

# 急速硬化によるコンクリート強度 即時判定方法に関する研究

## STUDIES ON A METHOD OF IMMEDIATE ESTIMATION OF CONCRETE STRENGTH USING QUICK HARDENING PROCESS

池田 尚 治\*  
By Shoji IKEDA

### 1. 結 言

コンクリートは、練り混ぜてから所要の強度が発現するまでに相当の期間を要する。このため普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを強度によって管理あるいは検査する場合、通常、材令 28 日における試験の結果が用いられている。コンクリートの強度には水、セメント、骨材、混和材料等の素材の品質、コンクリートの配合、空気量、打込み温度、養生方法、材令、など多くの要因が関与するため、これらの多くの影響を包含することのできる材令 28 日の強度試験の意義は極めて大きい。一方、コンクリートの品質管理、検査に対しては結果が判明するまでに期間がかかり過ぎ、試験結果を迅速に工事に反映することが困難である。近年コンクリート強度の早期判定に関する要望が高まっており、高温促進養生によって材令 24 時間後の強度を求め、これから材令 28 日の強度を推定する方法や、フレッシュコンクリート中のモルタルからセメントや水の量を分析し、その結果を用いてコンクリートの材令 28 日強度を間接的に推定する方法等が提案されている<sup>1)2)</sup>。これらの強度判定方法は、従来の材令 28 日の強度試験に比べると品質管理や検査に関して格段に優れた点を持つものであるが、なお必ずしも次のような点で十分な早期強度判定方法とはいえない面もある。すなわち材令 24 時間による促進強度試験は、結果の判明が 1 日後であるため、工事にその結果を迅速に反映するには必ずしも十分ではない。また、セメントや水の量を分析試験等によって求める方法は、分析などに要する時間は 1 時間程度と言われ迅速ではあるが、コンクリート中に有害物が混入している場合、セメント、砂、などの品質が変化した場合、混和剤が多量に混入された場合、コンクリートミキサなどの洗浄に伴って発生するスラッジが多量にコンクリート

中に混入された場合などでは、正しい強度判定を行うことが困難であると思われる。

コンクリート構造物の安全性、信頼性を高めるには、コンクリートの品質をある程度の精度で迅速に判定し、その結果を工事の管理や検査に適用できるような管理、検査システムを確立することが極めて重要である<sup>3)</sup>。このためには、上述の方法も含めてコンクリート強度の迅速判定方法として可能性のあると考えられる種々の方法について調査研究し、その内から現時点でコンクリート工事の管理、検査に最も適した試験方法を見つけ、管理、検査システムに積極的に取り入れることが必要と思われる。本文は、以上の趣旨に基づいて行ったコンクリート強度迅速判定方法の一つの試みについての研究結果であって、種々の実験の結果、本研究の方法がコンクリート強度の迅速判定方法として一つの有力な方法になりうるということが認められたので、これまでに得た研究成果をここに述べるものである。

### 2. 急速硬化によるコンクリート強度判定の方法と特徴

本研究で提案する「急速硬化によるコンクリート強度判定方法」は、型枠内に打込む前あるいは打込んだ直後のフレッシュコンクリートから試料を採取し、これから得たモルタルを急速硬化して材令 1~3 時間で圧縮試験を行い、その結果から材令 28 日におけるコンクリートの圧縮強度を推定するものである。短時間に強度を増大させる方法として本研究において急結剤と高温養生との組合せの早期強度に対する相乗効果を見出したので、これを応用することを試みたのである<sup>4)</sup>。急結剤はトンネル覆工あるいは、のり面防護のための吹付けコンクリートなどに用いられており、各種の急結性薬剤の特性はある程度明らかにされている<sup>5)6)</sup>。また、高温養生による初期強度の増進作用は、すでに材令 24 時間による促進

\* 正会員 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科

強度試験や、コンクリート工場製品などの製造に広く応用されている<sup>7)</sup>。しかしながら、両者を同時に応用して初期強度を増進させる方法については、現在まで全く研究されておらず、またその相乗特性についても全く報告されていない。これは、急結剤が混入されたコンクリートは初期強度の増大は著しいが長期強度は一般に相当劣ることが認められており、したがって、高温養生と組合せても実用的には利用価値の少ないことが予想されるからと思われる。コンクリート構造物やコンクリート製品を製造する場合には長期強度の劣性は好ましからざる現象であるが、本研究のように短時間のうちにコンクリートの品質を判定しようとする場合には、むしろ早期に強度が安定するために好ましい現象といえる。

急結剤には各種のものがあるが、一般にこれらをフレッシュコンクリート中に混入すると数十秒のうちにコンクリートは流動性を失って凝結する。したがって、このようなコンクリートを型枠に詰めたり、締め固めたりすることは極めて困難である。本研究では、ウェットスクリーニングしたモルタルを用いるために、急結剤の投入によってモルタルが相当に流動性を失っても、小さい型枠にこのモルタルを詰めるのは、コンクリートの場合とは異なり、十分に可能である。急結剤を適当量混入したモルタルは、急結剤投入後数分で凝固するので、これをすみやかに高温養生することが可能となり時間の短縮につながるものである。高温養生を行って短時間にその効果を発揮させるためには、なるべく早くモルタルなりコンクリートなりが一樣な高温状態に達するようにすることが必要である。このためにも、ウェットスクリーニングしたモルタルによる小型供試体を用いることが本方法のような場合には特に適していると思われる。

種々の実験の結果、フレッシュコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルに急結剤を一定量混入し、1~3時間高温養生した供試体の圧縮強度は、コンクリートの強度特性を支配する水セメント比にコンクリートと同様に支配されることが明らかとなり、したがって、急速硬化モルタルによる材令1~3時間の強度と材令28日の標準供試体によるコンクリート強度との間に極めて大きな相関性のあることが明らかになったのである。このことから、あらかじめ急速硬化モルタルと材令28日のコンクリート強度との関係を求めておくことによって、フレッシュコンクリートの材令28日強度をコンクリートがいまだ硬化する前にある程度の精度で推定することが可能なのである。

コンクリートの品質を総合的に判定するには強度試験の結果を用いるのが一般に最も適しており、このことは早期にコンクリート強度を判定する場合にもそのままあてはまるとと思われる。本研究の方法は以上に述べたよう

に直接水和反応による強度を求め、これを用いてコンクリートの強度を推定できる点の一つの特徴と思われる。

### 3. 急速硬化モルタルの性質

コンクリートは、セメントと水との化学反応によって徐々に強度が発現するのでコンクリートの強度はその硬化の過程での多くの因子の影響を受けることになる。急結剤の添加と高温養生とによる急速硬化方法は、複雑なセメントの水和反応にさらに新たな要素を加えることになるのでこれに対する種々の要因の影響の度合いを詳細に検討することが必要である。これらの検討を行うにあたり本研究ではまずモルタルを用いて基礎実験を行うこととした。すなわち、急速硬化モルタルの基礎特性として養生時間と強度、水セメント比と強度、急結剤量と強度などの関係を実験的に求め、急結剤と高温養生との相乗効果およびこの方法によるコンクリート強度判定法の可能性の検討を行った。引き続き、練りませ開始から急結剤投入までの時間、急結剤投入から高温養生開始までの時間、モルタルの練り上り温度、セメントと砂の比率、セメントの種類、混和剤の添加、有害不純物の添加などの要因が急速硬化モルタルの強度に及ぼす影響について実験を行って検討した。またブロッカー貫入試験によって急結剤の添加による急結特性についても検討を行った。

強度判定に用いる圧縮試験供試体は、4×4×16 cmのセメント強さ試験用の型枠の中央に仕切板を入れて作製した。仕切板を入れたのは曲げ試験を行わずに圧縮試験のみを行うことによって試験時間の短縮を計るためである。この寸法の供試体を用いることにしたのは短時間で供試体内部が一樣な高温になり易いこと、圧縮強度試験にキャッピングが不要であること、型枠がJIS R 5201に規定され精度のよいこと、硬練りモルタルでも比較的容易に突き固め、成型ができること、などの理由によるものである。供試体の高温養生には内容積70 cm立方の恒温恒湿チャンバを用い70°C 100% RHを標準とした。供試体の作製方法は、あらかじめモルタルを練りませ、これに急結剤の粉末を投入してから、30秒~1分間サジで十分に練りませ直ちに型枠に2層に分けて詰めた。急結剤の添加量はセメント重量の4%を標準とした。

実験には主としてセメントに普通ポルトランドセメント、急結剤にアルミン酸ソーダを主成分とするものを用いた。表-1に主として用いた普通ポルトランドセメントの化学成分および強度を示す。細骨材には粗粒率3.13(一部2.95)の川砂を用いた。

以下に実験の結果とその検討について要因別に述べる。

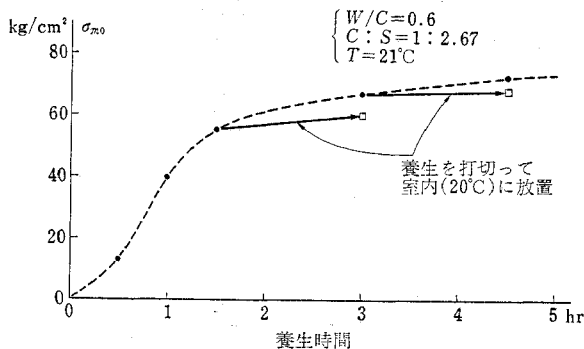
表一 セメントの試験成績表 (Aセメント)

種類：普通セメント，比重：3.15，比表面積（ブレン法）：3150 cm <sup>2</sup> /g										
化学成分	ig. loss 0.4	insol. 0.1	SiO <sub>2</sub> 22.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5.1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3.1	CaO 64.9	MgO 1.2	SO <sub>3</sub> 2.3	Total	99.2
比率係数	水硬率	2.09	活動係数	4.3	けい酸率	2.7	アルミナ鉄比	1.6	石灰飽和度	0.90
凝結	室温	20.0°C	湿度	91%	水量	27.6%	始発	2時間 20分	終結	3時間 35分
強さ	材令		1日		3日		7日		28日	
	曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )		—		34.1		48.8		73.5	
	圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )		—		148		238		410	

(1) 高温養生時間と強度との関係

急結剤を適当量混入したモルタルを高温養生すると水和反応が大幅に促進され急速にモルタルの強度が発現する。図一に水セメント比 60%，砂とセメントの比率 1:2.67 のモルタルにモルタル重量の1%の急結剤を混入し，70°C 100% RH で高温養生した場合における養生時間と強度との実験結果を示す。これから明らかなようにモルタル強度は材令2時間程度までの間に大きく上昇し，それ以降はほぼ安定した状態になっている。養生3時間の場合の圧縮強度を1とすると養生が30分，1時間，1.5時間，および4.5時間における強度の比率はそれぞれ0.19, 0.59, 0.83, 1.08であり高温養生を1時間以上行えばある程度の強度に達することが示されている。また同図で養生1.5時間および3時間で高温養生を中止しその後室内に1.5時間放置してから圧縮試験を行った結果も示してある。これから明らかなように高温養生を打切るとその時点から強度の発現はごく緩慢となっており，このことは高温養生を終えた供試体を必ずしも即座に試験しなくとも1.5時間程度以内に行えば試験結果にそれほど誤差を生じないことを示すものである。

なお，同様な配合のモルタルに急結剤を添加し高温養生しないで20°Cの恒温室で養生した結果，材令4.5時間で圧縮強度が5.2 kg/cm<sup>2</sup>に達したにすぎなかった。また同じモルタルに急結剤を添加せずに高温養生を行った結果，養生1.5時間でいまだ硬化せず，養生3.0時間で17 kg/cm<sup>2</sup>，養生4.5時間で42 kg/cm<sup>2</sup>となり養生3.0時間以前の強度発現は極めて小さかった。これらの結果

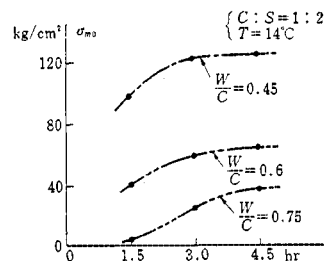


図一 急速硬化モルタルの養生時間と強度の関係

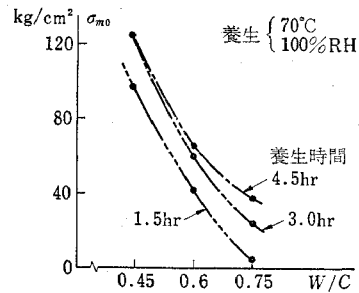
から急結剤の混入と高温養生との組合せにより独特の強度発現パターンのあることが認められたのである。

(2) 水セメント比と強度との関係

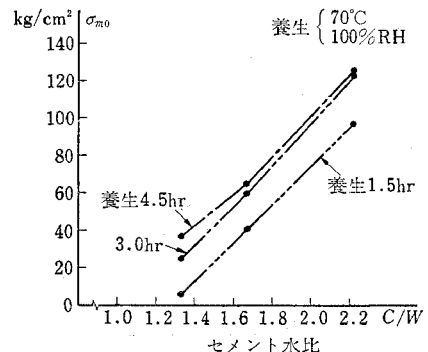
図二にセメントと砂の比率 (C:S) を 1:2 とし て水セメント比 (W/C) を 45%，60% および 75% と変化させた場合の急速硬化モルタルの圧縮強度を示す。この結果を水セメント比およびセメント水比を横軸とし



図二 水セメント比をパラメーターとした高温養生時間と圧縮強度の関係



図三 水セメント比と圧縮強度の関係



図四 セメント水比と圧縮強度の関係

て示したのが図-3および図-4である。これらの図から明らかなように急速硬化モルタルの各養生時間における強度は通常モルタルやコンクリートの場合と同様にセメント水比とほぼ比例関係にあり、しかも水セメント比の相違によって各養生時間後の圧縮強度が顕著に変化しているのである。このことは他の影響因子がほぼ同じ状態であれば材令1.5時間程度でモルタルの水セメント比を相当の精度で推定することが可能なものであり、したがってモルタルの材令28日における圧縮強度を推定することが可能なのである。

(3) 急結剤量と強度との関係

コンクリートの強度判定を行おうとする場合、試料中のセメント量は一般に不明であるので添加する急結剤のセメント重量に対する比率の相違が急速硬化モルタルの強度にどのような影響を与えるかを調べる必要がある。図-5にモルタルの水セメント比を60%とし急結剤の量をセメント重量の0~6%と変化させて行った実験結果を示す。この結果から、急結剤量が少ない場合には急結剤量の増加とともに各材令で急速硬化モルタルの圧縮強度が増大しているがセメント重量の約3.5%以上の急結剤を添加すると急結剤の効果は頭打ちになって、むしろ急結剤の増加とともに若干強度が低下している。急結剤の量が4~5%付近では急速硬化モルタルの強度は急結剤量と関係なくほぼ一定の値となっている。このことはセメント量が未知なモルタルに標準量の急結剤を添加してもその比率の差によって強度があまり影響を受けないこととなり、本研究の方法がコンクリートの強度判定に適用できる重要な背景となるものである。すなわち、通常コンクリート中のモルタル分の組成の範囲は水セメント比(W/C)が40~80%、セメントと砂の比率(C:S)が1:1.5~1:3程度であるので、急結剤の標準量としてW/C=0.6、C:S=1:2のときに4%とし、モルタル重量に対して一定量(この場合1.11%になる)の急結剤を混入するとすれば両極端の場合であるW/C=0.4、C:S=1:1.5およびW/C=80%、C:S=1:3の場合、急結剤のセメント量に対する比率はそれぞれ3.2%および5.3%となって急結剤の影響をあまり受けない範囲となるのである。しかもこの範囲をは

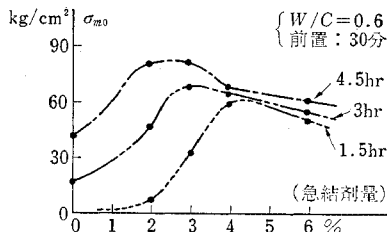


図-5 急結剤の量と圧縮強度の関係

ずれると急速硬化モルタルの強度は低下するので仮りにモルタルの組成が上記の範囲をはずれてもコンクリート強度を過大に推定する危険はないのである。

(4) 練り置き時間と強度との関係

通常コンクリート工事ではコンクリートを練り混ぜてから打込むまでの時間が現場の事情により相当に変化する。コンクリートを練り混ぜ開始してから急結剤を混入するまでの時間によって急速硬化モルタルの強度が大きく異なれば実用上支障となる。一般に練り混ぜ開始から打込みまでの時間は0~2時間程度の範囲であるので、この影響を見るために練り置き時間を0時間、1時間、2時間と変化させて急速硬化モルタルの強度を求めた結果図-6の通りとなった。これから明らかなように練り混ぜ開始から急結剤混入までの時間の影響は急速硬化モルタルの強度にほとんど現われず、むしろ実際のコンクリートの強度が受けると同程度の影響が見られたのである。

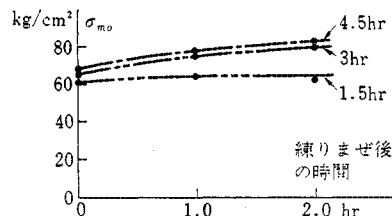


図-6 練りませ後から急結剤投入までの時間と圧縮強度の関係

この実験の結果、コンクリートの強度判定を行う場合、そのコンクリートの練りませ後の経過時間の相違による影響を特別に考慮しなくてもよいことが示されたのである。

(5) 砂セメント比と強度の関係

セメントと砂の比率(C:S)の若干異なったモルタルを急速硬化して試験をした結果、強度が若干異なる傾向が見られたのでC:Sを1:1.5~1:3.0、W/Cを45~75%に変化させてこの影響を実験によって求めた。この結果、図-7に示すようにC:Sが1:2以上に

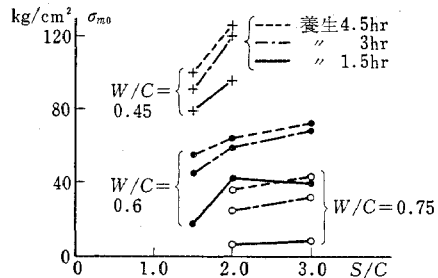


図-7 砂セメント比(S/C)と圧縮強度の関係

なると  $C:S$  の比率の相違が急速硬化モルタルの強度にあまり影響しないことが示された。しかしながら  $C:S$  が 1.5 から 2.0 の間では急速硬化モルタルの強度はある程度影響を受けることも示された。この原因としてはモルタルの流動性があまりに大きいと急結剤の混入による凝結効果が遅くなり、これが高温養生による強度の増進を遅らせるためと思われる。それでも急速硬化モルタルの強度は水セメント比の影響の卓越していることがこの図から明らかである。

標準養生したモルタルの場合には一般に砂セメント比の小さい方が強度が大きくなるのに対して急速硬化モルタルの場合には上述の理由で逆になる傾向にあるので急速硬化モルタルの強度から同一配合のモルタルの材令 28 日の強度を推定しようとする場合には注意が必要である。

(6) セメントの種類と強度

急結剤はセメントと反応して水和を促進するのでセメントの種類あるいは銘柄によってその効果の異なることが考えられる。図-8 に早強ポルトランドセメントおよび銘柄の異なる普通ポルトランドセメントを用いて行った実験結果を示す。これより、急速硬化モルタルの強度発現の様相はセメントの種類および銘柄によって若干異なることが示されたのである。したがって実際に急速硬化モルタルを用いてコンクリートの強度を推定しようとする場合には、あらかじめ同一のセメントを用いて急結剤とセメントとの組合せによる強度特性を求めておくことが必要である。

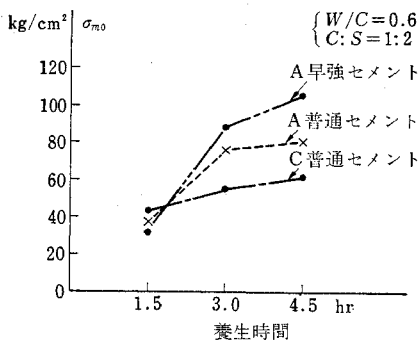


図-8 セメントの種類と強度発現特性

(7) その他の要因と強度との関係

これまでに述べた種々の要因のほかに急速硬化モルタルの強度に影響を与えると考えられるもののいくつかについて実験的に検討した結果を述べる。

高温養生する前のモルタルの温度を 14°C および 33°C とし、モルタルの温度の相違の影響を求めたところ急結剤を投入してから 30 分後に高温養生を開始した場合に若干その影響が見られた。すなわち高温養生 1.5 時間後

の強度の場合モルタルの練り上り温度の高い方が強度が大きくなる傾向が見られた。しかしながら急結剤を混入してから 5 分後に高温養生を開始することによってほとんどこの影響を除くことのできる事が確認された。

高温養生の温度は、既往の高温養生の例その他を参照して 70°C を標準としたが養生温度が鋭敏に急速硬化モルタルの強度に影響すれば実用上支障になる。そこで本研究では養生温度を 83°C とし、実験を行った結果急速硬化モルタルの強度は 70°C で養生した場合とほとんど有意な差が認められなかったのである。したがって現場で急速硬化モルタル供試体を養生する場合それほど精度の高い恒温恒湿チャンバを用意しなくともよいものと思われる。

コンクリートには遅延剤その他の混和材料を用いることが多いので遅延性減水剤をセメント量の 0.3% 含んだモルタルを用いて実験を行った。その結果、急速硬化モルタルの強度はモルタルの流動性があまり大きくならない範囲でその影響がほとんどない結果が得られた。混和剤の種類も多く、それぞれに異なった特性を持っていると思われるので、各種のセメント、急結剤、および混和剤を組合せて実験し、急速硬化モルタルの強度との関係を把握することが今後の課題となろう。

モルタルに有害不純物が含まれている場合急速硬化モルタルの強度にどの程度その影響が現われるかを求めるために、砂糖をセメント量の 2% 含んだモルタルおよび遅延性減水剤をセメント量の 3% 含んだモルタルを用いて実験を行った。その結果いずれの場合も急速硬化モルタルは材令 4.5 時間でも全く硬化しなかった。したがって急速硬化モルタルによるコンクリート強度迅速判定方法はコンクリート中に不純物が有害量含まれて硬化に悪影響を及ぼす場合にこれを検出することができるものと思われる。

(8) 急結剤を混入したモルタルの凝結特性

フレッシュモルタルに急結剤を混入して練りまぜると通常は 30 秒程度でモルタルの流動性が低下しはじめ数分で凝結する。このような初期における急結特性についてプロクターの貫入試験によって検討した。測定結果の一例を図-9 に示す。これに示されるように急結剤を混入したモルタルのプロクター貫入試験値はモルタルの水セメント比のほかにセメントと砂の比率、モルタルの温度などの要因に大きく影響されることがわかる。またセメントの銘柄、種類および風化の有無によっても急結特性が大きく異なるので、急結剤の添加によるモルタルの急結特性から直ちにそのモルタルの水セメント比を推定することは現段階では不可能であると思われる。

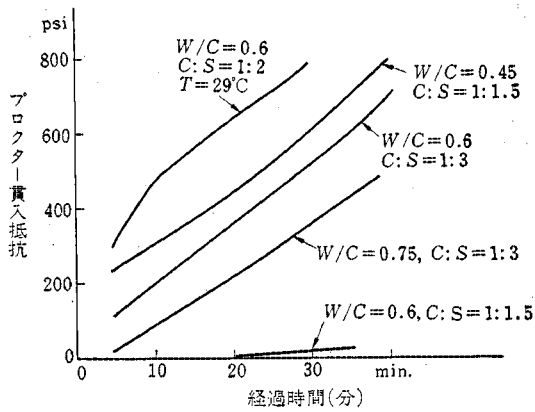


図-9 急結剤の混入されたモルタルのプロクター貫入抵抗の測定例 (温度の表示のないものはモルタル温度が約 14°C の場合である)

以上に述べたように、急速硬化モルタルの強度特性は想定された種々の影響因子に対し、ほぼ十分な性状を示したのであり、ここに本研究の方法によってコンクリート強度を迅速にしかも精度よく推定できる基礎的な裏付けが得られたのである。

#### 4. コンクリート強度の判定

フレッシュコンクリートの強度を本研究の方法によって判定する場合ウェットスクリーニングしたモルタルを用いるので、コンクリートの配合のうちから粗骨材をはじめから含まないモルタルのみの組成の場合とコンクリートを練ってからウェットスクリーニングして得たモルタルの強度に差があるかどうかを検討することが必要である。そこでセメント強さ試験用供試体を用いて標準養生による材令 28 日の圧縮強度を比較した結果ウェットスクリーニングして得たモルタルの方が水セメント比 45~75% の範囲のモルタルに対して強度が 20~30% 増大する結果を得た。このような現象は急速硬化モルタルの場合にも見られウェットスクリーニングによる強度の増加はさらに著しいものであった。表-2 にこれらの実験結果を示す。このような現象の理由としては、ふるい

に残留した 5 mm 以上の粗骨材の表面に水分がつくとともに水分を多く吸着した骨材の微粒分やセメント粒子が粗骨材表面に付着し、これによってふるいを通過するモルタルが若干脱水されるからと思われる。このことはウェットスクリーニングして得た急速硬化モルタルの強度がコンクリート中の粗骨材の粒度、細骨材率および粗骨材の管理状態などにも影響されることを示唆するものである。

しかしながら通常の配合のコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルを用いた実験結果の範囲では図-10 に示すように急速硬化モルタルの強度は、コンクリートの水セメント比を主要要因として定まることが示されたのである。

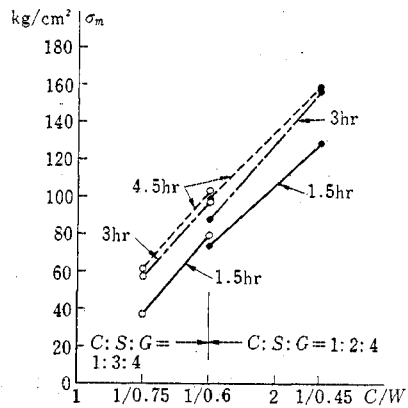


図-10 コンクリートのセメント水比とウェットスクリーンドモルタルの急速硬化による強度との関係

ウェットスクリーニングの有無によるモルタルの強度の差を定量的に把握するために図-11 および図-12 に両者の関係を示した。これらの図から明らかなように標準養生の場合および急速硬化養生の場合とも、モルタル強度とウェットスクリーンドモルタルの強度との間には極めてよい相関関係のあることが示されている。ここで注目すべきことは、これらの図には種々の材令および高温養生時間の場合が含まれていることである。また、図-11 と図-12 は、ほぼ同一の直線関係になっている

表-2 モルタルとウェットスクリーンドモルタルとの強度の比較

No.	種類	配合 (C : S : G)	水セメント比	標準養生による材令28日の圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	急速硬化モルタルの圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
					1.5 時間養生	3.0 時間養生	4.5 時間養生
1	モルタル	1 : 2 : 0	0.45	583	97	123	125
2			0.60	362	41	60	65
3			0.75	251	5.3	24	38
4	ウェットスクリーンドモルタル	1 : 2 : 4	0.45	705(1.21)	129(1.33)	158(1.28)	160(1.28)
5			0.60	476(1.31)	75(1.83)	88(1.47)	98(1.51)
6	ウェットスクリーンドモルタル	1 : 3 : 4	0.60	422(1.17)	80(1.95)	98(1.63)	104(1.60)
7			0.75	313(1.25)	37(7.0)	57(2.38)	62(1.63)

備考：1) ( ) 内の数値は対応するモルタル強度を1とした場合のウェットスクリーンドモルタルの強度比  
2) 粗骨材の最大寸法はいずれのコンクリートの場合も 25 mm である。

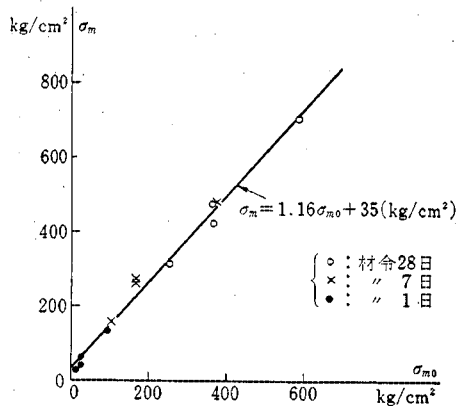


図-11 標準養生の場合におけるモルタルとウェットスクリーンドモルタルとの圧縮強度 ( $\sigma_{m0}$ ,  $\sigma_m$ ) の関係

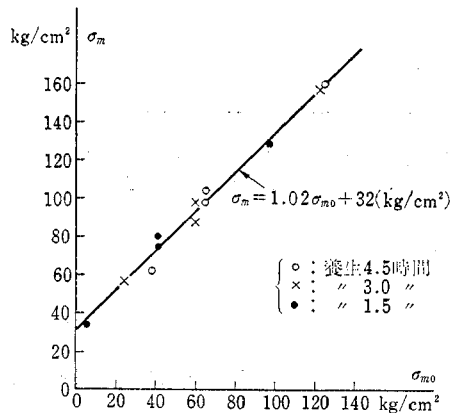


図-12 急速硬化の場合におけるモルタルとウェットスクリーンドモルタルとの圧縮強度 ( $\sigma_{m0}$ ,  $\sigma_m$ ) の関係

のである。図-11 の場合 (標準養生), 図-12 の場合 (急速硬化養生) および両方を含めた場合における回帰直線を最小自乗法によって求めると次の通りである。

標準養生の場合  $\sigma_m = 1.16\sigma_{m0} + 35 \dots (1)$

急速硬化養生の場合  $\sigma_m = 1.02\sigma_{m0} + 32 \dots (2)$

両方を含めた場合  $\sigma_m = 1.18\sigma_{m0} + 27 \dots (3)$

ここで

$\sigma_{m0}$ : 水セメント比の対応するモルタルの圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_m$ : ウェットスクリーンドモルタルの圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

このように水セメント比を同一としてモルタルのみを練り混ぜた場合とコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルとの強度の関係は直線関係となり, しかもその勾配がほぼ1である。このことはコンクリートをウェットスクリーニングすることによりモルタル部分のセメント水比 (C/W) がほぼ一定値だけ増大することを示すものである。すなわち式 (2) を適用すると

セメント水比 (C/W) が 0.29 だけウェットスクリーニングによって増大する結果となる。これはたとえば水セメント比が 60% のコンクリートをウェットスクリーニングするとウェットスクリーンドモルタルの水セメント比は約 51% になることである。

このように急速硬化モルタルは, ウェットスクリーニングをした場合もしない場合も, その強度はセメント水比 (C/W) に比例し, しかも両者の強度の間には極めてよい相関関係があることから, 現場で実際にコンクリート強度を判定する場合の強度推定式はこれらの関係を用いて簡単に求めることが可能なのである。

すなわち, コンクリート供試体の標準養生による材令 28 日の圧縮強度  $\sigma_{28}$  は他の条件がほぼ同一の場合, 水セメント比 W/C によって定まり一般に次式で表わされる。

$$\sigma_{28} = k_1 \frac{C}{W} + k_2 \dots (4)$$

またウェットスクリーニングして得たモルタルを急速硬化した場合の一定養生時間後における強度  $\sigma_m$  も, 実験結果からセメント水比に比例すると仮定できるので次式が成立つ。

$$\sigma_m = m_1 \frac{C}{W} + m_2 \dots (5)$$

式 (5) を式 (4) に代入すれば急速硬化モルタルの強度とコンクリート強度との間には次式が成立つ。

$$\sigma_{28} = \frac{k_1}{m_1} \cdot \sigma_m + k_2 - \frac{k_1 \cdot m_2}{m_1} \dots (6)$$

ここで,  $k_1, k_2, m_1, m_2$  は実験によって求まる定数。式 (4) において  $k_1, k_2$  は過去の実績から定めることもできるので, 同一材料を用いたコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルを急速硬化することにより即座に  $\sigma_{28}$  と  $\sigma_m$  との関係式を求めることができる。

また, さらに簡単な方法としてモルタルのみを練り混ぜて, コンクリートの強度推定式を定めることも可能である。すなわち, モルタルのみを練り混ぜた場合の急速硬化モルタルの圧縮強度  $\sigma_{m0}$  は次式で表わされる。

$$\sigma_{m0} = m_{01} \frac{C}{W} + m_{02} \dots (7)$$

配合が対応しているモルタル強度とウェットスクリーニングモルタル強度との回帰直線は, 式 (2) で示されるように一般に次式で表わされる。

$$\sigma_m = a_1 \sigma_{m0} + a_2 \dots (8)$$

式 (6), (7), (8) からコンクリートの圧縮強度  $\sigma_{28}$  を推定する式として次式が得られる。

$$\sigma_{28} = \left( \frac{k_1}{a_1 \cdot m_{01}} \right) \cdot \sigma_m + \left( k_2 - \frac{a_1 \cdot m_{02} + a_2}{a_1 \cdot m_{01}} \cdot k_1 \right) \dots (9)$$

ここで、 $m_{01}$ 、 $m_{02}$  および  $a_1$ 、 $a_2$  はそれぞれ実験により式(7)および式(8)から求まる定数。

式(9)は、モルタル強度とウェットスクリーンドモルタル強度の間の相関関係が既知であれば、モルタルのみを練り混ぜて急速硬化した供試体のセメント水比と強度の関係から直ちにその定数が定まるのである。

たとえば、 $k_1=300$ 、 $k_2=-205$ 、 $a_1=1.02$ 、 $a_2=32$  としたモルタルのみを練り混ぜた場合の図-4の関係をを用いると、急速硬化養生 1.5 時間および 3.0 時間の場合  $m_{01}$ 、 $m_{02}$  はそれぞれ、100、-126 および 112、-125 であり、これから直ちに次式が求まる。

すなわち

高温養生 1.5 時間の場合

$$\sigma_{28} = 2.94 \sigma_{m1.5hr} + 79 (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(10)$$

高温養生 3.0 時間の場合

$$\sigma_{28} = 2.63 \sigma_{m3.0hr} + 46 (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 $\sigma_{m1.5hr}$ 、および  $\sigma_{m3.0hr}$  は強度判定をしようとするコンクリートをウェットスクリーニングして得たモルタルの急速硬化による圧縮強度。

以上に述べたように、材令 28 日のコンクリート強度と、そのバッチからウェットスクリーニングして得た急速硬化モルタルとの強度を直接対比させなくとも、セメント等の材料特性を含めた強度推定式を得ることができるのである。

さて、表-3 に示すような種々の配合のコンクリートについて、コンクリートの材令 28 日の圧縮強度と、1.5 時間および 3 時間高温養生して得た急速硬化モルタルの圧縮強度との関係を示したのが 図-13 および 図-14 である。ここで用いたコンクリートはスランブが 0~24 cm、W/C が 45~76%、減水剤の有無、など広範に性状の異なったものである。図-13 および 14 から明らかのように、この実験の範囲では種々の性状のコンクリートの材令 28 日の圧縮強度と、そのコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルを急速硬化し

た場合の強度との間に極めてよい相関が成立している。特に一部のコンクリートでは減水剤の混和によって空気量が 4.9% になったがこの影響は同時に急速硬化モルタルの強度にも反映されたために両者の相関関係は他とほとんど同じとなった。このことから本研究の方法が空気量の多量混入などによるコンクリート強度の低下に対しても迅速に検出することができるものと思われた。

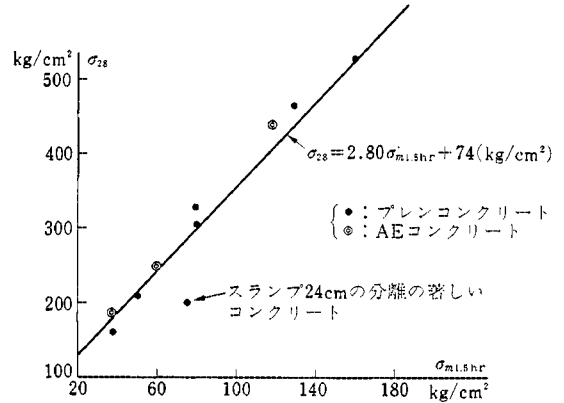


図-13 急速硬化養生 1.5 時間後のモルタル強度 ( $\sigma_{m1.5hr}$ ) とコンクリートの材令 28 日標準圧縮強度 ( $\sigma_{28}$ ) との関係

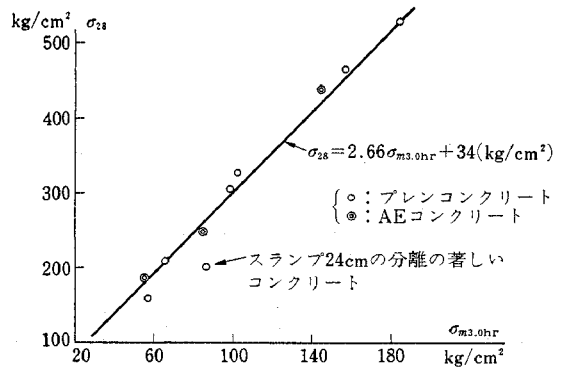


図-14 急速硬化養生 3.0 時間後のモルタル強度 ( $\sigma_{m3.0hr}$ ) とコンクリートの材令 28 日標準圧縮強度 ( $\sigma_{28}$ ) との関係

表-3 コンクリートの配合と特性および強度推定値

No.	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a	単位セメント量 C(kg/m <sup>2</sup> )	配 C : S : G	減水剤 (空気量%)	スランブ (cm)	$\sigma_{28}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1.5 時間推定値 ( ) : $\sigma_{28}$ との比	3.0 時間推定値 ( ) : $\sigma_{28}$ との比
1	0.45	33	330	1 : 2 : 4	—	0	469	435(0.93)	452(0.96)
2	0.60	33	314	1 : 2 : 4	—	24	201	284(1.41)	269(1.34)
3	0.60	43	281	1 : 3 : 4	—	3.2	308	298(0.97)	295(0.96)
4	0.75	43	270	1 : 3 : 4	—	18	161	178(1.11)	186(1.16)
5	0.45	41	377	1 : 2.0 : 2.88	—	4	528	525(0.99)	526(1.00)
6	0.60	41	292	1 : 2.67 : 3.84	—	8	331	295(0.89)	303(0.92)
7	0.75	41	238	1 : 3.34 : 4.80	—	8.6	212	217(1.02)	210(0.99)
8	0.459	38	314	1 : 2.35 : 3.84	ボゾリス No. 8 (空気量 3.2%)	2.4	447	404(0.90)	420(0.94)
9	0.612	38	241	1 : 3.14 : 5.12	同上 (4.9%)	6.2	251	242(0.96)	260(1.04)
10	0.765	38	196	1 : 3.92 : 6.40	同上 (3.6%)	3.1	188	175(0.93)	180(0.96)

備考：1) この表の No. 1~4 は表-2 の No. 4~7 にそれぞれ該当する。  
 2) 粗骨材の最大寸法はいずれの場合も 25 mm である。  
 3) 強度の推定値は式 (12) および式 (13) を用いて算出したものである。



なお水セメント比が 60% で  $C:S:G=1:2:4$  のコンクリートはスランプが 24 cm となって著しい材料分離を示し、コンクリート強度も同一水セメント比でプラスチックなコンクリートに比べ 60% 程度に低下した。このコンクリートからウェットスクリーニングして得たモルタルの標準養生による材令 28 日の圧縮強度および急速硬化モルタルの強度はプラスチックなコンクリートから得たモルタルの場合とそれぞれにつきほぼ同様な強度であった(表-2 参照)。したがって、コンクリート中のモルタルの水セメント比が同一でも材料分離の影響によってコンクリートの強度が著しく低下する可能性があるものであり、このような場合には急速硬化モルタルによる強度推定値は相当に過大な値となるのである。このため、このように著しく材料分離をするようなコンクリートの強度を本研究の方法を用いてそのまま推定することは危険であり、別に材料分離に対する補正を行うことが必要であろう。

図-13 および 14 から強度判定が安全側にできるように考慮して求めた式(6)に該当するコンクリート強度推定式は次の通りである。

$$\sigma_{28} = 2.80 \sigma_{m1.5hr} + 74(\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_{28} = 2.66 \sigma_{m3.0hr} + 34(\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $\sigma_{m1.5hr}$ 、 $\sigma_{m3.0hr}$  は高温養生 1.5 時間および 3.0 時間の急速硬化モルタルの圧縮強度。

式(12)および式(13)の中の定数はあくまでこの実験に用いた材料の特性によって定まったもので、必ずしも一般性のある値ではない。急結剤の性能やセメントの種類、骨材の特性、混和材料の特性、などこれらの定数に影響を及ぼす要因も多いので、種々の材料の組合せによる実験を行ってその影響の程度を把握することが必要である。また、種々の要因にあまり影響を受けないような急結性薬剤の研究開発も重要であろう。

なお、間接的に求めたコンクリート強度推定式である式(10)および式(11)は、直接的に求めた式(12)および式(13)とそれぞれよく一致しており、このことは精度のよい強度推定式を品質検査の開始と同時に容易に求められることを示すものである。

## 5. 強度判定の手順と適用性

本研究の方法による現場での作業の手順としては次のようなものである。検査をしようとするコンクリートから約 15 kg の試料を採取しこれを即座に 5 mm ふるいによってウェットスクリーニングしてモルタルを得る。このモルタルを 2.5 kg 採取しこれに急結剤を 25 g (セメント重量の約 4% に相当) 添加して 1 分間練りまぜ直ちにセメント強さ試験用型枠に詰める。これをあらかじめ

70°C 100% RH に保っておいた恒温恒湿チャンバに入れて 1~3 時間養生して急速硬化モルタル供試体を得る。これを圧縮試験してその結果から、あらかじめ求めておいた材令 28 日のコンクリートの圧縮強度との関係式を用いて直ちにコンクリート強度を推定する。

試験に要する人員は 1~2 名で十分であり実質的な作業時間もごく短い。用いる装置、器具も比較的安価に入手でき、また危険な薬品を用いることもないので、いずれの工事現場あるいはレデーミクストコンクリート工場でも本研究の方法を用いることが可能であると思われる。特にレデーミクストコンクリート工場で出荷前に試料を採取すれば現場でコンクリートを打込む前にそのコンクリートの強度をある程度の精度で推定することも可能であり現場でのコンクリートの品質向上に相当寄与することができると思われる。

本研究で提案したようなコンクリート強度の迅速判定方法が確立され、実際の工事に適用されるようになれば現在行われている慣習的な材令 28 日の圧縮強度による品質検査および管理のための試験を大幅に減らすことも可能である。この場合どの程度の頻度で迅速試験および材令 28 日の試験を行うかは今後の重要な課題である。いずれにしても本研究の方法のような迅速試験方法を有効にコンクリート工事の現場に適用すれば、コンクリートの品質管理および検査は大幅に合理化されるとともに、コンクリート構造物の安全性、信頼性の向上を図ることができるものと思われる。

## 6. 結 言

近年コンクリートの使用範囲がますます拡大し、コンクリートに対してより信頼度の高い品質が要求されるようになってきている。一方、各種混和材料の使用、海砂の使用、あるいはミキサの洗いに含まれているスラッジの再混入、などによりコンクリートの品質も従来に増して多様化してきている。このような状況のもとでは従来から慣習的に行われてきた材令 28 日によるコンクリートの品質検査方法が不十分であることは明白である。本研究は、このような状況に対処でき得るような品質検査方法に関する一つの試みについて検討を行ったものである。すなわち、本研究において急結剤と高温養生によるコンクリートの急速硬化特性を見出し、これをコンクリートの迅速品質検査に適用することを研究したのである。その結果、本研究の範囲でコンクリート強度を材令 1~3 時間で相当の精度で推定することの可能性が得られたのである。特に本研究の方法はセメントの水和を促進させて得た強度によってコンクリートの品質を判定するので欠陥のあるフレッシュコンクリートを検出するの

に有力な方法の一つになり得るものと思われる。

本論文の作成にあたり貴重なご助言とご指導を賜った恩師国分正胤教授に深甚の謝意を表します。また、本研究の実施にあたっては首都高速道路公団の諸兄、ならびに東京都立大学大学院の坂口武君、信田佳延君より多大のご支援、ご協力をいただいたことを記して御礼を述べます。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリートの品質管理試験方法，コンクリートライブラリー No. 38, 1974年9月.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの品質管理試験に関するシンポジウム発表報文集, 1974年2月20日.
- 3) 池田尚治：コンクリート構造物の品質管理，検査と安全性，土木学会構造工学委員会 構造物安全性小委員会編，構造物の安全性，信頼性，第3編 3.2, 昭和51年10月.
- 4) 池田尚治：打込み時点にコンクリート強度を判定する方法に関する研究，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集第5部 V-37, 昭和51年10月.
- 5) 高速道路調査会：トンネル 薄肉覆工（吹付けコンクリート工）に関する調査研究報告書，日本道路公団委託委員会報告（委員長 山本 稔，取りまとめ幹事 今田 徹，池田尚治），高速道路調査会発行，昭和48年2月.
- 6) 岩崎訓明：コンクリートの特性，3.2.4, p. 54, 共立出版，昭和50年12月1日.
- 7) 樋口芳朗：コンクリートの早期強度増進，コンクリート工学，p. 1, Vol. 14, No. 2, Feb. 1976, 日本コンクリート工学協会，昭和51年2月.

(1976.7.14・受付)