

# 論文 反発度法による構造体コンクリート強度推定精度向上技術の研究

米澤 敏男<sup>\*1</sup>・三井 健郎<sup>\*2</sup>・北川 高史<sup>\*3</sup>・今城 宏三<sup>\*4</sup>

要旨：反発度法による構造体コンクリート強度の推定精度を向上させることを目的に，コンクリートの表面で測定した反発度と内部のコア強度の関係を表面から内部にかけて測定した微小硬度により調べた。その結果，コンクリートが中性化するとその部分で微小硬度が増大し，表面の反発度が増大する事，中性化していない内部の微小硬度とコア強度が良好な直線関係にあることなどが明らかとなった。これらのデータを分析し，中性化に影響されない内部の仮想の反発度（修正反発度）を算定する方法を考案し，これを用いた強度推定法（修正反発度法）が，従来の方法に比べ高い精度を有することを示した。

キーワード：リバウンドハンマー，反発度，修正反発度，構造体コンクリート強度，中性化

## 1. はじめに

反発度法はリバウンドハンマーで測定した反発度から構造体コンクリートの強度を簡易に推定しようとする非破壊試験方法であり，シュミットらにより開発された後，すでに約半世紀が経過している。この間，この方法の精度や問題点について多くの研究がなされるとともに，技術の現状も何度かまとめられ<sup>1)</sup>等，標準化もなされてきた<sup>2),3)</sup>等。しかし，この方法が構造体コンクリートの強度の推定を主たる目的としたものであるにもかかわらず，測定した反発度が，強度以外にも中性化，表面含水率，材齢等の要因の影響を受けるため測定値のバラツキが大きく，構造物ごとにコア強度で校正しないと強度の推定は難しいとの認識<sup>3)</sup>が定着している。

本論文では，測定した「表面の硬度」から「構造体の内部の強度」を推定しようとしている点に反発度法の本質的な問題があるとの指摘<sup>4)</sup>を，逆に，研究すべき精度向上技術の原点と考え，コンクリートの表面で測定した反発度と内部のコア強度とを表面から内部にかけて測定した微小硬度により関連づけることを研究した。この結果に基づいて，反発度法の精度を向上させ

る新しい方法として「修正反発度法」を考案し，この方法の有効性を実構造物の測定データから検証した。

## 2. 実験

### 2.1 実験概要

筆者らの研究<sup>5)</sup>によれば，コンクリートの水セメント比，表面含水率，材齢，中性化等の要因のうち，反発度と構造体コンクリート強度（コアの圧縮強度）の関係に最も強く影響しているのは，表面の硬度を高くする中性化であり，水セメント比や材齢は中性化を介して両者の関係に影響していると考えられた。そのため，表-1に示すように，水セメント比 40～70%，試験体の暴露環境を屋外と促進中性化環境とし，材齢 28～1000 日で反発度，コアの圧縮強度（以下，コア強度と略記），中性化深さおよび表面から内

表 - 1 実験の因子と水準

因子	水準
水セメント比(%)	40, 55, 70
暴露環境	屋外, 促進中性化(w/c=55)
材 齢 (日)	28, 50, 100, 200, 500, 1000

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 部長 Ph.D. (正会員)

\*2 (株)竹中工務店 技術研究所 主席研究員 工修 (正会員)

\*3 関西電力(株) 土木建築室

\*4 近畿コンクリート工業(株) 建築事業部

部への微小硬度の分布を測定し，精度向上技術の検討のための基となるデータを取得した。

## 2.2 試験体

### (1) 形状寸法

試験体は，100×100×30cm の壁状であり，壁の両面を試験面とした。試験面以外の4面はエポキシ樹脂でコーティングした。

### (2) 使用材料とコンクリートの配(調)合

セメントは普通ポルトランドセメント，混和剤は AE 減水剤，細骨材は陸砂，粗骨材は砕石を使用した。細粗骨材の物理的性質を表 - 2 に，コンクリートの配(調)合を表 - 3 に示す。

### (3) コンクリートの打設と養生

壁状試験体の型枠上面(100×30cm 面)からコンクリートを3層に分けて打設し，各層を棒状バイブレーターで締め固めた。打設後，湿潤養生を行い，材齢5日で脱型し，材齢7日から暴露環境に設置した。

## 2.3 暴露環境

暴露環境のうち，「屋外」は千葉県印西市の屋外，「促進中性化」はCO<sub>2</sub>濃度 = 5% ，温度 = 20℃ ，相対湿度 = 60%の実験室である。

## 2.4 測定

壁状試験体の反発度，コア強度，中性化深さ，および微小硬度を材齢28日から1000日まで測定した。これらの項目の測定位置を図 - 1 に示す。

### (2) 反発度

日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」<sup>3)</sup>に従い，約20×20cmの測定面に間隔3cmのグリッドを描き，測定点数が25点以上になるように測定した。リバウンドハンマーとしてはNR型を使用し，気乾状態のコンクリート面で測定した。

### (3) コア強度

反発度測定後，JISA 1107に従い100×300mmのコアを採取し，両側50mmを除いた試験体によりコア強度を測定した。

### (4) 中性化深さ

コア強度試験時に除いた両側50mmのコアを割裂し，中性化深さを測定した。測定には1%フ

表 - 2 骨材の物理的性質

	骨材の種類	産地	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	粗粒率
細骨材	陸砂	茨城県鹿島	2.57	1.24	1770	2.51
粗骨材	砕石	栃木県葛生	2.61	1.02	1610	6.63

表 - 3 コンクリートの配(調)合

No.	水セトメ比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						水	セメント	細骨材	粗骨材
1	40	18	4.5	20	38.3	191	478	611	1003
2	55	18	4.5	20	46.3	181	329	806	955
3	70	18	4.5	20	48.9	178	254	887	946

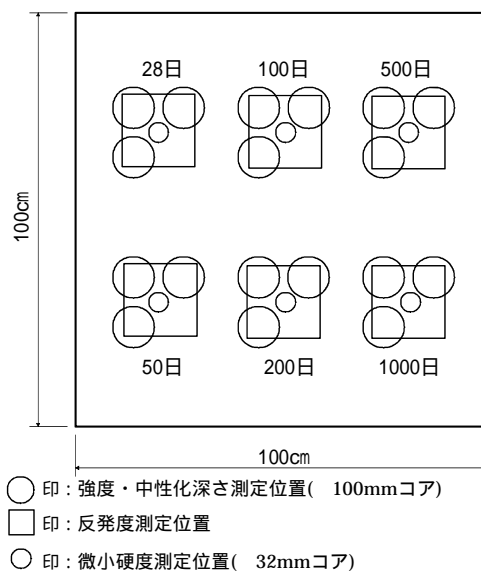


図 - 1 壁状試験体の測定位置

ェノールフタレイン溶液を用い，コンクリート表面から赤色着色部までの深さを片側5点，両側で10点測定し，その平均値を中性化深さとした。

### (5) 微小硬度

採取した32mmのコアを図 - 2 に示すように切断し，測定面をダイヤモンドスラリーにより鏡面研磨した。コンクリート表面から1mm，3mm，5mm，10mm，20mmの深さ（促進中性化の材齢1000日のみ30mm，35mm，40mmを追加）で，JIS Z2244「ビッカース硬さ試験 - 試験方法」に従い，微小硬度を測定した。同一の深さでの測定数は15点とし，平均値をその深さの微小硬度とした。微小硬度は，対角面136度のダイヤモンド

ンド正四角錐圧子を試験面に押し付けた時の荷重と対角線長さから次式により算定した。

$$H_v = \frac{2F(\sin a/2)}{d^2} = \frac{1.854F}{d^2} \quad (1)$$

- ここに、 $H_v$  : 微小硬度  
 $F$  : 試験荷重 (kgf)  
 $a$  : ダイヤモンド圧子対面角(136°)  
 $d$  : くぼみの対角線長さの平均値 (mm)

### 3. 実験結果

#### 3.1 コア強度と中性化深さ

コア強度、中性化深さと材齢の関係を図 - 3、図 - 4 に示す。水セメント比が小さくなると、コア強度が大きくなるが、屋外と促進中性化の環境条件でコア強度はほとんど変わらない。中性化深さは、促進中性化の環境で屋外の約 20 倍となっている。

#### 3.2 微小硬度の経時変化

コンクリート表面からの深さ 1mm と 20mm の位置で測定した微小硬度と材齢の関係を図 - 5 に示す。深さ 20mm の特性は図 - 3 に示したコア強度と材齢の関数に類似しており、中性化の影響の少ない内部では、微小硬度はコア強度に良く対応していることがわかる。これに対して深さ 1mm の微小硬度は、コア強度および深さ 20mm の微小硬度の特性とは大きく相違しており、いずれの水セメント比でも深さ 20mm より微小硬度が大きく、促進中性化の環境では、特に早期の材齢から高い微小硬度が測定される。

#### 3.3 微小硬度の分布の経時変化について

コンクリート表面から深さ 1mm、3mm、5mm、10mm、20mm の位置 (促進中性化 材齢 1000 日のみ 40mm まで) で測定した微小硬度の分布とその経時変化を図 - 6 に示す。中性化深さの位置を図中に破線で示す。

促進中性化の環境条件で最も顕著だが、表面の微小硬度が内部よりも高い。中性化の進展とともに微小硬度の高い領域も内部の方へ進展しており、微小硬度の高い領域と中性化している領域が比較的良く対応している。屋外環境で

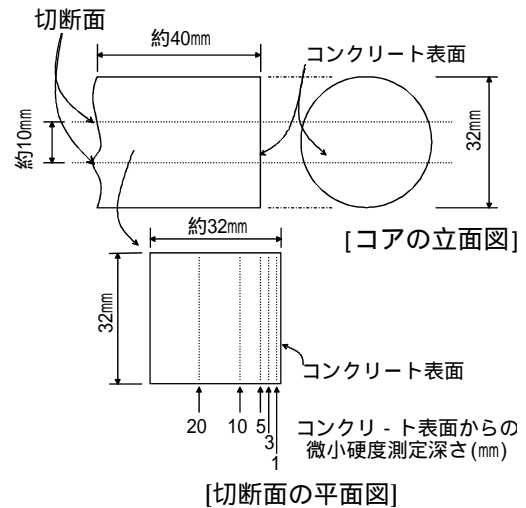


図 - 2 微小硬度測定用試験体

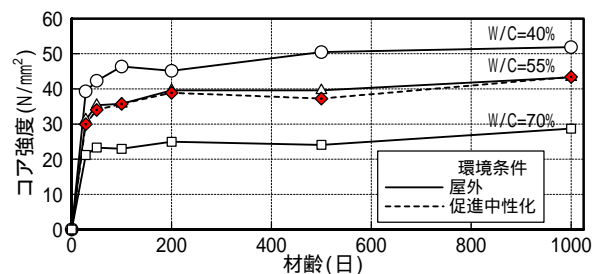


図 - 3 コア強度と材齢の関係

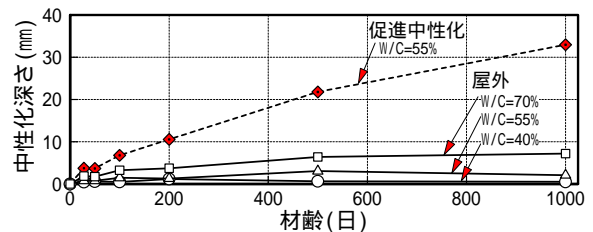


図 - 4 中性化深さと材齢の関係

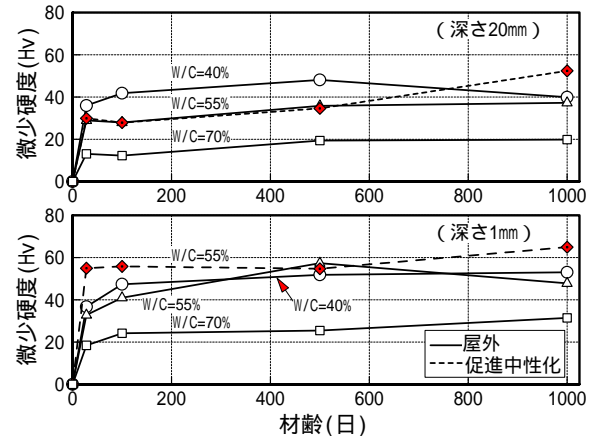


図 - 5 深さ 1mm と 20mm の微小硬度と材齢の関係

も水セメント比 70%と 55%では促進中性化の環境と同様に表面の微小硬度が高く、微小硬度の高い領域と中性化領域とは比較的良く対応している。水セメント比 40%では図 - 4 に示したように中性化がきわめて小さいため、表面部での微小硬度の増大傾向も小さい。

### 3.4 微小硬度と反発度の関係

微小硬度と反発度の関係を図 - 7 に示す。深さ 1mm の表面部では両者は比較的良好な直線関係にある。しかし、深くなるに従い相関が弱まり、相関係数は深さ 1mm の  $r = 0.86$  から 20mm では  $r = 0.71$  に低下する。これは、表面部では、反発度が表面の硬度を測定しているため、反発度と微小硬度が良く対応するのに対し、内部では表面部と硬度が異なるため、両者の対応が悪くなることによるものと考えられる。

### 3.5 微小硬度とコア強度の関係

微小硬度とコア強度の関係を図 - 8 に示す。深さ 1mm の表面部の相関係数が  $r = 0.75$  であるのに対し、内部に行くほど両者の相関は良好となり、深さ 20mm では中性化領域の 2 点を除くと相関係数は  $r = 0.96$  と極めて高い。これは、中性化による硬度増大の影響を受けない内部では、微小硬度とコア強度が良く対応しており、両者が直線関係にあることを示している。

## 4. コア強度の推定精度向上法

### (修正反発度法) の検討

前項で示した実験結果から、反発度は表面近傍の微小硬度と良好な直線関係にあるものの、コア強度を推定するには、中性化の影響を受けない内部の微小硬度を知る必要のあることが明らかとなった。この事実を基に、測定した反発度をコア強度に直接関連した反発度に変換する方法(修正反発度法)を検討した。

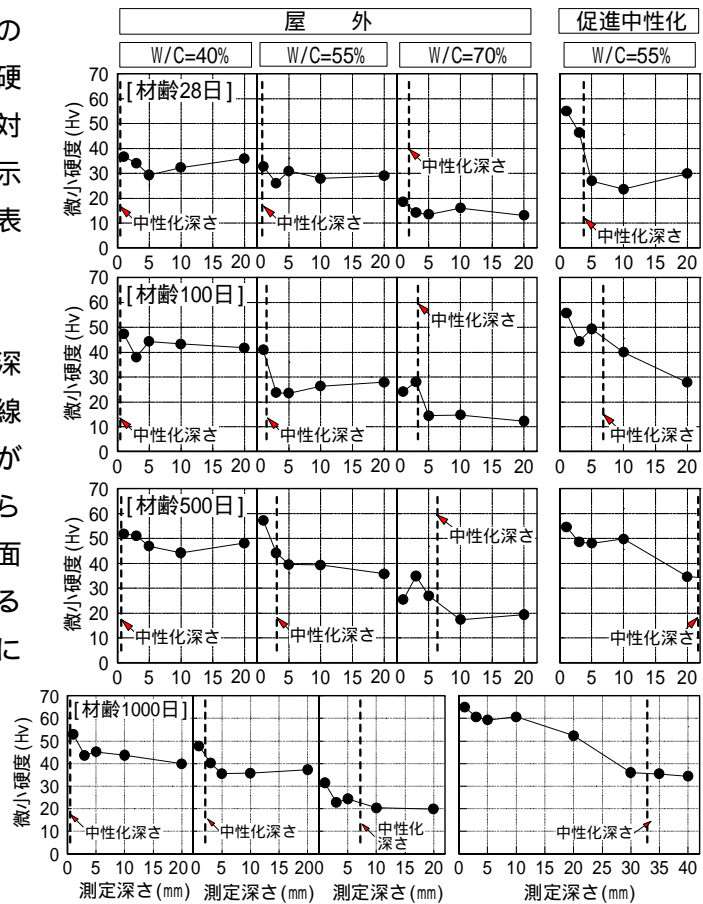


図 - 6 微小硬度の分布の経時変化

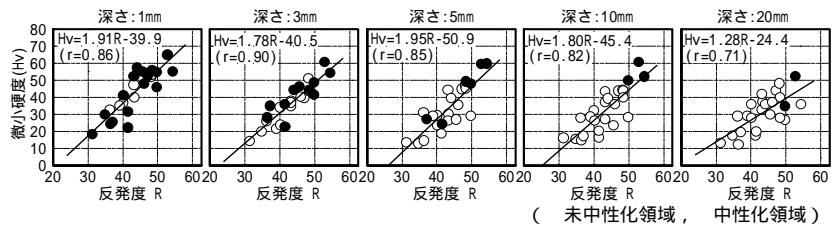


図 - 7 微小硬度と反発度の関係

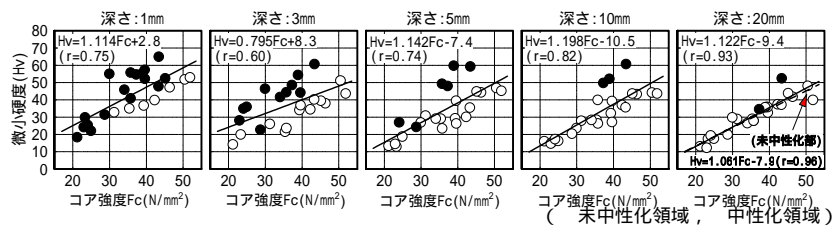


図 - 8 微小硬度とコア強度の関係

### 4.1 反発度の修正方法

反発度(R)と微小硬度(H)は、3.4 に示したように式(2)のような直線関係を有すると考えられる。

$$H = a \cdot R + b \quad (2)$$

ここに、 $a$ 、 $b$  は定数であり、図 - 7 の深さ 1mm のデータから  $a = 1.91$ 、 $b = -39.9$  とすることがで

きる。

式(2)を基に，表面部と内部（中性化の影響を受けない部分）の微小硬度を各々 $H_s$ ， $H_i$ ，反発度を $R_s$ ， $R_i$  とすると，式(3)，(4)が成立する。 $R_i$  は測定できない仮想の反発度であるが，この値が，中性化の影響を受けていない内部の強度と直接関連している仮想の反発度である。したがって， $R_i$  を修正反発度と呼ぶことにする。

$$H_s = a \cdot R_s + b \quad (3)$$

$$H_i = a \cdot R_i + b \quad (4)$$

式(3)，(4)から $R_i$ として式(5)が求まる。

$$R_i = \frac{H_i}{a} - R_s - \frac{b}{a} \quad (5)$$

ここに， $R_i$ ：修正反発度， $R_s$ ：測定反発度，  
 $(= H_i/H_s)$ ：表面硬度修正係数

したがって， $H_i$  が求めれば $R_i$ を算定できることになる。しかし，表面と内部の微小硬度を測定しない限り $H_i$ は求まらないので，通常の構造物の調査データからは $H_i$ を求めるのは難しい。そのため， $H_i/H_s$ に関連する要因について種々検討したところ，図-9に示すように $H_i/H_s$ と中性化深さとが強い関連を有することが明らかとなった。すなわち，構造物の調査で中性化深さがわかれば， $H_i/H_s$ が求まることになる。図-9の関係を近似すると下式（図中の破線）のようになる。

$$\left. \begin{aligned} &= 1 && (C \leq 1) \\ &= 0.5 + 0.5/C && (1 < C \leq 5) \\ &= 0.6 && (C > 5) \end{aligned} \right\} (6)$$

ここに， $C$ ：中性化深さ(mm)

#### 4.2 実験結果による検証

本研究の実験結果について，上記の方法で中性化深さから $H_i/H_s$ を求め， $H_i/H_s$ から修正反発度( $R_i$ )を求めた。図-10にコア強度と測定反発度( $R_s$ )および修正反発度( $R_i$ )の関係を示す。測定反発度を用いた場合の相関係数が $r=0.67$ であるのに対し，修正反発度を用いると相関係数は $r=0.95$ と大きく向上しており，この方法を用いることにより反発度法による構造体コンクリート強度の推定精度が向上することがわかる。

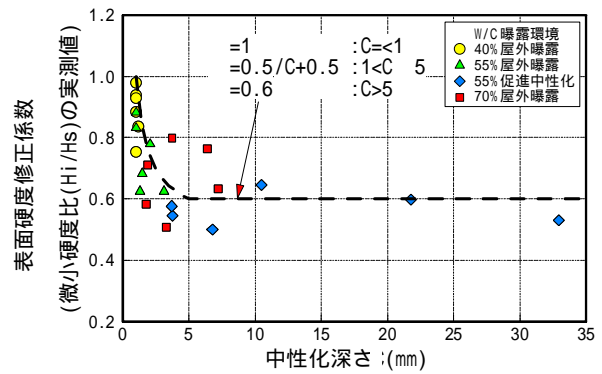


図-9 表面硬度修正係数 と中性化深さの関係

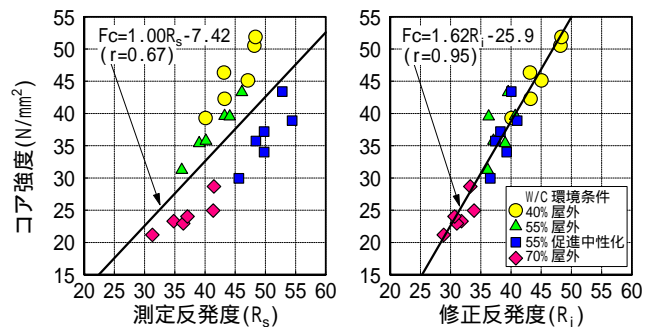


図-10 コア強度と反発度の関係（実験データ）

#### 5. 構造物の調査データによる検証

全国に分布する竣工後の年数や骨材の異なる表-4に示す7つの建物のデータを用いて修正反発度法を検証した。これらの建物のデータは柱部材または梁部材で測定したものであり，コア強度，中性化深さ，反発度の三つを同じ位置で測定している。中性化深さは，0mmのもの（仕上げの影響）から31mmまでの範囲に分布している。

図-11にコア強度と反発度の関係を示す。実構造物においても修正反発度を用いることにより，両者の相関は大きく向上することが確認できる。また，図-10で示したコア強度と修正反発度の関係式は実験データから求めた式であるが，この式は，図-11に示したように構造物のデータから求めた回帰式とほぼ一致しており，相当範囲の実構造物にも適用可能な一般性を有することがわかる。したがって，これをコア強度と修正反発度に関する修正反発度式(式(7))と呼ぶことにする。

（修正反発度式）

$$F_c = 1.62R_i - 25.9 \quad (7)$$



図 - 12 に反発度による推定強度とコア強度の関係を示す。左側は反発度の測定値から材料学会式で推定した強度，右側は修正反発度と修正反発度式を用いて推定した強度を用いている。材料学会式をそのまま用いたのでは，全体として強度を高く評価し，相関も低いのに対し，修正反発度式を用いることにより，推定値が適正化され相関係数も向上している。この式による推定値は，おおよそ $\pm 5 \sim 7\text{N/mm}^2$ の範囲に入っているようである。これらの結果は，構造物や骨材がある程度相違しても，修正反発度と修正反発度式を用いることにより，リバウンドハンマーで測定した反発度から簡易にコア強度を推定することが可能なことを示していると考えられる。従来のように構造物ごとにコア強度と反発度の校正式を作成する場合でも修正反発度を用いることにより精度はさらに向上すると考えられる。

## 6. まとめ

本研究により得られた成果を要約する。

- (1) 中性化した領域では，微小硬度は未中性化領域よりも著しく大きくなる。
- (2) 中性化により微小硬度が増大すると反発度も増大する。
- (3) 中性化していない内部の微小硬度とコア強度は良好な直線関係にある。
- (4) 中性化深さから求めた表面硬度修正係数により，測定した反発度をコア強度に直接リンクした内部の仮想の反発度すなわち修正反発度に変換することができる。
- (5) 修正反発度と修正反発度式で推定した強度は，7種の構造物でもコア強度と良好な相関があり，修正反発度法により簡易な構造体強度の推定が可能と考えられる。

## 参考文献

- 1) 明石外世樹：シュミットハンマーの使用上の注意，コンクリート工学，Vol.14，No.5，pp.41-46，1976.5

表 - 4 調査構造物の概要

建物記号	竣工後の年数	測定位置の屋内外の別	粗骨材の種類	細骨材の種類
A	21	屋外, 屋内	川砂利	川砂
B	26	屋外	川砂利	川砂
C	15	屋内	碎石	山砂
D	31	屋内	碎石	山砂
E	22	屋内	碎石	砕砂, 川砂
F	27	屋外, 屋内	碎石	砕砂, 山砂
G	6	屋内	碎石	川砂

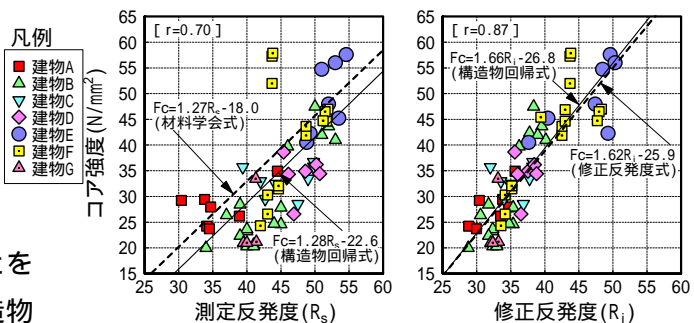


図 - 11 コア強度と反発度の関係（構造物データ）

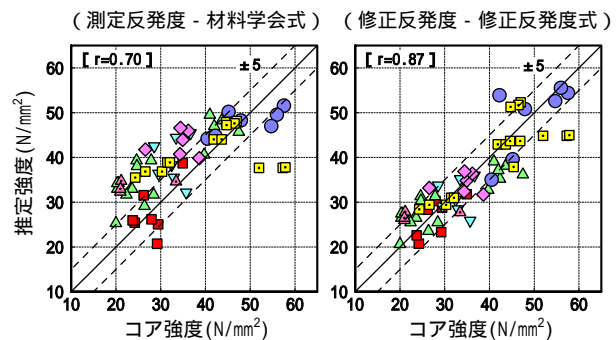


図 - 12 推定強度とコア強度の関係（構造物データ）

- 2) 日本材料学会（材料試験協会）実施コンクリート強度判定法委員会：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（案），材料試験，Vol.7，No.59，pp.426-430，1958.8
- 3) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，1983.2
- 4) 佐治泰治：鉄筋コンクリート建物の耐久性と耐力診断，セメントコンクリート，No.405，pp.2-8，1980.11
- 5) 押田文雄，米澤敏男，三井健郎，尾崎昌彦，北川高史，竹内賢次：反発度法によるコンクリート構造体強度推定精度向上技術の研究（その1～その4），日本建築学会大会学演梗概集，材料施工，pp.801-808，2003