

# ALA CONCRETE

## 世界の軽量コンクリート技術の現状

(1995.6 ノルウェー開催・国際会議の論文紹介)

# ご / あ / い / さ / つ

当協会におきましては、人工軽量骨材コンクリートの特性をよりよく活用していただくために、技術資料を作成しておりますが、今回は、横浜国立大学工学部池田尚治教授を委員長とします「軽量コンクリート海外技術調査委員会」の全面的なご協力を得まして『世界の軽量コンクリート技術の現況』を作りあげることができました。

本資料は、1995年6月ノルウェーで開催の軽量コンクリート国際会議の論文集の中から、土木関係を中心に論文を抄訳し、紹介したものであります。

最近の軽量コンクリートの使用工事では、ビルなどの建築構造物工事対象がほとんどを占める状況にありますが、今後の土木構造物工事対象への活用に大いに期待しております。

構造システムの多様化が急速に進んでいる状況下で、海外における貴重な研究内容や工事例等をご紹介しまして、軽量骨材の用途開拓にご理解を賜りたく、提供させていただきたいと思っております。参考資料としてご利用いただければ幸甚であります。

本資料の作成にあたり、多大のご尽力とご指導を賜りました委員会ならびに抄訳協力者に厚くお礼を申し上げます。

今後とも人工軽量骨材業界およびコンクリート業界の発展のために、皆様方のご指導とご鞭撻をお願い申し上げます。

1997年3月

人工軽量骨材(ALA)協会  
会長 野村龍四郎

## 人工軽量骨材コンクリート技術資料発行内容

- |                |                        |
|----------------|------------------------|
| No.1 床の遮音      | No.7 靱性能とせん断強度(続)      |
| No.2 ポンプ施工     | No.8 ポンプ施工(続)          |
| No.3 耐久性       | No.9 高性能A E 減水剤        |
| No.4 力学的性質     | No.10 鉄筋コンクリート部材の設計法   |
| No.5 高強度コンクリート | No.11 コンクリートの調合        |
| No.6 靱性能とせん断強度 | No.12 世界の軽量コンクリート技術の現状 |

## 1997年以降、下記の技術資料が発行されております。

- |   |
|---|
| No.13 鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLRC)  |
| No.14 鋼繊維補強軽量コンクリート床版 設計施工マニュアル   |
| No.15 ハーフ軽量コンクリートのRC造への適用<br>(スラブに軽量コンクリート、梁に普通コンクリートを用いた複合コンクリート部材の構造性能) |

# 巻 頭 言

横浜国立大学教授

軽量コンクリート海外技術調査委員会

(ALA協会)

委員長 池田尚治

コンクリートの欠点のひとつは何と言ってもその重量の大きいことである。これを解決する手段として軽量コンクリートが登場したのであったが、その普及は進んでいると言えない。しかし、1995年にノルウェーで軽量コンクリートの国際シンポジウムが開催され世界的に軽量コンクリートに対する関心の高いことが伺われた。そこでALA協会としては委員会を設置して海外の情報をとりまとめることとし、その方法として、国際シンポジウムに発表された論文を整理紹介することとしたのである。

『軽量コンクリート、それは軽諾寡信であってはならない。形（軽）影相同となり、ある時には鶏（軽）群一鶴の妙があるが、ALA協会の最も頭の痛いことは、人工軽量骨材の出荷量が昭和48年度の180万 $m^3$ 強をピークに昨年度は80万 $m^3$ 弱であって需要がのびないことである。過去の実施例を基にして、実物実績の蓄積で使用者の理解を増して行く努めがALA協会に不足していないだろうか。現に自然環境の中で、健康体で社会に貢献している軽量コンクリート構造物は無数にある。』ALA協会サイドの現在までの心境としては以上のようなものであるが、この国際シンポジウムの内容を詳細に検討することにより、将来への新しい方向性を見出せるのではないかと期待している。

1995年1月17日の阪神大震災を契機に構造物の軽量化に対する要請が強まると思われるし、それと同時に既設構造物の耐震補強にも軽量コンクリートの出番が大いにあるものと思われる。特に、鋼橋脚の中詰め補強には軽量コンクリートが最適であると思われる。

以上に述べたように、軽量コンクリートに関する環境が徐々にではあるが変化している息吹を感じる昨今であり、今回の海外技術調査委員会の成果が関係者に何らかのお役に立つことを願っている。

なお、「軽量コンクリート海外技術調査委員会」の各委員と協力者には、貴重な時間を削いで委員会のためにご苦労されましたことに対して心よりお礼を申し上げます。

1997年3月

# 軽量コンクリート海外技術調査委員会委員

(五十音順・敬称略)

委員長	池田尚治	横浜国立大学工学部建設学科
委員	相原 功	(株)大林組技術研究所土木第三研究室
	出雲淳一	関東学院大学工学部土木工学科
	大賀宏行	東京都立大学工学部土木工学科
	緒方紀夫	日本道路公団東京第三管理局技術部
	河野広隆	建設省土木研究所コンクリート研究室
	武田 均	大成建設(株)技術研究所材料研究部
	橋 大介	清水建設(株)技術研究所建設技術研究部
	信田佳延	鹿島建設(株)技術研究所第二研究部
	橋本親典	群馬大学工学部建設工学科
	安松敏雄	日本道路公団試験研究所橋梁研究室
	涌井 一	(株)鉄道総合技術研究所技術開発事業本部
委託側委員	綾田隆史	日本セメント(株)開発第2部
	高羽 登	日本セメント(株)建材事業部
	藤木英一	日本メサライト工業(株)技術部
事務局	田近昭一	前・人工軽量骨材協会事務局
	濱崎和幸	人工軽量骨材協会事務局

## 目 次

### 『招待論文』

1) 軽量骨材の発展についての概観－歴史と実態調査(Germany) -----	1
2) 軽量コンクリート橋梁構造物の長期供用性能(United States) -----	3
3) 日本における軽量骨材コンクリートの発展(Japan) -----	6
4) 軽量骨材コンクリートの設計基準(Norway) -----	9
5) Norwayにおける軽量コンクリート利用の現状(Norway) -----	11
6) Englandにおける軽量骨材コンクリート(England) -----	14

### 『一般論文』

7) 軽量骨材コンクリートを用いた橋梁と海洋構造物の設計事例 (Fergestad, Hagen, Norway) ----	17
8) 軽量コンクリートに対する MODEL CODE 90の補足(Holand, Norway) -----	19
9) 軽量骨材コンクリート製石油掘削プラットフォームへの適用 (Løseth, Husem, Einstabland, Landbo, Norway) ----	21
10) 高強度軽量コンクリートの脆性について(Markeset, Hansen, Norway) -----	23
11) 鉄筋の重ね継手部を有する壁状パネルの実物大実験 (Munkeby, Dyken, Stemland, Thorenfeldt, Norway) ----	26
12) 大型 I 形はりのせん断耐荷力 (Thorenfeldt, Stemland, Tomaszewicz, Norway) ----	28
13) せん断補強筋のない軽量コンクリートはりのせん断耐荷力 (Thorenfeldt, Stemland, Norway) ----	30
14) 軽量コンクリートの付着、テンションスティフニングおよびひび割れ幅制御 (Walraven, Stroband, Netherlands) ----	32
15) 軽量コンクリートを使用した斜張橋 “IROISE” 橋(Lange, Riutort, Lebris, France) -----	34
16) Californiaの橋梁構造物の耐震設計における軽量コンクリートの適用 (Thorkildsen, Kowalsky, Priestly, U. S. A) ----	37
17) 北海で使用された軽量骨材 LYTAG の製造と物性(Dolby, UK) -----	40
18) 高強度軽量骨材コンクリートのHEIDRUN TLP への適用(Erlien, Norway) -----	42
19) 海洋コンクリートプラットフォームへの軽量骨材の利用 (Hoff, Nunez, USA Walum, Norway Weng, Canade) ----	44
20) NORDHORDLAND斜張橋及びSTØVSET橋の建設 (Johnsen, Helland, Heimdal, Norway) ----	46

21) 乾燥骨材による高強度軽量コンクリートの製造 (Smeplass, Hammer, Sandvik, Norway) .....	48
22) 高強度軽量コンクリートの力学的物性・耐久性・耐火性能について (Bilodeau, Chevrier, Malhotra, Canada Hoff, USA) .....	50
23) 水和による高温度にさらされた軽量コンクリートの化学的安定性 (Ronne, Hammer, Justnes, Meland, Jensen, Smeplass, Norway) .....	53
24) コンクリートの材料特性に及ぼす軽量骨材の特性の影響 (Hammer, Smeplass, Norway) .....	56
25) 練直ししない軽量コンクリートの強度低下 (Helland, Maage, Norway) .....	59
26) 高強度軽量コンクリートの凍害融解試験：内部亀裂 v s スケーリング (Jacobsen, Hammer, Sellevold, Norway) .....	61
27) 塩分環境下における人工軽量骨材コンクリートの寿命予測 (Maage, Helland, Carlsen, Norway) .....	65
28) 海水および酸性溶液中に 10 年間曝露された軽量コンクリートの耐久性 (Osborne, UK) .....	68
29) 骨材の吸水が高強度軽量コンクリートの性能に及ぼす影響について (Punkki, GjØrv, Norway) .....	71
30) Norwayにおける高性能軽量骨材コンクリートの発展と利用 (Sandvik, Hammer, Norway) .....	73
31) 高性能軽量骨材コンクリートのための使用材料 (Swamy, Wu, England) .....	76
32) 骨材混合によるコンクリートの養生効果 (Weber, Reinhardt, Germany) .....	79
33) 高強度軽量コンクリートの特性 (Zhang, Canada GjØrv, Norway ) .....	81
■ 日本における最近の軽量コンクリート施工例 .....	83



# 1) 軽量骨材の発展についての概観－歴史と実態調査

## A REVIEW OF THE DEVELOPMENT OF LIGHT WEIGHT AGGREGATES-HISTORY AND ACTUAL SURVEY

Spitzner, Joachim, Germany

### 1. 緒言

多くの人は、コンクリートと言うと、力学的な抵抗性はあるものの、重くて、冷たい材料と考えがちであるが、実際にはその性質は多種多様であり、例えば、重さは300～3000kg/m<sup>3</sup>、熱伝導率は0.1～3W/mK、強度は1～100MPaの範囲にある。

### 2. 軽量骨材 (LWA)

軽量骨材は、天然資源から得られたものと人工的に製造されたものと大きく2つに分けることができる。天然資源から得られる軽量骨材の原材料は、火山性の軽石、scoriaなどで、粉碎やふるいわけなどの処理のみが行われる。人工的に製造される軽量骨材は、通常は熱処理が行われ、その原材料の違いによって、以下の3種類に分類することができる。

a) 真珠岩、蛭石、粘土、頁岩、粘板岩などの天然材料

b) ガラス、フライアッシュなどの工業製品あるいは工業副産物

c) 溶鉱炉の底に溜まる灰、石炭のもえ殻、膨張スラグなどの工業副産物

このノルウェーでのシンポジウムでは、強度が8～80MPa、密度が1000～2000kg/m<sup>3</sup>の範囲にある構造用コンクリートを扱うので、LWAに使用される骨材は、膨張粘土、頁岩、粘板岩が好ましい。これらの原材料に関して、工業的な製造過程が異なる。れんが製造のために粘土を処理するのと似た湿式処理が、柔らかい粘土に対して一般的に行われる。破碎処理すなわち乾式処理が、固めの頁岩や粘板岩に対して普通行われる。焼きおよび膨張処理は、約1000～1200℃の温度でロータリーキルンで大抵行われる。ロータリーキルンは、最も適当な設備であることが認められている。ある製造過程では、膨張を正確に制御し、異なる密度(例えば300、400、500、800kg/m<sup>3</sup>)を1つの原材料から作ることができ、他の過程では粗い粒を細かくするよりは軽くしながら、狭い範囲の密度(500-600kg/m<sup>3</sup>)に収めることができるからである。

### 3. 歴史

焼くことによって粘土れんがを多孔質にすることは、すでに紀元前2500年ころから行われていた。急速蒸発による多孔質粘土の製造に関する特許がドイツにおいて、1880年4月27日にG.Kukenthalにブラウンシュバイク市から与えられる。ローマ人は天然軽量骨材を実に巧みに利用し、118-128年にローマに建てられたパンテオンはその例として一番有名である。天然軽量骨材の工業的な利用は、ドイツにおいて1845年にFerdinand Nebelによってコブレンツで始められる。1928年以来、アイスランドでは軽石が地方の建築業に利用されてきた。

#### 3. 1 北アメリカ

Stefan John Haydeは、1918年2月12日ロータリーキルンによる膨張頁岩の製造方法に関して特許を取る。1920年に"Haydite"名の膨張頁岩の商業的生産プラントが開始し、1941年にはアメリカ合衆国において7基のプラントがカナダで1基がHaydeのライセンスを受けて操業していた。しかし、1946年彼の特許の期限が切れると、LWAの産業が急速に発展する。1955年にはアメリカおよびカナダに33の製造プラントがあった。当時の生産量は170万m<sup>3</sup>で、1958年には300万m<sup>3</sup>以上にまで達していた。1961年の調査では、LWAの生産の65%が頁岩によるもので、粘土が29%、粘板岩が9%あった。

今日の製造元は50年代後半から60年代前半に稼働を開始している。例えば、Arkalite(粘土、1959年)、Utelite(頁岩、1962年)およびLehigh(頁岩、1964年)である。現在では大抵のアメリカにおけるプラントは、LWAの適用分野が制限されるためか密度が500～700kg/m<sup>3</sup>のもののみを生産している。

#### 3. 2 ヨーロッパ

ヨーロッパでは、Phillip Holzmann 株式会社の特許に基づきドイツが一番最初に膨張粘土の商業生産を1935-1939年まで行ったが、一般的には、デンマークが膨張粘土LECA(Light Expanded Clay Aggregate)の発祥の地と考えられ、1939年Rosnesに年産20,000m<sup>3</sup>のロータリーキルンによるプラントが初めて設立される。その後

プラントは、Hingeに移され現在6基のキルンを有し、130万m<sup>3</sup>の生産能力を持っている。

ヨーロッパにおける発展の歴史は、北米と似ており60年代頃に頁岩、膨張粘土、頁岩および粘板岩の製造プラントが建設されている。もう一つのアメリカとの類似点は、幾つかの会社は、相互協力によって複数のプラントを稼働させながら、利益を出しているが、必ずしも全ての生産プラントが成功しているとは言い難い。解決しなければならぬ主な問題点は、原材料、製造工程、品質および市場である。

ドイツでは70年代に10のプラントが閉鎖し、80年代までにさらに5つのプラントが閉鎖している。現在ドイツでは、6つのプラントが稼働している。アメリカとは対照的に、ヨーロッパでは原材料として火力発電所から産出されるフライアッシュを用いて、他のLWAに比べて相対的には重い800kg/m<sup>3</sup>程度のLWAを製造している。

### 3. 3 ロシア

ロシアでのLWAについてはよく把握できていないが、世界で一番多くの"Keramsit" (LWAのロシアでの製品名)を生産している。1987年には、5000万m<sup>3</sup>の生産能力を持つ400以上のプラントが生産してきている。生産量の75%が粘土あるいは頁岩から生産されていると言われている。

## 4. 実態調査

1994年時点での生産能力、輸送についての世界的規模のアンケートが1995年に行われた。しかし、全ての企業からの回答は得られていない。信頼性のある回答が得られたのは主にヨーロッパからである。その他の国々からの情報はヨーロッパからの距離に比例して減少している。

### 4. 1 西および中央ヨーロッパ

西および中央ヨーロッパにおいては、膨張粘土、頁岩および粘板岩に関しては、32基のプラントが設置され、1994年時点でその内30基が稼働している。さらに、フライアッシュから生産するプラントが5つある。8カ国においては、プラント1基を有しており、イタリアおよびドイツでは5基以上のプラントを有している。設置されたプラントの生産能力に対する売上量の割合は、大抵の国において50~80%となっている。なお中央ヨーロッパにおいてコンクリートに用いられるLWAの全体の量は、おおよそ1200万m<sup>3</sup>となっている。

### 4. 2 その他の国々

アメリカおよびカナダにおいては、LWAを生産する14の企業があり、その内の数企業は5基以上のプラントを有している。1994年の膨張粘土、頁岩および粘板岩の船積み量は、おおよそ460万m<sup>3</sup>であった。その量は増える傾向にある。設置されたプラントの生産能力に対する売上量の割合は、60~85%であった。

南アメリカでは、2基のプラントがアルゼンチンおよびヴェネズエラにあり、アフリカにも同じ数のプラントがアルジェリアとエジプトにある。

アジアでは、ソビエトは別にして、中国、イラン、韓国およびベトナムに4基ある。日本では1994年現在2基のプラントがあり、120万m<sup>3</sup>の生産能力と750,000m<sup>3</sup>の出荷を行っている。その用途は主に構造コンクリート用であり、寸法が5/15mm密度がおおよそ800kg/m<sup>3</sup>となっている。

### 4. 3 調査のまとめ

世界中において140基以上のプラントの内、半分以上が旧ソビエト連邦で稼働しており、1/4がヨーロッパで、残りの1/4がその他の国々である。

## 5. 結言

構造用のLWAには、通常のコンクリートに比べて、200~300kg/m<sup>3</sup>あるいはそれ以上コンクリートの重量を軽減することができる軽くて強い良い砂が欠乏しているのが問題で、将来軽くて良い砂の開発への挑戦が期待される。LWAの原材料として廃棄物あるいは副産物を用いる場合、これらの原材料が健康に害があるかまたは影響を及ぼすかについて、我々は完全に確認しなければならない。

(抄訳担当 出雲淳一)



## 2) 軽量コンクリート橋梁構造物の長期供用性能

### LONG-TERM SERVICE PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT CONCRETE BRIDGE STRUCTURES

W.R.Brown, III and Torbjorn M.Larsen

Florida Department of Transportation, United States

Thomas A.Holm

Solite Corporation, United States

#### 1. 概要

本論文は、1964年にアメリカ合衆国のフロリダ州の Fanning Springs の国道19号線でSuwanee Riverに架けられた軽量コンクリート橋 Fanning Springs Bridge の長期供用性能に関する報告である。本報告に関する詳細な調査は1992年にフロリダ交通局によって実施された。調査方法としては、1968年と1992年に計測された実際の橋梁現場におけるトラック荷重を用いた荷重試験によるひずみとたわみの比較ならびに、フロリダ交通局の橋梁評価システムのプログラムの一部を用いて、有限要素モデルによって求められた理論的な応答解析結果との比較を行った。その結果、約30年の長期供用期間を経ても床版の曲げ剛性が変化していません、疲労特性に関しても問題がなく、長期供用に対する軽量コンクリート橋の機能が良好であることが明らかになった。

また、同じく1964年にフロリダ州のIndian Riverに架けられたSebastian Inlet Bridgeの床版のコンクリート表層の劣化に関する調査について報告され、約30年間の長期供用において軽量コンクリートの床版の耐久性は普通コンクリートの床版とほぼ同じであり、ほとんど劣化していないことが明らかになった。

#### 2. Fanning Springs の Suwanee River Bridge

Suwanee River に架かる

Fig. 1に示すFanning Springs 橋は、4スパンプレキャストプレストレスト軽量コンクリート製であり、桁部分に用いられたコンクリートの圧縮強度は34.5MPaである。

また、場所打ちの軽量コンクリートで造られた床版の設計基準強度は、27.6MPaである。軽量コンクリートの最大単位体積質量は $1880\text{kg/m}^3$ である。

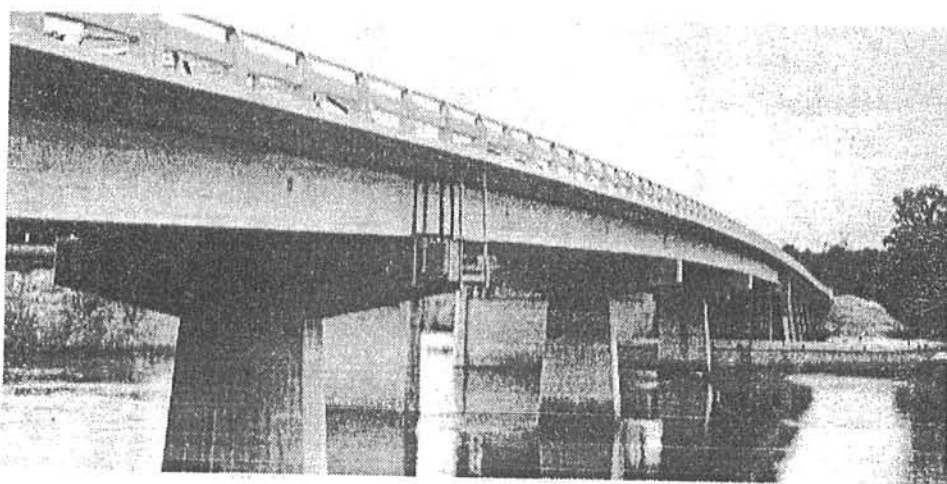


Fig. 1 1964年6月4日の Engineering News Record に掲載された当時のFanning Springs 橋

この Fanning Springs の橋梁構造物で軽量コンクリート

が用いられるまでフロリダ州では橋梁構造物に軽量コンクリートが用いられた前例が全くなかった。そのため、Suwanee River Bridge では、建設後2年間、構造物の挙動に関する種々の現場観測や幅広い研究が連続的に行われた。橋桁直下で計測する研究者を運搬するため、特別に懸垂式移動車両装置が用いられた。

1966~1968年の試験調査の直接的な結果である、詳細なコンクリートの情報、橋桁のたわみやひずみ応答からは、広範な荷重条件に対して有益であった。1992年の念入りな試験計画では、28年間に供用性能がどのように変化したかあるいは減少したのかを、直接比較することが試みられた。

#### 3. 載荷試験計画と計測装置

1968年当時に橋桁の設計に用いられていた HS20truck の輪荷重の寸法と、1992年の試験で用いられたフロ

リダ交通局の truck 荷重の全重量はほとんど同じであるが、車輪の配置および間隔が異なる。車両軸方向の間隔の位置のみならず車両幅の間隔との無数の組み合わせに従って、非常に多くの静的載荷試験が何度も繰り返された。計測機器としては、1968年の試験と同様に、電気的ひずみゲージを使用した。計測用に桁に貼付したゲージの位置の大半は十分確認することができた。これ以外に、桁中央直下の縁ひずみを計測することとした。また、トラック荷重の移動による動的な変形性状を得るために、LVDTを用いた。

#### 4. 載荷試験の結果

当時の載荷状態と測定状態は、Fig. 2に示すたわみ曲線の測定値と解析値を比較することによって複製された。スパンの自由端から18.4mの位置である載荷点直下の最大たわみ量は7.1mmであった。この値は、記録されている当時のたわみ量6.6mm（自由端から15.4mの位置）と非常に一致している。動的荷重によるたわみの変化は、静的荷重の場合と比較して少し小さい。

Fig. 3は、5本の橋桁断面のたわみの測定値と解析値との比較を示す。同様にFig. 4には、複製された5本の橋桁断面のひずみの測定値の比較を示す。

これより、大きなひずみの領域に位置する場所では、ひずみの測定値は非常に一致しているといえる。以上の結果から、1994年と1964年のデータを比較しその外観が一致していたことから、橋桁の挙動はほとんど変化していないと言える。

#### 5. 疲労特性

これまでの多くの研究報告では、軽量コンクリートの疲労特性は、普通コンクリートの疲労特性と比較して、ほとんどが幾分よいという場合が多いが、ほぼ同じであるというのが一般的である。また、軽量コンクリートの場合には骨材粒子と周囲のセメントマトリックスの良好な弾性的付着特性の影響で、普通コンクリートよりも疲労特性が向上するという研究者もいる。軽量コンクリートでは、粗骨材粒子とその周りのモルタル層の弾性係数は相対的に同程度である。一方、普通コンクリートでは、普通骨材の弾性係数は、その周囲のモルタル層の弾性係数の3~5倍程度大きい。したがって、軽量コンクリートでは、複合体としての骨材粒子とモルタル層が弾性的に一体化し、その結果、応力集中が発生せず、外的応力に対して平均的に内的応力が発生する。これに対し、普通コンクリートでは、大きな弾性的不一致のために応力集中が発達し、その結果として、コンクリート複合体に多くの微細ひび割れが発生することになる。

また、人工軽量骨材の表面のポゾラン反応の影響で、軽量コンクリートの接触領域の品質や完全性が非

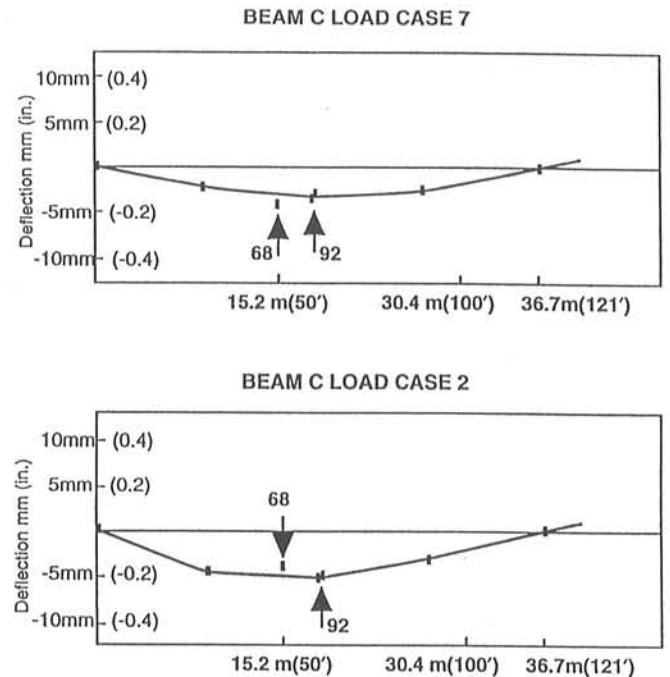


Fig. 2 1968年と1992年の測定値の比較によってフロリダ交通局が復元したたわみ曲線

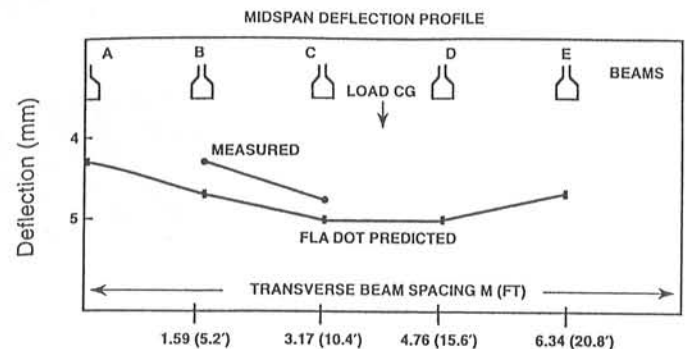


Fig. 3 横断方向のたわみ分布の予測値と測定値

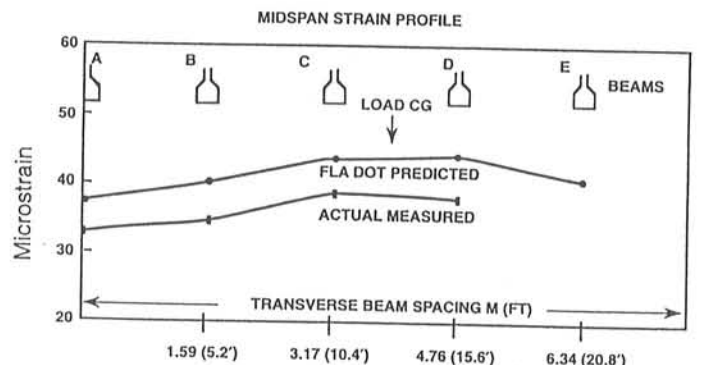


Fig. 4 横断方向のひずみ分布の予測値と測定値

常に良好になることが知られている。微細ひび割れの発生は、集積した骨材とその周辺のモルタルマトリックスの間の境界の脆弱領域でほとんど開始するため、軽量コンクリートの場合は微細ひび割れの発生確率をより小さく抑制することができるものと推測される。

## 6. Sebastian Inlet Bridge

フロリダ交通局は1964年に、大西洋に急激に注ぎ出るIndian RiverのSebastian河口に、兩岸から張り出した片持ち梁の間に中央スパンを挿入する施工方式による長スパン軽量コンクリート桁の橋梁構造物をHoward Needles Tammen & Bergendorf社による設計で建設した。アプローチスパン22.3mはType3の普通コンクリートで建設した。中央部は、Fig. 5に示す30.5m, 54.9m, 30.5mからなる3スパンの連続桁である。

したがって、有効高さ1.83m、桁長36.6mのプレキャストPC桁と挿入式断面の床スラブ、縁石やらんかんの建設に軽量コンクリートを使用することになった。

この橋梁の表面の耐久性に関しては、30年以上の暴露によって観測されることになった。Fig. 6の拡大写真は連結部の左側の軽量コンクリートのスラブ表面の耐久性が、普通コンクリートの耐久性とほとんど同じかあるいは劣ることはないということを示すものである。この実コンクリートの耐久性の実証は、粗骨材のタフネスがコンクリート全体の耐久性に貢献する程度を決定するために特に重要である。ASTM C131のC級によって試験される人工軽量骨材の劣化の損失量は、普通骨材が要求されるASTM C33の条件下で許される最大値よりも一般的に小さい。しかしながら、実験室での劣化試験の損失量は概して、ほとんどの普通骨材よりも人工軽量骨材の方が大きい。この橋梁の軽量コンクリートの長期供用期間における満足すべき耐久能力は、普通コンクリートの耐久能力とほとんど同じである。このことは単に、自然の環境条件と耐久条件の相関性を推定して試験された急速で短時間でかつ人工的な試験コンクリートの結果に対して、実コンクリートの性能が正反対であるということが強調されたにすぎないことを意味するだけである。

## 7. 結論

Fanning Springs Bridgeの詳細な検査結果と同様に、1968年に記録された測定結果と1992年の計測結果の比較によって、31年以上の供用年数を経てもこの橋梁は設計者の意図どおりの機能性を保持していることが明らかになった。全体として取り扱ったとき、たわみとひずみのデータは、年数が経ても増加する傾向を示さなかった。測定の不確実性を含むとき、個々の測定値の大部分が品質的に同じであると考えられた。この実験的な橋の橋桁や床版に用いられた人工軽量骨材は、この個性的な設計において十分満足がいくものであり予期できるものであった。また、この研究成果によって、以下のことが実証された。すなわち、フロリダ交通局の橋梁評価システムのプログラムを用いることにより、橋梁の性能と使用荷重の応答に十分に一致したデータを用いたモデルとの妥当性が証明された。

Sebastian Inlet Bridgeの軽量コンクリートスラブの暴露部分の耐久性が、30年以上暴露された普通コンクリートのスラブ表面（隣接した場所にある）とほとんど同程度の損傷であった。（抄訳担当 橋本親典）

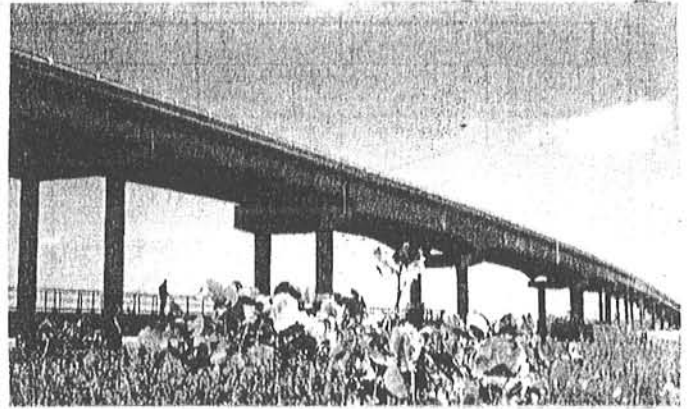


Fig. 5 Sebastian Inlet Bridge の中央部

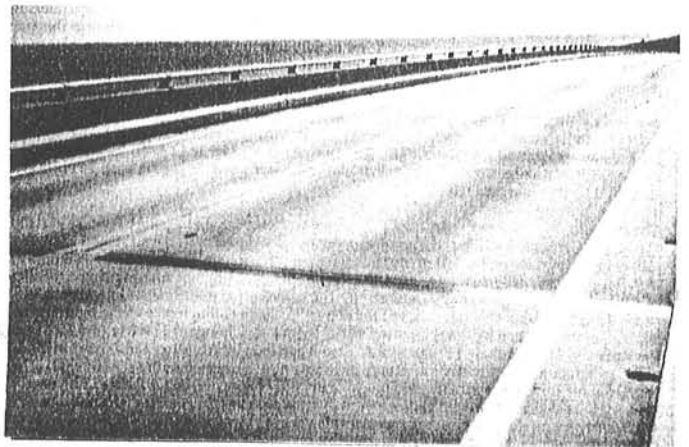


Fig. 6 Sebastian Inlet Bridge の普通コンクリートと軽量コンクリートスラブのジョイント部

### 3) 日本における軽量骨材コンクリートの発展

#### DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE IN JAPAN

Shoji Ikeda

Yokohama National University

Japan

#### 1. はじめに

本論文は、日本における構造用軽量骨材コンクリートの発展、特性および構造用軽量骨材コンクリートに関する規格などについて説明するとともに、軽量骨材コンクリートの実構造物への適用性や今後の技術動向について検討を加えている。

#### 2. 発展の概要

日本における軽量骨材コンクリートのコンクリート構造物への利用は1950年代に始まり、1960年代には人工軽量骨材の製造が開始販売された。軽量である特徴を生かし、建築構造物のみならず土木構造物にも利用され、1964年に土木構造物として初めて高速道路のデッキに軽量骨材コンクリートが適用された。しかし、軽量骨材の生産量は景気に影響を受けるため、結果的には生産量は増大していないが、潜在的には増大する可能性を有している。

最近の利用率は、ビルディングの建設に約75%、プレキャストカーテンウォールに約25%であり、土木分野への利用はほとんどない。しかし、高性能減水剤の軽量骨材コンクリートへの利用により、コンクリートの特性やポンプ圧送性が改善され、土木分野においても利用されるようになり、ビルディングの建設には約100万 $m^3$ の人工軽量骨材が用いられている。

#### 3. 規準および規格

軽量骨材は日本工業規格 J I S A 5 0 0 2 「構造用軽量コンクリート骨材」において規格化されている。原材料、比重、絶対容積、圧縮強度、コンクリートの単位容積質量によりクラス分けされている。

土木学会のコンクリート標準示方書（設計編）において、軽量骨材コンクリートの設計用値は以下のよう

に規格化されている。

(1) 細粗骨材とも軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートの曲げ強度、引張強度、付着強度、せん断強度、支圧強度は、圧縮強度の特性値から得られた普通コンクリートの値の70%とする。

(2) 軽量骨材コンクリートのヤング係数は、圧縮強度の特性値が18、24、30および40MPaの場合、それぞれ1.3、1.5、1.6および $1.9 \times 10^4$ MPaとする。

(3) 軽量骨材骨材コンクリートのクリープ係数は、普通コンクリートの場合の75%とする。

土木学会のコンクリート標準示方書（施工編）において、軽量骨材コンクリート構造物の施工に関する一般的な要求性能を規定している。

(1) 軽量骨材は清浄、堅硬、耐久的であり、適当な粒度と単位容積質量を有するものとする。コンクリートおよび鋼補強材に対して悪影響を及ぼさないものとする。主な諸物性は、J I S A 5 0 0 2の規格を満足するものとする。凍害性に関しては、実構造物の挙動および促進試験結果を考慮して評価する。

(2) 軽量骨材コンクリートは所要の性質を有すること。一般に、軽量骨材コンクリートの単位容積質量はフレッシュの値を用いる。

(3) 軽量骨材コンクリートは一般的にあらかじめ吸水させた状態で用いる。

(4) 軽量骨材コンクリートの配合は、所要の特性を有し、適当な流動性をもつ範囲内で単位水量が最小と



なるように試し練りにより決定する。

(5) 普通ポルトランドセメントを用いた軽量骨材コンクリートの水セメント比を凍害性により決定した場合、普通コンクリートの場合に比べ5%低減する。水密性により決定した場合、一般に55%を越えてはならない。

(6) スランプは適切な流動性が得られる範囲内で最低の値とする。高性能減水剤を用いる場合には、土木学会の「流動化コンクリートの施工指針(案)」および「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル」を参照してスランプを決定する。

(7) 軽量骨材コンクリートはAEコンクリートとし、普通コンクリートの場合に比べ1%空気量を多くする。

(8) 材料のミキサへの投入順序は練混ぜ効率や吸水性を考慮し、所要の性能と特性を有するように決定する。練混ぜ時間は、試験により定める。

(9) 軽量骨材コンクリートの運搬には、トラックおよびバケットが適している。ポンプにより運搬する場合には、土木学会の「流動化コンクリートの施工指針(案)」および「人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル」を参照する。

(10) 一般に、レディーミクスト軽量骨材コンクリートを用いる場合には、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に準拠する。

(11) 締固めは普通コンクリートの場合と同様に行う。

(12) 仕上げの際には、材料分離した粗骨材をコンクリート中へ押し戻す。

(13) 打設後最低5日間は湿潤状態に保つ。

(14) 品質管理と調査は普通コンクリートと同様に行うが、品質管理には単位容積質量試験が重要である。

#### 4. 構造物への適用

##### (a) コンクリートプラント用コンクリートバージ

本州四国連絡橋用のコンクリートバッチャープラントを備えたプレストレスト軽量骨材コンクリートバージは1982年に建造された。バージは、長さ62m、幅23m、高さ10mの矩形ケーソンである。設計基準強度が45MPa、比重1.9で、細骨材は海砂を用いた。

##### (b) 石油掘削プラットフォーム

上下を鋼製のベッドとデッキに挟まれた軽量骨材コンクリートの石油掘削プラットフォーム(Super CIDS)が1984年に建造された。コンクリート部分にはせん断壁を除いて高強度軽量骨材コンクリートが用いられている。圧縮強度46MPa、比重1.84以下を有する人工軽量骨材を用いた。全使用量は9280m<sup>3</sup>で、外壁に用いた軽量骨材コンクリートにはシリカフェームを用いた。

##### (c) 下水処理場

鋼材で取り囲まれた鉄筋コンクリートケーソンが1985年に建設され、下水処理施設として用いられている。人工軽量粗骨材と天然砂を用いた軽量骨材コンクリートを24000m<sup>3</sup>用いた。

##### (d) 吊り床版橋

吊り床版橋は1991年に建設され、アンカー基礎、アバットメント、現場打ちの人工軽量骨材コンクリートスラブで取り囲まれた主ケーブルで構成されている。4種の繊維補強プラスチックが用いられている。スパン46.5m、スラブ厚21cmで、軽量骨材コンクリートの設計基準強度は40MPaであった。

##### (e) 斜張橋

栃木県に建設された斜張橋の歩道橋に、高流動高強度軽量骨材コンクリートが用いられた。圧縮強度40MPa、比重1.9を有する軽量骨材コンクリートで、スランプフローは打設時に50cmであった。

##### (f) 高層ビルディング

1993年に日本一高いランドマークタワーが建設されたが、9階から最上階の70階まで人工軽量骨材コンクリートが用いられている。ポンプにより21MPaの軽量骨材コンクリートが運搬された。

## 5. 新開発と討議

高性能軽量骨材の開発により軽量骨材コンクリートの特性は改善されている。以下に新たに開発された人工軽量骨材の例を示す。

・新しい製造方法により開発された高性能人工軽量骨材は、ひび割れもしくは大きな空隙がなく、多くの空隙が独立し均一に小さなものとなっている。乾燥状態で用いても吸水量は著しく少なく、流動性を損なうことなくコンクリートをポンプにより施工することができる。さらに、骨材自身の強度も改善されているので、水結合材比を低減することにより140MPaの高強度コンクリートの製造も可能となる。この人工軽量骨材は、原料と製造工程を改善することにより高性能化が得られた。

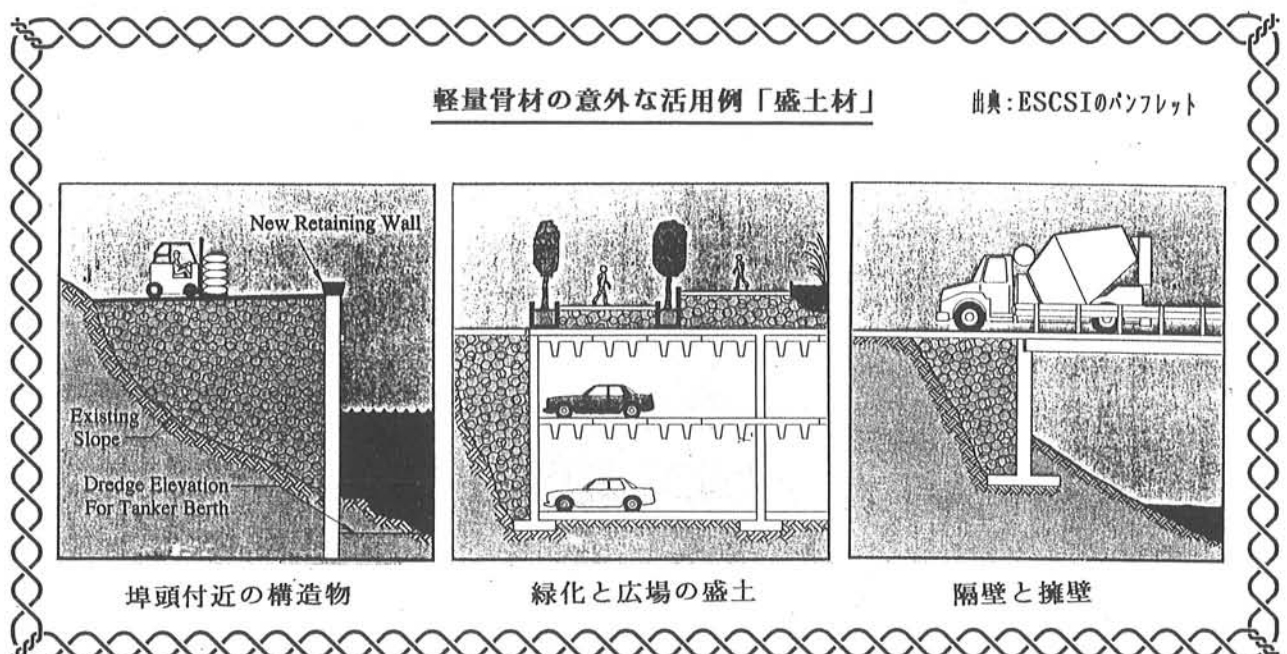
・表面を高分子パラフィンで被覆された新しい軽量粗骨材は、高圧力下のポンプ施工においても吸水を少なくすることができるので、凍結融解作用、摩耗作用、火事に対する高耐久性が得られる。この骨材を用いたコンクリートは、ポンプ圧送によるスランプロスが小さく、従来の軽量骨材コンクリートの場合に比べ流動性が著しく改善される。パラフィンの被覆がコンクリートの圧縮および引張強度に及ぼす影響はほとんど認められない。

以上のように、人工軽量骨材の品質を改善することにより高性能コンクリートの製造が可能となったが、より広範囲に軽量骨材コンクリートを利用するために、以下に示すような性能を有することを確認する必要がある。

- (a) 普通コンクリートと同等な強度を有する軽量骨材コンクリートを容易に製造できること。
- (b) 軽量骨材コンクリートのクリープ係数が普通コンクリートより小さい。
- (c) 軽量骨材は工場製品であるので、軽量骨材の均質性が確保できる。
- (d) アルカリシリカ反応に対して問題が生じない。
- (e) 軽量骨材コンクリートの長期安定性が、軽量骨材コンクリートの種々の使用実績から確認できる。

さらに、軽量骨材コンクリートのコストパフォーマンスは、普通コンクリートと軽量骨材コンクリートの圧縮強度、比重、フレッシュコンクリートの価格を用いて評価できることを明らかにした。

(抄訳担当 大賀宏行)





## 4) 軽量骨材コンクリートの設計基準

### DESIGN CRITERIA OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE

Erik Thorenfeldt

The Norwegian Institute of Technology

ルウエ-におけるこの10年間の軽量骨材（以下 LWA と呼ぶ）コンクリートに関する研究と適用の実績に基づき、普通骨材（以下 ND と呼ぶ）コンクリートと対比させながら既存の設計基準である EUROCODE 2（以下 EC2 と呼ぶ）及び Norwegian Standard 3473（以下 NS3473 と呼ぶ）を紹介、論評したものである。

#### 設計基準強度の適用範囲

EC2 では ND コンクリート、LWA コンクリートとも適用範囲の上限は、円柱供試体で 50 MPa である。一方、NS3473 では ND コンクリートの上限は円柱供試体で 94 MPa、立方体供試体で 105 MPa であり、LWA コンクリートは骨材の脆さを考慮し次式（円柱供試体）によっている。

$$f_{ck} \leq 94 \left( \rho / 2200 \right)^{1.5} \quad \text{ここで、} \rho \text{ はコンクリートの絶乾状態の単位容積質量 (kg/m}^3\text{)}$$

例えば  $\rho = 1300$  の場合、 $f_{ck}(\text{max}) = 42.7 \text{ MPa}$  となり、 $\rho = 1900$  の場合、 $f_{ck}(\text{max}) = 75.4 \text{ MPa}$  となる。

#### コンクリートの単位容積質量

コンクリートの単位容積質量は LWA コンクリートの最も重要な特性値であり、EC2では上記の絶乾状態の  $\rho$  を  $200 \text{ kg/m}^3$  ごとに無筋及び鉄筋コンクリートの標準的な単位容積質量を示している。

設計者は絶乾状態と湿潤状態の差を予測し、使用する鉄筋量、コンクリートの含水量から施工時、完成時の単位容積質量をそれぞれ定める必要がある。また、透水性や耐塩性の性能、空気量が要求される場合もあるが、いずれにしても設計の早い段階に骨材の種類、コンクリートの製造方法を決定し、諸々の検討を実施することが肝要である。

#### 圧縮強度

円柱供試体と立方体供試体の強度比は、ND コンクリートの場合約 0.8 でありこの値は強度増加に伴い少し増加する。EC2 では、LWA コンクリートも ND コンクリートと同一の比としているが、LWA コンクリートは一般に高い傾向にあり、その比が 1.0 の場合も見られる。

図-1 に2種類の LWA コンクリートの圧縮強度の材齢 28 日以後の強度の伸びを示す。高強度のものほど増加が少なく、水結合比をさらに下げれば、28 日以前に最高強度に達するであろう。

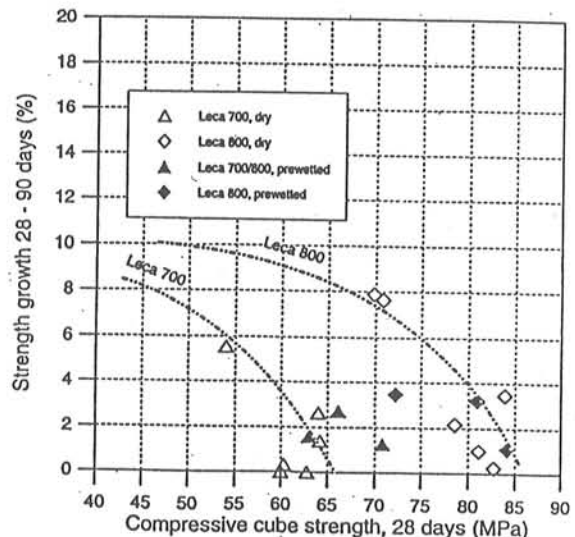


図-1 28日～90日間の圧縮強度増加

#### 応力-歪み曲線

ND コンクリートに比べて、応力が直線的に増加し、降伏点歪みが大きく、降伏点以後急激に減少する。（論文 12）参照

### ひび割れ発生面の設計圧縮強度

正負の面内力が作用する部材の設計圧縮強度  $f_{c2}$  について、NS3473 では ND コンクリート、LWA コンクリートとも同じ次式を示している。

$$f_{c2}/f_{cn} = 1 / (0.8 + K \times \varepsilon_1) \leq 1.0 : K = 100$$

ここで、 $f_{cn}$  は構造体としての圧縮強度（訳注：論文 12）ではシリング強度の 0.8 と仮定）、 $\varepsilon_1$  は主圧縮歪に直交する主引張歪である。

梁でウェブが薄い場合については 論文 12) を参照

### ヤング係数

EC2, NS3473 では圧縮強度 (MPa) と コンクリートの絶乾単位体積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) を用いて次式を示している。

$$\text{EC2} : E_{1cm} = 9500 (f_{ck} + 8)^{1/3} \times (\rho / 2200)^2$$

$$\text{NS3473} : E_{1ck} = 9500 (f_{ck})^{0.3} \times (\rho / 2400)^{1.5}$$

両基準とも、中程度の強度、単位体積質量の LWA コンクリートのクリップひずみは、ND コンクリートとほぼ同じ、すなわち、LWA コンクリートのクリップ係数は、ヤング係数の低い分小さいとしている。

### 引張強度

LWA コンクリートの引張強度は、設計基準強度が同じ ND コンクリートの引張強度に次の修正係数を乗じている。

$$\text{EC2} : \eta_1 = 0.4 + 0.6(\rho / 2200)$$

$$\text{NS3473} : \eta = 0.3 + 0.7(\rho / 2400)$$

### スラブのせん断強度

論文 12) 参照

### 鉄筋の定着

引抜き試験の結果を NS3473 と比較すると、 $\Phi 25$  の重ね継手の場合は同基準が妥当であった。継手長が長くなると、破壊時に継手に沿って脆性破壊を起こす可能性が高い。

参考文献：本シボジウム の Bjerkeli, L., Aassved Hansen, E., Thorenfeldt, E. :

"Tension Lap-Splices in High Strength LWA Concrete"

### その他の設計パラメータ

鉄筋の拘束効果：ND コンクリートに比べ拘束効果は小さい

骨材のインターロック：クラックに沿ったせん断滑動に対する抵抗が極めて小さい

疲労：ND コンクリートとの差は小さい

脆性：論文 10) 参照

(抄訳担当：相原 功)

## 5) Norway における軽量コンクリート利用の現状

### LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE IN NORWAY

Kjell Håkon Helgesen

Norsk Leca, Norway

#### 1. はじめに

ノルウェーにおける軽量骨材 (Light Weight Aggregate;LWA) の建設分野への利用は約40年前に始まった。軽量骨材そのものが初めて製造されたこの時代は石造建築 (masonry) の代替としての用途が主であったが、コンクリートに適用するための研究も同時に始まっていた。

最も興味深いコンクリートへの初期の適用例としては、「Ishavs-katedralen」と呼ばれる北ノルウェー Tromsø の教会が挙げられる。これは60年代始めに構築されたが、その特異な (有名な) 形状の屋根は軽量コンクリート (LWA Concrete;LWAC) の適用によって初めて可能となった。

#### 2. 石造建築における軽量コンクリートブロック

ノルウェーは世界で最も多く LWAC が用いられている国である。

##### 2. 1 ノルウェーにおける LWA の製造

1954年には一つのキルンのみで年間100000 m<sup>3</sup>の製造能力であったが、現在は4つのキルンで100万m<sup>3</sup>の製造能力を有する。40年前の製造開始より、現在まで1800万m<sup>3</sup>のLWAブロックが製造・販売されている。ノルウェーの人口400万人として、一人当たり4.5 m<sup>3</sup>、20~25m<sup>3</sup>もの消費量に上る。ノルウェーで製造されるLWAブロックの典型的な性能は、強度2~3MPa、比重は750-800kg/m<sup>3</sup>である。

##### 2. 2 日曜大工の思想

LWAブロックがこんなにも売れているのは、日曜大工市場が寄与するところが大きい。1950年代後半の住宅不足の時代には70-80%のLWAブロック壁が、職人ではなく一般人によって手作りされた。この伝統は今も受け継がれている。現在、ノルウェーのシングルユニットハウスの基礎の50%以上はLWAブロックからなるが、ほとんどが一般人の日曜大工によって構築されている。

#### 3. プレキャスト部材

ここ5~10年間のLWAC<sup>\*</sup>キャスト部材の年間使用量 (多くが床版および壁としての利用) は100000m<sup>2</sup>~200000m<sup>2</sup>である。ここ5年間では、高速道路トンネルのエレメントへのLWACへの使用例が急激に増加している。

#### 4. 高強度軽量骨材コンクリート

80年代初めより高強度軽量骨材コンクリートが実用化され、現在ではかなりの量が主に長大橋および沖合プラットフォームに適用されている。

表-1 ノルウェーでLWAを用いて構築された長大橋

Name	Type of construction	Length	Year of completion	LWAC volume
Sandhornøya bridge	Cantilever bridge	374 m	1989	1300 m <sup>3</sup>
Boknasundet bridge	Cantilever bridge	385 m	1991	2500 m <sup>3</sup>
Eidsvoll bridge	Girder bridge/8 spans	320 m	1992	2600 m <sup>3</sup>
Bergsøysundet bridge	Floating bridge	914 m	1992	4800 m <sup>3</sup>
Nordhordlands bridge*	Floating bridge	1246 m	1993	8500 m <sup>3</sup>
	Cable stayed bridge	369 m	1993	1100 m <sup>3</sup>
Støvset bridge	Cantilever bridge	420 m	1993	1000 m <sup>3</sup>

\*Also called «Salhus bridge».

#### 4. 1 橋梁

1989年以來、LWACが適用された主な橋の一覧を表-1に示す。これらに先立ち、わずか25m<sup>3</sup>のLWACを用いた小さな橋が1987に試験施工されており、28日強度で75MPa(立方体試験)で比重1920kg/m<sup>3</sup>が実現されている。これらに用いられたほとんどの軽量骨材は、高強度膨張粘土である(商品名Liapor8;ドイツ製 かさ比重800kg/m<sup>3</sup>,商品名Leca750;ノルウェー製 かさ比重750kg/m<sup>3</sup>)。コンクリートの典型的グレードはLC55あるいはLC60で(28日立方体強度55or60MPa),硬化コンクリートの比重は1900kg/m<sup>3</sup>である。高強度LWACを用いる理由は様々で、カンチレバー橋への適用理由としては主に長大でもスレンダーな形状を実現すること、および単にかりのバランスをとることである。8スパンのギルダ一橋であるEodsvoll橋では、コストダウンおよびスレンダーさを実現する目的でLWACが適用された。

#### 4. 2 浮き橋

7つのフオート(pontoon)を持つBergsoysundet橋および10のフオートを持つNordhordlands橋のフオート部がLWAC製である。Bergsoysundet橋のフオートサイズは、幅20m,長さ34m,高さ6.4mであり、Nordhordlands橋では幅20.5m,長さ42m,高さ6.5-8.5mである。コンクリート壁の厚さはわずか350mmである。Nordhordlands橋は浮き橋部とCable Stayed橋部から成り、この種の橋ではノルウェーにおけるLWACの初の適用例である。

現在、LWCAを用いた橋が一つ構築中であり、他に1996-1997施工予定のものが一つある。

#### 4. 3 沖合構造物

表-2に、沖合構造物への高強度LWACの主な適用例を示す。

表-2 ノルウェーでLWAを用いて構築された沖合構造物

Name	Type of construction	Grade	Density	Built	LWAC volume
Snorre Foundation	Templates	LC60	1900 kg/m <sup>3</sup>	1990-91	1100 m <sup>3</sup>
Troll GBS	Gravity base	LC75	2250 kg/m <sup>3</sup>	1992-95	60000 m <sup>3</sup>
Heidrun TLP	Tension leg	LC60	1950 kg/m <sup>3</sup>	1993-95	65000 m <sup>3</sup>
Troll West Floater	Catenary anchored	LC75	2250 kg/m <sup>3</sup>	1993-95	20000 m <sup>3</sup>

#### 5. 改良型通常密度コンクリート

高強度普通密度コンクリートと同程度の弾性係数かつLC75以上の強度性能を有するLWACとして、粗骨材が部分的にLWA(商品名Leca800;かさ比重800kg/m<sup>3</sup>,4-12mm径)に置換された「改良型通常密度コンクリート;Modified Normal Density Concrete(MND)」が実用化されている。

Troll GBS実構造物からの実績データで、それぞれ強度80MPa,コンクリート密度2230kg/m<sup>3</sup>,弾性係数31.5GPaを実現している(図-1~3)。構造物全体の重量を低減する目的で、浮きコンクリートプラットフォーム(The Troll West floating concrete platform)の柱部分へもMNDが用いられた。これらの例は複雑化するコンクリート構造の問題点が、LWACによって解決された好例と言える。

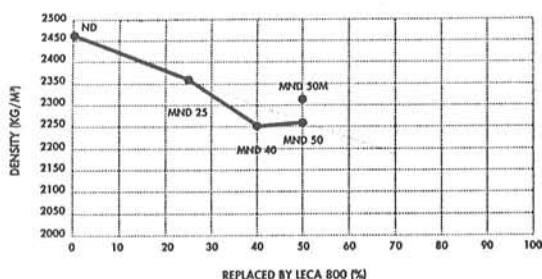


Figure 1: The density is reduced by 100-200 kg/m<sup>3</sup> by replacing 25-50% of the natural aggregates by Leca

図-1 LECA800置換率と密度の関係

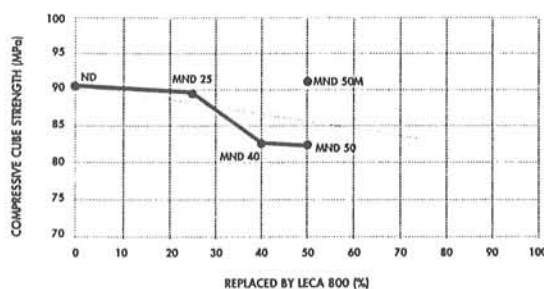


Figure 2: By 25% replacement of LWA the 28 days compressive cube strength is approximately the same as the strength of normal density concrete. By 50% replacement the reduction is 8 MPa. This reduction can be compensated by adjusting the effective water/cement ratio (MND50M).

図-2 LECA800置換率と圧縮強度の関係

## 6. 研究開発

ここ10～15年間は、異業種合同プロジェクトとして開発・研究が実施されている。ここ数年の大きなプロジェクトとして「Lightcon」が挙げられる。

これは1993年に始まり本年中に終了するが、一つの大きな活動としてLWACを用いた既存の構造物の調査を実施している。その結果、使用環境が厳しい海洋環境であったにもかかわらず、目立った劣化は確認されていない(本会議で発表される他の論文参照)。このプロジェクトでは、実経験に基づくLWAC製造・施工のガイドラインも作成する予定である。

プロジェクトへの参加企業は、製造サイドでElkem Materials(silica fume), Norcem(cement), Norsk Leca(LWA), Selmer, Veidekke, Norwegian Contractors(以上建設業), Aker Betong(生コン)である。施工者サイドで, Saga(石油会社)および公共道路省である。SINTEF Structure and Concreteも本プロジェクトで重要な役割を担っている。

(抄訳担当 信田佳延)

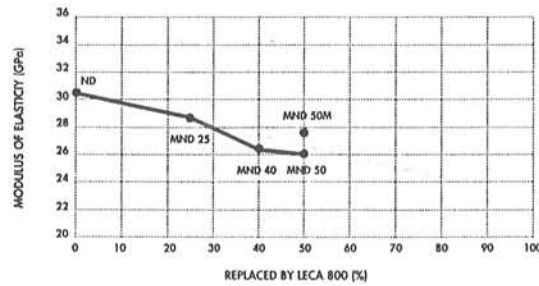


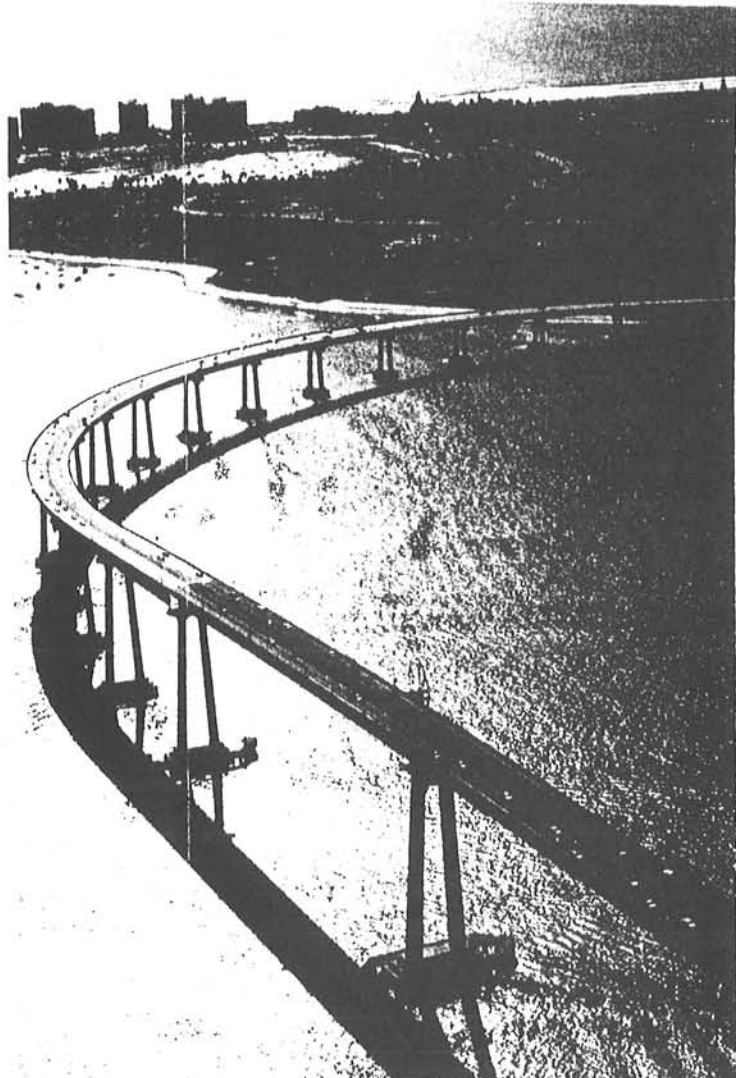
Figure 3: The modulus of elasticity is of course reduced by an increasing replacement of the rigid aggregates by Leca 800. This reduction can however be compensated by a reduction in the effective water/cement ratio.

図-3 LECA800 置換率と弾性係数の関係

### 美しい橋 (Coronado Bridge)

1969年にカリフォルニア州のSanDieago Bayに建設された長さ3354m、高さ60mの橋で、軽量1種コンクリートのプレキャスト・プレストレストコンクリート・ガーターを使用。

出典: ESCSI情報





## 6) England における軽量骨材コンクリート

### LIGHTWELGHT AGGREGHTE CONCRETE IN THE U.K.

Bipul K bardhan-Roy

Jan Bobrowski and Partners, England

#### 1. はじめに

この論文では主にイギリスにおけるカテゴリー1（構造用）のコンクリートへの軽量骨材コンクリートの適用について報告する。軽量骨材の製造は30年代中ごろからはじまったが、実際に使用されたのは、第2次世界大戦中の1943年であり、2隻の運搬船が軽量骨材（膨張粘土）コンクリートで製造され、1951年に座礁するまで使用された。イギリスにおける軽量コンクリートの使用が増加しはじめたのは、50年代後半であった。また、これらの骨材を用いたコンクリートの製造だけでなく、広範な研究により、その工学的特性値も明らかになった。この30年間に住居やオフィスなどから、海岸の倉庫、橋梁に至るまで、広範囲の構造物への軽量コンクリートの使用実績が増加してきている。

#### 2. 骨材

イギリスにおける軽量コンクリートは、天然材料の加工品または工業廃棄物のどちらかの人工的に造られた骨材を使用して製造される。軽量骨材はBS3797に規定されており、基本材料や製造方法に関係なくほぼ同じ化学組成と構造である。これらは化学的に無害で、高温に曝された場合にも安定でコンクリート中の他の成分とは有害な反応を示さない。70年代初頭頃までには、軽量骨材の選択肢も相当に広がり、天然材料の加工品の中には、Leca（膨張粘土-球状）、Aglite（膨張頁岩-不定形）、Solite（膨張粘板岩大部分は球形）のような骨材製品もあった。70年代中頃には、軽量骨材の種類は減少し始め、Soliteは環境規制のために、Agliteは経済性から製造が中止された。発泡スラグも事実上市場から消えた。ここで、さらに改良された骨材であるPellite（球状膨張高炉スラグ、中-高強度コンクリート、コンクリート比重1700-2000kg/m<sup>3</sup>）が生産されるようになった。80年代には工場建設のブームがあり、特別な耐火被覆を施さなくても高耐火性を付与できる軽量コンクリートが普通コンクリートよりも好まれ、1988年から1989年にかけての1年間で200,000m<sup>3</sup>の軽量コンクリートが使用された。1994年迄には、軽量骨材の製造はさらに衰退し、現在のところ、LytagとPelliteの2種の軽量骨材だけがイギリス国内で生産されているが、Pelliteはほとんどが構造用以外の目的に消費されているのが現状である。

#### 3. コンクリート（強度と特性）

FIPマニュアル中の軽量コンクリートの部分では、構造用コンクリートの最低強度は20N/mm<sup>2</sup>程度とするのがよく、一方、最大の強度は70N/mm<sup>2</sup>程度かまたはこれを越える程度とすることができる。比重（気乾）は1600-2000kg/m<sup>3</sup>の範囲にあることが望ましい。壁の建設を除いて25N/mm<sup>2</sup>未満のコンクリート強度は建設用に使用することは少なく、現場打ち鉄筋コンクリートでは、一般に25-40N/mm<sup>2</sup>の範囲の強度が要求され、プレキャストコンクリートでは35-50N/mm<sup>2</sup>程度の範囲の強度が要求される。プレストレストコンクリートでは、プレストレス導入時のコンクリート強度として35-40N/mm<sup>2</sup>、28日強度で50-60N/mm<sup>2</sup>の範囲の強度が要求される。現在までに70N/mm<sup>2</sup>以上の強度が使用されたことはないが、実験室レベルでは、Lytagを使用し、セメントの一部をシリカフュームで置換することにより、1850kg/m<sup>3</sup>の比重で85N/mm<sup>2</sup>以上の強度が確実に達成できる。興味深い点は、軽量コンクリートでは、骨材の機械的な強度はどちらかといえば低いが、コンクリートの強度はマトリックスの強度と骨材同士のアーチング効果により決まっている。一方、普通コンクリートでは、本来の骨材強度が高いためマトリックスが常に弱部を形成する。当初、軽量コンクリート



は粗骨材、細骨材ともに吸水率が高いため、コンクリート中の水量が多くなり、収縮量の増加、引張強度の低下、耐久性上の問題などがあつた。

混和剤や混和材などを使用することにより、同じ結合材量で、高いワーカビリティを保持したまま高強度を安定的に製造することができるようになった。また、ポンプによる施工や現場管理についても、比較的問題がなくなつたので、工業材料として広く容認されるようになった。

構造用材料として使用する場合に重要となる軽量コンクリートの物理的品質・特性としては主に以下の点が挙げられる。

- 1) 比強度が大きいこと
- 2) 温度ひずみと熱伝導率が小さいこと
- 3) 衝撃と温度衝撃への抵抗性が高いこと
- 4) 耐火性が高いこと
- 5) 伸び能力が大きいこと
- 6) 透水性が低いこと

構造物レベルでは、軽量コンクリートは骨材が非常に良い分布をしており、高品質のマトリックスがこれを包んでいるので、水やガスの透過性が小さい。したがって、中性化や塩化物の移動による鉄筋腐食のような耐久性上の問題に関して、同程度の普通コンクリートと比較して軽量コンクリートが劣るとは考えられない。

#### 4. 問題点とその取組み

軽量コンクリートの明らかに不利な点は、同程度の普通コンクリートと比較して弾性係数と引張強度が小さいこと、収縮やクリープなどがやや大きいことである。耐久性については上述のように軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して劣らないと考えられるが、残念ながらこの点に関しては、ナショナル・コードでは全く認められていない。実際、軽量コンクリートを使用する場合にはかぶりを大きくすることが要求されている。軽量コンクリートの適用初期には、ワーカビリティの経時的な低下が大きいため現場における打設に問題があつた。また、ポンプによる施工は事実上不可能であつた。しかしながら、これらの問題は、現在では既に解決されている。軽量コンクリートは、普通コンクリートを使用した場合よりも費用が高いが、これは、断熱性や耐火性およびその他の付加価値のための費用であると考えられるようになってきている。

#### 5. 実構造物への適用例

##### 橋梁および歩道橋

- Redesdale 橋 : イギリスにおける軽量コンクリートを使用した最初の橋梁である。実験的橋梁であり1975年に建設された。
- Friarton 橋 : 1979年建造、橋長830m、9径間。Lytag 軽量コンクリート床版。
- Stracathro 橋 : 2径間合成桁道路橋。220mm厚のLytag 軽量コンクリート使用。道路の閉鎖が10分未満であることが要求され、現場における全ての建設が極短時間で行われた。
- Car Park Access 橋 : スパン33mの斜張橋。Lytag 軽量コンクリート床版。設計コンクリート強度 $30\text{N/mm}^2$ 、実コンクリート強度 $34.3\text{N/mm}^2$ 、コンクリート気乾比重 $1810\text{kg/m}^3$  (写真-1)

##### 特殊構造物

BP Harding Fieldの重力式基礎: Lytag 骨材を用いた高強度軽量コンクリート使用。8,500tonの基礎をドライドックで建造し、220mile離れた位置に据え付けた。コンクリートには高いワーカビリティと、比重 $1,900\text{kg/m}^3$ で $50\text{N/mm}^2$ の強度を発現することが要求された。(図-1)

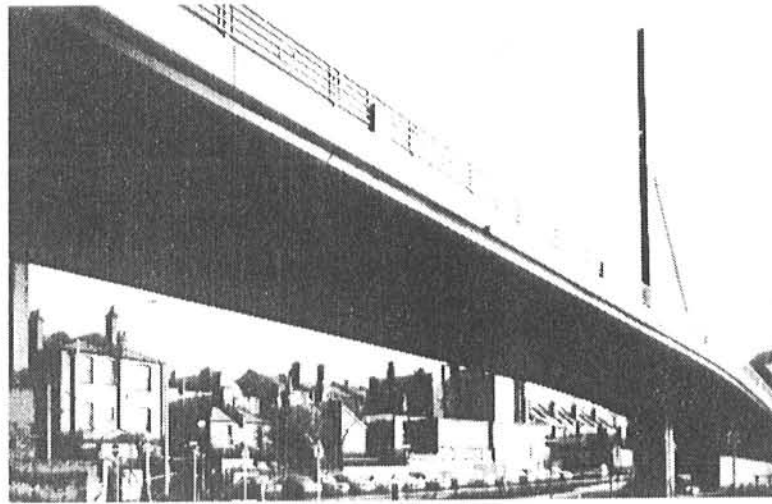


写真-1 Car Park Entrance Ramp - Ealing, London

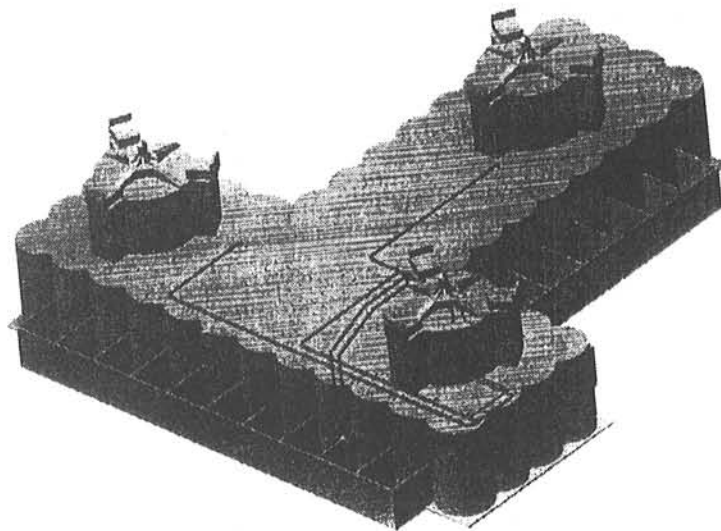


図-1 北極海の Harding Field Gravity Base Tower のコンピュータ・イメージ

(抄訳担当 武田 均)