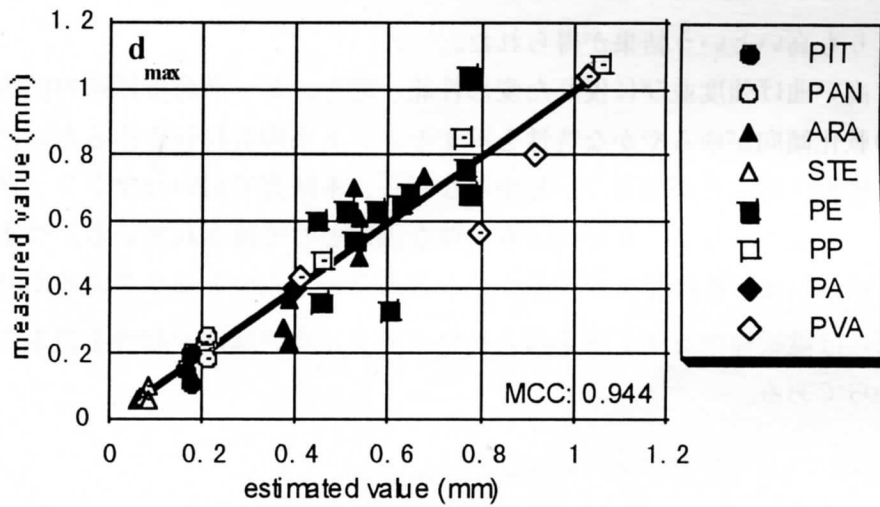


図6.4 d_{max} に関する推定値と実験値の関係

5) 靱性指標 $W_{0.9^2}/W_{pe}$ について

この靱性指標は、特に最大荷重以降でどれだけエネルギーの吸収をするのかを表わすパラメータである。同様の靱性指標である W_{pe} は、 d_{max} が必ずしも大きくなくとも P_{max} が大きければ比較的大きな値をとり得る性質を有している。それに対して、ピーク荷重を過ぎて後の P_{max} の90%の荷重レベルに対応する変位 $d_{0.9}$ が、 d_{max} に対して十分に大きな値をとらない限り、 $W_{0.9^2}/W_{pe}$ は大きな値をとることはない。その意味で、材料の粘り強さを表わす靱性指標としては、 W_{pe} よりもより適切なパラメータであると考えられる。また、 $W_{0.9^2}/W_{pe}$ は、 θ の傾向と強い関係がある。

表6.2に示す相関行列より、 $W_{0.9^2}/W_{pe}$ に対して最も高い相関を示したものは、繊維の剛性 E_f の-0.49である。次に高い相関を示したものは、繊維長さ L_f の0.47である。この傾向は、 W_{pe} に対するものと類似してはいるものの、 W_{pe} の場合と比較して、その相関性の度合いは低いことがわかった。

推定値と実験値との比較を、図6.6に示す。図6.3に示された W_{pe} については、ポリエチレン繊維(PE)の実験値は推定値よりも低いという結果が得られたが、図6.6では、 $W_{0.9^2}/W_{pe}$ の実験値が推定値よりも高いという結果が得られた。

以上から、高い曲げ強度並びに優れた変形性能、即ち、ピーク荷重以降の抵抗力が大きく、かつその軟化傾向がゆるやかな特性を示すセメント系複合材料を作るために求められる繊維の条件を把握することが出来た。しかしながら、本研究で用いたマトリックスの条件は限られており、今後マトリックスの検討も重要な課題として残されている。つまり、マトリックスの水結合材比の他に骨材の種類や量などもモルタルマトリックスの K_{IC} を変える要因となり、それらは繊維補強セメント系複合材料の更なる高い強度や靱性を得るための重要な因子となるからである。

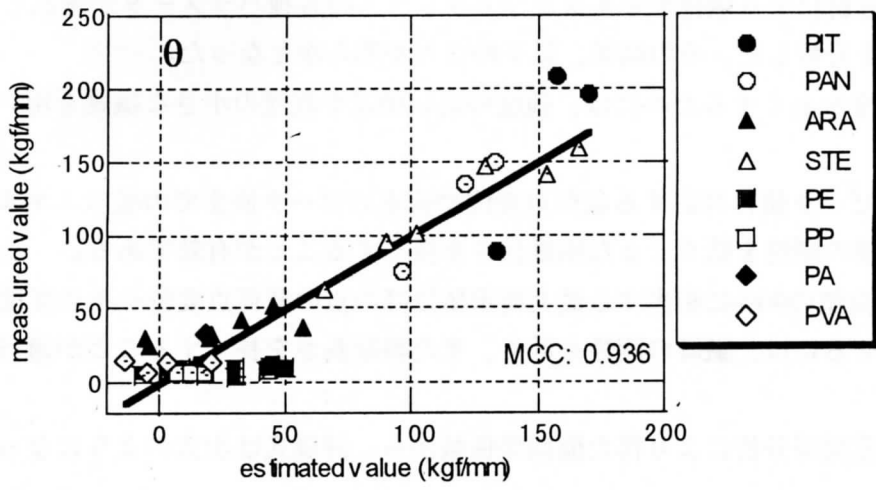


図6.5 θ に関する推定値と実験値の関係

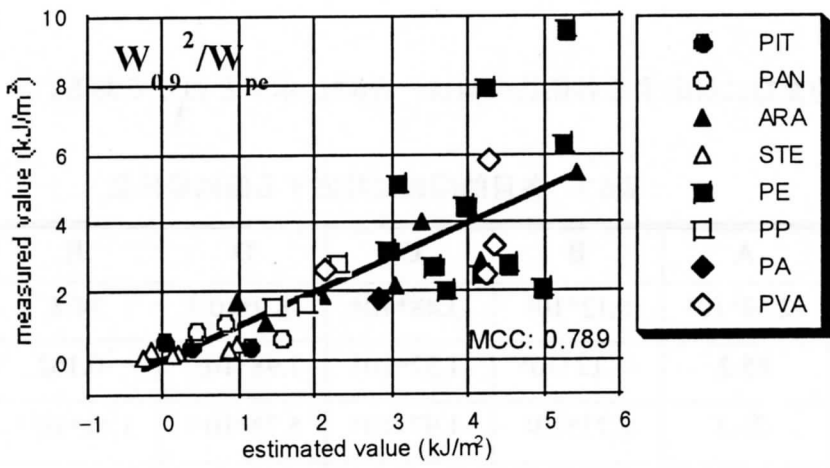


図6.6 $W_{0.9}^2/W_{pe}$ に関する推定値と実験値の関係

6.4 各目的関数と偏回帰係数

重回帰分析により繊維やモルタルマトリックスの各種パラメータが選択した目的関数に与える影響を分析した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 曲げ強度を高くするためには、強度の高い繊維や直径の小さな繊維を用いることが有効である。
- (2) 荷重のピーク値に対応する載荷点変位や荷重のピーク値までの吸収エネルギーを増大させるには、繊維の剛性を低く、また繊維長さを長くすることが有効である。
- (3) 最大荷重値の90%に相当する最大荷重値以降の点の載荷点変位やその変位までのエネルギーを増大させるには、繊維の剛性を低く、また繊維長さを長くすることが適当である。

また、重回帰分析により得た偏回帰係数から、評価式は次式のようにになった。

$$X = A d_f + B d_f^2 + C d_f^4 + D (d_f^4 \times E_f) + E L_f + F (L_f / d_f) + G (L_f \times d_f) + H f_t + I E_f + J f_{c,m} + K f_{t,m} + L E_m + M K_{IC} + N \quad (6.5)$$

ただし、目的変数に対応する各係数の値は、表6.3に示すとおりである。

表6.3 各目的関数に対応する偏回帰係数

X	A	B	C	D	E	F
P_{max}	-2.69×10^4	5.12×10^5	-3.48×10^6	-8.9×10^{-5}	34.8	-0.328
d_{max}	65.2	-1.12×10^3	-1.52×10^5	7.98×10^{-7}	-0.162	1.63×10^{-3}
W_{pe}	-26.3	8.73×10^2	-1.97×10^5	5.73×10^{-7}	1.41×10^{-3}	2.82×10^{-4}
θ	-3.71×10^4	6.61×10^5	1.61×10^7	-1.96×10^{-4}	51.9	-0.538
$W_{0.9^2} / W_{pe}$	1.86×10^3	-3.29×10^4	-1.29×10^6	1.16×10^{-5}	-2.41	2.64×10^{-2}

G	H	I	J	K	L	M	N
-6.24×10^2	2.78×10^{-2}	2.70×10^{-2}	1.21	-46.4	6.28	1.49×10^2	275.
4.28	2.29×10^{-5}	-2.65×10^{-3}	5.63×10^{-2}	-5.19×10^{-2}	-0.124	0.721	-0.222
0.661	1.81×10^{-4}	3.33×10^{-2}	4.55×10^{-2}	8.43×10^{-2}	-0.132	1.97	-0.153
-9.37×10^2	-7.55×10^3	0.767	0.463	-92.3	23.7	-4.13×10^2	4.03×10^2
45.4	1.54×10^4	-1.60×10^{-2}	0.299	5.98	-1.93	42.0	-25.8

6.5 結び

本章では、マクロレベルの挙動に影響を与えるメゾレベルの因子を探るために重回帰分析を行った。その結果、影響を与える因子が明確に現れ、それはLi¹⁾のマイクロメカニクスモデルに基づいた関係式と多くの点でよく対応することが認められた。また、得られた偏回帰係数を用いて、繊維及びマトリックスの特性を代入することにより、複合材料の曲げ変形挙動を把握することが出来る推定式を提案した。

以上の推定式から、複合材料の変形挙動即ち靱性特性を逆に設計することが可能となるが、本研究の実験で得られたもの以上に更に大きな塑性域を有するようなセメント系複合材料を開発するという要求に応えるためには、マイクロメカニクス的な検討を更に加えていくことが必要になる。つまり、極めて高い靱性を実現させるには、マトリックスに複数のひび割れが発生することは必要不可欠である。しかし、Liの理論では引張挙動の疑似歪硬化形状の設計は可能であるが、変形量やエネルギー吸収量の大きさそのものに関しては様々なパラメータで無次元化されているために、定量的に提案することは困難である。そのため実験により得られた挙動がどういう材料因子の影響を受けているかを明確にしなければいけない。その意味で、重回帰分析で得られた設計式は有効であると考ええる。

参考文献

- 1) V. C. Li, Y. Wang and S. Backer: A Micromechanical Model of Tensionsoftening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.39, No.5, pp.607-625, 1991.
- 2) V. C. Li, H. Stang and H. Krenchel: Micromechanics of Crack Bridging in Fiber-Reinforced Concrete, *Materials and Structures*, Vol.26, 1993, pp.486-494.
- 3) V. C. Li, Y. Wang and S. Backer: Effect of inclicing angle, bundling and surfacetreatment on synthetic fiber pull-out from a cement matrix, *Composites*, Vol.21, No.2, 1990, pp.132-140.
- 4) RILEM: Proceedings of the Second International RILEM Workshop, in High Performance Fiber Reinforced Composites 2(HFRCC2), edited by A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, E&FN SPON, 1995,161 p.

7章 結論

本研究は、セメント系複合材料の軽量化、高強度化そして高靱性化を目的とし、それらの性能を兼ね備え得るような材料の条件、それらの適切な組み合わせの条件及び有効な作製プロセス等を実験的に検討すると共にマイクロメカニクス立場から考察を重ね、そのような性能を有する材料の開発並びに設計方法の提案を試みたものである。

第2章では、セメント系複合材料の高性能化及び材料設計の現状と課題について記述した。

軽量化と高強度化を同時に兼ね備えるには、軽量化のために混入された空隙周りで生じる応力集中を如何に抑えるかが最も重要な問題である。そして、その応力集中を緩和するには、空隙の微小化や繊維によるひび割れ進展抑制が必要不可欠であることを強調した。

高靱性化には、繊維の混入の効果が最も大きいことは明白であるが、繊維補強複合材料のひび割れ抵抗性能は、繊維の特性とマトリックスの特性が絡み合った複雑な影響を受けることが分かっている。従って、繊維やマトリックスのどのような物理的的特性が、ひび割れ抵抗性能に大きく影響を与えるかということを確認にすることが必要であることを述べた。

セメント系複合材料の材料設計的な考えは、まずその非均質な内部構造を各オーダー毎に区分し、各オーダーの内部構造間の物理的な関係を明らかにすることが重要となる。そのためには、各レベルの特性間を関係づける道具として破壊力学を適用すると共に、マイクロメカニクスの視点から複合材料の破壊特性を解釈する事が重要であることを強調した。

第3章では、骨材に微細な中空軽量骨材を用いると共に、粉体の充填特性を考慮した調合方法の開発、並びに人工軽量骨材と鋼繊維を組み合わせることで軽量化と高強度化に加え、靱性の付与も期待した複合材料開発の実験的検討を行った。前者の実験では、密度が $1.3\sim 1.7\text{g/cm}^3$ 程度で、圧縮強度が $70\sim 110\text{MPa}$ と、従来開発されてきた軽量高強度モルタルあるいはコンクリート（密度が $1.2\sim 1.8\text{g/m}^3$ で圧縮強度が $35\sim 65\text{MPa}$ ）に比べて非常に低密度かつ高い圧縮強度を達成することができた。これは、用いた微細な中空セラミックスの特性が強固な中空体であること、骨材を除いたマトリックス部の最密充填が実現できていること等がその要因であることが明らかになった。一方、後者の実験では、人工軽量骨材と鋼繊維を組み合わせた結果、その圧縮強度は人工軽量骨材の性能に大きく依存し、鋼繊維混入による圧縮強度改善の貢献はあまり大きくないことが明らかになった。また、せん断におけるひび割れ抵抗性能については、鋼繊維の混入によりプレーン軽量コンクリートに比べて約30%のせん断強度の増大とピーク以降の高い靱性を実現できること、そして、比較的長い繊維を混入することにより、少ない繊維量でも高いひび割れ抵抗性能を実現できること等を明らかにした。

第4章では、炭素繊維、鋼繊維並びに高分子繊維合わせて25種類の繊維（繊維長さ3～

18mm) と水結合材比の異なる 3 種類のモルタルマトリックスとを組み合わせることにより、それぞれの素材の特性の違いが複合材料のひび割れ抵抗性能に与える影響を実験的に検討した。そして、曲げ試験におけるひび割れ抵抗性能については、繊維の素材が大きな影響を及ぼしていること、また、圧縮におけるひび割れ抵抗性能については、アラミド繊維が非常に靱性に富んだ挙動を示す他は、ピーク以降に不安定なひび割れが進展する挙動を示すこと等を明らかにした。

第 5 章では、セメント系複合材料の軽量化、高強度化及び高靱性化という性能を保持させるために、「押し出し成形」と「流し込み成形」の 2 つの作製プロセスを用いて実験的検討を行った。

押し出し成形セメント系複合材料では、密度が $1.3\sim 1.5\text{g/m}^3$ 程度で圧縮強度が $60\sim 80\text{MPa}$ 、曲げ強度が $10\sim 20\text{MPa}$ のセメント系複合材料を作製できた。さらに、養生条件の違いがマトリックスの内部構造に与える影響が、ひび割れ抵抗性能に対して大きな影響を与えること、また、押し出し成形は通常の成形方法である流し込み成形よりも格段に優れたひび割れ抵抗性能を実現できること等を明らかにした。

第 6 章では、実験で得た結果から、繊維やマトリックスの特性が複合材料に及ぼす影響を明らかにし、マイクロメカニクス理論に基づく理論式と比較考察することにより、今後の新しいセメント系複合材料を開発する上での支援となるような材料設計方法を検討した。

まずはじめに、荷重-載荷点変位曲線から抽出した幾つかのパラメータと繊維やモルタルマトリックスの特性を表すパラメータとの相関を重回帰分析により求めた。そして、セメント系複合材料を構成する材料パラメータを変数として、荷重-載荷点変位曲線の特徴づける諸特性の設計式を提案し、各項の持つ物理的な意味を明らかにした。

謝辞

第 4 章の実験的研究は、建築振興協会に設けられた高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会（委員長：松崎育弘東京理科大学教授）の協力の下に行ったものであります。多数の有益な御助言を頂いた建設省建築研究所の福山洋博士や(株)フジタの三瓶昭彦氏を始めとする委員各位、並びに試料の御提供を戴いた繊維メーカー各社の関係諸氏に深謝致します。

また、第 5 章の押し出し成形に関する研究は、新日本製鐵株式会社技術研究所との共同研究として行ったものであり、御協力戴いた山田寛次博士、山田隆氏および関係各位に記して謝意を表します。

研究組織

研究代表者：三橋博三（東北大学大学院工学研究科・教授）

研究分担者：野村希晶（東北大学大学院工学研究科・助教授）

桐越一紀（東北大学工学部・教務職員）

研究協力者：中村 裕（東北大学大学院工学研究科・大学院生、
現・(株)前田先端技術研究所・研究員）

研究経費

平成 9 年度	2,300千円
平成 10 年度	1,500千円
計	3,800千円

研究発表

- 1). Nakamura, H. and Mihashi, H. : Ductile Behavior of Polyethylene Fiber Reinforced Cementitious Composites, Proc. of the Fifth Japan International SAMPE Symposium, pp. 1429-1434, 1997.
- 2). Nakamura, H. and Mihashi, H. : Evaluation of Tension Softening Properties of Fiber Reinforced Cementitious Composites, Fracture Mechanics of Concrete Structures, eds. H. Mihashi and K. Rokugo, AEDIFICATIO, vol.1, pp499-510, 1998.
- 3). Nakamura, H. and Mihashi, H. : Formulation of Design Criteria for HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, eds. H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, RILEM, 1999, (in press).
- 4). 中村裕, 三橋博三：短繊維補強モルタルの曲げ挙動と圧縮挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, 1999, (印刷中).
- 5). 深澤俊男, 三橋博三, 川又篤：微粒子成分の充填性がセメント系複合材料の強度特性に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第62号, 1999, (印刷中).