

委員会報告 「高性能軽量コンクリート研究委員会報告」

国府勝郎*¹, 阿部道彦*², 橘 大介*³, 岡本享久*⁴, 小林克己*⁵, 杉山隆文*⁶, 梶田佳寛*⁷,

【委員構成】

委員長 国府 勝郎 東京都立大学大学院

梶田 佳寛 宇都宮大学工学部建設学科

委員

骨材性能評価分科会

幹事

阿部 道彦 建設省建築研究所

橘 大介 清水建設(株)技術研究所

委員

石川 雄康 太平洋セメント(株)中央研究所

柿沢 忠弘 (株)竹中工務店技術研究所

張 勇 高橋カテナール工業(株)技術開発部

橋田 浩 清水建設(株)技術研究所

三上 貴正 東京工業大学工学部建築学科

吉野 利幸 北海道立寒地住宅都市研究所

鹿毛 忠継 建設省建築研究所 (99.4~)

陣内 浩 大成建設(株)技術研究所 (99.2~)

渡辺 健治* 大成建設(株)技術研究所 (~99.8)

長瀬 公一* 大成建設(株)技術研究所 (~99.2)

成川 史春** 日本マライト工業(株)技術部

森下 宣明** 太平洋セメント(株)ロミッション事業部

入江 正明 ジャパン・ザ・パックス(株)

金久保利之 筑波大学機能工学系

上東 泰 日本道路公団試験研究所

葛 拓造 新日本製鐵(株)鋼構造研究開発センター

小泉 卓也 日本セメント(株)技術本部

坂田 昇 鹿島建設(株)技術研究所

佐藤 嘉昭 大分大学工学部福祉環境工学科

重富 光人 太平洋セメント(株)ロミッション事業部

竹本 伸一 ドーヒョー建設(株)北海道本店

津吉 毅 JR 東日本旅客鉄道(株)構造技術センター

鶴田 健 小沢コンクリート工業(株)

徳重 英信 秋田大学工学部資源学部土木環境工学科

白都 滋 東急建設(株)技術研究所

福山 洋 建設省建築研究所

藤木 英一 日本マライト工業(株)技術部

増井 直樹 (株)大林組土木設計本部

横田 弘 運輸省港湾技術研究所

渡辺 博志 建設省土木研究所

鳥谷 利夫* 戸田建設(株)技術研究所(~99.11)

梅村 靖弘** 日本大学工学部土木工学科

細田 信道** (株)熊谷組 (~99.3)

曾根 徳明** (株)オレック研究センター(99.4~)

*: 旧委員, **: 協力委員

利用技術分科会

幹事

岡本 享久 太平洋セメント(株)中央研究所

小林 克己 福井大学工学部環境設計工学科

杉山 隆文 群馬大学工学部建設工学科

1. はじめに

わが国では、1924年頃より天然軽量骨材を用いたコンクリートの軽量化に関する研究が行われており、1950年代に大島、浅間、榛名などの火山礫を用いた軽量コンクリートが実用化され、1955年にはJIS A 5002 として軽量骨材が規格化されている。そして、天然骨材に替わる人工軽量骨材の製造の必要性が叫

ばれ、1964年に品質の安定した人工軽量骨材が市販されるようになった。その後、1973年のオイルショックまでの間、高度成長経済下における建設需要に支えられて、建築および土木構造物の建設に軽量コンクリートが利用された。しかし、軽量骨材のコストパフォーマンスと骨材強度自体が低いことに起因するコンクリート強度の実用的限界が存在するため、

*¹東京都立大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

*²建設省 建築研究所 第二研究部長 工博 (正会員)

*³清水建設(株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

*⁴太平洋セメント(株) 中央研究所 第二研究部長 工博 (正会員)

*⁵福井大学 工学部 環境設計工学科 教授 工博 (正会員)

*⁶群馬大学 工学部 建設工学科 助教授 Ph.D. (正会員)

*⁷宇都宮大学 工学部 建設学科 教授 工博 (正会員)

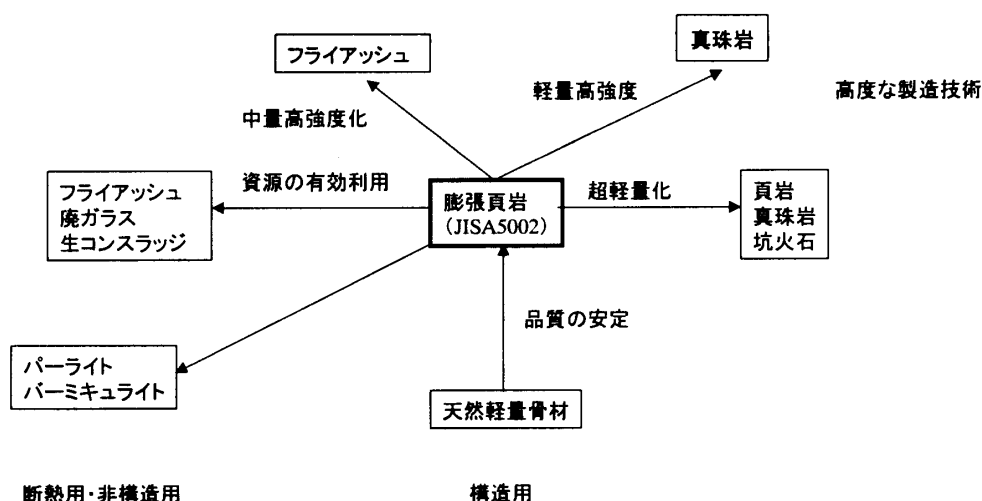


図-1 原材料別にみた軽量骨材の研究および開発

コンクリートの高強度化の趨勢に軽量コンクリートが対応できず、その後の普及は低迷している。

しかし、最近新しい原料と製法による高品質な骨材の開発や、フライアッシュなどの副産資源を活用した各種の軽量骨材の開発もなされ、これらを用いた軽量コンクリートの品質が広がってきている。膨張頁岩を原料とした従来製法の軽量骨材コンクリートに比べて、高強度で耐久性に富む軽量コンクリートが製造可能になったこと、副産物を有効活用した軽量骨材コンクリートの利用分野を開拓する必要があること、省資源と省エネルギーの要請に対する建設技術の見直しなどが必要となってきた。

高性能軽量コンクリート研究委員会は、このような状況を背景として、1998年からの2年間にわたって、軽量コンクリートの多様な性能の見直しとその利用技術を検討することとした。すなわち、従来からの人工軽量骨材ばかりでなく、最近新しく開発された軽量骨材およびこれらを用いた軽量コンクリートの品質や性能、試験方法などについて現状をとりまとめるとともに、軽量コンクリートの実構造物への適用技術について検討したものである。軽量コンクリートは、密度の小さな軽量骨材を用いる方法、軽量気泡モルタルのように発泡性の混和剤などを用いて起泡作用によって軽量化する方法があるが、本委員会では、軽量骨材を用いた軽量コンクリートに対象を限定している。

2. 軽量骨材の研究および開発の動向

2.1 軽量骨材の開発とその特徴

図-1は、原材料別にみた軽量骨材の研究および開発の動向をできるだけ簡単にまとめたものである。人工軽量骨材は、火山れきを破碎して粒度調整しただけの天然軽量骨材に対し、骨材としての品質の安定化を求めて膨張頁岩を利用して開発された。人工軽量骨材には原石としての頁岩を粉碎し粒度調整をした上で焼成した破碎型と、粉碎した時に製造される細粒分にバインダーとしての微粉を加えこれを造粒して焼成した造粒型がある。造粒型にはフライアッシュと発泡剤としての微粉炭を加えて造粒焼成したものもある。これらの人工軽量骨材は、JIS A5002で規格されており、粒子密度が1.3付近の、いわゆる従来型の軽量骨材とされる。

軽量骨材の特性は骨材内部を占める空隙構造によって概ね定まり、それはその原料を含めた製造方法で決まる。従来型の骨材は高温域にて骨材粒子の表面を熔融（軟化）させ、この溶融膜が粒子内部の頁岩自身から発生する気化ガスを包み込むため発泡して軽くなる。このように製造された骨材の断面は表面の殻状のガラス質と内部のハニカム状の発泡体により構成される。このような骨材の内部の空隙は空隙同士が連結する連続空隙であり、 3N/mm^2 程度の圧力のもとでほぼ全ての空隙が飽水する。

頁岩系の造粒型の場合も概ね同じような状況であるが、前記破碎型に比べると圧力下でも飽水しないいわゆる独立気泡が15%程度生成される傾向があ

表-1 超軽量化および高強度化を目指して最近研究・開発が盛んな軽量骨材の物理的性質

主原料	製造方法	形状	品種	絶乾密度 (g/cm^3)	24 時間吸水率 (%)	実績率 (%)
頁 岩	造粒型	まゆ形	粗骨材	0.9 ± 0.05	10~12	60 以上
		球形	細骨材	$0.7 \sim 0.9$	6~11	60 以上
真珠岩	造粒型	球形	粗骨材	0.8 ± 0.1	5 以下	60 以上
				1.2 ± 0.1	3 以下	60 以上
フライア ッシュ	造粒型	球形	粗骨材	2.03	0.35	65.0
				1.86	0.72	64.0

る。またこのような空隙構造から造粒型は破碎型に比べ骨材の強度が高い傾向がある。造粒型において、頁岩自身が持つ発泡度に加え別に発泡する材料を加えて全体としての発泡度を高めることができる。この場合添加する発泡剤の分散を確保するため、原料頁岩の微粉碎と発泡剤の混合が必要である。このような方法から超軽量骨材が製造されることもある。

発泡しない材料のみで焼成すれば、骨材は当然重くなり内部の空隙も少なく独立空隙となる確率が高く、また、骨材強度も大きくなる。これに微粉化した発泡剤を加えて焼成すれば軽くて独立空隙を持つ軽量骨材を製造することができる。骨材内部の空隙率が同じであれば（同一原料から製造される骨材粒子の比重が同一）その空隙の独立性の度合いに応じて骨材強度も向上するものと考えられる。しかしこのように製造された独立空隙の隔壁がポンプによる圧力や凍結時の水分の移動圧力に耐えることができるかどうか、コンクリート用骨材としての性能に大きく関係する。

新しい軽量骨材の開発は上記のような空隙構造と、それから得られる骨材特性に関する知識を基本に、原材料によって定まる焼成温度・方法と微粉碎などの加工度を決定し、必要な発泡剤を投与することで開発が可能となる。

最近では、原材料やその製造方法にさまざまな工夫が取り込まれ、密度やその他の特性において多様な種類の軽量骨材が研究・開発されている。開発の目的は、それぞれの軽量骨材の種類で異なり、骨材の特性もその原料や製造方法によって異なる（図-1 参照）。主な開発の目的として次の3つが考えられる。すなわち、(I) 高強度化、(II) 超軽量化、(III) 資源の有効利用の3つである。

①廃発泡スチロール、②廃ガラス、③建設汚泥、④浄水場発生土、⑤生コンスラッジ、⑥鑄造廃砂、⑦廃木材、⑧廃木炭、⑨もみがら灰、⑩抗火石屑

図-2 軽量骨材への利用を目指す廃棄物の一例

これらの目的で開発された軽量骨材の中には、従来の軽量骨材や構造用軽量コンクリートに比較して、結果的に吸水特性や耐凍害性などの性能も向上しているものもある。

2. 2 超軽量化される軽量骨材

近年、これまでの膨張頁岩を主原料とした在来の非造粒型人工軽量骨材に比べて、さらに軽量でかつ吸水率が小さい人工軽量骨材が開発されてきている。この骨材を用いた軽量コンクリートは、従来の軽量コンクリートよりも軽量化・施工性向上等が達成できる新しい材料として大きな期待がかかっている。このような低吸水性の軽量骨材が我が国で研究され始めたのは、1980 年代中頃からで、供給が開始されたのは 1993 年で抗火石を原料として製造されたものが最初であった。しかし、この抗火石を原料とした低吸水性軽量骨材は、原料供給や経済性の問題から現在は製造されていない。その後、1996 年には膨張頁岩を原料としたものの供給が開始され、1998 年には新たに真珠岩を原料とした密度の異なる 2 品種のものが供給され始めた（図-1 参照）。これらの低吸水性の軽量骨材の主原料以外の組成は可塑剤、発泡剤、造粒助剤等からなる。例えば、真珠岩系の低吸水性の軽量骨材は、可塑剤にベントナイト、発泡剤に炭化珪素、造粒助剤にリグニン水溶液を加えて造られる。

2. 3 資源を有効活用した軽量骨材

(1) フライアッシュを主原料とした軽量骨材

石炭灰はセメント粘土代替材等で約 60%程度有効利用されているが、今後大規模な灰捨て場の確保が困難となる事等から、さらなる利用拡大を検討しなければならない状況にある。

骨材分野はその市場が極めて膨大であることに加え、石炭灰の化学成分が人工軽量骨材の主原料である膨張頁岩の化学成分と酷似していることもあり、石炭灰有効利用で最も期待される分野の一つである。数十年前から 1) 発生灰をそのまま砂代替として利用、2) 石炭灰にセメント等を添加し化学的に固化して利用、3) 石炭灰を焼成して利用といった方法で石炭灰系骨材が利用されてきた [1]。

特に骨材強度が高くコンクリート用として十分利用できる焼成型骨材は、近年尚盛んに検討・開発が進められている。

(2) その他の廃棄物を利用した軽量骨材

図-2に示すように、今後の研究開発によっては人工軽量骨材やその原料として利用されることが期待されているものもある。その中で、廃発泡スチロールを素材とした軽量骨材は、極めて軽いコンクリートを製造できることが大きな特徴である。また、素材自身が空隙を多く含む特徴から、コンクリートに高い断熱性能を付加することができるといった特徴もある。

3. 軽量骨材および軽量コンクリートの定義

3. 1 定義

軽量コンクリートの性能の多様化とその利用の拡大を踏まえ、軽量骨材および軽量コンクリートの定義を行った。それぞれの定義は、prEN206 における骨材の分類およびコンクリートの分類を参考にした。また、参考までに、この prEN206 における軽量コンクリートの単位容積質量（絶乾質量）の分類を、表-2に示す。

(1) 軽量骨材

軽量骨材とは、コンクリート質量の低減および断熱性の向上を目的として使用する骨材で、一般に骨材の絶乾密度が 2.0 g/cm^3 程度以下のもの

(2) 軽量骨材の空隙率

軽量骨材粒の見かけ容積に対する骨材粒中の空隙容積の割合

(3) 軽量コンクリート

軽量コンクリートは、骨材の全部または一部に軽量骨材を用い、単位容積質量を 2.1 kg/l 以下としたコンクリート

3. 2 品質規格の提案

骨材密度が 1 g/cm^3 以下で低吸水性を有する軽量骨材や石炭灰を有効利用した軽量骨材などが次々と開発されるようになってきた。これらの新しい軽量骨材を用いたコンクリートは、構造用としての機能を満足するだけでなく、省資源、省エネルギーの観点からも利点を有したものである。しかしながら、現基準に準拠した場合、その使用に制約を受けることになる。日本建築学会や土木学会の基準は今後性能規定型の設計・施工法に移行していくため、このような材料の使用制限は少なくなると考えられるが、基準の国際化への対応なども踏まえると、各基準の改定・整備が必要な時期にきていると考えられる。そこで、新たに開発された軽量骨材を構造物に有効に適用するために、軽量骨材および軽量コンクリートに関する国内および海外基準の現状を把握し、近年の軽量骨材の性能を踏まえた新しい軽量骨材の品質規格の提案が必要であろう。

4. 軽量コンクリートの諸性状に関する文献調査

4. 1 フレッシュコンクリート

(1) スランプと空気量

従来から用いられている吸水率の大きい従来型の軽量骨材（連続空隙型）を用いたコンクリートは、十分にプレウェットングすることによって、普通骨材コンクリートと同様のスランプあるいは空気量の経時変化を示すと考えられており、フレッシュ時の性能を十分に満足することができる。

また、最近開発され実用化されている吸水率が 3%以下の軽量骨材（独立空隙型）については、絶

表-2 prEN206における軽量コンクリートの単位容積質量（絶乾質量）

区分	LC1.0	LC1.2	LC1.4	LC1.6	LC1.8	LC2.1
単位容積 質量 (kg/l)	≥ 0.80 ≤ 1.00	> 1.00 ≤ 1.20	> 1.20 ≤ 1.40	> 1.40 ≤ 1.60	> 1.60 ≤ 1.80	> 1.80 ≤ 2.10

表-3 既往のポンプ圧送試験結果の一覧

文献 No.	粗骨材		目標 スランプ (cm)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	圧送距離		圧送状況	圧送量30m ³ /h時の 管内圧力損失 (kgf/cm ² /m)
	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)				水平 (m)	鉛直 (m)		
[4]	1.29	28.0	21.0	46.0	168	11.8	120.7	良好	0.15~0.20
[5]	1.29	24.0~28.0	18.0~23.0	57.0 46.0~	171~196	120.0	296.0	良好	0.20~0.25
[6]	1.29	23.9~32.3	21.0	55.7	183~185	0.0	175.0	良好	0.20~0.30

乾状態で用いた場合でも、適切な配合（調合）にすることによって、スランプあるいはスランプフロー、空気量が経過時間120分程度までほとんど変化しないことが明らかにされている [2]。

さらに、石炭灰を原料とした非発泡型人工軽量骨材（中量骨材）を用いたコンクリートは、普通骨材コンクリートのスランプあるいは空気量の経時変化と同等もしくはそれよりも小さいことが明らかにされている [3]。

（2）ポンプ圧送性

主に、従来から用いられている吸水率の大きい軽量骨材を用いたコンクリート（軽量骨材コンクリート1種）についてのポンプ圧送性を上げた文献が多く、問題なく高所へも圧送できたことが示されている [4~6]。既往のポンプ圧送試験結果の一覧を表-2に示す。しかし、トラブルについての報告がほとんどなく、問題点があまり明確にされていない。また、吸水率が3%以下と小さい軽量骨材を用いたコンクリート（軽量骨材コンクリート1種）についてはまだ既往の研究が少ない状況であるが、適切な配合を選定し圧送前のコンクリートの流動性を高めることによって、軽量骨材を絶乾状態で用いても、十分にポンプ圧送できることが明らかにされている [2]。この際に、対象とするコンクリートについて非排水加圧試験を行い、そのときの軽量骨材の加圧吸水率がポンプ圧送性に影響していることが示されている。

4. 2 硬化コンクリート

（1）力学的特性

図-3に示すとおり [7]，比較的高強度な人工骨材を使用すると，密度が1.95~2.15 kg/l の範囲で30~95 N/mm² の圧縮強度が得られており，普通コンクリートよりも密度が10~20%小さいにも関わらず，普通コンクリートと同程度の圧縮強度が得られていることは特筆すべき特徴と言える。

さらに，最近のRILEMの破壊エネルギー試験の結果，密度1.2 kg/lの軽量コンクリート（真珠岩系超軽量粗骨材使用：密度0.85 kg/l）の破壊エネルギーは，普通コンクリートの破壊エネルギーの1/4~1/6であること，ならびに，コンクリート密度のレベルが1.2~1.9 kg/lの範囲で異なっても，破壊エネルギーに差が無く，骨材の破壊が破壊エネルギーの値に影響するといった知見が得られている。図-4はこの性状を示すものであるが，これは普通骨材を

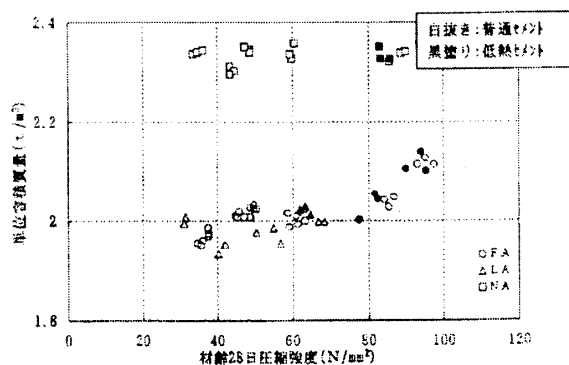


図-3 単位容積質量と圧縮強度との関係（FA：軽量骨材，LA：従来型軽量骨材，NA：普通骨材を使用） [7]

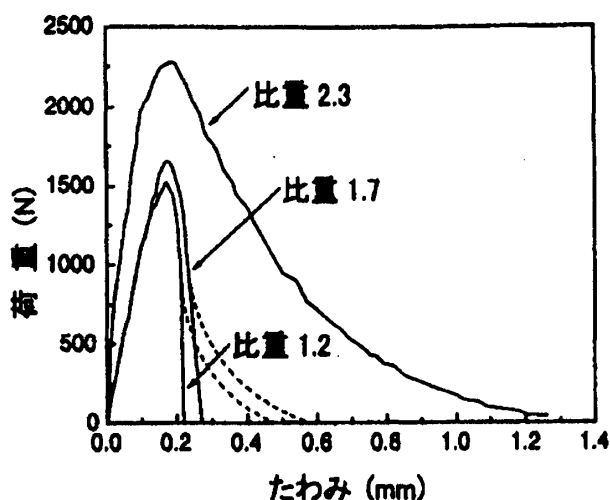


図-4 荷重-たわみ曲線 (曲げ試験) [8]

使用したコンクリートと超軽量骨材を使用したコンクリートでは、破壊のメカニズムが異なるためと推察される。つまり、普通骨材のヤング係数、強度はモルタルよりも大きく、マイクロクラックのほとんどはモルタル部、あるいは骨材界面に発生した後、骨材を迂回して進展するのに対し、超軽量粗骨材の場合は骨材のヤング係数、強度がモルタルよりも小さい場合が多いため、マイクロクラックはモルタル部と骨材部分に同時に発生するか、あるいは粗骨材の方が先に破壊するためと考えられる [8]。

(2) 耐凍害性

既往の研究によれば [9]、市販の軽量骨材を使用した軽量コンクリート 1 種 (W/C=35, 48, 55%) の場合、凍結融解試験開始時 (30 サイクル時) の骨材の飽和度が 30% までは耐久性指数は約 100%、30% を超えると耐久性指数が低下し、耐久性指数 60% を確保するための飽和度は約 50% であるとしている [9]。飽和度約 50% は軽量骨材の含水率で約 17% である。

一方、空気量が 5% 以上、気泡間隔係数が $200\mu\text{m}$ 以下であっても優れた耐凍害性が確保されない場合があり、このようなケースでは、練混ぜ前の軽量骨材の含水率が 5% を超えると急激な耐久性指数の低下を示すと報告している [10]。優れた耐凍害性を確保できる含水率は試験者によって異なっている。この原因としては、凍結融解試験開始前あるいは試験

中の含水率変化の評価程度の差異、水セメント比や混和材の影響、実験に使用した骨材ロットのばらつきなどが考えられる。現状では、より安全側の結果 [10] に基づき、水セメント比 30% 程度の軽量コンクリート 1 種の耐凍害性を確保するためには、練混ぜ前の軽量骨材の含水率を 5% 以下とする考え方が一般的である。

軽量骨材の含水率を抑えてコンクリートを製造することは耐凍害性に有利であるが、連続空隙型軽量骨材はポンプの圧送性を考慮し、プレウェッティングした 25~30% の高含水率で人工軽量骨材を出荷するのが一般的であった。しかしながら、最近開発された低吸水性軽量骨材は、内部組織が微細な独立空隙で形成されており、吸水率が小さく、出荷時の含水率を 5% 以下のほぼ絶乾状態で出荷することで、凍結融解抵抗性とポンプの圧送性を同時に確保することが期待できるようになってきている。これらの軽量骨材では、例えば、真珠岩系軽量骨材の密度 0.85 相当品で 24 時間吸水率 5% 以下、密度 1.2 相当品で 3% 以下、石炭灰系軽量骨材で 3% 以下のものがあり、在来の連続空隙型に比べかなり小さい。

5. 軽量骨材および軽量コンクリートの性能を正しく評価するために改良が求められる試験項目

骨材の絶乾密度による区分 L グレードの超軽量骨材およびこれを用いたコンクリートを製造する場合、その骨材の絶乾密度、細骨材の表面水率およびそのコンクリートの空気量などの測定方法が、普通骨材あるいは区分 M、H グレードの軽量骨材を用いた場合とは異なり、従来の試験方法ではその物性値を正確に評価できない場合がある。そこでとりわけ区分 L グレードの軽量骨材を正しく評価するための性能試験が必要である。また、耐凍害性を調べる試験方法として ASTM C 666 A 法が最も普及した試験方法であるが、この促進試験方法によって得られた結果は、必ずしも実際の構造物の耐凍害性を忠実に再現しているとは言い難い場合がある。以上の事を考慮して次の 3 つの試験方法に対して新たな検討が必要である：すなわち、①軽量骨材の性能試験、②空気量試験方法、③凍結融解試験方法

6. 軽量コンクリートの構造性能

本節では、軽量骨材コンクリートを用いた主として鉄筋コンクリート部材の構造性能に焦点をあて、部材の曲げ強度やせん断強度、ひび割れ強度等の既往の計算式による計算値と、文献により報告されている実験値との対応を、コンクリートの種類別に比較することにより普通コンクリートとの差異を検討した。検討の対象とした試験体は、主として日本コンクリート工学協会、土木学会、日本建築学会の単行本や論文集、梗概集に掲載された研究において加力実験が行われた試験体で、JIS A5002 で規格されている膨張頁岩を利用した人工軽量骨材に加え、近年研究・開発が進められてきているいわゆる“超軽量”骨材を使用した試験体である。なお、本検討の内、“軽量コンクリート 1 種”を用いた構造部材のデータに関しては文献[11]に依るところが大きい。また、軽量コンクリート部材の構造性能を比較検討する上で、その基本となる普通コンクリート部材のデータが必要であるが、本検討では梁試験体については産学官の共同研究による「高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造研究開発プロジェクト」によって行われた梁実験シリーズ（いわゆる HFW シリーズ）[12]を、柱試験体については建設省総合プロジェクト「鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究」によって行われた柱実験シリーズ（いわゆる短柱シリーズ）[13]を取りあげた。本報告では以下に、“軽量コンクリート 1 種”を用いた梁部材の構造性能に関する検討の一部を紹介する。また、“超軽量”骨材を使用した研究報告の成果の一部もあわせて紹介する。

6. 1 梁部材の曲げひび割れ強度

普通コンクリートおよび軽量コンクリート 1 種を用いた梁部材の、曲げひび割れ強度の計算値と実験値の比較を図-5 に示す。なお、計算値には文献[14]の算定式を用いた。左図が普通コンクリート試験体、右図が軽量コンクリート 1 種試験体を示しており、軽量コンクリート 1 種試験体の実験値がとりわけ普通コンクリート試験体と比較して小さいことはない。ひび割れ強度に関しては、実験値のばらつきが大きいこともあり、部材の構造性能としてコンクリートの種類による明確な差が現れないようである。

6. 2 梁部材のせん断強度

普通コンクリートおよび軽量コンクリート 1 種を用いた梁部材の、最大強度の計算値と実験値の比較を図-6 に示す。なお、計算値には文献[15]の算定式を用い、実験値、計算値とも曲げ強度計算値[15]で基準化している。左が普通コンクリート試験体、右が軽量コンクリート 1 種試験体を示しており、曲げ降伏 (F) していない試験体の計算値に対する実験値の比の平均は、普通コンクリート試験体で 1.41、軽量コンクリート 1 種試験体で 1.34 である。多くの算定式にはおおむね安全率が見込まれており、軽量コンクリート試験体でも実験値が計算値を上回るが、同一因子の試験体間でコンクリート種類を比較すると、軽量コンクリート試験体の方が若干小さいようである。超軽量コンクリートを用いた実験では、コンクリート圧縮ストラットの負担率、コンクリート有効強度低減係数を普通コンクリートより小さく評価した方がよいとの報告もある[16]。また、軽量コ

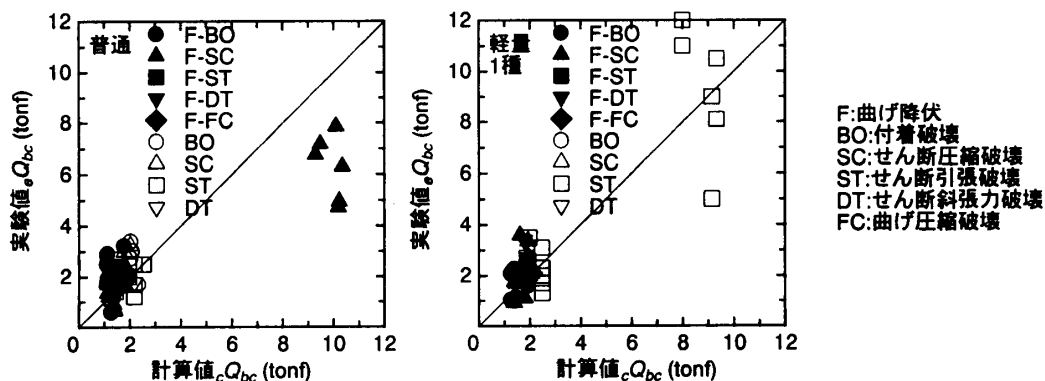


図-5 梁試験体の曲げひび割れ強度の実験値と計算値の比較

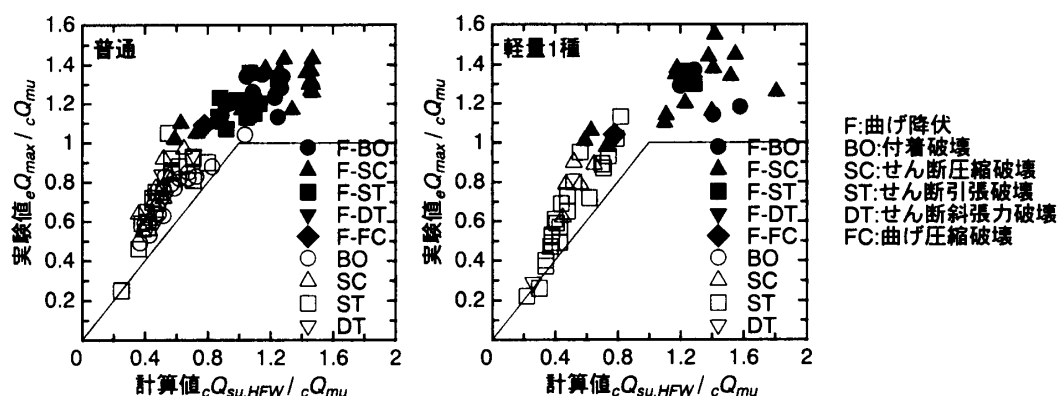


図-6 梁試験体のせん断強度の実験値と計算値の比較

ンクリート部材の付着割裂強度の低下が大きく、破壊モードがより付着破壊になりやすいようである。

6.3 プレストレス導入による効果

せん断補強鉄筋を用いない棒部材のせん断耐力は、プレストレスを導入することによって、軽量骨材コンクリートでも、普通骨材を用いたコンクリートと同程度の耐力を有するなどの報告[18]があり、今後の軽量骨材に関する新たな展開が期待されている。

7. 軽量コンクリートの今後の展望

7.1 建築物に関する今後の利用技術

建築物において、耐震補強の一つである増設耐震壁工法に軽量コンクリートプレキャスト板を適用した実験研究が行われ、その補強効果が確認されている。軽量コンクリートを増設耐震壁工法に適用することは、現場でのハンドリングが従来の工法より向上するため有効と考えられる。また、軽量コンクリートの靱性改善のためにビニロン繊維を混入した増設耐震壁工法に関する研究も行われ、繊維補強が軽量コンクリートの靱性改善に有効であることが実験で確認されている [17]。

高靱性を目指した繊維補強コンクリートまたはモルタルを建物のエネルギー吸収デバイスとして利用し、高性能な建築物を実現することを目的とした研究が、日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」の一環としてスタートした。このコンクリート系エネルギー吸収デバイスに軽量コンクリートを適用することは、剛性の調整、損傷後の容易なリプレースの実現に有効であると考えられる。

また、超軽量コンクリート部材の破壊性状は、普通コンクリートを使用した場合よりひび割れ間隔が小さく多数分散しており、繊維補強と組み合わせることにより、構造物の損傷制御技術としての適用が可能となるかもしれない。

木造フレームの中央コア部に軽量コンクリートによる耐震壁を配置し、中層木造建物を実現するための研究が行われている。軽量コンクリートを適用するメリットは、基礎、地盤への負担を少なくし、地震入力を減ずるためである。

これら軽量コンクリートを利用した技術を実現するためには、部材の性能評価ばかりでなく、材料の性能評価技術、施工性の優れた製造技術、品質管理技術の確立が重要である。

7.2 橋梁分野に関する利用の現状と今後の展望

軽量骨材の橋梁分野での使用事例については、これまでもいくつかの報告が紹介されているが、実績的には必ずしも多いとはいえないのが現状であろう。この理由として、軽量骨材を用いたコンクリートの施工性や耐久性等に対する問題点があったこととともに、一部の設計基準において、天然骨材の使用を原則としていたことも一因であると考えられる。

ところが、近年のコンクリート構造物を取り巻く状況はにわかに変化してきた。土木構造物については、建設コストの縮減が重要視されているが、単に初期コストのみを捉えるのではなく、維持管理も含めたライフサイクルコストを考慮するように変化しつつあること、および各種基準類は性能照査型への移行の準備が整い、これに伴って、材料選定や構造

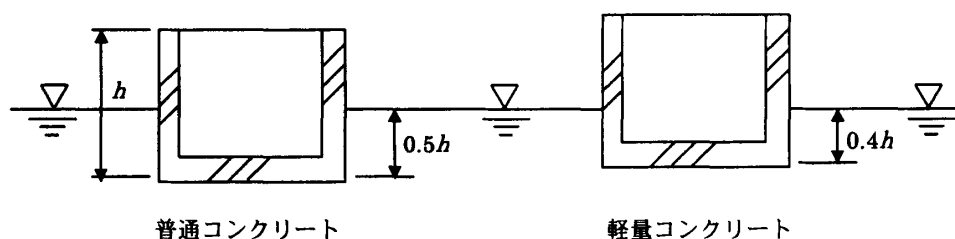


図-7 喫水の比較

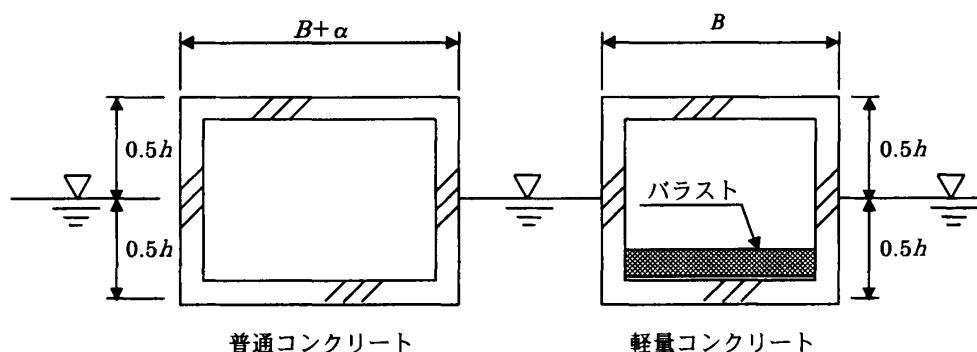


図-8 同一の安定性とした場合の比較の概念図

形式選定に対する自由度が増えると考えられる。

橋梁上部工についても、多彩な形式の構造物が採用されている。PC構造について言えば、施工の合理化・工期短縮を目指したプレキャストセグメント構造、自重の軽減と維持管理の軽減を兼ね備えた外ケーブル形式といった、新たな構造形式が積極的に用いられるようになってきた。鋼構造については、少数主桁構造が用いられてきている。また、新しい構造として、複合構造が採用される機会が増えてきた。これは、鋼とコンクリートのそれぞれの短所を補い、長所を生かすことによって経済的で合理的な橋梁を建設する試みであり、波型鋼板ウェブPC橋や鋼トラスウェブPC橋などが挙げられる。前者は、従来のPC箱桁のウェブに軽量の波型鋼板、後者は鋼管等のトラス部材を用いることで、自重の軽減を図り経済的な構造を目指すものである。このような構造形式に対し、軽量コンクリートを用いれば、プレキャスト部材の運搬・架設の合理化や上部工の軽量化が図られるため、上下部工を合わせた橋梁全体コストの一層の縮減に寄与するものと考えられる。

7. 3 海洋構造物への展開

軽量コンクリートは、これまでもいくつかの大型海洋構造物に適用されてきている。軽量化を図ることにより、メリットが生じる海洋構造物には以下

のものが考えられる。

- ・吊上げ・運搬する構造物：カルバート、L型ブロックなどのプレキャスト部材全般
- ・浮かせて運ぶ構造物：防波堤／岸壁に用いられるケーソン等
- ・浮体構造物：浮防波堤、浮桟橋、浮橋等

特に浮体構造物については、図-7に示すように、躯体重量が低減すれば、喫水が小さくなる。これを活用して、バラストを設置して同一の喫水とすれば、重心が低くなるため復元力が増加し、浮体としての安定性が向上する。したがって、同一の安定性を確保するには、図-8に示すように、軽量コンクリートを用いた場合は復元性能が良かったため浮体幅を小さくすることができ、構造物の容積（数量）は低減する。また、同一の喫水、浮体幅の場合には、軽量コンクリートを用いた浮体の方が安定性が良かったため、より大きな荷重を上載することが可能となり、構造物としての経済効果が生じる。

7. 4 鉄道構造物への最近の適用事例

山形新幹線新庄延伸工事（山形～新庄間、平成11年12月開業）では、狭軌から標準軌道への軌間の変更に伴い、28橋の橋梁改良を行った。改良にあたっては、メンテナンスの省力化を考慮し、できるかぎりコンクリート桁を採用することとした。しかし、

本橋の架設地点は周辺道路から進入路のない箇所であり、架設方法はオンレールでの運搬架設に制約された。そこで、桁重量を 8tf 以下に抑え、写真-1 に示すクレーン積載台車による架設ができるように、軽量コンクリートを使用することとした。なお、今回の場合、下部工が既設であるため、上部工だけの比較では、単純に材料費分、コストアップとなるが、架設全体を考えるとコストダウンとなる。

今回は、寒冷地での施工となることから、24 時間吸水率が 4%程度未満で、凍結融解に対してほぼ問題がないと考えられる人工軽量骨材を使用することとした。使用するコンクリートは、設計基準強度 $30(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、単位体積重量 $1.25(\text{tf}/\text{m}^3)$ とし、プラントからの輸送時間を考慮し、練混ぜ後 60 分で、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $5.0 \pm 1.5\%$ が確保できるよう配合を定めた。

8. おわりに

軽量コンクリートの多様な性能の見直しを目指して、従来型の JIS 軽量骨材に加えて、最近開発されている新しい人工軽量骨材の特性、及びこれらを用いたコンクリートの品質や部材の性能についての現状をまとめた。また、実構造部への適用技術についても検討を加えた。軽量コンクリートの今後の新たな展開が期待される。

参考文献

- [1] 玉貫 滋, 他: 石炭灰処理システムと有効利用技術, フジ・テクニクス, 1981
- [2] 坂田昇, 柳井修司, 石川雄康, 榎木隆: 高性能軽量コンクリートのポンプ圧送性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21-2, 1999. 7, pp. 355-360
- [3] 高強度人工骨材コンクリート研究会: 高強度人工骨材コンクリート施工実験結果取りまとめ(材齢 28 日中間報告), 1999. 11
- [4] 渡辺一弘, 清水昭之, 馬場正道, 早川光敬: 高流動コンクリートの利用と高強度軽量コンクリートの高所圧送コンクリート工学, Vol. 34, No. 9, 1996, pp. 13-19
- [5] 山崎真司, 馬淵喜全, 岡本修一, 後藤和正: 地上 296m への軽量コンクリートの直接ポンプ圧送, コンクリート工学, Vol. 32, No. 3, 1994. 3, pp. 31-34
- [6] 和美広喜, 笠井浩, 柳田克己ほか: 超高層建築に

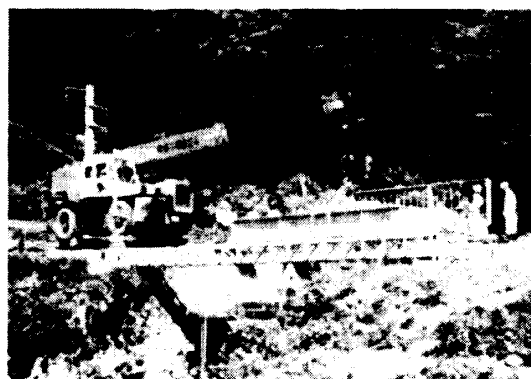


写真-1 クレーン積載台車による桁架設

おける軽量コンクリートの高所ポンプ圧送性, 鹿島

- [7] 石川嘉崇, 安田正雪ほか: 高強度人工骨材を用いたコンクリートの研究, その 3. 硬化コンクリートの性質, 日本建築学会学術講演概要集 A-1 中国, pp. 5-6, 1999. 9
- [8] 柴田辰正, 岡本亨久ほか: 超軽量骨材を使用したコンクリートの破壊性状に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 49-54, 1998
- [9] 藤木英一, 国府勝郎, 遠藤裕悦, 保坂鐵矢: 軽量コンクリートの凍害劣化気孔に関する研究, 土木学会論文集 No. 627/V-44, pp. 239-250, 1999
- [10] 橘大介, 今井實: 高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について, 土木学会論文集, No. 496/V-24, pp. 51-60, 1994
- [11] 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
- [12] HFW 研究推進委員会: 中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造の耐震性能に関する一連の研究結果, 季刊防災, No. 112, 1989. 3
- [13] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987
- [14] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- [15] 日本建築センター: 中高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針・同解説, 1987
- [16] K. Kobayashi, Y. Matsuzaki, H. Fukuyama and S. Hakuto: Performance Evaluation of RC Elements with Ultra Lightweight Concrete, Proceedings of 6th ASCCS International Conference, 2000. 3
- [17] 大岡督尚, 橘高義典, 小林康人, 宮下真一: 廃ガラス発泡骨材を用いたコンクリート耐震壁の破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1219-1224, 1999
- [18] 伊藤忠彦, 鈴木宣政, 山口隆裕, 池田尚治: 人工軽量骨材を用いた PC はりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 1133-1138, 1996