

論文 施工性を考慮した軽量コンクリートの調合条件に関する考察

神代泰道^{*1}・植松俊幸^{*2}・一瀬賢一^{*3}

要旨：39階建ての超高層建物における軽量コンクリートの品質管理結果を考察するとともに、軽量コンクリートの単位水量がコンクリートに性状に及ぼす影響について実験的に検討を行った。この結果、ポンプ圧送に伴うスランブの低下量は、25階まで3cm、それより上階は圧送高さに応じて最大5cm程度であった。筒先のスランブの変動係数は荷卸しの概ね2倍であった。単位水量が170～190kg/m³の範囲では、単位水量が多いほどブリーディング量は多くなるが、圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮ひずみは大きな差異がないことが分かった。

キーワード：軽量コンクリート，単位水量，スランブ，乾燥収縮ひずみ

1. はじめに

軽量コンクリートをポンプ圧送する場合、高圧力下における軽量骨材の吸水作用により、スランブの低下を招くことが知られている。スランブ低下に伴って圧送抵抗が増大し、ポンプ圧力が増加するため、圧力吸水がさらに促進され、閉塞に至る恐れがある。閉塞に至らない場合でもスランブが低下すると打込み位置におけるワーカビリティは低下する。

軽量コンクリートは、単位水量が大きく、圧送前のスランブが大きい方が、圧送後のスランブの低下量が小さくなる傾向であることが示されている¹⁾。また、圧送距離が長くなるほどスランブの低下量は大きくなるため、超高層建物に軽量コンクリートを適用する場合には、ポンプ圧送によるスランブの低下量をできるだけ小さくするように、圧送高さに応じて単位水量およびスランブを適切に設定することが重要となる。

ここでは39階建ての超高層建物における軽量コンクリートの品質管理結果を考察し、圧送によるスランブの低下量を把握するとともに軽量コンクリートの単位水量の違いが各種性状に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 超高層建物における品質管理結果

2.1 工事概要

本建物は地上39階のS造（CFT柱）の事務所ビルである。2階から39階までのスラブに軽量コンクリート1種を適用し、最高高さ180mまでポンプ圧送した。打込み時期は4月から翌年の3月までの約1年間であった。フレッシュコンクリートの品質管理を荷卸しだけでなく、筒先においても実施した。各階は2工区に分割し、1回の打設量は300m³程度であった。

2.2 コンクリートの調合と打設概要

コンクリートは、設計基準強度21N/mm²、気乾単位容積質量1.9t/m³であり、普通ポルトランドセメントおよびA E減水剤を用いた軽量コンクリート1種である。コンクリートの製造はAとBの2工場とし、軽量粗骨材は造粒型で製造工場において十分にプレソーキング（含水率28±2.5%）されたものを用いた。表-1にコンクリートの調合と打設概要を示す。コンクリートの呼び強度は24および27とし、外気温による強度補正值が6N/mm²となる期間については、構造体コンクリート強度の管理材齢を56日に延長することで3N/mm²補正とした。単位水量およびスランブは打設時期および打設高さに応じて変えており、6月～9月では遅延型A E減水剤を用いた夏期調合とし、夏期調合の適用が終了した17階以降については、単位水量を設計仕様の上限となる185kg/m³とし、筒先のスランブが18cmを確保できるように荷卸し地点でスランブ21cm相当のコンクリートとした。結果として途中閉塞等のトラブルもなく39階までのスラブを打設できた。

2.3 コンクリートの品質管理結果

各コンクリート毎の荷卸しおよび筒先におけるスラン

表-1 コンクリートの調合と打設概要

工場	記号	打設時期	打設階
工場A	24-18-175	4～6月	2～7F
	24-18-180夏	6～9月	8～16F
	24-21-185	9～11月	17～25F
	27-21-185	12～3月	27～39F
工場B	24-18-180	4～6月	4～8F
	24-18-184夏	6～9月	9～15F
	24-21-185	10～11月	18～26F
	27-21-185	12～2月	27～38F

記号：呼び強度 - スランブ - 単位水量，夏：夏期
スランブ21cmは筒先で18cmを目標とした

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主査 工博 (正会員)

*2 同 主任 (正会員) *3 同 主任研究員 工博 (正会員)

プの品質管理結果を統計処理して表 - 2 に示す。また、図 - 1 に荷卸しおよび筒先のスランブの確率密度の分布を示す。荷卸しのスランブの平均値は目標よりも若干大きめになっているものの、変動係数は3～7%の範囲であり、バラツキも小さく良好な管理状況であった。一方、筒先のスランブの平均値は、荷卸しよりも2～4cm小さく、変動係数は荷卸しの約2倍となった。これは配管距離などの圧送条件が同一でないため変動の影響因子が増加するためである。また、荷卸しの変動係数が大きい方が筒先の変動係数も大きくなる傾向であった。

荷卸しと筒先のスランブと空気量を比較して図 - 2 に示す。ここで荷卸しと筒先で採取した試料は必ずしも同一バッチのコンクリートではないため、各階毎に平均し

表 - 2 荷卸しおよび筒先のスランブ

工場	記号	荷卸し				筒先			
		n	平均 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)	n	平均 (cm)	標準偏差 (cm)	変動係数 (%)
工場 A	24-18-175	15	19.3	1.10	5.7	45	16.0	1.82	11.4
	24-18-180 夏	19	19.1	1.13	5.9	57	16.5	1.33	8.1
	24-21-185	27	21.6	0.82	3.8	99	19.3	1.43	7.5
	27-21-185	41	22.2	0.80	3.6	123	18.1	1.51	8.4
工場 B	24-18-180	19	18.7	1.32	7.0	57	15.8	1.89	12.0
	24-18-184 夏	37	19.5	0.94	4.8	101	16.4	1.64	10.0
	24-21-185	24	21.0	0.61	2.9	72	18.5	1.54	8.3
	27-21-185	22	21.7	0.75	3.5	66	18.0	1.99	11.1

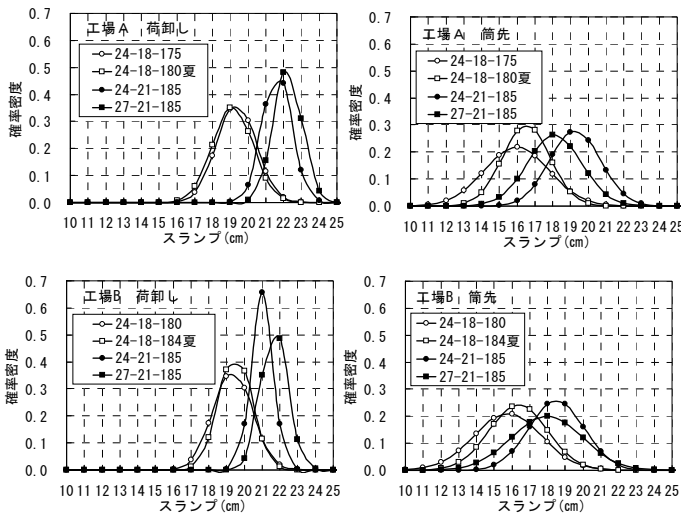


図 - 1 コンクリートごとのスランブの分布

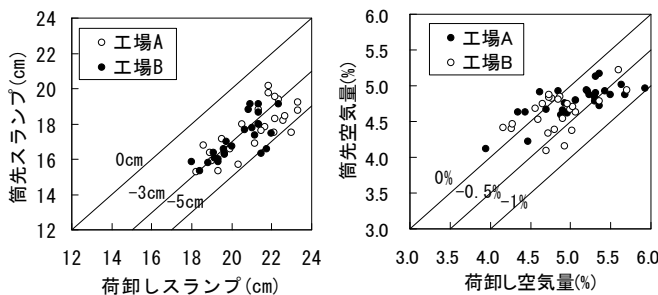


図 - 2 荷卸しと筒先におけるフレッシュ性状

た値を採用した。なお、試験回数は、荷卸し1回に対して筒先では3回程度行っており、試験頻度は筒先の方が多い。筒先のスランブは、概ね1.5から5cmの範囲で低下し、既往の文献の1～2cm¹⁾、0.6～3.4cm²⁾よりも若干大きめの結果であった。空気量については+0.25から-1.0%の変動で、既往の文献¹⁾²⁾とほぼ同様であった。

図 - 3 に各打設階ごとの荷卸しと筒先のスランブの推移を示す。また、図 - 4 には各打設階ごとのスランブの低下量の推移を示す。コンクリートは7Fまではスランブ18cmの標準調合を用い、8～16Fまでは単位水量を増し、遅延型AE減水剤を用いた夏期調合を用い、17F以降はポンプ圧送性を確保するため単位水量を185kg/m³、スランブを21cmとした調合を用いた。これら結果から、筒先のスランブは、荷卸しのスランブに連動して変化し、さらに高層階になるほどスランブの低下量は大きくなるのが分かる。今回の結果においては、スランブの低下量は概ね25F(圧送高さ100m)までは3cm、それより上階については圧送高さに応じて最大5cm程度の低下量となることが分かった。

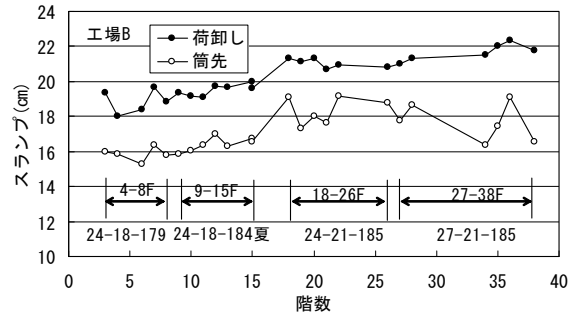
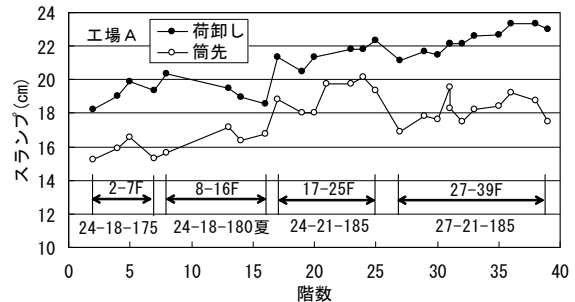


図 - 3 打設階ごとのスランブの推移

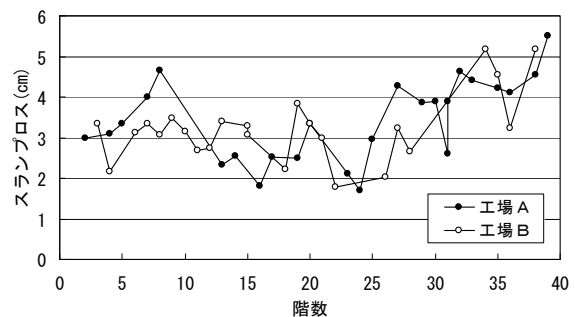


図 - 4 打設階とスランブ低下量の推移

3. 軽量コンクリートの単位水量が各種性状に及ぼす影響に関する実験

3.1 実験の目的

2章でも示したように軽量コンクリートを高所圧送するには、単位水量およびスランブを大きめに設定することが有効である。しかし単位水量が過多になると骨材の分離、耐久性の低下が懸念される。そこでここでは、主として単位水量が軽量コンクリートの各種性状に及ぼす影響について実験的に確認した。対象は、2章と同様の造粒型人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート1種と2種（以下、軽量1種および軽量2種と略記）とした。

3.2 コンクリートの調合

コンクリートの使用材料を表 - 3 に示す。軽量骨材は造粒型であり、ポンプ圧送を前提として十分にプレソッキングされたものとした。試験時の含水率は軽量細骨材15.8%、軽量粗骨材28.1%であった。化学混和剤はAE減水剤と高性能AE減水剤とし、単位水量およびスランブの設定で使い分けた。

コンクリートの調合を表 - 4 に示す。コンクリートは呼び強度24に相当する軽量コンクリート1および2種とし、単位水量は170、180、190kg/m³の3水準とした。スランブは高所への圧送を考慮して21cmとし、軽量コンクリート2種についてはスランブ18cmも追加して性状を比較した。コンクリートの練混ぜは、強制2軸ミキサ(55リットル)を用い、材料一括投入後10秒間空練りし、水を加えて90秒練り混ぜた。

3.3 試験項目

フレッシュコンクリートについては、スランブ：JIS A 1101(コンクリートのスランブ試験方法)、空気量：JIS A 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧入による試験方法)、コンクリート温度：JIS A 1156(フレッシュコンクリートの温度測定方法)および単位容積質量を測定した。材料分離抵抗性については、図 - 5 に示すように150×300mmの円柱供試体にコンクリートを突き棒を用いて詰めてから、振動機(280W, 150~167Hz 100V, 5A)を用いて60秒間振動を与え、強制的に加振して分離状況を比較した。供試体は封かん養生の上、材齢28日で上中下に3分割して単位容積質量を測定して評価した。これは軽量コンクリートをコンクリートバケツを用いて揚重する場合やポンプ車のホッパー内で長時間滞留している場合の状況を想定したものである。ブリーディング試験はJIS A 1123(コンクリートのブリーディング測定方法)、凝結試験はJIS A 1147(コンクリートの凝結時間試験方法)に準じて実施した。いずれも20℃の恒温室にて実施とした。

硬化コンクリートについては、100×200mmの円柱供試体にコンクリートを採取し、標準水中養生を行って材齢7および28日に圧縮強度(JIS A 1108)および静

表 - 3 使用材料

分類	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	S1	山砂と砕砂を6:4で混合 表乾密度 2.62g/cm ³ 吸水率 1.60% FM2.63
	S2	人工軽量細骨材 絶乾密度 1.62g/cm ³ 吸水率 14.0% FM2.65
粗骨材	G	人工軽量粗骨材 絶乾密度 1.30g/cm ³ 吸水率 26.0% FM6.27
混和剤	AE	AE減水剤
	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

表 - 4 コンクリートの調合

記号	スランブ ^a (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S1	S2	G
I-1	21	54.0	53.5	170	315	954	—	408
I-2	21	54.1	52.5	180	333	914	—	408
I-3	21	54.1	51.3	190	351	872	—	408
II-1	18	54.0	51.5	170	315	377	340	426
II-2	18	54.1	50.4	180	333	383	312	426
II-3	18	54.1	49.2	190	351	396	277	426
II-4	21	54.0	53.5	170	315	362	373	408
II-5	21	54.1	52.5	180	333	369	343	408
II-6	21	54.1	51.3	190	351	380	310	408

人工軽量骨材(S2およびG)は絶乾状態の質量を示す

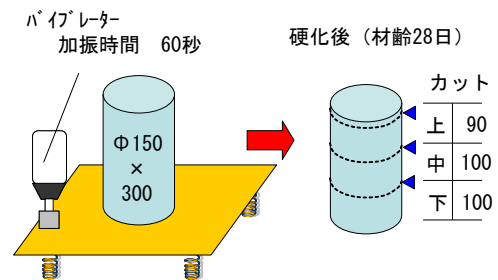


図 - 5 材料分離抵抗性試験

弾性係数(JIS A 1149)を測定した。乾燥収縮ひずみは、長さ変化試験(JIS A 1129-2コンタクトゲージ法)により、100×100×400mmの角柱供試体3個ずつとし、水中養生後、材齢7日から測定を開始し、乾燥材齢182日までの長さ変化率を測定した。

4. 実験結果

4.1 フレッシュコンクリートの試験結果

表 - 5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。空気量は、骨材修正係数を軽量1種で1.0%、軽量2種で1.2%とし、修正後の値を示した。

スランブ21cmでは単位水量180kg/m³までは高性能AE減水剤、190kg/m³ではAE減水剤を用いた。スランブ18cmでは単位水量が170kg/m³では高性能AE減水剤、180kg/m³以上ではAE減水剤を用いた。それぞれの添加率を調整することで所要のスランブ、空気量のコンクリ

ートが得られた。

4.2 材料分離抵抗性試験結果

図 - 6 に材料分離抵抗性試験結果を示す。振動を与えた場合には、いずれの場合も上部の単位容積質量が小さくなり、下部は大きくなった。これは振動により軽量粗骨材が上部に移動したためである。実際の切断面についても写真 - 1 に示すように上部では軽量粗骨材が偏在していた。軽量 1 種と 2 種を比較すると、軽量 1 種の方が振動を与えた場合の上下方向の単位容積質量の変化が大きい。これは軽量 1 種の細骨材は普通骨材であり、軽量粗骨材とモルタル部との密度差が大きくなるため、軽量 2 種よりも振動により粗骨材が上部に移動しやすいものと考えられた。今回の試験では、軽量 1 種で単位水量 $190\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合に他より分離しやすい傾向であったが、その他のコンクリートについては、単位水量とスランブの大きさが材料分離抵抗性に及ぼす影響については確認できなかった。

4.3 プリーディング・凝結試験結果

表 - 6 にプリーディングおよび凝結試験の結果を示す。プリーディング量は単位水量が多いほど多くなっ

表 - 5 フレッシュコンクリートの試験結果

記号	混和剤種類	添加率 (%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/m^3)
I-1	SP	1.4	21.0	36.0×34.0	5.7	21.0	1951
I-2	SP	0.7	19.5	32.5×32.5	4.6	21.0	1960
I-3	AE	0.05	20.5	39.0×39.0	5.6	21.0	1919
II-1	SP	0.15	18.0	32.0×30.0	5.6	21.0	1794
II-2	AE	0.15	19.0	35.2×34.7	4.6	21.0	1811
II-3	AE	0.00	19.5	40.0×40.0	5.3	21.0	1803
II-4	SP	0.30	21.0	37.0×37.0	5.6	21.0	1785
II-5	SP	0.05	21.5	42.0×39.0	4.5	21.0	1816
II-6	AE	0.05	21.5	42.5×42.0	4.5	21.0	1818

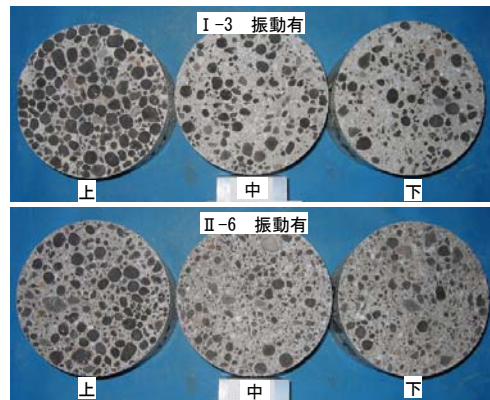


写真 - 1 供試体の切断面

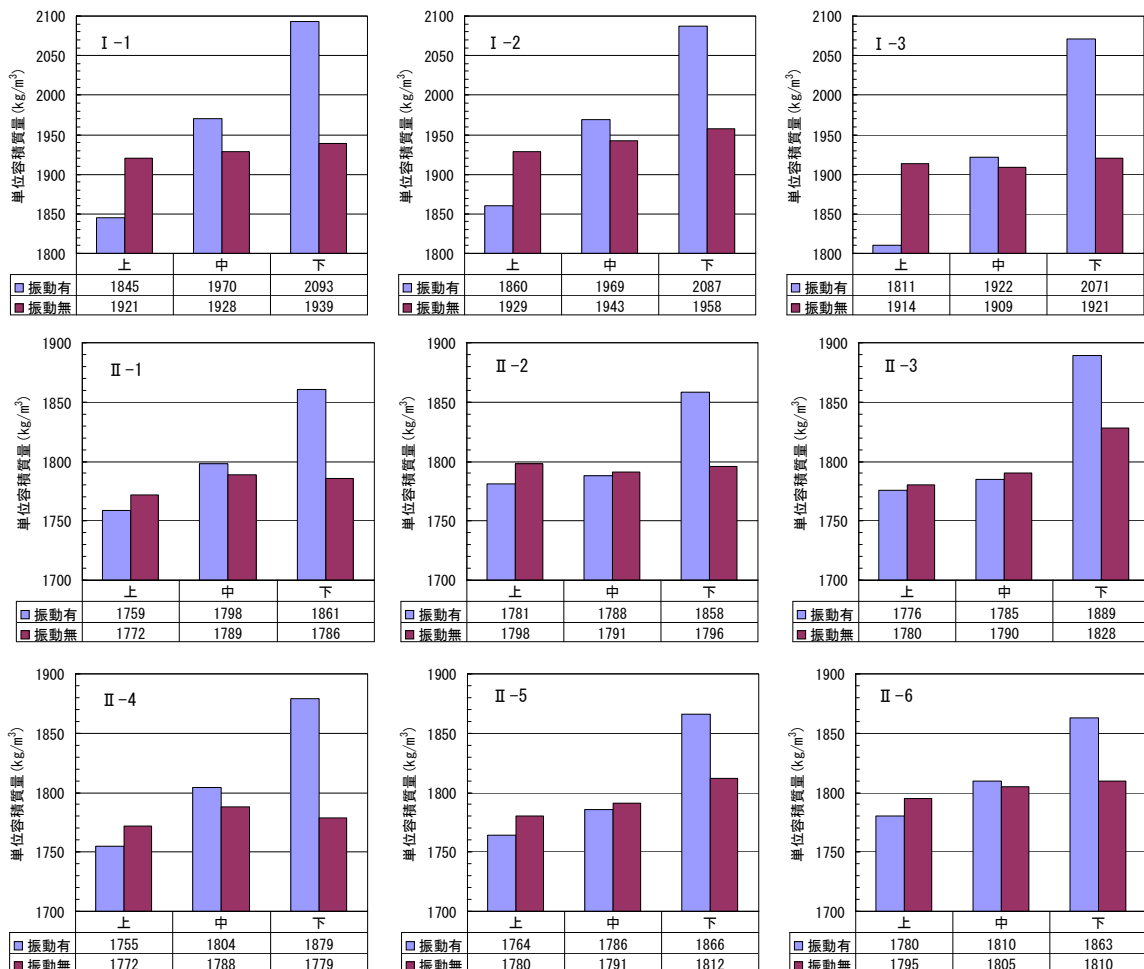


図 - 6 材料分離試験結果

表 - 6 プリーディング・凝結試験結果

記号	プリーディング量 (cm ³ /cm ²)	始発	終結
I-1	-	7:11	9:14
I-2	0.07	6:17	8:22
I-3	0.15	5:57	7:46
II-2	0.36	6:05	8:12
II-4	0.46	6:31	8:40
II-5	0.44	5:56	8:02
II-6	0.53	6:03	8:19

- : 測定せず

た。軽量1種では単位水量を190kg/m³とした場合でも0.15cm³/cm²であったが、軽量2種では単位水量によらず0.5cm³/cm²程度となり、軽量2種の方がプリーディング量は多くなった。なお、文献²⁾によると、ポンプ圧送した後の軽量2種のプリーディング量は圧送前のものより0.1cm³/cm²程度低減するとされる。凝結性状は、軽量1種および2種とも始発は注水後6~7時間であり、単位水量およびスランプによる相違はなかった。

4.4 圧縮強度および静弾性係数の測定結果

圧縮強度、単位容積質量(圧縮試験時)および静弾性係数の測定結果を図-7~図-9に示す。軽量1種、軽量2種ともに、単位水量の違いによる圧縮強度および静弾性係数の大きな差異は認められなかった。圧縮強度は、軽量1種と軽量2種ともほぼ同程度であるが、静弾性係数は単位容積質量の小さい軽量2種の方が低い。図-10に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中にはNewRC式による評価式を示した。評価式のコンクリートの単位容積質量には、圧縮強度試験時の単位容積質量として軽量1種の場合20、軽量2種の場合18.5kN/m³を代入した。今回の試験範囲では、静弾性係数は概ねこの評価式で評価できることを確認した。

4.5 乾燥収縮ひずみの測定結果

長さ変化率の測定結果を図-11に示す。図中には同一のセメントおよび細骨材(S1)を用い、粗骨材には石灰砕石を用いたスランプ18cmで呼び強度24(W/C=60.5%, W=179kg/m³)および30(W/C=50.6%, W=181kg/m³)の普通コンクリートの結果についても示した。軽量コンクリートと普通コンクリートの長さ変化率と比較すると、軽量コンクリートの進行は緩やかであり、乾燥材齢182日における長さ変化率は、普通コンクリートと同等の500~600×10⁻⁶であった。これは一般的に言われているように軽量骨材中に水分を多く含んでいるため、内部は湿潤状態にあり、普通コンクリートよりも乾燥が緩慢になるためである。なお、比較対象とした普通コンクリートは、石灰砕石を用いており、乾燥収縮ひずみは小さいレベルのものである。軽量1種と2種を比較すると、乾燥材齢91日までは軽量2種の方が軽量1種よりも長さ変化率は小さい傾向であり、乾燥材齢182日では

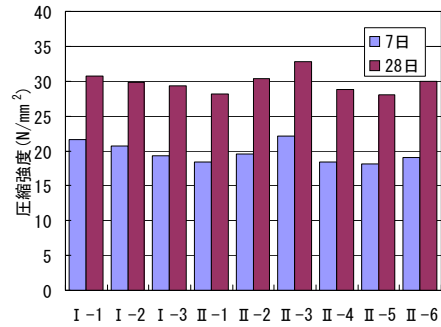


図 - 7 圧縮強度試験結果

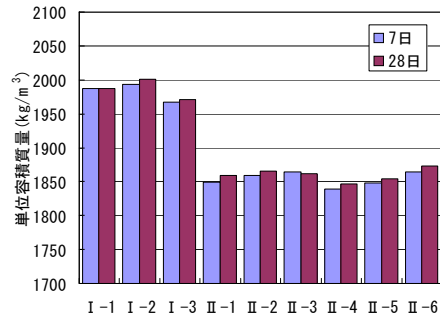


図 - 8 単位容積質量 (圧縮試験時)

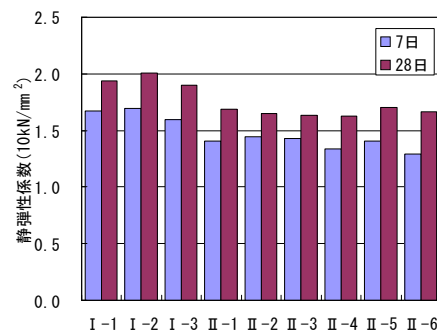


図 - 9 静弾性係数試験結果

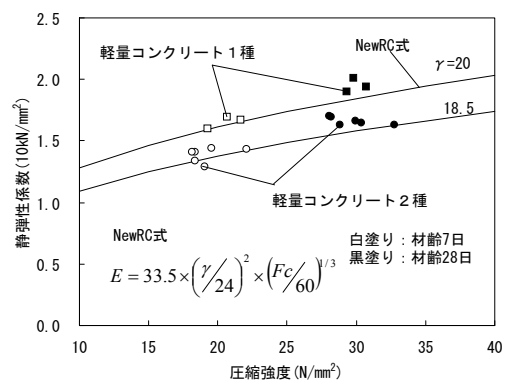


図 - 10 圧縮強度と静弾性係数の関係

ほぼ同等となった。一般的に単位水量が多くなると乾燥収縮ひずみは大きくなると言われるが、今回の試験範囲においては軽量コンクリートの単位水量と長さ変化率の関係は明確ではなかった。

図-12に長さ変化試験における質量減少率を示す。軽量2種の方が質量減少率が大きく、水分逸散量も多くな

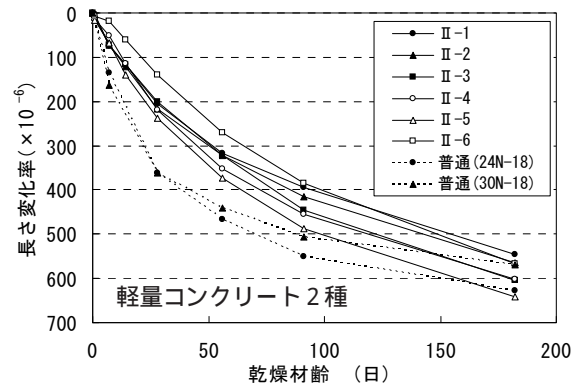
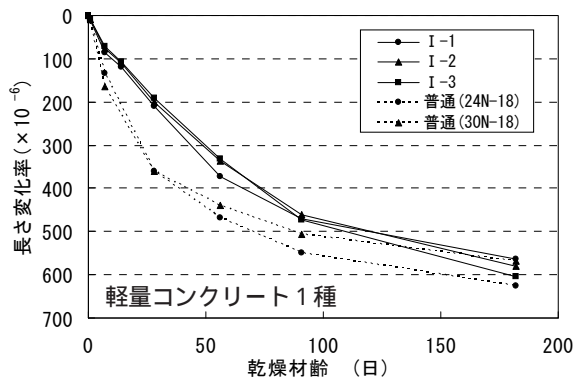


図 - 11 長さ変化率の測定結果

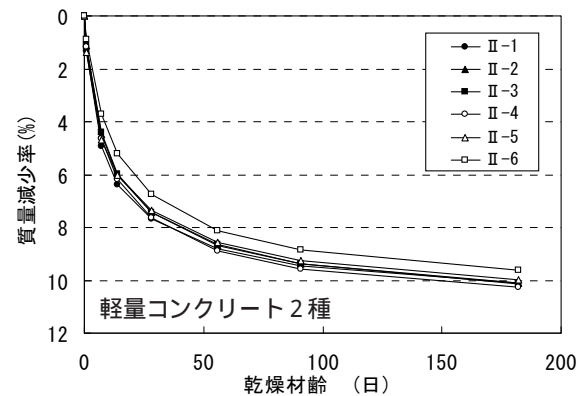
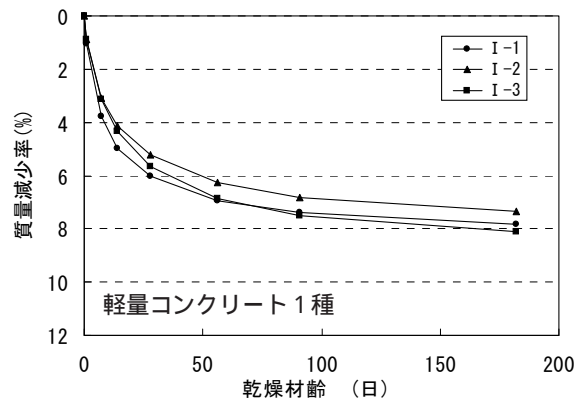


図 - 12 質量減少率の測定結果

る傾向であった。なお、乾燥材齢 182 日における単位容積質量は、軽量 1 種で 1869 ~ 1900 kg/m³、軽量 2 種で 1689 ~ 1747 kg/m³ の範囲であり、乾燥開始からの質量減少量は軽量 1 種で 150 kg/m³、軽量 2 種で 190 kg/m³ 程度であった。以上の検討結果から今回実施した単位水量が 170 ~ 190 kg/m³ の範囲では、単位水量が多いほどブリーディング量は多くなるが、圧縮強度、静弾性係数および乾燥収縮ひずみは大きな差異がないことが分かった。

5. まとめ

39 階建ての超高層建物における軽量コンクリートの品質管理結果について考察するとともに軽量コンクリートの単位水量の違いがコンクリートの各種性状に及ぼす影響について実験的に検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

超高層建物における軽量コンクリートの品質管理結果について：

- (1) ポンプ圧送に伴うスランブの低下量は、25F (圧送高さ 100 m) までは 3 cm、それより上階については圧送高さに応じて最大 5 cm 程度であった。
- (2) 荷卸しのスランブの変動係数は 3 ~ 7% の範囲であるのに対して、筒先のスランブの変動係数は荷卸しの約 2 倍と大きくなった。

単位水量の違いが軽量コンクリートの各種性状に及ぼす影響について：

- (1) 材料分離抵抗性については単位水量の影響は認められなかった。軽量コンクリート 1 種と 2 種を比較すると 1 種の方が粗骨材とモルタル部の密度差が大きくなるため、材料分離はしやすい傾向であった。
- (2) ブリーディング量は、軽量 1 種に対して軽量 2 種の方が多く、単位水量が多いほど多くなった。凝結時間は、単位水量および 1 種、2 種の違いはなかった。
- (3) 単位水量の違いが軽量コンクリートの圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響は見られなかった。軽量 1 種および 2 種とも静弾性係数は NewRC 式で評価できた。
- (4) 乾燥材齢 182 日における長さ変化率は、軽量 1 種、2 種ともに単位水量の影響は認められず、 $500 \sim 600 \times 10^{-6}$ と石灰碎石を用いた普通コンクリートとほぼ同等であった。それまでの進行は普通コンクリートよりも緩やかであった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，pp.59 - 61，1994
- 2) 和美廣喜，笠井浩，柳田克巳ほか：超高層建築における軽量コンクリートの高所ポンプ圧送性，鹿島建設技術研究所，Vol.38，pp. 35 ~ 42，1990