

低温下におけるコンクリートの強度増加に関する基礎的研究

今 井 実

§ 1. はじめに

コンクリートが低温構造物の有効な構造材料であることは、液化天然ガス(LNG)貯槽、冷凍冷蔵庫などの施工実績でも明らかである。しかし、対象構造物、構造形式等の違いにより使用するコンクリートの品質が異なり、そのために個々のコンクリートについて低温性状を確認する必要があった。

常温下においてコンクリートの強度、弾性係数などの諸性質は、材料、配合、養生方法および材令などの要因により決まることから、低温下における諸性質も同様な要因に支配されることが考えられた。既往の研究報告の多くは、配合、養生方法の条件を限定した範囲内でコンクリートの基礎的な性状を明らかにしたもので、前述の要因について定量的に検討された報告はない。

低温下でコンクリートの強度が著しく増加することは知られている。これはコンクリート内部の水が凍結し、強度を持つ氷の固体に変わるためと考えられ、その増加する程度はコンクリート内部の含水状態により影響されることが定性的に明らかになっている。しかしながら、増加する原因を明らかにした報告はない。

本実験は、常温下でコンクリートの諸性質に影響を及ぼす要因のうち、特に低温状態を考慮した要因を取り上げ圧縮強度試験を行ない、コンクリートの低温強度に影響を及ぼす要因を定量的に明らかにする。さらに、コンクリート内部の含水状態を変化させ圧縮強度試験を行ない、コンクリートの低温強度が増加する原因を明らかにするとともに、低温圧縮強度を推定する実験式を提案する。

§ 2. コンクリートの低温強度に関する既往の研究

コンクリートの低温強度に関する研究報告は数多くあ

る。調査によれば、低温強度は、主に(1)冷却温度、(2)冷熱の受け方、(3)コンクリートの含水状態により影響を受ける。冷却温度は氷の強度性状、水の凍結温度に関与し、温度の上昇、下降に伴う低温強度の増減に影響を与える。

冷熱の受け方は、1)緩やかな速度で冷却を受ける場合、2)急激、かつ大きな温度差を受ける場合(熱衝撃)、3)緩やかな冷却速度で、大きな温度幅の繰返しを受ける場合(凍結触解)に大別でき、各々によって強度性状が著しく異なる。

本研究は、コンクリートの低温強度に及ぼす要因、原因機構について検討することから、冷熱によるコンクリートの母材強度が変化しない¹⁾の冷熱の受け方に限定した。

以下、(3)コンクリートの含水状態と1)緩やかな速度で冷却を受けた場合で、低温強度の増加に関して論じている研究報告は主に次のとおりである。

Monfore & Lentz¹⁾の研究は、膨張骨材を使用した軽量コンクリートについて湿潤状態、相対湿度50%の空气中に1カ月間保存した気乾状態、105℃で乾燥させた絶乾状態の3形態について実験を行ない、低温強度が含水状態によって影響されることを解明している。

内田・嵩²⁾らは、コンクリートの含水状態を湿潤、気乾および絶乾の3段階に変化させ、低温強度が増大する原因としてコンクリートの含水状態による影響を明らかにし、さらにコンクリート内部の自由水の凍結による空隙の減少だけでなく、低温における氷の性状の変化およびセメント硬化体の吸着水の凍結の影響も無視できないことを推察している。

岩田・寛³⁾らは水中、屋内、屋外養生した試験体について圧縮強度試験を行ない、低温強度が増加する理由をG. Tognonの三軸圧縮モデルを使用し、Griffithの破壊理論式に適用した計算式と実験値とを比較検討し、Tognonのモデルが解析に適用できることを論じている。

後藤・三浦⁴⁾は、コンクリートの低温強度の増加はコ

ンクリートの含水率に比例し、低温圧縮強度増加量は温度と含水率との関数とした実験式を提案している。

著者⁹⁾らは、コンクリートが湿潤状態の場合、水セメント比に関係なく低温圧縮強度増加量は温度の関数とした実験式を提案した。

§ 3. 実験計画

3.1 低温圧縮強度に及ぼす要因分析

常温下におけるコンクリート強度は、主に(1)セメントの種類、(2)骨材の種類、(3)水セメント比、(4)単位水量、(5)材令、(6)養生方法などの要因により影響を受ける。

(1)のセメントの種類は、構造物の部材厚等により最適なセメントが選定されるが低温下でセメント自体の性質は変化しないことから、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。(2)の骨材の種類は、施工実績から天然骨材とした。したがって、取り上げた要因は(3)水セメント比、(4)単位水量、(5)材令、(6)養生方法とし、常温下と-50℃下で圧縮強度試験を行ない、コンクリートの低温圧縮強度に及ぼす要因を検討した。

実験に用いた要因と水準は、表-1に示すとおりである。これらの要因と水準を直交配列(L27)に割付けた全27回について圧縮強度試験を行なった。

3.2 低温圧縮強度の増加の原因について

5.1の低温圧縮強度に及ぼす要因分析の結果、養生方法、すなわちコンクリート内部の含水状態が、最も低温強度に影響を及ぼすことが明らかになった。

コンクリートの含水状態を定量的に表わすものとして既往の研究報告では含水率で表わしているものが多い。

コンクリートの含水率と低温圧縮強度の増加量との間には比例関係にある説、または必ずしも比例関係にない説等がある。

そこで、本実験は表-2に示す水セメント比、単位水

要 因	水 準		
(A) 水セメント比 (%)	43,	53,	63
(B) 単位水量 (kg/m ³)	135,	155,	175
(C) 材 令 (日)	1,	7,	28
(D) 養生条件	水中, 気乾, 絶乾		

表-1 要因と水準

要 因	水 準		
(A) 水セメント比 (%)	43,	53,	63
(B) 単位水量 (kg/m ³)	135,	155,	175
(C) 養生条件	湿潤, 気乾, 絶乾		

表-2 要因と水準

量を組合わせたコンクリートについて、図-1に示す養生方法でコンクリートの含水状態を任意に変化させ、常温下、-30、-50、-100℃下で圧縮強度試験を行ない、

- (1)コンクリートの含水率と低温圧縮強度増加量との関係を定量的に明らかにする、
 - (2)低温圧縮強度の増加の原因を明らかにする、
 - (3)低温圧縮強度の実験式を提案する、
- ことについて検討したものである。

§ 4. 試験方法

4.1 使用材料

セメントは、日本セメント株式会社製の普通ポルトランドセメントを用いた。試験成績は表-3に示す。これは JIS R 5201 に適合するものである。

粗骨材、細骨材とも富士川産である。粗粒率は6.93、と2.97、比重は2.63と2.61、吸水量は1.24と2.36%であった。

減水剤は、日曹マスタービルダーズ製ポゾリスNa 8でセメント重量の0.25%を用いた。

練混ぜ水は東京都水道水とした。

項 目	比重	比表面積 (ブレー ン方法) (cm ² /g)	凝 結			安定性 (煮沸方法)	酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 いおう (%)	強熱減量 (%)		
			室 温 (℃)	湿 度 (%)	水 量 (%)					始 発 (時一分)	終 結 (時一分)
普通セメント	3.15	3130	20.1	91	27.3	2-29	3-45	良	1.1	2.0	0.4
JISR5210(1973)	—	2500以上	20±3	80以上	—	1-00以後	10-00以内	良	5.0以下	3.0以下	3.0以下
項 目	けい酸 三カルシ ウム(%)	アルミン酸 三カルシ ウム(%)	フロー値 (mm)	曲 げ 強 さ (kg/cm ²)				圧 縮 強 さ (kg/cm ²)			
				1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通セメント	—	—	242	—	31.0	45.7	71.2	—	132	231	418
JISR5210(1973)	—	—	—	—	—	—	—	—	70以上	150以上	300以上

表-3 セメントの試験成績表

4.2 試験体作製

コンクリートの練混ぜは、石川島コーリンブ製強制かくはん式ミキサ（かくはん容量 100 ℓ，回転数 55 rpm）を使用し，全材料投入後 2 分間とした。

スランブ試験は JIS A 1101（スランブ試験方法），空気量は JIS A 1128（空気室圧力方法）に準じ行なった。試験体は φ10×20 cm とした。

4.3 養生方法とコンクリートの含水率

試験体はコンクリート打設後，翌日ペーストキャッピングを行ない，翌日脱型し，試験体重量を測定した。それ以後，3.1 の試験では材令により各養生方法に従った。水中養生は 20±2℃ の水中である。気乾養生は各材令まで水中養生し，以後水中から試験体を取り出し試験体重量を測定し，20℃，60±5% 相対湿度の恒温恒湿室で 28 日間養生し，コンクリートの含水状態を変化させた。絶乾養生は各材令まで水中養生し，以後水中から試験体を取りだし，110℃ の乾燥炉で 7 日間乾燥させ，試験体重量を測定した。

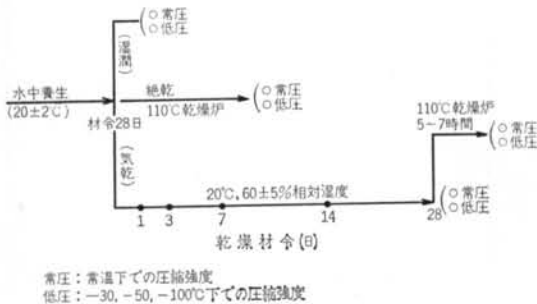
3.2 の試験の場合は材令 28 日まで水中養生し，以後図一に示すような養生工程でコンクリートの含水状態を変化させた。水中，気乾および絶乾養生条件は 3.1 の試験と同じである。

コンクリートの含水率は式(1)で求めた。

$$\text{コンクリートの含水率 (\%)} = \frac{\text{試験体の水中, 気乾重量} - \text{絶乾重量}}{\text{試験体の絶乾重量}} \times 100\% \quad \dots(1)$$

4.4 冷却方法と圧縮強度試験

所定の材令，養生を行なった試験体は低温槽（冷媒は液体窒素）内に入れ冷却した。温度管理と冷却速度は本試験体と同一条件のダミー試験体を作り，その試験体の中心部と側面から 1 cm の位置に c.c 熱電対を埋込み，側面から 1 cm の位置の温度と槽内温度との温度差を $\pm 10 \pm 2$



図一 養生工程

℃以内に保ちつつ設定温度まで降下させ，試験体全体の温度が設定温度に達するまで冷却した。

圧縮強度試験は JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準じた。試験時に試験体の温度上昇を防ぐため，200 ton アムスラー試験機に簡易低温槽を設置し，温度制御した。

§ 5. 試験結果

5.1 低温圧縮強度に及ぼす要因分析

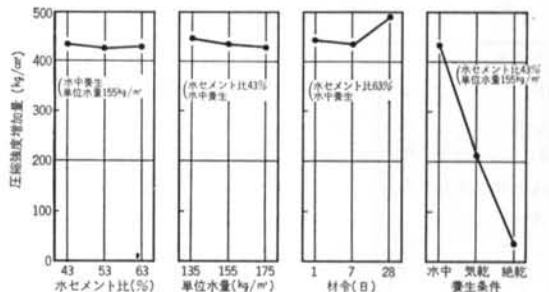
5.1.1 要因分析について

表一4は，常温下と-50℃下での圧縮強度試験結果である。絶乾養生の場合，低温下の圧縮強度は常温下の圧縮強度に比べわずかな増加を示すが，これは蒸発しきれない細孔中の水の凍結によるものと考えられる。よって，低温によるコンクリートの母材強度は変化しないものとし，低温による圧縮強度の増加量は低温圧縮強度から常温下圧縮強度を差引いた値（以下，低温圧縮強度増加量とする）とした。以下，要因分析には低温圧縮強度増加量を用いた。

表一5は，各要因の主効果と交互作用の要因分析の結果を示し，主効果の一部を図示すると図二のようになる。低温圧縮強度の増加に及ぼす要因は，養生条件（要因D）が最も大きく（因子寄与率=97.1%），水セメント比，単位水量，材令の影響は少ないことが明らかとなった。

5.1.2 養生条件の含水率と低温圧縮強度増加量との関係

養生条件は水中，気乾および絶乾の3条件であった。この3条件の低温圧縮強度増加量を比較すると，水中，気乾，絶乾の順となる。これはコンクリート内部の含水状態が表一6のように相違するため，図示すれば図三のようになる。明らかに含水状態により低温圧縮強度増加量は異なる。しかし，同一養生条件内で含水率と圧



図二 主効果の低温圧縮強度増加量

No.	水セメント比 (w/c)	単水量 (w)	材令 (日)	養生方法 (*1)	圧縮強度 kg/cm ²		
					常温下	-50℃下	$\Delta\sigma_{TC}$ (*2)
1	43	135	1	0	320	336	16
2	"	135	7	60	410	665	255
3	"	135	28	100	430	878	448
4	"	155	1	60	325	535	210
5	"	155	7	100	241	676	435
6	"	155	28	0	383	414	31
7	"	175	1	100	66	493	427
8	"	175	7	0	346	399	53
9	"	175	28	60	448	684	236
10	53	135	1	0	215	251	36
11	"	135	7	60	324	529	205
12	"	135	28	100	326	826	500
13	"	155	1	60	247	387	140
14	"	155	7	100	168	594	426
15	"	155	28	0	291	323	32
16	"	175	1	100	47	496	449
17	"	175	7	0	238	286	48
18	"	175	28	60	344	566	222
19	63	135	1	0	120	152	32
20	"	135	7	60	212	339	127
21	"	135	28	100	209	702	493
22	"	155	1	60	177	376	199
23	"	155	7	100	115	548	433
24	"	155	28	0	219	230	11
25	"	175	1	100	28	471	443
26	"	175	7	0	156	180	24
27	"	175	28	60	260	440	180

*1) 0: 絶乾, 110℃乾燥養生
60: 気乾, 20℃, 60±5%相対湿度養生
100: 水中, 水中養生
*2) $\Delta\sigma_{TC}$: 低温圧縮強度増加量
 $\Delta\sigma_{TC} = (-50℃下圧縮強度) - (常温下圧縮強度)$
圧縮強度は試験体3本の平均値

表-4 試験結果

要因	平方和 (s) ²	自由度 (ϕ)	平均平方和 $V(=\frac{s^2}{\phi})$	$F = \frac{V}{V_e}$
A (水セメント比)	1,660	2	830	0.71
B (単水量)	2,450	2	1,225	1.04
C (材令)	2,405	2	1,202	1.02
D (養生条件)	801,553	2	400,776	341.38
A×B (交互作用)	1,900	4	475	0.40
A×C (")	3,928	4	982	0.84
e (残差)	11,739	10	1,174	

F分布表より, $F(2.4: 0.05) = 6.94$

表-5 要因分析表

縮強度増加量との関係を見ると, 水中養生の場合, 含水率が5.5~8.3%に分散しているにもかかわらず, 低温圧縮強度増加量はほぼ同じ値を示している, 一方, 気乾養生の場合, 含水率がほぼ同じ値にもかかわらず低温圧縮強度増加量に差が認められる傾向がある。

絶乾養生の場合の増加量はわずかであった。すなわち, 低温圧縮強度の増加はコンクリートの含水状態に影響を受けるが, コンクリートの含水率と低温圧縮強度増加量との間には相関性は少ない。

5.2 低温圧縮強度の増加の原因について

試験は2段階で実施した。第1段階は表-2に示すコンクリートについて-50℃下で, 第2段階は水セメント比53%, 単水量 155 kg/m³のコンクリートについて-30, -100℃で圧縮強度試験を行なった。

5.2.1 常温下の圧縮強度試験結果

図-4は, 表-2のコンクリートについて水中, 気乾, 絶乾養生したときの常温下における圧縮強度の結果である。水セメント比が同一でも単水量の相違によって異なること, 気乾養生した場合, 水中養生の圧縮強度に比べ大きくなる傾向は一般的な傾向と同じである。気乾養生28日後, 105℃乾燥炉で7時間乾燥させたとき, および7日間乾燥させたときの圧縮強度は水中養生の値とほぼ同じ値であることから, 母材強度の劣化はないものと考えられ, 低温強度への影響はない。

5.2.2 水中養生したコンクリートの含水率

図-5は, 表-2のコンクリートを材令28日まで水中養生したときの含水率を単水量ごとに示したものである。明らかに水セメント比, 単水量の変化で含水率は異なることが認められる。単水量が同じであれば水セメント比が大きいくほど, また水セメント比が同じであれば単水量が大きいくほど含水率は大きくなる。

5.2.3 気乾養生中のコンクリートの含水率

材令28日まで水中養生したコンクリートを20℃, 60±

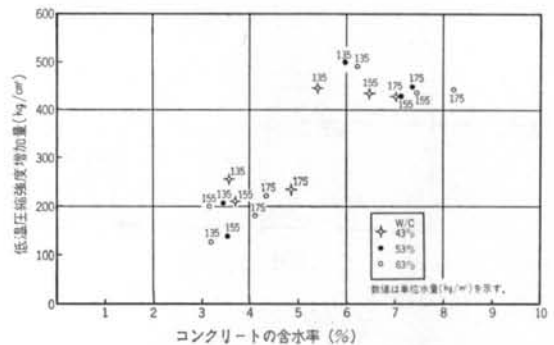


図-3 コンクリートの含水率と低温圧縮強度増加量との関係

5%の相対湿度の恒温恒湿室で乾燥養生させたときのコンクリートの含水率を、乾燥材令で示したのが図-6である。いずれのコンクリートとも、乾燥材令初期において含水率の低減が大きく、その傾向は水セメント比、単位水量が大きいほど大きくなる。同一水セメント比の場合、単位水量が大きいほど含水率の低減が大きくなる。すなわち、コンクリートの含水率は水セメント比、単位水量の組合わせによって著しく異なるものである。

5.2.4 コンクリートの含水率と低温圧縮強度増加量との関係

図-7は、表-2のコンクリートについて水中、気乾養生してコンクリートの含水状態を変化させ、-50℃下での低温圧縮強度増加量をコンクリート含水率との関係で表わしたものである。図によれば、含水率と低温圧縮強度増加量との関係は単位水量ごとにほぼ直線的な分布傾向を示している。

同一圧縮強度増加量を得るためには、単位水量が大きいほどコンクリートの含水率が大きくなければならない。また、同一含水率で得られる低温圧縮強度増加量は単位水量によって著しく異なり、単位水量が小さいほど大きな値となる。すなわち、コンクリートの含水率と低温圧縮強度との間には、単位水量によって異なることから、相関性は少ないことが認められた。

低温圧縮強度が増加する原因は、コンクリート内部の水が凍結するためである。含水状態により低温圧縮強度

養生方法	単位水量 (kg/m ³)	材令 (日)	水セメント比					
			43%		53%		63%	
			含水率 (%)	$\Delta\sigma_{TC}$ (kg/cm ²)	含水率 (%)	$\Delta\sigma_{TC}$ (kg/cm ²)	含水率 (%)	$\Delta\sigma_{TC}$ (kg/cm ²)
水	135	28	5.42	448	5.98	500	6.27	493
	155	7	6.48	435	7.11	426	7.47	433
中	175	1	7.04	427	7.38	449	8.23	443
気	135	7	3.56	255	3.42	205	3.18	127
	155	1	3.70	210	3.55	140	3.16	199
乾	175	28	4.88	236	4.38	222	4.12	180
	絶	135	1	0	16	0	36	0
155		28	0	31	0	32	0	11
175		7	0	53	0	48	0	24

注) 含水率(%) = $\frac{(w \text{ または } w_a - w')}{w'} \times 100\%$

$\Delta\sigma_{TC}$: 低温圧縮強度増加量 (kg/cm²)

w : 水中養生の試験体重量

w_a : 気乾養生の "

w' : 絶乾養生の "

ただし、含水率の中には骨材の含水率も含む

表-6 養生方法の相違に伴う含水率と $\Delta\sigma_{TC}$ の値

増加量が異なるのは、凍結時のコンクリート内部に残っている水の量（以下、残留含水量という）に影響されるものと考えられたが、図-8からは認められなかった。すなわち、水中養生の場合、水セメント比、単位水量の

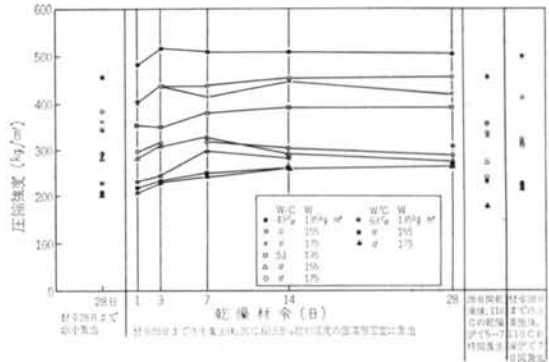


図-4 常温下における圧縮強度

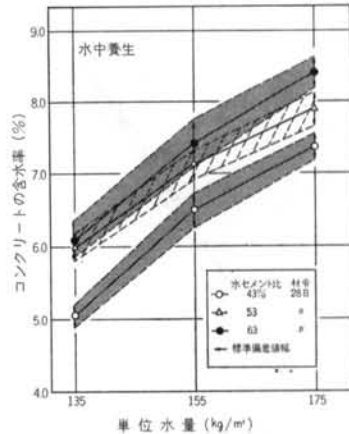


図-5 単位水量とコンクリートの含水率との関係

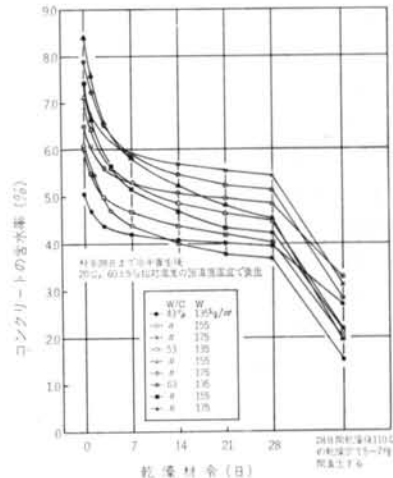


図-6 コンクリートの乾燥日数と含水量との関係

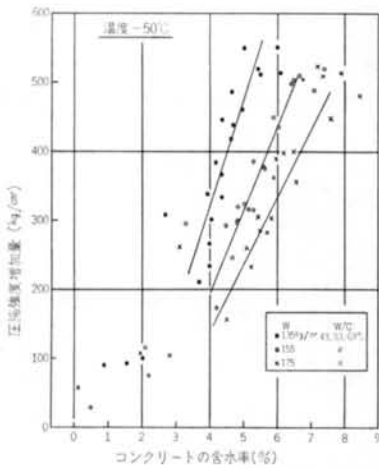


図-7 コンクリートの含水率と圧縮強度増加量との関係

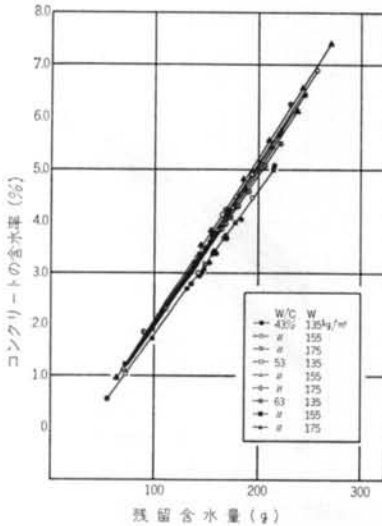


図-8 残留含水量とコンクリートの含水率との関係

組合わせにより残留含水量に大きな開きがあるにもかかわらず、低温圧縮強度増加量はほぼ同じである。一方、気乾養生の場合、同一含水率に対する残留含水量は水セメント比、単位水量が異なってもほぼ同じであるが、低温圧縮強度増加量は大きく異なる。このことから、低温圧縮強度増加量はコンクリート内部の残留含水量に影響されないことが明らかとなった。

次に、コンクリート内部の水が凍結し、空けき部が強度を持つ氷の固体に置き換わることから、置き換わる比率（以下、残留含水比という）に影響されるものと考えた。残留含水比は式(2)で求めた。

$$\text{残留含水比}(\%) = \frac{\text{残留含水量}}{\text{空けき量}} \times 100\% \quad \dots\dots(2)$$

空けき量は、材令 28日まで水中養生した後、110℃の

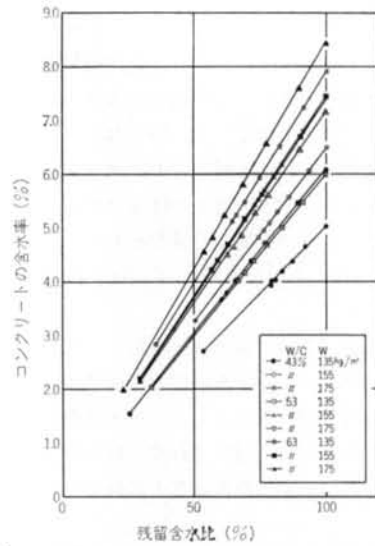


図-9 残留含水比とコンクリートの含水率との関係

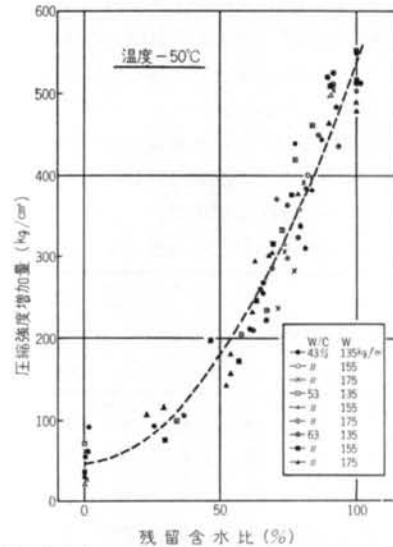


図-10 残留含水比と圧縮強度増加量との関係

乾燥炉で7日間乾燥させ、蒸発した水の量と定義する。残留含水量は、気乾養生で空けき部の一部に残っている水の量とする。

図-9は、残留含水比と含水率との関係を示したものである。含水率と残留含水比との間には直線的な傾向が認められるが、同一含水率に対する残留含水比は水セメント比、単位水量によって著しく異なる。図-8の同一含水率に対する残留含水量がほぼ同じで、低温圧縮強度増加量に大きい差が生じたのは、残留含水比に影響されるものと考えられる。

5.2.5 残留含水比と低温圧縮強度増加量との関係

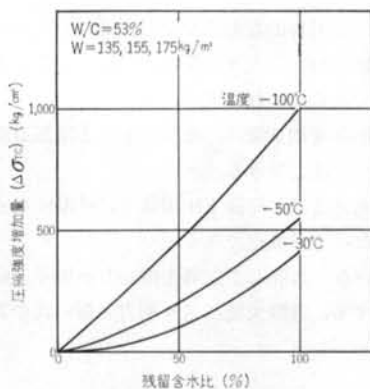


図-11 残留含水比と圧縮強度増加量との関係

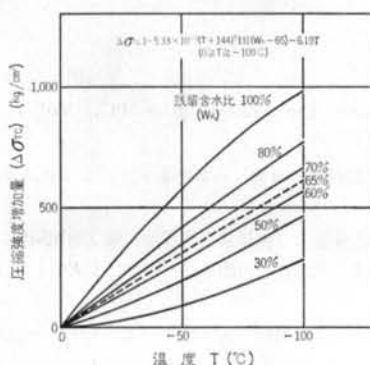


図-12 温度と圧縮強度増加量との関係

図-10は、 -50°C 下のコンクリートの残留含水比と低温圧縮強度増加量との関係を示したものである。結果によれば、水セメント比、単位水量に関係なく、残留含水比と低温圧縮強度増加量との間にはほぼ2次曲線の関係が成り立つことが明らかとなった。図-10から、水セメント比53%、単位水量135、155、175 kg/m^3 のコンクリートの残留含水比と低温圧縮強度の2次曲線と、全体のこれらの2次曲線とはほぼ近似した値を示し、水セメント比53%の2次曲線を全配合に適用しても大きな差は生じない。そこで水セメント比53%、単位水量135、155、175 kg/m^3 のコンクリートについて -30 、 -100°C でも実施し、各々の温度の残留含水比と低温圧縮強度増加量の2次曲線を求め図化したのが図-11である。冷却温度 -30 、 -100°C の場合も、 -50°C と同様に残留含水比が大きくなるに従い低温圧縮強度増加量は大きくなる。

図-11から、温度と低温圧縮強度増加量との関係に直せば図-12のようになる。図によれば、残留含水比65%近傍で温度と低温圧縮強度増加との間にはほぼ直線な関係が認められるが、65%を境として対称的な形状を示す。65%以上の場合、温度が -50°C 以上と高い領域において増加する傾向が大きくなる。一方、65%以下の場

合、温度が低くなるにつれて増加する傾向が大きくなる。これらの相違する原因については明らかではないが、Stockhausen⁶⁾らの硬化セメントペーストの細孔中の水の凍結挙動、R. H. Helmuth⁷⁾の細孔径と凍結温度の関係等の報告によれば、細孔径の大小によって水の凍結温度が著しく異なる。すなわち65%以上の場合、細孔径の大きい場所にも水が存在しているため比較的高い温度で凍結し、強度増加が大きくなる。一方、65%以下となると細孔径の大きい部分の水は蒸発し、水が存在しているのは細孔径の小さい場所となり、凍結温度が低くなるためと考えられる。

以下、低温圧縮強度増加量は温度と残留含水比の関数とした式(3)の実験式で表わせる。

$$\Delta\sigma_{Tc} = \{-5.33 \times 10^{-4}(T+144)^2 + 11\}(W_K - 65) - 6.19 T \quad \dots(3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{Tc}$: 低温圧縮強度増加量 (kg/cm^2)

T : 温度($^{\circ}\text{C}$)

W_K : 残留含水比 (%)

よって、低温圧縮強度は式(4)によって求まる。

$$\sigma_T = \sigma_c + \Delta\sigma_{Tc} \quad \dots(4)$$

ここに、

σ_T : 低温圧縮強度 (kg/cm^2)

σ_c : 常温下における圧縮強度 (kg/cm^2)

$\Delta\sigma_{Tc}$: 低温圧縮強度増加量 (kg/cm^2)

§ 6. まとめ

低温構造物に使用するコンクリートの圧縮強度等の品質は、構造形式、用途などにより最適なものが選定されるが、個々に異なる。これら品質が異なる個々のコンクリートについて、低温圧縮強度等の性状を確認していたのでは得策でない。

本実験は、コンクリートの低温圧縮強度に影響を及ぼす要因、原因を明らかにし、低温圧縮強度推定実験式の提案をすることを目的とし、水セメント比43、53、63%、単位水量135、155、175 kg/m^3 、材令1、7、28日、養生方法水中、気乾、絶乾の要因、水準としたコンクリートについて圧縮強度試験を行なった。以上の実験結果の範囲から次のことがいえる。

(1) 低温圧縮強度に影響を及ぼす主要因は養生方法、すなわちコンクリート内部の含水状態である。水セメント比、単位水量、材令の影響は少ない。

(2) コンクリートの含水率と低温圧縮強度増加量との関係は、水中養生の場合、含水率が異なっても低温圧縮強度

増加量はほぼ同じ値であり、また気乾養生の場合、同一含水率でも水セメント比、単位水量によって低温圧縮強度増加量が異なることから相関性は少ない。

(3)低温圧縮強度増加量は、コンクリート内部の凍結水量には影響されない。

(4)低温圧縮強度が増加する原因は、コンクリート内の空げき部に存在する残留含水量が凍結するため、その増加量は空げき量と残留含水量の比率、すなわち残留含水比と冷却温度によって決まる。

(5)低温圧縮強度増加量の増加傾向は、残留含水比65%

近傍を境として対称的な形状を示し、65%以上の場合温度が高い領域において大きくなる。一方、65%以下の場合温度が低くなるにつれて大きくなる。

(6)低温圧縮強度増加量は、残留含水比と冷却温度を関数とした式(3)で推定できる。

(7)低温圧縮強度は、常温下圧縮強度に低温圧縮強度増加量を加えた式(4)で推定できる。

本研究を行なうに際しご指導を頂いた岡田主任研究員に謝意を表す。実験実施に当り助力を頂いた中谷孝志氏に感謝する。

<参考文献>

- 1) Monfore & Lenty: "Physical Properties of Concrete at Very Low Temperature" J. of PCI, Vol. 4, No. 2 (1962) pp. 33~39
- 2) 内田忠男, 奥野享, 嵩英雄, 坂田雄二: "極低温下のコンクリートの性状に関する研究" 日本建築学会大会 学術講演梗概集(北陸)(昭和49年10月)
- 3) 岩田章, 寛勝行, 吉原健雄, 吉和雅雄: "コンクリートの低温物性" 日本冷凍協会学術講演会講演論文集(昭和50年)
- 4) 後藤幸正, 三浦尚, 阿部喜則: "極低温下で使用されるコンクリートの性質と含水比との関係について" 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集(昭和52年10月)
- 5) 岡田武二, 今井実, 長沢保紀, 石川登, 木村克彦: "低温下におけるコンクリート部材の曲げ特性" コンクリート工学 Vol. 15, No. 11 (1977)
- 6) N. Stockhausen, H. Dorner, B. Zech & M. J. Setyer: Cement and Concrete Research, Vol. 9, No. 6 (1979)
- 7) R. A. Helmuth: "Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes" 4th International Symposium on Chemistry of Cement, Washington, 1960. pp. 855~869