

寒中コンクリートの電気養生に関する実験

正員 一木保夫*

EXPERIMENTS OF ELECTRICAL CURING OF CONCRETE IN FREEZING WEATHER

Yasuo Ichiki, C.E.Member

Synopsis In this paper are stated the results of an experiment carried out chiefly of the materials to be used in electrical curing of concrete.

要 旨

寒中コンクリートの電気養生施工法に関連する主として材料学的な問題についての実験の結果をまとめたものである。

目 次

- I. 緒言
- II. フレッシュコンクリートの電気伝導性に関する実験
 - (1) 目的 (2) 方法 (3) 結果及び考察 (4) 結論
- III. 温度上昇速度及び温度上昇限界がコンクリートの強度に及ぼす影響に関する試験
 - (1) 目的 (2) 方法 (3) 結果及び考察 (4) 結論
- IV. 温度と通電時間に関する試験
 - (1) 目的 (2) 方法 (3) 結果及び考察 (4) 結論
- V. 結言

I. 緒 言

コンクリート自体に直接低周波電流を通じその電気抵抗による発熱を利用してコンクリートを保温養生し、寒中コンクリートの施工を容易且つ経済的ならしめんとする試みは、既に 10 数年前よりソヴィエトに於て行はれ、モスコウの地下鉄建設、工場建設等に應用された実例があるが、⁽¹⁾吾國に於ても最近この工法が大いに注目され、東北、北海道の各所の現場に於て実地施工も行はれるに至つた。この工法によれば従来一般の寒中コンクリート施工法と比較して、燃料その他の保温用資材は少くすみ、施工も容易であつて、寒気に対する増加経費も少く、又電気を熱として利用する熱効率の点から見ても最も有効な方法であり、將來大いに発展が期待される有望な工法である。⁽²⁾この問題に関し我國に於ては既に建設省土木研究所の島田八郎氏ほか数氏の研究があるが、尙多くの基礎的研究問題を残してゐる。

著者は昭和 21 年冬よりこの問題に関する種々の実験を行つて來たが、こゝにこれまで行つた実験のうち主として材料学的な問題に関するものを取まとめて報告する。

本研究に対しては文部省より昭和 22 年度及び 23 年度科学試験研究費の交付を受けた。

II フレッシュコンクリートの電気伝導性に関する実験

(1) 目 的

フレッシュコンクリートの電気伝導度は、使用材料によつて異なるは勿論、温度、使用水量、セメント使用量等によつて異なることが想像される。伝導度が異れば、ある電極配置に対し同じ印加電圧のもとに於て、コンクリートの温度状態が異つて来る。

* 北海道大学助教授

- 1) Albert Brund u. Helge Bohlin, "Elektrische Erwärmung von Beton," B.u.E., Heft 9, 1932, S. 138~140.
Andreas Réthy, "Die elektrische Beheizung des Betons," B.u.E., Heft 18, 1933, S. 282~285.
Andreas Réthy, "Elektrische Beheizten Beton beim Bau des Moskauer Untergrundbahn," B.u.E., Heft 4, 1934, S. 59.
- 2) 島田八郎; モルタルの工学的特性に及ぼす電流加熱の影響 (第 1 報), 内務省土木試験所報告第 70 号, p.19~37, 昭和 18 年 4 月
島田八郎; 同上 (第 2 報), 同上第 77 号, p.19~32, 昭和 19 年 6 月
近藤泰夫; 寒中コンクリートの試験, 日本学術振興会第 33 小委員会編「建設材料の研究」第 3 集
巽 純一; 極寒地に於けるコンクリートの電熱施工法, セメント界彙報第 322 号, 昭和 10 年 1 月

この実験は、コンクリート 1m³ に使用される水量及びセメント量を異にした場合、フレッシュコンクリートの電気抵抗が如何に変わるかを求めんとしたのである。尚、コンクリートの温度上昇を測定し、凝結開始前に於ける、コンクリートの温度と電気抵抗との関係をも求めんとした。

〔2〕方法

使用セメントは、普通ポルトランドセメントで、比重3.10、凝結の始発5時間22分、経結8時間15分(水量28.7%、室温15°C)規格による強度試験の結果は表-1で、規格に僅か不合格のものである。

砂は豊平川産、比重2.90、吸水率0.65%、粗粒率2.21、単位容積重量1840kg/m³、空隙率36.5%、砂利も同じく豊平川産、大きさ25mm以下で、比重2.55、吸水率1.4%、粗粒率6.47、単位容積重量1722kg/m³、空隙率32.5%のものを使用した。

表-1 セメントの軟練モルタル強度(重量比配合1:2, W/C=65%)

項目	フロー	曲げ強度 (kg/cm ²)			圧縮強度 (kg/cm ²)		
		3日	7日	28日	3日	7日	28日
試験結果	190	8.5	23.9	38.6	21.8	80.0	147
規格		>10	>20	>30	>35	>70	>150

先づ、コンクリート 1m³ 当りのセメント使用量をほぼ一定として、水量を変えた。即ち配合を容積比 1:2:4 (重量比 1:2.45:4.58) とし、水セメント比を 50%、60% 及び 70% の 3種に変えて試験した。夫々の場合のスラブ、1m² 当りの水量、セメント量等は表-2の通りである。

次に水の量を 1m³ 当り 168l (スラブ約 7cm) とし、細粗骨材比を容積比で 1:2 として、セメント使用量を 1m³ 当り 200, 250, 300, 350 及び 400kg に変えて試験した。各々の場合の配合及び水セメント比は表-3の如くである。表-3にスラブの値も記したが、セメント使用量 250~350 kg/m³ の範囲に於てはほぼ一定のスラブを得た。

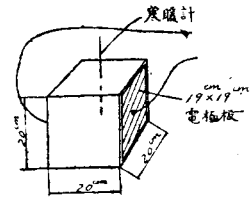
表-2 容積比配合 1:2:4, 水セメント比を異にせる場合の水量, セメント量及びスラブ

配合 (容積比)	水セメント比 (%)	1m ³ 当り水量 (l)	1m ³ 当りセメント量 (kg)	スラブ (cm)
1:2:4	50	144	288	1.0
	60	168	280	7.0
	70	191	274	17.3

表-3 使用水量 168l/m³, セメント使用量を異にする場合の配合, 水セメント比及びスラブ

1m ³ 当り水量 (l)	1m ³ 当りセメント量 (kg)	配合		水セメント比 (%)	スラブ (cm)
		容積比	重量比		
168	200	1:2.90:5.79	1:3.56:6.66	84	2.4
	250	1:2.28:4.55	1:2.79:5.22	67.3	7.1
	300	1;1.86:3.70	1:2.28:4.25	56	7.5,6
	350	1:1.56:3.11	1;1.91:3.57	48	6
	400	1;1.33:2.65	1:1.63:3.05	42	2.5

図-1 試験方法



試験には 図-1 の如き内法寸法 20×20×20cm の木製型枠を使用し両側面全面に亜鉛鍍薄鉄板の電極板を当てた。この中にコンクリートを充填し、直ちに通電したが、電源は 100V 交流で、スライダックを用ひてコンクリート温度上昇速度が毎時 5°C となる様に、又最高温度が約 50°C を越えぬ様に電圧を調節した。30 分間隔に電圧、電流、気温及びコンクリートの温度を記録した。尚、上面からの水の蒸発を防ぐため防水紙で被覆した。

〔3〕結果及び考察

(1) 配合一定 (容積比 1:2:4) として水セメント比を変えた場合の電気抵抗

測定結果は図-2の通りである。水セメント比が異ると明らかに電流が異り、温度状態が異つてゐる。即ち水セメント比の大なるものほど、換言すればセメント糊の濃度のうすいものほど伝導度が大で、温度の上り方が早く、50%と70%とでは最大約 10°C の温度の開きを示してゐる。

今、抵抗 $R = \rho \frac{L}{A}$ (ρ は比抵抗, L は長さ, A は断面積) より比抵抗 ρ を求めて図示すれば図-3の如くなる。

抵抗は時間と共に減少し、最小値に達すると再び増大する。当初の減少は温度の上昇に因るものであり、その後の増大はセメントの凝結及び硬化によるものである。温度上昇に伴ふ抵抗の減少はほぼ直線的となる筈であるが、50% 及び 60% のものでは

図-2 配合一定, 水セメント比を異にせる場合の測定結果

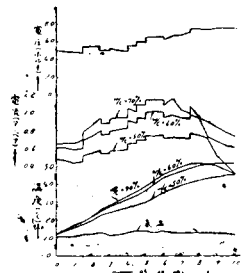
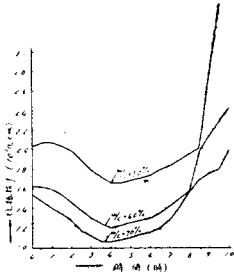


図-3 配合一定、水セメント比を異にする時の比抵抗の差異

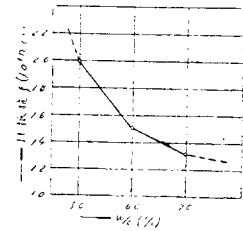


最初曲線を示して、その後直線となつてゐる。これは打込みの順序が70%,60%,50%の順であつて、50%を打込んで直ちに通電を開始したことから考へて、打込み直後の電極板に沿つての気泡の上昇に因るものと考えられる。この現象は常に起つた。又後期に於ける抵抗の不規則な増大は、コンクリートの収縮のため電極板との間の移行抵抗が増したためであると考えられる。

今コンクリートの温度 20°C の場合、水セメント比と比抵抗との関係を求めると図-4 の如くなる。W/C=60% の場合と比較して W/C=50% では 32% 増し、W/C=70% では 12.5% 減となつてゐる。

図-4 より見て、この場合は W/C=50% 以下の時の抵抗は急激に増大し、W/C=70% 以上の時の抵抗

図-4 温度20°Cのときの水セメント比と比抵抗との関係



の減少は小さいものと推察される。

(2) 1m³当りの水量を一定(168l)としてセメント使用量を変えた場合の電気抵抗測定結果は 図-5a 及び 5b の通りである。測定の都合上2回に分けて試験したのである。

図-5a 水量一定、セメント使用量200,250,300kg/m³の場合の測定結果

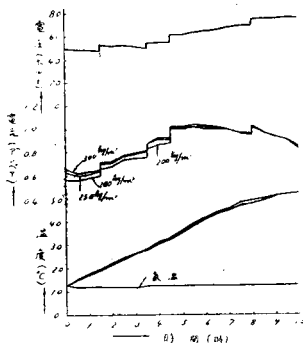
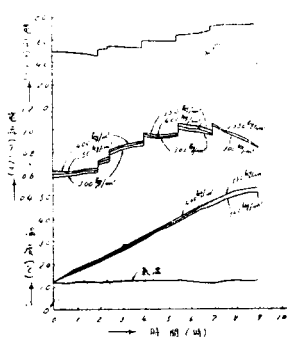


図-5b 水量一定、セメント使用量300,350,400kg/m³の場合の測定結果



セメント使用量の多いものは少いものより幾分か伝導度が大なる傾向を示してゐるが、温度状態に於ては殆んど差がない。即ち、1m³中の水量一定であれば、セメント使用量が変わつても、伝導度は多少変わるが温度状態に影響を与へるほどの相異はないことが分る。これは、水量一定としてセメント量を増せばセメント糊の濃度は濃くなるが、セメント糊の骨材に対する割合が大となつて、この相反する影響が互に相殺されるためである。

前と同様に、夫々の場合の比抵抗 ρ を求めると 図-6a 及び 6b の如くなる。

図-6a 水量一定、セメント使用量200,250,300kg/m³の時の比抵抗の差異

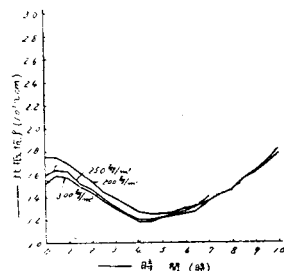
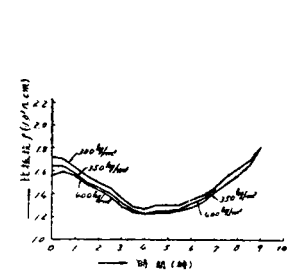


図-6b 水量一定、セメント使用量300,350,400kg/m³の時の比抵抗の差異



この場合、比抵抗の大体の値は、通電開始時温度約 12°C に於て 1.6~1.8×10⁸Ωcm 温度の上昇に伴ひ漸次減少し最小値 1.2~1.3×10⁸Ωcm を示し、その後再び増大してゐる。

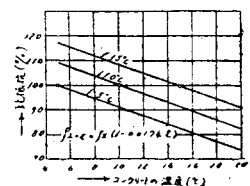
(3) フレッシュコンクリートの温度と電気抵抗との関係、

図-3、図-6a 及び 6b より、最小抵抗を示すまでの間の直線部分について、温度と抵抗との関係をプロットすると何れも大体同じ傾斜をもつ直線となる。今これを直

線と仮定して、ある温度 $x^{\circ}\text{C}$ に於ける比抵抗 ρ_x が、温度 $t^{\circ}\text{C}$ の上昇によつて ρ_{x+t} となるものとすれば、この関係は $\rho_{x+t} = \rho_x(1 + \alpha t)$ で表わされる。実験値より α を求めると $\alpha = -0.0174$ となる。即ち温度と比抵抗との関係は $\rho_{x+t} = \rho_x(1 - 0.0174t)$ となつた。

5°C、10°C 及び 15°C の夫との場合の比抵抗を 100 としてこの関係を図示すれば 図-7 の如くなる。これは通電による温度上昇に伴ふ比抵抗の減少割合を示したものであるが、これはコンクリートの練上り温度と比抵抗との関係を考へてもよいわけである。温度 10°C の変化に対して比抵抗は 7.4% 増減する。

図-7 温度と電気抵抗との関係



〔4〕 結論

1. フレッシュコンクリートの電気抵抗は、配合を一定とするとき水セメント比によつて著しく異なる。水セメント比大なるほど即ちセメント糊の濃度のうすいものほど電気抵抗は小である。
2. フレッシュコンクリートの電気抵抗は $1m^3$ 当りの使用水量を一定（即ちスランプを一定）とすればセメント使用量によつて大きな相異はない。セメント使用量大となると幾分抵抗が減ずる傾向はあるが、温度状態に影響を与えるほどの相異はない。
3. この実験では温度上昇速度を $5^{\circ}C/hr$ に調節し最高温度を $50^{\circ}C$ に抑えたのであるが、 $1m^3$ 当りの水量 $1.68l$ （スランプ約 $7cm$ ）のコンクリートの比抵抗の大体の値は、通電開始時温度約 $12^{\circ}C$ で $1.6\sim 1.8 \times 10^3 \Omega cm$ 、温度の上昇に伴ひ漸次減少し最小値 $1.2\sim 1.3 \times 10^3 \Omega cm$ を示した。
4. この実験の範囲から、コンクリートの温度と比抵抗との関係を求めると、次の式が得られた。

$$\rho_{x+t} = \rho_x(1 - 0.0174t)$$

但し ρ_x = 或る温度 $x^{\circ}C$ に於ける比抵抗

ρ_{x+t} = 温度が $t^{\circ}C$ 上昇した時比抵抗

5. 水セメント比の同じモルタルの電気抵抗とは比較して、コンクリートの電気抵抗は約2倍である（本文省略）。

III. 温度上昇速度及び温度上昇限界がコンクリートの強度に及ぼす影響に関する試験

〔1〕 目的

普通養生のコンクリートでは、養生温度 $4\sim 35^{\circ}C$ の範囲に於ては、養生温度の高いものほど総ての材齢に於ける圧縮強度が大であることは一般に認められてゐる。 $35^{\circ}C$ 以上の高温は早期強度を高めこれをうまく利用すれば早硬コンクリートが得られるが、後期の強度に悪影響を及ぼすことがある。

電気養生法に於ては、電極の配置によつては $35^{\circ}C$ 以上の温度は極めて容易に得られ、又電極附近は局部的に非常に高温となる危険があるのであつて、この試験は強度の点より温度上昇は最高何度まで許容出来るか、又温度の上昇速度（電気養生法では一定温度に達するまで温度が徐々に上昇するのであつて、この速度の問題は電気養生法に独特な問題である）は毎時何度位にするのが適当であるか等を明らかにせんとしたのである。

前掲 Réthy の報告によれば「コンクリートの温度が $50^{\circ}C$ に達するまで毎時約 $5\sim 6^{\circ}C$ の速度で温度を上げ 24 時間まで $50^{\circ}C$ に保つ。その後 $70\sim 75^{\circ}C$ まで高め 36 時間までこの温度を保つのが最も良い温度状態である」とし、又「電気養生を行つたコンクリートの強度は、総ての材齢に於て普通養生コンクリートの強度よりも大である」と云つてゐるが、この試験はこれらの点をも確かめんとしたのである。

〔2〕 方法

試験は2回行つた。第1回試験は上昇速度及び上早限界と強度について、第2回試験は上昇速度と強度について第1回を補足して行つたものである。

使用材料は第1回と第2回とで異り、諸性質は表-4~6、図-8及び9に示す通りである。

コンクリートの配合は容積比 $1:2:4$ （重量比では第1回 $1:2.07:4.54$ 、第2回 $1:2.29:4.65$ となる）とし、水セメント比はスランプ $7cm$ となる様に第1回では 65.6% 、第2回では 65% とした。

供試体の大きさは $10 \times 10 \times 10cm$ の立方体で、型枠は木製のものを使用した。

第1回試験に於ては、電気養生を行はず初めから $16\sim 23^{\circ}C$ の水中で養生したもの（これを普通養生コンクリートと呼ぶことにする）と、24時間電気を通して養生しその後常温の水中で養生したもの（電気養生コンクリート）との材齢 28 日までの圧縮強度を比較した。

表-4 セメントの性質（普通ポルトランドセメント）

試験項目	比重	凝 結					膨 脹 ひびわれ	軟 練 モ ル タ ル 強 度					
		水量 (%)	室温 ($^{\circ}C$)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)	フ ロー		曲げ強度(kg/cm ²)			圧縮強度(kg/cm ²)		
								3日	7日	28日	3日	7日	28日
第1回試験に使用のもの	3.11	30.7	15~20	4-17	10-35	完全	183	15.8	30.5	46.9	49.7	121	209
第2回試験に使用のもの	3.12	29.3	13~20	2-27	7-35	完全	187	20.3	32.1	46.8	63.7	128	193
規 格	>3.05			>1-00	<10-00	完全		>10	>20	>30	>35	>70	>150

表-5 砂の性質

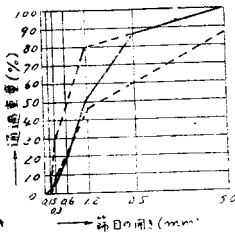
試験項目	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	空隙率 (%)	有機不純物	粗粒率
第1回試験に使用のもの	2.48	4.06	1 550	37.6	標準色程度	3.33
第2回試験に使用のもの	2.52	3.71	1 720	31.7	標準色以下	3.24

表-6 砂利の性質

試験項目	大小	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/cm ³)	空隙率 (%)	粗粒率
第1回試験に使用のもの	25mm以下	2.60	1.9	1 704	34.5	6.60
第2回試験に使用のもの	25mm以下	2.60	1.54	1 740	33.1	6.48

図-8 砂の粒度

(a)第1回試験に使用のもの



(b)第2回試験に使用のもの

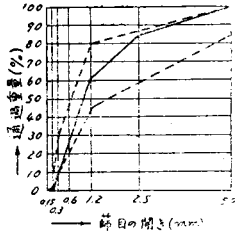
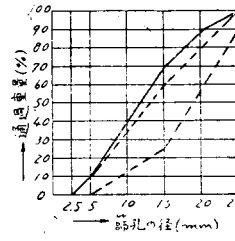
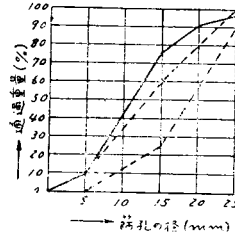


図-9 砂利の粒度

(a)第1回試験に使用のもの



(b)第2回試験に使用のもの



電極板は 10cm×10cm の薄鉄板で型枠の相対する面に釘付けし、これを両極としてコンクリートに通電した(図-10)。通電の際コンクリート上面からの水分の蒸発を防ぐため、タール紙を被せた。

電源は 100V 交流を使用し、スライダックで電圧調整を行って、コンクリートの温度上昇速度を 5°C/hr, 10°C/hr 等に調節し、又温度上昇限界を 40°C, 50°C, 60°C, 70°C 等に調節した(図-11)。この様な高温は一般に好ましいものではないが、上昇限界を見出すために 40°C 以上について試験したのである。

実験室の室温は 8~15°C 特に 10~15°C のことが多く、コンクリートの練上り温度も 10~15°C のものが多かった。供試体の温度は各材齢のものにつき 1ヶ宛、棒状寒暖計を中心に埋込んで測定した。

試験の材齢は普通養生のものは 1日, 3日, 7日及び 28日とし、電気養生のものは 12時間, 1日, 7日, 28日とした。各材齢毎に 3ヶ, 計 12ヶの供試体を並列につないで同時に製作した。通電時間は総て 24時間であるが、電流を切った後型枠を外し空气中で徐々に冷却させ、養生水温とほぼ同じ温度になつてから水槽中に入れ、試験日まで水中養生を行つた。

圧縮試験の際の加圧面は、電極板に接しない両側面を上下にして加圧した。

第2回試験も要領は全く同じであるが、最高温度を 40°C に抑え、上昇速度を 30°C/hr, 20°C/hr, 15°C/hr, 10°C/hr 及び 5°C/hr に変へて、材齢 1日, 3日, 7日及び 28日の圧縮強度を比較した。通電時間は 24時間であり、その後は水中養生である。

〔3〕 結果及び考察

(1) 第1回試験の結果

電気養生を行はないう普通養生コンクリートの圧縮強度試験の結果は表-7の通りである。

次に電気養生コンクリートについて

表-7 普通養生コンクリートの強度(養生水温 16~23°C)

配合(容積比)	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (kg/cm ²)			
			1日	3日	7日	28日
1:2:4	65.6	7	4.0	20.2	52.1	98.4

図-10 圧縮強度試験供試体型枠

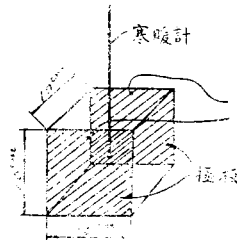
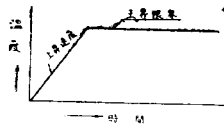


図-11 コンクリートの強度状態



の結果を述べる前に各々の温度状態のものについて簡単な説明を加える。

1. 100V-放置

電圧を調節することなく 100V 交流を通したまま 24 時間放置したものである。通電開始の際のコンクリートの温度は 8°C, 通電 2 時間で最高温度 91~93.5°C に達し, その後温度は徐々に下り 8 時間で 50~53°C, 16 時間で約 30°C, 24 時間で約 17°C となった。

2. 100V-40°C

最初は電圧を調節することなく 100V 交流を通し, 温度が 40°C に達した後は電圧を調節して 40°C を保つ様にしたものである。通電開始時の温度 11°C, 17 分で約 40°C に達し, その後徐々に電圧調節を行ひつゝ, ほぼ 40°C に保つた。

3. 10°C/hr-40°C

最初から電圧を調節して 10°C/hr の速度で 40°C まで上昇させ, それ以後 40°C に保つたものである。通電開始時の温度 11°C, 約 3 時間で 40°C に達せしめた。

4. 100V-50°C

初めの温度 15°C, 25 分で約 50°C に達した。

5. 10°C/hr-50°C

初めの温度 15°C である。

6. 5°C/hr-50°C

最初から電圧を調節して 5°C/hr の速度で 50°C まで上げ, その後 50°C に保つたものである。初めの温度 14°C である。

7. 100V-60°C

初めの温度 10°C, 40 分で約 60°C に達し, その後ほぼ 60°C に保つた。

8. 10°C/hr-60°C

初めの温度 11.5°C である。

9. 10°C/hr-70°C

初めの温度 14°C である。

10. 5°C/hr-70°C

初めの温度 12°C である。

以上 10 種類の場合について圧縮強度試験を行つたのであるが, その結果は表-8 の通りである。強度は供試体 3 ケの平均値である。

表-8 電気養生コンクリートの強度 (配合容積比1:2:4, W/C=65.6%, スランプ 7cm, 24時間通電, その後 16~23°C の水中養生)

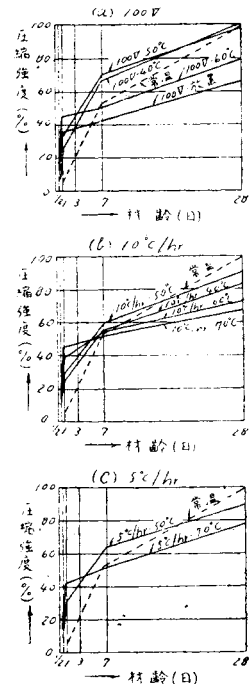
試験番号	温度状態	圧縮強度 (kg/cm ²)			
		12 時時	1 日	7 日	28 日
1	100V-放置	35.2	35.5	41.9	61.8
2	100V-40°C	11.5	24.8	64.8	99.3
3	10°C/hr-40°C	10.3	23.6	54.2	82.7
4	100V-50°C	17.2	32.3	68.8	97.9
5	10°C/hr-50°C	12.9	28.8	58.1	90.0
6	5°C/hr-50°C	9.1	30.4	61.5	88.6
7	100V-60°C	20.5	44.5	50.6	78.7
8	10°C/hr-60°C	16.7	38.5	53.5	72.3
9	10°C/hr-70°C	23.0	44.7	51.5	67.1
10	5°C/hr-70°C	13.7	41.5	51.0	76.9

今普通養生コンクリートの材齢 28 日の強度を 100 として, 温度上昇速度別に強度を比較すれば, 図-12 の如くである。

図-12 より温度上昇の限界について考察を加へる時は次の様になる。

60°C, 70°C 及び 100V- 放置 (最高 92°C に達す) のものは, 温度上昇速

図-12 圧縮強度の比較 (普通養生材齢 28 日の強度を 100 とす)



度に関せず 50°C 及び 40°C のものと比較して初期の強度は大であるが材齢 7 日及び 28 日の強度は低くなつてゐる。又 50°C と 40°C とを比較する時は、大体に於て 50°C の方が強度が大である。

50°C と常温の普通養生のものとを比較するときは 7 日までの強度は 50°C の方が何れも大となつており、28 日の強度は 100V で急速に温度を上げたものはほぼ同じ位の強度が出てゐるが、10°C/hr 及び 5°C/hr の速度で温度を上げたものは 50°C の方が常温よりも約 1 割強度が低くなつてゐる。この原因としては、高温の影響後に述べる温度上昇速度の影響、水分の蒸発の影響等が考へられる。

28 日の強度が普通養生のものよりも多少とも小であることは好ましくないことであるが、電氣養生施工に於ては電極附近の温度が他の部分に比して相当高くなることは避けがたいことであり、又一方寒中コンクリート工事では経済的な見地から終局の強度に僅かの犠牲を忍んでも早期強度を高めたことがある。勿論コンクリートの品質の点から云へば 35°C 以上の高温とすることは好ましいことではなく、それ以下の温度で永く養生した方が良いのであるが、上述の考慮を入れる時は、温度上昇の限界は最高 50°C であると結論される。但しこれは通電時間 24 時間の場合に対する最高温度である。

5°C/hr-50°C の時の早期強度を常温養生のものと比較してみると、大体に於て 1 日で常温の時の 4 日の強度を出してゐる。又材齢 7 日の強度は常温よりも約 2 割大となつてゐる。

次に温度限界 50°C 及び 40°C の場合について、温度上昇速度による強度の相異を比較するときは 図-13 の如くである。図-13 より、温度上昇速度と強度との関係について考察を加へる時は次の様になる。

100V-50°C 或は 100V-40°C の如く、温度上昇速度が非常に速い場合は 10°C/hr 又は 5°C/hr の速度で徐々に上昇させた場合に比し、各材齢に於ける強度が高くなつてゐる。これは凝結が始まる前に温度が 50°C 又は 40°C に上つて、水和が最も活潑に営まれる間の温度変化がないためであると考えられるのであつて、結局この場合はコンクリートの練上り温度を 50°C 又は 40°C に高めたのと同じことになる。

10°C/hr 又は 5°C/hr の時は、セメントの水和が最も活潑に行はれてゐる最中に温度が上昇して行くことになり、その結果強度の低下を来すのであろう。

この点に関して更に明らかな結論を得るため第 2 回試験を行つたのである。

(2) 第 2 回試験の結果

温度上昇限界を 40°C とし、上昇速度をいろいろ変えて強度の比較試験を行つた結果は 表-9 及び 図-14 の如くである。

表-9 温度上昇速度と圧縮強度 (配合容積比 1:2:4, W/C=65%
温度限界 40°C, 24 時間通電, その後 20°C の水中養生)

温度上昇速度 (°C/hr)	通電開始時 温度 (°C)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)			
		1 日	3 日	7 日	28 日
5	11.1	41.1	69.0	103	128
10	10.9	43.5	67.0	102	137
15	15.2	42.5	69.6	101	159
20	13.6	45.4	68.0	107	156
30	11.5	46.4	71.5	106	160

図-14 を見るに、初期に於ては傾向は明らかでないが、材齢が進むにつれて明らかな傾向を示し、速度 15°C/hr 以上のものが強く、材齢 28 日に於て 10°C/hr 或は 5°C/hr のものは夫と約 15% 及び約 20% 強度が小となつてゐる。即ち速い速度で温度を上げたものの方が強度が大きく、第 1 回試験に於けると同様な傾向を示してゐる。

この原因を究明するために、図-15 に電氣抵抗の時間的变化と各速度で 40°C に達するまでに要した時間をとつて比較してみる。コンクリート中に於けるセメント糊の凝結の状態を直接測定する適当な方法がないが、電氣抵抗が温度と共に直線的に変化する間は凝結が始つてゐないものと考へられる。この様な考へから 図-15 を見ると、速度 15°C/hr 以上のものは凝結開始前に最高温度 40°C に達してゐるが、速度 5°C/hr 及び 10°C/hr のものは凝結初期に温度変化があつたことが判る。即ちこのセメントの水和が最も活潑に行はれてゐる最中の温度変

図-13 温度上昇速度による強度の相異 (普通養生材齢 28 日の強度を 100 とす)

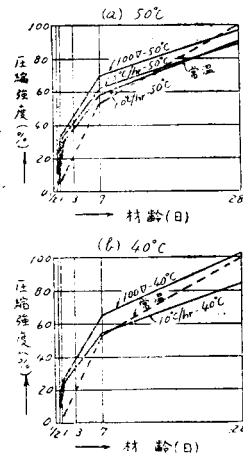
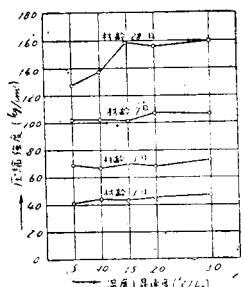


図-14 温度上昇速度と各材齢に於ける強度との関係



化が強度低下を来した原因であると推察出来るのである。

この様に、急速に温度を上げて後は一定温度に抑えた方がよいのであるが、実際問題として電圧を自由に調節し得る装置を有しない限り、これは困難であり、最も普通の電極配置では 5°C/hr 或はそれ以下の速度で温度が上がる事が普通であつてこの緩慢な温度上昇が多少の強度低下を来すことはまぬがれない。

〔4〕 結論

1. 温度上昇の限界は 50°C である。但しこれは通電時間 24 時間の場合に対する最高温度である。試験は 24 時間通電の場合のみに止めたので、Réthy の「24 時間まで 50°C、その後 36 時間まで 70~75°C」に対する検討は加へられない。

勿論この限界は、温度の最も高くなる箇所(普通の電極配置では電極附近)の温度限界である。

2. 温度上昇速度については、凝結開始前には急速に温度を上げたものの方が強度が大で、緩慢な温度上昇は強度を低下させる。この原因は、凝結中に於ける温度変化によるものと考えられる。

しかし実際問題として、急速に温度を上げて後、一定温度に保つ操作は困難であり、最も普通の電極配置では 5°C/hr 或はそれ以下の速度で温度が上昇するのが普通であつて、この緩慢な温度上昇が多少の強度低下を来すことはまぬがれない。

3. Réthy の云ふ「電気養生コンクリートの強度は、総ての材齢に於て普通養生コンクリートの強度より大である」ことに対しては、24時間通電のみ行うため明確な検討は加へられないが、この実験の結果から見ると必ずしもそうであるとは云へない。

IV. 温度と通電時間に関する試験

〔1〕 目的

通電は、コンクリートが凍結によつて害を受けない強さに達するまでに行はなければならないのが原則であるから、通電時間は温度状態によつて異なるべき筈である。

この試験は種々の温度状態に対する所要の通電時間を求めんがため行つたものである。

〔2〕 方法

試験に使用した材料、コンクリートの配合、水セメント比等は、Ⅲの第2回試験に於けると全く同じである。温度上昇速度は凡て 5°C/hr とし、最高温度を 10°C、20°C、30°C、40°C 及び 50°C の5種とし、通電時間は 10°C の場合 72 時間、20°C の場合 48 時間、その他では 24 時間として、通電終了後は水中養生を行ひ、材齢 1 日、2 日、3 日及び 7 日の圧縮強度を試験し、凍害を受けない強さに達するまでの時間を求めた。

〔3〕 結果及び考察

試験の結果は表-20 及び 図-16 の如くである。

表-10 温度上昇限界及び通電時間と圧縮強度(配合容積比 1:2:4, W/C=65%
温度上昇速度 5°C/hr, 通電終了後は 20°C 水中養生)

温度上昇限界 (°C)	通電開始時温度 (°C)	通電時間	圧縮強度 (kg/cm ²)			
			1日	2日	3日	7日
10	6.0	72時間	3.9	—	30.4	96.3
20	6.2	24時間	8.7	25.8	—	95.8
30	12.8	"	24.3	—	56.7	100
40	11.1	"	41.1	—	69.0	103
50	10.1	"	45.5	—	74.7	105

20°C の場合は 48 時間通電の予定であつたが、停電のため 24 時間通電で試験した。

コンクリートが凍害を受けない強さは、材料、配合、水量等によつて異なるが大体 50kg/cm² である。電気養生の場合には通電終了後少くとも 3 日以上型枠を外さないのが普通であるから、この間に於ける強度増加を考へて、大体 40kg/cm² の強度を得るに要する通電時間を 図-16 から求めてみると表-11 の通りになる。勿論表-11 の通電時間は、材料、配合、水量等によつ

図-15 電気抵抗の時間的変化

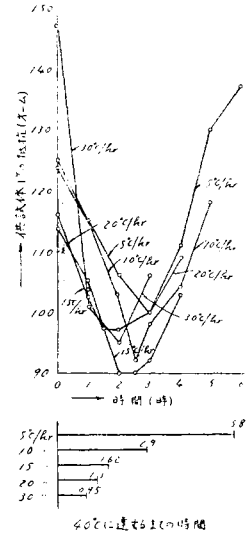
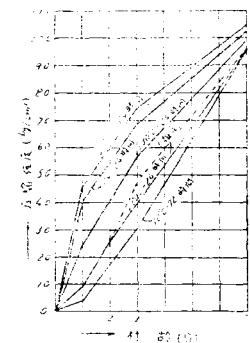


図-16 温度状態及び通電時間と強度



て異なるものであつて、大体の標準を示すものである。

〔4〕 結論

通電時間は、材料、配合及び水量、コンクリートの強度状態、気温等を考慮して定めるべきであるが、この試験より得られた大体の標準は前掲 表-11 の通りである。

実際問題として普通の電極配置では、電極附近の最高温度を 50°C 以下とすれば、電極から離れた所では 30°C 位になるから、多くの場合通電時間は 2 日間以上としなければならぬ。

V. 結 言

本報に於ては主として材料学的な問題に関する試験の結果を報告したのであるが、電気養生施工に関しては尙ほ、電気養生コンクリートの長期強度、耐久性、各種構造物に於ける電極配置の問題、これに関連してコンクリート内部の電流密度並びに温度分布、電極附近のコンクリートの温度、所要電力、鉄筋コンクリートの場合の鉄筋の影響及び鉄筋とコンクリートの附着力の問題、従来の方法との経済上の比較等多くの研究事項があり、これらのうち一部実験を終つたものもあるが引続き実験中であつて、これらに関しては追つて報告する積りである。

表-11 最高温度と通電時間

最高温度	通電時間
50°C	} 1 日
40°C	
30°C	2 日
20°C	3 日
10°C	3.5日

木材の曲げ破損法則に就て

正 員 工 博 金 俊 三*

ON LAWS OF FLEXURAL RUPTURE OF WOOD

Dr. Eng., Toshiizo Kon, C. E. Member

Synopsis; Through the experiment the bending failure mechanism was made clear of the materials with such low shearing strength as that of wood.

In this paper are stated results of investigations for

- i) a law covering the relations between bending failure co-efficient and its affecting factor, that is, load and span height ratio,
- ii) limits to span height ratio which determines normal stress distribution and characteristics of shearing failure, in cases of some principal loads, and further stated the author's view of his theory of bending failure with reference to ordinary designing.

要旨 本研究は木材の如き 剪断強の極めて低い 材料の曲げ破損の機構を明かにし、曲げ破損係数とその影響因子たる 荷重と スパン-厚さ比との間に存する法則を究明したものである。垂直応力分布と剪断破損の性質を決定するスパン-厚さ比の諸限界に就ても、重要な 2, 3 の荷重の場合に亘て論証した。最後にこの破損理論の現行の設計方法に対する立場について著者の所感を述べた。

目 次

諸 言

I 塑性域の剪断応力

- 1. 塑性域における諸関係
- 2. 塑性域における剪断応力
- 3. 塑性域における絶対最大剪断応力の一般条件

II 局部的に分布された等布荷重の場合の塑性域絶対最大剪断応力とその断面位置

III 塑性域剪断曲げ破損の場合の曲げ破損係数

IV 弾性域剪断曲げ破損の場合の曲げ破損係数

V 曲げ破損係数のスパン-厚さ比の諸限界

- 1. 引張強が主因となる曲げ破損係数
- 2. 局部的に分布された等布荷重の場合(垂直応力分布に関する限界, 第1限界)

* 北海道大学教授