

## 論文 設計強度より高く強度設定したコンクリートによる工期短縮効果の検討

申 相澈<sup>\*1</sup>・金 振晩<sup>\*2</sup>

**要旨**：本研究はコンクリート工事における工期短縮の一方法として、設計強度を所要の値よりも高く設定することにより、工期短縮の可能性があるかについて検討した。つまり、24MPaの設計強度を基準にして、これより高く設計されたコンクリート（27, 30, 35, 40MPa）を対象に養生温度を5, 10, 20℃に設定し、初期材齢の強度発現について検討した。実験の結果、型枠の解体時期を早めるためには、設計強度を増加させる方法よりも、製造および養生過程における温度管理が効果的であると判断された。ただし、10℃の条件の場合、27, 30MPaの設計強度とすると、約0.8～1.5日の工期を短縮できると期待される。

**キーワード**：設計強度、躯体工事、工期短縮、型枠の解体時期、養生温度

## 1. はじめに

現在、建設工事現場では、工期短縮とコスト節減が重要な課題となっている。一般的な共同住宅構造物の施工は、土工事、地下階躯体工事、地上階躯体工事、仕上げ工事の工程で行われる。特に、Critical Pathとして作用する地上階躯体工事は、型枠、鉄筋、コンクリート打設などの工程が同様の手順と方法で繰り返されるので、反復されるプロセスのサイクルを標準化して、工期と工事費に影響を及ぼす要因を反映した計画を確立すれば、最小限の工期と工事費で建設することができる。これは全体の工期の約40%を占める躯体工事の工期を短縮して、次の工程である仕上げ工事を早期に完了することにより、全体的な工事期間を短縮することができる概念である<sup>1-3)</sup>。

工期短縮は、材料的な側面においてはコンクリートの初期強度発現によって養生期間が短縮され、型枠の解体時期を早めることで実現できる。そのためには、セメントの粉末度を高めることにより比表面積を増加させて水和反応を促進する物理的な方法と早強セメントや早強性混和剤を投入し強度を向上させる化学的方法などが適用されている。しかし、これらの方法は、要求性能を満足させるには限界があったり、長期強度においては、大きな長所はない<sup>4-7)</sup>。一方、既往の研究で、構造設計で要求されることよりも高いコンクリート強度を設計することによって、初期強度発現率が増加でき工期短縮できる可能性が指摘されている<sup>8,9)</sup>。しかし、コンクリートの初期強度確保による型枠存置期間の短縮、すなわち、工期短縮のための定量的な効果および実務の適用に必要な研究成果の蓄積はまだ十分ではない。したがって、コンクリートの設計強度を超える調合、つまり、設計強度による初期材齢における強度発現について検討し、工期短縮

の可能性について評価する必要がある。

また韓国は、春秋や冬期には標準養生温度である20℃水準を維持することができないので、養生温度による初期強度発現特性についても検討する必要がある、これは、季節による躯体工程のサイクルを定量的に分析し、適用するためには不可欠である<sup>10,11)</sup>。

したがって、本研究では、多様な設計強度を適用して製造されたコンクリートを対象に季節によってさらされる様々な環境を再現するために、養生温度を5, 10, 20℃に設定し、温度要因による力学的特性を検討した。最終的には、温度条件によって初期強度発現特性による型枠の解体時期について分析し、躯体工事の工期短縮のための方法としての適用可能性を評価した。

## 2. 実験計画および方法

## 2.1 関連規定

国土が狭く人口密度が高い韓国においては、高層のコンクリート構造物が一般的であり、コンクリートの圧縮強度発現の早さは工程上非常に重要な意味を持つ。現行の韓国コンクリート工事標準仕様書<sup>12)</sup>によると、コンクリート工事における型枠の解体時期は垂直型枠の場合5MPa、水平型枠は14MPa、または設計強度の2/3以上の強

Table-1 Standards for removal time of form &amp; support

| Type               | Vertical form | Horizontal form                                 | Support         |
|--------------------|---------------|-------------------------------------------------|-----------------|
| SSRC <sup>a)</sup> | 5MPa          | 2/3 of design strength or 14MPa                 | Design strength |
| KASS <sup>b)</sup> |               | Architecture : design strength<br>Civil : 14MPa | Design strength |
| LHSS <sup>c)</sup> |               | Design strength                                 | Design strength |

a) SSRC : Standard Specification for Reinforced Concrete

b) KASS : Korean Architectural Standard specification

c) LHSS : Land and Housing Special Specification

\*1 九州大学大学院 博士後期課程 (学生会員)

\*2 韓国公州大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

度が発現した時点と規定されている。またTable-1のように建築工事標準仕様書<sup>13)</sup>とLH専門仕様書<sup>14)</sup>などでも型枠の存置期間について規定している。

## 2.2 実験計画

本研究におけるコンクリート品質性能の目標値をTable-2に示す。フレッシュコンクリートの製造条件はスランプ150±25mm, 空気量5±1.5%とした。また前述した規定の型枠の解体時期を早めることができるかについて評価した。これは早強性コンクリートの品質基準項目として、共同住宅の躯体工事における6days/cycle以下の水準を確保するためである。

Table-3は、本研究の実験計画を示したもので、設計強度5水準、養生温度3水準で設定した。一般的に韓国で多く使用されている設計強度24MPaの普通コンクリートを基準に、これより高く強度設計された27, 30, 35, 40MPaのコンクリートを比較することにより、コンクリートの早強性評価を行った。また、現場の環境を考慮した品質管理基準を提示するために、養生温度を5, 10, 20℃に設定して温度に応じて初期強度発現特性を検討した。なお、養生温度は材齢28日まで一定とした。試験項目は、上記フレッシュ性状のほか凝結時間を測定し、硬化後には圧縮強度を測定した。圧縮強度の測定は、材齢0.5, 1.5, 2, 2.5, 7, 14, 28日にしたが、ここで0.5, 1.5, 2.5日はコンクリート打設が前の午後に終了した翌日の午前を想定したものである。

## 2.3 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材は5mm洗浄砂を、粗骨材は25mmの碎石を使用した。セメントと骨材は、恒温恒湿チャンバー内で所定の養生温

**Table-2 Target performance of concrete and removal time of forms**

| Quality performance           |                 | Targets                 |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Fresh concrete                | Slump (mm)      | 150 ± 25                |
|                               | Air content (%) | 5.0 ± 1.5               |
| Removal time of form          | Vertical form   | Curing time for 5MPa ↓  |
|                               | Horizontal form | Curing time for 14MPa ↓ |
| Process of frame construction |                 | 6 days/cycle ↓          |

**Table-3 Experimental plan**

| Factors                 | Levels             | Test items                                                                                                                 |
|-------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Design strength (MPa)   | 24, 27, 30, 35, 40 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Slump</li> <li>Air content</li> <li>Setting time</li> <li>Comp. strength</li> </ul> |
| Curing temperature (°C) | 5, 10, 20          |                                                                                                                            |

**Table-4 Mixing design of Experiment**

| Design strength (MPa) | W/C (%) | S/a (%) | Unit weight(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |
|-----------------------|---------|---------|---------------------------------|-----|-----|-----|
|                       |         |         | W                               | C   | S   | G   |
| 24                    | 48.3    | 47.0    | 160                             | 331 | 837 | 980 |
| 27                    | 45.5    | 46.5    | 167                             | 367 | 806 | 963 |
| 30                    | 42.0    | 46.1    | 165                             | 393 | 791 | 961 |
| 35                    | 37.0    | 45.7    | 165                             | 446 | 765 | 943 |
| 40                    | 34.0    | 45.4    | 165                             | 485 | 745 | 930 |

度条件で24時間保管した後を使用して季節によって変化するコンクリートの温度を再現した。混和剤は、Lignin系流動化剤およびAE剤を使用した。

**Table-5 Properties of concrete according to curing temperature and design strength as the results of experiment**

| Curing temp (°C) | Design strength (MPa) | Super plasticizer (%) | AE agent (%) | Slump (mm) | Air content (%) | Setting time (hour : min) |       | Compressive strength (MPa) |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|-----------------|---------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                       |                       |              |            |                 | Initial                   | Final | 0.5d*                      | 1.5d  | 2d    | 2.5d  | 7d    | 14d   | 28d   |
| 5                | 24                    | 1                     | 0.001        | 150        | 5.0             | 23:00                     | 32:00 | 0                          | 0.92  | 3.18  | 6.60  | 21.97 | 28.67 | 34.35 |
|                  | 27                    | 1                     | 0.0005       | 165        | 6.5             | 23:30                     | 30:00 | 0                          | 0.65  | 2.50  | 6.90  | 24.45 | 30.86 | 36.89 |
|                  | 30                    | 1                     | 0.0005       | 145        | 5.3             | 21:00                     | 27:10 | 0                          | 0.73  | 4.04  | 9.20  | 27.63 | 36.00 | 39.99 |
|                  | 35                    | 1                     | 0.001        | 165        | 5.5             | 24:30                     | 34:00 | 0                          | 0     | 3.72  | 7.43  | 25.94 | 35.15 | 38.00 |
|                  | 40                    | 1                     | 0.001        | 165        | 5.5             | 30:00                     | 38:30 | 0                          | 0     | 2.68  | 6.68  | 29.86 | 36.79 | 41.99 |
| 10               | 24                    | 1                     | 0.001        | 140        | 5.5             | 21:30                     | 27:30 | 0                          | 3.93  | 7.12  | 10.59 | 21.97 | 24.70 | 27.13 |
|                  | 27                    | 1                     | 0.0005       | 145        | 5.3             | 17:20                     | 24:20 | 0                          | 5.08  | 9.26  | 13.03 | 24.82 | 25.16 | 29.03 |
|                  | 30                    | 1                     | 0.0005       | 145        | 4.8             | 17:30                     | 23:50 | 0                          | 3.50  | 8.74  | 15.61 | 26.53 | 27.36 | 29.92 |
|                  | 35                    | 1                     | 0.001        | 160        | 5.8             | 17:30                     | 24:20 | 0                          | 5.72  | 13.36 | 15.88 | 26.45 | 29.21 | 34.64 |
|                  | 40                    | 1                     | 0.001        | 165        | 5.0             | 22:00                     | 27:30 | 0                          | 3.25  | 16.79 | 18.25 | 27.88 | 32.60 | 38.20 |
| 20               | 24                    | 1                     | 0.001        | 150        | 5.5             | 15:00                     | 17:50 | 0                          | 12.98 | 16.19 | 18.71 | 22.30 | 27.94 | 27.76 |
|                  | 27                    | 1                     | 0.001        | 160        | 5.1             | 14:00                     | 17:00 | 0                          | 15.15 | 18.60 | 20.33 | 25.41 | 28.57 | 28.34 |
|                  | 30                    | 1                     | 0.001        | 145        | 3.7             | 11:30                     | 15:10 | 0                          | 20.08 | 22.10 | 24.22 | 27.67 | 32.58 | 32.82 |
|                  | 35                    | 1                     | 0.0015       | 170        | 4.1             | 11:30                     | 14:00 | 0                          | 17.79 | 25.60 | 26.38 | 33.92 | 36.05 | 36.27 |
|                  | 40                    | 1                     | 0.0015       | 155        | 3.6             | 11:00                     | 13:20 | 0                          | 23.24 | 26.54 | 28.34 | 37.42 | 38.95 | 45.07 |

\* d : day (age)

## 2.4 実験方法

調合をTable-4に示す。コンクリートはPan-mixerを使って骨材とセメントを一度に投入して1分間混合した後、AE減水剤と流動化剤を添加した練混ぜ水を投入してさらに2分間練り混ぜた。製造したコンクリートは圧縮強度試験用に $\phi 100 \times 200$  mmのモールド、凝結試験用に $100 \times 100 \times 400$  mmのモールドに成形した。

大型恒温恒湿チャンバーで温度5, 10, 20℃、湿度60 $\pm$ 5%の条件に保たれた試験体は、凝結に達してから脱型し、以後チャンバー内で同じ条件に気乾養生した。凝結時間測定用の試験体は、モルタルを分離採取して製造し、チャンバー内で<KS F 2436, 貫入試験によるコンクリートの凝結時間試験方法>に準じて測定した。圧縮強度は<KS F 2405, コンクリートの圧縮強度試験方法>に基づいて測定した。

## 3. 実験結果および考察

本研究で行ったコンクリートの設計強度による躯体工事の工期短縮効果の実験結果をTable-5に示す。

### 3.1 凝結

Figure-1は、設計強度と養生温度による凝結時間を示す。

まず、5℃で養生した場合、設計強度30MPaの試験体が27時間で最も早く終結に達し、40MPaの場合、終結まで約38時間かかった。両者の間に約11時間違いが生じたが、全体として設計強度の違いによる凝結時間の傾向は確認されなかった。養生温度10℃の場合にも設計強度の大小との相関は見られなかった。24MPaと40MPaの試験体が終結まで約28時間、他の試験体が約24時間となった。既存の理論<sup>15)</sup>によれば、W/Cが低くなるほど凝結が促進されると報告されているが、養生温度が低い場合には、その影響が大きくないことが分かった。したがって、外気温度5~10℃程度の環境でコンクリートを打設する時には、凝結促進剤、急結剤のような化学混和剤を使

用したり、保温養生をして凝結時間をコントロールする必要があると考えられる。また、Table-5に示したように、5℃および10℃の実験の中で30MPaと27MPaの調合は、使用されたAE減水剤の量が他の調合よりも少なかったもので、設計強度と関係なく、最速の凝結特性を示した。したがって、養生温度が低い場合、AE減水剤の量が凝結に及ぼす影響は大きいと判断される。AE減水剤は、フレッシュコンクリートのスランプと空気量の目標性能を満足させるために使用したが、使用量の増加によって凝結時間が遅くなるので、注意する必要があると考えられる。一方、20℃で養生した場合には、設計強度が大きいほど、凝結時期が早いことが確認された。40MPaが約13時間、24MPaが約18時間となった。

Figure-2は、設計強度と養生温度による始発および終結時間を示したものである。養生温度5, 10, 20℃の始発時間は、それぞれ21~30, 17~27, 11~15時間となり、終結時間は、それぞれ27~38, 24~28, 13~18時間で測定

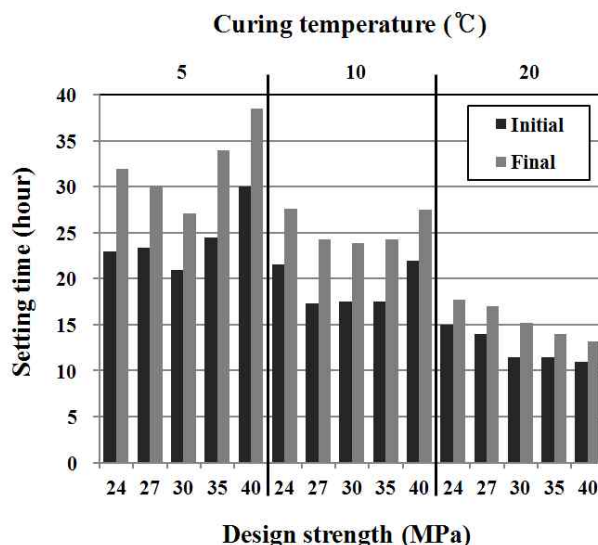


Figure-2 Initial and final setting time according to curing temperature and design strength

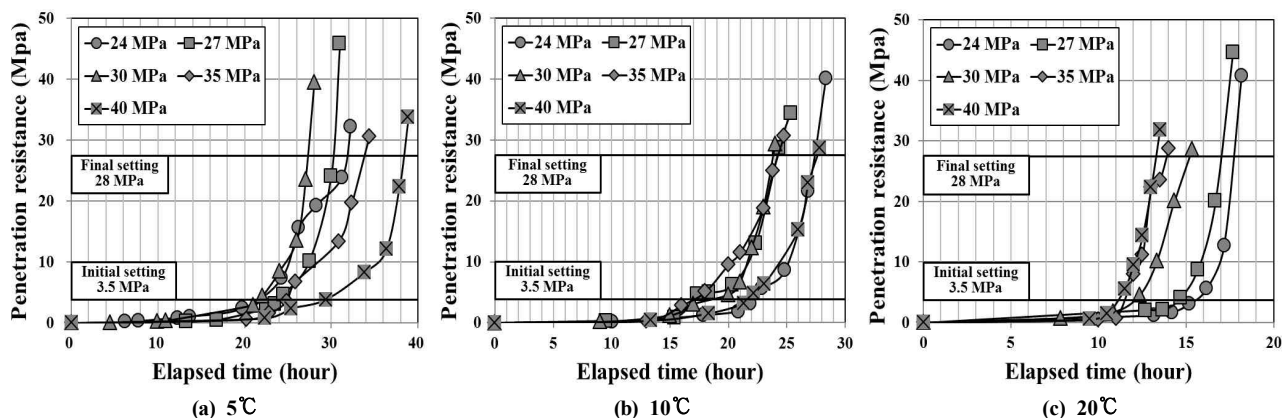


Figure-1 Results of setting time test according to curing temperature and design strength

され、凝結特性は養生温度に応じて大きな差を示した。特に設計強度40MPaの場合には、5℃に比べて20℃の条件で終結時間は25時間も差が生じた。また、始発から終結までの時間は養生温度について、それぞれ6～10、5～7、3～4時間で現れ、コンクリートの初期硬化における養生温度の影響が非常に大きいと考えられる。一方、設計強度の大小と凝結時間の間には20℃の条件を除いて相関が見られない結果となった。

### 3.2 強度発現特性

#### (1) 初期強度発現特性

Figure-3～5は、養生温度による初期強度発現特性を型枠の解体時期の基準に合わせて示したものである。

5℃で養生した試験体の場合、材齢2日の圧縮強度が約2.5～4.0MPaを示し、この時期の強度の大小に及ぼす設計強度の影響は小さいことが分かった。材齢2.5日では約6.6～9.2MPaの水準を示し、垂直型枠の解体時期である5MPaを上回ることが確認された。したがって、垂直型枠の場合、設計強度に関係なく、コンクリート打設後約2日後に解体作業を行うことができると判断される。一方、水平型枠の解体時期である14MPaに到達するまでの各試験体の材齢は、1日程度の差が生じた。設計強度30MPaの場合、高く設計された試験体よりやや早い強度発現を示した。しかし、他の試験体の場合、設計強度、40、35、27、24MPaの順に14MPaの圧縮強度を満足している。今回行った範囲では垂直型枠は、30MPaの場合24MPaと比べて約0.8日の短縮効果を持つ結果となった。

養生温度10℃の場合、材齢1.5日の圧縮強度は3.3～5.7MPaで5℃の条件よりやや高い値を示した。特に、設計強度27、35MPaの場合、垂直型枠の解体基準である5MPaを超えたが、残りの実験群では5MPaに達していなかった。しかし、5℃の条件と同様に5MPaの強度発現にかかる養生時間の差が大きくないので、型枠の解体時期の短縮効果は小さいと考えられる。一方、材齢2日の圧縮強度は、設計強度別に大きな違いが生じた。設計強度40MPaの試験体は、水平型枠の解体基準である14MPaよりも高い16.8MPaを示し、水平型枠の早期解体ができると判断される。また、材齢2.5日で圧縮強度は10.6～18.3MPaとなり、設計強度の大小によって圧縮強度の違いが大きくなった。水平型枠の解体時期と関連して、設計強度30MPa以上では、工期の短縮に大きな効果がないが、設計強度24MPaを基準に比較すると約1～2日の工期短縮効果が現れると考えられる。

一方、20℃で養生した場合、5、10℃の条件と比較して、急激な初期強度発現パターンを示した。すべての条件でコンクリート打設後遅くとも1.5日以内に垂直型枠を解体することができると判断される。また、1.5日材齢で13.0～23.2MPa水準を示し、5、10℃の条件より非常に大

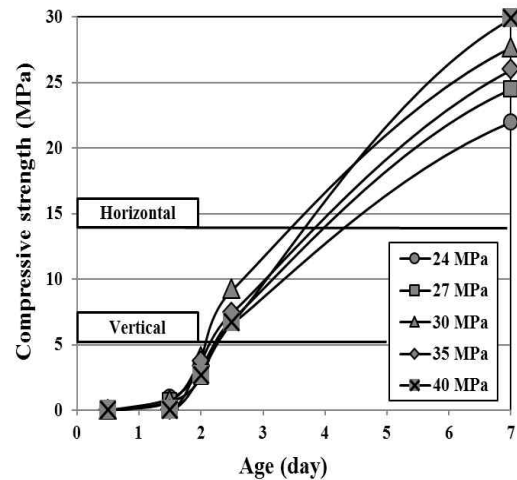


Figure-3 Properties of early strength development - 5℃

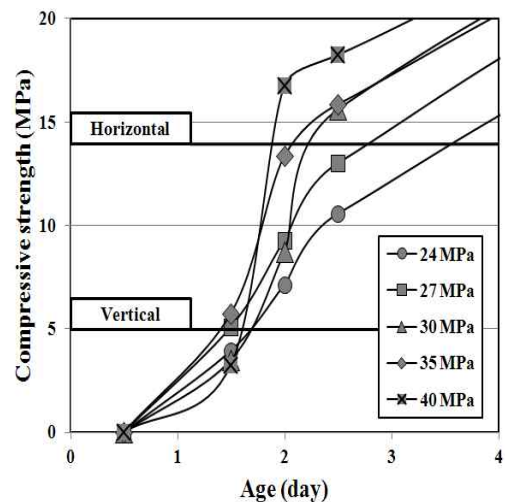


Figure-4 Properties of early strength development - 10℃

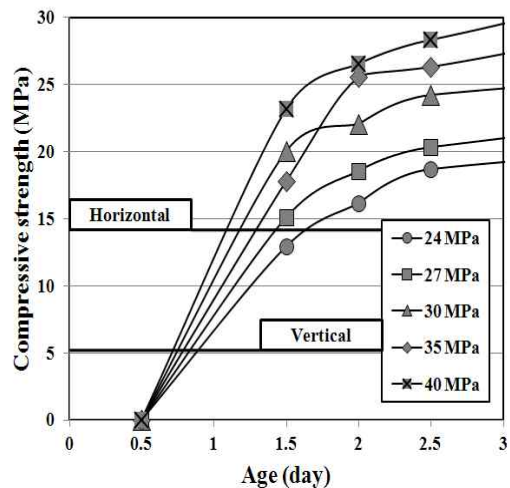


Figure-5 Properties of early strength development - 20℃

きい強度値を現わした。初期強度発現における温度の影響が非常に重要であると判断することができる。水平型枠の場合でも、すべての条件で材齢1.5日以内に解体することができると考えられる。

一方、材齢0.5日では、養生温度および設計強度に関係

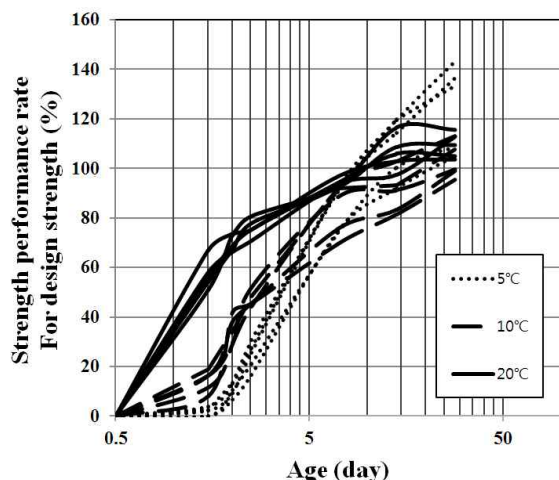


Figure-6 Properties of early strength development according to curing temperature

なく、すべての試験体が低強度だったので、圧縮強度を測定することができなかった。20℃の養生温度を確保しても、前日の午後に打設を行った場合、翌日の午前には、どのような作業もできないと判断される。

## (2) 養生温度による強度発現特性

Figure-6は、各設計強度に対する強度発現率を養生温度によって示したものである。養生温度が高いほど、初期材齢の強度発現率は急激に増加する傾向となっている。材齢2日では、5、10℃の温度条件に対して、それぞれ10、35%水準の強度発現率を示した。一方、20℃で養生した場合、約70%まで強度が発現された。養生温度5℃については1.5日までの強度増進がほとんどなかったが、以降持続的に増加するパターンを見せた。特に、28日材齢で最大140%の強度発現率を示した。10℃で養生した場合、材齢5日までは5℃の条件より強度発現率が高かったが、その後には緩やかに増加することが分かった。最終的には設計強度に到達するまでの時間は20℃が最も早く10℃の条件で最も遅いことが確認された。

## 3.3 28日の圧縮強度

躯体工事における型枠の解体時期を検討するために実施した本実験で、初期材齢の強度特性は最も重要な要因である。しかし、実際の構造物の安定性と耐久性を最終的に決定するのは長期強度であるため、28日間養生した試験体の圧縮強度を測定した結果をFigure-7に示す。

5℃ - 35MPaの条件を除いてすべての試験体で、設計強度上昇により圧縮強度は増加した。また、10℃ - 40MPaの試験体を除いてすべての設計強度を上回る。

養生温度による特性を見ると、10、20℃で養生した場合、それぞれの強度水準別にお互いにほとんど同じような値を示した。一方、5℃の条件では、設計強度40MPaの調合を除いて全体として高い強度を示し、打設及び養生の時のコンクリート温度が低いほど、長期強度は大きく

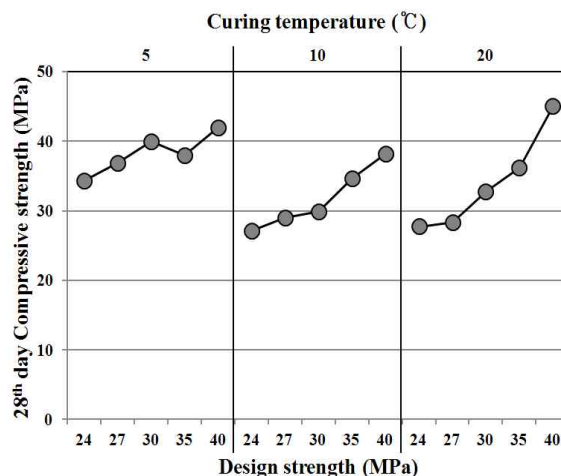


Figure-7 28<sup>th</sup> day compressive strength according to curing temperature and design strength

なる傾向が確認できた。Figure-6に示すように、材齢初期に急激に強度が増加することよりも徐々に増加する区間がある必要があり、長期的な圧縮強度に有利であると判断される。また、初期強度が大きいコンクリートは乾燥収縮や温度ひび割れなどの問題を伴うため、これに対する品質管理も必要であると考えられる。

## 3.4 工期短縮の効果

Figure-8は実験結果によって達成可能な垂直型枠、水平型枠および支保工の解体時期について示す。

垂直型枠の解体時期の短縮効果は、5、10、20℃でそれぞれ0.2、0.3、0.2日程度となり、垂直型枠の解体時期である5MPaを達成するために必要な材齢区間では、設計強度増進による短縮効果が小さいことが分かった。また、養生温度が増加するにつれて、最大1.5日の差が現れ、垂直型枠の解体時期の短縮に影響を与える要因は養生温度が支配的であると判断される。

水平型枠の場合、5℃の条件で24MPaと比べて30MPaは約0.8日の短縮が可能であった。10℃では、27または30MPaの場合約0.8～1.5日程度水平型枠の解体時期を早めることができる。一方、20℃の場合のコンクリートの設計強度を増加させることによって、短縮できる工期は最大0.5日程度であり、これは材料費の増加を考慮すると、型枠の解体時期の短縮のための方法としては、やや適切でないと判断される。

支保工の場合、解体時期をそれぞれの設計強度と規定しており、設計強度が増加するほど解体までの材齢は増加することが分かった。また、10℃の条件で設計強度を満足するために必要な時間が最も大きいことが分かった。

総合的な分析の結果、早い型枠の解体時期の確保のためには、設計強度を増加させる方法よりも、製造および養生過程での温度コントロールが効果的と判断される。

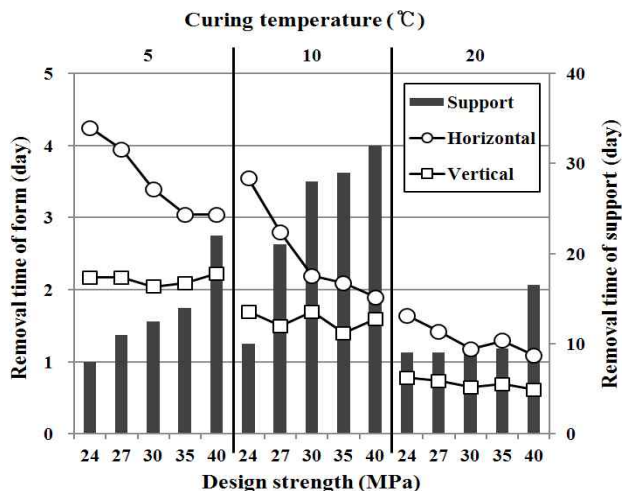


Figure-8 Removal time of form and support according to curing temperature and design strength

しかし、養生温度10℃の条件では、設計強度を増加させる方法も、工期短縮の方法として妥当性があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 10℃以下の条件で設計強度による凝結の特性には差があったが、その影響は小さい。
- 2) 5℃および20℃の条件では、設計強度を高める方法による型枠の解体時期の短縮効果が大きくなかった。
- 3) 今回検討を行った範囲では、型枠の解体時期を早めるためには、設計強度を高く設計することより製造および養生過程における温度管理が効果的であると判断される。ただし、10℃の条件の場合、27、30MPaで強度設計をすると、約0.8～1.5日の工期を短縮することができると期待される。
- 4) 本研究で得られた結果を適用して共同住宅の躯体工程を5day/cycleに下げることができる方法を提示することができるが、材料費の増大を招くため、今後経済性分析による検証が必要である。

#### 参考文献

- 1) 金俊鎬：工期短縮のためのシステムフォームの現場適用性評価，大韓建築学会秋季学術発表大会論文集，

Vol.26, No.1, pp. 437~440, 2006.10

- 2) 主善優ほか：RC造共同住宅の躯体工期短縮とコスト算定の改善に関する研究，大韓建築学会秋季学術発表大会論文集，Vol.27, No.1, pp. 667~670, 2007.10
- 3) Ashraf M. Elazouni, Estimating : The Acceptability of New Formwork systems Using Neural Networks, Journal of Construction Engineering and Management, pp. 33, 2005
- 4) 崔誌祐：セメントの種類および養生温度による早強コンクリートの工学的特性，公州大学修士論文，pp. 94, 2013.2
- 5) Japan Concrete Association : Cement and Concrete, pp. 34~35, 1996.
- 6) 宋太浹ほか：液状早強剤を使用したコンクリートの初期強度特性に関する研究，韓国コンクリート学会春季学術発表大会論文集，Vol.18, No.1, pp. 469~472, 2006.5
- 7) 韓千求ほか：早強性混和剤の種類によるコンクリートの物理的特性，清州大学産業科学研究論文集，Vol. 26, No.2, pp. 1~6, 2009.2
- 8) 姜昌雲ほか：コンクリートの初期強度発現特性に関する研究，韓国コンクリート学会秋季学術発表大会論文集，Vol. 20, No.2, pp. 541~544, 2008.10
- 9) 李鍾烈ほか：コンクリートの早期強度発現による耐久性に関する研究，韓国コンクリート学会秋季学術発表大会論文集，Vol. 19, No.2, pp. 629~632, 2007.10
- 10) 笠井芳夫，小林正児：セメントコンクリート用混和材料，pp. 325~345, 1986.
- 11) 蘇廣鎬ほか：微粒子セメントを用いた早強コンクリートの現場実用化に関する研究，大韓建築学会論文集構造系，Vol.25, No.6, pp. 99~106, 2009.6
- 12) 韓国コンクリート学会：コンクリート工事標準仕様書，2009.
- 13) 大韓建築学会：建築工事標準仕様書，2013.
- 14) 大韓土地住宅公社：LH専門仕様書，2012.
- 15) 全英植：高強度コンクリートの工学的特性に及ぼす水セメント比および単位水量の影響，忠南大学博士論文，pp. 10~11, 2002.2