総説 REVIEW

コンクリートの非破壊試験 (I)*

明 石 外 世 樹**

The Non-Destructive Testing of Concrete (I)

by

Toyoki AKASHI

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kyoto)

1 概 説

現在コンクリート構造物を作っているコンクリートの強度を知るためには、施工時に同じコンクリートから製作した標準供試体の圧縮強度試験によっている。しかし、供試体と構造物コンクリートとは、締固め、型枠、養生などの諸条件が異なり、供試体強度が直ちに実施コンクリート強度とはならない。もちろんコンクリート構造物からコアを採取し、試験すれば問題がないのであるが、部分的損傷、経費などの点で特別な場合以外は適用されていない。したがって簡便に実施コンクリートの品質を非破壊的に試験したいということとはかなり以前からの願望でもあった。

いままでに試みられた方法および現在も利用されているコンクリートの非破壊試験方法の種類を示せば表 I となる。

古くは簡易試験方法ともいべきもので、型枠にセットした埋込み金物、釘などをコンクリートが硬化してから引き抜き、そのときの引抜力からコンクリート強度を求めるという研究があった。この方法は任意箇所を何回も、しかも無傷で試験したいという点で欠点を有し、この方法は広くは適用されなかった。

1930年代にはブリネル硬度の静的な載荷の代りに、ピストル、ばね、重力を利用し一定衝撃エネルギーで鋼球をコンクリート表面に押しつけ、そのときでできるくぼみ直径、ないしはくぼみ表面積とコンクリート強度との関係を求めた、いわゆる表面硬度法が発達してきた。

1948年にはスイスの E. Schmidt が反発の原理を応用したシュミットハンマーを考案し、N_I 型から N_{II} 型、さらに N_{II2} 型と改良された。これは上記のくぼみ直径を測る代りに反発硬度を読みとるもので、あら

ゆる方向のコンクリート面を簡便に試験できることから、広く世界的に利用されている。

一般に非破壊検査といえば、金属材料などの探傷、厚みなどを放射線、超音波、電磁気などを利用して測定することが主であるが、コンクリートは金属材料と異なり本質的に複合材料であり、骨材、空げきなどを多量に含むことからその内部探傷はかなり困難で、むしろコンクリート全体を弾性体あるいは粘弾性体とみなして、振動理論あるいは波動伝ばの理論から弾性的性質、粘性的性質を測定したり、放射線から密度あるいは内部の鋼材位置、寸法、グラウトの注入状態を測定することが多い。

コンクリートの非破壊試験の目的とは、その弾性的性質、あるいは波動伝ば速度から品質を推定することであるが、これら両者の相関は種々の条件が影響して必ずしも良くない。

一方、相関を良くするために、弾性係数と粘性的性質を組合せたり、縦波速度と反発硬度法など他の一方法を併用して推定精度を向上させる試みも研究されている。

なお、振動によるいわゆる共鳴方法はすでに JIS に制定され、コンクリートの劣化過程測定に有効で、凍結融解試験、耐硫酸塩性試験に適用されている。

なお、表 I の表面硬度法をくぼみ直径による表面硬度法と反発硬度法とに分け、前者は概略を、後者については詳述する。

2 表面硬度法

表面硬度法は表 I にあるように、鋼球に一定の衝撃力を与え、これによってできるコンクリート表面のくぼみ直径を測定して、関係式から強度を推定するもので、主としてドイツで研究された。衝撃力を与えるのに自由落下、回転式 (Einbeck pendulum hammer)、ばね式 (Frank spring hammer) がある。これらの場

* 原稿受理 昭和54年4月23日

** 正 会 員 立命館大学理工学部 京都市北区等持院北町

表 I コンクリート非破壊試験方法の種類

種 類	分 類	測定対象物	直接測定値	間接測定値	適用範囲	利 点	欠 点
簡易試験方法	くぎまたはボルトの引抜き コアの引抜き	一般コンクリート構造物	引 抜 力 引 抜 力	圧縮強度 引張強度	品質管理のためコンクリートの強度を推定する	強度推定精度がよい	あらかじめ装置しておく必要があり、局部的損傷をあたえる
表面硬度方法	落下式ハンマー 手動式ハンマー 回転式ハンマー はね式ハンマー	一般コンクリート構造物	くぼみ直径		品質管理、強度発現など	手動式以外は強度推定精度が比較的よい	くぼみ直径を正確に多数測ることは面倒である
	シュミットハンマー	N P L M 一般コンクリート構造物 床、壁 軽量コンクリート マスコンクリート	反発硬度		品質管理、強度発現など	適用が簡便で測定値が多数えられ、強度推定精度も比較的よい	コンクリート内部の品質が判定できない
音 響 学 的 方 法	共 振 方 法	縦 振 動	円柱供試体 はり供試体	共振周波数	動弾性係数 E_D 、 ときには対数減衰率 δ	品質管理、ときには強度の判定	供試体に適用して結果は正確で、コンクリートの平均的性質を知りうる。ポアソン比かわからなくても E_D を求めうる
		たわみ振動	はり供試体 円柱供試体	共振周波数	耐薬品、凍解などの耐久性係数		
		ねじり振動	はり供試体 円柱供試体	共振周波数	動せん断弾性係数、ポアソン比	広くは用いられないが、ポアソン比が必要と	
	音 速 方 法	超音波方法	すべての供試体、構造物のはり、柱、床はもちろん、ダムにも適用できる	超音波パルスの伝ば時間、反射波の検出、透過波の減衰状況	縦波の速度、き裂の位置あるいは床版厚さ	実験室の各種試験、現場コンクリートの強度推定、き裂の有無、深さ、コンクリートの内部分離、空洞の測定	供試体のみならず、大抵のコンクリート構造物に適用できる。コンクリート内部の品質の変化かわかる
		機械的打撃方法	舗装コンクリート、床、壁など	コンクリートの表面をつたわる衝撃波の伝ば時間	縦波、横波の速度	現場コンクリートの品質判定	粗面コンクリートでもよい
		連続表面波	舗装コンクリートなど版	たわみ波および縦波の波長	版・レー厚波速度	表面層の動的性質の調査、コンクリート舗装版の厚さ	E_D 、 G_D も計算できる
	放射線方法	γ 線 X 線	ラジオグラフィー透過方法	はり、壁、床など	鉄釘の太さ、位置、グラウトの空けき、コンクリート中の空けき	密 度	コンクリート内部欠陥が写真で直接知ることかできる
		中性子	中性子散乱 活性化法	同 上	カウント数	湿セメント分量	人畜に対する遮蔽が必要である。測定に時間を要する
電気的方法	誘 電 抵 抗 マイクロ波	同 上	マイクロ波の減衰	湿水版湿	湿水分厚分	多少適用例があるのみ	あらかじめ活性化する必要あり
AE 法		同 上 供試体	AE 割合 伝ば時間	応力履歴 AE 源	まだ実験室的である	構造的に適用できる	動的荷重下には適用しにくい

合、衝撃エネルギー: $A((\text{kg} \cdot \text{cm}))$ 、鋼球直径: $D(\text{mm})$ 、くぼみ直径: $d(\text{mm})$ とするとき、立方体強度: $W(\text{kg}/\text{cm}^2)$ とすれば

$$W = 10^3 \eta \frac{A}{D^3} \left(\frac{d}{D} \right)^{-m} \quad (1)$$

が成立するとしている。ここに η 、 m は係数である。

わが国でも1950年代前半に長島³⁾、木村ら⁴⁾によって基礎的資料が発表されている。

これらの方法はくぼみ直径を直角2方向に 0.1 mm まで測定するわずらわしさと、くぼみの周辺がコンクリート面からはみでるための直径の不明確さのため、あまり普及しなかった。

3 反 発 硬 度 法

3・1 まえがき

1948年スイスの E. Schmidt によって考案されたいわゆるシュミットハンマーが有名で、現在世界的に普及し、わが国にも2万台以上輸入されているといわれる。

シュミットハンマーは図1に示す構造で、ハンマーをコンクリート面に垂直に押しつけると重錘④がプランジャー①に衝突し、そのはね返りがライダー④の移動で示され、これを反発硬度 R として測定する簡便な方法である。しかも任意角度の面が試験でき、さらに強度推定精度も比較的よい。

わが国でも昭和27年9月、日本材料学会には実施コンクリート強度判定法委員会が坂静雄を委員長として発足し、シュミットハンマーを重点的にとりあげ、坂⁵⁾、松井の研究結果を中心に、各研究者の結果も考慮して

図1 シュミットハンマーN型の内部断面

昭和33年8月にN型による取扱い指針として、“シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法(指針案)”が作製され、円柱体強度 σ と反発硬度 R_0 との関係式として、

$$\sigma = -184 + 13.0 R_0 \quad (2)$$

が提案された。

その後シュミットハンマーは広く普及したが、一方、正しいハンマーの使用方法がとられているかどうか、また反発硬度とコンクリート強度との関係曲線を過信して検取時の品質決定に問題がないであろうか。ASTM C 805 (Tentative Method of Test for Rebound

Number of Hardened Concrete) ないように反発硬度試験はコンクリートの均一性、劣化部分の決定、セメントの水和作用による経時変化などを知るために有効で、コンクリート強度を一義的に決定するものではないことは銘記すべきであろう。

以下、シュミットハンマーによる測定上の問題点を示す。

3・2 反発硬度測定上の問題点

R を測定し、強度を推定する場合に考慮すべき問題点は、(1)コンクリートの品質相違は考慮せず、測定方法のみ考慮する場合、(2)コンクリートの品質を考慮する場合とに分けられる。

(1)に属する項目は、(i)シュミットハンマーの各個誤差、(ii)打撃方向、(iii)圧定力ないしコンクリートの応力、(iv)部材寸法および剛度、(v)コンクリートの表面状態、(vi)測定個数。

(2)に属する項目は、(i)コンクリートの配合および強度、(ii)養生条件、(iii)骨材の種類、(iv)使用セメントの種類および混和材料、(v)コンクリート表面の炭酸化など。

3・3 シュミットハンマーの各個誤差

シュミットハンマーのばねおよびフックなどの条件は、その取扱い説明書によれば、図1を参照して次のように指示している。

(1) 衝撃の解放位置 目盛板のカバー⑬をはずし、指標④を手で目盛の90くらいまで引きもどしておき、普通の打撃試験をするとき指標が100の位置でちょうど衝撃が起らなければならないとし、調節はハンマー後部のロックナット②で行う。

(2) 指標の摩擦 指標④とガイド棒との摩擦は50～80gの範囲でなければならない。

(3) 打撃スプリング スプリング⑬は、これを垂直にしたときおもり⑭の自重によって正確に5mm縮まなければならないとされ、スプリング固定端Aの穴の一つの移動で約0.4mmの変化を与えたとしている。

つぎに規定アンビル(重さ35lb、ブリネル硬度500

表II 内部機構の調整前後のアンビルテスト結果

ハンマー番号			1***	3	4	9	10	11	12
規定値									
解 放 位 置	前	100	98.0	99.5	101.8	101	100	97.5	101
	後		—	100	100	100	100	—	100
摩 擦 (g)	前	50～80	20.5	19	70	80	75	125**	95
	後		—	—	70	80	75	—	78
衝撃ばねの力 (mm)	前	5.0	5.3	5.0	6.5	5.0	5.0	4.4	5.6
	後		—	5.0	5.0	5.0	5.0	—	5.0
R_a		80±2	82.7	78.1	76.3	79.1	85.1	69.9	80.1
標準偏差			2.0	1.6	0.4	1.1	0.2	1.8	0.3
変動係数 (%)			2.4*	2.0*	0.5	1.4	0.2	2.6	0.4
$80/R_a$			0.967	1.024	1.048	1.011	0.940	1.144	0.999

*: ハンマー番号1, 3はN₁型で、アンビルテストでも変動係数がやや大きい。これは摩擦が小さいため指標の固定度が悪い。

**：ハンマー番号11は指標部分が摩耗していて、明らかに欠陥を有しているもの

***：ハンマー番号1は原器的な考えから調整しなかったものである。

表Ⅲ 金属板の硬度

種 類	厚さ (mm)	ブリネル硬度 (kg/mm ²)
鉛	14.9	—
アルミニウム	9.8	25
銅	12.1	69
鋼	11.1	116

図2 各種金属板による比較測定

kg/mm²) を強固な床の上において下向打撃したとき、 R が 80 ± 2 の値を示さねばならないとし、80からはずれるときは、

$$R = \bar{R}_0 \frac{80}{R_a} \quad (3)$$

なる式で補正しなければならないとしている。ここに、 R_a : アンビルによる反発硬度、 $\bar{R}_0$: R の平均値、さきに紹介した強度判定法委員会では、1959年10月各ハンマーにどれくらいの差があるかを調査した。

この結果によれば、ハンマー内部の調整前後の値およびアンビル試験による補正值を表Ⅱに示す。調整後の R の値を調べるために表Ⅲに示す各硬度の金属板 (16×16 cm) を 20 cm 立方体のコンクリート面に埋込み、200 t 長柱アムスラー型耐圧試験材で 3 t 圧定とし、水平打撃により R を求めた。結果を図2に示す。これらのうち、ハンマー 4, 9, 10, 12 の4台は取扱説明書の条件に合格しており、かつアンビルによる補正を行っても、各個誤差が相当であることが認められた。すなわち、その範囲は鉛で7、銅で10であった。このことはその後制定された ASTM C 805 にいう R の各個誤差 (必ずしもシュミットハンマーのみを制定していない) 1~3 よりかなり大きい。さらに ASTM にいう“アンビルによる補正は別の R のところでの適用を保証しない”という点は首肯できることである。

ASTM によれば、2 台以上のハンマーによって測定するときは、各個誤差を決定するために典型的なコンクリート面で十分な数の試験によらなければならないとしている。またハンマーは定期的な手入れと検査が必要で、よく使用されるハンマーでは年に1回、それほど頻繁に使用しないハンマーでは半年に1回が推奨されている。

3・4 打撃方向の修正

打撃方向は水平に行うのが標準とされているが、構造物の事情によってそれ以外でも行わねばならないことがある。この方向の補正值は1957年と1960年の取扱説明書に示されている図が多少異り、図3となる。この理由はさだかではない。

指針案作製に当たり、当時の実験結果から1957年の補正值で充分であるとし、これを採用した。

Kolek によれば、図4の状態では摩擦を無視し、かつ傾斜角によるばね常数に変化がないものと仮定し、

$$R_0 = \left(\frac{n l R_a^2 - 2 W R_a \sin \alpha}{n l - 2 W \sin \alpha} \right)^{1/2} \quad (4)$$

を示している。ここに、 R_0 : 水平方向の R 、 R_a : 水平と角 α をもつ方向の R 、 n : ばね常数、 l : 打撃直前のばねの伸び、 W : 重錘重量。

しかし、具体的な数値は示していない。

図3 傾斜角度による補正

図4 ハンマーの打撃角度の関係

3・5 供試体・圧定力および寸法

3・5・1 圧定力 立方体供試体によって R を測定するとき、その圧定荷重によって R は変化する。これは圧定する試験機の質量、据付けの剛柔などにも関係するが、測定面内の圧縮応力に最も影響される。図5は 20 cm 立方体を 100 t アムスラー型試験で圧定力を 20 t まで変化させ、3 t 圧定の R を 100 としたもので、この結果から指針案の応力による補正值が決定された。

一方、円柱供試体の側面を打撃するときは、Mitchell らによれば、 R が一定値になる応力は供試体によって異り、25~60 kg/cm² でそれは圧縮強度の約15%に相当するとしている。また Zoldners, Greene, Grieb はそれぞれ 10, 18, 21 kg/cm² の応力で圧定している。

3・5・2 供試体の容積 供試体を圧定せずに強固

図5 圧定力による R の変化

図6 供試体の容積と反発硬度比の関係

なコンクリートの床などにおいて下向き打撃をすると、供試体の容積によって R の値が変わる。図6は林ら¹²⁾が行った結果で、15 cm 立方体を固定して下向き打撃をしたときの R を1としている。これは15 cm 立方体を圧定(10 kg/cm²)し、水平打撃したときの R を下向き打撃に方向修正をやり、一方圧定しないものは圧定したものより26% R が小さくするとして求め、また15×30 cm 円柱体の底面の R は立方体側面の R の1.14倍になると、これらの修正を行ったものである。容積が10 lを超えると R は一定となることを示している。

3・6 部材厚

試験される部材厚が薄くなると、打撃エネルギーが部材の弾性変形に変えられ、 R の値が小さくなることが予想される。指針案およびASTMにも10 cm以下の床版や壁には適用せず、また一辺が15 cm以下の断面の柱など小寸法で支間の長い部材は避けることになっている。

厚さによる R の低下状況を図7に示す。これは前面寸法が20×20 cmで圧定力は各供試体とも7.5 kg/cm²としたもので、厚さが10 cm以下になると R が急激に低下する。

図7 厚さによる R の変化

3・7 測定面の状態

R の測定は型枠に接していた平滑な面で行うのが原則であって、打撃面はモルタルでおおわれた平滑な平面部を選定しなければならない。打撃点のすぐ内部に粗骨材や空けきがあるときは打撃音などで判断して、その点の値を棄却しなければならない。指針案ではその偏差が平均値の±20%以上になる値、ASTMでは平均値から7以上はずれた値は捨てることになっている。

3・7・1 型枠の種類 Greene¹³⁾は、型枠が鉄製であったか、木製であったかによって R が変化するとし、金ゴテ仕上げ、または金属の型枠に接していた面は、木製型枠に接していた面よりも R が10～25%大となり、特に強度の大なるものほどその差が大きかったとしている。これは表面の平滑さが関係しているとみられ、ASTMでも型枠仕上げの表面が研磨された場合は、全体的に合板型枠の場合で2.1、高密度合板型枠の場合で0.4だけ R が増大するとしている。

最近の明石らの実験によれば図8の結果がえられ、鋼製型枠と木製型枠との差がなかった。この原因は木製型枠には充分油を塗り、また鋼製と同様の平滑さであったためと思われる。

図8 型わくの相違による円柱供試体強度と反発硬度との関係

一方、鋼製型枠とカートン紙型枠¹⁵⁾とは、後者が吸水のため R が大きくなったという報告もあり、もし現場コンクリートがカートン紙型枠で供試体を作られ、これで強度と R との検定曲線を作成するときは、吸水による影響を考慮すべきであるとしている。

3・7・2 曲面の影響 15×30 cmの円柱供試体を圧定し、その側面で R を測り検定曲線を作成する場合、平面との差異が生ずるであろうか。木村はすべての条件を同じくした20 cm立方体と15×30 cm円柱体との側面での R を測定し、表Ⅳを示している。また明石は半径35 cmの曲面と平面とでは R に差異がなかったことを確認している。

3・7・3 乾湿の影響 充分に養生後、乾燥させた供試体を一時的に湿潤状態にすると R が低下する。

表Ⅳ 平面と曲面によるRの相違

W/C (%)	20 cm 立方体の側面	15×30 cm 円柱体の側面
50	45.1	43.7
60	43.4	39.2

¹⁶⁾ Zoldnersによれば、表面乾燥内部飽水状態にするとRは5低下し、これをさらに気乾状態にもどすと、3日でRが3、7日でRが5回復したと報告している。しかし若材齢のコンクリートではこのような差がほとんどなかったともいっている。

さて、コンクリートは気乾状態にあって、一時的に湿潤状態になると強度は低下するし、さらに硬度も低下する。これらが検定曲線に及ぼす影響について、坂⁵⁾らは両者が低下するから表面乾湿の影響に過大視する必要がないとして表Ⅴを示している。

表Ⅴ 供試体の乾湿の影響

配 合	W/C (%)	状態	強 度 (kg/cm ²)	R
1 1 5・3	50	乾	>500	45.5
		湿	>500	42.0
1:1 5・3	55	乾	368	39.3
		湿	386	38.4
1 2・4	60	乾	469	40.6
		湿	458	34.3
1・2 5・5	70	乾	275	33.6
		湿	258	33.6
1・2 5 5	70	乾	334	35.0
		湿	319	34.9
1 2 5 5	75	乾	307	34.6
		湿	292	33.3

⁸⁾ 一方、木村は湿空養生したものと水中養生したもので、同一強度に対しRの差は6～8あるとし、指針案でも連続水中養生のものはRの測定値に+5 ことにしている。

ASTM では、この乾燥と炭酸化の影響を少なくするために試験前24時間表面を充分湿潤にすることを推奨している。というのは現場コンクリートでも供試体でも真の含水状態がなかなかわからないからである。

3・8 表面硬度、反発硬度および強度との関係 (特に乾湿について)

コンクリートの表面硬度を測定する方法には種々のものがあるが、尼崎¹⁴⁾らは表面硬度をシュミットハンマー試験によって生ずるくぼみ体積をその直径から求めている。対象にしたコンクリートは、水セメント比70～25.5%，スランプ7.5 cm を目標とし、粗骨材は最大寸法 25 mm の川砂利および 20 mm の碎石を用いたものである。Rおよびくぼみの測定は 20 cm 立方体により圧縮強度は 10×20 cm 円柱体によっている。

養生は標準水中と空中とで、主として乾湿の差を調べる目的で二つの方法をとった。

図9のくぼみ体積と圧縮強度との関係は、乾湿によって異なる傾向がみられ、300 kg/cm² 程度までは同じ強度でも湿潤コンクリートはくぼみが大きい。また500 kg/cm² 以上の強度の場合、くぼみ体積に変化が非常に少く、この点からシュミットハンマー N₂ 型のばね係数では500 kg/cm² 以上の強度のコンクリートにシュミットハンマーテストを適用して強度を推定してよいものかどうか疑問を与えているように思う。

図9 くぼみ体積と円柱供試体強度との関係

図10 くぼみ体積と反発硬度との関係

つぎに図10はくぼみ体積とRとの関係で、この場合はコンクリートの乾湿にほとんど影響されず、くぼみ体積は硬度を示しているようである。

また別の実験で、最近、筆者の研究室でくぼみができるときにシュミットハンマーのプランジャーにどのような衝撃応力波が発生するかを調べた。プランジャーは正規の長さの約2倍の180.6 mm のものを作り、その中央に半導体ゲージを直角4方向に4枚貼り、直並列結線をして平均ひずみが得られるようにした。実験装置の概要は図11に示すとおりで、図12は観測応力波形を計算機で処理し、材齢別に示した1例である。

図11 プランジャーの応力測定概要

図12 プランジャーに生ずる応力波

何れも、重錘の衝突による圧縮波の第1波が現れ、これがプランジャーおよび重錘を往復しているうちにくぼみを生じ、あたかも先端が固定端になったように第2波の圧縮波が現れる。第2波はくぼみを生ずるための必要時間とエネルギー消費のため若材齢では発生が遅れ、かつ波高が小さい。

第1波および第2波のひずみ波高を ϵ_1 , ϵ_2 とし、 R と ϵ_2/ϵ_1 を示せば図13となる。両者はかなり良い相関を示し、特に乾湿による影響がないことを示している。しかし、圧縮強度 σ_c と ϵ_2/ϵ_1 との関係は図14となり、かつ相違がみられる。

圧縮強度 σ_c と R との関係 (検定曲線ともいう) は直線回帰で示すか、曲線回帰で示すかという問題¹⁴⁾はあるが、シュミットハンマーの動作機構からして、曲線回帰となり、 $\sigma_c = 800 \text{ kg/cm}^2$ 程度までの高強度を対

図13 反発硬度とプランジャーの第1応力波、第2応力波の比

図14 圧縮強度とプランジャーの第1応力波、第2応力波の比

図15 円柱供試体強度と反発硬度との関係

表VI 圧縮強度と反発硬度の回帰関係

	回帰係数および相関係数	乾燥コンクリート	湿潤コンクリート
$\sigma_c = a + bR + cR^2$	a	-98.3 ± 324.6	6.71 ± 142.3
	b	4.43 ± 20.6	3.45 ± 9.67
	c	0.283 ± 0.32	0.214 ± 0.153
	r	0.891	0.957

象にすれば表VIとなる。また測定点も図示すれば図15となり、乾燥コンクリートでいえば指針案の式とは 300 kg/cm^2 程度までよく一致するが、これ以上の圧縮強度となるとかなり差がでてくる。

図15の結果は、最近PC用コンクリート¹⁷⁾を対象にして $\sigma_c - R$ の関係を求めた沢田らの検定曲線

$$\sigma_c = -441 + 23.4R \quad (5)$$

とほぼ一致することがわかる。

3・9 コンクリート強度と反発硬度との関係 (検定曲線)

3・9・1 検定曲線の推移 検定曲線をスイスの取扱い説明書により年代順に調べると図16のようになる。1950年ごろの初期の立方体強度 W と R との関係は図中 $1W$ で示され、同一 R に対してその後のものと比べてかなり高い強度を示している。その後1957年、1960年

図16 各検定曲線の比較

と2者に幾分差異は認められるけれども、1Wより80～100 kg/cm² 低い立方体強度を示している。またこの間にN型器種についてもN₂型に変更されている。このことはスイスにおけるその間の実験の結果修正されたものか、あるいはハンマー自体の内部機構、特にスプリングの性質の変更によるものかどうか明かでない。

現在のハンマーに貼布の曲線は4Zで示されるもので、これは3WをZ=0.85Wにより円柱体強度に換算したものである。

わが国では1954年に当時の京大建築学教室の坂教授が直接スイスのBureau BBRから輸入され、早速わが国のコンクリートについて検定曲線を作成されるべく広範な実験が行われた⁵⁾。実験の条件は(1)セメントは普通および早強ポルトランドセメント、高炉セメントの3種、(2)コンクリートの配合は重量比1:1.5:3～1:2.5:5、水セメント比48～80%、(3)材齢は3日～1年で28日までのものは水中養生で、試験前3～4時間乾燥させた。28日水中養生後は地下室保存、(4)20 cm立方体を7.5 kg/cm²で圧定し、木製型枠に接していた鉛直側面でRを求めた。(5)圧縮強度はRを求めた立方体(F_W)と同一条件で製作養生された15×30 cmの円柱体(F_Z)で求めた。Rの範囲は18～45で資料総個数は432個である。

各種セメントを総合して得られた結果は

$$F_W = -146 + 12.3R + 0.0485R^2 \quad (6)$$

$$F_Z = -17.4 + 0.830F_W \quad (7)$$

(7)式を(6)式に代入して、

$$F_Z = -138.5 + 10.2R + 0.0402R^2 \quad (8)$$

また、RとF_Zとをプロットした図から最小自乗法で2次式の係数を決めると

$$F_Z = -229 + 16.1R - 0.0527R^2 \quad (9)$$

実用的には

$$F_Z = -184 + 13.0R \quad (10)$$

標準偏差 27.8 kg/cm²

図16で3W曲線を(7)式で換算したものが5Z曲線であり、また6Zの直線は(10)式で、当時のその他の研究者の結果と比較して適当なものであるとして指針案の式とされた。

なお、(8)、(9)および(10)式の関係を示したものが図17となる。

また高強度コンクリートを対象にするときは3・8節が参考になる。

図17 円柱体強度とR

3・9・2 コンクリートの品質と検定曲線 反発硬度は強度と同様に種々の因子によって影響される。3・2節で述べた(1)に属する因子について、現在までわかっている結果について述べる。

(1) セメントの種類

坂らは図17に示す3種のセメントにつき、Klieger¹⁸⁾はI～IVおよびII A、III A型の6種について同じく実験したところ、検定曲線には実用上差異を認めなかったと報告している。¹⁹⁾しかし、特殊な例ではあるがKolekによれば高アルミナセメントコンクリートは普通ポルトランドセメントコンクリートの検定曲線でえられる強度より100%高くなり、また超硫酸塩セメントコンクリートでは逆に50%低くするとしている。

(2) 粗骨材の種類

天然産骨材を使用するときPetersen, Stollの実験²⁰⁾では骨材の品種によって検定曲線に影響を与えないとしているが、一般的にいうて骨材の種類によって影響されるといえる。²¹⁾例えばGriebによれば同一Rに対して石灰石碎石はシリカ質川砂利より約90 kg/cm²強度が大きくなったとし、また異った産地の川砂利4種について比較するに検定曲線の傾斜もやや異なり、同一Rでも18～24 kg/cm²の変動があったとも報告している。

軽量コンクリートの場合はL型ハンマーを使用すべきであるが、N型ハンマーを使用したGreene¹³⁾の報告によれば、普通コンクリートに対する検定曲線より推

定した強度の60～80%になるという。

(3) 空気量

Zoldners¹⁶⁾ は材齢 28 日では普通コンクリートと AE コンクリートでは差異がなく、材齢 7 日では同一強度に対して AE コンクリートは R が 1～3 低くなる実験結果を示しているが、実用上差異がないとしてよいともいっている。

(4) 炭酸化

コンクリート表面が炭酸化すると、やはり検定曲線に影響を与える。炭酸化の深さは数 mm から 20 mm に達するといわれ、炭酸化を考慮しないと推定強度を高く見積ることになる。

ASTM では乾燥と炭酸化の影響を少なくするには、試験前24時間表面を充分湿潤状態におくように、また 6 か月以上の材齢のコンクリートと著しく若材齢のコンクリートを比較するには表面を深さ約 5 mm 研摩する必要があると規定している。

3・10 シュミットハンマー使用上の留意

1965～1967年にかけて RILEM のワーキンググループで非破壊試験法についての国際的な調査で、シュミットハンマーについて次のようなコンセンサスを得ている。“シュミットハンマー試験はコンクリートの均一性をチェックしたり、またあるコンクリートと他のコンクリートを比較するときは非常に有効であるがコンクリートの強度は大略を知りたいときのみ使用することができる”としている。

ASTM でも、反発硬度はコンクリートの強度を一義的に決定しようとするものではないと明記している。

さらに Molhotra¹¹⁾ はシュミットハンマーの R からの強度推定精度は $\pm 15 \sim \pm 20\%$ であり、さらに実験室で求めた検定曲線は、構造物コンクリートの強度予測に使用することを推奨していない。

要約すれば、シュミットハンマーによる推定強度を過信してはならないということである。

参 考 文 献

- 1) 明石外世樹, “コンクリートの非破壊試験法”, p. 9 (1954) コンクリートパンフレット, No. 36, セメント協会
- 2) Gaede, K., D. A. f. S. **107**, 15 (1952).
- 3) 長島 弘, セメント技術年報, **VII**, 407 (1953).
- 4) 伴 潔, 木村恵雄, セメント技術年報, **IX**, 400 (1955).
- 5) 坂 静雄, 松井敏夫, セメント技術年報, **IX**, 395 (1955).
- 6) 日本材料試験協会実施コンクリート強度判定法委員会, 材料試験, **7**, 426 (1958).
- 7) 坂 静雄, 明石外世樹, セメント技術年報, **XV**, 260 (1961).
- 8) 木村恵雄, 材料試験, **5**, 641 (1956).
- 9) Kolek, J., Mag. of Conc. Res., **10**, No. 28, 27 (1958).
- 10) 明石外世樹, 立命理工紀要, No. 2, 93 (1957).
- 11) Malhotra, V. M., “Testing Hardened Concrete: Nondestructive Method”, p. 16, etc. (1976) ACI Monograph, No. 9.
- 12) 林 正道, 前川静男, 沖野俊広, セメント技術年報, **XX**, 474 (1966).
- 13) Greene, G. W., Proc. ACI, **51**, 249 (1954).
- 14) 尼崎省三, 明石外世樹, セメントコンクリート, No. 385, 16 (1979).
- 15) Mitchell, L. J., and G. G. Hoagland, Highway Res. Board, Bull. No. 305, 14 (1961).
- 16) Zoldners, N. G., Proc. ACI, **54**, 161 (1957).
- 17) 沢田守雄, 兼子政志, 沢田兼二, プレストレストコンクリート, **18**, 22 (1976).
- 18) Klieger, P., Proc. Highway Res. Board, **34**, 392 (1955).
- 19) 明石外世樹, コンクリート工学, **14**, 41 (1976).
- 20) Petersen, P. H., and U. W. Stoll, Proc. Highway Res. Board, **34**, 387 (1955).
- 21) Grieb, W. E., Public Roads, **30**, 45 (1958).

本総説の続報 (II) は、昭和54年11月号 (No. 314) に掲載されます。ご参考のため、目次を下記に掲げます。

4. 動的方法

4.1 共振方法 (ソニック方法) の推移 4.2 音速方法の推移

5. 超音波法

5.1 超音波法の原理 5.2 測定方法および影響する因子

6. 版厚の測定

6.1 反射波法 6.2 連続表面波による方法

7. 併用法

7.1 動弾性係数と対数減衰率 7.2 音速と減衰 7.3 音速と反発硬度