共同研究報告書
整理番号第287号

コンクリート構造物の
鉄筋腐食診断技術に関する
共同研究報告書
－反発度法によるコンクリート品質評価－

平成15年3月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム
日本構造物診断技術協会

Copyright © (2003) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第287号2003年3月

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書

－反発度法によるコンクリート品質評価－

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

主席研究員　河野　広隆　　研究員　古賀　裕久

日本構造物診断技術協会

研究委員	福田　暁	研究委員	伊藤　祐二
〃	石井　和夫	〃	高橋　功
〃	野永　健二	〃	峰村　富夫
〃	北園　英明	〃	森　正嗣
〃	今尾　勝治	〃	川崎　克己

要旨

構造物マネジメント技術チームと日本構造物診断技術協会は，各種の非破壊検査を活用した鉄筋腐食診断技術の開発・改善を目標とし共同研究を行った。本報告書では，リバウンドハンマーを用いて非破壊でかぶりコンクリートの品質を調査する方法（反発度法）について検討した結果を報告した。特に測定装置の点検方法について，低反発度アンビルを用いた新たな点検方法の提案を行った。また，反発度からコンクリート強度を推定する際に現状で広く用いられている推定式の問題点について明らかにした。

キーワード：コンクリート構造物，健全度診断，非破壊試験，リバウンドハンマー，反発度法

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究

担当者名簿

全体とりまとめ

土木研究所構造物マネジメント技術チーム		日本構造物診断技術協会	
主席研究員	河野　広隆	理事・技術委員長	飯野　忠雄
主任研究員	渡辺　博志	技術委員	竹田　哲夫
主任研究員	久田　　真	技術委員	内田　　明
研究員	田中　良樹※1	技術委員	松村　英樹
研究員	古賀　裕久		

診断マニュアルWG（鉄筋コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）の改訂を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム			
主任研究員	渡辺　博志	研究員	古賀　裕久
主任研究員	久田　　真	交流研究員	野田　一弘
研究員	田中　良樹※1	交流研究員	田中　秀治

日本構造物診断技術協会

技術委員		松村　英樹		
研究委員	WGリーダー	野永　健二		
研究委員	WGサブリーダー	猪八重　由之		
研究委員				
	瀬野　康弘	笠井　和弘	込山　貴仁	谷岡　洋一
	森　二三人	吉田　光秀	坂井　　渉	石本　義將
	峰村　富夫	新谷　　毅	鈴木　宏信	遠藤友紀雄※2

鉄筋腐食WG（自然電位法，分極抵抗法による鋼材の腐食度評価についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム		主任研究員	渡辺　博志

日本構造物診断技術協会

研究委員	WGリーダー	渡辺　　寛		
研究委員	WGサブリーダー	井川　一弘		
研究委員				
	安田　敏夫	尾之内　和久	秋山　　暉	上岡　誠一
	酒井　徳久	毎田　敏郎	峰村　富夫	綿貫　輝彦
	柴田　浩司			

リバウンドハンマーWG（反発度法によるコンクリート品質評価についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム　　研究員　古賀　裕久

日本構造物診断技術協会

研究委員　WGリーダー　福田　暁

研究委員　WGサブリーダー　石井　和夫

研究委員

野永　健二	今尾　勝治	伊藤　祐二	高橋　功
川崎　克己	峰村　富夫	森　正嗣	北園　英明

かぶりWG（電磁誘導法・電磁波反射法による鉄筋位置およびかぶりの測定についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム

主任研究員　久田　真

研　究　員　田中　良樹※1

交流研究員　野田　一弘

日本構造物診断技術協会

研究委員　WGリーダー　毎田　敏郎

研究委員　WGサブリーダー　鈴木　透

研究委員

黒岩　和彦	瀬川　祐司	峰村　富夫	藤原　貴央

※1：2002年3月まで

※2：2002年9月まで

※　本共同研究報告書の内容は，リバウンドハンマーWGが主に検討し，執筆した。

目次

1．研究の概要 …… 1

1.1 研究の背景 …… 1

1.2 既往研究の整理 …… 2

1.3 検討項目の概要 …… 4

1.4 用語の説明 …… 6

2．測定装置の点検方法に関する検討 …… 8

2.1 繰返し使用の影響 …… 8

2.2 点検を行う場所の影響 …… 12

2.3 リバウンドハンマーの個体差 …… 16

2.4 低反発度アンビルを用いた点検 …… 27

3．コンクリートの含水状態と反発度の関係に関する検討 …… 43

3.1 実験方法 …… 43

3.2 実験結果と考察 …… 45

4．コンクリートの材齢の影響に関する検討 …… 47

4.1 検討の目的 …… 47

4.2 実験方法 …… 51

4.3 実験結果と考察 …… 52

4.4 材齢に関する検討結果 …… 53

5．反発度とコンクリート強度の関係に関する検討 …… 57

5.1 検討の目的 …… 57

5.2 実験方法 …… 57

5.3 実験結果と考察 …… 60

5.4 配合の異なるコンクリートについての検討結果 …… 66

6．まとめ …… 67

資料編 …… 71
・ 測定データ集 …… 73
・ 実構造物における反発度測定結果について …… 85
・ 反発度と圧縮強度の関係について(予備実験結果) …… 87
・ テストハンマーによる強度推定調査ＦＡＱ集 …… 89

1．研究の概要

1.1　研究の背景

コンクリート構造物中の鉄筋を腐食から保護するためには，鉄筋のかぶりを確保することに加え，かぶり部分のコンクリートの品質を確保することが重要である。コンクリートの品質が十分でないと，設計で考慮しているよりも早期にコンクリートの中性化が進んだり，塩化物イオンなどの劣化因子が比較的容易に鉄筋近傍に到達したりして，鋼材の腐食が始まり，構造物の劣化が進行するおそれがある。そこで構造物の健全度を診断し，将来の劣化の可能性を検討するためには，構造物に使用されているコンクリートの品質を評価する必要がある。

実構造物のコンクリートの品質を評価する方法として現在一般的に行われているのは，コアを採取して行う圧縮強度試験である。しかし，構造物を傷つけることから構造物の美観や耐久性等に影響を与える可能性があることや試験のための費用が高いことから，多くの構造物に対して広く適用することは難しいという問題点がある。一方で，コンクリートの品質を評価する方法として，種々の非破壊試験方法（例えば，コンクリート中の超音波伝搬速度を測定する方法やコンクリートの電気抵抗を測定する方法など）が提案されているが，その多くはまだ研究段階のものであり，構造物の健全度診断への適用実績も少ないという問題点がある。

リバウンドハンマーを使用してコンクリート表面を打撃し，得られた反発度から簡易にコンクリートの強度を推定する方法（以下，反発度法）は，コンクリートの品質を評価する非破壊検査方法の一つで，比較的簡単に実施でき，現場での適用実績も多い。そこで，独立行政法人土木研究所と日本構造物診断技術協会は，「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究」の一環として，反発度法によるコンクリートの品質評価の現場適用性について検討してきた。本報告書は，その結果を報告するものである。

1.2　既往研究の整理

リバウンドハンマーを用いたコンクリート強度の推定方法(反発度法)は，1948年に考案され，わが国でも1958年に日本材料試験協会(現，日本材料学会)から指針(案)が出されるなど，数多くの研究実績がある[1)2)3)4)5)]。また，反発度法は，構造物を傷つけずに行うことができることや，比較的簡易に実施できるといった長所がある。

その一方で，反発度法は，種々の要因に影響されることが明らかとなっており，その精度は必ずしも高くはないという短所もある。このため，数多くの研究成果があるにもかかわらず，実務では反発度法が十分には活用されてこなかったものと考えられる。既往の文献で紹介されている強度推定の誤差要因を表－1.1に整理する。

ただし，土木用鉄筋コンクリート構造物を調査する場合に限定すると使用されるコンクリートの配合や測定に関する条件が限定されるので，表－2.1に挙げた要因の一部は影響が小さく無視できる場合もあると考えられる。これを考慮して，リバウンドハンマーを用いた強度推定の際の誤差を既往の文献からおおまかに推定したものを表－1.2に示す[20)]。誤差の程度については，文献によって記述の方法が異なっているので，反発度が36で強度が28N/mm^{2}のコンクリートに適用した場合を仮定して誤差の程度を比較することも試みた。表から，測定装置の個体差や測定面の含水状態，コンクリートの使用材料・配合等の違いなどの影響が，大きいと考えられる。

表－1.1　リバウンドハンマーによるコンクリート強度推定の誤差要因

種類	誤差要因	誤差の生じる原因やその程度
反発度の再現性に関するもの	測定装置の個体差	個々の測定装置ごとに使用部品等が異なるため，同じ反発度の供試体を打撃しても結果が異なる可能性がある[6]。
	測定者	測定の方法が適切であれば，影響はないと考えられる[7]。
反発度の測定条件に関するもの	応力状態	円柱供試体などを載荷装置で圧定して試験する場合，その圧定力により反発度が異なる[8)9)]。例えば日本建築学会のマニュアル[2)]では，2.5N/mm²以上の力で供試体を固定しておくことが推奨されている。
	測定個所の寸法	構造物で部材厚の小さい部分を打撃すると，反発度が小さく測定される[10)11)]。例えば土木学会規準[3)]では，厚さ10cm以下の床版や壁，一辺が15cm以下の断面の柱など小寸法で，支間の長い部材を避けることとされている。
	測定面の平滑度・型枠	木製型枠を用いた場合は，鋼製型枠を用いた場合よりも表面の平面度が低く，反発度が低く測定されるという報告がある[12)]。一方，型枠による影響はほとんどないとする報告もある[13)]。
	曲面での測定	半径35cmの曲面と平面での測定結果を比較したところ差異はなかったとの報告がある[14)]。
	測定面の含水状態	測定面が湿った状態で測定すると反発度が低く測定されることがわかっている[15)]。しかし，その関係については，必ずしも十分には明確でない。また，測定面の含水状態を定量的に評価する手法が確立されていないため，測定者により含水状態の評価（補正値の選択）が異なるおそれがある。
	中性化	ASTMでは，中性化（炭酸化）したコンクリートでは，反発度が高く測定されるので表面付近の中性化領域を削り取って試験することとされている[16)]。しかし，中性化深さが反発度測定に与える影響については，必ずしも明確ではない[17)]。
反発度からコンクリート強度を推定することに関するもの	配合	セメント量や粗骨材量等が異なるコンクリートでは，反発度と強度の関係が異なると考えられている[2)]。しかし，その関係については，必ずしも明確ではない。
	セメントの種類	同じ強度のコンクリートでも，セメントの種類が異なると，反発度が異なる場合もあると考えられる[16)]。一方，広く用いられている普通セメント，早強セメント，高炉セメントの間では，ほとんど差がないとする報告もある[18)]。
	骨材の種類	一般的な天然産骨材では，その品質による影響は少ないと考えられている[2)]。一方，12種類の骨材を用いて試験した結果，推定強度で最大15%の差があったとする報告もある[11)]。
	材齢	長期材齢のコンクリートでは，反発度とコンクリート強度の関係が，材齢２８日での場合と異なっていることから，補正が必要である[1)2)]。材齢３日から材齢91日程度であれば，補正は不要とするものもある[19)]。

表－1.2　反発度法の誤差の推定結果

誤差要因	誤差の程度（推定）	標準偏差（N/mm²）**
測定装置の個体差	反発度で±３	2.32
測定位置の支持状態*	反発度で±５%	1.39
測定面の含水状態	反発度で±３	2.32
配合	推定強度で±10%	1.70
セメントの種類	推定強度で±５%	0.85
材齢	不明	－

＊　測定位置の支持状態とは，表－1.1でいう「応力状態」「測定箇所の寸法」などの影響を勘案したものを指す。

＊＊ 反発度が36で強度が28N/mm²のコンクリートに適用した場合を仮定し，誤差の程度を求めた。

1.3　検討項目の概要

リバウンドハンマーを用いた強度推定には，前節でとりまとめたように各種の誤差要因がある。これらの誤差要因について個別に検討して，反発度法の適用範囲をより明確にするため，以下の点に着目して実験を行い，順に検討することとした。

①測定装置の点検方法

②測定面の含水状態が反発度の測定結果へ与える影響の明確化

③材齢が反発度の測定結果へ与える影響の明確化

③反発度とコンクリート強度の関係

測定装置の点検方法

反発度法については数多くの研究がなされているが，既往の研究にあるようにリバウンドハンマーの個体差によって測定結果が大きく異なるようでは，異なる装置での測定結果を比較すること自体に疑問が生じることになる。そこで，測定装置の違いによる誤差について明確にし，測定装置の個体差を少なくするために，以下の検討を行った。

1) リバウンドハンマーの耐久性についての実験

リバウンドハンマーは多数回使用するとその性能が変化し測定される反発度も変化するので，定期的に点検・整備を行うことが必要だと考えられている。この点検・整備の間隔についてより明確にするため実験を行って検討した。

2) 点検を行う場所についての実験

リバウンドハンマーの点検を行う際に，テストアンビル(検定器)を設置する場所によって測定結果が影響されないか，実験を行って検討した。一般的的なテストアンビル(質量13kg程度)の他に，これを小型化した携帯型のテストアンビルについても検討した。

3) リバウンドハンマーの個体差に関する調査

既往の研究でリバウンドハンマーの個体差による測定結果への影響が大きいと報告されている[6]が，この報告から40年程度が経過し，当時と現在とでは使用されている測定装置の仕様も異なっている。そこで，現在使用されているリバウンドハンマーを約40機収集して性能を比較する実験を行った。

4) 低反発度アンビルを用いた点検に関する実験

上記の「リバウンドハンマーの個体差に関する調査」を行った結果，従来から用いられてきた鋼製のテストアンビル(質量13kg程度)を用いた点検だけでは，リバウンドハンマーの性能を十分には適切に評価できていないことが明らかになった。そこで，コンクリートと同程度の反発度(30～50前後)が得られるように製造された低反発度アンビルの試作品を入手し，これを用いた点検でリバウンドハンマーの性能を評価することを，実験を行って検討した。

測定面の含水状態が反発度へ与える影響の明確化

一般のコンクリート構造物では，降雨等の影響でコンクリートの表面から水分が供給されたり，表面から乾燥が進んだりしているものと考えられる。しかし，既往の研究では，このような水分移動を模擬した供試体を用いた実験の例は少ない。そこで，気乾状態のコンクリートに表面からゆっくりと吸水・乾燥させて含水状態を変更した供試体を用い，含水状態が反発度の測定結果に与える影響を検討した。

コンクリートの材齢の影響の明確化

一般に，試験時のコンクリートの材齢が大きくなると，コンクリートの強度に比して，反発度が高く測定されると考えられている。しかし，その原因や程度については十分には明らかにされていない。これまでに考えられている要因としては，コンクリートの材齢が大きくなるとともに，①気乾状態で養生されている場合には乾燥が進むこと（測定される反発度は大きくなる），②コンクリートの表面から中性化が進むこと（測定される反発度が大きくなる可能性がある），③コンクリートの水和が進むこと，などがある。しかし，実構造物の調査等ではこれらの条件がそれぞれ一定でないので，いわゆる材齢の影響とされるものの真の原因を明確にすることは困難である。

そこで，コンクリートの材齢が反発度の測定結果に与える影響を明確にすることを目的として，乾燥に関する条件を整えた供試体を作製し，実験を行って検討した。

反発度とコンクリート強度の関係

測定された反発度からコンクリートの強度を推定する換算式については多数の提案があるが，その多くは，材齢・含水状態が異なるコンクリートでの測定結果が混在したデータを元に求められたものである。しかし，上記の「コンクリートの材齢の影響の明確化」に関する検討を行った結果，供試体の含水状態等が反発度の測定結果に与える影響が大きいことが確認された。そこで，材齢や含水状態の条件を一定とし，配合が異なる供試体を作製して，反発度とコンクリート強度の関係について検討した。

1.4　用語の説明

本報告書で使用した用語で一般的でないもの，混同しやすいものについて，説明を加える。

リバウンドハンマー：

反発度を測定する装置の名称。測定装置は，構造物診断の現場では“シュミットハンマー”と呼ばれることが多いが，これは商品名である。一方，土木学会規準(JSCE G504)等では，“テストハンマー”という呼び名が用いられているが，この呼び名は，コンクリートの表面を打撃してはく離等の発生箇所の有無を調べる際に用いられるハンマーと混同されることが多いという問題がある。

そこで本報告書は英語文献で一般的に用いられている“rebound hammer”という名称を参考に，測定装置の名称を“リバウンドハンマー”とした。

公称反発度：

リバウンドハンマーの点検にはテストアンビルと呼ばれる鋼製の検定器テストアンビルが用いられるが，それぞれのテストアンビルには，それを適切に整備されたリバウンドハンマーで打撃した際に得られる反発度が示されている。この値のことを本報告書では，実際に測定された反発度と区別するため“公称反発度”と表記することにした。公称反発度は，80±2などと一定の範囲(通常は±2)を持っているが，本報告書では表記を簡潔にするため，その中央値のみを記載した。

従来型テストアンビル：

従来から広く用いられているテストアンビルを，後に述べる携帯型テストアンビル，低反発度型テストアンビルと区別する必要がある場合には，従来型テストアンビルと記述することにした。なお，従来型テストアンビルの特徴としては，①質量が約13kg以上，②公称反発度が80前後，といったことがあげられる。

特に断りがない限り，本報告書でいうテストアンビルは，従来型テストアンビルを指す。

携帯型テストアンビル：

従来型テストアンビルを小型化してより携帯に適した形状・質量としたテストアンビルで，すでにいくつかの製品が市販されている。しかし，比較的最近に開発された製品であることや，その形状・質量・公称反発度(通常，60～80程度)等が製品ごとにまちまちであることから，これを用いた調査・研究等はあまり行われておらず，その適用性が明確でないのが現状である。

低反発度型テストアンビル：

テストアンビルの材料や構造等を工夫することで，公称反発度を30～50程度(コンクリートを打撃した際に得られる反発度とほぼ同じ)としたテストアンビル。現状では研究段階で，市販されている製品はない。低反発度型アンビルについては，「2.4　低反発度型アンビルを使用した点検」で詳述する。

リバウンドハンマーの点検：

本報告書でいう点検とは，リバウンドハンマーでテストアンビルを打撃し，得られた反発度とテストアンビルの公称反発度を比較することを指す。

リバウンドハンマーの整備：

本報告書でいう整備とは，リバウンドハンマー内部の清掃や部品交換などを行い，リバウンドハンマーを製造されたときとほぼ同様の状態になるように調整することを指す。

リバウンドハンマーの検定：

本報告書でいう検定とは，リバウンドハンマーの製造者らが所有する検定用の原器（テストアンビル）を使用してリバウンドハンマーの点検を行い，点検時のリバウンドハンマーの性能を明確にすることを指す。

基準反発度：

リバウンドハンマーで測定した反発度に，打撃の方向や測定面の含水状態による補正値を加えた結果で，コンクリートの強度を推定する際に用いられる。ただし，本報告書中では，①コンクリートの強度と比較することを目的とした試験では水平方向に打撃を行っており補正の必要がないこと，②含水状態が反発度の測定結果に与える影響を把握するために行った実験を除いて，含水状態が一定の供試体を用意したこと，のため測定された反発度をそのまま基準反発度としている。

材料学会式[1]：

反発度からコンクリートの強度を推定する換算式の一つで，日本材料学会の提案によるもの（式－1.1）。構造物の調査などの場面で，最も使用されている換算式である。

建築学会式[2]：

反発度からコンクリートの強度を推定する換算式の一つで，日本建築学会の提案によるもの（式－1.2）。構造物の調査などの場面で，材料学会式に続き頻繁に使用されている換算式である。

$$F_c = 0.098 \times (13.0R - 184) \quad \cdots\cdots (1.1)$$

ただし，　F_c：コンクリートの推定強度（N/mm^2）

　　R　：基準反発度

※SI単位系に変換した。

$$F_c = 0.098 \times (7.3R + 100) \quad \cdots\cdots (1.2)$$

※SI単位系に変換した。

2．測定装置の点検方法に関する検討

2.1　繰返し使用の影響

（1）検討の目的

リバウンドハンマーは，繰り返し使用すると性能が低下することが明らかにされている[21]。このため，正しい測定結果を得るためには，定期的に点検を行い，製造者による整備や検定を受けることが必要と考えられる。しかし，この整備・検定の適切な間隔については，必ずしも明らかにはされていない。そこで，リバウンドハンマーの検定間隔に関する検討の基礎資料とするために，繰返し使用によるリバウンドハンマーの性能変化について実験を行って確認した。

（2）実験方法

この実験には，表－2.1に示す4機のリバウンドハンマーを使用した。これらのリバウンドハンマーは，この実験の直前に購入した新品か，製造者による整備・検定を受けた新品同様のものである。実験は以下の手順で行った。

①各リバウンドハンマーで，各種テストアンビル（表－2.2，写真2.1）を打撃し反発度を測定した（写真－2.2）。各種テストアンビルの打撃回数は10回とし，測定値の平均を反発度とした（以下，同様）。

②各リバウンドハンマーで，反発度40程度を示すコンクリートを，水平方向に500回打撃した。

③各リバウンドハンマーで，従来型テストアンビルを打撃し反発度を測定した。

④コンクリートでの使用回数が1万回になるまで②と③を繰り返し行った。

⑤1万回使用後のリバウンドハンマーで，各種テストアンビルを打撃し，反発度を測定した。

⑥各リバウンドハンマーの製造者等に，整備・検定を依頼した。

⑦製造者等が整備・検定したリバウンドハンマーを用いて，各種テストアンビルを打撃し反発度を測定した。

表－2.1　使用したリバウンドハンマー

記号	型式	機械番号	備考
HA	NR-10	58414	スイス国の製造者Aによるもの
HB	α-800RJ	C00050	国内の製造者Bによるもの
HC	NSR	80476	国内の製造者Cによるもの
HD	－	00000127	中華人民共和国の製造者Dによるもの

※製造者Aは文献21）におけるA種の，製造者Bは文献21）におけるB種の製造者と同一と考えられる。

※使用したテストハンマーは，いずれもほぼ同様な打撃機構を有するものである。

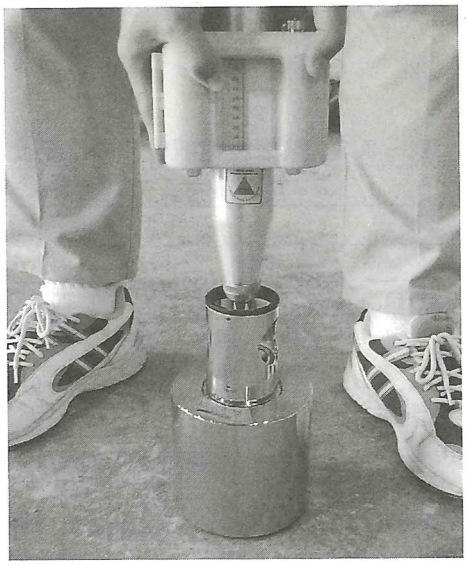
表－2.2　使用したテストアンビル

記号	タイプ	製造者	詳細
a80	従来型	A	高さ215mm×直径130mm，質量13kg，公称反発度80
a74	携帯型	B	高さ238mm×直径88mm，質量6kg，公称反発度74
a72	携帯型	C	高さ160mm×直径107mm，質量4.9kg，公称反発度72
a60	携帯型	C	高さ169mm×直径50mm，質量2.2kg，公称反発度60



※写真奥左から，a72，a60，a74，a80

写真－2.1　使用したテストアンビル



写真－2.2　テストアンビルの打撃状況

（3）実験結果

繰返し使用による反発度測定結果の変化を図－2.1に示す。リバウンドハンマーHAは，2000回使用後までは徐々に測定値が大きくなる傾向が見られたが，2500回使用後には急激に低下した。その後，測定値は上下を繰り返しながら徐々に低下する傾向が見られた。リバウンドハンマーHBでは，1500回使用後までは測定値はほとんど変化せず，その後，2000回～5000回使用後までは当初と比べて反発度が1低い程度で安定した。さらに多数回使用すると，測定値は徐々に低下する傾向が見られた。リバウンドハンマーHCは，3000回使用後まで測定値が徐々に低下した後，3500回使用後に急激な測定値の低下が見られた。リバウンドハンマーHDは，当初から他の機種と比較して著しく低い反発度が測定されたがこの原因は明確ではない。また，打撃を起こすのが困難になったので，5000回使用後には実験を中止した。

繰返し使用した後に製造者に整備・検定を依頼したが，その前後での測定結果等を表－2.3に示す。整備の結果，いずれの機種でも実験前とほぼ同様な状態を回復したが，そのうち少なくとも2つのリバウンドハンマーでは，部品の交換が必要になったことがわかった。

実験時の観察から，リバウンドハンマーの測定結果の変化は，まず作動箇所の摩擦の増大により始まるものと思われる（いずれのリバウンドハンマーでも，使用を続けるにつれて，内部が金属粉のようなもので汚れていくことが観察された）。次に，リバウンドハンマーHA，HB，HCでは，いずれも4000回程度の使用後に，打撃後のプランジャーの戻りが悪くなったり，異常な振動が見られるなど明確な不調が現れたことから，4000回程度の連続使用で，部品の変形が生じることが疑われる。

これらの結果から，リバウンドハンマーHA，HB，HCでは，1500回程度まではほぼ問題なく使用できるが，その後，2000回から3000回の使用をめどに整備・検定を行うことが望ましいものと考えられる。なお，繰返し使用の間に内部の金属粉等の清掃を行い作動箇所の摩擦を軽減することで，整備・検定までの間隔を延ばすことが可能になることも予想されるが，今回は検討していない。

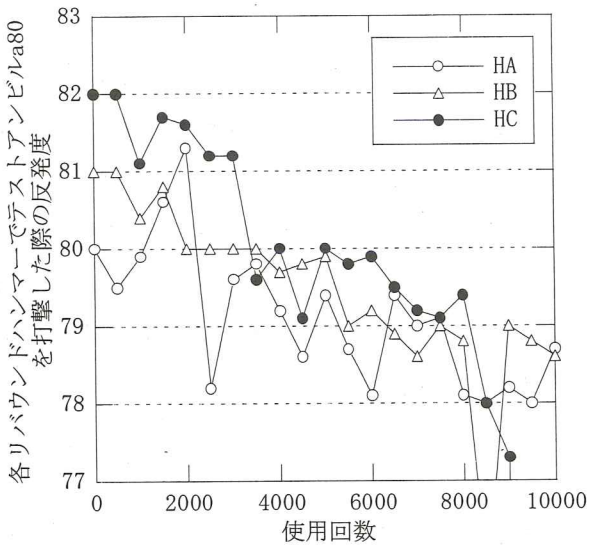
表－2.3　整備検定前後での反発度

リバウンドハンマー	著者らが測定					製造者らの検定		著者らが測定				整備・検定時の交換部品**
	実験前	一万回打撃後						整備・検定後				
	a80	a80	a74	a72	a60	不明*		a80	a74	a72	a60	
HA	80.0	78.7	75.3	73.1	61.9	74.0	81.0	80.4	79.0	76.0	64.6	ハンマーガイドバー
HB	81.0	78.6	55.5	69.5	61.0	不明	82.0	80.8	77.0	74.5	62.9	報告なし
HC	82.0	72.9	71.8	68.7	57.7	76.0	80.0	81.6	78.2	75.2	64.0	ハドメ
HD***	76.1	68.4	71.0	64.2	54.7	－	－	－	－	－	－	－

*　製造者らが，検定で使用しているテストアンビルは，公称反発度80～81程度のものであった。

**　交換部品の用語は，文献2）に基づくものとした。

***　リバウンドハンマーHDのみ，5千回使用後の試験結果を記入した。また，製造者による整備・検定は行っていない。



※テストアンビルへの打撃は，ここでいう使用回数には，含めなかった。
※リバウンドハンマーHDは，当初からテストアンビルを打撃した際の反発度が，他のハンマーと大きく異なっていたので図中には示さなかった。

【実験時の状況・リバウンドハンマーの使用感】
○リバウンドハンマーHA
4500回使用後から，打撃後の振動が大きくなる場合があった。
6500回使用後から，打撃後毎回，本体が大きく振動した。
○テストハンマーHB
800回使用後から，打撃後の振動が強くなった。
3800回使用後から，打撃後プランジャーが戻りにくくなる場合があった。
○リバウンドハンマーHC
750回使用後から，打撃後プランジャーが戻る際に金属の摩擦音がした。
4000回使用後から，打撃後プランジャーが戻りにくくなる場合があった。
5000回使用後から，打撃後プランジャーが戻らない場合が多くなった。この場合は，本体を振ってプランジャーを戻すようにした。
○リバウンドハンマーHD
600回使用後から，プランジャーを押し込みにくくなった。
1300回使用後から，特に反発を起こす直前がかたく，反発を起こすのに力が必要になった。
2800回使用後から，特に反発を起こす直前がかたく，力をいれて押し込むと金属のきしみ音がするようになった。
5000回使用後に，実験を中止した(打撃を起こすのが困難なため)。

図－2.1　繰り返し使用によるリバウンドハンマーの性能変化

2.2　点検を行う場所の影響

（1）検討の目的

反発度法で使用するリバウンドハンマーは，通常，測定に使用する前にテストアンビルを用いた点検で，その整備状態が適切であるかどうか確認される。しかし既往の研究では，テストアンビルを打撃した際の反発度の測定結果がテストアンビルの設置場所の影響を受けることが報告されている[23)]。そこで，テストアンビルの設置場所が測定結果に与える影響をより明確にするため，実験を行って検討することにした。

また，携帯しやすいように設計された携帯型テストアンビルも市販されているが，これらは従来型テストアンビルと比較すると寸法・質量が小さくなっているので，点検時の設置場所の影響をより強く受ける可能性がある。そこで，各種のテストアンビルを異なる設置条件の下で使用して測定結果を比較した。

（2）実験方法

表－2.4，写真－2.3に示す５種類のテストアンビルと製造者Ａ，Ｂ，Ｃが製造した３機のリバウンドハンマーHA，HB，HCを用いた（前節，表－2.1参照）。なお，リバウンドハンマーは，製造者等による整備・検定を受けた後，本試験の前に数百回程度使用したものである。

テストアンビルを表－2.5に示す５つの場所で使用し，反発度の測定結果を記録した。各場所で，床面等にテストアンビルを直接設置した場合と厚さ10mmのゴム板上に設置した場合の２ケースの測定を行った。一ケースにつき５回の打撃を行い，得られた測定値の平均を反発度とした（多数回測定することによるリバウンドハンマーの性能変化を懸念して１ケースあたりの測定回数を抑えた）。繰返し使用によるリバウンドハンマーの性能変化を確認するため，最後に場所conAにおける測定を再度行った。

表－2.4　使用したテストアンビル

記号	タイプ	製造者	詳細
a80	従来型	A	高さ215mm×直径130mm，質量13kg，公称反発度80
a74	携帯型	B	高さ238mm×直径88mm，質量6kg，公称反発度74
a72	携帯型	C	高さ160mm×直径107mm，質量4.9kg，公称反発度72
a60	携帯型	C	高さ169mm×直径50mm，質量2.2kg，公称反発度60
a49	低反発度型	F	高さ226mm×直径146mm，質量8.7kg，公称反発度49，試作品

表－2.5　測定を実施した場所

記号	詳細
conA	強固なコンクリート床面（試験室）
conB	強固なコンクリート床にプラスチックタイルが張られた床面
desk	conB上におかれたスチール事務机の上面
asphalt	アスファルト路面（屋外）
ground	土の地面（屋外，野球グラウンド）

※測定は，conA(直接→ゴム有)→conB→desk→asphalt→ground→conAの順に実施。
※conA，conB，deskは，屋内の気温約20℃の環境で実施した。asphalt，groundは，屋外の気温約10℃の環境で実施した。



※写真奥左から，a49，a74，a80
写真手前左から，a72，a60

写真－2.3　使用したテストアンビル

（３）実験結果

実験結果を図－2.2に示す。まず，従来型テストアンビルa80を用いた測定結果に着目すると，場所conAでの一回目の反発度測定結果と比較して，最後の測定結果は若干低下している。すなわち，一連の実験中に各リバウンドハンマーの性能が変化し，測定される反発度が低下していることが疑われる。conA以外の測定場所での測定結果を比較すると，ハンマーHCを用いた場所deskでの反発度が他のケースでの測定結果よりも小さい値を示した。また，他にもいくつか比較的小さな反発度が測定されたケースがあった。しかし，３機のリバウンドハンマーに共通する明確な傾向は認められなかった。このことから従来型テストアンビルは測定場所の影響を受けにくく，比較的安定した性能を示すと考えられる。

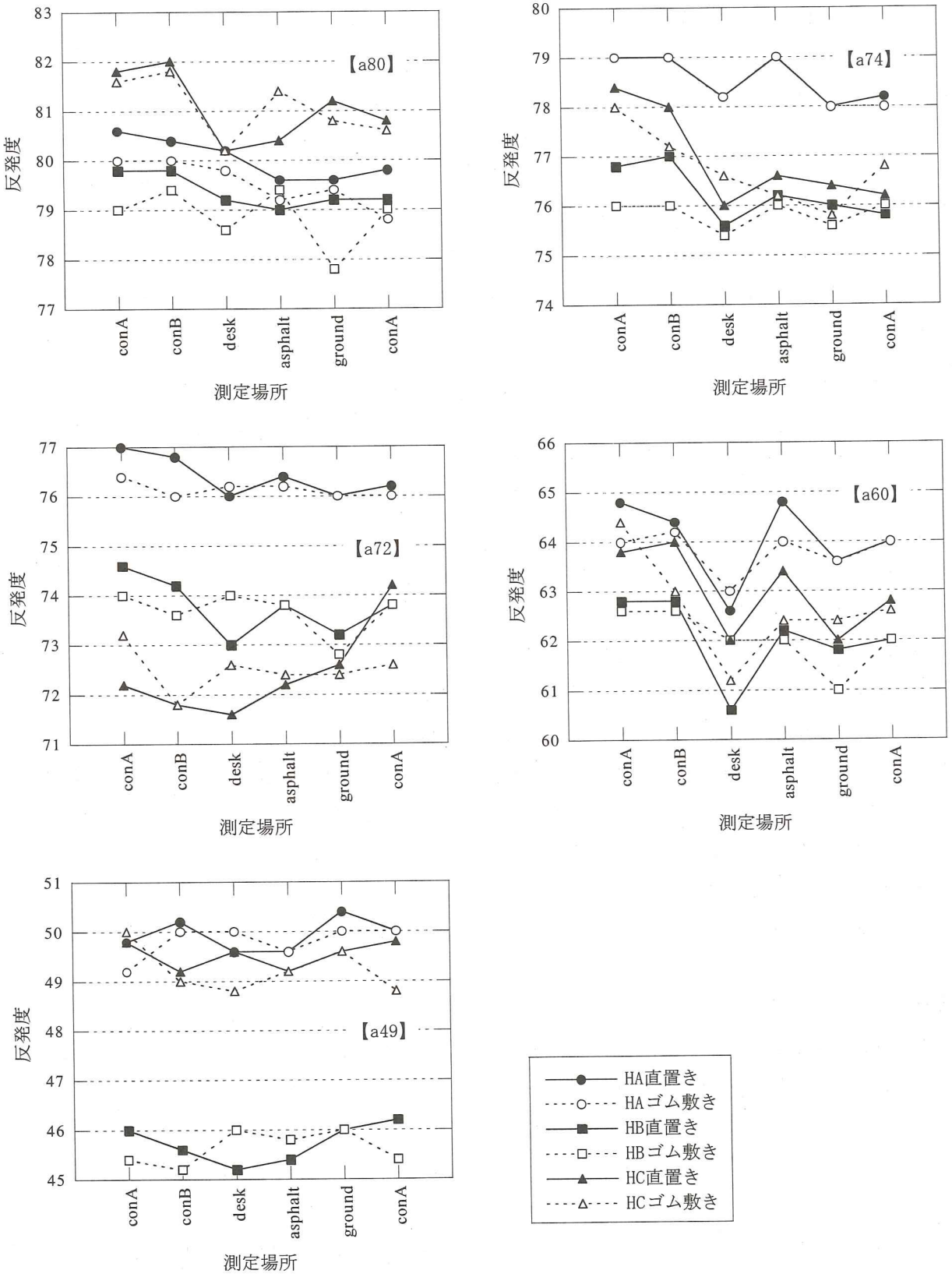
一方，携帯型テストアンビルa74やa60を使用した結果に着目すると，場所deskやgroundなどで使用した場合には，他の場所よりも反発度が１程度低く測定されたケースが目立った。これらのテストアンビルは，直径が比較的小さいことから設置面積も小さくなっており，設置場所の影響を受けやすいことが考えられる。しかし，テストアンビルの下にゴムを敷くことで，設置場所の影響を緩和できる可能性もあると考えたが，今回の実験結果からはゴムの有無による測定結果の違いは必ずしも明確ではなかった。

ところで，ハンマーHBでアンビルa49を打撃した場合には，他のハンマーの測定結果と比較して著しく低い反発度が測定された。打撃する際にアンビルa49のハンマーを固定するガイド部分(写真－2.3)とハンマーHB本体が干渉するような手応えがあり，反発度の測定結果に影響を与えているものと考えられた。また，原因は明確ではないが，ハンマーHCでアンビルa72を打撃した場合にも反発度が比較的小さく測定されている。一方，ハンマーHAは，アンビルa74，a72を打撃した際の反発度が公称反発度よりも著しく大きい。これらのリバウンドハンマーとテストアンビルの組み合わせでは，リバウンドハンマーの整備状態を正しく評価できないおそれがある。リバウンドハンマー本体の形状には製造者や製造時期によって若干の違いがあり，リバウンドハンマーとテストアンビルは同一の製造者によるものを用いることが望ましいものと考えられる。

（４）点検を行う場所の影響についてのまとめ

広く用いられている従来型テストアンビルを用いた場合，今回の実験の範囲では，設置場所による影響は明確ではなかった。一方，直径が比較的小さい携帯型テストアンビルでは，設置場所の影響を受ける場合があったので，点検時にアンビルを設置する場所に特に注意を払う必要がある。

また，リバウンドハンマーとテストアンビルの組み合わせによっては，リバウンドハンマーの性状を正しく評価できないおそれがあることがわかった。この理由の一つには，各製造者によってリバウンドハンマーの外形が若干異なることがあると考えられる。



図－2.2　テストアンビルの設置場所と反発度の測定結果の関係

2.3　リバウンドハンマーの個体差

（1）検討の目的

既往の研究から，反発度法による強度推定結果はさまざまな要因の影響を受けることも明らかとなっている。特に，リバウンドハンマーの個体差から生じる反発度の測定誤差は，測定結果に与える影響が大きいこと，テストアンビル（検定器）を用いた検定だけでは十分に補正することが難しいという指摘がある[6]。仮に，測定装置の個体差が大きいとすると，その他の誤差要因について検討する場合や反発度とコンクリートの圧縮強度の関係を検討する場合にも影響があり，大変な問題である。

一方，坂らの研究から約40年が経過しており，リバウンドハンマーの仕様に変更が加えられたこと，測定装置の製造者が1社から複数社になったことなどから，現在使用されているリバウンドハンマーの品質は，既往の研究で調査されたものとは異なっている可能性が高い。

そこで，現在使用されているリバウンドハンマーの個体差に関する調査の必要性が高まっていると考え，41機のリバウンドハンマーを用いて比較試験を行った。

（2）実験方法

国内で使用されている機器を幅広く調査することを目的とし，表－2.6に示す41機のリバウンドハンマーを収集した（写真－2.4）。また，反発度を測定する対象として，表－2.7に示すテストアンビル5種類と，供試体2種類（鋼板，モルタル製品）の計7種類を用意した（写真－2.5，写真－2.6）。

反発度の測定は，テストアンビル・供試体を強固なコンクリート床上に設置し，鉛直下向きに打撃することにより行った。測定回数は，アンビルは10回，鋼板は5回とした。リバウンドハンマーの動作を安定させるため，コンクリート床面などで20回の捨て打ちを行った後で本試験を実施した。試験は，室温20℃の恒温室内で行った。なお，打撃方向等に応じて測定結果を補正する機能を内蔵するリバウンドハンマーについては，補正機能を使わない設定にして測定した。

モルタル製品は個体によって品質が異なる可能性があるので，図－2.3のようにリバウンドハンマーR02で全ての供試体の反発度を測定し，その後，式－2.1を用いて測定結果を補正した。

（3）実験結果

反発度の測定結果を表－2.8に示す。測定結果のうち鋼板を打撃した結果には，信頼性に疑問が残るデータがいくつかあった（例えば，リバウンドハンマーN08はアンビル等の測定では比較的低めの反発度を安定して示すにもかかわらず，鋼板を打撃した結果のみ高めの結果を示した）。この原因としては，鋼板背面のコンクリートに空洞がある可能性などが考えられるが明確ではない。このため，鋼板の測定結果は考察の対象から除外した。

本報告では，本試験の直前に整備・点検が行われ，さらにその整備状況が（財）日本品質保証機構により確認されているリバウンドハンマーR02による測定結果を基準として，各リバウンドハンマーの測定結果を比較することにした。

表－2.6　収集したリバウンドハンマー

記号	製造者	整備状況	整備者	測定結果表示	製造年	型式	機械番号
A01	A	1	F	記録紙	2001	NR-10	58414
A02	B	1	B	デジタル	2000	α-800RJ	C00050
A03	C	1	C	記録紙	2001	NSR	80476
A04	E	1	E	目盛り	2001	—	00000127
N01	A	3	—	記録紙	1965～70	N*R-5	5870
N02	A	3	—	目盛り	1976	N-34	97698
N03	A	3	—	目盛り	1975	N-34	93257
N04	A	3	—	目盛り	1969	N-34	87061
N05	A	3	—	目盛り	1975	N-34	93143
N06	A	3	—	目盛り	1982	N-34	116618
N07	A	3	—	目盛り	2001	N-34	150675
N08	A	3	—	目盛り	1994	N-34	133868
N09	A	3	—	記録紙	1982	NR-10	39055
N10	A	3	—	記録紙	1982	NR-10	39095
N11	A	3	—	目盛り	1997	N-34	143199
N12	A	3	—	目盛り	1959	N-15	38503
N13	A	3	—	目盛り	1969	N-34	88187
N14	A	3	—	目盛り	1977	N-34	105830
N15	A	3	—	目盛り	1982	N-34	118315
N16	A	3	—	目盛り	1994	N-34	134168
R01	A	2	R	目盛り	1993	N-34	130815
R02	A	1	F	目盛り	1997	N-34	142773
R03	A	3	—	デジタル	2001	ND-1	2772
R04	B	2	R	デジタル	不明	α-750RX	02463
R05	A	1	R	記録紙	2000	NR-10	57868
R06	A	1	F	記録紙	2000	NR-10	57396
R07	A	1	F	記録紙	2001	NR-10	58265
R08	A	3	—	記録紙	1991	NR-10	47831
R09	C	1	C	記録紙	2001	NSR	80450
Z01	A	3	—	デジタル	2001	ND-1	2472
Z02	A	3	—	目盛り	1992	N-34	129010
Z03	D	2	G	記録紙	1987頃	OT-80	8600
Z04	B	2	C	デジタル	不明	α-750RX	02852
Z05	A	3	—	目盛り	1991	N-34	128136
Z06	A	2	H	記録紙	1977	NR-10	25774
Z07	B	3	—	デジタル	不明	α-750RX	02016
Z08	A	1	F	デジタル	2001	ND-1	1140
Z09	B	3	—	デジタル	不明	α-800RJ	C00016
Z10	C	3	—	目盛り	1999	NS	10500
Z11	A	1	F	目盛り	1957	N-10	24324
Z12	A	1	F	目盛り	1954	N-6	15523

※記号：A01～A04は，筆者らが所有し調査の直前に整備・点検を依頼した新品の状態に近いもの(A04は，購入直後のもの)。N01～N16は，レディーミクストコンクリート工場が所有するもの。R01～R09は，レンタル業を営む企業９社から賃借したもの。Z01～Z12は，上記に含まれない企業や大学が，調査や研究のために所有するもの。

※リバウンドハンマーR02：R02は今回の試験に用いる直前に，整備者Fにより整備・点検され，その整備状況が適切であることが(財)日本品質保証機構にて確認されたリバウンドハンマーである。そこで，本節告では，このR02を用いた反発度結果を基準となる測定結果とした。

※製造者：Aはスイス国の，Eは中華人民共和国の企業である。B～Dは，日本国内の企業である。

※整備状況：1は今回の試験の直前に整備・点検等が行われたことが明かなもの。2は書類等から購入後も整備・点検等が行われていることがうかがえるが，今回の試験までの間に他で使用されたことも考えられるもの。3は整備・点検等の記録がなく管理の状態が不明なもの。

※整備者：Fは製造者Aの日本国内での総代理店であり，Fによる検定は，製造者Aによるものと同等と考えられる。GとHは，測定機器の販売や整備等を行う企業である。また，Rはレンタル事業者が自ら整備・点検を行っている場合である。

※測定結果表示：“目盛り”は，自動記録装置をもたず打撃毎に目視で読みとるもの。“記録紙”は，感熱式の記録紙にアナログで反発度が記録されるもの。デジタルは，測定結果をデジタルで表示するモニタなどが搭載されたもの。

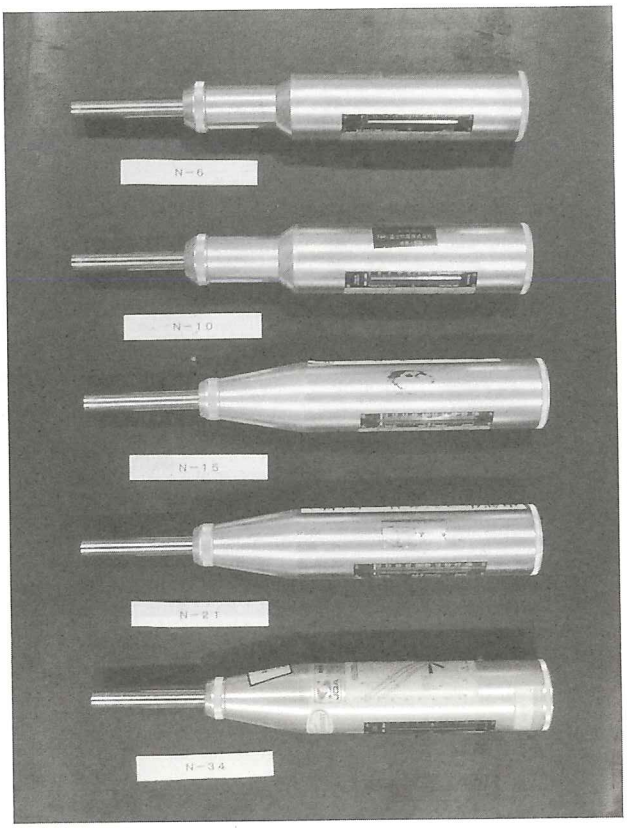
表－2.7　使用したテストアンビル，供試体

記号	タイプ	製造者	詳細
a80	従来型	A	高さ215mm×直径130mm，質量13kg，公称反発度80
a74	携帯型	B	高さ238mm×直径88mm，質量6kg，公称反発度74
a72	携帯型	C	高さ160mm×直径107mm，質量4.9kg，公称反発度72
a60	携帯型	C	高さ169mm×直径50mm，質量2.2kg，公称反発度60
a49	低反発度型	F	高さ226mm×直径146mm，質量8.7kg，公称反発度49，試作品
st1	供試体	－	220mm×440mm×16mmの鋼板を，300mm×700mm×200mmのコンクリートに埋め込んで固定したもの。鋼板部を打撃した。反発度53前後
m30	供試体	－	300mm×300mm×61mm，質量約1.2kgのモルタル製品。各リバウンドハンマーごとに一個の製品を使用した。反発度30前後

※テストアンビルはいずれも新品または数100回使用した程度のものであり，打撃の繰返しによる反発度の変化については，考慮する必要がないものと考える。

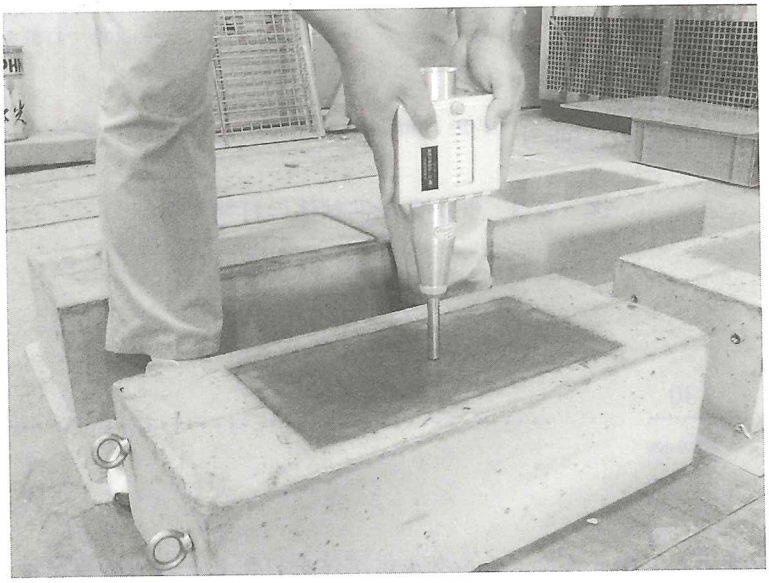
※モルタル供試体の反発度測定は，供試体とコンクリート床の間に厚さ1 cmのゴム板を敷いて行った。

※モルタル供試体の個体差について：リバウンドハンマーR02を用いて全ての供試体の反発度を測定した結果（4点の平均で），反発度は25.8～32.5の範囲にあり，平均は29.7であった。

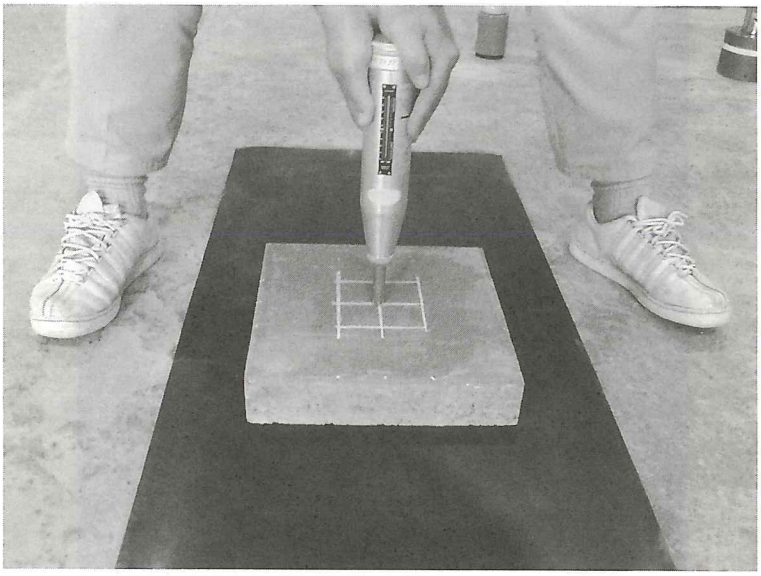


※測定結果表示が“目盛り”のリバウンドハンマー(形式によって外形も異なっている)

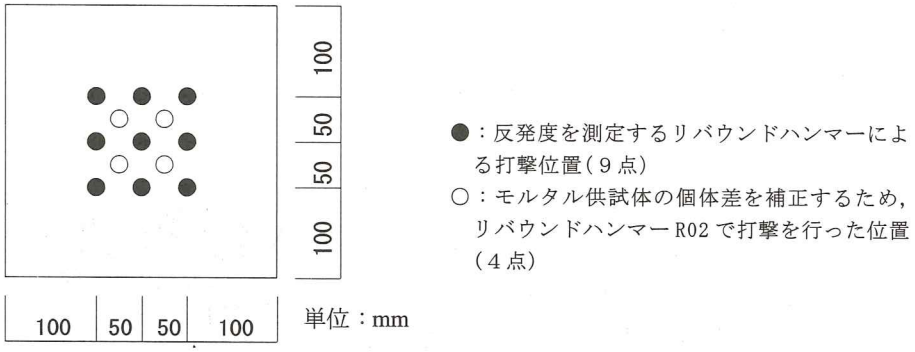
写真－2.4　収集したリバウンドハンマー(一部)



写真－2.5　供試体st1の打撃状況



写真－2.6　供試体m30の打撃状況



図－2.3　モルタル供試体の打撃位置

$$R_{i,m30} = r_{i,m30} \times \frac{30}{R_{R02,m30}} \quad \cdots\cdots (2.1)$$

ここで，

$R_{i,m30}$：リバウンドハンマーiで，モルタル供試体を打撃したときの反発度(補正後)

$r_{i,m30}$：リバウンドハンマーiで，モルタル供試体を打撃したときの反発度(測定値)

$R_{R02,m30}$：リバウンドハンマーR02で，モルタル供試体を打撃したときの反発度

表－2.8　測定結果一覧

記号	測定結果						
	a80	a74	a72	a60	a49	stl	m30
A01	80.4	79.0	76.0	64.6	50.4	54.0	29.5
A02	80.8	77.0	74.5	62.9	46.0	52.8	29.1
A03	81.6	78.2	75.2	64.0	49.9	50.2	27.2
A04	76.1	76.0	73.7	62.2	45.4	51.0	27.8
N01	77.1	73.0	70.3	—	44.0	54.8	28.8
N02	66.6	64.1	56.1	49.2	33.9	46.6	20.5
N03	71.2	70.6	67.8	57.3	43.5	50.2	26.8
N04	78.1	75.7	71.5	61.2	46.5	50.0	28.6
N05	67.1	65.1	60.1	51.8	38.6	45.8	23.4
N06	80.8	79.9	76.6	66.1	50.6	56.2	32.4
N07	80.0	77.6	75.0	64.0	48.6	52.6	28.5
N08	77.2	78.0	76.0	62.7	44.8	61.6	28.5
N09	77.4	75.5	72.6	62.2	46.8	51.6	27.5
N10	78.2	76.0	73.3	61.9	50.1	50.8	27.2
N11	80.0	78.0	76.0	64.0	48.2	52.4	26.8
N12	73.8	72.0	70.0	58.5	44.5	50.6	27.2
N13	76.5	75.6	73.4	—	45.6	51.8	28.6
N14	68.2	66.9	62.4	54.1	36.6	50.0	26.7
N15	72.7	73.9	70.3	58.7	42.0	52.0	27.0
N16	78.9	77.9	75.8	64.0	49.0	54.6	29.7
R01	79.9	79.1	76.6	65.0	50.0	55.0	31.1
R02	80.7	78.8	76.2	65.0	50.2	53.2	30.0
R03	79.5	77.7	75.1	63.7	49.0	53.0	29.1
R04	78.3	75.3	73.0	62.3	45.0	51.4	28.9
R05	78.4	79.0	76.3	—	47.4	54.8	32.3
R06	79.7	77.9	75.8	64.0	49.0	54.0	29.8
R07	76.7	74.7	72.2	61.6	46.0	52.0	28.3
R08	81.7	80.5	78.1	67.4	51.9	57.6	32.2
R09	82.7	77.4	71.2	62.7	49.4	49.6	25.7
Z01	79.3	76.9	74.8	63.4	48.6	54.6	30.0
Z02	79.6	76.0	69.9	62.5	47.1	54.4	28.2
Z03	79.7	74.1	72.9	62.1	51.4	46.0	25.9
Z04	81.9	76.8	73.9	63.3	56.0	48.8	29.2
Z05	80.1	79.3	77.0	64.5	49.1	56.4	28.7
Z06	76.5	75.7	73.0	61.9	48.0	52.8	29.0
Z07	76.2	71.1	68.7	59.0	47.0	46.0	25.9
Z08	80.9	79.0	76.9	65.7	51.1	55.8	30.4
Z09	77.6	74.1	71.6	60.3	45.2	50.4	28.6
Z10	79.8	77.4	70.9	62.0	47.6	54.6	24.7
Z11	77.3	76.6	74.1	—	46.4	52.8	27.6
Z12	78.9	78.0	72.4	—	48.5	53.2	29.9

※アンビルa60では，アンビルとリバウンドハンマー本体が干渉するため測定ができない場合があった。

(4)製造者ごとの性能の比較

a)現行製品

リバウンドハンマーA01～A04，R02，R06，R07，R09，Z08の9機は，現在も販売されている機種で，かつ，製造者らにより整備・検定されていることから，新品として入手できるリバウンドハンマーとほぼ同じ状態であると考えられる。これらの測定結果を比較して図－2.4に示す。

整備者Fが整備・点検を行った4機のうち，A01，R06，Z08の3機は，ほとんどの測定結果がR02と±1程度しか異なっていない。したがって，A01，R02，R06，Z08の4機の間には個体差がほとんどなく，どのハンマーを用いても同じ反発度が得られると言える。一方R07は，テストアンビルを打撃したときの反発度がR02と比較的大きく異なっているが，この原因は不明である。

製造者Bが製造したA02は，テストアンビルa49の試験結果のみR02の結果から大きく離れている。この原因は，測定時の観察からリバウンドハンマーの形状とテストアンビルのガイド部の形状が合っていないためと考えられる。その他のテストアンビル，供試体を打撃した結果は，R02とほぼ同等かやや低い結果であった。

製造者Cが製造したA03とR09は，従来型テストアンビルa80を打撃した場合には反発度が比較的高く測定されたにもかかわらず，モルタル供試体を打撃した場合には反発度がR02よりも3程度小さく測定された。製造者Dが製造したA04は，いずれの測定結果でもR02の測定結果を大きく下回っていた。

これらの結果から，製造者ごとにリバウンドハンマーの調整状態が若干異なっているものと考えられる。

b)旧製品など

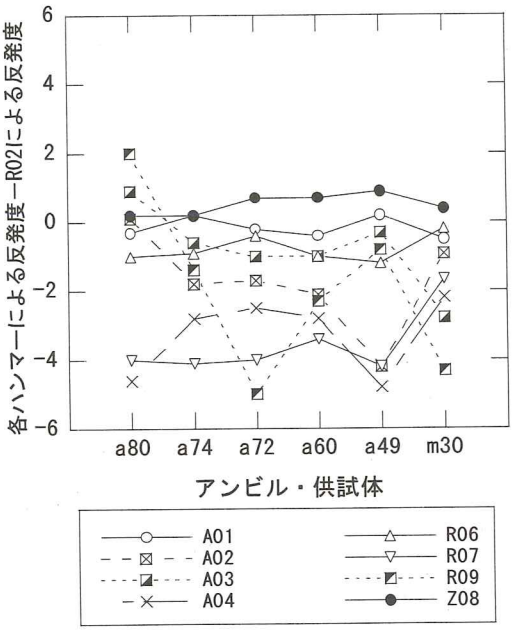
Z11およびZ12は，打撃エネルギーが現行のリバウンドハンマーとは異なっている旧機種である。この二機を用いた反発度の測定結果は，現行製品であるR02よりやや低めであった(図－2.5)。

Z04は，製造者Bが製造し製造者Cが整備・点検を行った現行の製品である。同じくCが整備・点検したA03やR09と同様に，テストアンビルa80を打撃した際の反発度がR02よりもやや高かった。しかし，モルタル供試体を打撃した場合の反発度はR02とほぼ同等であった(図－2.5)。アンビルa49の反発度が大きく測定されているのは，リバウンドハンマーの外形とテストアンビルのガイド部が合っていないためと考えられる。

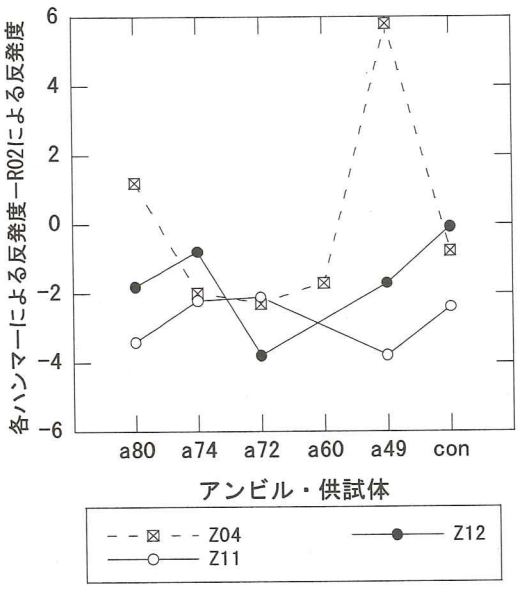
(5)製造者以外による整備の影響

リバウンドハンマーR01，R04，R05，Z03，Z06の試験結果を図－2.6に示す。これら5機は，レンタル業や測定機器の販売代理店など製造者以外の企業による整備を受けたことが明らかものである。

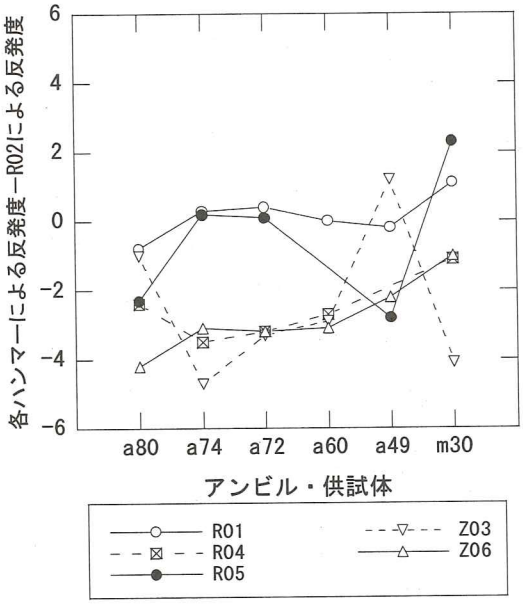
R05およびZ06の測定結果に着目すると，図中の折れ線が右肩上がりになっており，反発度が比較的高いアンビルa80等を測定するとR02の測定結果より低い反発度となるが，反発度が比較的低いモルタル製品等を測定するとR02の測定結果より高いかほぼ同等の反発度が得られている。このような傾向は，製造者が整備・点検したリバウンドハンマーでは見られなかったものであり，製造者以外の企業等が独自に整備・点検を行ったリバウンドハンマーには，コンクリートの表面硬度の差異に対応する測定反発度の変化が出荷時の状態と異なっているものも含まれていると考えられる。



図－2.4　製造者に整備・検定されたリバウンドハンマーの反発度測定結果(現行製品)



図－2.5　製造者に整備・検定されたリバウンドハンマーの反発度測定結果(旧製品など)



図－2.6　製造者以外の企業等に整備されたリバウンドハンマーの反発度測定結果

(6)リバウンドハンマーの点検方法についての考察

a)従来型テストアンビルa80を用いた点検結果

リバウンドハンマーの検定方法として一般的なのは,表－2.7に示したa80のような従来型テストアンビルを打撃し,測定された反発度が公称反発度±2の範囲に入っていることを確認する方法である。そこで,テストアンビルa80を打撃したときの試験結果に着目して整理すると,次のような結果であった。

1) 新品同様の4機(A01～A04)のうち,E製のA04は購入直後の製品であったが反発度が80±2の範囲を外れていた。
2) 賃借した9機(R01～R09)のうち,2機は今回の試験の前に整備・点検されていたにもかかわらず反発度が80±2の範囲を外れていた。
3) 上記以外の28機では,14機が反発度が80±2の範囲を外れていた。原因としては,多数回使用したにもかかわらず整備等を行っていないことや,長期間使用されないまま保管されていたことなどが考えられるが,明確ではない。

b)従来型テストアンビルによる点検結果とモルタル供試体の反発度

一般に広く用いられている呼び強度24程度の土木用コンクリートを材齢28日前後に試験すると,反発度は30前後であり,従来型テストアンビルの反発度(80前後)とは大きく異なっている[24)]。そこで,従来型テストアンビルによる点検の妥当性を検討するため,a80を打撃した場合に得られた反発度とモルタル供試体を打撃した場合の反発度を比較して図－2.7に示す。

また,リバウンドハンマーのマニュアル等では,従来型テストアンビルによる点検結果を利用してコンクリート等を打撃した際の測定結果を補正する方法が示されている場合がある。そこで,モルタル供試体の測定結果に対して,式－2.2による補正を行った結果を図－2.8に示す。

図－2.7と図－2.8の比較から,以下のことがわかった。

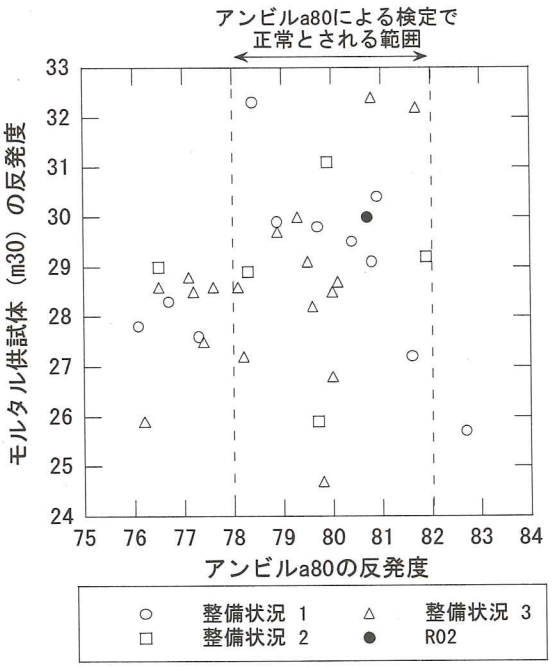
1) アンビルa80を打撃したときの反発度が80±2の範囲に入っているリバウンドハンマーでも,モルタル供試体を打撃した場合の反発度には,最大で8の開きがあった。
2) アンビルa80を打撃したときの反発度が比較的低いリバウンドハンマーは,モルタル供試体を打撃した場合にも比較的低い反発度を示す傾向があった。これには,式－2.2による補正が有効と考えられる。ただし,モルタル供試体を打撃したときの反発度がR02のものから大きく異なっているリバウンドハンマーについては,補正の効果は認められなかった。
3) モルタル供試体を打撃したときの反発度が,R02のものと大きく異なっているリバウンドハンマーには,Cが製造または整備・点検したもの(A03, R09, Z10)や製造者以外が整備・点検したもの(R05, Z03)等が目立った。これらのリバウンドハンマーは,今回比較の基準としたR02とは,その仕様や整備状態が異なっているためと考えられる。
4) 1)～3)から,反発度30程度のコンクリートを試験することを考えると,アンビルa80を用いた検定のみでは不十分で,より低い反発度領域でリバウンドハンマーの整備状態を確認する点検方法が必要である。

$$R_{ni,m30} = R_{i,m30} \times \frac{80}{R_{i,a80}} \quad \cdots\cdots(2.2)$$

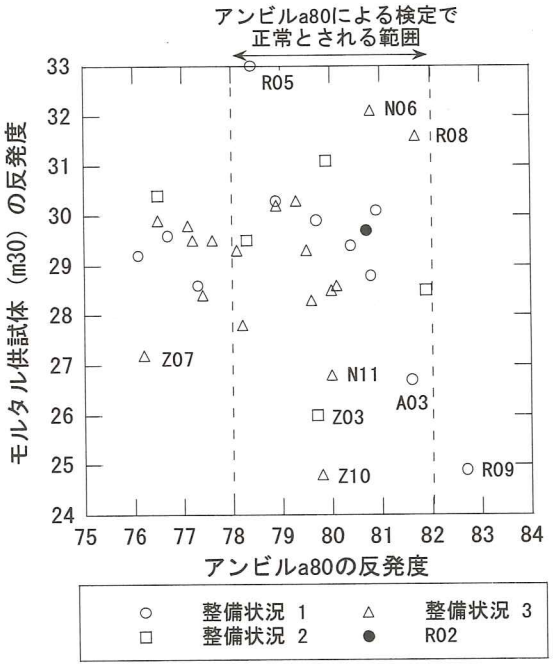
ここで,

$R_{ni,m30}$：テストアンビルa80による検定結果を利用して補正したモルタル供試体の反発度

$R_{i,a80}$：リバウンドハンマーiで，アンビルa80を打撃したときの反発度



図－2.7　アンビルa80とモルタル供試体の反発度測定結果の比較



図－2.8　アンビルa80とモルタル供試体の反発度測定結果の比較(補正後)

（7）リバウンドハンマーの個体差に関する調査結果のまとめ

41機のリバウンドハンマーを収集し，各種のアンビル等を打撃して測定された反発度を比較した。その結果，以下のことがわかった。

① 製造者の異なるリバウンドハンマーを用いると，反発度の測定結果が３程度異なる場合がある。

② 製造者以外の企業等が整備・点検等を行ったリバウンドハンマーには，その整備状態が製造時とは異なっているものも含まれている。

③ ①および②の理由から，アンビルa80を用いて点検したリバウンドハンマーを用いても，測定するコンクリートの反発度によっては，大きく異なった結果が得られる場合がある。

④ ①～③の理由から，従来から行われているアンビルa80を用いた検定に加え，より低い反発度を示すテストアンビルまたは供試体を併用してリバウンドハンマーの調整状態を確認する点検方法を開発する必要があると考えられる。

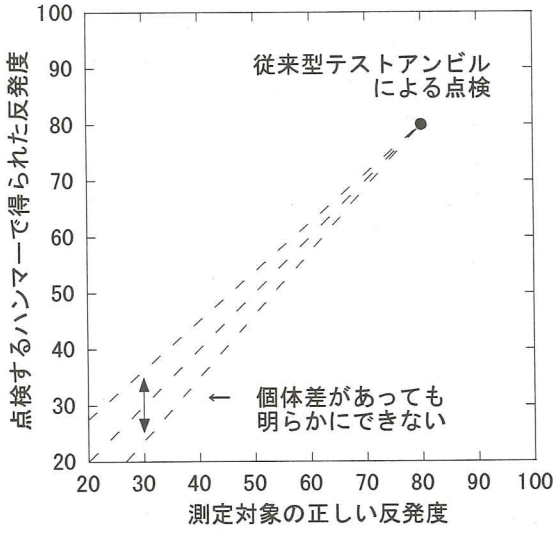
2.4　低反発度型テストアンビルを用いた点検

（1）検討の目的

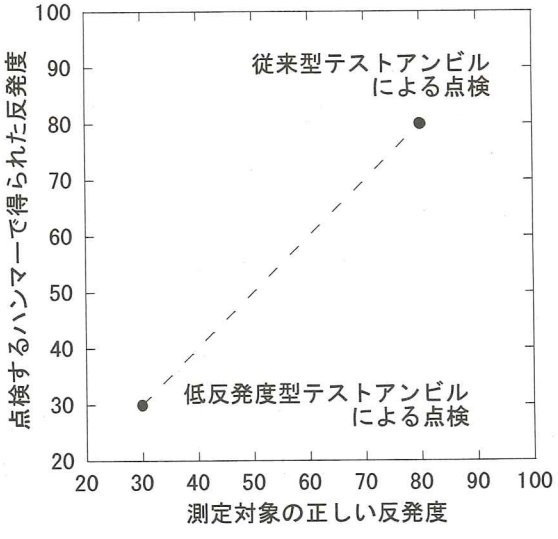
前節「リバウンドハンマーの個体差」に関する調査・検討の結果，従来型テストアンビルによる点検で適切な状態にあると判定されたリバウンドハンマーの中でも，モルタル供試体を打撃した際の反発度には最大で8程度と，大きな個体差があることがわかった。また，従来から一般的に行われている公称反発度80程度のテストアンビルを用いた点検だけでは，このような測定装置の個体差を明らかにできないこともわかった（図－2.9）。

リバウンドハンマーの用途がコンクリートの品質を評価することにあることを考えると，コンクリートを打撃した場合に測定されるのとほぼ同様な反発度（20～50程度）で，点検を行うことが妥当だと考えられる。また，仮に反発度30程度の値が得られる検定器があれば，従来型テストアンビルと併用して用いることでほぼ全ての反発度領域でリバウンドハンマーの性能を確認できることになる（図－2.10）。現状では，20～50程度の公称反発度を持つ検定器は市販されていないが，仮にこのような検定器が開発されれば，リバウンドハンマーの個体差を減少させることに大きな役割を果たすことができると考えられる。

そこで，本共同研究では，①公称反発度が30～40程度，②取り扱いが容易，③従来型のテストアンビルとほぼ同等の費用で点検できる（安価であれば使い切りタイプでもかまわない），といった条件を満たす検定器を低反発度型テストアンビルと名付け，このようなテストアンビルの開発・提供をリバウンドハンマーの製造者等に依頼した。そして，試作された低反発度型テストアンビルを用いて，リバウンドハンマーの性能を評価することを試みた。



図－2.9　従来の点検のイメージ



図－2.10　低反発度型テストアンビルを併用した点検のイメージ

(2)収集した低反発度型テストアンビル

リバウンドハンマーの製造者らから，8台の低反発度型テストアンビルを貸与することができた。また，比較のため従来型テストアンビルや携帯型テストアンビルについても広く収集した。ここで検討に用いたテストアンビルを表－2.9，写真－2.7に整理する。

収集した低反発度型テストアンビルはいずれも市販されておらず，試作品という位置づけであるが，AF41は，社内的にはリバウンドハンマーの検定にも用いられているとのことであった。製造者FによるAF40およびAF41の材料・構造等については明らかにされていないが，AF40は打撃すると鈍い音がすることから，その内部に金属とは異なる材料が使用されていることも推測される。AF41は打撃時に高い金属音がすることや，同じ寸法の従来型テストアンビルよりも軽量であることから，構造面で何らかの工夫がなされていることが推測される。製造者KによるAK30～AK45(写真－2.8)は，テストアンビル本体に油圧ジャッキが接続されており，内部の油圧を変化させることで公称反発度を変化させることができるものである。一方，製造者CによるACS39，ACS29のテストアンビルは，携帯型テストアンビルをさらに小型化したものである(写真－2.9)。製造者Cは，これらの小型低反発度アンビルを従来型テストアンビルに埋め込んだような構造のテストアンビル(寸法，質量が従来型テストアンビルと同等)も試作しており，ACTA，ACTBの二台のテストアンビルは打撃面を二つ有し，一台で図－2.10に示したような点検を行うことが可能なものである(写真－2.7参照)。

なお，いずれの低反発度型テストアンビルでも，打撃面の形状や材料等は，外見上，同一の製造者が作製した従来型テストアンビルと同じであった。

(3)実験方法

a)使用した機器

反発度の測定対象として，上記のテストアンビルの他にも，5種類のコンクリート製供試体を用意した(表－2.10)。これらを測定した場合の反発度は，30～45程度の範囲にあった。

con40とcon70はこの実験のために作製した供試体で，含水状態を一定とするために試験前に乾燥炉で乾燥させた。他の3つの供試体は，他の実験のために作製されていた大型の供試体で，屋内で保管された材齢の大きな供試体であり，測定箇所のコンクリート品質や含水状態がほぼ一定となっているものと推定されるものである。

テストアンビル・供試体を打撃して反発度の測定を比較するリバウンドハンマーは13機用意した。このうち9機は各々の製造者等によって適切に整備された装置である。また，4機はリース業や販売店などにより整備されており，製造者による整備を受けた装置と同様な性能を有するかどうか不明なものである。また，様々な性能のリバウンドハンマーを用意するため，著者らが所有しているリバウンドハンマーの整備状態を故意に変更した測定ケースを2ケース行った。その結果，測定装置のケース数は15となった(表－2.11)。一方，テストアンビルと供試体をあわせると，測定対象のケース数は25となった。

b)反発度の測定

反発度の測定は，テストアンビル・供試体を強固なコンクリート床上に設置し，一部の供試体を除き下向

きに打撃して行った。テストアンビルは10回の打撃を行ってその平均値をとった。コンクリート製供試体は18～22回の打撃を行い，その平均値からの偏差が平均値の20%以上となる測定点を削除した上で，残りの測定結果の平均値を算出し，これを反発度とした。

リバウンドハンマーの動作を安定させるため，コンクリート床面などで10回程度の捨て打ちを行った後で本試験を実施した。打撃方向等に応じた測定結果の補正は行っていない。

c)測定時のテストアンビルの温度

測定時の条件を一定とするため，テストアンビルおよびcon40，con70は室温20℃の恒温室に保管しておき，測定は同室内で行った。conAA～conCCは大型で移動が困難なので，それぞれ設置されている屋内(気温25～30℃程度)で測定した。

しかし，特に低反発度型テストアンビルは，公称反発度を低く抑えるために種々の工夫がなされており，使用する際の温度によっては測定結果に影響があることも懸念される。そこで，測定時の温度の影響を検討するために，5～35℃の恒温槽中で保管して一定の温度としたテストアンビルの反発度を測定し，20℃の環境下で測定した場合と比較することにした。テストアンビルは恒温槽から取り出した直後に室温20℃の恒温室内で打撃した。リバウンドハンマーは20℃の実験室に保管しておいたHA1，HC1の二機を用いた。

(4)実験結果

反発度の測定結果を表－2.12，表－2.13に示す。

(5)使用したリバウンドハンマーの性能比較

まず，整備状態が良の9機のリバウンドハンマーを用いて従来型テストアンビルおよびコンクリート製供試体を打撃した結果を図－2.11に示す(AC80は打撃できないハンマーも多かったのでACTA78で代用した)。図から以下のことが明らかになった。

① 従来型テストアンビルのAB80およびACTA78を測定した場合の反発度は，リバウンドハンマーの製造者ごとに異なっている。

② 供試体con40を打撃した際の反発度には，やや測定装置によるばらつきが見られる。

③ ①，②の場合を除くと，整備状態が良のリバウンドハンマーによる反発度測定結果のばらつきは，反発度でおおむね反発度で4の範囲に入っていた。また①の場合でも，同一製造者による3機のリバウンドハンマーの結果は，ほとんど同じであった。

次に，整備状態が不良・または不明の6機のリバウンドハンマーによる測定結果を，図－2.12に示す。図から，以下のことが明らかになった。

① コンクリート製供試体の測定結果に着目すると，HR2，HZ2を使用した場合にはいずれの供試体でも高めの，HZ1，HM1を使用した場合にはいずれの供試体でも低めの反発度が測定されているなど，各テストハンマーによってその性能が異なっている。

② 整備状態が不明の各リバウンドハンマーの個体差は，整備状態が良のものと比較して，明らかに大きい。

③ 一方で，従来型テストアンビルAF79の測定結果に着目すると，各リバウンドハンマーの個体差は大きくなく，点検で整備状態が適切であると判定される公称反発度±２の範囲内やその近くに測定結果が集中している。

これらの結果から，製造者以外が整備したリバウンドハンマーはその性能が購入当初とは異なっている可能性があること，従来型のテストアンビルを使用した点検だけではリバウンドハンマーの性能を適切に評価することが難しいことがあらためて確認された。

（６）低反発度型テストアンビルと供試体の測定結果比較

供試体con70を打撃した場合の反発度と他の６種類のアンビル・供試体を打撃した場合の測定結果を比較し，図－2.13に示す。図から，供試体con70（反発度30程度）の測定結果と供試体con40（反発度40程度）の測定結果は相関関係が強く，con70を打撃したときに比較的高い反発度が得られるリバウンドハンマーを使用すると，con40を打撃した場合にも比較的高めの反発度が測定されることがわかる。

同様の傾向は，con70の測定結果と低反発度型テストアンビルAK40，ACS39，ACTA39を打撃した場合の測定結果の間にも認められる。これは，con70の公称反発度と低反発度型テストアンビルAK40，ACTA39等の公称反発度の差が小さく，打撃を行った際のリバウンドハンマー内の作動が比較的似ているためであると考えられる。従って，これらの低反発度型アンビルを使用することで，コンクリートの反発度を測定するハンマーの整備状態をより適切に評価することができるものと考えられる。例えば，ACTA39の測定結果をみると，HR2，HM1の二機は製造者により整備・検定されたテストハンマーとは性能が異なっていることを明らかにできる。また，AK40の測定結果からはHR2，HZ2の二機について製造者により整備・検定されたテストハンマーとは性能が異なっていることがわかる。

各種テストアンビル・供試体を打撃した場合の測定結果につき，図－2.13と同様なグラフを作成して求めた測定結果の相関係数を表－2.14に示す。表から以下のことがわかる。

① コンクリート製供試体同士の測定結果はいずれの場合でも相関関係が比較的強い。したがって，特定の供試体を打撃した際のリバウンドハンマーごとの測定結果のばらつきは，供試体内での測定面のばらつき等によるものではなく，各リバウンドハンマーの個体差に起因するものであると推測される。

② 低反発度型テストアンビルACTA39の測定結果は，コンクリート製供試体の測定結果との相関関係が比較的強く，その相関係数は0.7を上回っている。従ってACTA39は各リバウンドハンマーの性能を比較的良く評価することができるテストアンビルであると考えられる。

③ 従来型テストアンビルを用いた場合の測定結果（反発度80程度）と，コンクリート製供試体の測定結果との相関関係は，多くの場合には明確でない。同様に，携帯型テストアンビルを用いた場合の測定結果も，低反発度型テストアンビルと比較すると，供試体の測定結果との関係は強くない。

④ 一方で，低反発度型テストアンビルでも，コンクリート製供試体を打撃した測定結果との相関関係が強くない場合もある（例えば，AF40）。

④について検討するため，AF40の測定結果とACTA39の測定結果（整備状態良のリバウンドハンマーのみ）を比較して，図－2.14に示す。ACTA39では，整備状態が良のリバウンドハンマーについては，いずれのハ

ンマーでもほぼ同程度の反発度が得られているのに対し，AF40を打撃したとき際の反発度にはばらつきが大きい。また，AF40を打撃したとき際の反発度の大きさには，図－2.11のAB80やACTA78の測定結果と同様，測定装置の製造者によって高めの，あるいは低めの反発度が得られるといった傾向が認められる。この理由としては，リバウンドハンマーの外形やリバウンドハンマーによる打撃が垂直に行われるようリバウンドハンマーをガイドする部分の形状等が，製造者によって異なることが考えられる。

(7)テストアンビルの性能に対する温度の影響

テストアンビルの温度を変化させて反発度を測定した結果を図－2.15，図－2.16に示す。従来型，携帯型のアンビルがほとんど温度の影響を受けなかったのに対して，AF41，ACS29を除く低反発度型テストアンビルは，いずれも温度の影響を受けており，AF40とAC36は，温度の上昇とともに測定される反発度が上昇する傾向が著しい。一方，製造者Kによる低反発度型テストアンビルは，温度の上昇とともに反発度が低下する傾向が見られる。これらは，反発度40程度の測定結果が得られるようにするため，内部に温度の影響を受けやすい材料を使用しているためと推測される。

製造者Cによる低反発度型テストアンビル，AC36，ACTA39，ACTB39に着目すると，従来型テストアンビルとほぼ同様な形状・質量のAC36では，測定時の温度の違いが反発度に著しい影響を及ぼしていたが，ほぼ同様な質量で打撃面を二つ有するACTA39では，AC36と比較して温度の影響が小さかった。また，ACTA型よりも一回り大きいACTB39での測定結果では，温度の影響がさらに小さかった。三つのテストアンビルを測定した際の打撃音等については違いは少ないが，内部の構造のわずかな違いが，温度の影響の大きさが異なる原因となっていると考えられる。

今回収集した低反発度型テストアンビルの多くは，10℃程度の温度変化によってもその性能が大きく変化する場合があることがわかった。したがって，必ずしも気温が一定でない調査場所における使用には適さず，今後，測定時の温度の影響を受けにくいような材料・構造を検討する必要がある。

(8)低反発度型テストアンビルを用いた点検についての検討結果

本節では，低反発度型テストアンビルやコンクリート製供試体を含む25種類の測定箇所で，15種類のリバウンドハンマーを用いて反発度の測定を行い，測定結果の比較を行った。その結果，以下のことが明らかになった。

① リバウンドハンマーの製造者らにより適切に整備された測定装置の個体差は，反発度で4程度の範囲に入っていた。

② 製造者以外が整備したリバウンドハンマーの性能は，製造者が整備したものと大きく異なる場合があることが改めて確認された。

③ ②のようなリバウンドハンマーを従来型テストアンビルを用いた点検で明らかにすることは困難であることが改めて確認された。

④ 製造者らが試作した低反発度型テストアンビルを用いることで，リバウンドハンマーの性能をより適切に評価できる可能性があることが明らかになった。ただし，今回，収集した低反発度型テストア

ンビルは，測定時の温度の影響を受けやすいものもあった。

⑤ 従来型・低反発度型にかかわらず，製造者の異なるリバウンドハンマーとテストアンビルを用いると，反発度が高め，あるいは低めに測定される組み合わせがあった。この理由としては，製造者ごとにリバウンドハンマーや，テストアンビルの形状が異なることが考えられる。

これらの検討結果から，測定に用いるリバウンドハンマーの整備状態を点検するためには，従来から行われている点検方法だけでは不十分で，低反発度型テストアンビルなどを用いた点検方法を確立する必要があるものと考えられる。しかし，現状では，現場でのリバウンドハンマーの点検等にすぐに適用できる低反発度型テストアンビルはなく，さらに検討・開発が進められる必要がある。

なお，ここで検討した，低反発度型テストアンビルAF40，AK30～AK45(可変型)，AC36の三台については，使用を繰り返し合計で3000～4000回の打撃を行ったが，測定される反発度が変化するといった不具合はなかった。

表－2.9　収集したテストアンビル

記号	タイプ	製造者	詳細
AA80	従来型	A	高さ215mm×直径130mm，質量13kg，公称反発度（80→）78 ※この実験に使用した結果，性能が購入時と変化していることが明らかになったが，実験中の性能は安定していた。
AF79	従来型	F	高さ227mm×直径135mm，質量14.0kg，公称反発度79
AB80	従来型	B	高さ231mm×直径146mm，質量16.9kg，公称反発度80
AC80	従来型	C	高さ234mm×直径128mm，質量12.9kg，公称反発度80
AB74	携帯型	B	高さ238mm×直径88mm，質量6kg，公称反発度74
AC72	携帯型	C	高さ160mm×直径107mm，質量4.9kg，公称反発度72
AC60	携帯型	C	高さ169mm×直径50mm，質量2.2kg，公称反発度60
AF40	低反発度型	F	高さ228mm×直径130mm，質量13.0kg，公称反発度40
AF41	低反発度型	F	高さ236mm×直径146mm，質量9.1kg，公称反発度41 ※表－2.7のa49と同型式
AK30 AK35 AK40 AK45	低反発度型	K	高さ221mm×直径118mm，質量12.6kg，公称反発度30～45 ※油圧を変化させることで公称反発度を30～45の範囲で変化させることができる。本実験では，30，35，40，45の４点で測定したので，測定ケースごとに異なる記号を用いることにした。
ACS39	低反発度型	C	高さ95mm×直径52mm，質量1.13kg，公称反発度39″
ACS29	低反発度型	C	高さ74mm×直径52mm，質量0.81kg，公称反発度29
AC36	低反発度型	C	高さ234mm×直径128mm，質量12.2kg，公称反発度36
ACTA78 ACTA39	低反発度型	C	高さ230mm×直径129mm，質量13.4kg，公称反発度78，39 ※公称反発度が異なる２つの打撃面を持つ。
ACTB79 ACTB39	低反発度型	C	高さ231mm×直径149mm，質量17.6kg，公称反発度79，39 ※公称反発度が異なる２つの打撃面を持つ。

※テストアンビルAA80は今回の試験の結果，その性能が購入当初(公称反発度80)とは異なっていると推測される。しかし，今回の実験期間中には安定した反発度が測定されたので，測定結果を採用した。

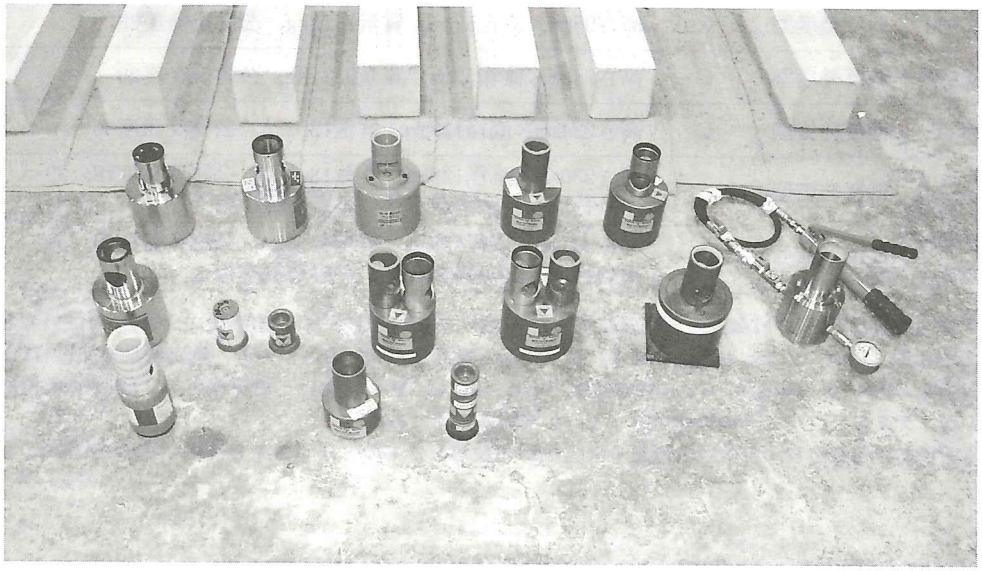
※製造者：Aはスイス国のB，Cは国内の企業である。FはAの国内における総代理店，Kは販売の実績はないが，テストハンマー等の試作を行っている国内の企業である。

※本報における製造者・整備者名の記号は既報2)で使用したものと同じものを使用した(Kを追加)。

表－2.10　反発度の測定を行ったコンクリート製供試体

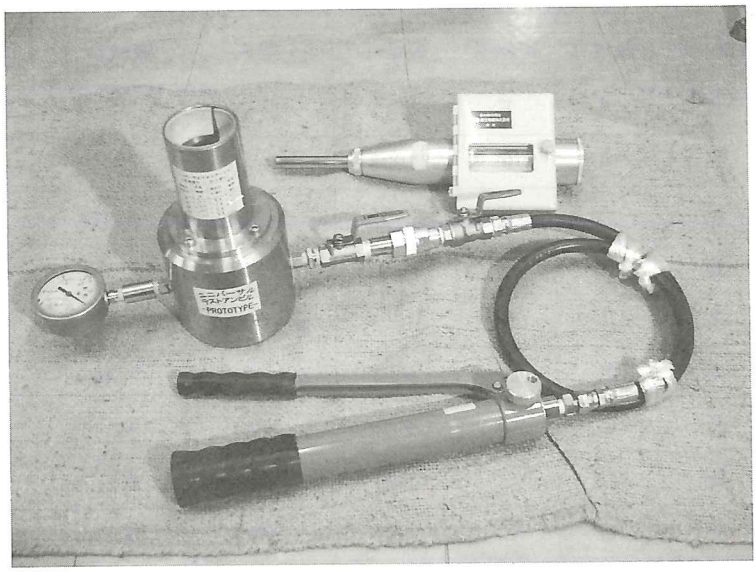
記号	詳細
con40	W/C＝40%，150mm×150mm×530mmの供試体を７本作成し，10日間湿潤養生の後２日間105℃の気中で乾燥させたもの，打撃回数は21回（３回／本） 公称反発度40.7
con70	con40と同様に作成したW/C＝70%の供試体 公称反発度31.2
conAA	高さ1300×幅1200×厚さ700mmのブロック状供試体で屋内に約10年間保管されていたもの，コンクリートの配合は不明 公称反発度45.2（水平方向に打撃）
conBB	高さ1350×幅2200×厚さ100～600mmの壁状供試体で屋内に約３年間保管されていたもの，測定個所の壁厚は200mmで一定，W/C＝62.5%， 公称反発度41.4（水平方向に打撃）
conCC	1500×1500×200mmの版状供試体で屋内に約２年間保管されていたもの， W/C＝50% 公称反発度42.5

※特に記してある場合を除き，打撃方向は鉛直下向き。
※コンクリート製供試体の公称反発度は，整備状態が良の９本のハンマーで反発度を測定した結果の平均とした(表－2.10参照)。



※テストアンビル前列左から，AB74，AC72，AC60，中列左から，AF40，ACS39，ACS29，ACTA78＆39，ACTB79＆39，AF41，AK30～45，後列左から，AA80，AF79，AB80，AC80，AC36，テストアンビルのさらに奥はコンクリート製供試体con70である。

写真－2.7　収集したテストアンビル



写真－2.8　低反発度型テストアンビルAK30～AK45



※左から，AC60，ACS39(低反発度型)，AC80，ACS29(低反発度型型)，AC72

写真－2.9　テストアンビルの寸法比較

表－2.11　使用したリバウンドハンマー

記号	整備状態	製造者	整備者	製造年	型式	機械番号	表－2.6との対応
HA1	良	A	F	－	NR-10	55694	－
HA2	良	A	F	1998	NR-10	55985	－
HA3	良	A	F	2001	NR-10	58414	A021
HK1	良	K	K	－	α－3000J	－	－
HK2	良	K	K	－	α－5000J	－	－
HB1	良	B	B	2000	α－800RJ	C00050	A02
HC1	良	C	C	不明	NSR	80345	－
HC2	良	C	C	不明	NSR	80317	－
HC3	良	C	C	2001	NSR	80476	A03
HR1	不明	B	R	不明	α－750RX	02852	R04
HR2	不明	A	R	1996	NR-10	53010	R05*
HZ1	不明	D	G	1987頃	OT-80	8600	Z03
HZ2	不明	A	H	1977	NR-10	25774	Z06
HM1	不良	C	著者	HC3と同じ			
HM2	不良	C	著者	HC3と同じ			

※整備状態：良は製造者らにより整備されたリバウンドハンマー。不明は，製造者以外の企業により整備されたテストハンマー。不良は，HC3の調整ネジを操作し，故意に整備状態を変更したテストハンマーである。HM1では調整ねじの高さをHC3の状態から約1.5mm程度高くし，HM2ではHC3の状態から約3mm低くした。

※製造者・整備者：Dは国内の企業である。Rはレンタル事業者が自ら整備・点検を行っているものである。GとHは，測定機器の販売や整備等を行う企業である。

※FはAの国内における総代理店なので，Fが整備した装置はAが製造したものと同等の性能を有していると考えられる。また，Kの装置は，Bの装置と共通の部品を多数使用しており，同等の性能を有していると考えられる。

※前節でも使用したハンマーについては，表－2.6で使用した記号を参考までに示した。ただし，今回の実験までの間に整備が行われ，調整状態が異なっている可能性もある。

※HR2は，表－2.6でのR05と同じ会社から賃借した測定装置であり，R05と同様の整備状態にあるものと推測される。

表－2.12　反発度測定結果(20℃で保管したテストアンビル)

使用したハンマー	従来型テストアンビル				携帯型テストアンビル			低反発度型テストアンビル		
	AA80	AF79	AB80	AC80	AB74	AC72	AC60	AF40	AF41	AK30
HA1	77.8	80.0	83.1	81.9	78.8	71.3	64.1	38.8	44.8	32.0
HA2	78.5	80.2	84.3	81.7	79.1	76.7	63.8	40.6	41.0	27.0
HA3	76.7	79.2	82.9	79.1	75.1	73.5	61.9	36.0	41.2	31.2
HK1	77.8	79.1	80.0	－	75.0	72.0	60.7	36.1	39.6	32.0
HK2	76.9	78.0	80.9	－	74.6	71.9	61.1	37.2	40.0	32.9
HB1	77.5	79.6	82.0	－	75.6	73.0	62.0	36.5	39.6	31.0
HC1	77.6	79.5	83.9	80.8	77.2	74.5	62.0	36.0	39.1	28.0
HC2	77.6	79.5	83.6	78.9	77.4	75.0	63.0	38.9	42.1	31.0
HC3	81.0	80.5	83.2	79.8	77.6	71.9	63.9	37.6	44.3	32.1
HR1	77.1	78.0	80.2	－	74.2	71.6	60.1	36.6	38.0	29.0
HR2	78.6	80.7	85.7	83.2	80.6	77.3	66.0	39.0	47.3	36.0
HZ1	79.8	79.8	80.2	－	75.1	73.6	61.9	36.4	45.6	32.9
HZ2	76.4	79.9	84.0	－	78.6	76.0	64.3	36.8	44.5	35.9
HM1	77.0	77.4	78.8	75.7	71.3	68.3	60.0	35.3	40.2	27.0
HM2	81.7	81.5	85.5	81.8	79.8	74.5	64.9	39.9	44.8	29.3

使用したハンマー	低反発度型テストアンビル									
	AK35	AK40	AK45	ACS39	ACS29	AC36	ACTA78	ACTA39	ACTB79	ACTB39
HA1	37.0	42.0	47.0	40.6	31.9	39.5	80.0	39.7	81.0	39.3
HA2	33.0	37.0	42.0	39.6	27.8	38.0	79.0	38.9	80.6	37.8
HA3	36.6	42.1	46.5	40.7	30.4	36.5	77.0	39.9	78.0	38.1
HK1	37.0	41.3	45.8	37.8	29.9	34.5	74.8	39.9	76.3	37.1
HK2	37.3	43.0	47.0	38.8	28.5	33.5	75.1	39.8	76.5	37.9
HB1	36.0	40.5	45.0	38.5	29.9	35.5	75.9	39.9	77.0	37.4
HC1	33.1	39.0	44.0	40.2	31.1	34.0	79.4	38.7	80.1	38.1
HC2	35.4	42.0	46.7	41.7	30.0	36.5	78.4	39.3	79.8	38.3
HC3	37.2	41.8	47.0	40.7	31.5	35.4	78.8	38.9	80.0	39.0
HR1	33.9	38.4	42.0	36.3	28.6	33.7	74.7	40.1	76.5	38.7
HR2	40.4	45.5	50.4	44.7	35.4	38.9	80.2	42.6	82.1	42.9
HZ1	37.0	42.0	46.4	39.8	30.3	32.4	75.7	38.2	77.9	38.8
HZ2	41.0	45.0	50.4	42.5	33.9	37.1	78.6	40.3	80.1	40.4
HM1	33.7	38.0	42.1	36.8	27.6	33.8	74.3	35.8	74.7	33.7
HM2	35.1	40.8	45.1	41.0	34.3	38.3	81.0	40.0	82.0	39.9

使用したハンマー	コンクリート製供試体				
	con40	con70	conAA	conBB	conCC
HA1	43.0	31.7	45.9	42.8	44.7
HA2	40.9	31.2	43.2	39.4	41.6
HA3	41.0	31.3	46.4	41.2	42.8
HK1	41.1	31.0	46.2	41.8	42.8
HK2	42.0	32.0	46.0	42.3	42.3
HB1	40.8	30.1	46.6	42.0	42.0
HC1	37.4	29.7	44.4	40.4	41.7
HC2	42.4	32.6	44.1	41.2	43.1
HC3	37.4	30.8	44.0	41.2	41.8
HR1	41.4	30.0	46.2	41.9	44.9
HR2	46.5	35.5	51.8	48.0	48.5
HZ1	34.0	28.4	41.8	38.9	38.3
HZ2	42.0	33.5	48.4	44.5	45.5
HM1	38.4	28.9	43.2	39.8	40.5
HM2	42.5	32.6	47.1	42.3	41.7

※AC80は，打撃時にハンマーを支えるガイド部分の形状が打撃するハンマーと合わず測定できない場合があった。

表－2.13　反発度測定結果(温度を変化させた場合)

【リバウンドハンマーHA1を使用】

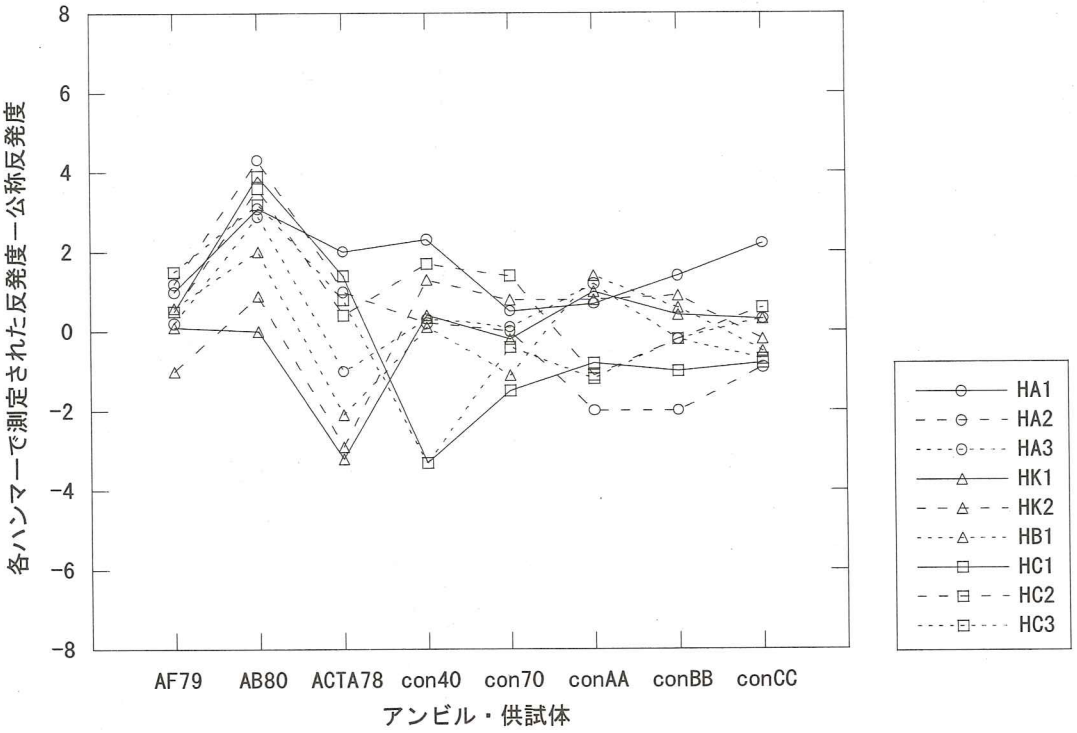
保管時の温度	従来型テストアンビル				携帯型テストアンビル			低反発度型テストアンビル		
	AA80	AF79	AB80	AC80	AB74	AC72	AC60	AF40	AF41	AK30
5℃	79.1	79.1	84.0	81.0	77.9	75.9	64.2	32.2	45.5	37.0
10℃	78.8	80.1	84.3	81.9	78.2	76.0	64.5	32.4	42.9	35.2
15℃	—	—	—	—	—	—	—	35.1	43.1	33.0
20℃	77.8	80.0	83.1	81.9	78.8	71.3	64.1	38.8	44.8	32.0
25℃	—	—	—	—	—	—	—	39.0	42.2	30.0
30℃	78.7	79.5	83.9	81.9	78.0	75.9	63.8	39.8	42.4	28.0
35℃	78.2	79.9	84.8	82.0	78.0	75.9	63.8	42.3	43.9	27.8

保管時の温度	低反発度型テストアンビル									
	AK35	AK40	AK45	ACS39	ACS29	AC36	ACTA78	ACTA39	ACTB79	ACTB39
5℃	42.0	46.1	51.0	38.4	30.8	21.2	78.9	38.6	80.5	40.2
10℃	40.4	45.0	50.0	39.5	31.6	28.8	79.5	37.0	80.9	39.0
15℃	38.9	43.9	48.1	40.5	32.0	33.2	—	39.8	—	39.0
20℃	37.0	42.0	47.0	40.6	31.9	39.5	80.0	39.7	81.0	39.3
25℃	36.0	41.0	45.2	40.9	32.7	38.2	—	40.0	—	39.2
30℃	33.0	39.3	44.8	41.4	31.3	43.1	79.0	41.9	80.7	40.4
35℃	34.0	38.0	44.0	41.8	32.3	46.0	79.0	43.9	80.3	42.6

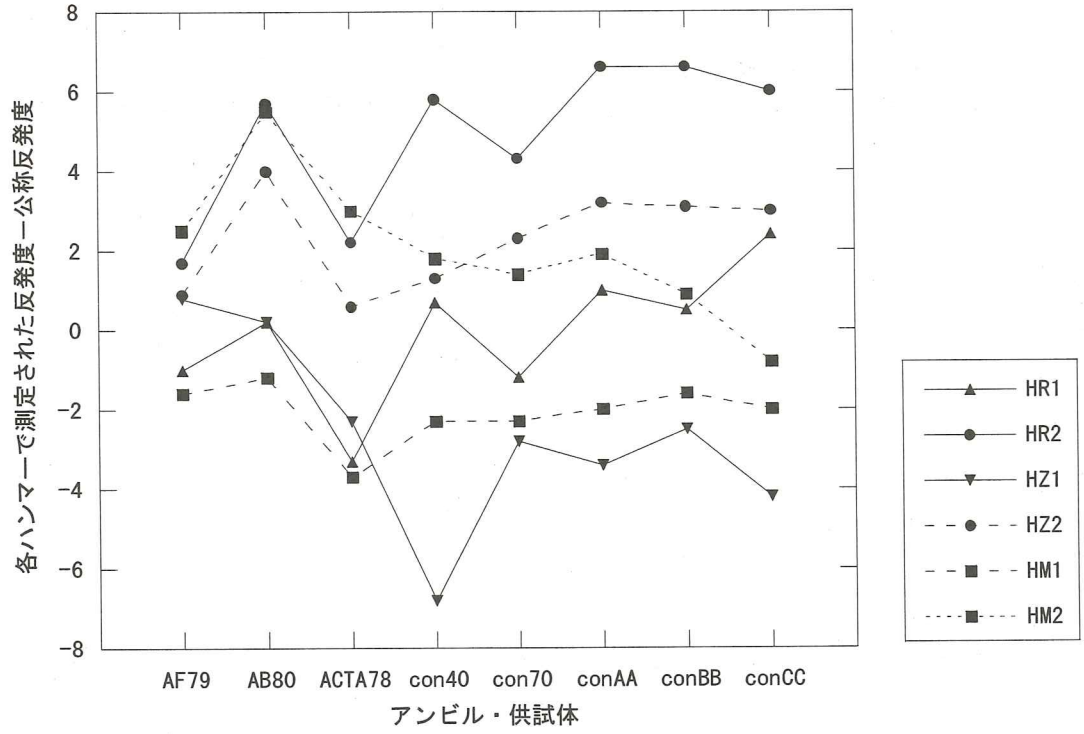
【リバウンドハンマーHC1を使用】

保管時の温度	従来型テストアンビル				携帯型テストアンビル			低反発度型テストアンビル		
	AA80	AF79	AB80	AC80	AB74	AC72	AC60	AF40	AF41	AK30
5℃	76.1	78.3	82.3	79.1	76.9	74.3	62.7	31.4	38.2	36.0
10℃	77.6	78.6	83.9	81.0	77.4	75.0	56.8	31.5	38.2	34.0
15℃	—	—	—	—	—	—	—	34.0	40.0	30.2
20℃	77.6	79.5	83.9	80.8	77.2	74.5	62.0	36.0	39.1	28.0
25℃	—	—	—	—	—	—	—	37.4	38.1	27.0
30℃	78.2	78.0	83.7	79.9	77.0	75.0	63.1	38.2	39.8	27.1
35℃	77.9	78.4	83.5	80.8	76.7	74.2	62.5	39.4	39.1	24.3

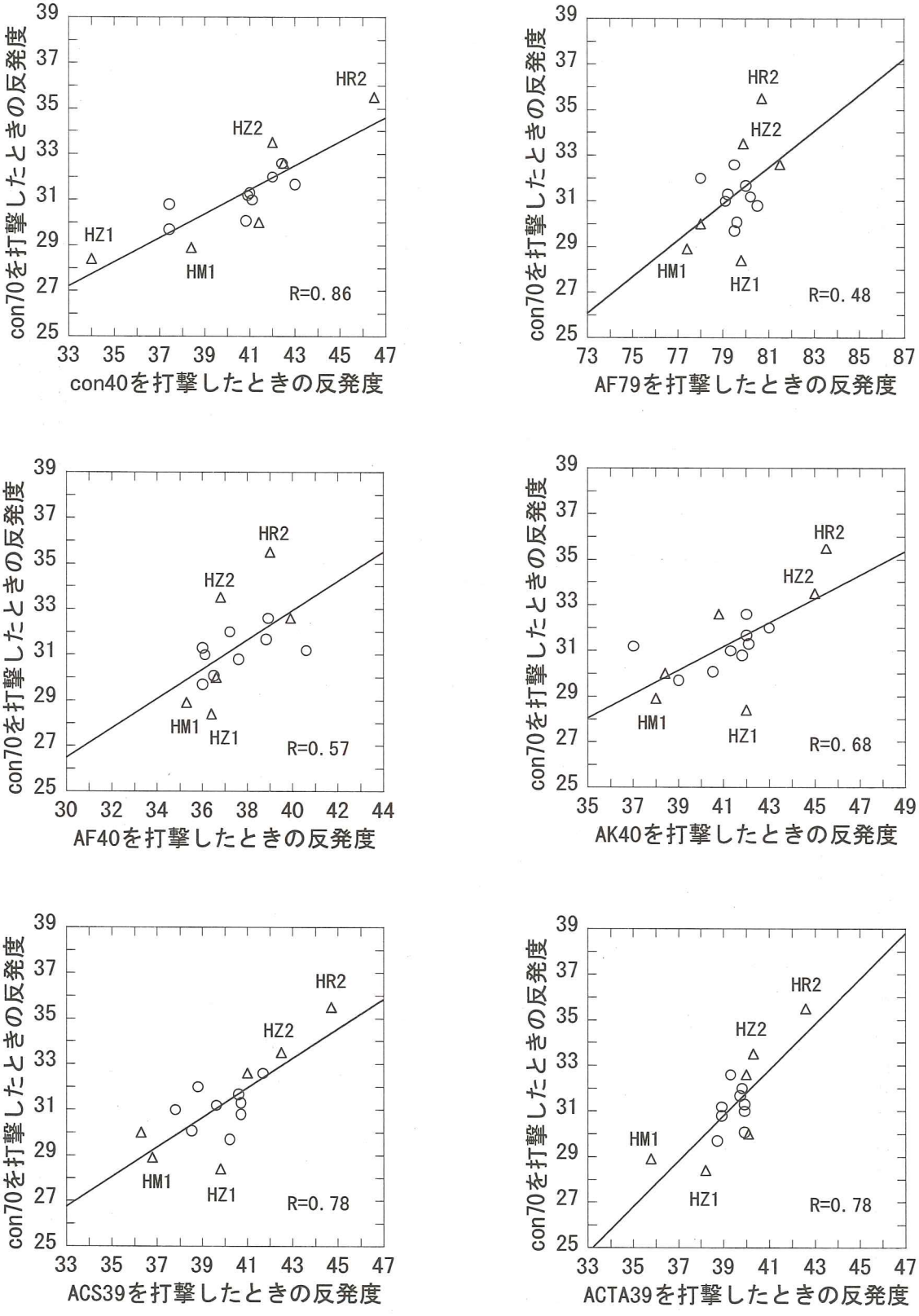
保管時の温度	低反発度型テストアンビル									
	AK35	AK40	AK45	ACS39	ACS29	AC36	ACTA78	ACTA39	ACTB79	ACTB39
5℃	40.0	45.0	49.0	38.1	30.0	17.9	78.3	35.1	79.6	38.1
10℃	39.0	43.0	48.0	39.2	31.0	21.4	79.3	37.9	80.1	38.0
15℃	37.0	42.0	46.0	39.3	30.6	25.7	—	37.9	—	38.0
20℃	33.1	39.0	44.0	40.2	31.1	34.0	79.4	38.7	80.1	38.1
25℃	33.0	39.0	44.0	40.5	31.3	33.9	—	40.0	—	38.0
30℃	33.0	38.0	43.2	40.0	30.1	33.1	79.2	41.7	80.1	39.7
35℃	30.0	37.0	41.0	41.0	31.2	34.7	78.9	43.1	79.9	42.0



図－2.11　従来型テストアンビル・供試体の反発度測定結果
（整備状態良のリバウンドハンマー）



図－2.12　従来型テストアンビル・供試体の反発度測定結果
（整備状態不明・不良のリバウンドハンマー）

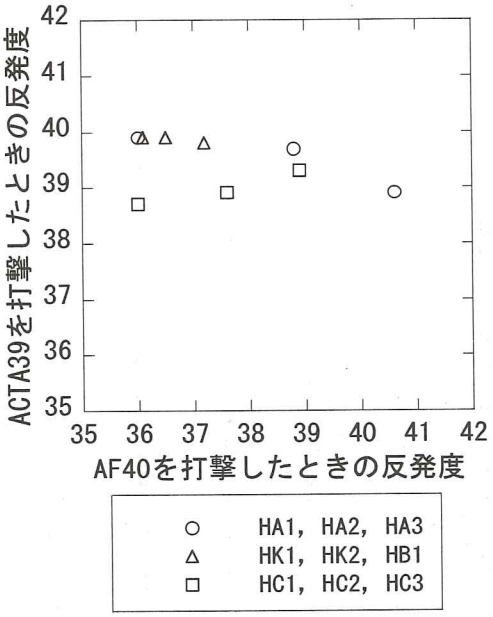


図－2.13　アンビル・供試体の反発度測定結果の比較(con70を中心に)

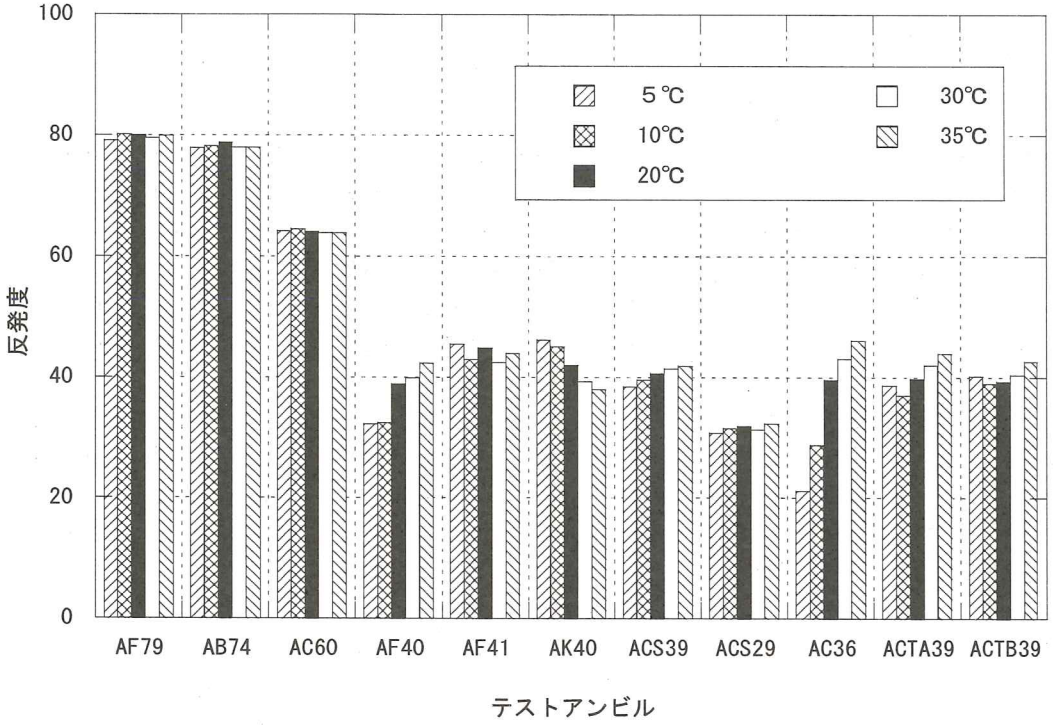
表－2.14　反発度測定結果の相関関係

	コンクリート製供試体					低反発度型アンビル						
	con40	con70	conAA	conBB	conCC	AF40	AF41	AK30	AK35	AK40	AK45	ACS39
con40	1.00	0.86	0.82	0.79	0.84	0.50	0.18	0.33	0.37	0.40	0.38	0.42
con70	—	1.00	0.80	0.85	0.79	0.57	0.52	0.60	0.63	0.68	0.70	0.78
conAA	—	—	1.00	0.95	0.86	0.17	0.30	0.60	0.64	0.62	0.60	0.52
conBB	—	—	—	1.00	0.90	0.24	0.46	0.71	0.74	0.73	0.71	0.62
conCC	—	—	—	—	1.00	0.26	0.25	0.52	0.54	0.52	0.52	0.49

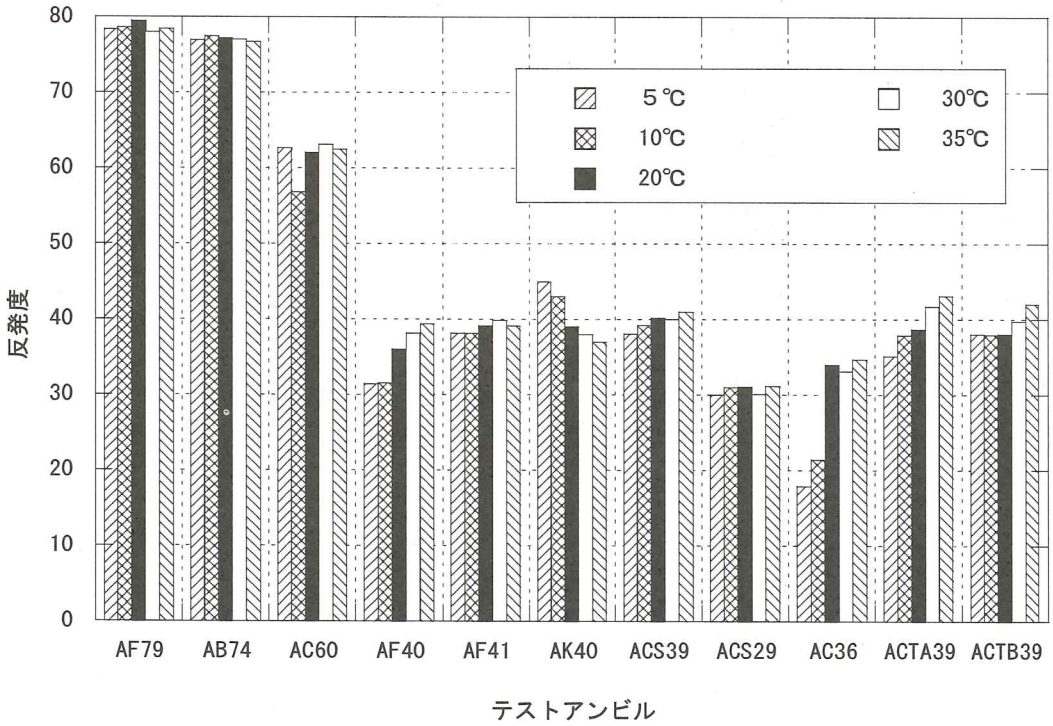
	低反発度型アンビル						携帯型アンビル			従来型アンビル		
	ACS29	AC36	ACTA78	ACTA39	ACTB79	ACTB39	AB74	AC72	AC60	AA80	AF79	AK80
con40	0.41	0.71	0.36	0.73	0.37	0.49	0.48	0.35	0.46	-0.22	0.19	0.48
con70	0.69	0.73	0.59	0.78	0.64	0.74	0.72	0.62	0.74	0.02	0.48	0.72
conAA	0.69	0.52	0.32	0.85	0.35	0.67	0.45	0.39	0.47	-0.14	0.28	0.47
conBB	0.73	0.54	0.38	0.82	0.43	0.74	0.52	0.40	0.57	-0.09	0.31	0.48
conCC	0.54	0.58	0.35	0.78	0.39	0.65	0.48	0.37	0.45	-0.29	0.16	0.44



図－2.14　低反発度型テストアンビルAF40とACTA39の比較



図－2.15　テストアンビルの温度による測定結果への影響
（リバウンドハンマーHA1を使用）



図－2.16　テストアンビルの温度による測定結果への影響
（リバウンドハンマーHC1を使用）

3．コンクリートの含水状態と反発度の関係に関する検討

3.1　実験方法

反発度法に関しては，既往の研究結果から，測定結果がコンクリートの測定面の含水状態に影響されることが明らかにされている。しかし，その影響の程度やコンクリートの品質を推定する際の補正方法については必ずしも十分には明確でない。一方で，実構造物調査の現場で測定するコンクリートの含水状態を調整することは容易ではなく，コンクリートの含水状態が反発度の測定結果に与える影響を明確にする必要性は高い。

既往の研究では，含水状態の影響の評価を検討するために，含水状態が異なる複数の供試体を用意した比較実験がなされている場合がある。しかし，コンクリートを乾燥させると，測定される反発度が大きくなるだけでなく，圧縮強度試験で測定される強度も高くなることに留意すべきである。すなわち，一時的に乾燥させたコンクリートを用いると，湿潤状態の場合と比較して圧縮強度が大きくなるが，乾燥によってそのコンクリートの品質(緻密さなど)が向上したわけではない。

したがって，コンクリートの含水状態が反発度の測定結果に与える影響を検討するためには，均質なコンクリートの含水状態を変化させ，反発度の変化を調べる方法が望ましいと考えられる。このような方法で，検討した既往の研究事例[25)26)]は少ないので，本共同研究でも実験を行って，データを収集することにした。

実験には，1500mm × 1500mm × 200mm の版状のコンクリート供試体３体(A1，A2，B3)を用いた。この供試体は，材齢７日まで湿潤養生が施された後，屋内(ただし，気温・湿度は屋外同様に変動)に約１年間放置されていたものである。３体のうち２体(A1，A2)は粗骨材の最大寸法が25mmで１体(B3)は40mmと異なっているが，３体とも水セメント比50％のコンクリートが使用されており，円柱供試体の圧縮強度(材齢28日，版状供試体と同様の養生条件)は，A1，A2が35.1N/mm^{2}でB3が36.8N/mm^{2}とほとんど変わらなかった。実験は次の手順で行った，

① 気乾状態で反発度を測定した。＜気乾＞

② 反発度測定個所周辺を湿布で覆いコンクリート表面から約21時間吸水させた。その後，湿布を取り除いて約３時間自然乾燥させ，反発度を測定した。このとき，測定面には水滴等はほとんど見られなかったものの吸水のため濃い灰色を呈しており，吸水箇所とそうでない箇所が明確に区別できるような状態であった。＜湿潤＞

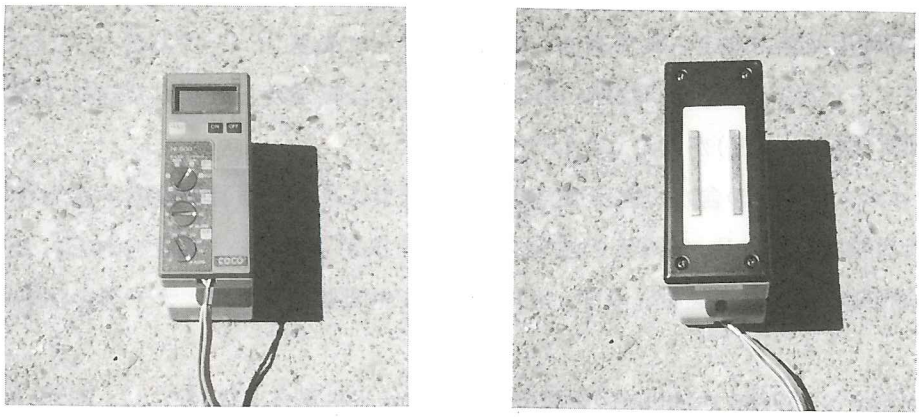
③ さらに乾燥が進んだ翌々日(湿布を除いてから約23時間後)に，三回目の反発度測定を行った。このときには吸水操作を行ったコンクリート表面も乾燥が進み，吸水箇所とそうでない箇所を外観から区別することは困難な状態であった。＜再乾燥＞

④ ①～③の反発度測定の際には，同時に高周波容量式水分計(写真－3.1)を用いてコンクリート表面からコンクリートの含水率を測定した。

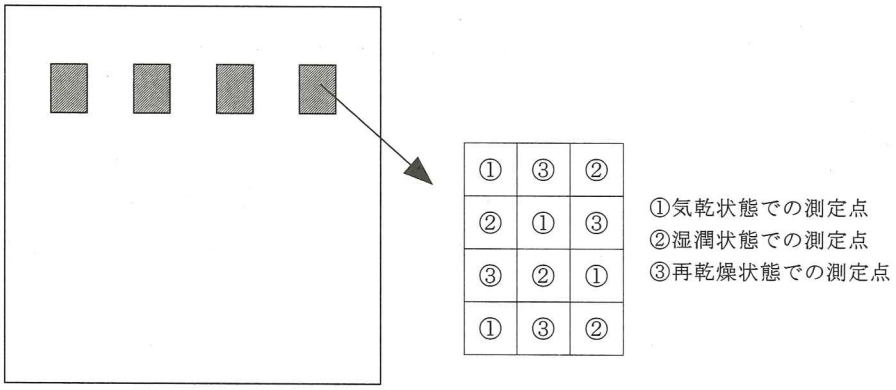
本章では，簡単のためそれぞれの測定ケースを，気乾，湿潤，再乾燥と略す。

反発度は16点の打撃を行って得られた測定値の平均とした。ただし，平均値からの偏差が平均値の±20%以上となる測定値があった場合には，その測定点を捨て，残りの測定値の平均を求めてこれを反発度とした。個々の測定点は図－3.1のようにとり，供試体の部位によるコンクリートの品質の変動が測定結果に影響しないよう配慮した。また，コンクリートの含水率は，４回の測定を行った平均値とした。

測定には，前章表－2.1のリバウンドハンマーHCを使用した。測定の間に前章表－2.2のテストアンビルa80を使用した点検を行い，リバウンドハンマーの性能が大きく変化していないことを確認した。なお，測定時の気温は，いずれの場合も10℃前後であった。



写真－3.1　高周波容量式水分計(左：上面，右：測定端子面)



※供試体にはコア採取跡などがあったので，それらの影響がないような場所を選定した。その結果，一つの範囲で48点(16点×３条件)程度の測定を行うことが困難であったので，図のように測定点を配した。また，各範囲ごとに含水率を測定し，４箇所の平均をとった。

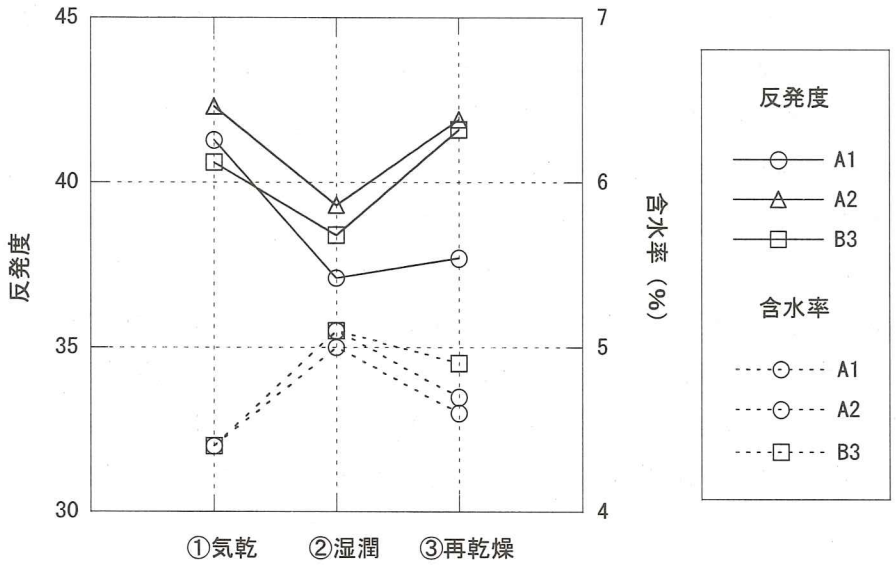
図－3.1　測定点の配置

3.2 実験結果と考察

測定結果を図－3.2に示す。表面が湿潤状態の二回目の測定では，気乾状態での測定結果と比較すると２～４程度反発度が小さく測定された。この結果は，同程度の品質のコンクリートを用いて行われた木村の実験結果(表－3.1)とほぼ同様であった。一方，推定強度に換算するとその変化量は10%程度で，永島らの実験結果(表－3.2)よりやや大きい。永島らの実験におけるコンクリートの材齢については詳細な記述が無く不明であるが，今回の実験(材齢１年)や木村の実験(材齢47年)と比較すると，実験前の乾燥時間が短かく，気乾状態と湿潤状態の差が比較的小さかったことも考えられる。

表面が再度乾燥してきた三回目の測定では，３体の供試体のうち２体では気乾状態とほぼ同程度の反発度が測定されたが，１体では湿潤状態での測定結果に近い反発度が得られた。反発度測定時における含水率の測定結果を比較すると，再乾燥状態での含水率は，いずれの供試体でも気乾状態と湿潤状態の中間程度である。しかし，含水率と反発度の測定結果には明確な関係は見られず，供試体による差異が生じた原因は明確にはできなかった。

今回の湿潤状態での測定では，コンクリート表面に水滴がほとんどみられない状態であったにもかかわらず反発度の低下が比較的大きかったこと，永島らの実験結果でも吸水直後より吸水後１時間程度経過した後の方が推定強度の低下が大きかったことから，測定される反発度の変化にはコンクリートのごく表層の含水状態だけでなく吸水時間や吸水したコンクリート部分の深さ等の影響があるものと考えられる。これらの影響程度の把握は，今後の課題である。



測定ケース	反発度			含水率（%）		
	A1	A2	B3	A1	A2	B3
気乾	41.3	42.3	40.6	4.4	4.4	4.4
湿潤	37.1	39.3	38.4	5.0	5.1	5.1
再乾燥	37.7	41.9	41.6	4.6	4.7	4.9

図－3.2　測定結果

表－3.1　木村の実験結果[25)]

測定ケース	反発度	湿度（°/wt）
気乾状態	41	1
霧吹き後30分	39	6
さらに霧吹き後30分	38	8

表－3.2　永島らの実験結果[26)]

測定ケース	推定強度（気乾状態を100とした場合）	含水率（%）
気乾状態	100.0	3.6
散水直後	95.8	—
1時間後	93.7	8.0
3時間後	97.5	5.1
6時間後	101.1	4.8
24時間後	99.3	4.6

※推定強度はグラフから読みとった。

4．コンクリートの材齢の影響に関する検討

4.1　検討の目的

既往の研究結果から，コンクリートをリバウンドハンマーで打撃した際に得られる反発度とコンクリートの強度との関係は，コンクリートの材齢によって変化すると考えられている。このため，長期材齢のコンクリートの強度を推定する際には，一般に広く使われている強度推定式によって求めた推定強度に対し，表－4.1に示す材齢係数を乗じる補正が行われる場合がある。図－4.1に計算例を示す。

しかし，このような推定方法には，以下のような点で問題である。

① 国内で用いられていることの多い材料学会式や建築学会式は，幅を持った種々の材齢における測定結果をもとに定められている。しかし，反発度から強度を推定する際に材齢による補正が必要であるという立場に立てば，複数の材齢のデータを補正せず，ひとまとめにして換算式を定める手法は誤っている

② 材齢による影響を補正する係数として表－4.1に示すような材齢係数が使用されているが，これらの値はリバウンドハンマーを使用した実験等から導き出されたものではないので，補正値として適切であるかどうかは明確でない。国外の文献等では，補正方法について表－4.1とは異なる提案もある。

①に関連してさらに説明を補足する。例えば，建築学会式はφ150mm×300mmの円柱供試体を用いた実験結果から定められており，測定時のコンクリートの材齢は7日から1年まで幅がある[28]。建築学会式は，すべての測定データから，反発度と供試体強度の回帰直線として得られている(図－4.2)。

しかし，この測定データをコンクリートの材齢ごとに整理し，反発度と強度の関係を求めると図－4.3のように表され，試験時の材齢ごとに反発度と供試体強度の関係が異なっていることがわかる。例えば，材齢91日以降はほとんど強度の増進が見られないにもかかわらず，材齢が大きいコンクリートほど測定された反発度が大きくなっている。また，特に材齢28日と材齢91日の間で，反発度と強度の関係が大きさが大きく変化している。

これらは材齢による反発度－強度の関係の変化とも考えられるが，同時に，試験時の供試体の含水状態が大きく変化していることの影響も大きいと推測される(供試体は材齢28日までは水中養生されているが，材齢28日以降は，気中で養生されている)。したがって，これらの測定データをひとまとめにして回帰直線を求めた建築学会式を用いてコンクリートの強度を推定することには問題がある。なお，材料学会式も同様に，材齢・養生の条件が異なる供試体での測定結果を元に定められており[18]，同様の問題点を有している。これらの実験結果からは，各材齢ごとの反発度－強度関係の違いが材齢による水和反応の増進等によるものか，供試体の含水状態の影響なのかを明確にすることは容易ではない。

②に関連して,材齢による反発度－強度の関係の変化が,どのような現象に起因するのかが現状では明確でない。材齢の経過に従って反発度－強度の関係が変化する理由としては,

1) 乾燥が進み,測定される反発度が変化する。

2) コンクリート表面から中性化が進み,測定される反発度が変化する。

3) 水和反応などが進み,コンクリートの組織が変化して測定される反発度が変化する。

のような原因が考えられる。しかし,1),2)のような変化は構造物の周辺環境等によって大きく異なってくるので,材齢の経過による変化とは区別して整理される必要があると思われる。

そこで,含水状態などの測定条件を一定とした供試体を作製し,コンクリートの材齢が反発度の測定結果へ与える影響について検討することにした。

表－4.1　材齢係数[27)]

材齢（n日）	10	20	28	100	150	200	300	500	1000	3000
材齢係数（α_n）	1.55	1.12	1.00	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

※長期材齢時のコンクリート強度を推定するときは，材齢28日のときの強度
推定式によって求めた強度にひょじの材齢係数αを乗ずる。

例えば，材齢100日のコンクリートを打撃し基準反発度として40.0が得られたとする。

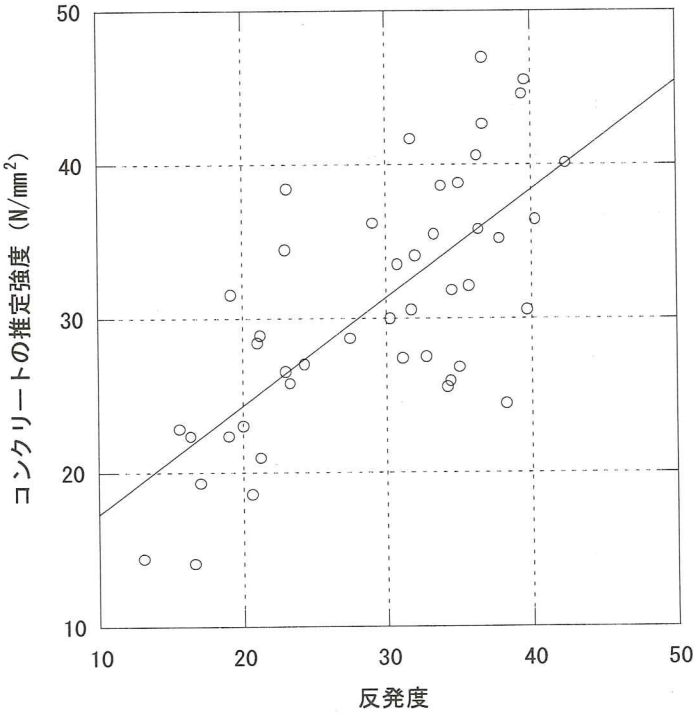
①材料学会式から算出される推定強度は32.9N/mm²

$0.098 \times (13.0 \times 40.0 - 184) = 32.9$

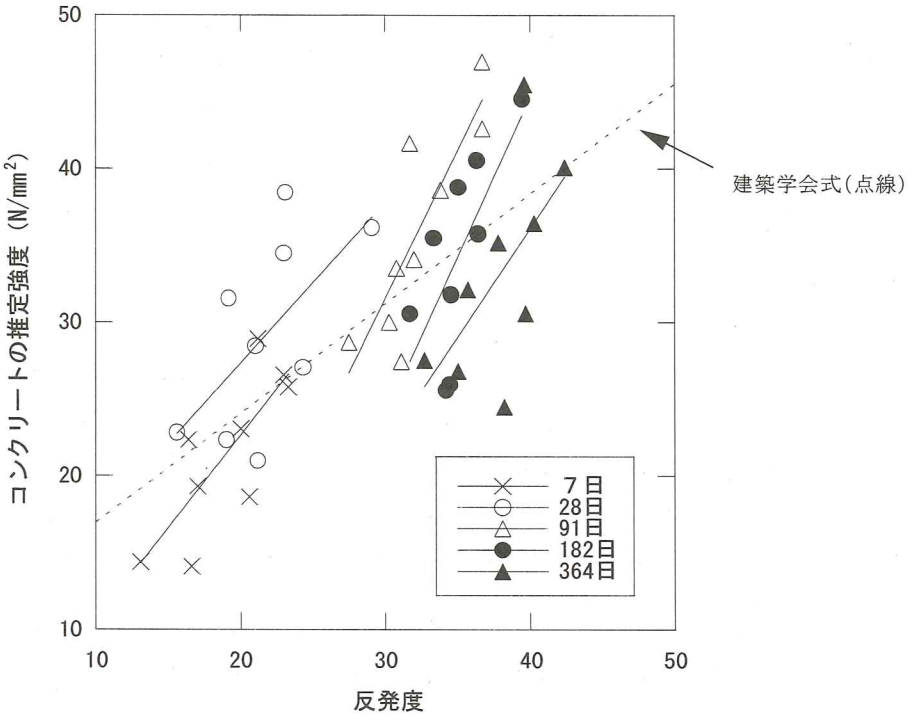
②表－4.1で材齢100日での係数が0.78なので，強度の推定結果は25.7N/mm²

$32.9 \times 0.67 = 25.7$

図－4.1　コンクリート強度推定の計算例(好ましくない例)



図－4.2　日本建築学の共同実験結果



図－4.3　反発度と強度の関係(材齢ごとに整理)

【図－4.3中の回帰式】

全データを含む　　$F_c = 0.72R + 9.80$ ＜建築学会式＞　　……(4.1)

ただし，　F_c：コンクリートの推定強度(N/mm²)

R　：基準反発度

で，式－4.2～4.6でも同様である。

材齢　7日　　$F_c = 1.21R - 1.49$　　……(4.2)

材齢 28日　　$F_c = 1.04R + 6.45$　　……(4.3)

材齢 91日　　$F_c = 1.93R - 26.4$　　……(4.4)

材齢182日　　$F_c = 2.08R - 38.4$　　……(4.5)

材齢364日　　$F_c = 1.41R - 20.3$　　……(4.6)

4.2 実験方法

材齢による反発度と強度の関係の変化をより詳細に把握するため,含水状態を調整したコンクリート供試体を作製し,反発度と圧縮強度の測定結果を比較することにした。供試体の養生条件は表－4.2の通りで,材齢にかかわらずコンクリートの乾燥条件が一定である「表乾」の供試体と,材齢とともにコンクリリートの表面から乾燥が進むと考えられる「気乾」の供試体を用意した。また,材齢28日の場合のみ,水中養生した供試体をそのまま用いる「湿潤」の供試体を用意した。

コンクリートの配合は,表－4.3に示す一種類のみである。

供試体はφ15cm×高さ30cmの円柱供試体とし,圧縮試験器を用いて約2.5MPaの加圧力で固定しておき,反発度を測定した。また,反発度の測定後,引き続き載荷して圧縮強度を測定した。各養生条件ごとに３本ずつの供試体を用意した。

反発度の測定には２機のリバウンドハンマー(２章,表－2.1のHA,HB)を使用した。各ハンマーは,使用中にテストアンビルによる点検を行って,その性能がほとんど変化していないことを確認した。各リバウンドハンマーを用いて供試体の側面を16点ずつ水平方向に打撃し,16点の測定結果の平均を反発度とした。ただし,平均値と±20%以上の誤差がある測定点は除外し,残りの測定点の平均値をとった。

表－4.2　試験ケース

養生条件	説明	試験した材齢（日）
気乾	材齢３日まで20℃の水中で養生した後，20℃の気中で養生した供試体をそのまま使用した。	7，11，21，28，50，100，200，300
表乾	試験材齢の反発度測定日の３日前まで20℃の水中で養生した後，３日間20℃の気中で養生し，表面を乾燥させて使用した。	11，21，28，50，100
湿潤	試験直前まで20℃の水中で養生した後，そのまま使用した。	28

表－4.3　コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G		
55	45	173	314	790	1000	16.7 16.6 11.7	6.7 6.8 6.3

※各試験ケースに使用する供試体は，各バッチから１本ずつ選定し，計３本とした。

4.3 実験結果と考察

測定した各供試体の反発度と圧縮強度の関係を図－4.4～図－4.7に示す。図中の直線は，表乾の供試体および気乾で材齢７日の供試体の試験結果から得られた，反発度と圧縮強度の関係である(気中に置かれた期間がほぼ同じなので，供試体の含水状態がほぼ同様になっていると考えられる)。この回帰式は，式－4.7，式－4.8で表される。

これらの測定結果から以下のことが明らかになった。

① 表乾のケースでは，養生期間が長くなるにつれて圧縮強度が増進しているが，測定される反発度は材齢21日以降，ほとんど変化しなかった。

② 気乾のケースでは，圧縮強度は材齢28日以降ほとんど増進しなかったが，反発度は材齢とともに増加しつづけた。反発度が増加したのは，供試体の乾燥が材齢28日以降も進んでいるためと推測される。

③ 材齢28日での反発度の測定結果を比較すると，湿潤のケースで測定された反発度は平均で，表乾のケースより９，気乾のケースより10低い。これは，従来考えられていた(反発度で5程度)よりも大きい。

④ 適切に整備された状態で使用した結果，リバウンドハンマーHAとHBには，反発度測定結果の差はほとんどなかった(図－4.8)。

⑤ 同一配合でかつ含水状態がほぼ同一である供試体の試験結果から得られた反発度と圧縮強度の関係は，従来から用いられている強度推定式である材料学会式(式－4.9)や建築学会式(式－4.10)とは大きく異なる(図－4.8)。

①，②から，従来材齢による影響とされてきた長期材齢での反発度の増進は，コンクリート表面の乾燥の影響が大きいものと推測される。供試体の含水状態がほぼ一定である“表乾”の試験ケースに着目すると，コンクリートの強度の増進と比して，材齢に伴うリバウンドハンマーで測定される反発度の増加はわずかである。従って，単純にコンクリートの材齢にあわせて，表－4.1に示した材齢係数を使用するのは適切ではないと考えられる。

一方で，コンクリート供試体を大気中に保管しておいた期間の長さが反発度の測定結果に与える影響は，前章の実験結果など，既往の調査結果より大きかった。従って，試験室で供試体をつくってコンクリートの反発度と圧縮強度の関係を求める際には，供試体の含水状態の調整に留意する必要がある。

また，本実験の“気乾”の試験ケースでは，材齢が100日以上とかなり大きくなっても，乾燥期間の多少が反発度の測定結果へ引き続き大きな影響を与えており，表－4.1から予想される傾向とは異なっていた。したがって，乾燥期間の増大によって測定される反発度が変化することを補正するという立場に立っても，表－4.1は適当でないものと思われる(実構造物のコンクリートの乾燥速度は，周辺環境等によっても大きく異なってくると考えられるので，乾燥期間の影響を一つの表で表すことは困難であると思われる)。

本実験から得られたコンクリートの反発度と圧縮強度の関係は，従来から用いられていた強度推定式とは大

きく異なっている。これは，既往の強度推定式を作成する際に用いられたデータの中に，含水状態が異なる場合や整備状態が異なる測定装置を用いた場合の測定結果が含まれているために，図－4.9のように，個々の条件で測定された反発度－強度の関係と比較すると，既往の強度推定式では関係式の傾きが小さく推定されているためと考えられる。

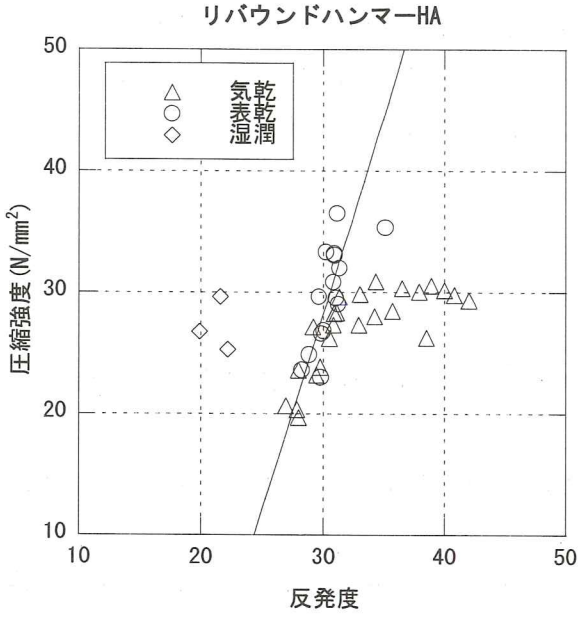
4.4　材齢に関する検討結果

本章の検討から，以下のことがわかった。

① 今回の実験の範囲では，コンクリートの材齢の増加そのものによる反発度測定結果への影響はほとんどなかった。

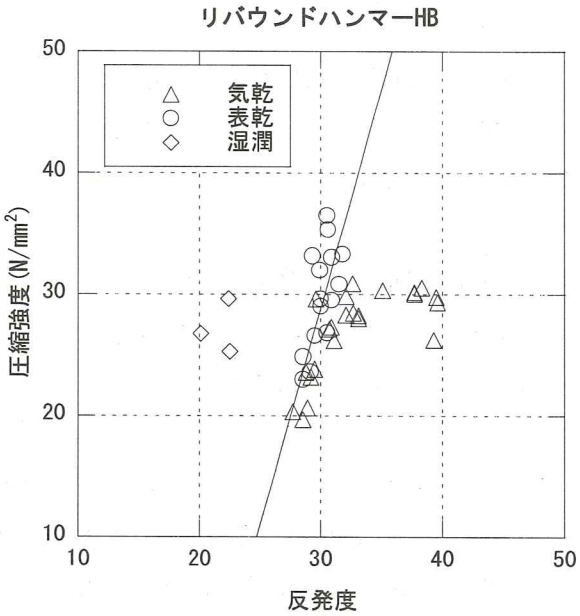
② 長期材齢のコンクリートで反発度が比較的大きく測定される場合があるのは，コンクリート表面の乾燥が進むことの影響が大きいと考えられる。

③ 既往の強度推定式は，種々の含水状態にある供試体の測定データを元に作成されている点で，適切でない。



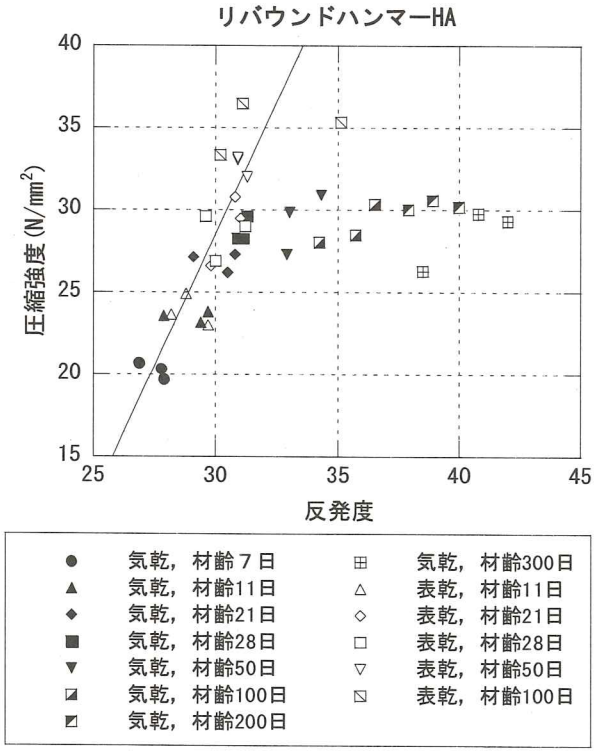
※図中の直線は，式－4.7

図－4.4　反発度と圧縮強度の関係
（リバウンドハンマーHA）



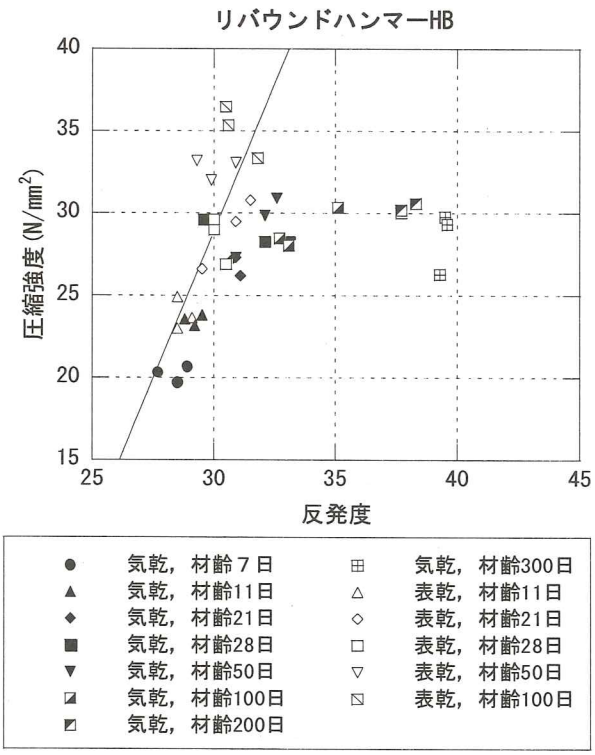
※図中の直線は，式－4.8

図－4.5　反発度と圧縮強度の関係
（リバウンドハンマーHB）



※図中の直線は，式－4.7

図－4.6　反発度と圧縮強度の関係
（リバウンドハンマーHA）



※図中の直線は，式－4.8

図－4.7　反発度と圧縮強度の関係
（リバウンドハンマーHB）

＜リバウンドハンマーHAを使用した場合＞

$F_c = 3.23R - 68.3$ ……(4.7)

ただし，　F_c：コンクリートの推定強度(N/mm²)

　　R　：基準反発度

※反発度約35の測定結果1点を除外して求めた。

＜リバウンドハンマーHBを使用した場合＞

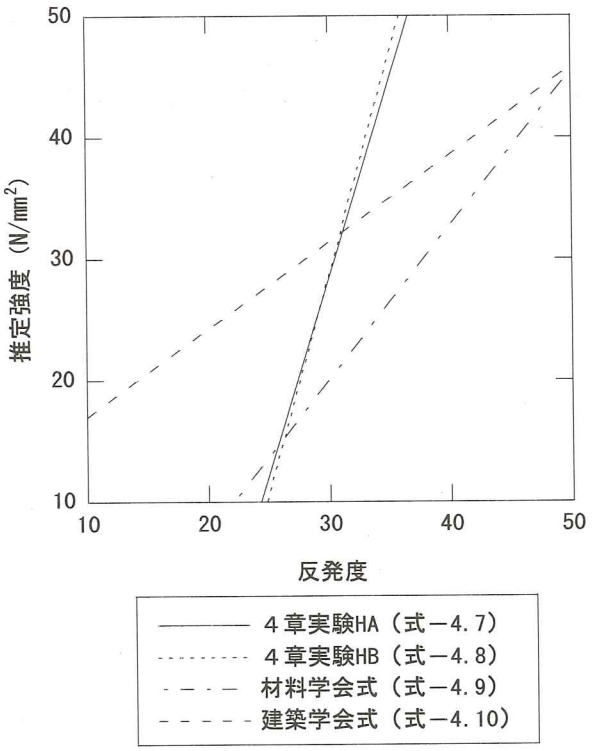
$F_c = 3.59R - 78.8$ ……(4.8)

＜材料学会式，SI単位系に変換したもの＞

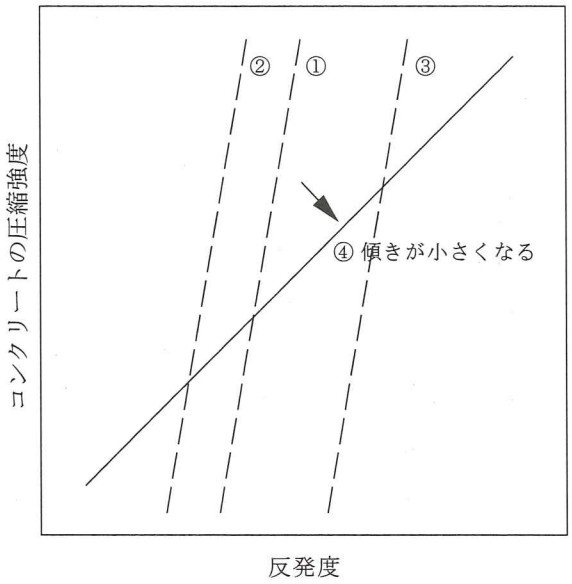
$F_c = 1.27R - 18.0$ ……(4.9)

＜建築学会式，SI単位系に変換したもの＞

$F_c = 0.72R + 9.8$ ……(4.10)



図－4.8　回帰式の比較



① 含水状態が一定の場合の反発度－強度関係
② ①とは性能の異なるリバウンドハンマー(測定装置)を使用した場合
③ コンクリートの含水状態が①と異なる場合
④ ①～③のデータを全て併せて回帰直線を引いた場合

図－4.9　反発度とコンクリートの圧縮強度の関係(イメージ)

5．反発度とコンクリート強度の関係に関する検討

5.1　検討の目的

前章の検討から，コンクリートの含水状態が測定される反発度に大きな影響を与える可能性があること，既往の強度推定式には含水状態が一定でないと考えられる供試体を用いた実験データから作成されているといるという問題点があること，が明らかになった。また，同一配合で，かつ，含水状態が一定の供試体を用いた実験の結果得られたコンクリートの反発度と強度の関係は，既往の強度推定式で示されているものとは大きく異なっていた。

そこで，セメントの種類や配合が異なる供試体を多数作成して，コンクリートの反発度と強度の関係について再度検討することにした。

5.2　実験方法

反発度と圧縮強度の関係を含水状態の影響を排除して検討するため，養生条件を同一とした種々の配合の供試体を作製し，反発度と圧縮強度の測定結果を比較した。供試体の試験材齢は，材齢28日（早強の場合24日）と材齢49日の２ケースとしたが，いずれの場合でも試験の21日前まで20℃の水中に養生した後，21日間20℃の気中で自然乾燥させて試験に用いた。

コンクリートの配合は，表－5.1に示した15ケースとした。配合計画では，コンクリートの単位水量，単位粗骨材量が一定になるようにした。また，空気量を調整するためにAE助剤の使用量を配合によって若干変更したが，AE減水剤の使用量は一定とした。その結果，コンクリートのスランプは配合によって大きく異なっていた。また，予備試験等から定めたAE助剤の使用量を用いた結果，空気量が全体的に6～7%と高めになった（混和剤のロットが予備試験時と異なっていることなどの影響と考えられる）。

既往の強度推定式の作成の際に行われた実験では，材料学会式の場合は立方体供試体[18]が，建築学会式の場合は円柱供試体[28]が打撃されており，違いが見られる。円柱供試体は，型枠の準備や取扱いのしやすさで立方体供試体よりも優れているが，曲率が大きく，反発度の測定結果の影響を与える可能性がある。一方，立方体供試体では，圧縮強度試験用の供試体を別に用意する必要がある。そこで，本章の実験では，各配合，材齢ごとに，φ150mm×300mmの円柱供試体を３本，200cm角の立方体供試体を２個用意した。

各供試体は圧縮試験器を用いて約2.5MPaの加圧力で固定しておき，反発度を測定した。円柱供試体は，反発度の測定後に荷重を増加させて圧縮強度を測定した。立方体供試体は破壊形態が円柱供試体と大きく異なると考えられるので，圧縮強度試験は行わなかった。

反発度の測定には２機のリバウンドハンマー（２章，表－2.1のHA，HC）を使用した。各ハンマーは，使用中にテストアンビルによる点検を行って，その性能がほとんど変化していないことを確認した。各リバウンドハンマーを用いて供試体の側面を16点ずつ水平方向に打撃し，16点の測定結果の平均を反発度とした。ただし，平均値と±20%以上の誤差がある測定点は除外し，残りの測定点の平均値をとっ

た。

表－5.1　コンクリートの配合

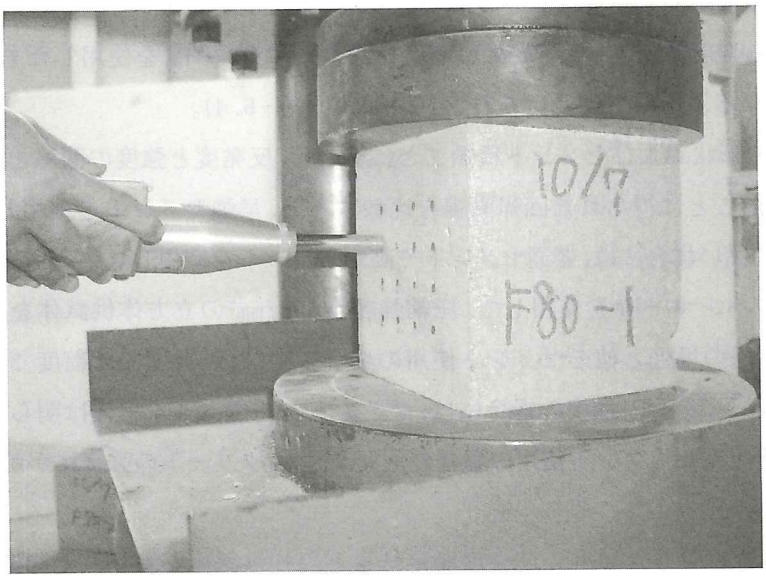
セメント種類	材齢（日）	水セメント比	単位水量 (kg/m³)	単位粗骨材量 (kg/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
普通	28，49	40	160	1000	8.4	6.9
		50			14.0	7.8
		60			8.3	6.8
		70			3.3	6.7
		80			1.6	6.6
高炉*	28，49	40			6.2	4.5
		50			14.0	6.5
		60			14.7	6.4
		70			4.8	6.3
		80			2.6	5.8
早強	24**，49	40			3.9	3.7
		50			7.6	6.2
		60			13.7	6.8
		70			5.3	6.8
		80			3.0	6.8

*　ここでいう高炉とは，普通ポルトランドセメントに高炉スラグ4000(JIS A 6206)を40%混入したものである。

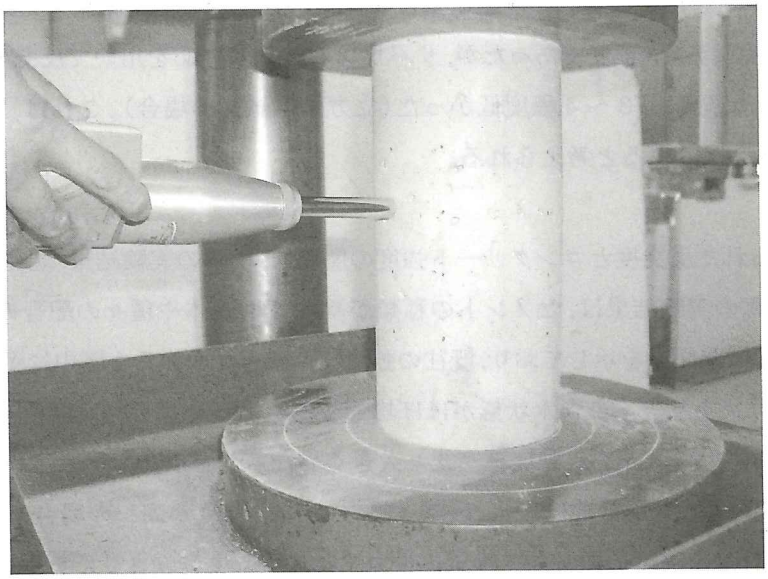
** 早強セメントは強度発現が早いので，3日間水中養生(普通，高炉は7日間水中養生)の後，21日間気中に放置することにした。

※粗骨材には，笠間産砕石(表乾密度2.67kg/m³)を使用した。

※細骨材には，大井川産川砂(表乾密度2.61kg/m³)を使用した。



写真－5.1　反発度測定状況(立方体供試体)



写真－5.2　反発度測定状況(円柱供試体)

5.3 実験結果と考察

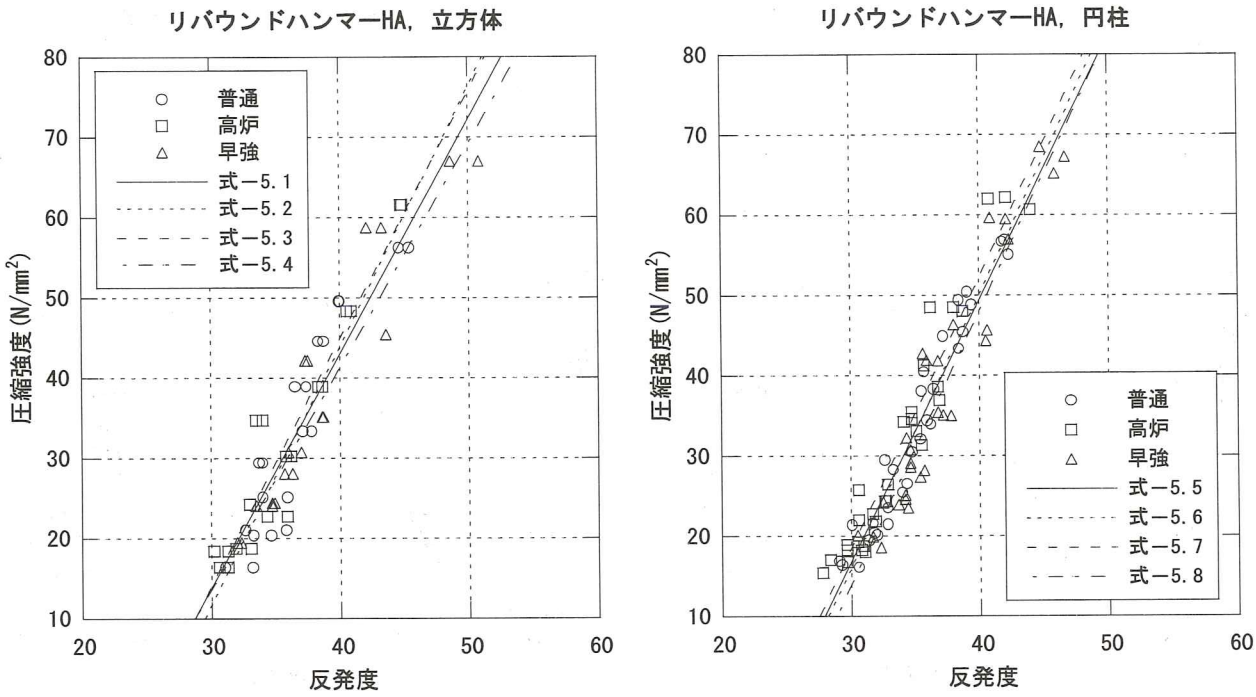
実験の結果得られた反発度と供試体圧縮強度の関係を，図－5.1，図－5.2に示す。立方体供試体の反発度は,配合･養生条件が同じ円柱供試体３本の強度の平均と比較した。前章での検討から材齢の影響は少ないと判断し，特に区別せず整理した。ただし，リバウンドハンマーHAを使用したものは，試験時の材齢によって若干傾向が異なるようにも見受けられる(図－5.3,図－5.4)。

測定結果は供試体の形状およびセメント種類ごとに整理し,反発度と強度の関係を求めた(式－5.1～式－5.16)。セメントの種類ごとに得られた回帰直線を比較すると,早強セメントを使用した場合で,コンクリートの圧縮強度が比較的高い場合には,普通セメントや高炉セメントを使用した場合よりもやや高めの反発度が得られた。リバウンドハンマーHAを使用して,圧縮強度が60N/mm²の立方体供試体を打撃した場合を仮定すると,早強セメント使用の場合と他のセメント使用の場合の差は,反発度で２程度であった。しかし,コンクリートの圧縮強度が20～30N/mm²程度の場合には,セメントの種類による差異は明らかでなかった。また,普通セメント使用の場合と高炉セメント使用の場合の差異は,コンクリートの強度にかかわらず明確ではなかった。

一方,立方体供試体を打撃した場合の反発度測定結果と円柱供試体を打撃した場合を比較すると,同一配合･養生条件の場合には，立方体供試体を用いた場合のほうが，円柱供試体を用いた場合より反発度が大きかった(図－5.5)。これは,測定面の曲率による影響と考えられる。供試体の形状による反発度の差異はコンクリートの強度が大きいほど大きく,リバウンドハンマーHAを使用して圧縮強度が60N/mm²の供試体を打撃したと仮定すると反発度の差は４程度あるが,圧縮強度が20N/mm²の供試体を打撃したと仮定すると１程度である。

リバウンドハンマーHAを用いた場合の測定結果とHCを用いた場合の測定結果を比較して,図－5.6に示す。両者の回帰直線の傾きはほぼ同程度であったが,リバウンドハンマーHCを用いて反発度を測定した場合には,HAを用いた場合より,反発度が３～４程度低かった(立方体供試体の場合)。これは,リバウンドハンマーの製造･整備者が異なることによると考えられる。

本章の実験から得られた反発度とコンクリート強度の関係を,前章の実験結果,既往の強度推定式と比較して図－5.7に示す。本章の実験結果は,セメントの種類が異なる供試体や種々の配合の供試体を含むが,前章での実験結果とほぼ同様な傾向を示しており,既往の強度推定式と比較すると図中に示される直線の傾きが大きい。この結果から,コンクリートの含水状態がほぼ均一である試料を用いて実験すると,その反発度－圧縮強度の関係は従来から用いられている強度推定式と大きく異なることがあらためて確認された。なお,本章の実験結果(式－5.5)と前章の実験結果(式－4.7)で,コンクリート強度が同一の場合を比較すると反発度の測定結果が異なるが,これは反発度の測定前に供試体を気中に放置して乾燥させた期間の長さが異なる(本章では21日間，前章では３日間)ためと考えられる。



図－5.1　反発度と圧縮強度の関係(リバウンドハンマーHA)

＜リバウンドハンマーHA, 立方体供試体, 全セメント種類のデータを用いた場合＞

$F_c = 2.92R - 73.61$ ……(5.1)

ただし，　F_c：コンクリートの推定強度(N/mm²)

R　：基準反発度

$F_c = 3.22R - 84.55$　＜HA，立方体，普通セメント＞……(5.2)

$F_c = 3.09R - 78.42$　＜HA，立方体，高炉セメント＞……(5.3)

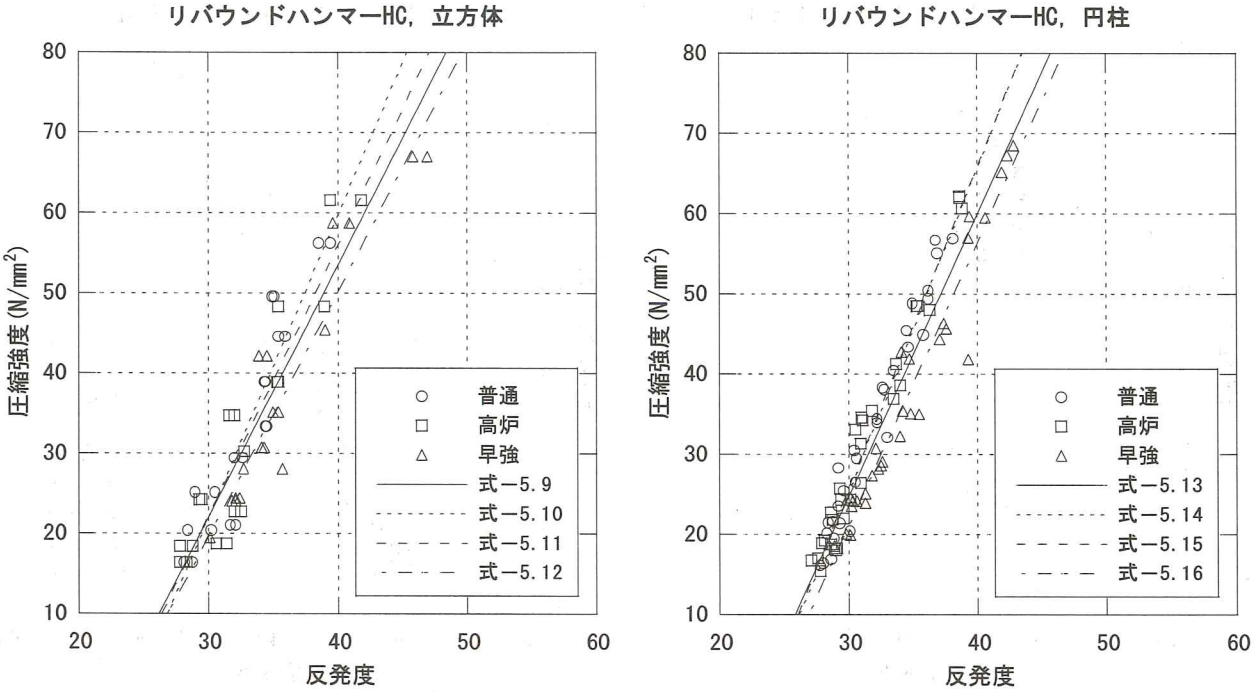
$F_c = 2.78R - 69.80$　＜HA，立方体，早強セメント＞……(5.4)

$F_c = 3.26R - 80.90$　＜HA，円柱，全セメント種類＞……(5.5)

$F_c = 3.39R - 85.48$　＜HA，円柱，普通セメント＞……(5.6)

$F_c = 3.38R - 82.98$　＜HA，円柱，高炉セメント＞……(5.7)

$F_c = 3.39R - 87.75$　＜HA，円柱，早強セメント＞……(5.8)



図－5.2　反発度と圧縮強度の関係(リバウンドハンマーHC)

＜リバウンドハンマーHC,立方体供試体,全セメント種類のデータを用いた場合＞

$F_c = 3.15R - 72.25$ ……(5.9)

ただし，　F_c:コンクリートの推定強度(N/mm²)

R　:基準反発度

$F_c = 3.78R - 91.18$　＜HC，立方体，普通セメント＞……(5.10)

$F_c = 3.38R - 78.90$　＜HC，立方体，高炉セメント＞……(5.11)

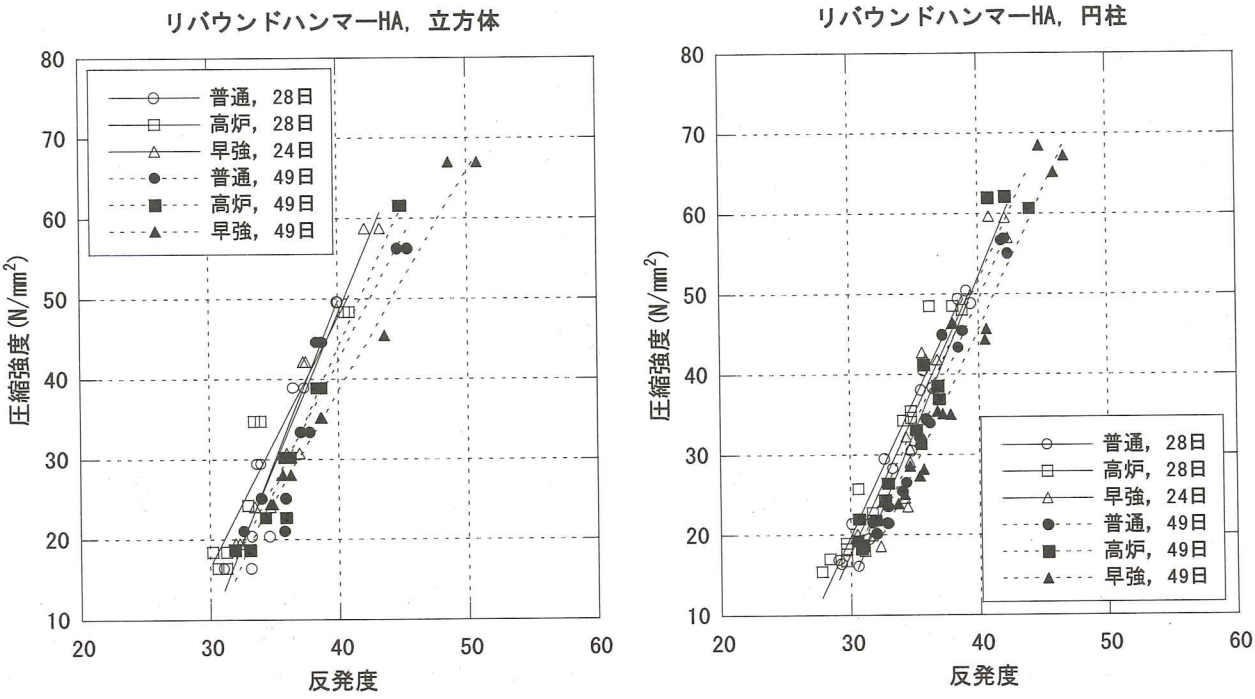
$F_c = 3.07R - 72.15$　＜HA，立方体，早強セメント＞……(5.12)

$F_c = 3.52R - 80.62$　＜HA，円柱，全セメント種類＞……(5.13)

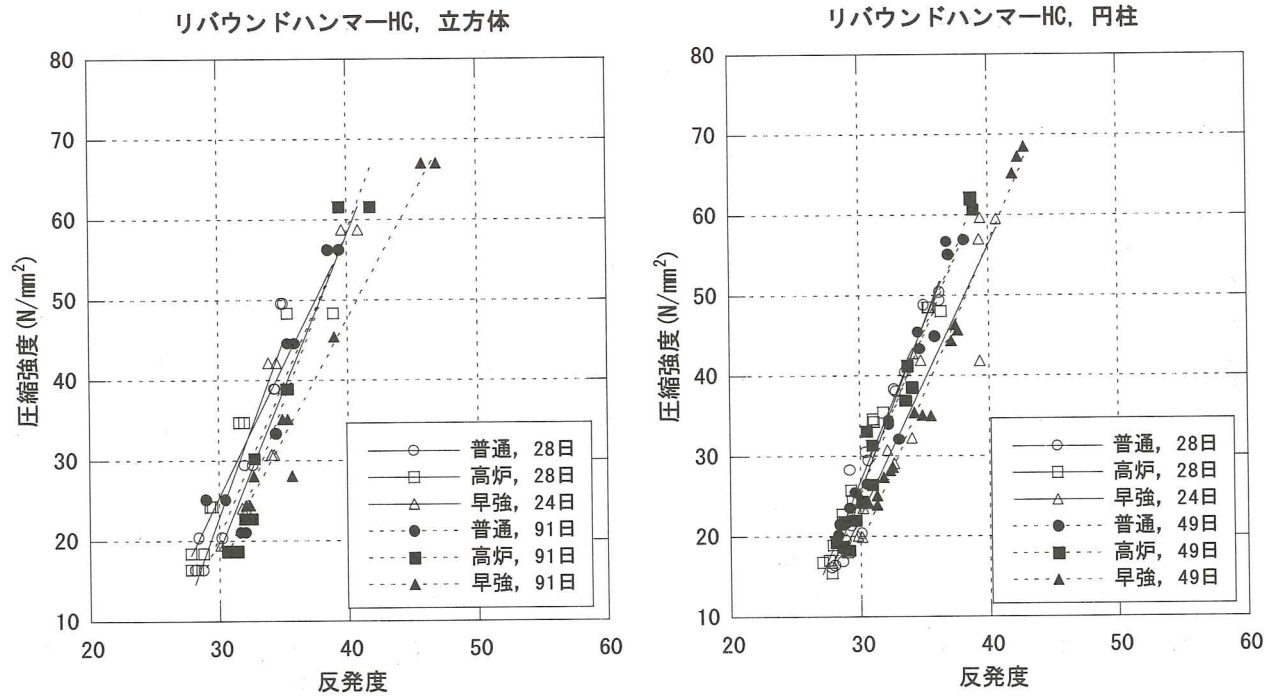
$F_c = 4.03R - 95.02$　＜HA，円柱，普通セメント＞……(5.14)

$F_c = 4.01R - 94.19$　＜HA，円柱，高炉セメント＞……(5.15)

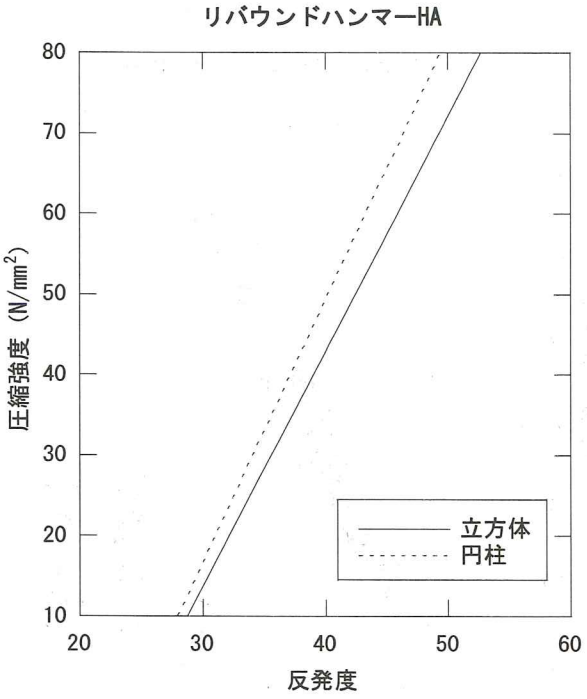
$F_c = 3.53R - 84.70$　＜HA，円柱，早強セメント＞……(5.16)



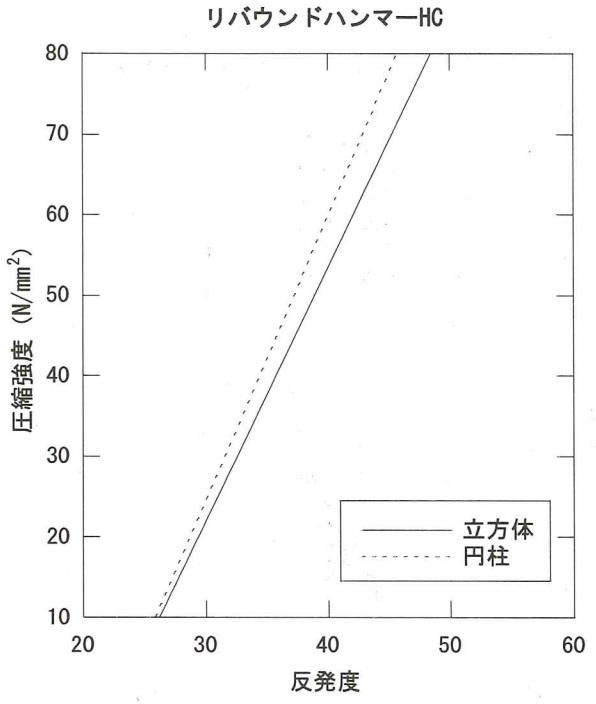
図－5.3　材齢による比較(リバウンドハンマーHA)



図－5.4　材齢による比較(リバウンドハンマーHC)

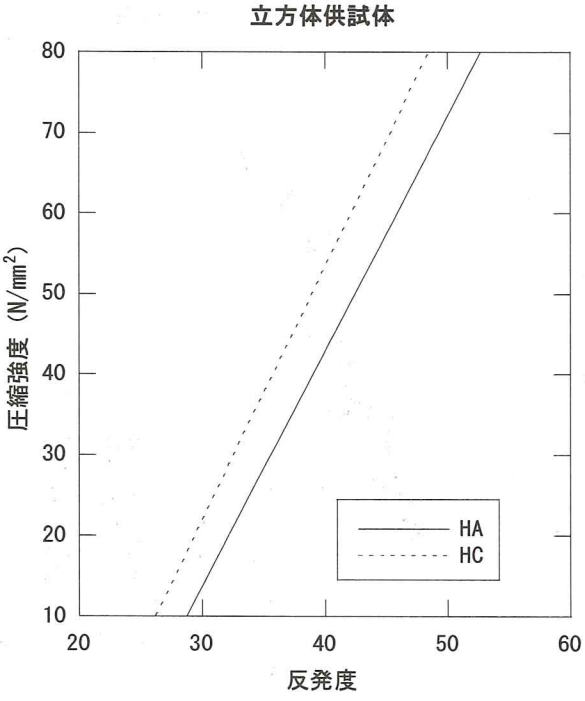


※セメント種類に関わらずとりまとめた式－５．１と式５．５を比較した。

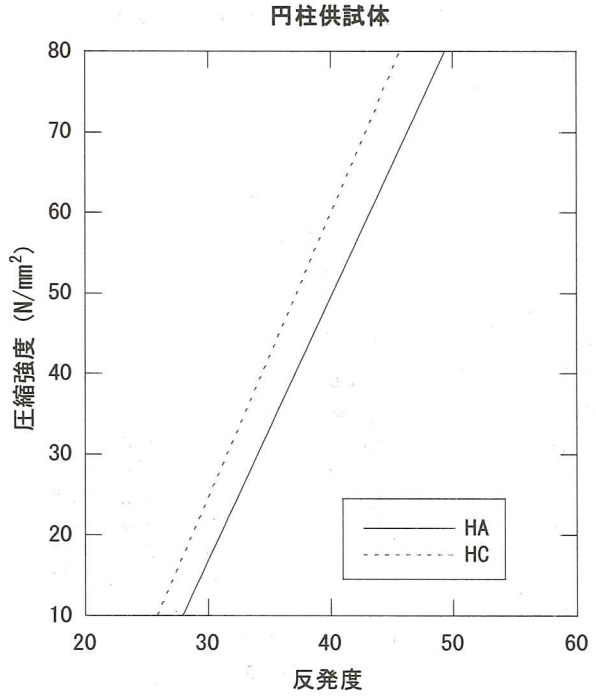


※セメント種類に関わらずとりまとめた式－５．９と式５．１３を比較した。

図－５．５　供試体の形状による比較

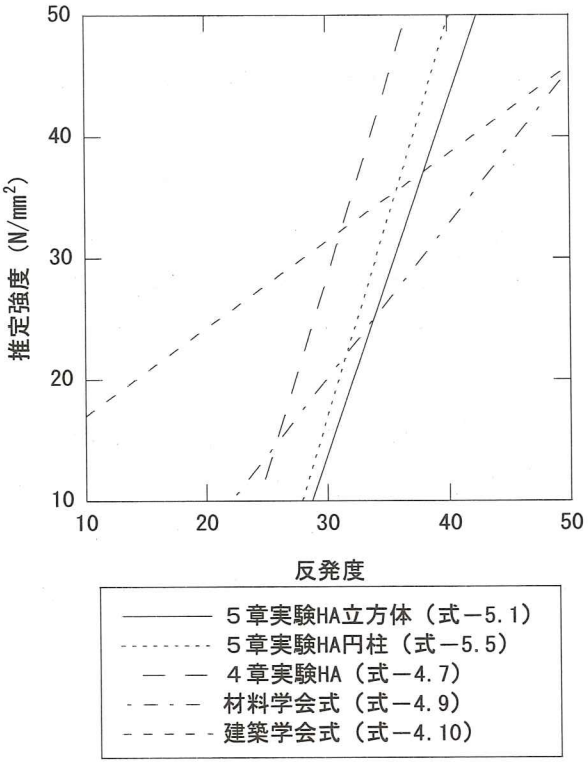


※セメント種類に関わらずとりまとめた式－５．１と式５．８を比較した。



※セメント種類に関わらずとりまとめた式－５．５と式５．１３を比較した。

図－５．６　リバウンドハンマーの比較


50
40
30
20
10
推定強度 (N/mm²)
10
20
30
40
50
反発度
５章実験HA立方体（式－5.1）
５章実験HA円柱（式－5.5）
４章実験HA（式－4.7）
材料学会式（式－4.9）
建築学会式（式－4.10）

図－５．７　回帰式の比較

5.4　配合の異なるコンクリートについての検討結果

本章の検討から，以下のことがわかった。

① 含水状態が一定の供試体の反発度－圧縮強度の関係は，既存の強度推定式(材料学会式，建築学会式)とは大きく異なっている。

② コンクリートの圧縮強度が比較的高い(60N/mm²)ケースでは，早強セメントを使用した場合に普通セメント・高炉セメントを用いた場合より，若干反発度が高くなる傾向が見られた。しかし，コンクリートの圧縮強度が20～30N/mm²程度の場合には，セメント種類による差異は見られなかった。普通セメントを使用した場合と高炉セメントを使用した場合の間には，いずれのケースでも反発度－圧縮強度の関係に差異は認められなかった。

③ 円柱供試体(φ150mm)を打撃した場合には，立方体供試体を打撃した場合と比較すると，やや低めの反発度が得られた。これは，測定面が曲面であるためと考えられる。ただし，コンクリートの圧縮強度が20～30N/mm²程度の場合には，その差は反発度で１程度とわずかであった。

④ 本章で使用したリバウンドハンマーHAとリバウンドハンマーHCでは，測定される反発度に３～４程度の差があった(立方体供試体の場合)。

6．まとめ

リバウンドハンマーで測定される反発度からコンクリートの圧縮強度を簡易に推定する方法について，その精度を改善するために種々の検討を行った。検討結果のうち，主要なものを以下に示す。

＜測定装置の個体差と点検方法について＞

- 現在市販されているリバウンドハンマーでコンクリート(反発度30～50程度)の反発度を測定すると，製造者の違いにより，反発度が３程度異なる場合がある(図－2.4，図－5.6)。
- 現在使用されているリバウンドハンマー(レンタル品など)の中には，整備状態が適切でないために，測定される反発度が製造時と大きく異なるものがある。このためコンクリートの反発度を測定した結果が，８程度異なる場合もある(図－2.7，図－2.12)。
- リバウンドハンマーの個体差をより適切に評価するためには，低反発度型テストアンビルを使用した点検が効果的であると考えられる(図－2.13，表－2.13)。ただし，現状では，低反発度型テストアンビルは市販されていない。また，本報告書中で検討した低反発度型テストアンビルには，温度の影響を受けてその性能が変化しやすいといった問題点もあった(図－2.15)。
- リバウンドハンマーとテストアンビルの組み合わせによっては，反発度が適切に測定できない場合があることがわかった(図－2.2のa49など)。

＜材齢が反発度の測定結果に与える影響について＞

- 水中養生していた供試体の場合，気中での乾燥期間の長さが反発度の測定結果に大きな影響を与えることが明らかになった(図－4.5～図－4.7)。
- コンクリートの含水状態の条件が一定であれば，材齢が異なっても，反発度とコンクリートの圧縮強度の関係は大きくは変わらないことがわかった(図－5.3，図－5.4)。

＜反発度と圧縮強度の関係について＞

- コンクリートの圧縮強度を推定する際に，材齢に応じて材齢係数(表－4.1)を一律に掛ける方法には問題があることを明らかにした。
- 既往の強度推定式には，含水状態が大きく異なる供試体の試験結果が混在したデータを元に検討されているという問題点があることを明らかにした。
- 配合の異なるコンクリートでも，含水状態の条件が一定であれば，反発度とコンクリートの圧縮強度の関係は大きくは変わらないことがわかった(図－5.1，図－5.2)。
- φ150mmの円柱供試体を打撃した結果得られる反発度は，平面(立方体供試体)を打撃した場合より，１～４程度小さくなることがわかった(図－5.5)。

【参考文献】

1) 日本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指針(案), 材料試験, 第7巻, 第59号, pp.40～44, 1958.8

2) 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

3) 土木学会規準：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(JSCE-G 504-1999)

4) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究, 土木学会論文集, 第390号／Ⅴ-8, pp.1～22, 1988.2

5) 日本コンクリート工学協会コンクリートの非破壊試験法研究委員会:コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, 1992.3

6) 坂静雄・明石外世樹：シュミットハンマーの各個誤差および較正法について, セメント技術年報, 15, pp.260-268, 1961

7) 建設省土木研究所コンクリート研究室:コンクリートの検査方法に関する試験調査報告書(Ⅱ),土木研究所資料, No.818, 1973

8) 木村恵雄：シュミットハンマーによるコンクリート強度の判定について, 材料試験, 第5巻, 第38号, pp.19～26, 1956.11

9) 谷川恭雄・山田和夫:複合非破壊試験法によるコンクリート強度の推定,セメント・コンクリート,No.393,pp.10～17, 1979.11

10) 明石外世樹:シュミットハンマーによるコンクリートの反撥硬度試験について,立命館大学理工学研究所紀要,第2号, pp.93～103, 1957

11) 林正道・前川静男・沖野俊広：シュミットハンマーによるコンクリート既製品の試験方法, セメント技術年報, 20, pp.474～478, 1966

12) 近田孝夫・岡田研介：コンクリートの表面反発硬度に影響を及ぼす諸要因について, セメント技術年報, 34, pp.199～202, 1980

13) 尼崎省二・明石外世樹:シュミットハンマーと超音波法によるコンクリートの非破壊試験,セメント・コンクリート, No.385, pp.16～22, 1979.3

14) 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

15) 木村敬三：ＲＣ建築物のコンクリート強度と耐久性, 鹿島出版会, 1981

16) 日本建築学会材料施工委員会RILEM小委員会・日本コンクリート工学協会ISO/TC71対応国内委員会：AIJ＆JCIジョイントセミナー性能規定化と材料性能評価の国際動向, p.132, 1999

17) ASTM C 805-97 : Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete

18) 坂静雄・松井敏夫:表面硬度法による実施コンクリートの強度判定法,セメント技術年報,9,pp.395～401,1955

19) ISO/CD 1920-7 : Testing concrete - Part7: Non-destructive tests of hardened concrete, 1999

20) 古賀裕久・河野広隆・渡辺豊：反発度法による新設構造物検査に関する検討, 第24回日本道路会議一般論文集, A, pp.342～343, 2001.10

21) 豊福俊泰・亀倉邦男：コンクリートテストハンマー強度の試験方法に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会, Ⅴ-587, pp.1172-1173, 1996

22) 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，p.13，1983.2

23) 永島明夫，中村博之，松浦将雄：「テストハンマーを用いた反発硬度試験結果に及ぼす測定方法の影響」，土木学会第56回年次学術講演会，第Ⅴ部門-430，pp.860-861，2001.10

24) 野田一弘，河野広隆，古賀裕久：反発度法による新設コンクリート構造物の強度推定結果，第24回日本道路会議一般論文集，A，pp.344-345，2001.10

25) 木村敬三：「RC建築物のコンクリート強度と耐久性」，鹿島出版会，pp.76-77，1981.12

26) 永島明夫，山際浩二，小野敏明：「シュミット・ハンマー法による圧縮強度の推定法に関する研究(その２) 表面の湿潤状態，表面粗度，個人差の影響」，土木学会第43回年次学術講演会，第Ⅴ部門-236，pp.520-521，1988.10

27) 日本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指針(案)，材料試験，第７巻，第59号，p.43，1958.8

28) 日本建築学会:コンクリートの非破壊試験法に関する共同実験結果,「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」，pp.60-75，1983.2

＜資料編＞

・測定データ集　　pp. 73 ～ 84

・実構造物における反発度測定結果について　　pp. 85 ～ 86

・反発度と圧縮強度の関係について(予備実験結果)　　pp. 87 ～ 88

・テストハンマーによる強度推定調査ＦＡＱ集　　pp. 89 ～ 98

表資－１　本文図－2.1のデータ　その１

リバウンドハンマーHA

0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000
80	80	80	81	81	78	80	79	79	78	80	79	78	79	79	79	78	78	78	77	79
80	80	80	81	81	78	80	80	79	78	80	79	78	80	79	79	78	78	78	78	79
80	79	80	80	81	78	79	80	80	78	79	78	78	79	79	80	78	78	78	79	79
80	80	80	81	82	78	79	80	79	79	79	79	78	79	79	79	78	78	78	78	79
80	79	80	81	81	78	79	80	79	78	80	79	79	79	79	79	78	78	78	78	79
80	80	80	81	81	78	79	80	79	78	80	79	78	79	79	79	78	78	78	78	79
80	79	80	80	82	78	80	79	79	80	79	78	78	80	79	79	78	78	78	78	78
80	79	79	81	81	78	80	80	79	78	79	78	78	80	79	79	79	78	79	78	79
80	80	80	80	81	79	80	80	80	79	79	79	78	80	79	79	78	78	78	78	78
80	79	80	80	82	79	80	80	79	80	79	79	78	79	79	79	78	78	79	78	78
80.0	**79.5**	**79.9**	**80.6**	**81.3**	**78.2**	**79.6**	**79.8**	**79.2**	**78.6**	**79.4**	**78.7**	**78.1**	**79.4**	**79.0**	**79.1**	**78.1**	**78.0**	**78.2**	**78.0**	**78.7**

リバウンドハンマーHB

0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000
81	81	81	80	80	80	80	80	80	79	79	79	79	78	78	79	78	79	79	78	79
81	81	80	81	80	80	80	80	80	80	80	79	79	79	78	79	79	79	79	79	78
81	81	81	81	80	80	80	80	79	80	80	79	79	79	78	79	78	63	79	78	79
81	81	81	81	80	80	80	80	79	80	80	79	79	79	79	79	79	79	79	79	78
81	81	80	81	80	80	80	80	79	80	80	79	79	79	79	79	79	63	79	79	79
81	81	80	81	80	80	80	80	80	80	80	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
81	81	80	81	80	80	80	80	80	80	80	79	79	79	79	79	79	79	79	79	78
81	81	80	81	80	80	80	80	80	79	80	79	79	79	79	79	79	79	79	79	78
81	81	80	81	80	80	80	80	80	80	80	79	80	79	78	79	79	79	79	79	79
81	81	81	80	80	80	80	80	80	80	80	79	80	79	79	79	79	79	79	79	79
81.0	**81.0**	**80.4**	**80.8**	**80.0**	**80.0**	**80.0**	**80.0**	**79.7**	**79.8**	**79.9**	**79.0**	**79.2**	**78.9**	**78.6**	**79.0**	**78.8**	**75.8**	**79.0**	**78.8**	**78.6**

表資－２　本文図－２.１のデータ　その２

リバウンドハンマーHC

0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000
82	82	82	82	82	81	82	80	81	79	80	79	80	79	79	80	79	78	77	77	76
82	82	82	83	82	82	81	80	80	79	80	79	80	80	79	79	79	78	78	63	76
82	82	81	82	82	81	80	80	80	79	80	80	80	80	79	79	79	78	78	64	64
82	82	81	81	81	81	81	81	80	79	80	80	80	79	79	79	80	78	78	63	77
82	82	82	81	81	81	81	80	80	79	80	80	79	80	80	79	79	78	77	64	77
82	82	82	81	82	81	80	79	79	80	80	80	80	80	79	79	80	79	77	62	77
82	82	80	82	81	81	82	78	80	78	80	80	80	80	79	79	79	78	77	55	78
82	82	80	82	82	81	82	80	80	79	80	80	80	79	79	79	79	78	77	62	64
82	82	80	81	82	82	82	79	80	79	80	80	80	79	79	79	80	78	77	76	77
82	82	81	82	81	81	81	79	80	80	80	80	80	79	80	79	80	77	77	76	63
82.0	**82.0**	**81.1**	**81.7**	**81.6**	**81.2**	**81.2**	**79.6**	**80.0**	**79.1**	**80.0**	**79.8**	**79.9**	**79.5**	**79.2**	**79.1**	**79.4**	**78.0**	**77.3**	**66.2**	**72.9**

リバウンドハンマーHD

0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
77	77	74	74	73	74	72	70	70	70	68
75	78	76	74	74	75	70	72	69	69	68
75	78	75	75	74	73	69	72	68	67	68
77	78	75	72	75	75	70	72	72	70	68
75	76	74	74	76	75	70	72	71	68	66
76	77	73	76	74	72	70	72	70	66	69
76	77	75	74	75	72	70	70	72	70	69
76	76	75	74	72	72	72	70	70	70	68
76	76	76	74	74	74	72	72	70	70	70
78	77	75	76	72	74	72	71	72	69	70
76.1	**77.0**	**74.8**	**74.3**	**73.9**	**73.6**	**70.7**	**71.3**	**70.4**	**68.9**	**68.4**

表資－3　本文図－2.2のデータ

リバウンドハンマーHA

	直置き					ゴム敷き				
	a80	a74	a72	a60	a49	a80	a74	a72	a60	a49
conA	80.6	79.0	77.0	64.8	49.8	80.0	79.0	76.4	64.0	49.2
conB	80.4	79.0	76.8	64.4	50.2	80.0	79.0	76.0	64.2	50.0
desk	80.2	78.2	76.0	62.6	49.6	79.8	78.2	76.2	63.0	50.0
asphalt	79.6	79.0	76.4	64.8	49.6	79.2	79.0	76.2	64.0	49.6
ground	79.6	78.0	76.0	63.6	50.4	79.4	78.0	76.0	63.6	50.0
conA	79.8	78.2	76.2	64.0	50.0	78.8	78.0	76.0	64.0	50.0

リバウンドハンマーHB

	直置き					ゴム敷き				
	a80	a74	a72	a60	a49	a80	a74	a72	a60	a49
conA	79.8	76.8	74.6	62.8	46.0	79.0	76.0	74.0	62.6	45.4
conB	79.8	77.0	74.2	62.8	45.6	79.4	76.0	73.6	62.6	45.2
desk	79.2	75.6	73.0	60.6	45.2	78.6	75.4	74.0	62.0	46.0
asphalt	79.0	76.2	73.8	62.2	45.4	79.4	76.0	73.8	62.0	45.8
ground	79.2	76.0	73.2	61.8	46.0	77.8	75.6	72.8	61.0	46.0
conA	79.2	75.8	73.8	62.0	46.2	79.0	76.0	73.8	62.0	45.4

リバウンドハンマーHC

	直置き					ゴム敷き				
	a80	a74	a72	a60	a49	a80	a74	a72	a60	a49
conA	81.8	78.4	72.2	63.8	49.8	81.6	78.0	73.2	64.4	50.0
conB	82.0	78.0	71.8	64.0	49.2	81.8	77.2	71.8	63.0	49.0
desk	80.2	76.0	71.6	62.0	49.6	80.2	76.6	72.6	61.2	48.8
asphalt	80.4	76.6	72.2	63.4	49.2	81.4	76.2	72.4	62.4	49.2
ground	81.2	76.4	72.6	62.0	49.6	80.8	75.8	72.4	62.4	49.6
conA	80.8	76.2	74.2	62.8	49.8	80.6	76.8	72.6	62.6	48.8

表資－４　本文図－3.2の詳細データ

【含水率】

12月5日	No.1	4.5	4.4	4.2		5.1	5.0	4.9		4.8	4.5	4.7	
11:00～	No.2	4.6	4.5	4.5		5.1	5.1	4.8		4.8	4.8	4.7	
8.9℃	No.3	4.4	4.2	4.5		5.1	5.3	5.1		4.5	4.8	5.0	
	No.4	4.2	4.4	4.4		4.6	5.0	5.4		4.2	4.8	5.1	
13:00～翌10:00　吸水	平均	**4.4**	**4.4**	**4.4**		**5.0**	**5.1**	**5.1**		**4.6**	**4.7**	**4.9**	
10:00～自然乾燥													

【反発度】

	測定前				測定後				測定後				測定後
12月6日													
13:00～	点検	A1	A2	B3	点検	A1	A2	B3	点検	A1	A2	B3	点検
9.4℃	80	34	40	34	79	35	40	37	80	35	38	44	81
	80	40	39	39	80	37	39	38	80	34	44	45	81
12月7日	80	40	41	41	81	35	39	~~54~~	79	37	~~51~~	39	80
9:00～	80	42	39	41	81	35	33	44	80	36	41	38	80
8.3℃	80	35	43	43	80	37	41	36	81	37	40	42	81
	80	45	44	38	80	36	41	35	80	37	39	36	81
	80	48	47	39	80	37	37	40	80	40	36	39	81
	80	41	44	39	79	37	37	44	80	37	45	45	81
	80	46	43	42	81	42	38	37	81	37	40	36	79
	80	39	47	42	82	36	38	34	81	37	45	47	80
		44	39	~~53~~		41	40	42		38	39	38	
		47	42	~~52~~		37	43	34		38	39	49	
		38	46	38		35	39	38		37	38	~~53~~	
		41	42	46		37	38	34		39	46	47	
		40	44	44		40	40	44		43	50	41	
		40	37	43		37	46	39		41	48	38	
平均	**80.0**	**41.3**	**42.3**	**40.6**	**80.3**	**37.1**	**39.3**	**38.4**	**80.2**	**37.7**	**41.9**	**41.6**	**80.5**

表資－５　４章実験の反発度測定結果詳細

養生条件	供試体番号	圧縮強度		反発度	
			平均	HA	HC
気乾	①－１	20.68	20.2	26.9	28.9
	②－１	19.70		27.9	28.5
	③－１	20.33		27.8	27.7
	①－２	23.18	23.5	29.4	29.2
	②－２	23.56		27.9	28.8
	③－２	23.83		29.7	29.5
	①－３	27.15	26.9	29.1	30.7
	②－３	26.21		30.5	31.1
	③－３	27.30		30.8	30.9
	①－４	29.63	28.7	31.3	29.6
	②－４	28.26		30.9	33.1
	③－４	28.28		31.1	32.1
	①－５	29.85	29.4	33.0	32.1
	②－５	27.32		32.9	30.9
	③－５	30.90		34.3	32.6
	①－６	28.46	28.9	35.7	32.7
	②－６	28.02		34.2	33.1
	③－６	30.33		36.5	35.1
	①－7	30.04	30.3	37.9	37.7
	②－7	30.18		40.0	37.7
	③－7	30.58		38.9	38.3
	①－8	26.30	28.5	38.5	39.3
	②－8	29.78		40.8	39.5
	③－8	29.33		42.0	39.6
表乾	①－１０	23.01	23.9	29.7	28.5
	②－１０	23.65		28.2	29.1
	③－１０	24.89		28.8	28.5
	①－１１	26.60	29.0	29.8	29.5
	②－１１	29.49		31.0	30.9
	③－１１	30.81		30.8	31.5
	①－１２	29.02	28.5	31.2	30.0
	②－１２	26.90		30.0	30.5
	③－１２	29.62		29.6	30.0
	①－１３	33.06	32.7	30.9	30.9
	②－１３	31.99		31.3	29.9
	③－１３	33.17		30.9	29.3
	①－１４	33.33	35.0	30.2	31.8
	②－１４	35.33		35.1	30.6
	③－１４	36.47		31.1	30.5
湿潤	①－１５	25.27	27.2	22.2	22.5
	②－１５	29.64		21.6	22.4
	③－１５	26.79		19.9	20.1

表資－６　４章実験の圧縮強度試験結果詳細

供試体No.	養生条件	材齢（日）	供試体直径(mm)			供試体高さ(mm)			脱型後の質量(g)	試験前の質量(g)	見掛けの密度 (g/cm³)	破壊荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm²)	
			①	②	平均値	①	②	平均値						平均値
①－１	気乾	７	149.41	149.58	149.50	299.69	299.85	299.77	11972.1	11909.8	2.263	363	20.68	20.24
②－１			150.06	149.86	149.96	300.03	300.21	300.12	11919.5	11868.8	2.239	348	19.70	
③－１			149.62	149.85	149.74	300.06	299.96	300.01	11966.0	11905.3	2.254	358	20.33	
①－２		１１	149.70	149.69	149.70	299.94	300.05	300.00	11935.2	11835.2	2.242	408	23.18	23.52
②－２			149.83	149.34	149.59	299.63	299.59	299.61	11911.9	11815.9	2.244	414	23.56	
③－２			149.57	150.01	149.79	300.09	300.38	300.24	11974.1	11905.3	2.250	420	23.83	
①－３		２１	150.01	149.76	149.89	300.09	300.05	300.07	11982.6	11840.4	2.236	479	27.15	26.88
②－３			149.90	149.73	149.82	299.85	300.04	299.95	11866.6	11752.3	2.223	462	26.21	
③－３			149.84	149.74	149.79	300.25	300.14	300.20	11868.4	11868.4	2.244	481	27.30	
①－４		２８	149.57	149.40	149.49	300.01	299.62	299.82	11942.1	11782.2	2.239	520	29.63	28.72
②－４			149.82	149.75	149.79	299.97	299.73	299.85	11920.6	11774.2	2.228	498	28.26	
③－４			149.83	149.64	149.74	299.93	300.10	300.02	12033.7	11901.0	2.253	498	28.28	
①－５		５０	149.60	149.98	149.79	299.85	299.61	299.73	12004.9	11801.0	2.234	526	29.85	29.35
②－５			149.51	149.64	149.58	300.24	300.40	300.32	11895.9	11697.0	2.217	480	27.32	
③－５			149.80	149.66	149.73	300.52	300.33	300.43	12010.7	11827.7	2.236	544	30.90	
①－６		１００	149.98	149.73	149.86	299.95	299.80	299.88	12028.6	11793.8	2.230	502	28.46	28.94
②－６			149.82	150.42	150.12	300.05	300.02	300.04	11946.5	11721.5	2.207	496	28.02	
③－６			149.44	150.03	149.74	300.21	300.25	300.23	12034.9	11834.8	2.239	534	30.33	
①－７		２００	149.48	150.02	149.75	299.59	299.98	299.79	11969.0	11740.6	2.224	529	30.04	30.26
②－７			149.93	149.72	149.83	300.40	300.26	300.33	12022.2	11806.3	2.230	532	30.18	
③－７			149.78	150.10	149.94	300.22	300.31	300.27	12069.5	11881.7	2.241	540	30.58	
①－８		３００	150.37	149.71	150.04	300.09	299.94	300.02	11992.6	11773.0	2.219	465	26.30	28.47
②－８			149.76	149.61	149.69	299.93	299.87	299.90	11998.5	11803.3	2.237	524	29.78	
③－８			149.81	149.50	149.66	299.66	299.93	299.80	12056.1	11860.8	2.249	516	29.33	
①－１０	表乾	１１	149.62	150.13	149.88	299.85	299.64	299.75	11963.0	11936.9	2.257	409	23.18	23.91
②－１０			149.40	149.53	149.47	299.81	300.05	299.93	11945.0	11934.6	2.268	415	23.65	
③－１０			150.09	148.91	149.50	299.90	300.14	300.02	12009.5	11989.2	2.277	437	24.89	
①－１１		２１	149.80	149.85	149.83	299.71	299.72	299.72	11928.5	11932.7	2.258	471	26.72	29.01
②－１１			149.43	149.66	149.55	300.07	300.04	300.06	11973.7	11987.9	2.275	518	29.49	
③－１１			149.43	149.89	149.66	300.12	300.00	300.06	12057.2	12070.0	2.287	542	30.81	
①－１２		２８	149.87	149.60	149.74	300.04	299.85	299.95	12006.5	12028.3	2.277	511	29.02	28.51
②－１２			149.70	149.85	149.78	300.06	299.97	300.02	12040.5	12068.1	2.283	474	26.90	
③－１２			149.56	149.46	149.51	300.48	300.12	300.30	11997.8	12024.5	2.281	520	29.62	
①－１３		５０	149.61	149.57	149.59	299.58	299.79	299.69	11933.5	11871.5	2.254	581	33.06	32.74
②－１３			149.53	150.10	149.82	299.95	299.77	299.86	11968.8	12034.7	2.277	564	31.99	
③－１３			149.62	150.07	149.85	300.41	300.23	300.32	12039.6	12097.1	2.284	585	33.17	
①－１４		１００	149.51	150.00	149.76	300.08	299.95	300.02	11950.0	12044.4	2.279	587	33.33	35.04
②－１４			150.52	149.63	150.08	300.17	300.05	300.11	12030.7	12114.5	2.282	625	35.33	
③－１４			149.67	149.75	149.71	300.32	300.12	300.22	12012.0	12105.3	2.291	642	36.47	
①－１５	湿潤	２８	149.74	150.10	149.92	299.95	299.89	299.92	11940.3	12070.1	2.280	446	25.27	27.23
②－１５			149.91	149.60	149.76	300.30	300.17	300.24	12046.4	12178.4	2.303	522	29.64	
③－１５			150.23	148.70	149.47	299.55	299.66	299.61	12080.0	12080.0	2.298	470	26.79	

※①～③－９の供試体については，まだ試験を実施していない。

表資－７　５章実験の反発度測定結果詳細(立方体供試体)

配合 No.	供試体 形状	供試体 No.	材齢 (日)	圧縮強度 N/mm^2	反発度	
					HA	HC
Ｎ４０	立方体	1	28	49.56	39.9	34.9
		2			40.0	35.1
Ｎ５０	立方体	1	28	38.95	36.5	34.4
		2			37.4	34.3
Ｎ６０	立方体	1	28	29.43	34.0	32.0
		2			33.7	32.6
Ｎ７０	立方体	1	28	20.45	33.3	28.4
		2			34.6	30.2
Ｎ８０	立方体	1	28	16.44	33.2	28.8
		2			31.1	28.1
Ｂ４０	立方体	1	28	48.35	40.5	35.4
		2			40.9	38.9
Ｂ５０	立方体	1	28	34.74	33.5	31.6
		2			34.0	32.0
Ｂ６０	立方体	1	28	24.30	33.0	29.5
		2			33.0	29.3
Ｂ７０	立方体	1	28	18.39	31.3	27.8
		2			30.2	28.8
Ｂ８０	立方体	1	28	16.39	31.3	28.3
		2			30.6	27.8
Ｆ４０	立方体	1	24	58.74	42.1	39.6
		2			43.3	40.9
Ｆ５０	立方体	1	24	42.16	37.3	33.9
		2			37.5	34.5
Ｆ６０	立方体	1	24	30.72	36.0	34.3
		2			37.0	34.1
Ｆ７０	立方体	1	24	24.09	34.7	31.8
		2			33.5	32.1
Ｆ８０	立方体	1	24	19.54	32.0	30.1
		2			32.3	30.1
Ｎ４０	立方体	3	49	56.24	45.4	39.4
		4			44.6	38.5
Ｎ５０	立方体	3	49	44.60	38.3	35.4
		4			38.7	35.9
Ｎ６０	立方体	3	49	33.46	37.8	34.4
		4			37.1	34.5
Ｎ７０	立方体	3	49	25.15	35.9	29.0
		4			34.0	30.5
Ｎ８０	立方体	3	49	21.09	35.8	31.7
		4			32.6	32.1
Ｂ４０	立方体	3	49	61.63	44.9	39.4
		4			44.8	41.8
Ｂ５０	立方体	3	49	38.92	38.6	35.4
		4			38.3	35.3
Ｂ６０	立方体	3	49	30.30	35.8	32.8
		4			36.2	32.8
Ｂ７０	立方体	3	49	22.73	34.3	32.0
		4			35.9	32.5
Ｂ８０	立方体	3	49	18.72	31.9	31.4
		4			33.1	30.6
Ｆ４０	立方体	3	49	66.98	48.6	45.8
		4			50.8	46.9
Ｆ５０	立方体	3	49	45.46	43.6	39.0
		4			43.6	39.0
Ｆ６０	立方体	3	49	35.17	38.7	35.4
		4			38.6	35.0
Ｆ７０	立方体	3	49	28.06	36.3	32.7
		4			35.7	35.7
Ｆ８０	立方体	3	49	24.39	34.7	32.1
		4			34.9	32.4

表資－８　５章実験の反発度測定結果詳細(円柱供試体，材齢24～28日)

配合 No.	供試体 形状	供試体 No.	材齢 (日)	圧縮強度		反発度	
				(N/mm^2)	平均値	HA	HC
Ｎ４０	円柱	1	28	50.42	49.56	39.1	36.2
		2		49.42		38.4	36.2
		3		48.84		39.4	35.0
Ｎ５０	円柱	1	28	40.46	38.95	35.7	33.5
		2		38.34		36.4	32.6
		3		38.05		35.5	32.8
Ｎ６０	円柱	1	28	28.29	29.43	33.3	29.2
		2		29.52		32.6	30.6
		3		30.48		34.7	30.4
Ｎ７０	円柱	1	28	21.40	20.45	30.1	29.3
		2		19.51		31.4	28.9
		3		20.44		31.8	30.1
Ｎ８０	円柱	1	28	16.13	16.44	30.6	27.8
		2		16.82		29.1	28.6
		3		16.38		29.3	28.0
Ｂ４０	円柱	1	28	47.98	48.35	38.7	36.3
		2		48.53		38.0	35.3
		3		48.53		36.2	35.4
Ｂ５０	円柱	1	28	34.24	34.74	34.1	31.1
		2		35.41		34.7	31.8
		3		34.58		34.7	31.0
Ｂ６０	円柱	1	28	22.79	24.30	31.7	28.6
		2		25.79		30.6	29.3
		3		24.31		32.6	29.4
Ｂ７０	円柱	1	28	18.28	18.39	29.7	28.9
		2		18.88		29.7	27.9
		3		18.01		31.1	29.0
Ｂ８０	円柱	1	28	15.41	16.39	27.8	27.8
		2		17.04		28.4	27.6
		3		16.72		29.7	27.1
Ｆ４０	円柱	1	24	59.54	58.74	42.1	40.6
		2		59.70		40.9	39.4
		3		56.99		42.3	39.3
Ｆ５０	円柱	1	24	42.74	42.16	35.6	34.1
		2		41.91		35.9	34.7
		3		41.84		36.8	39.3
Ｆ６０	円柱	1	24	29.08	30.72	34.6	32.6
		2		32.29		34.3	34.0
		3		30.79		34.6	32.1
Ｆ７０	円柱	1	24	24.59	24.09	34.2	30.1
		2		24.15		32.5	30.3
		3		23.54		34.4	30.2
Ｆ８０	円柱	1	24	18.60	19.54	32.3	28.9
		2		20.06		30.5	29.8
		3		19.95		31.7	30.1

表資－９　５章実験の反発度測定結果詳細(円柱供試体，材齢49日)

配合 No.	供試体 形状	供試体 No.	材齢 (日)	圧縮強度		反発度	
				(N/mm^2)	平均値	HA	HC
Ｎ４０	円柱	4	49	56.96	56.24	42.0	38.1
		5		56.66		41.8	36.8
		6		55.10		42.3	36.9
Ｎ５０	円柱	4	49	43.37	44.60	38.4	34.6
		5		45.45		38.7	34.5
		6		44.96		37.2	35.8
Ｎ６０	円柱	4	49	33.93	33.46	36.2	32.2
		5		34.38		35.9	32.2
		6		32.06		35.4	33.0
Ｎ７０	円柱	4	49	26.52	25.15	34.3	30.5
		5		23.49		32.9	29.2
		6		25.44		34.0	29.6
Ｎ８０	円柱	4	49	21.55	21.09	31.7	28.8
		5		21.54		32.9	28.4
		6		20.19		32.0	28.3
Ｂ４０	円柱	4	49	60.69	61.63	44.0	38.8
		5		61.99		40.8	38.6
		6		62.19		42.1	38.6
Ｂ５０	円柱	4	49	36.89	38.92	36.9	33.5
		5		38.59		36.8	34.0
		6		41.27		35.7	33.7
Ｂ６０	円柱	4	49	33.13	30.30	35.1	30.5
		5		31.37		35.5	30.9
		6		26.40		32.9	30.9
Ｂ７０	円柱	4	49	21.85	22.73	31.9	28.7
		5		21.99		30.6	29.6
		6		24.37		32.7	30.1
Ｂ８０	円柱	4	49	18.23	18.72	30.8	29.1
		5		19.22		30.5	28.1
		6		18.72		31.0	28.6
Ｆ４０	円柱	4	49	65.19	66.98	45.9	41.9
		5		67.27		46.7	42.3
		6		68.49		44.8	42.8
Ｆ５０	円柱	4	49	44.37	45.46	40.5	37.1
		5		45.68		40.6	37.6
		6		46.33		38.0	37.4
Ｆ６０	円柱	4	49	35.05	35.17	37.2	34.8
		5		35.03		37.8	35.5
		6		35.44		36.8	34.2
Ｆ７０	円柱	4	49	28.21	28.06	35.7	32.3
		5		28.63		34.6	32.5
		6		27.34		35.4	31.8
Ｆ８０	円柱	4	49	23.92	24.39	33.7	31.3
		5		24.15		32.5	30.6
		6		25.11		34.2	31.3

表資－10　５章実験の圧縮強度試験結果詳細(円柱供試体，普通セメント使用)

配合 No.	供試体 No.	材令	供試体直径(mm)			供試体高さ(mm)			質量(g)			見掛けの密度 (g/cm^3)	破壊荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm^2)	圧縮強度 平均値	弾性係数 (N/mm^2)
			①	②	平均値	①	②	平均値	脱型後	水中養生後	試験前					
N40	1	28	149.41	149.91	149.66	300.23	300.18	300.21	12218.9	12284.5	12193.1	2.301	887	50.42	49.56	35686
	2		149.70	150.06	149.88	300.10	300.07	300.09	12236.3	12302.0	12209.0	2.301	872	49.42		34503
	3		149.92	149.90	149.91	300.17	300.52	300.35	12266.6	12334.4	12245.5	2.309	862	48.84		34079
	4	49	149.82	149.66	149.74	300.46	300.37	300.42	12227.1	12317.2	12208.2	2.310	1003	56.96	56.24	37325
	5		149.59	149.46	149.53	300.17	300.09	300.13	12204.6	12295.2	12184.7	2.314	995	56.66		37858
	6		149.56	149.42	149.49	300.30	300.11	300.21	12164.8	12259.0	12148.7	2.309	967	55.10		36356
N50	1	28	149.99	150.00	150.00	300.04	300.00	300.02	12017.2	12095.5	11960.0	2.256	715	40.46	38.95	33758
	2		149.55	149.65	149.60	300.29	300.50	300.40	12078.2	12158.3	12021.9	2.274	674	38.34		32918
	3		149.40	149.60	149.50	300.15	300.50	300.33	12078.9	12155.7	12019.4	2.276	668	38.05		31449
	4	49	149.57	149.55	149.56	300.53	300.18	300.36	12039.0	12163.3	11986.2	2.273	762	43.37	44.60	33282
	5		149.35	149.48	149.42	300.58	300.54	300.56	12046.9	12145.7	11994.3	2.274	797	45.45		33438
	6		149.88	149.28	149.58	300.37	300.50	300.44	12069.6	12168.6	12018.4	2.285	790	44.96		34015
N60	1	28	149.57	149.87	149.72	300.54	300.45	300.50	12145.5	12232.1	12048.3	2.273	498	28.29	29.43	28902
	2		149.64	149.90	149.77	300.69	300.57	300.63	12132.6	12218.9	12029.8	2.268	520	29.52		30696
	3		149.60	149.94	149.77	300.40	300.26	300.33	12109.1	12195.2	12011.6	2.266	537	30.48		32074
	4	49	149.25	149.87	149.56	300.24	300.20	300.22	12106.6	12215.1	12002.0	2.266	596	33.93	33.46	31169
	5		149.83	149.79	149.81	300.39	300.53	300.46	12127.3	12231.3	12025.8	2.271	606	34.38		31979
	6		149.63	149.96	149.80	300.96	300.66	300.81	12123.8	12229.4	12023.5	2.264	565	32.06		33252
N70	1	28	149.78	149.39	149.59	300.47	300.49	300.48	12047.5	12138.5	11886.3	2.257	376	21.40	20.45	27139
	2		149.71	149.97	149.84	300.73	300.54	300.64	12154.2	12238.8	11985.7	2.258	344	19.51		28533
	3		149.71	149.79	149.75	300.76	300.56	300.66	12093.2	12180.1	11921.5	2.251	360	20.44		26996
	4	49	149.49	149.97	149.73	301.31	300.62	300.97	12074.0	12175.2	11918.5	2.244	467	26.52	25.15	28990
	5		149.32	149.55	149.44	300.78	299.97	300.38	12091.0	12190.3	11934.7	2.265	412	23.49		29664
	6		149.63	149.87	149.75	300.92	300.54	300.73	12094.3	12197.2	11940.5	2.252	448	25.44		29957
N80	1	28	149.78	149.68	149.73	301.41	301.24	301.33	12104.1	12192.5	11899.5	2.245	284	16.13	16.44	25986
	2		149.69	149.20	149.45	300.63	300.91	300.77	12134.0	12216.5	11924.4	2.267	295	16.82		26024
	3		149.39	149.87	149.63	300.62	300.78	300.70	12124.3	12209.7	11920.2	2.247	288	16.38		25544
	4	49	149.63	150.08	149.86	300.61	301.05	300.83	12113.9	12221.4	11919.9	2.238	380	21.55	21.09	28299
	5		149.93	149.79	149.86	300.66	300.54	300.60	12114.2	12218.1	11926.3	2.252	380	21.54		25866
	6		149.75	149.51	149.63	300.58	300.69	300.64	12124.8	12229.8	11928.7	2.260	355	20.19		28439

表資－11　5章実験の圧縮強度試験結果詳細(円柱供試体，高炉セメント使用)

配合 No.	供試体 No.	材令	供試体直径(mm)			供試体高さ(mm)			質量(g)			見掛けの密度	破壊荷重	圧縮強度		弾性係数
			①	②	平均値	①	②	平均値	脱型後	水中養生後	試験前	(g/cm^3)	(kN)	(N/mm^2)	平均値	(N/mm^2)
B40	1	28	149.75	149.40	149.58	300.45	299.92	300.19	12341.0	12444.8	12322.3	2.344	843	47.98	48.35	35519
	2		149.12	149.71	149.42	300.17	300.12	300.15	12371.8	12476.2	12367.0	2.341	851	48.53		33435
	3		149.90	149.48	149.69	299.87	299.99	299.93	12329.0	12434.2	12321.6	2.340	854	48.53		34194
	4	49	149.62	149.89	149.76	300.64	300.07	300.36	12341.9	12467.3	12379.3	2.338	1069	60.69	61.63	38001
	5		149.56	149.27	149.42	300.46	300.48	300.47	12288.0	12413.0	12324.4	2.344	1087	61.99		39354
	6		149.63	149.68	149.66	300.27	300.30	300.29	12327.1	12454.0	12364.6	2.340	1094	62.19		37990
B50	1	28	149.76	149.48	149.62	300.31	300.53	300.42	12114.3	12218.8	12044.1	2.284	602	34.24	34.74	30372
	2		149.27	149.83	149.55	300.10	300.05	300.08	12070.4	12176.9	12005.9	2.269	622	35.41		31078
	3		149.34	149.67	149.51	299.84	300.10	299.97	12111.7	12216.8	12036.4	2.280	607	34.58		30453
	4	49	149.47	149.39	149.43	300.10	300.83	300.47	12103.0	12222.2	12087.2	2.292	647	36.89	38.92	32380
	5		149.84	149.74	149.79	300.55	300.14	300.35	12081.1	12200.7	12070.7	2.284	680	38.59		33930
	6		149.04	149.66	149.35	300.74	300.56	300.65	12093.2	12211.7	12084.9	2.286	723	41.27		33019
B60	1	28	149.40	149.58	149.49	300.71	300.32	300.52	12048.1	12140.5	11896.8	2.254	400	22.79	24.30	28217
	2		149.50	149.57	149.54	300.35	300.50	300.43	12066.4	12160.7	11918.4	2.257	453	25.79		29059
	3		149.50	149.58	149.54	300.37	300.48	300.43	12092.7	12186.1	11946.8	2.263	427	24.31		28618
	4	49	149.53	149.57	149.55	300.45	300.56	300.51	12060.3	12173.8	11994.6	2.271	582	33.13	30.30	32141
	5		149.74	149.88	149.81	300.65	300.38	300.52	12056.5	12168.5	11987.9	2.262	553	31.37		32459
	6		149.58	149.63	149.61	300.55	300.43	300.49	12072.0	12183.3	12003.0	2.272	464	26.40		32116
B70	1	28	149.61	149.44	149.53	300.18	300.43	300.31	12055.0	12144.5	11846.8	2.248	321	18.28	18.39	25146
	2		149.61	149.66	149.64	300.57	300.70	300.64	12070.6	12162.0	11861.3	2.242	332	18.88		27474
	3		149.54	149.37	149.46	300.34	300.60	300.47	12063.8	12150.9	11847.5	2.249	316	18.01		26720
	4	49	149.04	150.55	149.80	300.67	300.69	300.68	12076.2	12177.6	11954.9	2.233	385	21.85	22.73	28833
	5		149.34	149.68	149.51	300.58	300.55	300.57	12087.8	12188.9	11932.5	2.256	386	21.99		29834
	6		149.54	149.89	149.72	300.68	300.41	300.55	12057.3	12160.3	11966.4	2.257	429	24.37		30756
B80	1	28	149.83	149.42	149.63	300.61	300.69	300.65	12096.3	12185.3	11857.3	2.249	271	15.41	16.39	23884
	2		149.41	149.50	149.46	300.36	300.37	300.37	12080.4	12174.0	11849.4	2.247	299	17.04		24839
	3		150.17	149.58	149.88	300.40	300.38	300.39	12067.5	12160.2	11834.8	2.242	295	16.72		23777
	4	49	149.68	149.33	149.51	300.76	300.49	300.63	12059.9	12158.0	11899.1	2.261	320	18.23	18.72	25821
	5		149.55	149.27	149.41	300.70	300.39	300.55	12097.7	12200.8	11946.7	2.273	337	19.22		28716
	6		149.75	149.40	149.58	300.21	300.30	300.26	12075.8	12177.9	11925.8	2.265	329	18.72		26896

表資－12　5章実験の圧縮強度試験結果詳細(円柱供試体，早強セメント使用)

配合 No.	供試体 No.	材令	供試体直径(mm)			供試体高さ(mm)			質量(g)			見掛けの密度	破壊荷重	圧縮強度		弾性係数
			①	②	平均値	①	②	平均値	脱型後	水中養生後	試験前	(g/cm^3)	(kN)	(N/mm^2)	平均値	(N/mm^2)
F40	1	28	149.21	150.19	149.70	299.97	300.06	300.02	12485.6	12528.5	12453.8	2.343	1048	59.54	58.74	37851
	2		149.64	150.22	149.93	300.32	300.48	300.40	12463.6	12505.3	12428.5	2.334	1054	59.70		38631
	3		150.59	150.15	150.37	300.03	300.23	300.13	12475.0	12516.2	12441.4	2.340	1012	56.99		39069
	4	49	150.32	150.08	150.20	300.25	300.12	300.19	12488.5	12563.5	12484.1	2.351	1155	65.19	66.98	38173
	5		150.37	149.78	150.08	299.95	300.03	299.99	12467.1	12541.7	12459.1	2.357	1190	67.27		39150
	6		150.21	149.75	149.98	300.16	300.12	300.14	12491.7	12567.2	12486.7	2.362	1210	68.49		40115
F50	1	28	149.41	149.55	149.48	300.47	300.32	300.40	12109.7	12177.1	12051.2	2.284	750	42.74	42.16	33069
	2		150.08	149.81	149.95	300.23	300.35	300.29	12155.7	12215.0	12089.6	2.284	740	41.91		38010
	3		149.78	149.93	149.86	300.21	300.32	300.27	12153.3	12217.2	12086.3	2.280	738	41.84		33963
	4	49	149.72	150.45	150.09	300.21	300.40	300.31	12134.3	12233.7	12094.2	2.265	785	44.37	45.46	36498
	5		149.90	150.06	149.98	300.18	300.09	300.14	12151.1	12251.5	12113.7	2.282	807	45.68		34561
	6		149.25	150.08	149.67	300.13	300.07	300.10	12173.4	12268.0	12132.5	2.286	815	46.33		35993
F60	1	28	149.82	149.65	149.74	300.39	300.42	300.41	12023.2	12101.8	11924.3	2.257	512	29.08	30.72	33203
	2		149.99	150.10	150.05	300.32	300.29	300.31	12020.7	12098.7	11920.6	2.243	571	32.29		32419
	3		150.09	150.18	150.14	300.64	301.29	300.97	12042.9	12118.3	11937.1	2.237	545	30.79		32539
	4	49	149.96	150.17	150.07	300.33	300.45	300.39	12042.8	12153.1	11962.7	2.287	620	35.05	35.17	33973
	5		149.49	149.55	149.52	300.37	300.47	300.42	12016.3	12131.5	11944.0	2.300	615	35.03		34630
	6		149.40	150.29	149.85	300.69	300.42	300.56	12019.4	12132.2	11818.1	2.289	625	35.44		36064
F70	1	28	149.23	149.55	149.39	300.37	300.47	300.42	11985.0	12054.0	11818.1	2.239	431	24.59	24.09	33069
	2		149.48	149.87	149.68	300.47	300.27	300.37	11958.2	12032.0	11795.1	2.227	425	24.15		38010
	3		150.42	149.95	150.19	300.42	300.29	300.36	12015.8	12091.5	11858.1	2.236	417	23.54		33963
	4	49	149.94	149.59	149.77	300.59	300.40	300.50	11976.9	12083.1	11842.7	2.243	497	28.21	28.06	36498
	5		149.55	149.87	149.71	300.12	300.34	300.23	11980.6	12085.2	11846.1	2.236	504	28.63		34561
	6		149.73	149.92	149.83	300.22	300.24	300.23	11966.0	12074.3	11827.3	2.232	482	27.34		35993
F80	1	28	150.09	149.61	149.85	300.42	300.10	300.26	11991.3	12075.8	11810.9	2.239	328	18.60	19.54	33203
	2		149.89	149.93	149.91	300.32	300.45	300.39	12040.9	12118.0	11851.7	2.234	354	20.06		32419
	3		149.64	149.67	149.66	300.16	300.10	300.13	12011.5	12088.3	11820.3	2.239	351	19.95		32539
	4	49	149.75	150.33	150.04	300.28	300.26	300.27	12011.8	12119.7	11845.6	2.283	423	23.92	24.39	33973
	5		150.20	149.56	149.88	300.28	300.53	300.41	12017.5	12126.3	11853.5	2.288	426	24.15		34630
	6		149.97	150.11	150.04	300.17	300.45	300.31	12060.5	12153.5	11890.1	2.289	444	25.11		36064

実構造物における反発度測定結果について

本報告書では，試験室で作製した供試体を用いた実験から，コンクリートの含水状態の違いが反発度の測定結果に大きな影響を与えること，その一方で，含水状態がほぼ同じであれば，反発度－圧縮強度の関係は材齢の経過や配合の違いによらず，ほぼ一定であったことを報告した。しかし，実構造物における反発度法による強度推定には，含水状態を一定にすることが困難であることや，コンクリートの中性化による影響など，検討すべき課題が残されている。ここでは，実構造物に対して反発度法による強度推定を行った結果を紹介する。

調査した構造物は材齢30年～60年の橋梁で，橋脚を中心に調査を行っている。一つの部位（おおよそ1×1mの範囲内）で2箇所反発度の測定を行い，材料学会式を用いてコンクリートの強度を推定した。また，反発度を測定した箇所の近傍でφ100mm程度の1本のコアを採取して圧縮強度試験を行った。調査結果を表

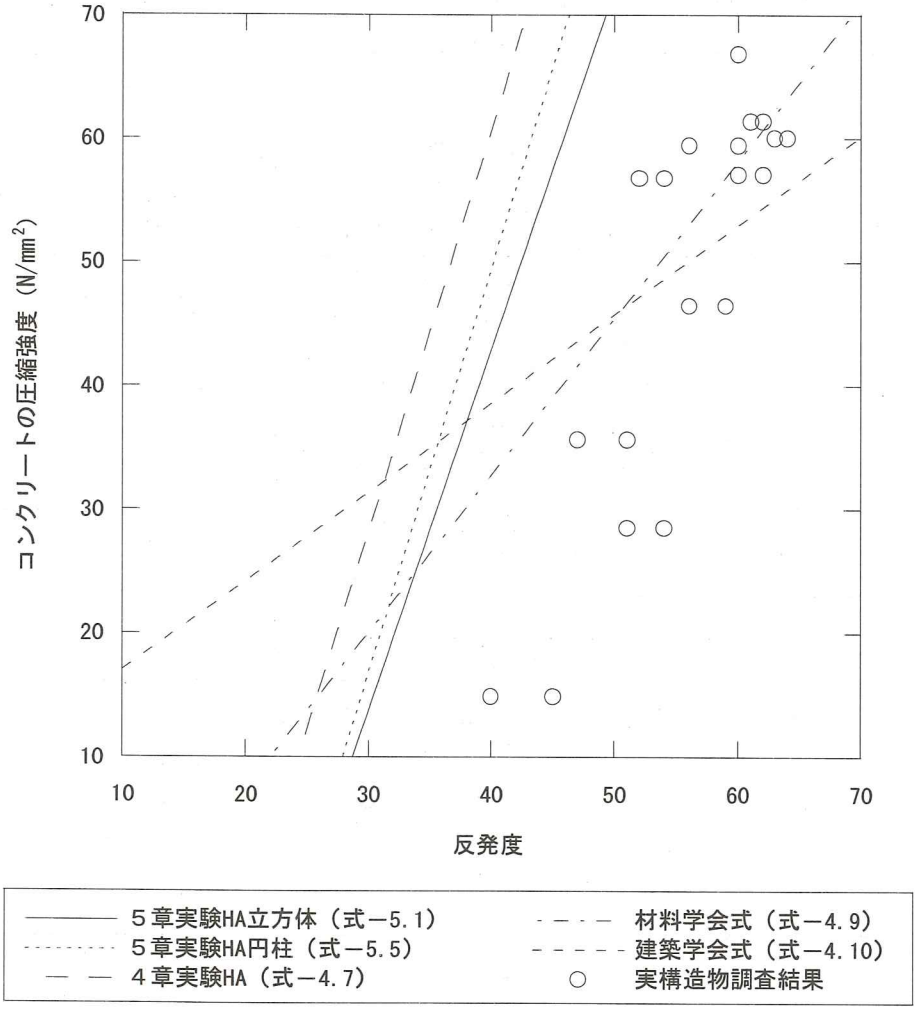
表資－13　既存構造物の調査事例

構造物	部位	基準反発度	推定強度（N/mm²）		コアの圧縮強度（N/mm²）	中性化深さ（mm）
			材齢補正前	材齢補正後		
A橋 材齢30年	P2	63	62.0	39.1	60.1	2
		64	63.3	39.9		
	P4	47	41.7	26.3	35.7	21
		51	46.8	29.5		
	P26_a	62	60.7	38.3	57.1	4
		60	58.2	36.7		
	P26_b	62	60.7	38.3	61.4	4
		61	59.5	37.5		
	P28	59	56.9	35.9	46.5	6
		56	53.1	33.5		
B橋 材齢60年	P2	54	50.6	31.9	28.5	4
		51	46.8	29.5		
C橋 材齢35年	A1	45	39.2	24.7	14.9	59
		40	32.8	20.7		
	G1_a	56	53.1	33.5	59.5	4
		60	58.2	36.7		
	G1_b	60	58.2	36.7	66.9	2
		60	58.2	36.7		
D橋 材齢35年	P3	54	50.6	31.9	56.8	0
		52	48.0	30.3		

※材齢補正後：材齢係数として強度推定結果に0.63を乗じた場合
※中性化深さ：測定箇所周辺のコンクリートをはつって測定した平均値を示した

資－13に示す。

反発度の測定結果は40～64と，本報告書で検討した実験と比較するとかなり大きい(図資－1)。これはコンクリートの乾燥の影響と考えられる。しかし，コアの圧縮強度が60N/mm²程度のデータにも，反発度で10以上のばらつきがあるなど,反発度の測定結果からコンクリートの強度を正確に推定することは困難であることがうかがわれる。



図資－1　実構造物の反発度調査結果

反発度と圧縮強度の関係について(予備実験結果)

反発度と強度の関係に関する実験については,本文５章で紹介したが,この実験の前に予備的に実施した実験結果があるので簡単に紹介する。

実験方法

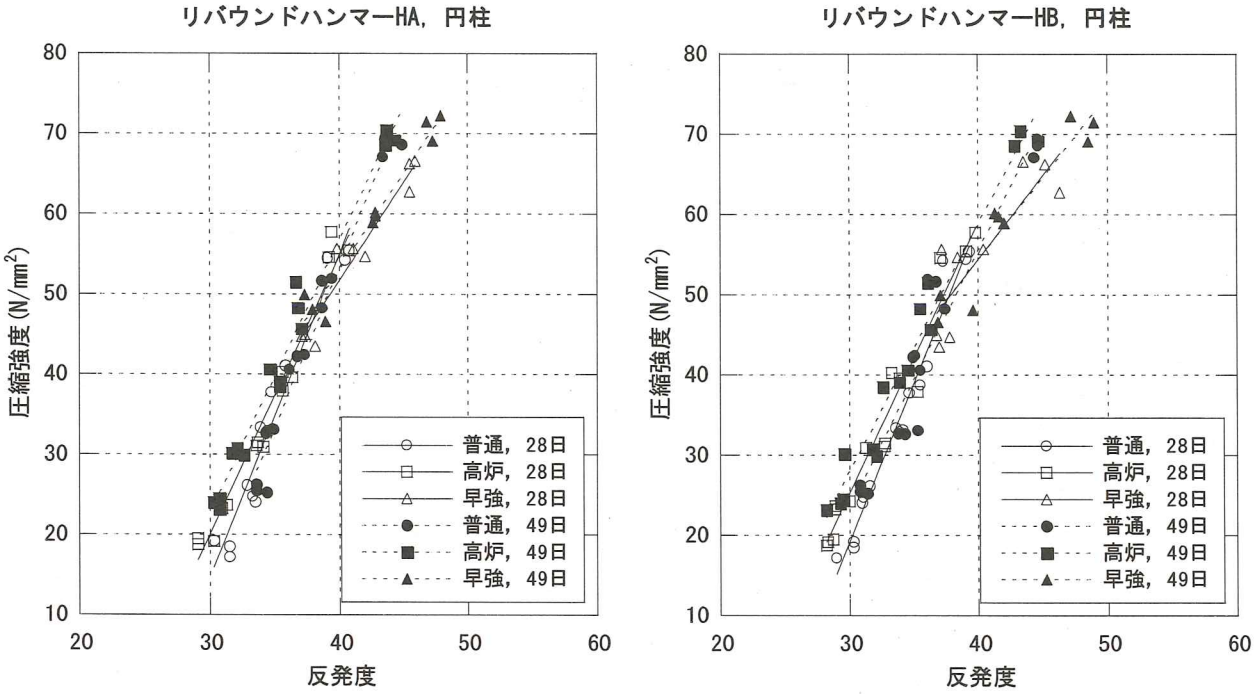
実験方法は，５章とほぼ同様であるが，以下の点で異なっている。

- 供試体は円柱供試体のみ
- 早強セメント使用の配合で，水セメント比70，80%の場合は行っていない。
- 早強セメント使用の場合で，材齢24日で試験するは行っておらず，代わりに材齢７日まで水中養生して21日間気中で養生している(普通セメント等と同じ養生条件)
- 測定に使用したリバウンドハンマーは，リバウンドハンマーHAとHB

実験結果

反発度の測定結果を図資－２に,各リバウンドハンマーおよびセメント種類ごとに反発度と圧縮強度の関係を回帰した式を式資－１～式資－６に示す。これらの実験結果からは以下のことがわかる。

- リバウンドハンマーHAを用いて測定した反発度とコンクリートの圧縮強度の関係は，５章の実験結果(円柱供試体の場合)とほぼ同じ結果が得られている。
- リバウンドハンマーHBを用いて測定した反発度とコンクリートの圧縮強度の関係は，リバウンドハンマーHAを用いて測定した場合とほとんど同じである。
- 早強セメントを使用した配合の反発度－圧縮強度の関係(式資－3，式資－6)は，５章の結果と少し異なっている。これは，予備実験では水セメント比70%，80%の供試体について実験を行っていないためで，水セメント比40～60%の供試体の実験結果は，５章のものとほぼ同様である。



図資－２　反発度と圧縮強度の関係

＜リバウンドハンマーHA，円柱供試体，普通セメントのデータを用いた場合＞

$F_c = 3.94R - 103.6$ ……(資.1)

ただし，　F_c：コンクリートの推定強度(N/mm²)

　　R　：基準反発度

$F_c = 3.49R - 91.18$　＜HA，円柱，高炉セメント＞……(資.2)

$F_c = 2.45R - 45.73$　＜HA，円柱，早強セメント＞……(資.3)

$F_c = 3.47R - 82.89$　＜HB，円柱，普通セメント＞……(資.4)

$F_c = 3.23R - 70.66$　＜HB，円柱，高炉セメント＞……(資.5)

$F_c = 2.06R - 28.14$　＜HB，円柱，早強セメント＞……(資.6)

テストハンマーによる強度推定調査ＦＡＱ 集

（土木研究所ホームページに掲載したものを編集）

このページについて

このＦＡＱ集は，国土交通省および独立行政法人土木研究所が作成した「テストハンマーによる強度推定調査の６つのポイント」（以下「６つのポイント」）の記載内容などについて寄せられたご質問のうち，特にお問い合わせの多い内容を取り上げ，より詳細な説明を追加するものです。

ご注意

このＦＡＱ集や「６つのポイント」に記載された内容にしたがって強度推定調査を行ったとしても，テストハンマーを用いた調査で推定したコンクリート強度と実構造物のコンクリート強度が大きく異なる場合があります。従って，テストハンマーを用いた調査から推定したコンクリート強度はあくまで参考値として取り扱う必要があります。コンクリートの圧縮強度を正確に知る必要がある場合には，コアを採取して圧縮強度試験を実施することなどもご検討ください。

目次

質問１：テストハンマーの整備について　その１
質問２：テストハンマーの整備について　その１
質問３：測定面の乾燥状態について
質問４：材齢係数について　その１
質問５：材齢係数について　その２
質問６：測定方向による補正について
質問７：高強度コンクリートへの適用について
質問８：既存コンクリート構造物への適用について
質問９：文献について

質問１

「６つのポイント」では，一つ目のポイントとして点検された測定装置を用いるように指示されていますが，点検が十分でないとどんな不都合が生じますか？

回答：

テストハンマーを繰り返し使用すると，内部の作動部分に可動部品の接触から生じたと思われる金属粉などのゴミが付着することがあります。この状態で使用を続けると内部の摩擦が増大し，一般に本来測定されるべき値よりも低い反発度が測定されるようになります。このため，試験前に点検を行い，テストハンマーの整備状態が適切であることを確認する必要があります。

点検には金属製のテストアンビル(検定器)を用いるのが一般的で，点検の結果，測定される反発度が検定器に示された適正とされる範囲に入らなかった場合には，分解清掃・部品交換などの整備を行わなければなりません。なお，内部の摩擦等が増加した状態で使用を続けると，部品の変形等が生じる場合もありますので，早め(2000回程度の打撃後)の整備をおすすめします。

参考資料：

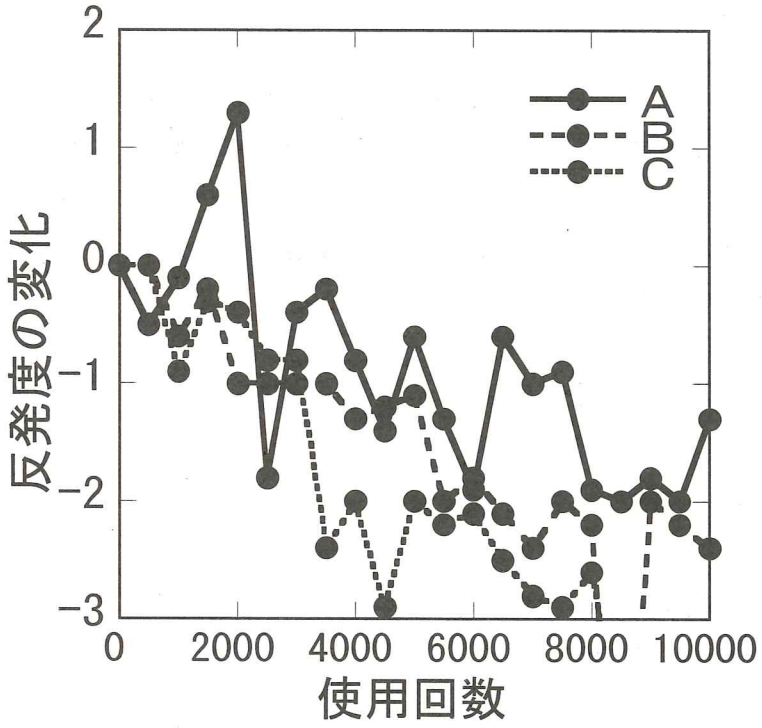


図　整備を行わずテストハンマーの使用を続けた場合の反発度の推移

(反発度80のテストアンビルを打撃した場合)

参考文献：

古賀裕久・河野広隆・野永健二・北園英明：テストハンマーの検定頻度に関する検討，第56回セメント技術大会講演要旨，pp. 100-101，2002

質問２

「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」(日本建築学会)などを参考に，自分でテストハンマーの整備を行ってもいいでしょうか？

回答：

簡単な清掃以外は，絶対に行わないでください。

土木研究所と日本構造物診断技術協会が共同で，実際に使用されているテストハンマーの整備状態について調査を行った結果，一般的なテストアンビルを用いた点検(反発度80程度)で整備状態が適切であると判定されるテストハンマーを用いても，モルタル(反発度30程度)を打撃して反発度を測定した結果が，大きく異なっている場合があることがわかりました。この理由としては，テストハンマーの所有者らが内部の調整ねじ等の状態を変更するなどし，重錘の移動距離や内部の摩擦，バネのバネ定数等が購入当初の状態から大きく変化したまま，使用されていることが考えられます。一般的なコンクリートを打撃した場合に測定される反発度は20～50程度であるので，上述のようなテストハンマーを調査に用いると，点検では適切に整備されていると判定されるものの，測定結果として本来得られるべき値と大きく異なる値が得られるということが考えられます。

一方，テストハンマーの製造者等は30～50程度の反発度が得られるテストアンビルを開発・所有しており，出荷や整備の際に，複数の反発度領域における性能検査などを行っています。このような理由から，テストハンマーの整備は，必ず信頼できる整備者に依頼するようにしてください。

参考資料：

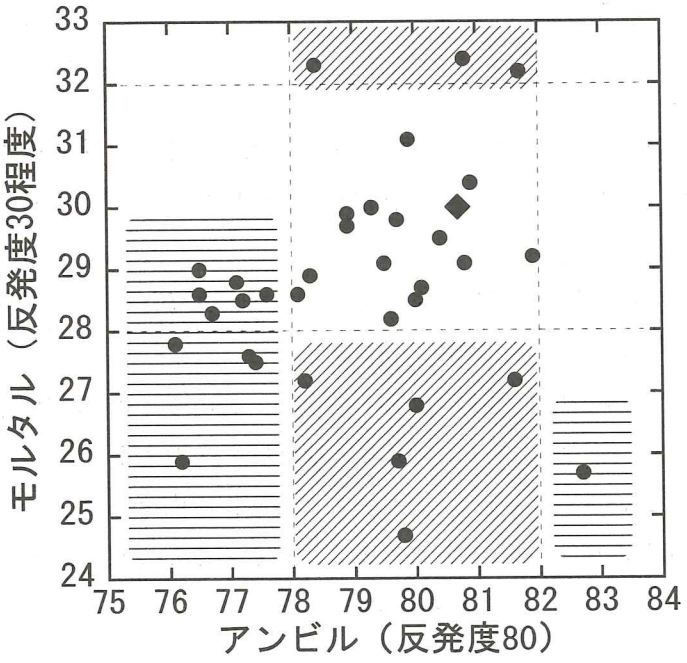


図　国内で保有・使用されているテストハンマーの整備状態の比較

※ 約40機のテストハンマーについて，テストアンビル(反発度80)を打撃した際に測定された反発度と，モルタル製品(反発度30程度)を打撃した際に測定された反発度の関係を整理したものである。菱形の点は，測定の直前に(財)日本品質保証機構により，その整備状態が適切であることが確認された装置の測定結果である。

※ 横線が引かれたエリアに含まれるテストハンマーは，テストアンビルを打撃した際に得られた反発度が78～82の範囲に入っていないことから，整備状態が適切でないことを点検によって明らかにできる。

※ 斜線が引かれたエリアに含まれるテストハンマーは，テストアンビルを打撃した際には適切に整備された装置とほぼ同様の反発度が得られるが，反発度30程度のコンクリートを調査するために使用すると，整備状態が適切なハンマーとは大きく異なる測定結果が得られる可能性のある装置である。これらのハンマーは，内部の調整状態が製造時とは大きく異なっている可能性がある。このような状態になったテストハンマーを通常の点検で抽出することはできないため，装置の製造者以外のものが内部の調整状態を変更してはならない。

参考文献：

古賀裕久・河野広隆・福田暁・石井和夫：テストハンマーの個体差および較正法に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1617-1622，2002

質問３

「６つのポイント」のポイント２で紹介されているコンクリート表面の乾燥状態に関する補正方法は，どのようにして定められたものですか？

回答：

テストハンマーで測定される反発度は，コンクリート表面の乾燥状態の影響を受けることが明らかになっていますが，その影響の程度については必ずしも明確ではありません。このため各種基準類でも，明確な補正方法は示されていません。

しかし，調査の現場ではどうしても表面がぬれている箇所での測定が避けられない場合もあると考えられます。そこで，ポイント２では，

1) 測定位置が湿っており打撃の跡が黒点になる場合：測定された反発度に補正値３を加える

2) 測定位置がぬれている場合：測定された反発度に補正値５を加える

という補正方法を用いても良いことにしました。この補正方法は国内で販売されているテストハンマーのマニュアルにおける記述を参考に定めたもので，この補正値を定めるための系統立てた実験を特別に行ったわけではありませんが，おおむね妥当な値であると考えます。

参考文献：

古賀裕久・河野広隆・伊藤祐二・川崎克己：コンクリート強度推定のための反発度測定における乾燥・吸

水状態の影響，土木学会第57回年次学術講演会，pp. 313-314，2002

質問４

「６つのポイント」のポイント４では，材齢20日で測定した場合の補正として，算出された推定強度を1.12倍するように指定されていますが，1.15倍の誤りではありませんか？

回答：

ポイント４での補正値は，材料学会の「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試験判定方法指針(案)」(「材料試験」第７巻，第59号，pp. 40-44)に基づいたもので，誤りではありません。他の文献(テストハンマーのマニュアル等)では，材齢20日での補正値として1.15とされている場合もありますが，国交省の調査では1.12を用いてください。なお，文献によって補正値が異なる理由としては，補正値を算出した際の計算方法の違いなどが考えられますが，明確ではありません。

質問５

「６つのポイント」のポイント４では，1) 原則としてコンクリートの材齢28日から材齢91日の測定すること，2) 材齢28日から材齢91日の間に測定した場合には材齢に応じた補正を行わないこと，などとされていますが，テストハンマーのマニュアルなどを見ると，試験時の材齢に応じた補正係数(材齢係数)が掲載されています。「６つのポイント」で，この材齢係数を用いない理由を教えてください。

回答：

大気中にあるコンクリートは，表面から徐々に乾燥し，その影響からごく表面の部分のみが非常に硬くなる場合があります。このため，反発度を測定するコンクリートの材齢が大きいほど，圧縮強度に比して高めの反発度が測定されると考えられています(注1)。テストハンマーのマニュアル等では，上記のような影響を避けるため，測定時のコンクリートの材齢に応じた補正係数(材齢係数)を用いる方法が紹介されている場合があります。

しかし，材齢係数には，

1) 数値そのものが他の試験方法から引用されたものであり，テストハンマーを用いた実験等を行って定められたものではないこと(注2)
2) 測定面の乾燥状態は，材齢の他にも，周辺環境や測定面の向き，コンクリートの配合など様々な影響を受けることが容易に推測され，材齢のみで一律に評価することは難しいと考えられること

などの問題点があり，実際に，長期材齢のコンクリートを試験した実験結果では，補正値が妥当でないと考えられる場合も少なくありません(→質問８)。したがって，材齢係数を用いたからと行って，推定結果の精度が向上するとは限りません。

一方，新設構造物の構造体コンクリートの品質を確認することを目的とすると，測定時のコンクリートの材齢をある程度限定でき，材齢による影響を少なくできるものと考えられます。そこで，「６つのポイント」では，現場での調査のしやすさ等を考慮し，コンクリートの材齢が28日～91日の間に調査を行い，その間に得られた反発度に対する材齢による補正は行わないことにしました。

注：

1) 他に，表面付近のコンクリートの中性化(炭酸化)も反発度と強度との関係に影響すると考えられています。

2) ここでいう材齢係数とは，材料学会の「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試験判定方法指針(案)」の解説中で説明されたものを指します。いくつかの研究論文や海外のテストハンマー製造者のマニュアル中(英文)などでは，異なる材齢係数(補正値)や補正方法が提案されている場合もありますが，国内の構造物調査に適用されている実績は少なく，その妥当性については十分な検証がなされていないのが現状です。

参考資料：

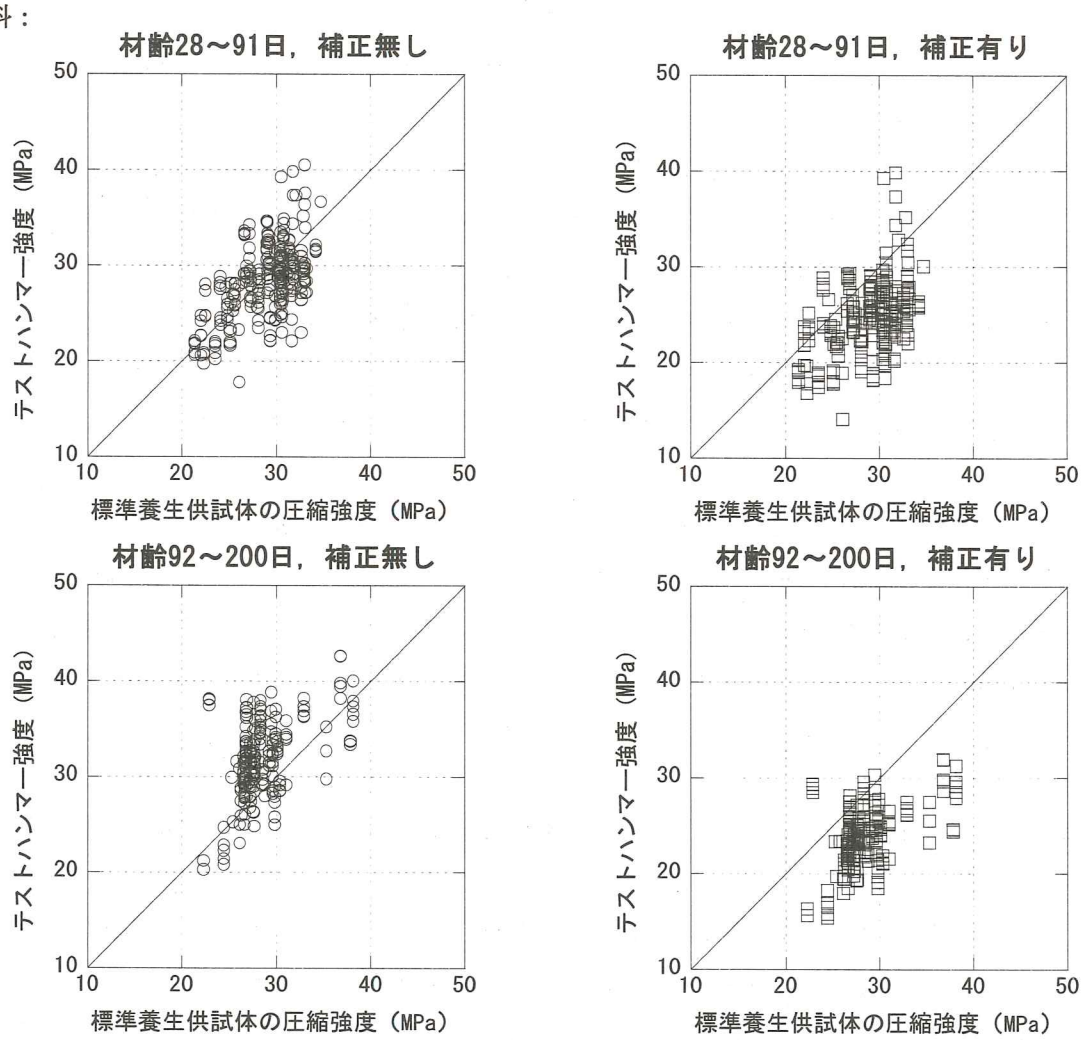


図　新設土木構造物における強度推定結果

※新設土木構造物においてテストハンマーによる強度推定調査を行った結果(テストハンマー強度)と，打設時に採取され標準養生されたコンクリートの圧縮強度(材齢28日)を比較した結果である。

※材齢28日～91日の試験結果は，約60件の土木構造物中の約260箇所で測定を行った結果である。材齢92日～200日の試験結果は，約60件の土木構造物中の約200箇所で測定を行った結果である。

※新設構造物でテストハンマーによる強度推定を行った結果に対して材齢係数を用いた補正を適用すると，強度の推定結果が標準養生供試体の圧縮強度よりも低くなった。

参考文献：

野田一弘・河野広隆・古賀裕久：反発度法による新設コンクリート構造物の強度推定結果，第24回日本道路会議一般論文集，A，pp.344～345，2001

質問6

「6つのポイント」では，ポイント4の強度推定方法のフロー図中で，測定方向が地面に対して水平でない場合には補正を行う用に指示されていますが，補正値がわかりません。

回答：

打撃後に重錘が戻ってくる距離は重力の影響を受けるので，地面と水平に打撃した場合以外では，測定方法による補正を行わなければ行けません。この補正値は，土木学会規準(JSCE-G504)によるものとしました。土木学会規準(JSCE-G504)は，土木学会の「2002年制定コンクリート標準示方書［規準編］土木学会規準」などに掲載されていますので，こちらを参照してください。「6つのポイント」では，著作権の関係から補正値を算出する図を掲載していません。

質問７

「６つのポイント」では，ポイント５の強度推定方法の文中に、「国土交通省の調査では、呼び強度２４程度の土木用コンクリートを主な対象としていることから、材料学会提案の換算式を使用し強度の推定を行うこととしています」とありますが，この推定式は，呼び強度４０程度の比較的高強度のコンクリートには適さないのでしょうか？

回答：

材料学会式が提案された当時(1958年)と現在では，コンクリートに使用されている材料(セメント，骨材，混和剤など)が異なっていると考えられます。この影響については必ずしも明確ではないのですが，特に高強度コンクリートや高流動コンクリートは近年開発された比較的新しい材料であり，材料学会の提案式を用いて強度の推定を行うことが妥当かどうかは明らかではありません。高強度コンクリートや高流動コンクリートの反発度を測定して材料学会式を用いた強度推定を実施すると，その実際の強度よりもかなり低く推定されるという調査結果もありますので，注意が必要です。

なお，高強度のコンクリートが使用されるプレストレストコンクリート構造物は一般的な鉄筋コンクリート構造物よりも入念にコンクリートの品質管理が行われていることから，国土交通省ではプレストレストコンクリート構造物をテストハンマーによる強度推定調査の対象外としています。

参考文献：

古賀裕久：テストハンマーによる強度推定調査について，土木技術資料(建設技術Q＆A)，Vol.44，No.11，p.14，2002.11

濱尚史ほか：反発硬度法による高強度・高流動コンクリートの強度推定に関する実験，土木学会第56次学術講演会講演概要集，第５部，pp.858-859，2001

質問８

「６つのポイント」は，新設構造物の初期点検時に用いる資料ですが，既存構造物の調査に用いることはできませんか？

回答：

「６つのポイント」のうち，ポイント１～３まではテストハンマーの基本的な取扱い方について説明を加えたものであり，新設・既設に関係なくご参照いただけます。しかし，材齢によってコンクリートの反発度と強度の関係が変化するおそれがあり(→質問５)，ポイント４以降の強度推定方法で，材齢が特に大きい既存コンクリート構造物のコンクリート強度を推定することは難しいのが現状です。

従って，既存コンクリート構造物に使用されているコンクリートの圧縮強度を正確に知る必要がある場合には，強度推定調査を行った箇所の一部でコア試料の採取などを行って，調査する構造物ごとに反発度と強

度の関係を求めることなどを検討する必要があります。

参考資料：

表　土木研究所で実施した既存構造物の調査事例

構造物	部位	基準反発度	推定強度 (N/mm²)		コアの圧縮強度 (N/mm²)	中性化深さ (mm)
			材齢補正前	材齢補正後		
A橋 材齢30年	P2	63	62.0	39.1	60.1	2
		64	63.3	39.9		
	P4	47	41.7	26.3	35.7	21
		51	46.8	29.5		
	P26_a	62	60.7	38.3	57.1	4
		60	58.2	36.7		
	P26_b	62	60.7	38.3	61.4	4
		61	59.5	37.5		
	P28	59	56.9	35.9	46.5	6
		56	53.1	33.5		
B橋 材齢60年	P2	54	50.6	31.9	28.5	4
		51	46.8	29.5		
C橋 材齢35年	A1	45	39.2	24.7	14.9	59
		40	32.8	20.7		
	G1_a	56	53.1	33.5	59.5	4
		60	58.2	36.7		
	G1_b	60	58.2	36.7	66.9	2
		60	58.2	36.7		
D橋 材齢35年	P3	54	50.6	31.9	56.8	0
		52	48.0	30.3		

※材齢係数補正後：材齢係数として推定結果に0.63を乗じた場合で，多くの調査箇所では推定精度の向上に寄与していない。なお，コンクリートの材齢はいずれもおおよその値である。

参考文献：

国土交通省土木研究所：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書，共同研究報告書，第269号，2001

質問 9

各所で引用されている材料学会の「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試験判定方法指針(案)」について研究するため資料を探しているのですが，入手が困難です。

回答：

いわゆる材料学会式が記載されている資料「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試験判定方法指針(案)」は，(社)土木学会発行のコンクリート・ライブラリー第38号「コンクリートの品質管理試験方法」にも転載されています。

参考文献：

土木学会：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試験判定方法指針(案)，「コンクリートの品質管理試験方法」(コンクリート・ライブラリー第38号)，pp. 85-90，1974