

寒地におけるコンクリート (II)

横 道 英 雄*

5. コンクリートの凍害現象

1. 概 説

新しく打たれたコンクリートが低温にさらされると、水和熱の発生にもかかわらずコンクリートの温度は低下し、凝結および硬化の速度は遅滞する。Rastrup氏¹⁸⁾によれば、一般に養生温度の減少 10°C につき水和作用の速度は 1/2 となる。従つて養生温度 10°C, 0°C では、標準温度 20°C のときのそれぞれ 2 倍、4 倍の時間を要することとなる。-3°C になるとコンクリートは凍結を始め、凍結したものは水和作用を停止する。

凝結中に凍結したコンクリートは、これを融解して適当に締固めを行えば強度はほとんど回復する。しかし凝結後期ないし硬化初期に凍結したものは、これを融解しても強度の回復はいちじるしく低下する。

高橋氏の実験報告¹⁹⁾によれば、凍結気温時に打つたコンクリート試験舗装を特別の養生をしないで放置し、冬期間中は除雪をして直接空気にさらしたものを夏季に掘り起してその凍害状況を観察した結果は 図-7 のごとくであつた。A は表面数 cm の間に発生し、組織は全く破壊され使用に耐えぬ部分

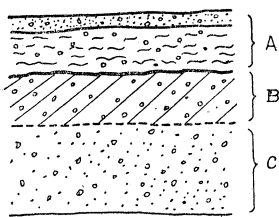


図-7

である。その表面は打設後まもなく凍結したまま気乾によつて粒状化し、あたかも切込み砂利のように素材に還元したものとコンクリートの小塊から成つている。A 部内の

下層部は無数の水平キレツを含む被害層で、B との境界には明らかに全面にわたる水平キレツ層があり、これによつて両者は容易に分割される。このような明瞭な全面的水平キレツは、A 部内の中間にも発生することがあり、これによつて A 自身も二層に分割される。また A 層中の骨材はモルタルとの密着不十分で容易に抜取ることができ、骨材の表面はレータンスのごとき薄層が付着しており、キレツはこのような粗骨材を連絡して発達している。凍結期間中に観察すると、この砂利の表面および水平キレツの下面には微細な霜柱の発生しているのが見られる。これは明らかに地盤の凍上現象と類似のもので、

とくに骨材表面の霜柱は水源不足のため骨材自身の含有水が吸い出されて凍結したとも考えられる。試験採取のためコンクリートをタガネで破壊するとき、A 部は容易に打込まれて破壊し、また注水すれば容易に浸透して B 部または無被害部との色調を異にするので判別しうる。

B 部は A に接した被害部分で、一見無被害部 C との区別が困難で肉眼的には組織の差異も認めがたいが、タガネの打込みは C より容易であり、また注水による透水性にも差がある。この B は A 部の保護によつて凍結の時期が遅れ、硬化初期もしくはそれ以後になつて凍結温度に達したもので、強度進行の遅滞、自由水の凍結膨脹による間ゲキの増大などのために被害を受けたものと見られるが、表面処理を適当に施せば、実用に供しうるものが多く、材令とともに強度も増加する傾向を有する。一般に B と C との境界は判定困難で、ときには B を欠くこともある。また高橋氏は単位セメント量 180~380 kg/m³, w/c=0.8~0.32 の、種々の配合のコンクリートブロック 10 cm³ のものを製作後ただちに 5 段重ねて戸外におき、側方および下方を断熱的にして放置し、寒気は上面からのみ侵入するようにしたものを観察した結果、1 段目のブロックは前記の A および B と同様の被害を受け、2 段目は被害軽微の B と C、3 段目以下は C すなわち無被害であつた。そして 90 日経過後水中養生をしたものは材令 365 日での圧縮強度の比は 1 段目 47~61%, 2 段目 85~90%, 3 段目以下 100% であつた。これによれば、凍結したコンクリートも融解して養生すれば、その被害の程度に応じて強度の増進を見ることがわかる。

2. コンクリートの凍害理論

コンクリートの凍結現象は高橋、Powers²⁰⁾, Nerenst²¹⁾ら諸氏の研究によれば、土の凍上現象とほぼ類似のものである。コンクリート中のセメントペーストは、水和作用によつて漸次セメントゲルをつくるが、このゲル中の水は、ゲル内の間ゲキが 20~40×10⁻⁸cm という微細であるため、-30°C でその 1/2、-78°C でようやく全部が凍結するほどに非凍結性のものである。従つてコンクリートの凍害は未化合間ゲキ水の凍結によつて生ずる。もし間ゲキ水が氷結すると、近くの毛細管水が氷へ移動してきてつぎつぎに氷結する。通常のコンクリートの組成は凍上性の土質と同様に 0.02 mm 以下の有害量を含んでいるから、土の凍上現象と同様のことが行われる。もし何かの事情で毛細管水の移動が行われなときは氷層の生成は阻止され、骨材の表面とペーストとの間や毛細管内に針状の霜柱が発生する。融解するとこれらの水層や霜柱は空ゲキとなつて残る。そして水和作用が進みセメントペーストの引張強度が、氷層の生成による圧力に耐えるようになったとき、または未化合水の減少するにともなつて凍上現象は停止する。若令コンクリートでは十分な未凍結水があるかぎり水和作用が続き、強度の増

* 正員 工博 北海道大学教授, 工学部土木工学科

進をみるが、凍結水は容積を増加するので、凍結の進行とともに未凍結水はコンクリートの内方へ押しやられる。このため水圧が増加し、ついには組織を破壊する。Powers 氏に²²⁾よれば凍結による内部の圧力は

$$P = a \left(1.09 - \frac{1}{s} \right) \frac{uR}{K} \left(\frac{L^3}{r_b} + \frac{3L^2}{2} \right) \text{ dynes/cm}^2 \dots \dots (4)$$

- a : 水の粘性などによる常数 (g/cm・sec)
- s : セメントペーストの飽和度 = 未化合水 / (未化合水 + 空気容積)
- u : 1°C 低下により氷結する水の量 (セメント 1g 当り) g/g°C
- R : 冷却速度 (°C/sec) K : 透水性 (cm²)
- r_b : 気泡の平均半径 (cm) L : 気泡の間隔係数 (cm)

で表わされる。これによれば、まず飽和度 s が限界値約 90% 以内のときは凍結融解をくり返しても破壊を生ずることはない。またもし凍結しうる水がコンクリートの容積の 10% とすれば、凍結によつて $0.09 \times 10 = 0.9\%$ の容積増加を生ずるが、この場合もし 2% の空気があればその圧力を 1 kg/cm² に止めることができ、若令コンクリートの引張強度でも抵抗しうることになる。次に透水性 K は凍結時期によつて変化し、水和作用の進むにつれて小さくなり、また凍結部分は非凍結部よりも小さくなるので、凍結圧はこれに従つて大となる。また気泡の間隔の小さいほど凍結圧はいちじるしく小さくなるので、AE コンクリートはこの点でも有利である。

6. コンクリートの凍害抵抗と対策

1. 概説

コンクリートの凍害を防止するには、

(1) コンクリートの材料・配合を適当にして凍害に対する抵抗を大にする。とくにセメントペーストの飽和度を小さくするため AE コンクリートは有利である。

(2) 合理的かつ経済的な寒中コンクリート施工法によつて、凍害抵抗に必要な強度をうるまで凍害を受けないようにする。

このうち (1) はセメント、骨材、混和材などの性質およびコンクリートの配合に関係し、(2) は開放時のコンクリート始期強度、寒中コンクリート施工法に関係する。

2. 凍害抵抗に必要な始期強度

新らしく打込まれたコンクリートがどの程度に硬化すれば、その後の寒冷気象によつて凍害を受けないかという事は困難な問題である。

高橋・林氏¹⁷⁾らは非 AE コンクリート (単位セメント量 320 kg, $w/c = 0.53$) につき月を異にして製作した標準供試体について、10°C の湿潤養生日数を調節して始期強度 30, 60, 90, および 120 kg/cm² に達したとき、戸外の寒期に放置して、材令 1 年までの圧縮強度試験をした結果、打込後 1 カ月間の平均養生温度が -2.3°C 以上

の場合は始期強度の影響はほとんど見られず、同じく平均強度が -3.5°C の場合には始期強度 30 kg/cm² のものは寒冷の影響を受けて各材令の強度が低下し、さらに平均温度が -4.2°C では始期強度 60 kg/cm² のものも凍害を受けて低下した。これによれば酷寒期に施工する場合は 90 kg/cm² 以上の始期強度が必要である。そしてこれは空気中においたものであるから、もし水路などのごとく常に水で飽和されている場合には、Voellmy 氏²³⁾によれば 150 kg/cm² の始期強度が必要であるとしており、少なくとも前記試験結果を 50% 増とする必要がある。これに反し AE コンクリートの場合は凍害抵抗が大であるから、いくぶん低い値をとることができる。

3. 凍害抵抗の改善

(1) 材料 セメントの種類は硬化後の凍害抵抗にあまり関係はないが、施工上からいうと、水和熱および早期強度の大きいアルミナセメント、早強セメント、次に普通ポルトランドセメントはこの順序で有利であり、中庸熱セメントおよび高炉セメントは少し不利である。

骨材は、寒中コンクリートでは凝結硬化に悪影響のある有機不純物・どろなどを含まない清浄で耐久性のものであることがとくに必要である。

(2) 混和材 混和材としては AE 材、塩化カルシウムが使用される。凍結点低下その他のために用いる防凍材は不都合な作用があるので一般に使用しないのが適当である。AE 材は最も広く使用されており、各種のものが市販されているが、その使用量の点を除けば、でき上った AE コンクリートの性質はほとんど同じである²⁴⁾。AE 材の性質・効果については省略するが、その大きな作用はペーストの飽和度を小さくして、凍害抵抗を大にすることである。

塩化カルシウムも各社の製品が市販されているが、実験の結果はほとんど差がない²⁵⁾。これを混和すると、凝結時間は使用量の増加とともに早くなり、セメント重量の 1% (以下単に 1% という) を混入したとき始発 1 時間、終結 1.5 時間それぞれ短縮される²⁶⁾。また塩化カルシウムは、同じスランプをうるための単位水量を AE 材の有無にかかわらず混入量 1% につき約 2% 減少させる²⁶⁾。コンクリート強度におよぼす影響としては、混入量 1~2% によりその初期強度を増加し、無混入コンクリートの 3 日強度は 2~1.5 日で得られる (標準養生)²⁶⁾。しかし凍結融解に対する抵抗性は 図-8 および 図-9 のごとく、AE 材の有無にかかわらず比較的初期養生のものでは塩化カルシウムの混入によつて増大するが、養生日数がある数値以上となるとかえつて減退し、無混入のものに劣る傾向を示す。この傾向は比較的低温の養生のものにおいていちじるしい (図-9 (b))。従つて塩化カルシウムは早期強度を増進させるために使用するとしても、耐久性の点からいつてできるだけ少なく用いるのが

図-8 林, 本間の実験

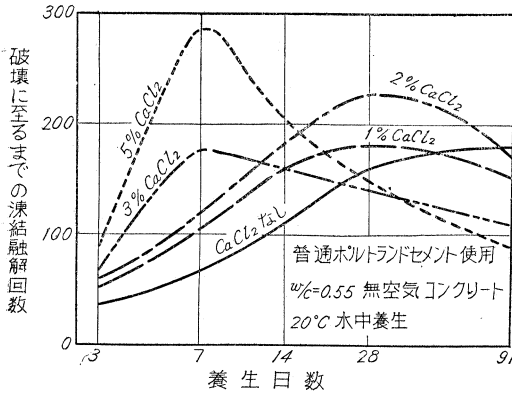
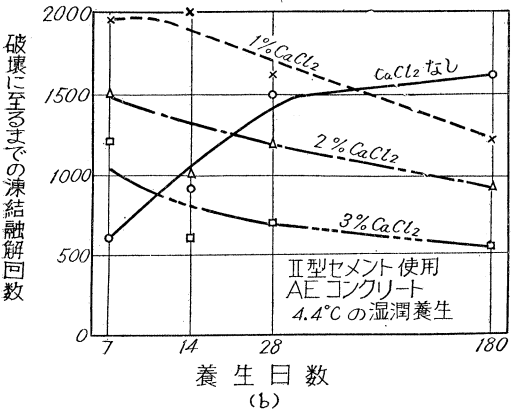
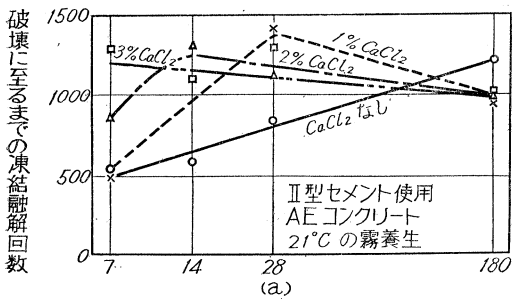


図-9 アメリカの実験



安全である。とくに硫酸塩に対する抵抗を弱めるので泥炭地帯などの構造物には使用すべきではない。また塩化カルシウム使用による鉄筋腐食の疑いについても決定的な結論に到達していない²⁸⁾。わが国の標準示方書では、寒中コンクリートの場合、AEコンクリートに1%の塩化カルシウム混入を認めているが、鉄筋コンクリートおよびダムではその使用に当つては責任技術者の承認を要すると規定しており、無筋コンクリートでも硫酸塩の作用を受ける場合にはこれを禁止している。ソ連では-20°Cの寒中コンクリートに塩化カルシウムおよび塩化ナトリウムの10%溶液を混合水に使用していると報告されているが、水路、道路、PC橋などに使用すべきでないとしている²⁹⁾。なお塩化カルシウムの使用に当つ

ては完全に水に溶解しておくことが大切である。

(3) 配合 常温時コンクリートの場合と同じ注意をするほかに、寒中コンクリートにおいては、単位水量をできるだけ少なくすること、および単位セメント量を少し増加することが必要である。フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの凍害は未水和水の凍結によるものであるから、単位水量を少なくすることは凍害抵抗を増加する。また単位セメント量が増加すると発熱量が増加するので、養生期間中に凍害を受けるおそれを少なくすることに効果があり、発熱量の多いセメントを使用すれば硬化速度が大であるのでさらに有利である。また水セメント比の小さいものほど、硬化したコンクリートの凍害その他に関する耐久性を増加する。耐久性をもとにして水セメント比の標準値についてはコンクリート標準示方書に示されているので省略する。

7. 寒中コンクリート

1. 総説

(1) 目的 寒中コンクリートとは施工方法の宜しきを得ない場合、凍害を受けるおそれのある低温時に施工するコンクリートのことである。その目的は a) 適当な養生をすることによつて、冬期の低温、凍結および融解などがコンクリートの凝結、硬化におよぼす悪影響すなわち凍害現象の発生するのを防ぎ、b) コンクリートの強度が十分でないうち、大きな急激な温度変化を与えないようにして、ひびわれその他の悪影響の発生を防ぎ、c) これによつてコンクリートの硬化を支障なく進行させて所要の強度に達せしめ、開放後は長期にわたつて凍害を受けず、常温時施工のコンクリートに劣らない品質のものを得て、d) 冬期施工を可能にすることによつて工事全体の完成時期を促進し、e) 必要によつては早期強度を促進して型枠除去の時期を早め、構造物の一部使用開始時期を早める、f) 以上によつて経済的条件をも満足させようとするにある。

(2) 開放時に必要な始期強度 寒中施工をしたコンクリートが開放後十分な凍害抵抗を有するに必要な始期強度については、前章において述べたごとく、コンクリートの材令28日に達するまでの間の凍結融解の回数が数回以内であり寒冷の激しくない場合には30 kg/cm²以上、同じ期間の平均温度が-3°C以下となる激しい寒冷の場合には60 kg/cm²以上、最も激しい寒冷時には90 kg/cm²を必要とする。またもしその構造物が水路などのごとく水で飽和されるものでは、上記の数値をそれぞれ50%以上増加させることが必要である。

(3) コンクリートの温度 コンクリートは凍害を受けることなく所定の期間内に必要な始期強度に達しうだけの温度を保たなければならない。打込まれたコンクリートの温度の変化は、打込み温度、養生の方法および

その温度、熱の損失、水和熱の発生状況などに関係があり、吉田博士の研究がある³⁰⁾。コンクリートの打込み温度を必要以上に高くすると、かえつて熱損失の速度は増加するだけでなく、スランプの減少、収縮ひびわれのおそれなどの悪影響があるから、養生方法を適当のものとし、打込み温度はあまり多くしない方がよい。わが国の示方書では、一般に 10°C 以上、ダムのようなマスコンクリートでは 5°C 以上と規定している。ただし舗装コンクリートにおいてその作業の性質上、打込み後しばらくの間は凍結気温にさらすような場合には、冷却の影響を考慮してドイツの示方書のごとく 20°C 以上とするがよい。

(4) 養生温度と期間 一般に積算温度（日平均温度×日数）が等しくても、低い温度で養生する方が成熟係数（(1) 式）が大きいので有利となる。例えば 3 日間 10°C と 6 日間 5°C は同じ積算温度であるが、成熟係数はそれぞれ 60, 90°C 日となつて 50% の差が生ずる。施工時期および、その地方の寒冷気象の程度などを考えて、これに相当した始期強度を定め、あらかじめ現場コンクリートにつき強度-成熟係数曲線を試験によつて求めておけば、必要な養生温度と期間を定めることができる。コンクリート標準示方書では a) 無筋コンクリートでは AE コンクリートに 1% の塩化カルシウムを用いた場合、10°C で 3 日間以上、早強セメントの場合 2 日間以上、b) 鉄筋コンクリートでは同上、ただし早強セメントの場合の日数を明示していないので試験によつて少なくしうる、c) 舗装では圧縮強度 50 kg/cm² 以上、曲げ強度 10 kg/cm² 以上になるまで、d) ダムでは 7 日間 5°C 以上とそれぞれ規定し、また一般に開放後 3 日間は凍結しないように保護し、とくに鉄筋コンクリートでは開放直後の温度低下の割合が 1 日につき 25°C 以上とならぬように保護せねばならないことが定められている。

(5) 寒中コンクリートの開始時期 日平均気温が所定の養生温度以下となつて、所定の強度に達する前に凍害を受けるおそれのあるとき、または平均温度はよくても最低気温が凍結温度以下になるおそれのあるときは寒中コンクリートとしての準備をしなければならない。すなわち一般には日平均気温が 10°C 以下となるときは、その後 7 日間は凍結に対する準備が必要であり、平均気温が 5°C に達したときは最低気温が凍結気温となつてることが予想される。最低気温が 5°~0°C となつたときは、水を加熱してコンクリートが所定の打込み温度以下とならぬようたえず測定し、気温が -3°C に達するときは簡単な保温装置を必要とし、-3°C 以下になる場合には材料の加熱、保護施設など本格的な寒中施工法を行う。

以上については現地に関する過去の気象記録を参考にしておき、あらかじめ相当期間の余裕をもつて準備しておくことが必要で、時期の迫つたときは毎日の気温測定回数を増加して注意を怠らぬことが大切である。

2. 材料の加熱

(1) コンクリート温度の損失 練りませ、ミキサより出すとき、運搬中、打込みのときなどのコンクリート温度の損失は、その施工法、気温および最初のコンクリート温度によつて異なるが、これを 8°C 以内に止めることは困難でない。ACI の示方書³¹⁾では、気温 -1°C 以上のとき 2.8°C、-12°C 以上のとき 5.6°C、それ以下のとき 8.4°C の損失としている。

(2) 材料の加熱温度 所定のコンクリート打込み温度 t_c に熱損失 dt を見込んだ温度が、所要のミキサ内練上げ温度 t_{cm} となる。コンクリートの練上げ温度 t_{cm} は次式によつて求められる。

$$t_{cm} = \frac{0.2(t_c W_c + t_a W_a) + t_w W_w + T_a W_{wa}}{0.2(W_c + W_a) W_w + W_a} \dots\dots (5)$$

ただし t は温度、 W は重量、 c はセメント、 a は骨材、 w は使用水、 W_a は骨材含有水、0.2 はセメントおよび骨材の比熱の假定値である。

(3) 水の加熱 水は他の材料に比して比熱が高く、平均に温めやすく、混合しやすいのであるから、まず第一に水の加熱を考えるのが有利である。高温水とセメントを直接に混合することはなるべく避けるのがよいが、しかし実験によれば³²⁾ 80°C までの高温水を用いても、ペーストの練り上り温度が 50°C 以内のときはフラッシュセットの心配はない。またコンクリートの練上げ温度が標準温度 20°C より 5°C 増加するに従つてスランプは約 20% 減少するが、寒中施工のコンクリート温度は 25°C に達することはまれであるから大した影響はない。また強度には悪影響はなかつた。水の加熱方法は種々あるが、設備が許せば高温スチーム吹込みなどは便利で経済的である。

(4) 骨材の加熱 骨材は冰雪の混らないように、またあまり温度が下らぬように貯蔵方法を工夫する。氷結したものは計量が困難で不正確であるし、氷塊があれば示方配合の単位水量とならなくなるので融解して除去しなければならぬ。一般に骨材を一樣に加熱することは困難で非能率的であるから、まず使用水の温度をできるだけ高くし、骨材の温度は止むを得ない程度に止めるのが有利である。骨材は高くとも 65°C 以上に熱しないのがよい。骨材加熱の方法は種々あり³³⁾、そのときの事情に相当したものを撰択する。電熱、スチーム吹きつけなどは有効である。骨材の加熱は時間的余裕をおいて使用前早めに行い、適当に保温することが必要である。

(5) セメントは直接これを加熱してはいけない。倉庫を保温するのは有利である。

3. 練りませ、運搬および打込み

(1) 練りませ 気温が -3°C 以下のときは混合所全体を小屋によつて包囲し、骨材・セメントなどの材料運搬の出入口も、そのつどこれを開閉して室内保温につと

める。水はプラント内で加熱するのが望ましい。室温は少なくとも 0°C 以上、できれば 5°C 以上とするのが望ましい。材料投入順序は水、骨材、セメントの順序とするのが安全である。

(2) 運搬 熱損失を少なくするため運搬距離を小さくするのがよい。タワーとシュートを用いるときは、全体をむしろ 2 枚以上またはシート類で包む。ベルトコンベヤも同様である。鉄製のスキップ、バケットを用いるときには側面を板、むしろ類で囲み、コンクリート表面も被覆する。その他、熱の損失を最小限にするように工夫するのがよい。

(3) 打込み 養生法の種類を問わず、打込み場全体を適当の防護施設で囲んで打込み中にコンクリートのはなはだしい冷却や万一の凍結を防ぐのが原則である。打込み前には型ワク内面および鉄筋表面の氷雪、霜柱の融解、凍結地盤、旧コンクリートの凍結面などの融解を行う。鉄筋は熱の良導体であるから寒気に露出させないようにする。またコンクリート打込み作業中、防寒施設の入出による室内温度の低下を防ぐような注意と工夫が大切である。舗装のように広い面積にコンクリートを打つ場合には、やむを得ず一部分を空気にさらすこともあるが、できるだけ狭い範囲にとどめ、風に対しては防御することが必要である。凍結したコンクリートは取除かなければならない。

4. 養生方法

(1) 熱計算 ある被覆内のコンクリートを所要の養生温度に保つためには、熱量の損失と供給が平衡を保つ必要がある。近似的に、まず熱量損失は次式を用いる。

$$q_l = KA \Delta t, \quad \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta}{\lambda} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 q_l は kcal/hr, K は熱量損失率 kcal/m²,hr,°C, Δt は内外の温度差, α : 熱伝導率 kcal/m²,hr,°C= α , (対流)+ α_2 (輻射), δ は被覆材の厚さ (m), λ は被覆材の熱伝導率 (面積 1 m², 厚さ 1 m につき kcal/hr,°C) で、表-2~4 はその値を示す。

表-2 α_1 の値 (垂直面)

風速 m/sec	被覆材の表面温度と気温との差 20°C			
	平滑面	粗面	平滑面	粗面
0	4.8	5.3	5.3	5.8
1	8.2	8.9	8.7	9.4
3	15.0	16.1	15.5	16.6
5	21.8	23.3	22.3	23.8

表-3 α_2 の値

物 体	α_2	物 体	α_2
鋼 板	3.3	ス レ ー ト	4.7
砂 岩	2.9	シ ー ト	3.9
粘 土	1.85	建 築 紙	3.42
煉 瓦	4.61	木 材 (仕上げ)	4.4
コンクリート	3	水	3.2

表-4 λ の値

物 体	λ	物 体	λ
コンクリート	1.1	軟 鋼	40
同 (乾燥)	0.65	ム シ ロ	0.07
鉄筋コンクリート	1.3	ノ コ ク ズ	0.06
木 材	0.15	土	2.0
紙	0.12	シ ー ト	0.05
石 綿	0.12	砂 利	0.3
水	0.5		

次にコンクリートの発熱量を q_c とすれば所要の総熱量 Q は $Q = q_l - q_c \dots \dots \dots (7)$

となる。普通ポルトランドセメントの発熱量は 0~3 日平均で約 0.9 kcal/hr, 0~7 日間平均約 0.45 kcal/hr であるから、これに単位セメント量に乗ずれば q_c を求められる。例えば鉄筋コンクリートの単位セメント量 300 kg とすれば $q_c = 270$ kcal/hr となる。

〔例〕 外気温 -20°C, 養生温度 10°C, 防寒被覆材 3 mm 厚きシート, 放熱面積 100 m², 鉄筋コンクリート量 30 m³, 風速 3 m/sec のとき 7 000 kcal/kg の石炭の消費量を求む。ただしストーブの効率 50% とする。

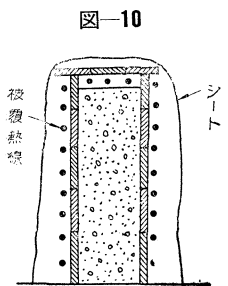
$\Delta t = 20 + 10 = 30^\circ\text{C}$, 表-2 より $\alpha_1 = 16.6$, 表-3 より $\alpha_2 = 3.9$, 表-4 より $\lambda = 0.05$, ゆえに $\alpha = 16.6 + 3.9 = 20.5$, $\therefore \frac{1}{K} = \frac{1}{20.5} + \frac{0.003}{0.05} = 0.1088$, $K = 9.2$, $q_l = 9.2 \times 100 \times 30 = 27\ 600$ kcal/hr, また $q_c = 270 \times 30 = 8\ 100$ kcal/hr, $\therefore Q = 27\ 600 - 8\ 100 = 19\ 500$ kcal/hr, 所要石炭消費量 = $19\ 500 / 7\ 000 \times 0.5 = 5.6$ kg/hr

(2) 暖房養生 コンクリート打込み場所を防寒小屋

で被覆し、内部をストーブ、スチームなどで給熱養生をする方法で、従来最も広く一般に行われてきたものである。その構造、工法は寒気の程度、風、構造物の形状、現地の状況により異なる。防寒小屋は足場丸太などで骨格をつくり、これに寒気の程度に応じてむしろ、シート、四分板などを張る。この方法は一般に予想されるほど不経済でなく、合理的に設計して熱損失を少なくすれば相当経済的である。道路舗装では、低い小屋組を適当間隔に並べて、その上にシート、板などをかけ渡す。打込み作業区間は高い小屋組を使用し、舗設がすんでからこれを移動させて、そのあとに低い小屋組を置くようにすればよい (前出の熱計算例参照)。

(4) 電熱養生 これは堀松氏³⁴⁾の研究によるもので、図-10のごとく型ワクの周囲に被覆熱線を 10~20 cm ピッチにはりつけ、その

上をシート類で被覆して所定の養生温度を保たせるもので、最近大分普及されるようになった。被覆熱線には比抵抗の大きい洋銀線 (49×10⁻⁶ Ω/cm², 20°C) φ1.2 mm を用いると約 30 m で 15 オーム、電圧 100 V のとき電流 6.6 A,

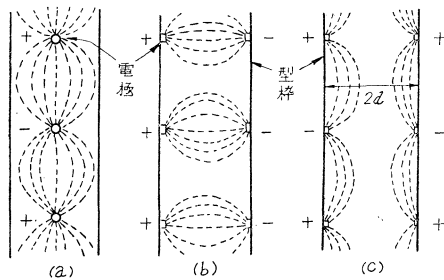


消費電力 0.66 kW/hr となり 1 本のジュール熱は 574 kcal/hr となる。この工法の特長は被覆熱線の温度は高温とならないので火災の心配がないこと、シートを型ワクに近接してかけられるのでその表面積従つて放熱面積が減少し、熱量損失が少なくなること、設備が比較的簡単に経費も少ないことなどである。前出の熱量計算例において、シート面積は少し軽減されるとして 80 m² とし、他は同じ条件とした場合について計算すると、

$q_1 = 9.2 \times 80 \times 30 = 22\,080 \text{ kcal/hr}$, $Q = 22\,080 - 8\,100 = 13\,980 \text{ kcal/hr}$, 熱線本数 = $13\,980 / 574 = 24$ 本, 消費電力 = $22 \times 0.66 = 14.52 \text{ kW/hr}$ となる。

(3) 電気養生³³⁾³⁵⁾ これは前述までのと異なつてフレッシュコンクリート自身に電流を通して給熱する方法である。電極には銅または鉄製の線 (3 mm 以上)、帯状板を用いる。配置方法には図-11 に示すように 3 種類が

図-11



あるが、普通は (b), (c) を用いる。(b) は主としてコンクリート内部に電流を通すもので、コンクリートの厚さ、電圧の大きさ、極間隔を適当にしなければならない。(c) は主としてコンクリート表面に電流を通すもので、構造物の形状寸法による制限を受けない。いずれの方法でも、電極付近は高温となりやすく、温度分布を一樣にすることがむずかしいのが欠点である。また鉄筋コンクリートでは、鉄筋の付着強度を少し減少させるおそれがある。コンクリートの抵抗は単位水量の多くなるほどおよび温度の高いほど小さく、時間とともに未水和水の減少するにつれて大となる。通電中は必ず数カ所で温度測定を行い、コンクリートの温度は 10°~45°C 以内、上昇速度 5°C/hr 以内に調節しなければならない。コンクリート温度 10°~45°C に対し通電時間は 1 日 3.5~1 時間が標準である。方法 (b) ではコンクリート 1 m³ に

表-5

厚さ $d(\text{cm})$	最大電力 (kW)		消費電力 コンクリート 1 m ³ につき (kWh)
	コンクリート 1 m ³ につき	配極面積 1 m ² につき	
5	3.3~8.5	0.2~0.5	最大で 35~70
20	2.2~4.4	0.4~0.9	
40	1.3~2.3	0.5~0.9	少ないとき 10 以下
100	0.5~0.9		
500	0.1~0.2		

ついて最大電力 3.5~7 kW, 消費電力量 65~135 kWh, 方法 (b) では電圧 100 V, 極間隔 30~50 cm に対し表-5 の値にとつてよい。ただしコンクリート両面に極を配置したときは厚さの 1/2 を d とする。電気養生では塩化カルシウムの混和は避けた方がよい。

(4) 一般注意事項 打つたばかりのコンクリートを直接、また局部的に加熱してはいけない。コンクリートの温度は 40°C 以下におさえて、冷却によるひびわれを防ぐ。養生中コンクリートが乾燥しないように注意すること、火災が起ると復旧までの間は凍結気温にさらさなければならぬほか、型ワクに損傷があると重大な事故となるのでとくに注意を要する。

5. 型ワク取外し

寒中コンクリートでは夏季に比し強度の進行が遅いので型ワクおよび支保工の取外しはできるだけおそくする方がよく、これは養生終了後の空気に対する保護の上からも好ましい。しかし必要の場合には強度-成熟係数曲線を利用するか、実際のコンクリートと同じ条件の養生をした供試体を試験するかによつて強度を推定して、型ワク取外しの時期を決定する。

6. 温度記録

寒中コンクリートでは毎日数回気温、防寒室温度、材料の温度、同加熱温度、練上りコンクリート温度を測定する必要がある。とくにコンクリートは数カ所において表面、内部および隅角部の温度測定が必要である。

参考文献

- Rastrup: Heat of hydration in concrete. Magazine of Concrete Research, No.17, Sept. 1954
- 高橋敏五郎: 昭和 18 年度寒中コンクリート舗装試験報告書
- Powers: Resistance of Concrete Frost at Early Ages, RILEM-Symposium on Winter Concreting, 1956. Session C
- P. Nerenst: Computation of Freezing Resistance of Concrete at Early Ages, 同上
- Powers: Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing. Proceedings, Highway Research Board, Washington, 1953. Vol.33
- Voellmy: High Concrete Quality in Cold Weather. RILEM-Symposium (前出) Session D
- 園分正胤: 各種 AE 材の使用法に関する研究, 土木学会論文集 23 号, 昭 30
- 近藤泰夫・渡辺昭彦: コンクリート工事における塩化カルシウムの利用に関する研究, 昭 31 年度土木学会年次学術講演会
- 林正道・本間清: 塩化カルシウムを使用したコンクリートの性質について, 昭和 32 年度土木学会年次学術講演会
- J.J. Shideler: Calcium Chloride in Concrete. ACI Journal, March 1952.
- Staub: RILEM-Symposium (前出), Session D, Discussion.
- V.N. Sizov: 同上
- 原田千三: ソ連の寒中コンクリート, 道路建設 No.90, 1955. 7.
- T. Yoshida: Studies on Cooling of Fresh Concrete in Freezing Weather. Bulletin No.123 of the Engineering Experiment Station. Univ. of Illinois.
- Recommended Practice for Winter Concreting (ACI 604-56), ACI Journal Vol.27, June 1956
- H. Yokomichi: Influence of High Temperatures of Mixing Water on Setting, Consistency, Strength and Heat of Concrete. RILEM-Symposium (同上), Session D.
- 吉田徳次郎: コンクリート及鉄筋コンクリート施工方法, 昭 31. 丸善 KK.
- 堀松和夫: 寒中コンクリート, 昭 30. 理工図書 KK.
- Y. Ichiki: Some Experiments on Electrical Curing of Concrete in Cold Weather. RILEM-Symposium (前出) Session D.