

論文 車両運搬時の振動および温度がコンクリート供試体に与える影響

古江 翔子*1・西脇 智哉*2・渡邊 健一*3・佐々木 正行*4

要旨: 生コンクリートの品質管理に関して、現場での供試体作製後にやむを得ず当日中の運搬を行う場合を想定して、実験検討を行った。各種の温度環境下において、運搬振動の開始時間および継続時間が圧縮強度に及ぼす影響を確かめた。その結果、振動時間や温度環境によらず、供試体作製から4~8時間以前の運搬は、JIS規格通りに静置した場合の供試体と比較して、強度が増加する危険側の傾向を示した。したがって、供試体をやむを得ず当日運搬する場合でも、作製後8時間以上の現場静置が望ましいことが明らかになった。なお、運搬振動の開始時間と凝結過程および体積変化との関係性は明らかにならなかった。

キーワード: 圧縮強度, 車両運搬, 振動, 品質管理, 供試体

1. はじめに

出荷した生コンクリートの品質管理のため、施工者および第三者機関は荷卸し地点で受入検査を実施し、JISA 1132¹⁾に従い、圧縮強度試験のための供試体を採取する²⁾。JISA 1132¹⁾では、「型枠を取り外すまでの間、衝撃、振動及び水分の蒸発を防がなければならない。」とされており、JISA 5308³⁾でも、「供試体は、常温環境下で作製することが望ましい。常温環境下での作製が困難な場合は、作製後、速やかに常温環境下に移す。」とされている。したがって、現場に標準養生槽があること、あるいは、少なくとも硬化するまでの間、供試体を静置する常温環境があることが理想であるが、特に小規模な現場などでは、そのような環境が必ずしも用意されていない。そのため、供試体を作製した当日に標準養生槽がある場所まで、やむを得ず運搬する場合も存在する。

標準期（ここでは、気温が20℃程度の環境と定義する）の場合、供試体作製直後の運搬は、強度低下を引き起こす^{4),5),6),7),8)}との報告が多いが、供試体作製後、数時間静置した後の運搬は、強度増加^{4),5)}と低下⁷⁾、どちらの報告もみられる。また、静置時間の増加に伴って、強度低下、増加、低下の順に起きるとの報告もある⁵⁾。暑中期（ここでは、気温が35℃程度の環境と定義する）の場合、供試体作製直後の運搬は、強度増加^{6),7)}と低下⁷⁾、どちらの報告もある。また、寒中期（ここでは、気温が5℃程度の環境と定義する）の場合、供試体作製直後の運搬は、強度低下を引き起こすが、数時間静置した後の運搬は強度増加を引き起こす⁴⁾との報告がある。ただし、これらの温度区分は既往の研究ごとに多少の差異があり、本研究の定義とは必ずしも一致しないことに注意が必要である。運搬時間については、コンクリート温度（以下、CT）が20℃以下では、運搬時間の経過により強度が低

下するが、CTが30℃の場合は、強度回復が見られた⁹⁾との報告がある。いずれにしても、既往の研究は少なく、実験結果も配（調）合や実験ごとに違いがある。また、車両運搬振動の開始時間と凝結時間との関係性が示唆はされているものの⁷⁾、明らかにすることはできていない。

本実験では、暑中期、標準期、寒中期の3パターンの温度環境下において供試体を作製し、その圧縮強度に対する、車両運搬振動の開始時間および継続時間の影響を確かめた。併せて、凝結時間と沈降量を計測し、車両運搬振動の開始時間と凝結過程との関係性を確かめた。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配（調）合および供試体の作製

結合材として普通ポルトランドセメント（記号C、密度3.16 g/cm³、比表面積3320 cm²/g）、細骨材として山砂（記号S1、表乾密度2.57 g/cm³）および砕砂（記号S2、表乾密度2.74 g/cm³）、粗骨材として碎石（記号G、表乾密度2.75 g/cm³）、混和剤としてAE減水剤（標準形I種）（記号SP、密度1.07 g/cm³）、練混ぜ水には地下水（記号W）を使用した。

表-1に示す設計条件および配（調）合は、全シリーズ共通であり、生コンクリート工場で通常の出荷に使用されているものである。

練混ぜには、強制2軸ミキサー（容量50L）を用いた。細骨材とセメントをミキサーに投入し、空練りを5秒間行った後、水を投入し、モルタルの状態30秒間練り混ぜた。最後に、粗骨材を投入し、30秒間練り混ぜた。

供試体は、温度環境および振動条件ごとに3体ずつ作製した。型枠からの漏水の影響を考慮して使い捨て樹脂製型枠を用い、打込み後は、ラップをして養生した。

最終的な供試体のシリーズ数は結果で後述する。

*1 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社タイハク

*4 仙台コンクリート試験センター株式会社 (正会員)

表-1 設計条件および配(調)合

| 呼び強度 (MPa) | スランプ (cm) | 粗骨材の最大寸法 (mm) | セメントの種類による記号 | W/C(%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | |
|------------|-----------|---------------|--------------|--------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| | | | | | | C | W | a | | | SP |
| | | | | | | | | S1 | S2 | G | |
| 27 | 15 | 20 | N | 49.5 | 45 | 343 | 170 | 632 | 158 | 1023 | 3.43 |

表-2 目標温度

| 区分 | 環境温度 (°C) | 運搬温度 (°C) | 運搬後養生温度(°C) |
|----|-----------|-----------|-------------|
| 暑中 | 40 | 40 | 20±2 |
| 標準 | 20 | 20 | |
| 寒中 | 5 | 5 | |



図-1(a)ジェットヒーター (b)保冷車



図-2 運搬時の状況

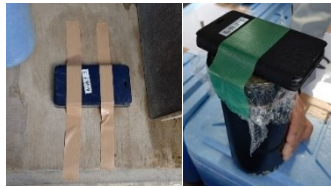


図-3 振動計設置状況
荷台(左) 供試体(右)



図-4(a)軽トラック (b)軽バン

2.2 温度条件

暑中期、標準期、寒中期の3パターンを想定した目標温度を表-2に示す。環境温度とは、供試体作製と、運搬開始まで供試体を静置する部屋の温度のことである。暑中期は、練混ぜ室の空調設備の設定温度範囲が30℃までであったため、開口部を閉じ、図-1(a)に示すようなジェットヒーターを3台稼働して調整した。寒中期は、スペースの関係上、供試体作製は、20±2℃の試験室で行い、供試体作製後すぐに、図-1(b)に示すような5℃設定の保冷車内へ運び、静置した。したがって、寒中期は、供試体作製環境と、静置環境の温度が異なる。ただし、使用材料の温度を調整し、供試体作製を速やかに行なったため、供試体作製中の現場温度の影響は少ないと考えられる。そのため、環境温度は供試体を静置する部屋の温度とした。使用材料の水以外は、供試体作製前に温度調整された作業場所に置いておき、水は、暑中期は40℃、標準期と寒中期は、20℃のものを使用した。

図-2に示すように、発泡スチロールの箱(運搬箱)に温度計と供試体を9および10体ずつ入れて、箱にふたをし、荷台に乗せて車両運搬した。暑中期は、運搬箱に温熱カイロを入れて高温環境を維持した。

2.3 運搬振動条件

供試体作製後、温度パターンごとに現場に1, 2, 4, 8, 24時間、および、始発、終結時間(h)まで静置し、静置後それぞれ30, 60分間(min)車両運搬した。始発、終結時間が、1, 2, 4, 8, 24hに近い場合は併用した。凝結時間に運搬を開始する条件では、凝結時間を確認後に



図-5 沈降量試験
ダイヤルゲージ(左) ディプスゲージ(右)

運搬を開始した。運搬後は、20±2℃の養生室で養生した。あわせて、運搬なし0min、静置時間0hの供試体(以下、JIS供試体)を作製した。なお、標準期の環境および運搬温度と運搬後の養生温度は同じであるため、振動の影響がないと考えられる静置時間24hと、静置時間0hは同じ条件となる。そこで、外気温下の静置を想定して、標準期24hの供試体を室外に静置した。運搬中は、図-3に示すように荷台と供試体上面にスマートフォンを設置し、振動計アプリを用いて振動を測定した。暑中期は図-4(a)に示すような軽トラック、標準期と寒中期は図-4(b)に示すような軽バンを用いて、車両運搬を行った。

2.4 フレッシュ性状試験および沈降量試験

温度パターンごとに、フレッシュ性状を確かめた。スランプはJIS A 1108、空気量はJIS A 1128、凝結時間はJIS A 1147に則り、測定した。

打込み直後の体積変化を確かめるために、JASS 5 T-503:2018⁹⁾を参考に、沈降量試験を行った。内径150mm、

表-3 実施温度

| | 環境温度(°C) | | | | 運搬温度(°C) | | | | 運搬後養生温度(°C) |
|----|----------|------|------|------|----------|------|------|------|-------------|
| | 最小値 | 最大値 | 平均値 | 標準偏差 | 最小値 | 最大値 | 平均値 | 標準偏差 | |
| 暑中 | 32.0 | 39.0 | 38.6 | 2.75 | 32.5 | 40.5 | 36.1 | 2.05 | 20±2 |
| 標準 | 19.8 | 21.4 | 20.6 | 0.37 | 21.2 | 26.7 | 23.4 | 1.69 | |
| 寒中 | 4.10 | 13.9 | 5.47 | 1.02 | 7.40 | 13.8 | 10.5 | 2.00 | |

表-4 運搬時間帯の外気温

| | 最小値 | 最大値 | 平均値 | 標準偏差 |
|----|------|------|------|------|
| 標準 | 18.2 | 24.9 | 21.3 | 2.21 |
| 寒中 | 8.80 | 18.6 | 14.4 | 3.68 |

表-5 フレッシュ性状

| | スランプ(cm) | 空気量(%) | CT(°C) | 始発(h:mm) | 終結(h:mm) |
|----|----------|--------|--------|----------|----------|
| 暑中 | 15.0 | 4.8 | 33 | 3:45 | 5:17 |
| 標準 | 17.5 | 5.7 | 19 | 6:05 | 8:09 |
| 寒中 | 17.0 | 5.1 | 11 | 14:05 | 19:05 |

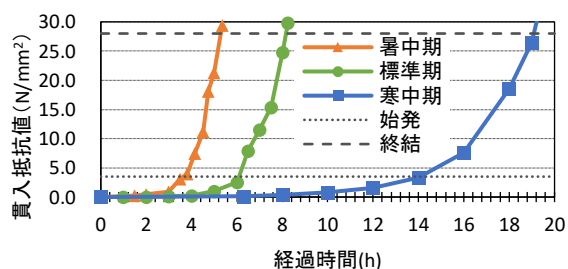


図-6 凝結試験結果

高さ 300 mm の使い捨て金属製型枠に、試料を JIS A 1132¹⁾ に準拠し、温度パターンごとに 1 つ採取した。図-5 に示すように、コンクリートの上面にアクリル板を置き、測定器具を用いて、上面中央部の沈降量を打込み後 7 時間まで、15 分ごと計測した。7 時間は、運搬による強度への影響が小さくなると考えられた時間である。測定器具は、寒中期と暑中期でダイヤルゲージ、標準期でディプスゲージを用いた。

2.5 圧縮試験

圧縮強度は JIS A 1108 に基づき、材齢 3, 7, 28 日で直径 100 mm、高さ 200 mm 円柱供試体を用いて測定を行った。載荷には 2000 kN 全自動圧縮試験機を用い、測定結果は、3 体の平均値として整理した。

3. 実験結果および考察

3.1 温度環境およびフレッシュ性状

表-3 は、実施した温度環境である。計測時間中の最小値、最大値、平均値、標準偏差を示した。寒中期では、温度計を計測開始直前に運搬箱に入れたことにより、実際の温度が計測値に反映されるまで時間がかかった。し

0:00 4:00 8:00 12:00 16:00 20:00 24:00

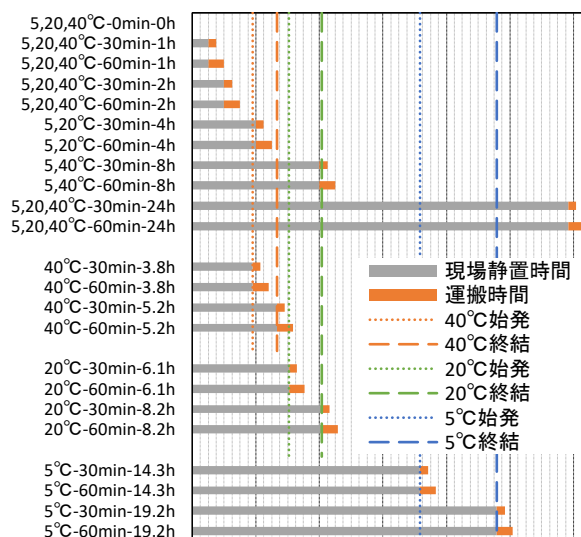


図-7 実施パターン

たがって、運搬時間の後半 30 分を計測時間として運搬温度を計算した。暑中期にはやや大きな標準偏差が見られるが、これはジェットヒーターやカイロでの温度調整に限界があったことと、熱中症防止のため、作業者が頻繁に部屋を出入りしたために生じている。寒中期の環境温度が、一時 10 °C 以上になるのは、供試体を保冷車に乗せる際に、ドアを開閉したためと考えられる。また、標準期や寒中期の運搬温度が表-2 に示すような目標温度よりも高くなったのは、供試体の水和熱発生により運搬箱内の温度が上昇したことと、外気温による影響と考えられる。表-4 に、温度上昇に影響したと考えられる標準期と寒中期における運搬時間帯の外気温を示す。

フレッシュ性状を表-5 に、凝結試験結果を図-6 に示す。CT は、暑中期、標準期、寒中期でそれぞれ 33, 19, 11 °C となり、JASS 5 の荷卸し時のコンクリート温度要件を満たした。

3.2 振動条件

図-7 に実施した全ての試験条件を示す。シリーズ名は、「目標環境温度 (°C) - 運搬時間 (min) - 現場静置時間 (h)」で構成されている。暑中期の始発時間 3.8 h と 4 h、標準期の終結時間 8.2 h と 8 h は併用した。

図-4 に示した(a)軽トラックと(b)軽バンの運搬時の加速度を図-8(a)、図-8(b)にそれぞれ示す。この加速度の

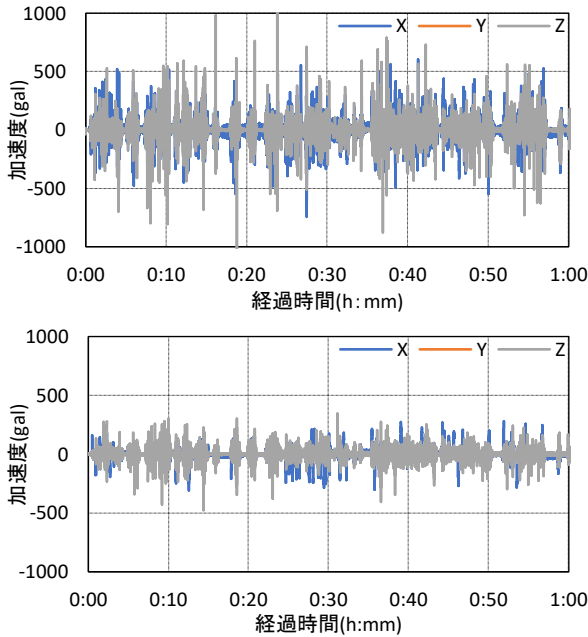
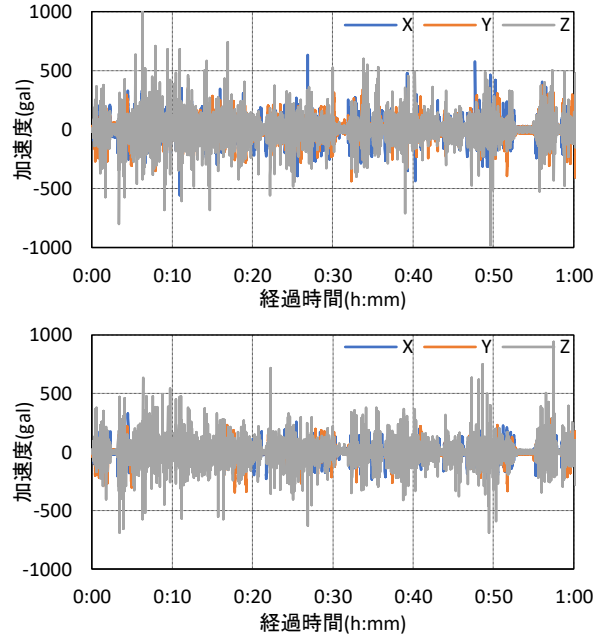


図-8 (a)軽トラック加速度 供試体(上) 荷台(下)



(b)軽バン加速度 供試体(上) 荷台(下)

程度は既往の研究ともおおむね一致する^{5),6)}。(b)軽バンより(a)軽トラックの方が荷台の振動が小さいが、供試体上面の振動には、あまり差が見られなかった。車両運搬振動は 500 gal 程度であり、テーブルバイブレーターの 4000 gal¹⁰⁾に比べると極めて小さい振動である。そのため、車両間の振動の差が強度に及ぼす影響は、バイブレーターによる振動の差と比較すると限定的と考えられる。

3.3 沈降量試験結果

沈降量および 15 分ごとに計測した貫入抵抗試験結果を図-9 に示す。本結果は、2.1 に記載した材料、配(調)合を用い、2.2 に準じた温度環境を再現し、追加で試験したものである。CT は、暑中期、標準期、寒中期でそれぞれ 33, 22, 13 °C であった。試験日の気温が低かったため、暑中期の試料は練混ぜ方法を変更して作製した。まず、骨材を 5 秒間空練りし、70 °C の水を投入後 20 秒間練り混ぜた。最後にセメントを投入し、45 秒間練った。

沈降量は温度パターンによらず、経過時間 2 時間ほどで停滞するが、寒中期の沈降量は 7 時間以降も増加すると予測された。暑中期と標準期の沈降量は同程度で寒中期よりも小さかった。沈降量と凝結試験結果の間に明確な関係は見られなかった。

3.4 圧縮試験結果

暑中期、標準期、寒中期における現場静置時間と圧縮強度の関係をそれぞれ図-10(a)、図-11(a)、図-12(a)に、現場静置時間と JIS 供試体に対する圧縮強度比の関係をそれぞれ図-10(b)、図-11(b)、図-12(b)に示す。凡例は温度パターンごとに共通で、現場静置時間 (h) は横軸であるため、X h で表した。凡例の初めは材齢を表している。圧縮強度の標準偏差は最大 1.0 程度であった。

材齢 28 日に着目すると、温度パターンによって多少時間は前後するものの、静置時間 4~8 h 以前は、JIS 供試体と比較して強度が増加し、以降は強度が横ばい傾向であった。特に、暑中期では、図-10(b)に示すように静置時間 1 h で強度増加率 10 % 超が確認された。打込み完了後に再度、バイブレーターの振動を与えることで強度が増進する再振動締め¹¹⁾という現象がある。3.2 で記述したように、車両運搬はバイブレーターと比較して極めて小さい振動ではあるものの、本研究でも同じ現象が生じたと考えられる。水田らによれば、コールドジョイントの発生限界である抵抗値 0.1 N/mm² 以前の再振動は強度が増進するという¹¹⁾。図-9 より、暑中期は静置時間 1 h で高い強度増進効果が得られる抵抗値であったと推測される。また、標準期では静置時間 2 h、寒中期では 2, 4 h に強度増進が見られ、再振動に適切な状態であったと推察される。ただし、図-6 に示すような温度パターンごとの凝結時間の違いに対して、強度傾向に大き

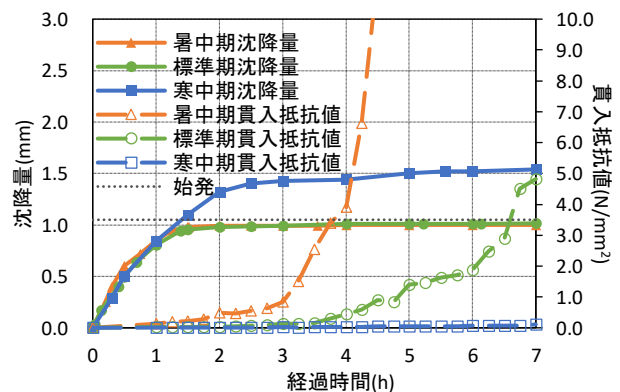


図-9 沈降量および貫入抵抗試験結果

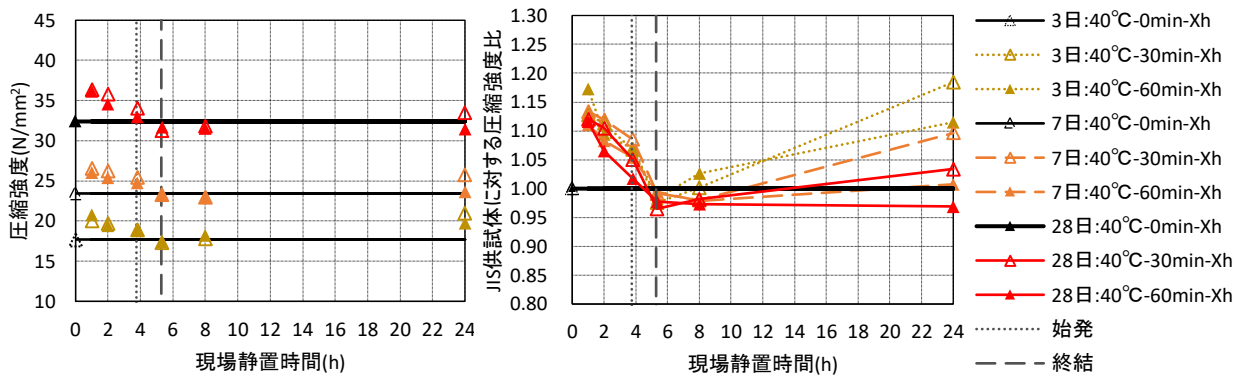


図-10 (a)現場静置時間と圧縮強度（暑中期） (b)現場静置時間と JIS 供試体に対する圧縮強度比（暑中期）

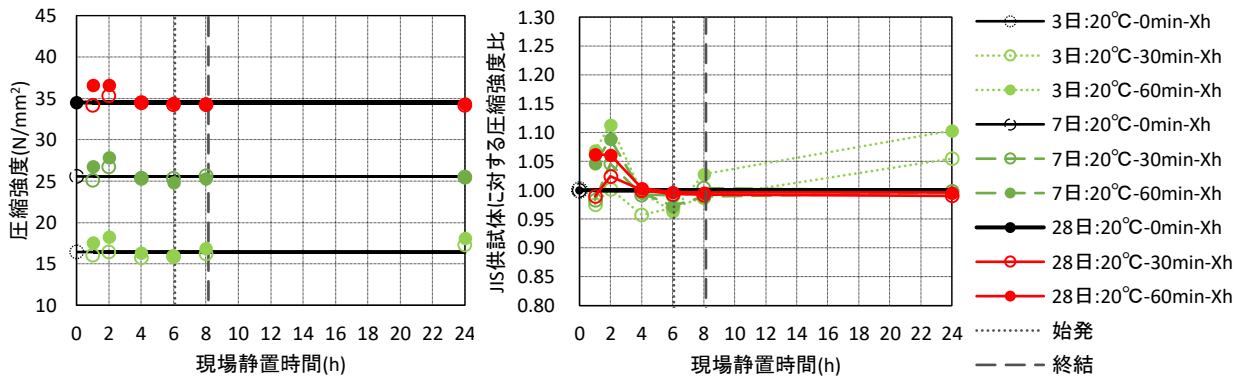


図-11 (a)現場静置時間と圧縮強度（標準期） (b)現場静置時間と JIS 供試体に対する圧縮強度比（標準期）

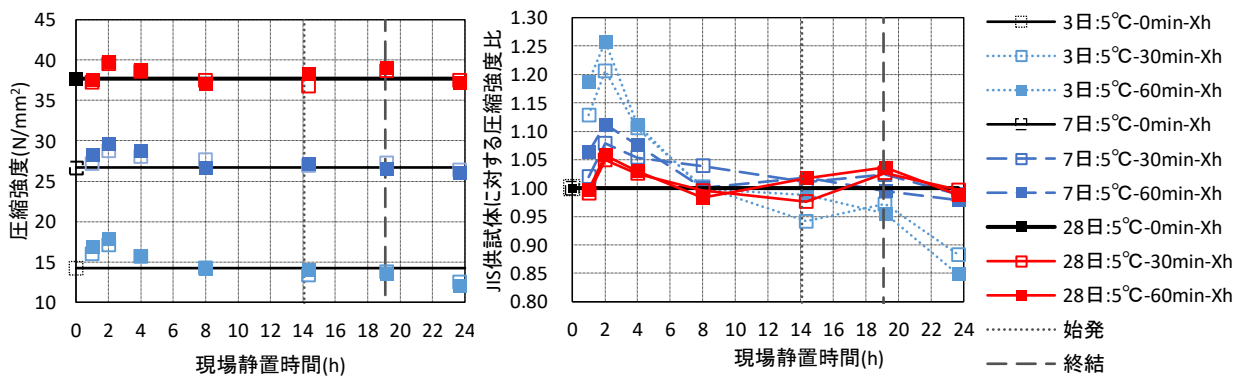


図-12 (a)現場静置時間と圧縮強度（寒中期） (b)現場静置時間と JIS 供試体に対する圧縮強度比（寒中期）

な違いは見られなかったため、凝結時間に及ぼす車両運搬振動の影響は、本検討範囲内では小さいといえる。

標準期と寒中期において、沈降量変化が落ち着く打込み後 2 時間以前に運搬した場合、一部強度が低下する傾向がみられた。しかし、強度との関係が明確とはいえず、供試体作製後の体積変化と強度の関係は、本検討範囲内では明らかにならなかった。

これらの結果から、供試体をやむを得ず当日運搬する場合、作製後 8 時間以上は現場に静置することで、温度条件によらず安全側の結果が得られるといえる。本検討では、シリーズごとにバッチが異なり、沈降量試験や凝結試験の試料も別バッチで採取している。今後、実機試験を行い、より実務に即したデータを採取予定である。

図-10(b)、図-11(b)、図-12(b)より、材齢 3 日、静置時間 24 h は強度増減が大きかった。これは、若材齢ほど、環境温度が占める割合が大きくなり、環境温度の影響が大きくなるためだと考えられる。平均温度を用いて、材齢 3 日の積算温度を簡易計算すると、暑中期、標準期（ただし、外気温下での静置）、寒中期それぞれで、JIS 供試体の $90^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ と比較して、約 20 %増、7 %増、15 %減であった。これは、特に暑中期での著しい強度増加、寒中期での著しい強度低下の理由となる。材齢 28 日になると、JIS 供試体の $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ と比較して、暑中期、標準期、寒中期それぞれで約 2 %増、1 %増、2 %減となり、環境温度の影響は限定的となる。

図-12(b)の材齢 3 日、静置時間 8 h 以前を見ると、強

度増加がより顕著であった。これは、運搬開始まで低温環境に静置されるため水和反応の進展が遅く、再振動による締固めの効果が大きい、かつ、標準環境での静置時間が占める割合が大きくなるため、強度増進が十分に得られたと考えられる。

圧縮強度は、静置時間に関わらず、若材齢では環境温度が高くなるほど増加し、材齢 28 日では環境温度が高くなるほど低下した。これは水和反応が早く進み、初期強度の発現が早い一方で、急激な微細構造の成長により、緻密な硬化体組織を得られにくいためと考えられる¹²⁾。

温度パターンによらず、運搬時間による強度の違いは明確には見られなかった。ただし、標準期や寒中期の若材齢、静置短時間においては、60 min 運搬の方が 30 min 運搬よりも強度が高くなる傾向がみられるため、より多くのサンプル数を集める必要がある。

3.5 観察結果

凝結が遅く、最も振動の影響が大きいと考えられる寒中期の運搬時間 60 min、静置時間 2 h (5°C-60min-2h) と、振動の影響が小さい運搬時間 60 min、静置時間 24 h (5°C-60min-24h) の供試体の断面図を図-13 に示す。この観察からは、骨材の分布に大きな違いは見られず、本検討範囲内では、車両運搬は骨材の分布に影響を及ぼすほどの振動ではないことが確認された。

4. まとめ

暑中期、標準期、寒中期の 3 パターンの温度環境下において供試体を作製し、その圧縮強度に対する、車両運搬振動の開始時間および継続時間の影響を確かめた。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 材齢 28 日に着目すると、温度パターンによって多少時間は前後するものの、静置時間 4~8 h 以前は、JIS 供試体と比較して強度が増加し、以降は強度が横ばい傾向であった。したがって、本配(調)合では、供試体をやむを得ず当日運搬する場合、作製後 8 時間は現場に静置することが望ましい。
- ・ 運搬振動の開始時間と凝結過程および体積変化との



(a) 5°C-60min-2h



(b) 5°C-60min-24h

図-13 断面図 (上側打込み面・下側型枠底面)

関係性は明らかにならなかった。

- ・ 材齢 3 日、静置時間 24 h で強度増減が大きいのは、若材齢ほど、環境温度が占める割合が大きくなり、環境温度の影響が大きくなるためと考えられる。
- ・ 寒中期において、材齢 3 日、静置時間 8 h 以前の強度増加がより顕著であった。これは、水和反応の進展が遅く、再振動による締固めの効果が大きい、かつ、標準環境が占める割合が大きくなるため、強度増進が十分に得られたと考えられる。
- ・ 温度パターンによらず、運搬時間による強度の違いは明確には見られなかった。
- ・ 供試体断面の目視観察からは、骨材の分布に大きな違いは見られず、本検討範囲内では、車両運搬は骨材の分布に影響を及ぼすほどの振動ではない。
今後、より実務に即したデータを取るため、実機試験を実施予定である。

参考文献

- 1) JIS A 1132 コンクリート強度供試体の作り方, 2014
- 2) 日本建築学会: コンクリートの品質管理指針・同解説, pp.17-20, 2015
- 3) JIS A5308 レディーミクスコンクリート, 2019
- 4) 伊興田直行, 鈴木幸治, 上田明: 供試体の早期運搬による振動が強度に及ぼす影響について, 生コン技術大会研究発表論文集, 第 7 巻, pp.111-114, 1993
- 5) 小山善行, 早川光敬, 陣内浩, 中村光男: 車両運搬による材齢初期の振動が高強度コンクリートの供試体の圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.692, pp.1665-1671, 2013.10
- 6) 竹村賢, 重見高光, 渡部義弘, 島弘: 現場採取した供試体を即時持ち帰った場合の圧縮強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.363-368, 2016
- 7) 酒井宏, 関村尚人, 加藤修通: コンクリートの管理供試体強度に及ぼす初期養生に関する検討 その 3. 実験結果 2 (硬化コンクリート (圧縮強度)), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.189-190, 2017.8
- 8) 降旗直樹, 池田雅隆, 中村明, 宮原修一郎: 現場採取供試体の運搬開始時間がコンクリート強度に及ぼす影響 (第 19 回生コン技術大会・優秀賞表彰論文), コンクリートテクノ, Vol.36, No.9, pp.49-54, 2017.9
- 9) JASS 5 T-503 コンクリートの沈降量試験方法, 2018
- 10) 神代泰道, 金子智弥: コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的研究, Vol.37, No.1, pp.1201-1206, 2015
- 11) 水田実, 加藤淳司, 寺澤正人: 再振動締固めの強度増進効果および実施方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1373-1378, 2011
- 12) 十河茂幸: 水分と温度の制御が養生のポイント, Vol.15, No.5, pp.6-7, JCM マンスリーレポート, 2006.9