

論文

[1062] 高強度コンクリートの高層建築物への適用に関する研究

西田 朗*1・橋 大介*2・江原 恭二*3・熊谷 仁志*4

1. はじめに

近年、建築分野では設計基準強度が420~480kgf/cm²の高強度コンクリートを使用した高層建築物が建設されるようになり、その製造・施工技術については多くの報告がなされている。一方、著者らは、これらのコンクリートよりさらに高強度の設計基準強度600kgf/cm²のコンクリートの製造・施工技術についてすでに報告を行っており[1]、この中で多くの知見を得ている。こうした背景のもと、神奈川県海老名市において建設が進められている地上25階建ての高層建築物に設計基準強度420~600kgf/cm²の高強度コンクリートの適用が計画され、そのための製造・施工技術を検討する機会を得た。この事前検討において、既報[1]の結果を踏まえて、設計基準強度420~600kgf/cm²を想定したコンクリートについて、調合設計と構造体コンクリートの強度管理に関する検討を重点的に行った。本報告は、このうち、夏季施工を想定した場合の設計基準強度600kgf/cm²のコンクリートに関する検討を中心に取りまとめたものである。図-1に本報告における研究の流れを示す。

2. 室内実験

2.1 実験概要

室内調査実験は、使用材料の選定と調合の検討を中心とし、標準養生供試体の圧縮強度で評価を行った。つぎに、実施工における所要の品質に近いと考えられる調合について断熱温度上昇試験を行い、これらの結果と対象構造物の部材寸法等を用いて有限要素法による温度解析を行い、この温度履歴を与えた供試体の強度発現の検討を行った[2][3]。

2.2 使用材料および調合

実験に使用した材料を表-1に示す。骨材は、実施工の際にコンクリートの供給を行うレディーミクストコンクリート工場で購入可能な、高強度コンクリートに適していると思われる硬質砂岩砕石と川砂の組合せ、同じく通常使用している川砂利と混合砂の組合せおよび比較用に当社技術研究所所有の硬質砂岩砕石と陸砂

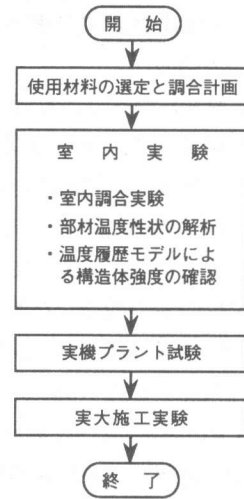


図-1 研究の流れ

表-1 使用材料

使用材料	記号	種類	物性および成分
セメント	C	普通*1 トラントセメント	比重3.16 比表面積3250cm ² /g
細骨材	S1	山砂(市原産)	表乾比重2.56 吸水率2.22% 粗粒率1.41
	S2	川砂(相模川産)	表乾比重2.59 吸水率1.81% 粗粒率3.06
	S3	陸砂(浜岡産)	表乾比重2.59 吸水率1.50% 粗粒率2.82
粗骨材	G1	川砂利(相模川産)	最大寸法25mm 表乾比重2.66 吸水率1.76%
	G2	硬質砂岩砕石(多摩産)	最大寸法20mm 表乾比重2.70 吸水率0.66%
	G3	硬質砂岩砕石(青梅産)	最大寸法20mm 表乾比重2.63 吸水率0.85%
混和剤	AD	高性能AE減水剤	主成分: ポリアルキルアリルスルホン酸塩
水	W	水道水	——

*1 清水建設(株)技術研究所建設技術研究部、工修(正会員)
 *2 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部主任研究員、工修(正会員)
 *3 清水建設(株)技術研究所建設技術研究部、工修(正会員)
 *4 清水建設(株)技術研究所構造技術研究部、工修(正会員)

の組合せを使用した。

調査は、既報[1]の実績から、表-2に示すように単位水量をすべて165kg/m³一定とした。シリーズ1は、レディーミクストコンクリート工場で入手可能な碎石と川砂を使用し、水セメント比27.5~42.0%、目標スランプ21cm、同空気量2%とした。シリーズ2はレディーミクストコンクリート工場で通常使用している川砂利と混合砂を使用し、また、シリーズ3は比較用骨材を用いて、それぞれ水セメント比26.5~30.0%、目標スランプ23cm、同空気量2%とした。

2.3 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

材令28日における圧縮強度試験結果を図-2に示す。圧縮強度は、使用骨材を変えた各シリーズによって異なり、水セメント比30%の場合に、シリーズ1で848kgf/cm²、シリーズ2では685kgf/cm²、シリーズ3で1,001kgf/cm²となった。こうした結果から、シリーズ2の骨材を使用した場合に設計基準強度600kgf/cm²を満足するためには、かなりの低水セメント比が必要になり、製造・施工上の困難が予想されたため、シリーズ1の骨材を選定することとした。

(2) 温度履歴モデルによる強度発現

圧縮強度試験の結果から、シリーズ1の水セメント比30~39%の調査について、断熱温度上昇試験を行い、この結果を用いて有限要素法により夏季を想定した場合の部材の温度履歴モデルを作成した。温度解析条件および解析結果を図-3に示す。

つぎに、この温度履歴を与えた供試体の材令91日までの強度発現を標準養生の場合と併せて図-4に示す。温度追従養生を行った供試体はいずれの調査においても材令7日以降の強度発現が停滞する傾向にあり、強度発現に対する温度履歴の影響を確認することができた[3][4]。また、材令28日における標準養生の圧縮強度は、水セメント比30%で838kgf/cm²、35%で719kgf/cm²、39%で666kgf/cm²となったが、温度追従養生の場合は、水セメント比30%で664kgf/cm²、35%で578kgf/cm²、39%で613kgf/cm²となり、標準養

表-2 調査一覧 (室内実験)

シリーズ	調査名	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	s/a (%)	粗骨材	細骨材	AD (C×%)
1	27N1	27.5	165	600	40.0	G2: 多摩産碎石	S2: 相模川産川砂	2.0%
	30N1	30.0		550	42.0			
	35N1	35.0		471	44.0			
	39N1	39.0		423	44.0			
	42N1	42.0		393	46.0			
2	26N2	26.5	165	623	40.0	G1: 相模川産川砂	混合砂 (S1:S2 = 15:85)	2.9~ 3.0%
	28N2	28.5		579	40.0			
	30N2	30.0		550	40.0			
3	26N3	26.5	165	623	40.0	G3: 青梅産碎石	S3: 浜岡産陸砂	2.0~ 2.2%
	28N3	28.5		579	40.0			
	30N3	30.0		550	40.0			

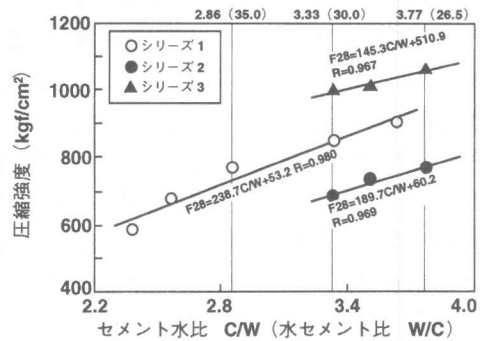


図-2 圧縮強度試験結果

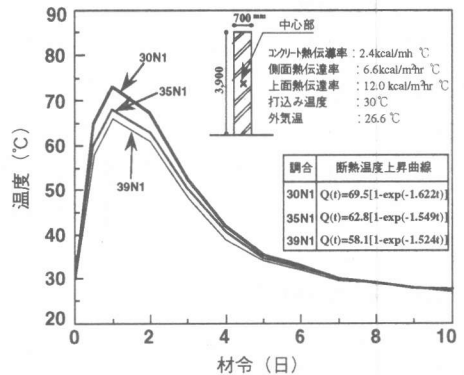


図-3 温度解析結果

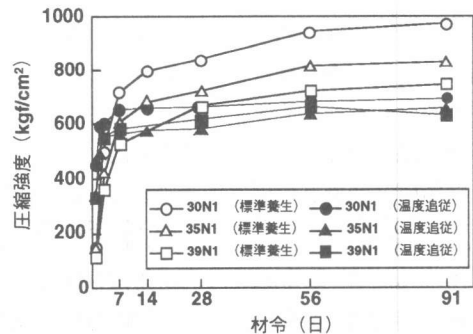


図-4 温度履歴供試体の強度発現

生に比べて水セメント比による差は小さく、強度発現が頭打ちになる傾向が認められた。

以上の結果から、室内実験において構造体コンクリートの強度発現の傾向を推定し、調合設計のための資料とすることが可能と考えられる。

3. 実機プラント試験

3.1 実験概要

室内実験の結果をもとに、レディーミクストコンクリート工場において練混ぜを行い、圧縮強度と水セメント比の関係について検討を行った。また、設計基準強度 600kgf/cm^2 を想定した水セメント比30%のコンクリートについて、スランプ、フローおよび空気量の経時変化の確認を行い、併せて、同工場内で図-5に示す実際の構造体と同じ壁厚(700mm)の試験体にこれを打ち込み、温度測定、温度追従養生による強度発現の確認、コア強度の測定を行った。なお、実験は7月に実施した。

3.2 使用材料および調合

使用した材料および調合は、室内実験のシリーズ1を基本とし、単位水量 165kg/m^3 一定で水セメント比を27.5~48.0%の範囲とした。目標スランプは、水セメント比27.5~34.0%で23.0cm、水セメント比39.0, 42.0%で21.0cm、水セメント比45.0, 48.0%で18.0cm、目標空気量はすべて2.0%とした。

3.3 実験結果および考察

(1)フレッシュコンクリートの経時変化

アジテータ車で練り置いたコンクリートの練り上がり90分までのスランプ、フロー、空気量の経時変化を図-6に示す。90分経過でフローが若干小さくなったが、スランプおよび空気量はほとんど変化がなく、施工上の問題はないと判断された。

(2)圧縮強度

材令28日における標準養生圧縮強度の試験結果を室内実験のシリーズ1と比較して図-7に示す。この結果から、実機プラントで製造したコンクリートは室内よりも $70\sim 90\text{kgf/cm}^2$ 程度強度が小さくなることが確認された。こうしたことから、この種のコンクリートについては事前に実機プラントでの圧縮強度の確認が必要であると考えられる。

(3)モデル試験体の温度、強度

図-5の試験体に打ち込んだコンクリートの温度履歴を室内実験時に得た温度解析結果と併せて図-8に示す。また、試験体の温度履歴を与えた温度追従養生

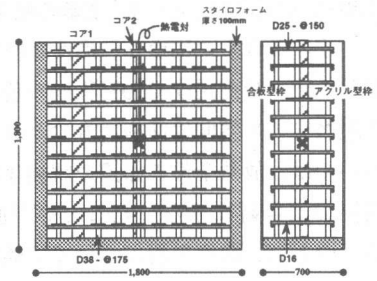


図-5 試験体の概要 (プラント実験)

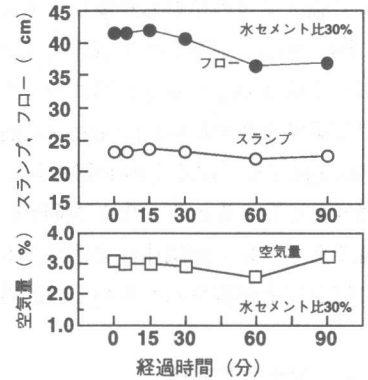


図-6 フレッシュコンクリートの経時変化

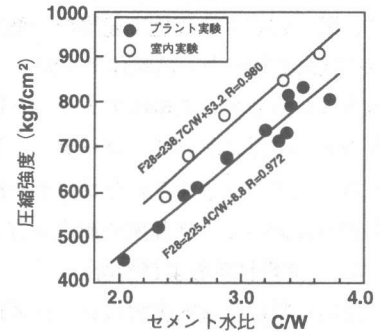


図-7 圧縮強度試験結果

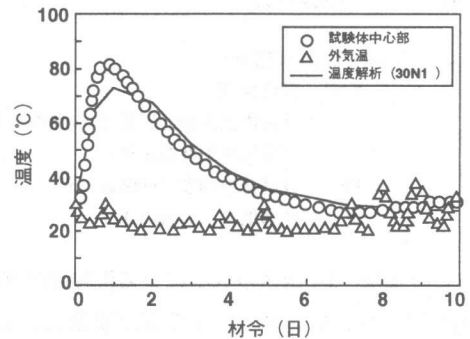


図-8 温度履歴測定結果

生供試体の強度発現を室内実験の結果と併せて図-9に示す。これらの図から、温度履歴については解析結果に比べ最高温度で10℃程度の差が生じたが、温度履歴全体の傾向は同様のものとなった。この差については、放熱条件の相違や試験体の温度上昇が外気温の上昇時に重なったこと等が原因と考えられる。つぎに、強度発現については標準養生強度で室内実験との差が認められたが、温度追従養生についてはほぼ同等の値となった。これは、室内実験と同様に強度発現の頭打ち現象によるものと思われる。

図-10は、試験体から採取したコアの材令28日における強度分布を高さ方向に示したものである。コア強度は平均値でそれぞれ632kgf/cm²、631kgf/cm²となったが、一部で600kgf/cm²を下回るものも認められた。また、温度追従養生強度と比較すると若干低めの強度を示したが、その差は5%程度であり、コア供試体の成型による強度低下等を考慮すれば良好な対応が得られたものと判断される。

4. 実大施工実験

4.1 実験概要

室内実験、実機プラント試験の結果を踏まえて、設計基準強度600kgf/cm²のコンクリートを対象に、図-11に示す実施工建物の一部をモデル化した試験体にコンクリートを打ち込み、その強度性状の検討を行った。試験体はレディーミクストコンクリート工場から1.5km程度の距離にある現場敷地内に組み立て、運搬はアジテータ車、打込みはポンプ車を使用した。ここで、試験体の部材厚方向の中心位置において、コーナー、壁中央、梁中央の各箇所温度測定を行い、この中で最も温度上昇が大きいと予想されたコーナー部分の温度を追従させた供試体の強度測定を行った。また、材令28日においてコア強度の測定を行った。なお、実験は8月下旬に実施した。

4.2 使用材料および調査

使用材料は、室内実験のシリーズ1と同一のものとした。調査は、実機プラント試験の結果を用いて下式(1)のように定めた。

$$F_{28} = \alpha (F_c + 1.73 \sigma) \quad (1)$$

F₂₈ : 調査強度

α : 構造体強度補正係数 (α = 標準養生強度 / 構造体強度推定値)

F_c : 設計基準強度 (600kgf/cm²)

σ : 標準偏差 ($\sigma = 0.08F_c$)

この式は、JASS 5の気温による温度補正の考え方[5]と異なり、コンクリートの温度履歴による強度低下分を、標準養生強度に対する構造体強度の比率で補

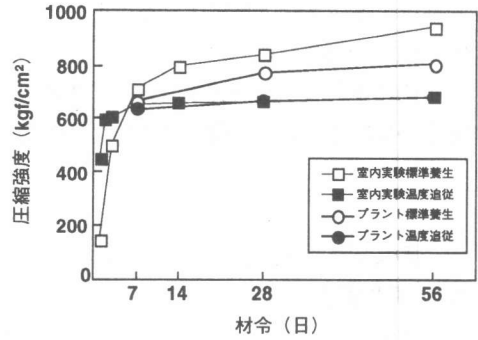


図-9 強度発現の比較

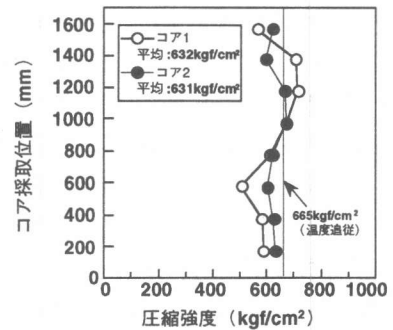


図-10 コア強度の分布

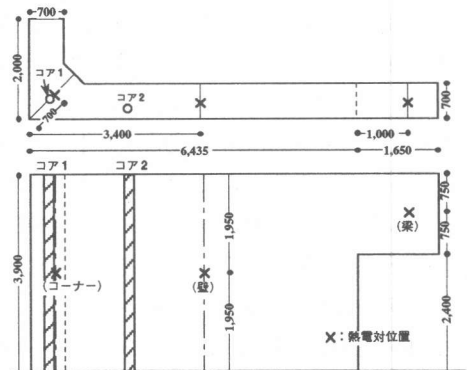


図-11 試験体の概要 (実大施工実験)

正して調合強度を求める形をとっている。ここで、標準養生強度は実機プラント試験で得られた770kgf/cm²とし、構造体強度推定値については同じく実機プラント試験の温度追従養生強度665kgf/cm²を用い、これらの値から α を求めた。以上の条件で調合強度を求めると792kgf/cm²となり、実機プラント試験における強度—セメント水比の関係から水セメント比は28.8%となる。この結果から実大施工実験における水セメント比を28.5%に設定した。なお、単位水量は、室内実験、実機プラント試験と同じ165kg/m³とした。

4.3 実験結果および考察

(1) 試験体温度履歴

試験体と温度追従水槽および外気温の温度履歴を図-12に示す。この結果、コーナー部分の温度上昇が最も大きく、材令16時間で最高温度92.9℃となった。つぎに、壁中央部分、梁部分の順に温度上昇が大きく、これらの位置でも89~90℃の最高温度となった。一方、コーナー部分の温度に追従させた養生水槽は最高温度が89.1℃と部材に比べ若干低い値となった。これは、追従させる温度が90℃以上と非常に高温となったため、水槽周囲への放熱が過大になったことが主な原因であり、水槽付近の外気温が50℃程度になっていることから推察される。この点については、その後、断熱材等の使用による追従性の改善を室内実験で確認している。また、途中で示した2回の急激な温度降下は蒸発水補給のため、補給直前には空焚きに近い状態になった。これについても水槽蓋の改善、温水補給で防止できることを確認した。

(2) 圧縮強度

図-13は、アジテータ車ごとに採取した供試体の標準および温度追従養生の材令28日における圧縮強度を示したものである。この結果から、標準養生強度の平均値が786kgf/cm²となり、ほぼ所定の強度を得ることができた。また、温度追従養生の強度平均値は741kgf/cm²となり、標準養生強度との比率は1.06で実機プラント試験の結果より小さい値となった。一方、図-14は、試験体から採取したコア強度の高さ方向の分布を示したものである。コア強度は平均値でそれぞれ673kgf/cm²、642kgf/cm²となり、また、全36本のコアの中で600kgf/cm²を下回ったものは2本だけであり、ほぼ所要の強度を得ることができた。このことから、今回設定した水セメント比28.5%は妥当なもの判断される。また、コア強度と温度追従養生の強度を比較すると、コア強度が9~13%低い値となっており、実機プラント試験の結果に比べてその差が大きく

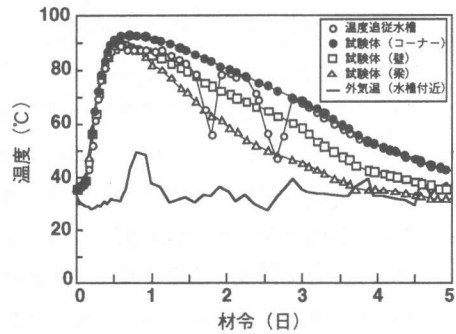


図-12 温度履歴測定結果

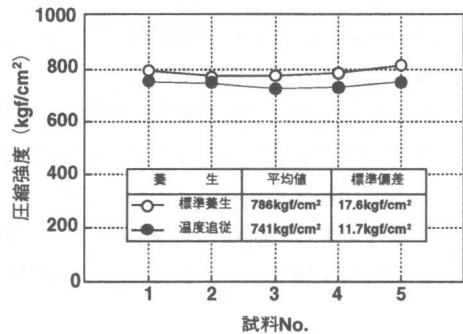


図-13 圧縮強度の変動

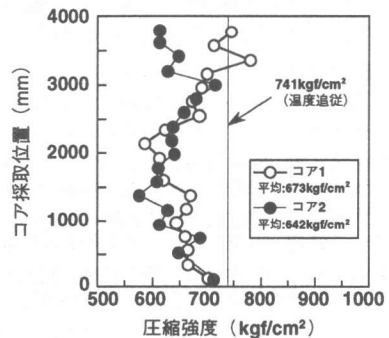


図-14 コア強度の分布

なった。これは、温度追従養生強度が標準養生強度に近い値を示したことを合わせて考えると、実大施工実験では、室内実験や実機プラント試験の場合と異なり、温度追従養生強度の頭打ち傾向が小さかったものと判断される。この点については、温度追従養生装置の管理が不十分であったこと等が影響していると考えられる。

5. まとめ

設計基準強度420~600kgf/cm²の高強度コンクリートを高層建築物に適用するための製造・施工技術に関する検討を行い、この中で調合設計、構造体強度管理を中心に実験を行った。

本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下の様になる。

- 1)室内調合実験の結果、設計基準強度600kgf/cm²程度までの高強度コンクリートを得るためには、骨材の選定を十分に行うことが必要であることがわかった。また、部材温度履歴モデルを与えた温度追従養生を行った結果、コンクリートの強度発現は標準養生と比べて、大きく異なることが確認され、室内実験で構造体強度の傾向を捉えることができた。
- 2)レディーミクストコンクリート工場における練混ぜ実験の結果、アジテータ車に練り置いたコンクリートの90分までのスランプロスはほとんどなく、良好な状態を保持することができた。また、実機プラントで練り混ぜたコンクリートは、室内実験に比べて同一水セメント比で70~90kgf/cm²程度強度が小さくなることが確認された。同時に打ち込んだモデル試験体のコア強度は温度追従養生供試体の強度に比べて5%程度の低下となり、良好な対応が得られた。
- 3)設計基準強度600kgf/cm²のコンクリートを対象として行った実大施工実験において、標準養生強度と構造体強度推定値の比率による補正係数を用いた調合強度算定式から、水セメント比を28.5%とすることで、強度管理材令28日において実大試験体から採取したコア強度は所要の強度をほぼ満足するものとなった。
- 4)調合設計において標準養生強度と構造体強度推定値の比率により調合強度を算出する方法や構造体の強度を部材の温度追従養生強度で判定する方法は、設定数値の決定や装置の管理に十分な注意が必要であることがわかった。こうした点を十分検討した上で、これらの方法は設計基準強度420~600kgf/cm²の範囲の高強度コンクリートに適用が可能と考えられる。

上記の結果を踏まえて、今後、冬季施工等に関する検討を行う予定である。

〔謝辞〕

本研究の実施にあたり、筑波大学 園部泰寿教授、建設省建築研究所 山崎 裕氏 同 平石久広氏に御教示を戴いた。また、実験に際しては、厚木小野田レミコン(株)、小野田セメント(株)、花王(株)、山宗化学(株)および清水建設(株)関係各位の協力を得た。ここに、慎んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 橘 大介・熊谷仁志・山崎庸行・鈴木忠彦：高強度コンクリート ($F_c=600\text{kgf/cm}^2$) の建築構造物への適用に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.2、No.2、pp.131-142、1991.7
- 2) 桑原隆司・安斎俊哉・森永 繁：マスコンクリートの強度管理方法と管理装置の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.79-84、1987
- 3) 西田 朗・岡田武二・桑原隆司：暑中コンクリートおよび高強度コンクリートにおける積算温度方式の適用に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.511-516、1992
- 4) 榊田佳寛・阿部道彦・松本雅之：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度管理方法に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.837-838、1991
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.146-159、1991