

[22] 蒸気養生による RC セグメントの適正養生条件および 4 週強度の推定について

正会員 ○守屋一光 (帝都高速度交通営団建設本部)

島山 博 (帝都高速度交通営団建設本部)

1. まえがき

シールド工事の掘削方式は、これまでの手掘りから近年は機械掘りが多くなり、その1日当りの掘削進捗は手掘りの4~5倍である。したがって工事に用いる鉄筋コンクリートセグメント(RCセグメント)の製作も、このような工事の進捗速度に合せ、型枠の回転もこれまでの1日1~1.5サイクルから、2~3サイクルに上げる必要が生じてきた。以下はコンクリートの材料として、普通ポルトランドセメント、碎石、砂または砕砂に高性能減水剤を用い、常圧蒸気養生(蒸気養生)条件の組合せを変えて実験を行い、蒸気養生によるRCセグメントの製作について、1日3サイクルの型枠の回転を前提とする養生条件を提案するものである。また、早期に製品の品質を確認するため、蒸気養生によるコンクリートの4週強度を脱型強度から推定する方法についても、合せて検討を行う。

2. 養生方法、結果

実験は次の6項目について行った。実験に用いたセメント、骨材の品質は表-1.2に、コンクリートの配合と練上り結果は表-3に示す。試料のコンクリートは、プラントミキサー(強制パン型1.5m³)で練混ぜたものを用い、成形はφ10×20cmの円柱型枠を用い、締固めは棒型バイブレーターによった。

(T-1) 蒸気養生のさいの温度上昇速度が、コンクリートのひびわれの発生に及ぼす影響について検討するため、温度上昇速度と前養生時間を主要因とし(表-4参照)、ひびわれの発生を観察した。蒸気養生は最高温度=65℃、等温養生時間=2Hで、ひびわれの確認は送気停止1H後に脱型した供試体とセグメントについて行った。供試体には長さ5cm、巾0.06~0.1mm程度のひびわれが、上部付近に数ヶ所水平方向に発生した。セグメントには、背面に長さ20~30cm、巾0.1~0.2mm程度のひびわれが円曲線に直方向の鉄筋上に、10cm位の等間隔で発生した。温度上昇速度とひびわれの関係は表-4に示す。

(T-2) 高温度による養生時間の短縮について検討するため、最高温度と等温養生時間を主要因とし(表-5参照)、コンクリートの圧縮強度を求めた。養生方法は前養生=2時間、温度上昇速度=20℃/Hである。脱型強度は送気停止1H後に行った。σ₂₈は、送気停止1H後養生槽から取出し試験室放置、成型48H後脱型し水中(20±2℃)5日、以後材令迄試験室放置(気乾養生)。結果は表-5に示す。

(T-3) 前養生時間と等温養生時間を主要因とし(表-6参照)、コンクリートの圧縮強度を求め、効率の良い組合せについて検討した。養生方法は最高温度=65℃、温度上昇速度=20℃/Hである。脱型強度は送気停止後直ちに行った。σ₇、σ₂₈、

σ₉₁は送気停止後徐冷、成型20H後養生槽から取出し試験室放置、成型48H後脱型し水中(20±2℃)5日

表-1 セメントの品質

| 記号 | 比重 | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | | |
|-----------|------|-----------------------------|-----|-----|
| | | 3日 | 7日 | 28日 |
| T-1,2,5,6 | 3.15 | 136 | 231 | 417 |
| T-3 | 3.17 | 123 | 212 | 408 |
| T-4 | 3.17 | 136 | 232 | 411 |

表-2 骨材の品質

| 材料 | 記号 | 産地 | 比重(表乾) | 吸水率(%) | FM | ロサンゼルスすりへり減量(%) |
|-----|-----------|-------|--------|--------|------|-----------------|
| 細骨材 | T-1,2,5,6 | 上里 | 2.60 | 1.6 | 2.80 | - |
| | T-3 | 富津,田沼 | 2.62 | 1.5 | 2.72 | - |
| | T-4 | 利根川 | 2.63 | 2.0 | 2.44 | - |
| 粗骨材 | T-1,2,5,6 | 田沼 | 2.63 | 0.7 | 7.15 | 14.4 |
| | T-3 | 田沼 | 2.62 | 0.9 | 6.95 | 15.5 |
| | T-4 | 秩父 | 2.70 | 0.8 | 6.80 | 12.3 |

表-3 コンクリートの配合と練上り結果

| 項目 | 記号 | 1 T-2 T-3 T-4 T-6 | | | | |
|-------------------|------|-------------------|------|------|------|------|
| | | 5 | | | | |
| W/C (%) | | 34.2 | 39.0 | 37.0 | 36.0 | 36.0 |
| S/a (%) | | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 4.0 | 4.0 |
| 単位量 | セメント | 430 | 390 | 412 | 390 | 390 |
| | 水 | 147 | 152 | 152 | 140 | 140 |
| | 細骨材 | 727 | 722 | 715 | 775 | 766 |
| | 粗骨材 | 1150 | 1178 | 1166 | 1194 | 1162 |
| Kg/m ³ | 混和剤 | 4.3 | 3.9 | 4.12 | 0.98 | 3.9 |
| スランプ (cm) | | 3.5 | 2.0 | 2.5 | 1.5 | 1.7 |
| 空気量 (%) | | 1.9 | 1.3 | 1.3 | 2.0 | 1.6 |
| コンクリート温度 (℃) | | 17 | 21 | 21 | 25 | 23 |

表-4 温度上昇速度とひびわれの発生

(ひびわれなし○, 有×)

| 前養生時間 (H) | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|----|----|----|----|
| 温度上昇速度 (℃/H) | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 供試体 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| セグメント | × | × | × | × |

表-5 最高温度と圧縮強度

| 最高温度 (℃) | 65 | | 70 | | 80 | | |
|----------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| 等温養生時間 (H) | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | |
| 圧縮強度 (kg/cm ²) | 170 | 193 | 182 | 218 | 221 | 253 | |
| | 28日 | 5.54 | 5.32 | 5.42 | 5.24 | 4.99 | 4.75 |

表-6 前養生時間 t₁と等温養生時間 t₂の組合せと圧縮強度

| t ₁ (H) | t ₂ (H) | W/C | 圧縮強度 (kg/cm ²) | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|-----|----------------------------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
| | | | W/C=0.39 | | | | W/C=0.37 | | | |
| | | | 脱型 | 7日 | 28日 | 91日 | 脱型 | 7日 | 28日 | 91日 |
| 2 | 2 | 265 | 220 | 450 | 572 | 631 | 240 | 479 | 600 | 675 |
| | 3 | 330 | 232 | 469 | 574 | 634 | 250 | 500 | 622 | 673 |
| | 4 | 395 | 258 | 478 | 618 | 620 | 267 | 504 | 604 | 670 |
| 3 | 1 | 220 | 143 | 409 | 552 | 603 | 167 | 455 | 603 | 671 |
| | 2 | 285 | 188 | 421 | 560 | 608 | 209 | 458 | 617 | 647 |
| | 3 | 350 | 210 | 411 | 564 | 608 | 241 | 449 | 601 | 658 |
| 4 | 0 | 175 | 66 | 402 | 596 | 639 | 81 | 431 | 634 | 665 |
| | 1 | 240 | 134 | 451 | 596 | 633 | 167 | 460 | 619 | 667 |
| | 2 | 305 | 172 | 425 | 586 | 641 | 207 | 455 | 615 | 683 |

、以後材令迄気乾養生をした。結果は表-6に示す。

(T-4) 送気停止後の徐冷方法を検討するため、①送気停止後供試体を脱型即浸水し、最高温度と水温(20℃)の差を主要因とし、コンクリートにひびわれの生ずる温度差を求め、②ひびわれが生じなかった温度差での浸水急冷と気中徐冷をした場合の圧縮強度を求めた。

①養生方法は前養生=2時間、温度上昇速度=20℃/H、最高温度×等温養生時間(℃×H)=60×3、70×2、80×1で、浸水急冷した供試体のひびわれの確認は成型48H後に行った。ひびわれは、温度差50℃迄は認められず60℃で発生した。

②養生方法の前養生時間と温度上昇速度は①と同じ、最高温度=65℃、等温養生=2時間で、急冷の場合浸水7H、以後材令迄気乾養生と浸水後材令迄水中養生の2種類の後養生をした。徐冷の場合は、送気停止後供試体を養生槽から取出し試験室放置、成型48H後に脱型、後養生は材令迄水中養生と材令迄気乾養生および脱型後水中7日、以後材令迄気乾養生の3条件で行った。結果は表-7に示す。

(T-5) 蒸気養生後の浸水期間を検討するため、材令28日迄の浸水期間を主要因としコンクリートの圧縮強度を求めた。養生方法は前養生=2時間、温度上昇速度=15℃/H、最高温度=65℃、等温養生=2時間で、送気停止後徐冷、成型24日後供試体を養生槽から取出し試験室放置、成型48H後脱型、後養生は材令迄水中養生と材令迄気乾養生および脱型後水中1~7日、以後材令迄気乾養生の3条件で行った。比較のための自然養生での供試体は成型後試験室放置、成型48H後脱型、後養生は蒸気養生の場合と同じ条件による。結果は表-8に示す。

(T-6) 脱型強度σ₀から28日強度σ₂₈を推定する方法を検討するため、T-1、T-2の結果と営団工事用セグメントの条件で行った試験結果から、それぞれσ₀とσ₂₈の関係式を求めた(表-9参照)。実績値と推定値の結果は表-10に示す。工事用セグメントの養生方法は、前養生=2時間、温度上昇速度=20℃/H、最高温度=60℃、等温養生=2時間で、送気停止1H後脱型し水中(20±2℃)5日、以後材令迄気乾養生を行った。

3. 考察

(1) 温度上昇速度

温度上昇速度とひびわれの発生は前養生時間と相関性があり、表-4の結果から、ひびわれが生じなかった温度上昇速度と前養生時間は、20℃/H=2H、30℃/H=3H、35℃/H=4Hで、上昇速度を上げ最高温度到達時間を短縮しても前養生時間が長くなり、全体の養生時間としてはむしろ長くなるので得策ではなく、温度上昇速度は20℃/Hの方が全体の養生時間の短縮には得策である。

(2) 最高温度

表-5の結果から、脱型強度は温度と等温養生時間に比例し高い値を示すが、σ₂₈では逆に低くなっている。このことは温度の強度に及ぼす影響として一般に良く知られているが、高温による強度の損失は結果から65℃で

表-8 浸水期間と圧縮強度

| 浸水 (日) | 蒸気養生 | | 自然養生 | |
|--------|-----------------|------|-----------------|------|
| | σ ₂₈ | 弾性比 | σ ₂₈ | 弾性比 |
| 0 | 403 | 0.78 | 360 | 0.58 |
| 1 | 447 | 0.87 | 524 | 0.84 |
| 2 | 457 | 0.89 | 545 | 0.88 |
| 3 | 463 | 0.90 | 556 | 0.90 |
| 4 | 473 | 0.92 | 573 | 0.92 |
| 5 | 476 | 0.93 | 578 | 0.93 |
| 6 | 477 | 0.93 | 596 | 0.96 |
| 7 | 491 | 0.95 | 606 | 0.98 |
| 26 | 514 | 1.00 | 620 | 1.00 |

表-7 急冷、徐冷と圧縮強度

| 後期養生 | σ ₂₈ (kg/cm ²) |
|----------|---------------------------------------|
| 急冷 | 460 |
| 水中7日以後気乾 | 542 |
| 水中 | 586 |

の σ_{28} を1とすれば平均で、 $70^{\circ}\text{C}=0.97$ 、 $80^{\circ}\text{C}=0.9$ となり、最高温度が 70°C をこえると強度損失は急に大きくなる。この強度損失と養生時間の短縮を考慮すれば、必要な脱型強度が得られる範囲で、最高温度は低目で等温養生時間も短かくする方が得策であり、最高温度は 65°C 、等温養生時間は1~2H程度で良い。

(3) 前養生時間と等温養生時間

コンクリートの強度に及ぼす養生温度の熱効率を、温度と養生時間の積(マチュリチー)で表わすと、強度はマチュリチーに比例すると言われているが、表-6の結果では初期強度ではこの関係が明らかであるが、材令が進むにつれてマチュリチーの影響は小さくなる傾向を示している。前養生時間と等温養生時間の組合せでは、前養生時間が短かくマチュリチーの大きい場合が効率も良い。結果からは、前養生2時間の組合せが短期、長期強度とも高い値を示し、営団用RCセグメントの条件(設計基準強度 $\sigma_{28}=480\text{kg/cm}^2$ 、配合強度 $=550\text{kg/cm}^2$ 、脱型強度 $=150\text{kg/cm}^2$)では、前養生=2時間、等温養生=2時間で、所要の条件に適合している。

(4) 徐冷方法

表-7の結果では、浸水急冷での σ_{28} の方が気中徐冷の場合よりも高い値を示しているが、気中徐冷の場合に送気停止から脱型迄の間に、急激な水分の蒸発が生じたためと思われる。送気停止後製品を取出すさい急冷によるひびわれ防止のため、JISでは養生室の温度を徐々に下げ、外気温と大差がなくなってから製品を取出すことになっているが、一般にこの養生室内の徐冷時間は短かく、気中徐冷によることが多い。この場合はむしろ急激な水分の蒸発に対する注意が肝要で、ひびわれの発生しない程度の温度差であれば浸水急冷による方が良い。

(5) サイクルタイム

工場製品として、経済的で効率の良いサイクルタイムを一律に決めることは困難であるが、蒸気養生時間に関わる要因として、T-1~T-4の結果から1サイクルの養生時間を求めると、前養生=2時間、温度上昇速度 $=20^{\circ}\text{C}/\text{H}$ 、最高温度 $=65^{\circ}\text{C}$ 、標準室温 20°C で最高温度到達時間 $=2.5\text{H}$ 、等温養生=2時間、送気停止即脱型で、養生時間は6.5Hである。1サイクルの工程を、①型枠掃事、組立、②鉄筋かごの設置、③コンクリート打、④前養生、⑤送気、⑥製品の取出し、⑦脱型、に大別すると、④~⑥の養生時間が6.5H、①~③と⑦の作業時間は1Hで、一つの養生槽で数体のセグメントを取容することを考慮しても1日3サイクルの工程は可能である。

(6) 蒸気養生後の浸水期間

表-8の結果では、蒸気、自然養生いずれの場合も、 σ_{28} は浸水期間に比例し増進しているが、その影響は浸水初期に大きく、脱型後2~3日の浸水で、28日水中養生(脱型後26日間)した強度の90%に達し、その後は浸水期間の増加とともに強度の伸びは緩やかとなり、初期材令での湿潤養生の重要さを示唆している。

促進養生の場合初期に高強度が得られるため、一般的なコンクリート製品では、後養生の湿潤養生は省略または簡略化されるケースが多い。RCセグメントは高強度であり、また水密性を要する製品であるため、成型後は充分な湿潤養生を行い、製品の品質の向上を計る必要があるが、製品を長期間水中養生を行うことは設備上困難であり、適切な浸水期間を定めなければならない。結果から、浸水7日以上強度の伸びはかなり緩やかで、後養生としての浸水期間は、最低3日最大7日で充分である。

(7) 脱型強度から28日強度の推定

表-10の結果から、T-1、T-2の脱型強度 σ_0 と28日強度 σ_{28} の関係を図-1に示すと、T-1の場合を除き σ_0 と σ_{28} の間に相関性を見出すことは困難である。次に σ_0 と σ_{28} の強度比を σ_0 の増進率 m として図示すると、図-2、図-3に示すように、 σ_0 と m は逆比例の関係にある。結果から σ_0 と m の関係式を求め(表-9参照)曲線を図-2、図-3に示す。関係式から求めた推定値 σ_{28} の誤差は、T-1、T-2は平均で $\pm 2.3\%$ 、T-6は $\pm 4.3\%$ 、T-6の関係式を用いた営団11号線シールド工用セグメントの管理試験結果(昭和56年8月~12月:表-10参照)では $\pm 4.5\%$ であった。蒸気養生を行ったコンクリートの長期強度は、成型方法、蒸気養生条件および後期の養生条件を同じとするならば、脱型強度にはあまり支配されないうで、セメント効率、水セメント比および後期養生としての水中日数をベースとした強度を基準にして、ある強度範囲内に分布すると言える。

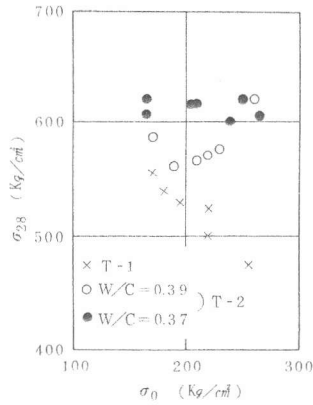


図-1 σ_0 と σ_{28}

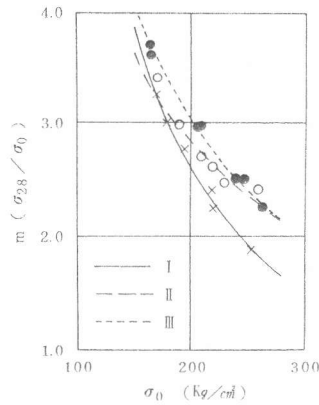


図-2 σ_0 と m (T-1, T-2)

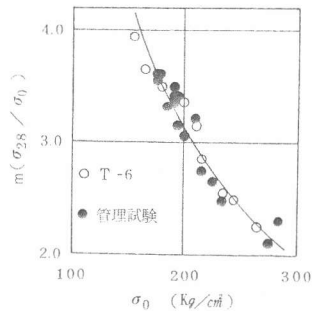


図-3 σ_0 と m (T-6)

表-9 σ_0 と m の関係式

| 記号 | $m = a \cdot \sigma_0^{-b}$ | | 曲線 |
|---|-----------------------------|-------|--------------|
| | a | b | |
| T-1 | 3.396 | 1.353 | I |
| T-2 | 2.76 | 0.862 | II W/C=0.39 |
| | 7.40 | 1.038 | III W/C=0.37 |
| T-6 | 1.274 | 1.134 | IV |
| $\sigma_{28} = m \cdot \sigma_0 = a \cdot \sigma_0^{1-b}$ | | | |

表-10 σ_{28} と m の実績値と推定値

| 記号 | σ_0 (kg/cm²) | σ_{28} (kg/cm²) | | m | |
|-----|------------------------|------------------------|------|------|------|
| | | 実績 | 推定 | 実績 | 推定 |
| T-1 | 170 | 554 | 554 | 3.26 | 3.26 |
| | 182 | 542 | 511 | 2.98 | 2.97 |
| | 193 | 532 | 530 | 2.76 | 2.75 |
| | 218 | 524 | 508 | 2.40 | 2.33 |
| | 221 | 499 | 505 | 2.26 | 2.29 |
| T-2 | 253 | 475 | 482 | 1.88 | 1.91 |
| | 172 | 586 | 562 | 3.41 | 3.27 |
| | 188 | 560 | 568 | 2.98 | 3.02 |
| | 210 | 564 | 577 | 2.69 | 2.75 |
| | 220 | 572 | 581 | 2.60 | 2.64 |
| | 232 | 574 | 585 | 2.47 | 2.52 |
| | 258 | 618 | 594 | 2.40 | 2.30 |
| | 167 | 619 | 609 | 3.71 | 3.65 |
| | 167 | 603 | 609 | 3.61 | 3.65 |
| | 207 | 615 | 604 | 2.97 | 2.92 |
| | 209 | 617 | 604 | 2.95 | 2.89 |
| | 240 | 600 | 601 | 2.50 | 2.50 |
| | 241 | 601 | 601 | 2.49 | 2.49 |
| | 250 | 622 | 600 | 2.49 | 2.40 |
| | 267 | 604 | 598 | 2.26 | 2.24 |
| T-6 | 156 | 618 | 648 | 3.96 | 4.15 |
| | 165 | 602 | 643 | 3.65 | 3.90 |
| | 180 | 630 | 635 | 3.50 | 3.53 |
| | 201 | 676 | 626 | 3.36 | 3.11 |
| | 208 | 655 | 623 | 3.15 | 3.00 |
| | 213 | 609 | 621 | 2.86 | 2.92 |
| | 234 | 599 | 613 | 2.56 | 2.62 |
| | 244 | 608 | 610 | 2.49 | 2.50 |
| | 267 | 604 | 603 | 2.26 | 2.26 |
| | 管理試験 | 173 | 614 | 639 | 3.55 |
| 177 | | 636 | 637 | 3.59 | 3.60 |
| 182 | | 651 | 634 | 3.58 | 3.49 |
| 185 | | 611 | 633 | 3.30 | 3.42 |
| 189 | | 632 | 631 | 3.34 | 3.34 |
| 191 | | 666 | 630 | 3.49 | 3.30 |
| 192 | | 652 | 630 | 3.40 | 3.28 |
| 195 | | 666 | 628 | 3.42 | 3.22 |
| 196 | | 615 | 628 | 3.14 | 3.20 |
| 202 | | 620 | 626 | 3.07 | 3.10 |
| 209 | | 668 | 623 | 3.20 | 2.98 |
| 214 | | 591 | 621 | 2.76 | 2.90 |
| 226 | | 604 | 616 | 2.67 | 2.73 |
| 234 | | 581 | 613 | 2.48 | 2.62 |
| 276 | | 579 | 600 | 2.10 | 2.17 |
| 283 | 651 | 598 | 2.30 | 2.11 | |

4. 結論

コンクリートの材料として、普通ポルトランドセメント、砕石、砂または砕砂、高性能減水剤を用い、型枠の回転1日2~3サイクルを前提とする、RCセグメントの蒸気養生の方法について、次のことが言える。

① 前養生 = 2時間、温度上昇速度 = 15~20℃/H、最高温度 = 60~65℃、等温養生 = 1~2時間、の条件で、脱型強度および28日強度（設計基準強度 = 450~480 kg/cm²）を満足し、1日2~3サイクルの工程が可能なサイクルタイムが得ることができる。

② 徐冷方法は、一般的に行われている気中徐冷の場合、急激な水分の蒸発に対する注意が肝要で、ひびわれの生じない程度の温度差であれば、むしろ送気停止後即脱型し浸水急冷による方が良い。

③ 蒸気養生後の後期養生としての、水中養生による強度への影響は、浸水初期に大きく表われ7日以上浸水では緩やかで、製品の品質向上を計り、後期養生として水中養生を行う場合の日数は、最低3日最大7日程度で充分である。

④ 早期材令での圧縮強度でコンクリートを管理すべく、脱型強度 σ_0 から28日強度 σ_{28} を推定する方法については、 σ_0 と σ_{28} の強度比を増進率mとして回帰曲線式を求め、 σ_{28} を推定する方法によったが、推定値の誤差は±5%未満であった。工場において材料、配合、養生条件の変化と、 σ_0 とmの相関を把握しておけば、この手法で σ_0 から σ_{28} を推定することは、かなりの精度で可能であると思われる。