

コンクリートに関する測定

樋口 芳朗*

はじめに

種々の測定が、コンクリートに対してなされている。その目的は所定のコンクリートを（なるべく経済的に）つくるため、所定のコンクリートが（なるべく小さいばらつきで）つくられたかどうかをチェックするため、あるいは現存するコンクリート（構造物）が、想定される外荷重その他の外作用に対し適当な安全率を持って対処できるかどうかを検査するために行なわれる。

ぼう大かつ多種多様にわたるこれらの測定を、わずか1回の講座でカバーすることはもちろん不可能である。したがって、本講座では取り上げる範囲について最初にお断わりしておくとともに、取り上げた対象についてもできるだけ注を活用して表現を簡潔化し、詳細については引用文献^{1),2)}を見て頂くという形式をとったのでご諒承頂きたい。

本講座では、つぎに述べる測定は取り上げない。

(1) コンクリート用の各材料に対する測定³⁾

(2) コンクリート製品に対する測定²⁾

* 正会員 工博 国鉄鉄道技術研究所 構造物研究室長

1) 吉田徳次郎「コンクリート および 鉄筋コンクリート施工方法」, 国分正胤他「土木学会土木工学ハンドブック」, 近藤・坂監修「コンクリート工学ハンドブック」, 土木学会「コンクリート標準示方書」・「土木学会規準」, 近藤 訳「土木材料試験便覧」, 「セメント 技術協会パンフレット」, 「丸東製作所その他の材料試験機メーカーのカタログ」等を参照されたい。

2) 1) にあげた文献, 関連 JIS, 日本材料学会「工業材料規格便覧」その他を参照されたい。

3) 構造特性については、本講座その1およびその2において取り扱われている。

4) まだ固まらないコンクリート (fresh concrete) とは、一般に練りませ直後のコンクリートをさすのであろうが、硬化したコンクリート (hardened concrete) に対応するものと考えられる範囲をひろげる必要が感じられる。コンクリートの硬化現象は連続して半永久的に起こるので、区切りをつけることが困難であるが、セメントの凝結という点では標準軟度のセメントペーストに対して、JIS R 5201 に割り切って処理されている。モルタルあるいはコンクリートになると、後に述べるように硬化速度測定方法として種々のものが提案されているが、硬化現象の区切りを一般に示すことはなされていない。

測定対象となる試料の採取に当たっては、できるだけ代表的なコンクリートを採取しないと行けない。このことは、まだ固まらないコンクリートの性質 および 硬化後のコンクリートの性質

(3) コンクリート構造物の構造特性に対する測定³⁾

1. まだ固まらないコンクリート⁴⁾に対する測定

(1) ワーカービリチーの測定

まだ固まらないコンクリートに要求される性質のうち、最も重要な性質はワーカービリチーである。コンクリート標準示方書によると「コンシステンシーによる打込みやすさの程度、および材料の分離に抵抗する程度を示すまだ固まらないコンクリートの性質をいう」と示されており、簡単に測定できないものであることを示唆しているが、事実現在でもワーカービリチーを定量的に測定できる理想的な測定方法は案出されていないといっている。わかりやすくいうとコンクリートの練りませ、打込み、締固め、仕上げ等の容易さを示す性質であるワーカービリチーを測定するに当たっては、まずこの言葉の持つ意味の分析から始めなければならないであろう。コンクリートがワーカブルであるためには、現場で採用される練りませおよび締固め手段に適切した「やわらかさ」、運搬し打ち込み締め固めている間に有害な程度の材料の分離が起こるのを防ぐための「ねばりけ」、粗骨材や鉄筋を十分包み表面仕上げを現場で取りうる手段により満足に行なえるところの「十分量のモルタル」をあげるこができる。これらの3つの性質をいろいろの角度から分析すると、図-1 に示す術語⁵⁾となる。3性質との間の関連も示しておくが——はもっとも関連の深いことを示し、……はそのつぎに関連の深いことを示す（線で結ばれていないことが全然関連がないことを示すものでももちろんない）。

コンシステンシーの測定方法として最も広く用いられるのは、JIS A 1101 のスランプ試験であるが、この試験は普通現場で用いられるところのスランプ 2.5~15

のいずれの測定に当たっても重要な前提要件となるものであり、JIS A 1115 に規定がある。

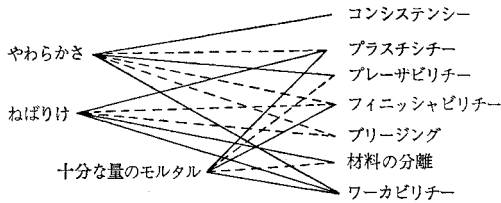
5) ポンプコンクリート、注入モルタル、グラウト等を対象とするとポンパビリチー、グラウタビリチー、フロー（ロートからの流下時間）、保水性（ブリージングと関連がある）等も考えなければならない。土木学会 PC グラウト指針、プレバックドコンクリート指針案、その他1) にあげた文献参照。

6) スランプ 15 cm 以上といった軟練りコンクリートは、材料の分離が大きく不満足な結果しか得られないので推しようできない。このような軟練りコンクリートを用いなくともいいような段取りを行なうことが基本的に重要である。

比較的軟練りコンクリートの場合、一定重量の金属球をコンクリート上にのせて貫入深さによりコンシステンシーを測定するケリーボール、ボール状測定器をコンクリート上にのせ貫入部分の直径によりコンシステンシーを測るイリパレン試験等が提案されている。別に試料を採取しないでも、任意の場所でコンクリート表面をならすだけで測定できるという利点があるが、実用上それほど便利でないためあまり用いられていない。

スランプ 2.5 cm 以下の硬練りコンクリートに対しては、落下衝撃を与えその際のコンクリート試料の変形と落下回数との関連からコンシステンシーを求めるリモールジグ試験、フローテーブル試験、ドロップテーブル試験（コンクリート・ジャーナル、昭41.2）、一定重量の貫入体を一定高さから締め固めたコ

図-1



cm³のコンクリートに対して適用できるものであり、これより硬練りコンクリートのコンシステンシー試験には不向きであること、いろいろの条件によって影響を受けやすいこと⁷⁾を心得ておいて測定することが重要である。

プラスチシチー、プレーサビリチー、フィニッシュアビリチー、ブリージングおよびこれと表裏の関係にある沈下収縮以外の材料の分離⁸⁾を定量的に測定する方法はまだ標準化されていないので、コンシステンシー試験をしながら、あるいはコンシステンシー試験の終わったコンクリートを用いて定性的に判断する方法が用いられている。

ブリージングは材料の分離の一種であるが、これには定量的な測定方法として JIS A 1123 がある。しかしこの方法は、ASTM C 243 のモルタルのブリージング試験や土木学会 P C グラウトのブリージング率試験とちがひ、いったんあがった水がまたコンクリート中に吸われる現象を再現していないことに注意しなければならない。

(2) 空気量の測定⁹⁾

コンクリートの耐久性を改良するための革命として、戦後アメリカから導入された AE コンクリートは、ワーカビリチーの改善にもなるということで、レデーミクス ト コンクリート その他に一般的に用いられるようになったので、まだ固まらないコンクリートの空気量を測ることが重要な作業の一つになったことは周知のとおりで

ンクリート上面に落下させその貫入深さをもってコンシステンシーを判定する西ドイツ DIN 1048 の試験、一定の落下方法により詰められたコンクリート重量と十分に締め固めたコンクリート重量比をもってコンシステンシーを判定するイギリス BS 1881 の試験等があるが、硬練りコンクリートの締め固めは一般に振動機で行なわれることを考えると、一定のテーブルバイプレーター上のコンクリートが一定の沈下を起こすまでの時間でコンシステンシーを測定するスウェーデンのビービー コンシストメーター（建設省 土木研究所では伊東茂富博士が国際型のものより小型とし、かつ振動数を落した試験器を提唱している）のすぐれていることが国際的に認められている。コンクリートの所要のコンシステンシーは、現場で採用される振動機の性能によって左右されることは当然であるが、このことを考えて、現場で用いる内部振動機を用いて硬練りコンクリートのコンシステンシーを測定するように考えられた試験器としては、VF 試験器(菅原 操・宮坂慶男：セメント コンクリート、昭 38.12)、ハッチソンのプレーサビリチー試験器がある。

7) このことはスランブ試験がきわめて鋭敏なことを示すとして利点にあげることが可能であるが、ろう水の有無、コーンの引き上げ方などに十分注意する必要のあることを示していることは確かである。欧州ではスランブ試験に信頼をおいていない国もあり、ドイツでは、スランブ試験と類似の試験を行なった後、落下エネルギーを与え、そのひろがり方でコンシステンシーを

ある。空気量を測定する方法としては、JIS A 1116 の重量方法¹⁰⁾、JIS A 1117 の水柱圧力方法、JIS A 1118 容積方法¹¹⁾、JIS A 1128 空気室圧力方法の4つが定められている。重量方法は不便であり測定誤差も大きくなる恐れがあるので、あまり用いられていない。圧力方法はポイルシャルの法則を応用した巧妙な測定方法であり、労力がかからず迅速に測定できるので広く用いられているが、骨材粒中の空気量を補正するための骨材修正係数が正確に求められないような多孔質の骨材を用いた場合は、適用できないことに注意しなければならない。空気室圧力方法の方が水柱圧力方法のように大量の水を必要としないし軽便であるが、キャリブレーションに留意する必要がある。

(3) 配合の測定

コンクリートの品質管理を硬化後のコンクリートの強度について行なうと、たとえ管理状態の悪いことがわかって、すぐにこれを反映させて是正することが明らかに手遅れとなるのであり、品質管理の結果をすぐ施工にフィードバックしてゆくことができないため、熱もはいらぬという結果になりやすい。この意味では、コンクリートがまだ固まらない間にその配合——特に水セメント比が測定できれば有利であることは明らかである。このための測定方法としては、JIS A 1112 の洗い分析試験のようなものがあるが、この試験はきわめてめんどうで時間も要するため、発生国であるアメリカでもあまり実施されていないようである。この他種々の簡易な試験方法¹²⁾が提案されているが、いずれもまだ広く用いられるにはいたっていない。

(4) 凝結硬化過程の測定¹³⁾

JIS R 5210 では、標準軟度のセメントペーストの凝結過程を割り切って処理し、凝結の始発時と終結時を測定するようにしているが、モルタルあるいはコンクリー

測っている。しかし、世界的に見てスランブ試験が最も広く用いられていることは確かであろう。

8) ミキサの性能試験 (JIS A 1119、近く改訂される予定)では、練りませぬ十分の際の不均等性を測定している。吉田徳次郎博士、ヒュー等は、落下飛散試験によって材料の分離を測定することを試みた。

9) 空気量の測定は、普通まだ固まらないコンクリートに対してだけ行なわれるものと思われているが、実際に打設されたコンクリートが、硬化したのちコーアをとってその空気量を測定するのが重要であるという見地から、300 kg/cm² までの高圧を用いた硬化コンクリート空気量測定器もアメリカで案出され、わが国でも市販されている。

10) コンクリートの重量を測定することは、軽量コンクリートや重いコンクリートを打設するとき以外あまり重視されていない。

11) 労力を要するが、最も信頼性に富む試験方法とされている。

12) DIN 52171; 穂積豊：土木技術、昭 34.7; 水野俊一、土木学会誌、昭 34.10; 落山源太郎・小沢清：セメントコンクリート、昭 34.5 および 8

13) ACIペネトロメーターとしてアメリカで開発された貫入試験器は、ビカー試験器をモルタル、コンクリート向きに改造したものであり、硬化過程の測定、コンシステンシーの測定、

トに対して、このように明確な区切りをつけることは一般に行なわれていない。なお、正常な凝結と異なる異常凝結として生ずるものに偽凝結があるが、セメントペーストに対する偽凝結試験¹⁴⁾のようなものを土木学会では取り上げていない。

(5) その他の測定

振動機を用いたときの振動の伝達状況を、埋め込まれたピックアップによって測定すること、コンクリートが型わくにおよぼす圧力を圧力計を用いて測定すること、電気抵抗を測定すること、発熱量¹⁵⁾を測定すること等が実施されている。

2. 硬化したコンクリートに対する測定

(1) 強度の測定

コンクリートの強度を測定する目的は、所要の強度を得るための配合を決めたり、材料が適当かどうかをチェックしたり、弾性係数・耐火性・耐久性・すりへり等強度以外の性質を推定するためである。

強度の中でも、圧縮強度はコンクリートの圧縮強度が高く主として圧縮力に抵抗するように、コンクリートが使われていることから最も重視されており、一般に強度といえば圧縮強度のことを指している。圧縮強度の測定は簡単であること、圧縮強度からコンクリートの他の力学的性質を推定するための資料が豊富であること、各示方書類がコンクリートの品質を代表するものとして、圧縮強度をとっていること等も圧縮強度の測定が最も一般的に行なわれている理由である。

圧縮強度の測定は簡単であるなどといっても、コンクリートは粘弾性体であり、異種材料の結合体であり、しかも脆いといった複雑な材料であるから、圧縮試験は特に慎重に行なわないと、得られた試験値が種々の試験要

偽凝結の測定に適するといわれる。

電気抵抗、音波伝達速度、水和熱等を測定して凝結硬化過程を測定しようと試みられたこともある。

14) 建築学会(JASS 5)、アメリカ(ASTM C 359)等では一応規定しているが、セメントペーストで偽凝結を起こしても、モルタル、コンクリートでは起こさないことが多く、この種の試験を規格化することについては疑問の点が多いようである。

15) ダム、コンクリートその他のマス、コンクリートを対象として、断熱状態におけるコンクリートの発熱量をカロリメータを用いて測定することがよく行なわれていたが、寒中あるいは暑中コンクリートにおけるコンクリート温度測定、特に単位セメント量の多いプレストレストコンクリートにおける温度測定が最近では実施されることが多い。棒状寒暖針などを用いる原始的な方法では、誤差も多くまた集中管理ができないので、熱電対その他の用いられることが多い。またひずみ測定用のカーボン計その他を用いて温度を測定することもある。

16) 同じコンクリートでも、供試体寸法が大きいほど強度は小さくなる。

17) ほっそりした供試体ほど、強度は小さくなる。

18) 加圧面が平滑でないとき強度低下がいちじるしいから、キャッピングには十分注意しなければならない。特に中央部が突出している場合の強度低下は、30%にも達することがある。

19) 破壊荷重の90%以上の荷重のときの載荷速度の影響が

因によって大きく左右されてしまうこともあるから、注意しなければならない。圧縮強度におよぼす試験方法の影響を列挙すると、供試体の大きさ¹⁶⁾、形状¹⁷⁾、表面状態¹⁸⁾、載荷速度¹⁹⁾、試験温度²⁰⁾等であり、これらを示方書や規格で決められたところによることと、試験時のデータを記録しておくことを心掛けなければならない。

圧縮強度以外の強度でしばしば測定されるものは、引張強度²¹⁾、曲げ強度²²⁾および鉄筋との付着強度²³⁾である。ねじり強度および直接せん断強度²⁴⁾は試験が面倒であり、得られた測定値の解釈も面倒であることもつだって、余り実施されていない。

コンクリート部材の試験やコンクリート構造物の看視を行なう際、ひびわれの早期発見²⁵⁾の望まれることが多いが、標準方法のようなものが定められる段階には至っていない。

供試体に対する試験でなく、実際に施工したコンクリートに対する試験から実施コンクリートの強度が測定できれば理想的といえる。この方法については種々の方法²⁶⁾、²⁷⁾が提案されてきたが、部分的破壊をとともう方法²⁶⁾より、非破壊方法²⁷⁾の方が好まれてきたようである。しかし非破壊試験結果から、本質的に破壊と結びついた性質であるところの強度を推定しようとするには、そもそも無理のあることを心得ておく必要は認められる。

疲労強度²⁸⁾についての測定は、もっと行なわれるべきであると思われる。

(2) 弾性的および非弾性的性質の測定²⁹⁾

コンクリートは、鋼などと違って非弾性的傾向の強い材料であるから、弾性的性質を測定するに際しても、非弾性側からの影響を常に意識しておく必要がある。この項で最も重要な測定対象であるヤング係数(縦弾性係数)の測定に当たっても、静的載荷による静弾性係数と動

大きく、速度の小さいほど強度は小さくなる。

20) 供試体温度が高いほど強度は小さくなる。

21) 円柱供試体を横にして引張強度を求める JIS A 1113 の試験方法は、全世界で行なわれている優秀な方法であるが、これは吉田徳次郎博士に指導された赤沢常雄氏により世界に先がけて提唱され、国分正胤博士によって発展されたものであることは周知のとおりである。

直接供試体をつかんで引張試験を行なうと、つかんだところから破壊しやすいので、供試体をつかまずに遠心力を利用して引張試験を行なう方法が欧州で提案されているが、あまり実施されていないようである。

22) 曲げ試験は容易に実施できるし、コンクリート道路その他で実際に問題となるので、圧縮強度について多くの実験が行なわれ、豊富なデータが提供されている。

23) 付着強度試験は重要な試験であり、古来いろいろな試験方法が提案されてきたが、標準方法として実情に合った簡易な方法を制定することが望まれている(コンクリートライブラリー第14号、昭41.1; 岡村甫:コンクリート・ジャーナル、昭41.2)

24) 押抜きせん断破壊が問題となるのはむしろ特殊の場合であり、せん断応力と垂直応力の合成された斜め引張応力による破壊の問題になることがほとんどであるから、真のせん断強度を求める必要性はあまり認められない。またこれを求めることは実験的に相当困難であるが、3軸圧縮試験の結果からモール

的載荷による動弾性係数を区別しなければならないし、静弾性係数の測定に当たっても、載荷速度および応力段階によってその値が大いに変わることには注意しなければならない。設計計算に用いられるヤング係数は、断面の決定または応力度の計算に用いられるものと、不静定力・弾性変形の計算に用いられるものとの2つである。コンクリート標準示方書では、前者に対して応力度の高い段階を考慮して14万kg/cm²、後者に対して応力度の低い段階を考慮して21万kg/cm²ととっている³⁰⁾。動弾性係数の測定は、測定器さえあれば迅速で簡易に実施できるので、コンクリートの品質劣化をトレースするのに利用されている。

プレストレストコンクリート(PC)が出現してから、コンクリートのクリープという非弾性的性質が重要なものとして浮かびあがってきた(もっとも、ダムなどの研究で古くからクリープの研究は進められてきたようである)。クリープ試験も、パネによって載荷するものから高圧ガスを用いるものまでに進化してきている。なお、コンクリートのクリープおよびPC鋼材のレラクセーションと、同じような性質から由来した現象の取扱いが異なっているのは、注意されるべきであろう。

(3) 耐久性の測定

耐久的事であることがコンクリートの重用される大きな理由であるが、コンクリートが耐久的事であるためには、凍結融解、乾湿、寒暖等のくり返し作用からなる気象作用に対して、強くなければならない。従来はこの中でも最も被害の顕著な凍結融解に対する耐久性がよく取り上げられ、単に耐久性といえばこのことを意味していることが多いといえる状態にあった。凍結融解試験についてはアメリカの規格があり、急速試験が自動的に行なえるような試験機もつくられている。凍結融解作用によるコンクリートの劣化状態の判定は、目視と動弾性係数ある

いは重量の測定によっている。

流水、海水、酸類、塩類、油類等に対するコンクリートの劣化状態判定や、すりへり度判定も、同様な手段によって測定を行なっている。

(4) 水密性の測定

一般に、コンクリートは水密であることが望まれるので、古くから種々の試験機が考案され研究されてきた。水圧をかけない試験方法としては、重量変化を測定することによって吸水量を測る単なる吸水試験と、毛細管現象による吸水現象を拡大して吸水経過を測定する新しい試験方法³¹⁾がある。水圧をかけて行なう透水試験方法としては、円板供試体の中央部に厚さ方向に圧力水を作用させる方法、中空円筒供試体の側面の内周、あるいは外周から圧力水を作用させる方法、円柱供試体の一端面に軸方向に圧力水を作用させる方法等がある。圧力水がコンクリート中を透過したときは透水量を測定するし、透過しないときは浸透量を測定する³²⁾。

圧力水かける場合は供試体にひびわれを生じたり供試体境界からろ水したりすることのないよう注意すること、コンクリート中の流れが定常状態にならなければ透水係数を求めるためのダルシーの法則は成立しないこと、供試体が均等質でなく弱点があると試験結果に大きい影響を与えること等に留意する必要がある。透気性試験も、透水試験と類似のものである。

(5) その他の測定

熱伝導率、熱膨張率、比熱等の熱的性質の測定、火災の際の耐火性の測定、電気抵抗その他の電氣的性質の測定、通電の際の電気分解の測定、放射能しゃへい率等の測定、種々の化学的測定³³⁾等が行なわれている。

(終りに) 調査洩れと偏見に対する御叱正を頂ければ幸甚です。

の破壊限界曲線を描き、垂直応力度を零としたときのせん断応力度をもって真のせん断強度とする巧妙な方法が、アメリカで発表されている。組合せ強度については、わが国でも相当研究が進んでいるようである(西沢紀昭:電研技術研究所報、11巻3,4号、関慎吾:コンクリート・ジャーナル、昭41.2)。

25) 通電塗料を塗って発見する方法、パラフィン塗っておき、目視によって発見する方法、ワイヤーストレインゲージをはって発見する方法の3方法を比較したところ、後にあげたものほど早期にひびわれを発見できたという経験がある。アセトンその他を塗ると、ひびわれ部だけ乾燥が速いので、ひびわれを早期に発見できる。しかし蒸発熱をとられるから、ワイヤゲージをはってあるときなどは注意しなければならない。ひびわれ発生時の波をキャッチする方法も最近提案されている(横道・松岡・高田:セメント・コンクリート、昭41.2)。現場のコンクリート構造物に入ったひびわれを監視するためには、モルタルパッドをつけ、測微鏡を用いて便利である。ひびわれ深さを測定する方法も、着色剤を注入してこわす方法のようなもの以外あまりよい方法が考えられていないが、電気抵抗を利用して測定する試みもなされている(岩井徳雄:鉄道土木、昭37.3)。マイクロクラッキングの測定に当たってはX線その他も応用されている。

26) グギその他を引き抜く方法、コアをとる方法等がある。

27) 表面硬度測定方法(シュミット・ハンマーその他)、音速方

法(超音波方法、機械的打撃方法、位相方法)等がある。反射波を利用した、超音波方法によってコンクリート厚さを測定することが試みられているが、良好な結果はまだ得られていないようである。アメリカでは、表面波方法によって良い結果を得たという報告がある。

28) 持続荷重およびくり返し荷重の両者に対する強度低減を測定する必要がある。

29) 乾燥収縮その他の体積変化を測定する必要のあるものもコンクリートに特有のものである(JIS A 1124)。クリープと分離するために基準コンクリート試験体をつくっておく必要がある。PCグラウトや注入モルタルの膨張率測定方法は、土木学会指針で定められている。

30) コンクリートの強度が高くなるにつれて、ヤング係数を大きくとっている指針、示方書もある。

31) 常山源太郎:セメントコンクリート、昭32.5

32) 拡散係数を算定して透水性を判断することは、わが国で提案されたものである。村田二郎:セメントコンクリート、昭35.12、土木学会論文集77号、昭36.11

33) フェノールフタレオン1%液を用いた中性化試験や、化学分析による配合の推定などがあげられる。