

# [35] 複合非破壊試験法によるコンクリートの打込み高さ方向の強度分布の推定

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学工学部)  
 正会員 小阪 義夫 (名古屋大学工学部)  
 正会員 山田 和夫 (名古屋大学工学部)  
 正会員 ○熊谷 茂 (名古屋大学工学部)

## 1. まえがき

実構造物中に打設されたコンクリート(以下、構造体コンクリートと呼ぶ)の強度は、通常打設時に製作した標準円柱体の圧縮試験によって判定されているが、施工方法、養生条件、部材の形状・寸法などによってコンクリート強度は大きく相違し、供試体強度と構造体コンクリート強度とは必ずしも一致しない。また、同一構造物にあっても、その部材・部位によってコンクリート強度は相違し、特に柱や壁などの垂直部材に打設されたコンクリートの強度は、打込み高さ方向にかなりの強度差を生じることが明らかにされている。<sup>1) 2)</sup>

筆者らは、構造体コンクリート強度の実態を把握するための補助手段としての複合非破壊試験に関する若干の研究を行ってきたが<sup>3) 4)</sup>、本報では、断面寸法、高さなどの異なる柱状試験体を製作し、各種非破壊試験(超音波速度法、シュミットハンマー法および引抜き法)並びにコア試験体の強度試験を行ったので、ここにそれらの結果を報告する。

## 2. 実験方法

**2.1 試験体の種類および形状** 本研究では、表-1に示すような2シリーズの実験を行った。Exp.-Iでは、断面寸法(D)が30×30cmおよび15×15cmの2種類、高さ(H)が300cm、150cm、100cmおよび50cmの4種類の柱試験体を使用し、Exp.-IIでは、D=30×30cm、H=150cmの一定とした。また、柱試験体の他に、φ10×20cmの標準供試体も同時に製作した。柱試験体および標準供試体ともブレンコンクリートであり、配筋は全く行っていない。

**2.2 試験体の製作方法** 型枠の製作には、厚さ21mmの合板(写真-1参照)を使用した。なお、一部の試験体については、まだ固まらない状態での水セメント比を測定するために、図-1に示すように、型枠の一部が取りはずせるように工夫した。

コンクリートは普通コンクリートとし、レデーミクストコンクリートを用いた。その調査および使用骨材の性質を、それぞれ表-2および表-3に示す。実測スランブは、Exp.-Iが15.0cm、Exp.-IIが22~25cmであった。コンクリートの打設は、すべて人力によって行い、打設に際しては棒状バイブレータおよび型枠バイブレータを用いて振動締固めを行った。柱試験体は、材令7日目に脱型した後、実験室内の大気中で所定材令まで養生し、円柱体は材令2日目に脱型後、各半数ずつを標準水中および空中で養生した。

**2.3 測定方法** 本実験では、まだ固まらないコンクリートについては、スランブ・空気

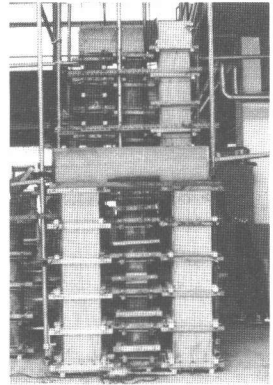


写真-1 型枠の概要

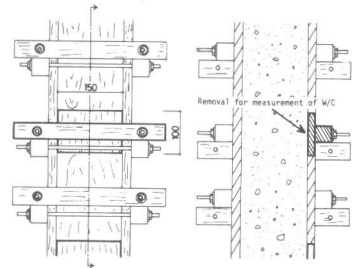


図-1 水セメント比測定用型枠

表-1 実験の概要

|         | Cross section of specimen D(cm) | Height of specimen H(cm) | Water-cement ratio W/C(%) | Testing Age (Weeks) |
|---------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|
| Exp.-I  | 30x30                           | 300                      | 59                        | 1,2,4               |
|         |                                 | 150                      |                           |                     |
|         | 15x15                           | 300                      |                           |                     |
|         |                                 | 150<br>100<br>50         |                           |                     |
| Exp.-II | 30x30                           | 150                      | 46                        | 12                  |
|         |                                 |                          | 54                        |                     |
|         |                                 |                          | 68                        |                     |

表-2 コンクリートの調査表

| Exp.    | W/C (%) | Unit content (Kg/m <sup>3</sup> ) |       |      |        | Admixture |
|---------|---------|-----------------------------------|-------|------|--------|-----------|
|         |         | Cement                            | Water | Sand | Gravel |           |
| Exp.-I  | 59      | 343                               | 202   | 805  | 853    | 0.858     |
| Exp.-II | 46      | 459                               | 211   | 648  | 895    | 0.459     |
|         | 54      | 382                               | 206   | 730  | 887    | 0.382     |
|         | 68      | 311                               | 211   | 828  | 835    | 0.124     |

表-3 使用骨材の性質

|         | Kind of aggregate | Maximum size (mm) | Specific gravity | Fineness modulus | Water absorption(%) | Unit weight (Kg/l) |
|---------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| Exp.-I  | Fine sand         | 2.5               | 2.58             | 2.8              | 0.89                | 1.68               |
|         | Coarse sand       | 5.0               | 2.58             | 2.8              | 1.79                | 1.70               |
|         | Gravel            | 15.0              | 2.61             | 6.35             | 0.61                | 1.60               |
| Exp.-II | Coarse sand       | 5.0               | 2.58             | 2.79             | 1.71                | 1.69               |
|         | Gravel            | 15.0              | 2.61             | 6.31             | 0.61                | 1.59               |

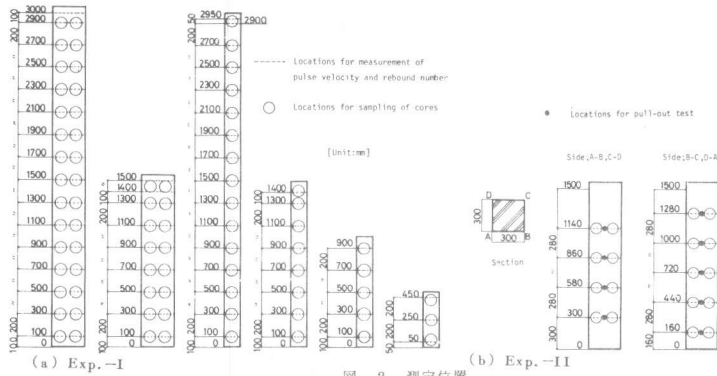


図-2 測定位置

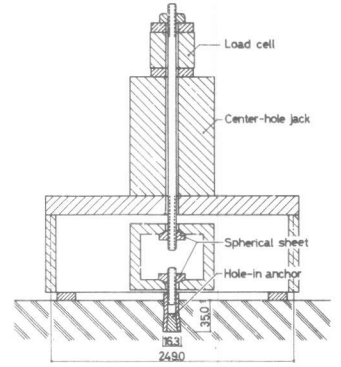


図-3 アンカーの引抜き試験法

量・ブリージング量・比重・水セメント比を測定し、硬化したコンクリートについては、反発硬度・音速・アンカーの引抜き耐力・コアによる圧縮強度・単位粗骨材量などを測定した。これらのうちの主要なものについて、その測定方法を以下に示す。

(1) 水セメント比：コンクリートの打込み終了後、安息状態に達した時点（約2時間後）で型枠の一部を取りはずし、各断面中央部の試料を約500ccずつ取り出して、塩酸溶解熱法<sup>5)</sup>により水セメント比(W/C)を測定した。試料の採取位置は高さ方向につき約30cm間隔とした。なお、比較のために円柱体に打設されたコンクリートの水セメント比も測定した。

(2) 反発硬度：N型シュミットハンマーを使用し、試験前にテストアンビルを用いて機器の較正を行った。柱試験体の相対する二つの側面について、図-2に示す各測定高さごとに5点ずつ、合計10点の反発硬度を測定し、それらの平均値をその高さにおける反発硬度(R)とした。結果の整理に際しては、特にばらつきの大きい値（原則として平均値から±20%以上の誤差をもつもの）は除外した。

(3) 音速：PUNDIT（周波数50kHz）を用いて、コンクリートの打込み方向に垂直な方向の音速( $V_{pc}$ )を測定した。

(4) 引抜き耐力：図-2(b)に示すように、柱試験体の各側面にコンクリートドリルで4~5個の孔（直径15mm、深さ35mm）をあけた後、鋼製ホールインアンカー（直径14mm）を打ち込み、図-3に示すように、センターホールジャッキを用いて、アンカーの引抜き耐力(P)を求めた。

(5) コア強度：Exp.-Iでは材令3週目に、Exp.-IIでは材令1週目に、直径10cmのコアを採取した。コアの採取位置は、原則として、音速、反発硬度および引抜き耐力を測定した位置と一致させた。採取したコアは、1週間空中に放置した後、両端面にイオウキャッピングを施した。コアの圧縮強度( $F_c$ )は、JIS A 1107およびA 1108の規定にしたがって測定した。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 高さ方向におけるコア強度の分布

図-4(a)および(b)は、それぞれExp.-IおよびExp.-IIによって得られたコア強度( $F_c$ )とコア採取位置(h)との関係を示したものである。図に示せば、高さ(H)が300cmの柱試験体の場合、柱下部の約30~50cmの範囲では圧密によって強度はかなり高くなっており、上部に向かうにつれてブリージング等の影響により強度が低下している。高さ(H) =

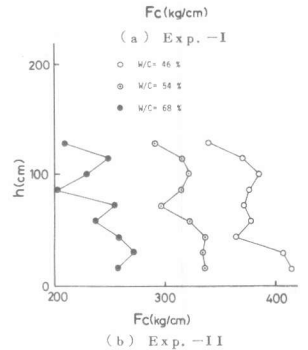
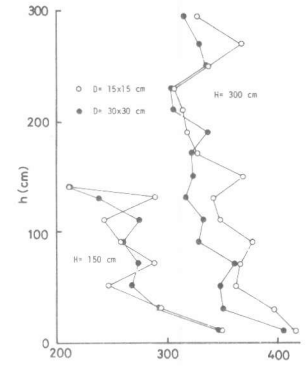


図-4 高さ(h)方向におけるコア強度( $F_c$ )の分布

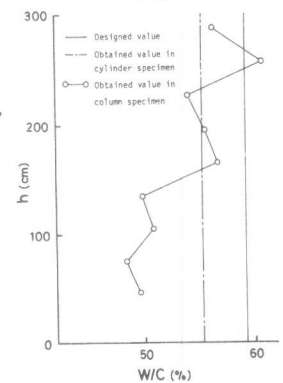


図-5 高さ(h)方向における水セメント比(W/C)の分布

150cmの試験体でもほぼ同様の傾向がみられる。一般に、柱上・下部の強度差は、高さ(H)=300cmの試験体では約 $100\text{kg/cm}^2$ 、H=150cmの試験体では約 $70\sim 100\text{kg/cm}^2$ であり、部材の断面寸法による差異はほとんどみられなかった。ただし、図-4(a)から明らかなように、高さ(H)が300cmと150cmの試験体では、強度そのものにかなりの差がみられる。これは、H=300cmの試験体では型枠から若干の水漏れがあったことや圧密が原因として考えられる。

図-5は、高さ(H)=300cm、断面寸法(D)=15cmの試験体から採取したまだ固まらないコンクリートの水セメント比を塩酸溶解熱法によって測定した結果の一例である。図によれば、水セメント比(W/C)は、試験体の上部に向かうにしたがって増大し、上・下端部では約7%の差が生じている。

**3.2 高さ方向における反発硬度の分布** 図-6は、Exp.-Iによって得られた柱試験体における高さ(h)方向の反発硬度(R)の分布性状を示した一例である。この図によれば、反発硬度は底面から150cmの高さまではほぼ一定であるが、150cmより上部では高さの増加とともにゆるやかに減少し、高さ270cm付近から急激に低下する傾向を示している。試験体上・下端では反発硬度に5~6程度の相違がみられる。

図-7は、Exp.-IおよびExp.-IIによって得られたコア強度(Fc)と反発硬度(R)との関係を示したものである。両者の間の相関係数は、断面寸法(D)が $30\times 30\text{cm}$ の試験体では0.767、D= $15\times 15\text{cm}$ の試験体では0.688となり、一応の相関がみられる。D= $30\times 30\text{cm}$ の試験体の方がD= $15\times 15\text{cm}$ の試験体に比べて、同一強度時の反発硬度は4~5程度大きいのが、これは試験体寸法による打撃エネルギーの吸収度の相違によるものと考えられる。

**3.3 高さ方向における音速の分布** 図-8は、高さ(H)=300cm、断面寸法(D)= $30\times 30\text{cm}$ の柱試験体の高さ(h)方向における音速(Vpc)の分布を示している。コンクリートの音速は、最上端部では小さく、最下端部では大きくなる傾向を示すが、柱中央部では高さによる顕著な相違はみられない。部分的な音速の変動は、局所的な強度の相違によるものと思われる。

コア強度(Fc)とコンクリートの音速(Vpc)との関係を図-9に示す。この図によれば、反発硬度の場合とは異なり、試験体の断面寸法には関係なく、強度と音速との間には一定の相関(CR=0.825)がみられる。

**3.4 複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定** 図-10は、Exp.-Iによって得られた材令4週におけるコア強度と、反発硬度と音速を併用して求めた推定強度とを比較したものである。複合非破壊試験法による強度推定式としては、筆者らが先に提案した次式<sup>8)</sup>を用いた。

$$F_c = 11.8R + 129V_{pc} - 642 \dots\dots\dots (1)$$

ただし、断面(D)= $15\times 15\text{cm}$ の試験体については、反発硬度の実測値に $\Delta R=4$ だけ増した値をR値として採用した。図中の直線は、標準円柱体による強度の実測値を示している。式(1)は小型試験体を用いた実験によって得られた式であるが、どの試験体においてもコア強度は式(1)によってかなりの精度で推定できる。

図-11は、Exp.-IIによって得られた材令12週におけるコア強度と、

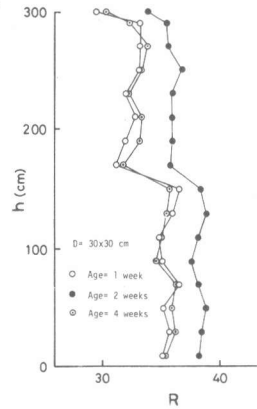


図-6 高さ(h)方向における反発硬度(R)の分布の一例 (Exp.-I)

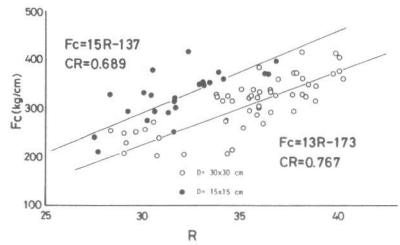


図-7 コア強度(Fc)と反発硬度(R)との関係

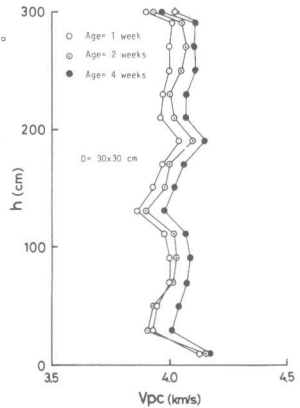


図-8 高さ(h)方向における音速(Vpc)の分布の一例 (Exp.-I)

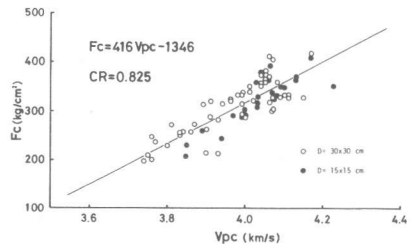


図-9 コア強度(Fc)と音速(Vpc)との関係

前報<sup>4)</sup>で提案した材令13週に至るまでの次のような強度推定式を用いて求めた推定強度とを比較したものである。

$$F_c = 14.7R + 165V_{pc} - 846 \dots\dots\dots(2)$$

図-11から明らかなように、材令12週においても、反発硬度と音速を併用した複合非破壊試験法によってコア強度を比較的精度よく推定することができる。

### 3.5 コア強度とアンカーの引抜き耐力との関係

図-12は、ホールインアンカーの引抜き耐力(P)とコア強度(Fc)との関係を示したものである。ただし、横軸は、引抜き耐力(P)を引抜き深さ(d)の2乗で割った値(P/d<sup>2</sup>)を示している。この図によれば、両者の間にかなり良好な相関(CR=0.841)がみられ、

Exp.-IIによって得られたコア強度と反発硬度との相関(CR=0.855)、コア強度と音速との相関(CR=0.954)と比較してみても大差がない。本実験結果によれば、FcとP/d<sup>2</sup>との間には、次のような関係式が成立する。

$$F_c = 4(P/d^2) - 140 \dots\dots\dots(3)$$

図-13は、高さ(h)方向における引抜き耐力(P)の分布を示したものであるが、コア強度の場合とはほぼ同じ傾向がみられる。

## 4. 結論

本報では、先に提案したシュミットハンマー法と超音波速度法を併用した場合の圧縮強度推定式を用いて、断面寸法および高さを変化させた柱試験体の高さ方向の強度分布を推定し、コアによる強度試験値との比較検討を行うとともに、アンカーの引抜き試験による強度推定法についても若干の検討を行った。本実験によって得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 柱試験体の上・下部では、断面寸法にかかわらずコンクリート強度に70~100kg/cm<sup>2</sup>程度の相違がみられる。
- 2) 反発硬度は、試験体の高さ方向、断面寸法および水セメント比によってかなり変化するが、音速は断面寸法にはあまり影響されない。
- 3) 複合非破壊試験法による強度推定値は、コア試験体による強度の実測値とよい相関を示す。ただし、反発硬度は断面寸法によって補正する必要がある。
- 4) アンカーの引抜き耐力とコア強度との間には、かなり良好な相関がみられるため、反発硬度と音速の他に、引抜き耐力も加えた複合非破壊試験法についても検討する価値がある。

〔謝辞〕本実験に際して御協力を得ました金英俊氏(中国研修生)、林達也氏(名大技官)、古沢新司君(名大学生)をはじめ、研究室の諸氏に謝意を表します。本研究費の一部は、昭和54・55年度科研費・試験研究によったことを付記する。

〔文献〕1)大林組技研,セメントコンクリート, №372,昭53.2, pp.8-15. 2)毛見他,セメントコンクリート, №387,昭54.5, pp.18-25. 3)谷川・山田,セメントコンクリート, №393,昭54.11, pp.10-17. 4)小阪・谷川・山田・熊谷,第2回コンクリート工学講演会論文集,昭55.6, pp.141-144. 5)神田,セメントコンクリート, №300,昭47.2, pp.19-26.

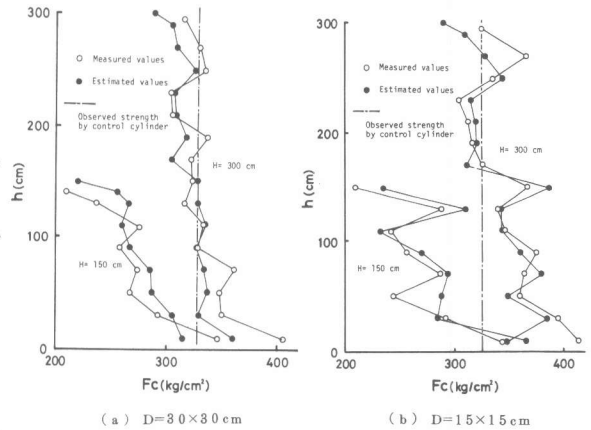


図-10 実測強度と推定強度の比較 (Exp.-I)

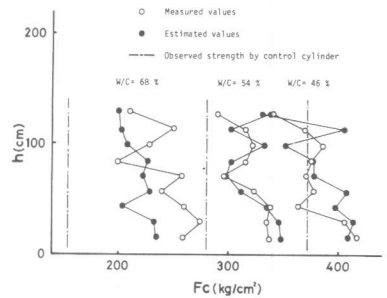


図-11 実測強度と推定強度の比較 (Exp.-II)

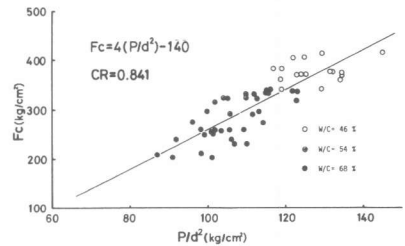


図-12 FcとP/d<sup>2</sup>との関係 (Exp.-II)

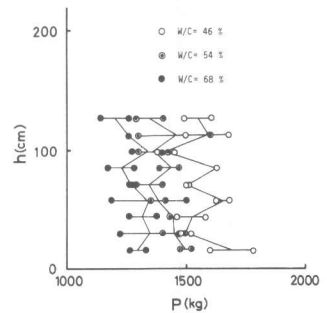


図-13 高さ(h)方向における引抜き力(P)の分布