共同研究報告書
第285号2003年3月

ＰＣ部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究報告書

―テストハンマーによるＰＣ部材のコンクリート強度推定に関する検討―

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
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

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285号2003年3月

ＰＣ部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究報告書

―テストハンマーによるＰＣ部材のコンクリート強度推定に関する検討―

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
（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

要　旨

テストハンマーによる強度推定法のプレストレストコンクリートへの適用性を検討するため，工場製品を用いた実態調査，高強度コンクリートを含む種々のコンクリート供試体を用いた室内試験，打撃時のコンクリートの弾塑性変形と測定される反発度の関係に関する試験を行ったので，その結果を報告する。

キーワード：テストハンマー，非破壊検査，高強度コンクリート，強度，反発度，弾塑性変形

ＰＣ部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究委員会

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	
	主任研究員	渡辺　博志	
	研　究　員	田中　良樹*	（～平成 14 年 3 月）
	交流研究員	葛西　康幸	（平成 13 年 4 月～）
	交流研究員	田中　秀治	（平成 14 年 4 月～）
(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会		藤田　　学	
		今井　昌文	（～平成 14 年 3 月）
		佐藤　重一	（～平成 14 年 3 月）
		鈴木　雅博	
		竹本　伸一	
		田中　政章	
		棚橋　和夫	（平成 13 年 4 月～）
		谷口　秀明	
		手塚　正道	（平成 14 年 4 月～）
		中田　順憲	
		中村　定明	
		長井　健雄	
		蓑田　理希	（～平成 13 年 3 月）

＊　現　独立行政法人土木研究所　企画部研究企画課　主査

目　次

1. 目的 1

2. 工場調査 2

2.1 目的 2
2.2 調査方法 3
2.3 調査結果及び考察 4

3. 反発度への影響要因に関する要素試験 10

3.1 目的 10
3.2 コンクリートの条件 10
3.3 供試体の条件 12
3.4 テストハンマー試験の条件 12
3.5 テストハンマー以外の試験 13
3.6 試験結果および考察 13
3.6.1 試験に供したコンクリートの圧縮強度およびヤング係数 13
3.6.2 テストハンマー用供試体の表面含水率 21
3.6.3 基本配合における反発度と圧縮強度の関係（養生、材齢の影響を含む） 24
3.6.4 フレッシュコンクリートの空気量の増加が反発度に及ぼす影響 33
3.6.5 骨材量および軽量骨材が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響 34
3.6.6 供試体の湿潤状態が反発度に及ぼす影響 35
3.6.7 圧縮応力が反発度に及ぼす影響 36
3.6.8 供試体の寸法、型枠の種類および測点数が反発度に及ぼす影響 37
3.6.9 同一個所連続打撃による反発度の変化 38
3.6.10 供試体の表面を切断した面における粗骨材部分の反発度 41
3.6.11 軽量骨材を用いた供試体におけるテストハンマーの種類が反発度に及ぼす影響 42
3.6.12 反発度とヤング係数の関係 42

4. テストハンマーの原理に関する試験 47

4.1 目的 47
4.2 試験条件 48
4.3 テストハンマーの原理 49
4.3.1 テストハンマーの動作機構及び基本的な考え方 49
4.3.2 反発度の数式化 50
4.3.3 弾塑性力学における2物体の接触問題 56
4.3.4 硬度の位置付け 59
4.4 試験結果および考察 61
4.4.1 静的圧入試験での荷重－変位曲線 61
4.4.2 変形に対する荷重の影響 69
4.4.3 コンクリートの弾性変形が全弾性変形に占める割合 74
4.4.4 変形、ブリネル硬度及び計算反発度とコンクリートの特性の関係 75
4.4.5 エネルギー効率ηの算出 96
4.4.6 計算反発度と測定反発度 98
4.4.7 反発度と圧縮強度の関係における高強度域特有の問題 105

5. まとめ 107

1. 目的

近年、コンクリート構造物の早期劣化やコンクリート片の剥落事故を契機として、本来耐久性に優れたコンクリートに対する信頼性が問われつつある。その一方では、コンクリート構造物のストックは増加の一途にあり、例えば、橋梁は2010年頃から供用年数50年以上のものが急増し、架替えが現在の新設のペースを上回る可能性が指摘されている[1)]。そのため、現存の構造物に対して適切な維持管理により、長寿命化を図るとともに、今後の建設に当たっては、計画・設計段階から耐久性と維持管理を十分に検討し、これを実現するための適切な施工と維持管理を実施していくことが重要である。

このような社会的な背景を鑑み、国土交通省（旧建設省、旧運輸省）および農林水産省は、土木コンクリート構造物耐久性検討委員会を設置し、2000年3月には、「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言」を発表した。この中では、鉄筋のかぶりやコンクリートの品質を確保するため、非破壊試験法を活用した検査システムの必要性が示された。次いで、国土交通省は、通達(国官技第61号「土木コンクリート構造物の品質確保について」、国コ企第2号「土木コンクリート構造物の品質確保についての運用」、2001年3月29日)を示し、2001年4月以降には、テストハンマーによるコンクリートの調査が新設の重要構造物で行われている。

テストハンマーによるコンクリートの強度推定は、1948年にスイスのE.Schmidtがシュミットハンマーを考案して以来、簡便な非破壊検査として世界的に広く利用されてきた。我が国においても、考案から10年後の1958年には日本材料試験協会において試験方法案[2)]がまとめられ、土木研究所においても、1973年にはこの検査法の適用について検討を行っている[3)]。テストハンマーに関する研究はこれまでに膨大な件数が発表され、それらの成果を踏まえて、土木学会規準[4)]、日本建築学会マニュアル[5)]も制定されている。

この検査法は、対象構造物に試験器を押し当てるだけの簡便なものであることから、検査の装置や測定方法は検査の実務面では広く浸透している。しかし、装置自体の規格には定まったものがなく、かつ、反発度による圧縮強度の推定結果には、かなりの誤差が避けられないといった問題があるのも事実である。土木学会規準では、テストハンマーを用いた推定強度は、試験体と同じコンクリートを用いた円柱供試体の圧縮強度とは±50%、場合によってはそれ以上に異なることを考慮して適用しなければならないと注意書きしている[4)]。土木研究所では、このような状況を踏まえ、テストハンマーによるコンクリートの圧縮強度の推定を円滑に実施できるよう、テストハンマーの精度などについて調査・検証を行っている[6)]。

国土交通省の通達は、耐久性が問題となりやすい比較的強度の小さいRC部材を対象としていて、PC部材は対象から除外されている。PC部材に使用される高強度コンクリートは耐久性に優れていること、また、高強度コンクリートに対してテストハンマーによる強度推定の精度が必ずしも検証されていないことなどがその理由に挙げられる。しかし、テストハンマーの適用限界が明確になっていないこともあり、一部にはPC部材のコンクリートに対しても調査範囲が拡大されている事例もあるようである。高強度域でのテストハンマーによる品質の判断を行うに当たっては、試験データを蓄積し、推定精度を把握することや反発度に及ぼす影響要因を明確にし、その推定精度に見合った利用を心がけることが重要であると思われる。

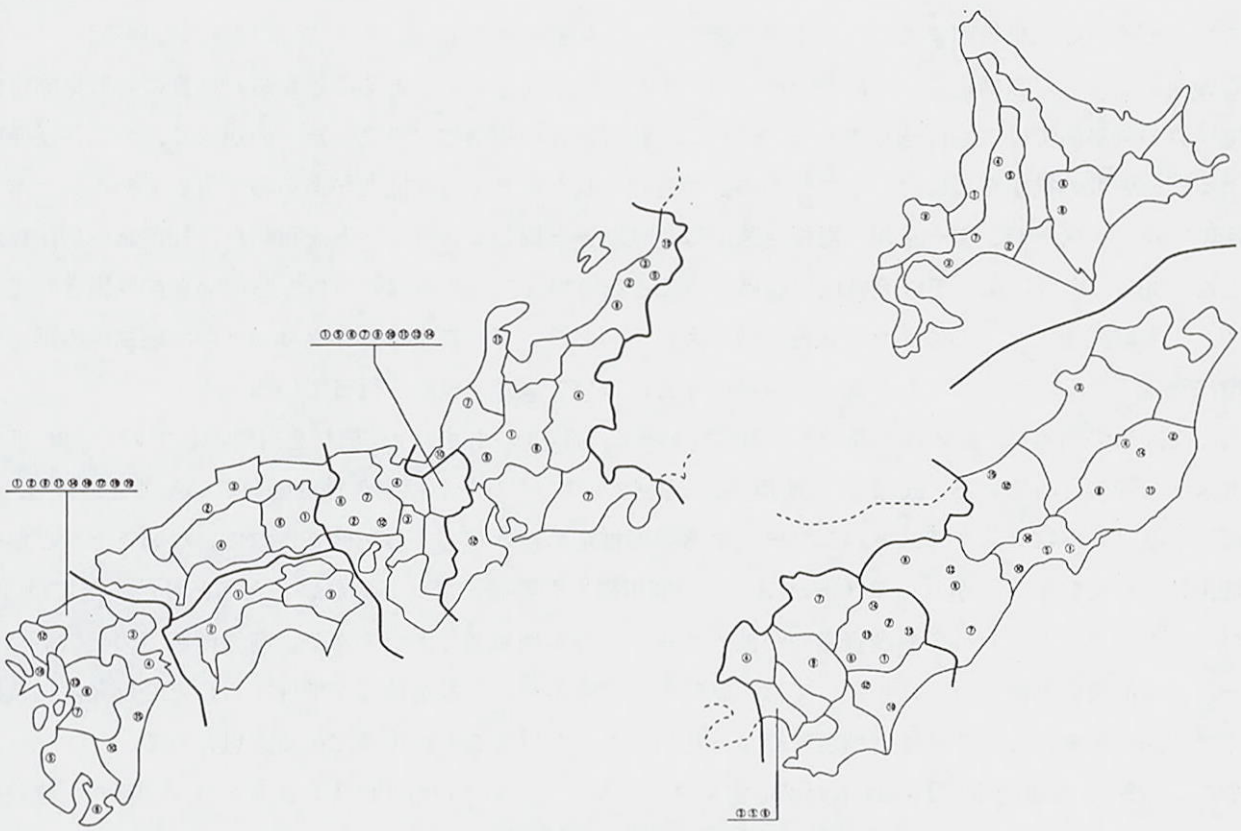
そこで、(独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメントチームと(社)プレストレストコンクリート建設業協会（以下、PC建協と表現する）から構成される「PC部材の軽量・高耐久化に関する共同研究委員会」で

は、テストハンマーによる PC 部材のコンクリート強度推定に関する検討を行うこととした。実施内容は、PC 建協会員に所属する PC 工場で製造されたプレキャスト PC 桁などの工場製品に対するテストハンマーによる圧縮強度の推定精度の実態調査、反発度への影響要因に対する要素試験およびテストハンマーの原理に関する試験によって構成される。

2. 工場調査

2.1 目的

テストハンマーによる圧縮強度の推定精度の実態を把握する方法としては、文献調査と構造物調査が考えられる。文献の多くは、3 章の内容と同様に小規模な供試体を用いた試験室レベルでの結果であるが、国土交通省の調査が実際の新設構造物を対象にしていることを考えると、実態を把握する上では後者に関連した検討が必要になるものと思われる。しかし、構造物に対する調査では、反発度の測定と同一材齢の供試体強度が明らかではなく、その代わりとして構造物からコア供試体を採取して圧縮強度試験を行うことも困難である。そこで、本研究では、図－1 に示すとおり、PC 建協会員会社（正会員 41 社）が全国に PC 工場（93 工場）を有することを活かし、また、今後、工場製品に対してもテストハンマー試験が検査の一つになり得ることを考え、工場製品を対象とした調査によって、テストハンマーによる圧縮強度の推定精度の実態を把握することにした。



図－1　PC 建協会員会社の PC 工場の所在地 [7)]

2.2 調査方法

この調査は、テストハンマーによる圧縮強度の推定精度の実態を把握することが目的であることや、工場側の自主的な協力によるものであることなどを考え、テストハンマー試験の実施に当たっては、なるべく条件を絞り込まないことにした。そのため、高強度コンクリートを使用したPC製品（プレキャストPC桁、ポストテンション桁）を主たる対象とするものの、普通強度域との関係も確認する目的で、工場の自主的な判断によってRCプレキャスト製品に対して試験を実施するのも良いこととした。

表－1 は、各社へ配布した記入用紙である。記入用紙は、協力工場の負担をなるべく軽減するため、必要最低限の内容のみとし、配合や測定個所などは添付資料での提出とした。ただし、将来的な結果の活用を考え、工場（会社名、住所）、対象製品（プレキャストPC桁，ポストテンション桁，RC床版など）、使用したコンクリート（使用材料、配合、フレッシュ性状、圧縮強度）、製品の養生（蒸気養生，気中養生）、測定時のコンクリート表面の湿潤状態（乾燥，湿潤）、応力状態（PC製品の場合）、テストハンマー（種類、機種）、打撃方法（個所、角度）、試験時の材齢（1日～）などを明確にし、資料として保存することにした。表中には補正値を記載しているが、打撃方向以外はPC部材に対して必ずしも明らかではないので、試験条件のみ

表－1　工場調査に使用した記入用紙

テストハンマー(シュミットハンマー)試験の調査票

会社名				工場名	
担当者名		試験者名		Tel	FAX
製品の種類				試験日	
テストハンマーの種類		製造会社		製造番号	

測定箇所A				測定箇所B				測定箇所C			
反発度				反発度				反発度			
			異常値を除いた20点の平均値				異常値を除いた20点の平均値				異常値を除いた20点の平均値
打撃方向 傾斜角			(°)	打撃方向 傾斜角			(°)	打撃方向 傾斜角			(°)
			補正値				補正値				補正値
試験体 材齢			(日)	試験体 材齢			(日)	試験体 材齢			(日)
			補正値				補正値				補正値
養生方法				養生方法				養生方法			
乾燥状態	乾燥している			乾燥状態	乾燥している			乾燥状態	乾燥している		
(丸を付ける)	濡れている			(丸を付ける)	濡れている			(丸を付ける)	濡れている		
			補正値				補正値				補正値
打撃方向と直角方向に圧縮応力を受けている場合				打撃方向と直角方向に圧縮応力を受けている場合				打撃方向と直角方向に圧縮応力を受けている場合			
圧縮応力			(N/mm²)	圧縮応力			(N/mm²)	圧縮応力			(N/mm²)
			補正値				補正値				補正値
基準反発度				基準反発度				基準反発度			
								3箇所の平均基準反発度			

添付資料

□ 製品の図面(測定箇所A,B,Cがわかるように印を付け	□ 混和材料試験成績表(メーカーより入手)
□ 配合報告書(使用材料、配合表など)	□ テストハンマーの資料(強度換算図式、試験方法等)
□ 配合計算書(W/Cの算定など)	□ 管理用供試体の圧縮強度試験結果(養生、材齢、強度)
□ セメント試験成績表(メーカーより入手)	
□ 骨材試験成績表	添付した資料の□にチェックを入れる

で補正値を記載しなくてもよいことにした。

2.3 調査結果及び考察

調査依頼に対し、14 社 40 工場からの回答を得た。調査結果の特徴を、以下にまとめた。なお、測定データは、反発度と圧縮強度（製品同一養生を施した円柱供試体の実測値）であるが、両者の関係を調べる上で圧縮強度の記載がないものは除外した（全 131 データのうち 7 データに記載なし）。

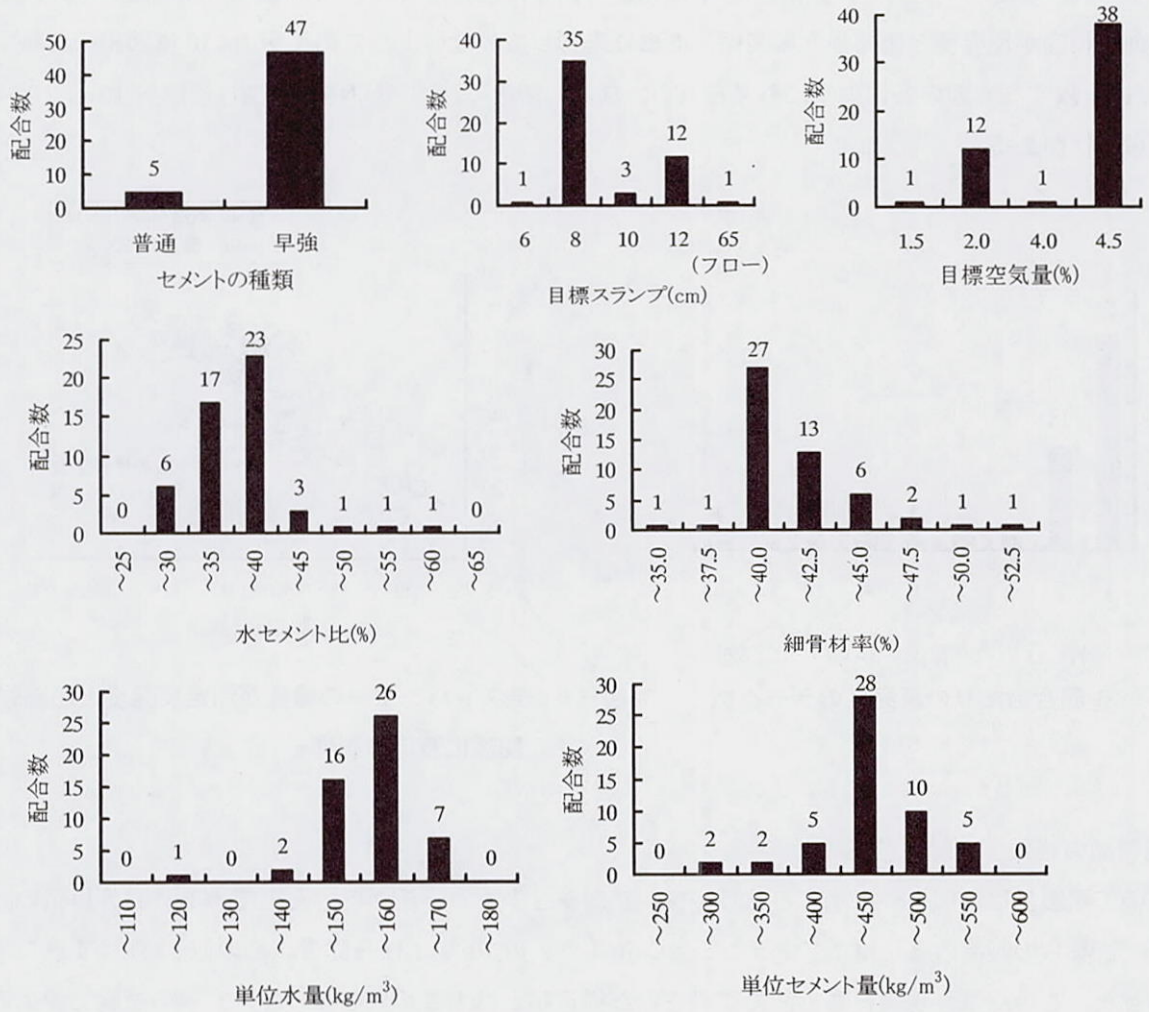
(1)コンクリートの条件

表－2 および図－2 は、収集された配合に関するデータをまとめたものである。回答があった 52 データ（回答 54 のうち、2 データには配合の記載なし）の配合には、PC 製品を中心とした調査結果の特徴が見られ、使用されたセメントは全体の 90%に相当する 47 配合が早強ポルトランドセメントである。スランプは 8cm が最も多いものの、ポストテンション桁や RC 製品などにおいてスランプ 12cm としたものや高流動コンクリートとしてスランプフロー65cm としたものも含まれる。空気量は、レディーミクストコンクリートと同様に 4.5%とするものが 38 配合、2.0%とするものが 12 配合であった。

水セメント比の平均は 36.1%で、30～40%の範囲でデータがほとんどであり、これも PC 製品であることの特徴と言える。細骨材率、単位水量および単位セメント量の平均値は、それぞれ、41%、153kg/m^3、430kg/m^3 となった。水セメント比が平均 36.1%で、関西地区のデータも多いことを考えると、単位水量が一般の生コン工場の配合よりも小さい。例えば、文献 8)で紹介された現場打ちコンクリートの平成 3 年度全国平均は、設計基準強度 40N/mm^2 の PC 橋梁用コンクリートでは、水セメント比 40.0%、スランプ 9.8cm、単位水量 176.5kg/m^3、 単位セメント量 442kg/m^3 である。テストハンマーの反発度が骨材量の影響を受けるとすれば、今回の工場製品を対象とした調査結果は、現場打ちコンクリートを用いた構造物とは多少異なる可能性を有しており、3 章の要素試験において調査結果を実証することが必要となる。

表－2　配合に関するデータ

配合数			52			
セメントの種類			普通	5	早強	47
	スランプ(フロー) (cm)	空気量 (%)	水セメント比(%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/ m^3)	単位セメント量 (kg/ m^3)
平均	9 (スランプのみ)	3.9	36.1	41.0	153	430
最大	65 (フロー)	4.5	60.0	52.0	170	525
最小	6	1.5	28.5	35.0	120	267



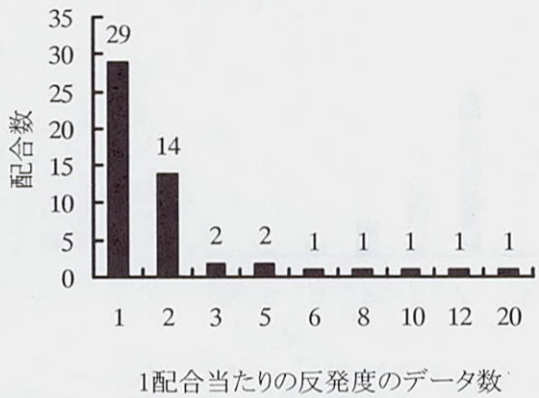
図－2　配合に関するデータの分布

(2)テストハンマーの条件

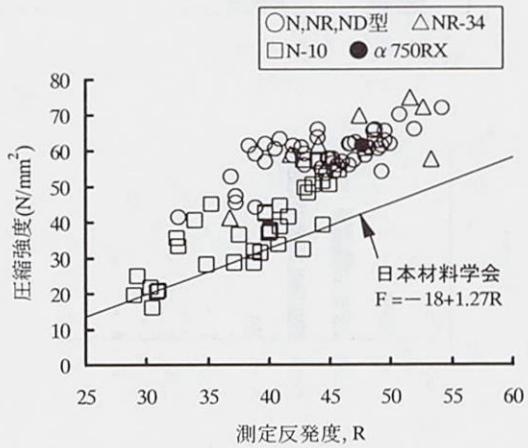
反発度のデータは、54 種類（52 配合）の製品に対して 131 個を得た。1 配合に対して 1 データのものと複数のものがあることを意味し、調査結果を分析する上ではデータの偏在の影響を多少受ける可能性を考慮しなければならない。ただし、図－3 に示すとおり、1 配合当たり反発度のデータが 1 ないし 2 のものがほとんであるので、配合の偏りの影響は小さいものと思われる。

反発度を得るのに使用したテストハンマーの種類は、P 社製の N 型に分類されるものがほとんどであり、データの記録機能を有するものとして、記録紙が付いた NR 型、デジタル処理機能が付いた ND 型も使用されていた（ただし、α750RX と記載されたものが 1 工場、全く記載のないのが 2 工場、P 社製という記載のみが 1 工場存在する）。回答用紙には N 型という記載がほとんどであったが、中にはさらに製品番号を付記したものが存在した。その記載によれば、P 社製の N 型には製造時期が異なる N-10 と N-34 の 2 種類が少なくとも存在し、PC 工場で使用されていることになる。製造時期による試験装置の仕様の違いはメーカーのカタログなどで明らかにされていない。

そこで、図－4 に示すとおり、試験器を 4 種類に分類し、測定反発度と圧縮強度の関係を調べた。全体的には機種の相違が反発度と圧縮強度の関係にあまり影響していないようであるが、N-10 は図中の材料学会式[2)]の直線に一致するものの多いようにも見られる。なお、図中の○印（N,NR,ND 型）には N-10 と N-34 が含まれる可能性がある。



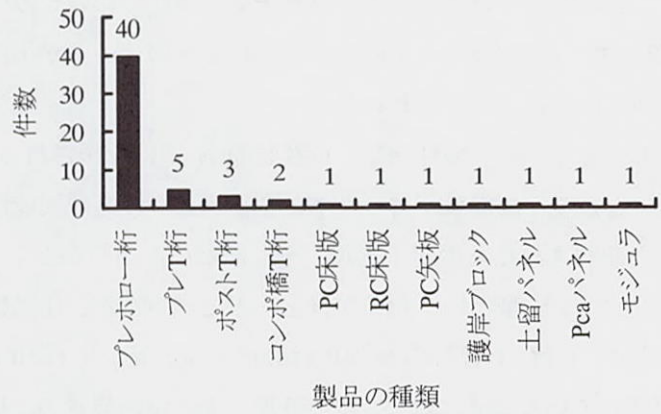
図－3　1 配合当たりの反発度のデータ数



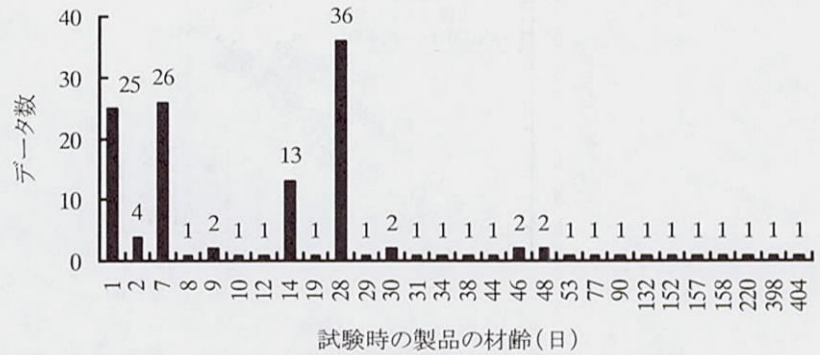
図－4　テストハンマーの機種が測定反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響

(3)工場製品の種類

対象の工場製品は、図－5 に示すとおり、プレテンションホロー桁がほとんどである。回答用紙の記載によれば、これらの製品の養生はポストテンション桁 1 件、RC 床版 1 件を除き、その他 52 体はすべて蒸気養生であった。この点は、現場打ち工法で建設された構造物とは大きく異なるので、3 章の試験で養生の影響を確認することにした。試験時の製品の乾燥状態は、4 件が「濡れている」である他は、「乾燥している」という回答であった。また、PC 製品に関してはプレストレスの導入応力を記載したものがあり、その範囲は 3～14N/mm^2 で、測定個所に関しては、プレテンション PC 桁では支点・横桁部で測定されているものが多く、中間部、中空部において測定を行ったケースも存在した。



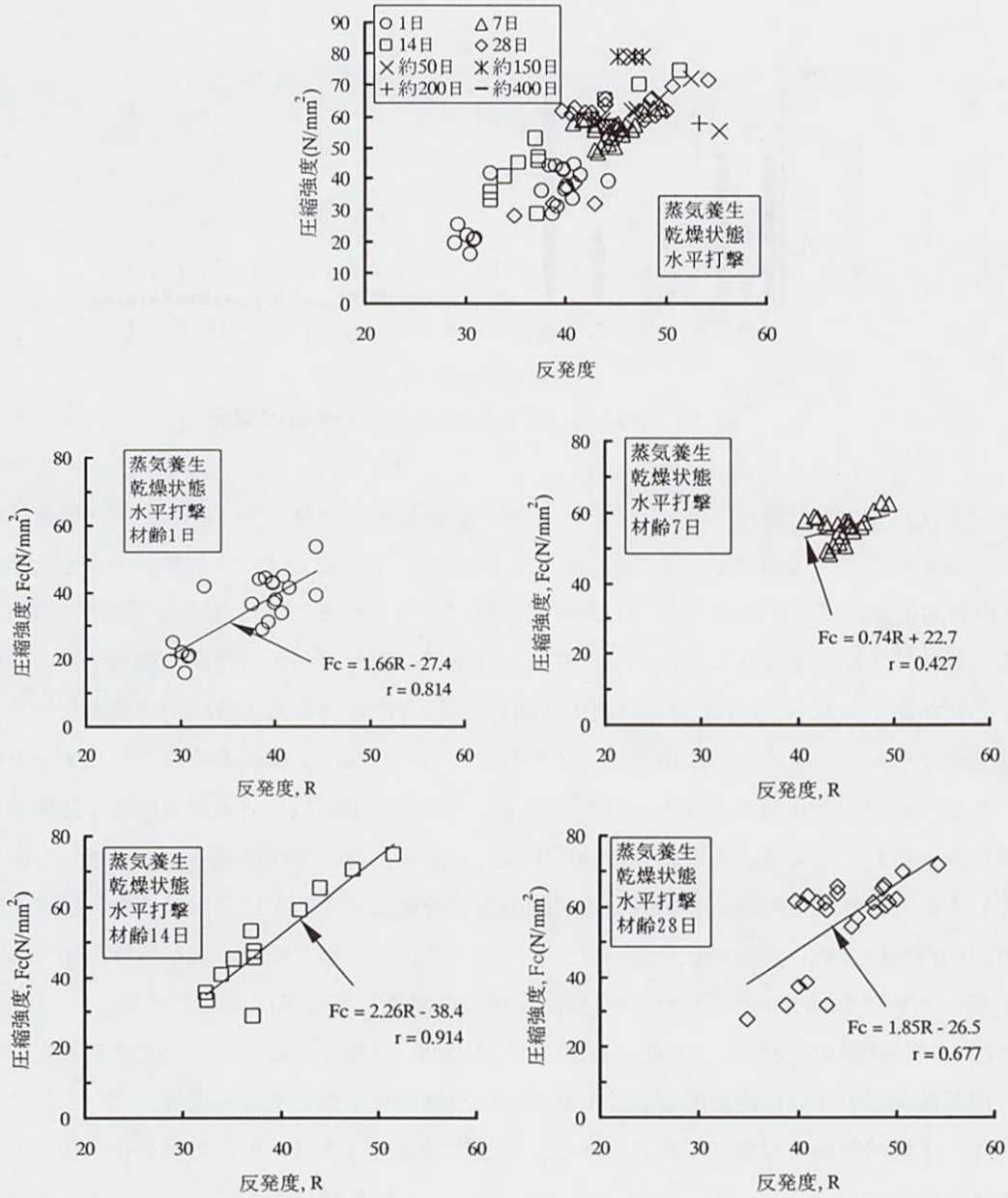
図－5　測定の対象になった製品の種類と件数



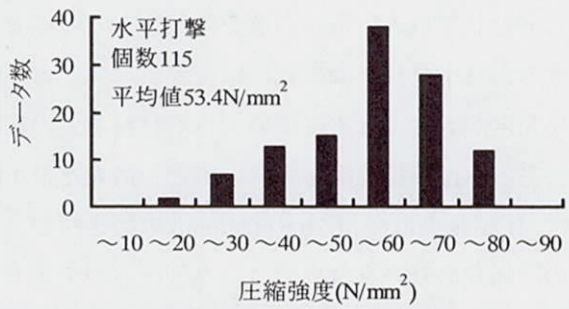
図－6　試験時の製品の材齢とデータ数の関係

次に、コンクリートの材齢について調べると、図－6 に示すとおり、テストハンマー試験時の製品の材齢は 1 日から 404 日までの広範囲であったが、材齢 1 日、7 日、14 日および 28 日のデータが大半を占める。一般に、工場製品の品質に対する検査は、材齢 14 日以降に実施されることになるので、テストハンマーの反発度に対する材齢補正が必要である場合には、材齢 7 日までのデータが多い今回の調査結果の評価においても考慮する必要がある。なお、PC 部材への適用に関しては、PC 特有の緊張時の初期強度をテストハンマーを用いて補助的にチェックするような用途も考えられる。図－7 は、工場調査で得られたデータの中から、蒸気養生、製品が乾燥した状態および水平打撃で測定したものに限定し、材齢が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響を調べたものである。工場調査の結果では、材齢補正の必要性は見られないが、材齢以外の要因も影響しているので、3 章における要素試験で材齢の影響を確認することにした。また、テストハンマー試験（水平方向の打撃による）を実施した時のコンクリート強度は、図－8 に示すとおり、50～60N/mm^2 のデータが最も多く、平均 53.4N/mm^2 となり、PC 製品を中心に調査した結果が現れている。

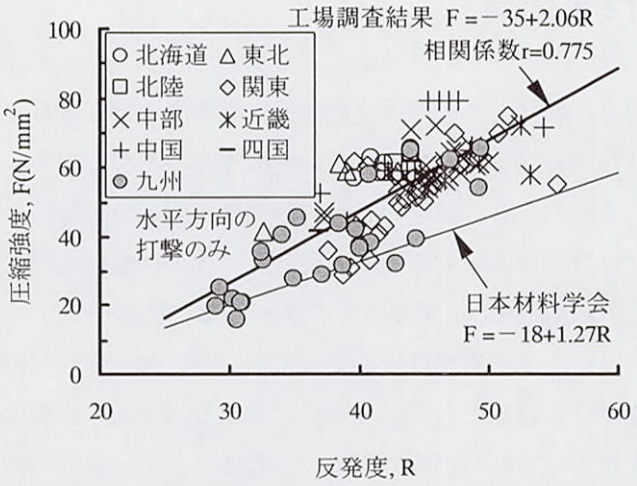
テストハンマー試験の反発度は、前述の打撃方向、湿潤度、材齢などによって補正することになっている。しかし、湿潤度などの評価は定量的でなく、材齢に伴う補正係数も必ずしも明らかではない [6]。また、今回の調査は PC 工場の製品を対象にしたことから、高強度域のコンクリートに対する反発度において、各要因の影響度は明らかになっておらず、今回の調査結果のみでその影響度を判断するにはデータ数が少ない。そこで、ここでは、試験器の機械的な要因である打撃方向のみを水平方向に限定するにとどめ、図－9 に示すように反発度と圧縮強度の関係を総合的に調べた。図－9 では、工場が立地する地域を凡例にしているものの、反発度と圧縮強度の全体的な傾向において地域性は見られない。図中には、日本材料学会式 [2,4]、工場調査のデータによる回帰式および目安として最大・最小の値を結んだものの線を付記している。工場調査で得られた結果は、一部のデータを除き、日本材料学会の式には合致しないことが明らかである。また、その回帰式から得られる圧縮強度は、反発度が大きくなるに従い、日本材料学会の式による値よりも大きくなる。さらには、反発度が大きいほど、あるいは圧縮強度が大きいほど、最大と最小の差が大きいことがわかる。例えば、反発度が 40 であっても、圧縮強度は概ね 30～60N/mm^2 の幅を持つ。このような結果を鑑みれば、既往の推定式、今回の工場調査の回帰式の双方を含め、コンクリートやテストハンマーの諸条件を限定しない、汎用的な強度推定式に精度を要求することは困難であるものと判断される。



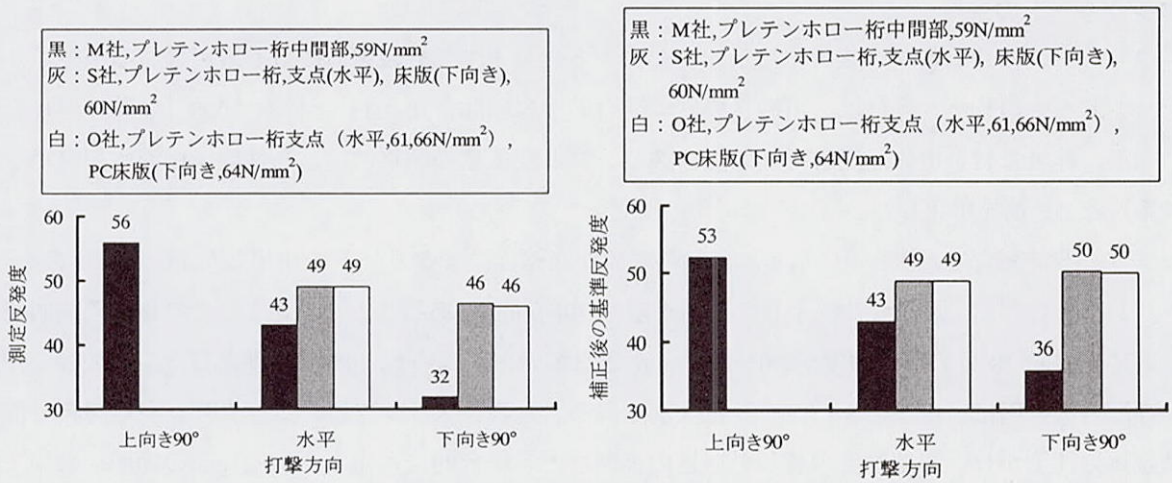
図－7　材齢毎に分類した測定反発度と圧縮強度の関係



図－8　工場調査における圧縮強度の分布（水平打撃に対応したデータに限定）



図－9　工場調査における反発度と圧縮強度の関係（水平打撃に限定）



図－10　打撃方向が異なる場合の反発度と圧縮強度の関係

(4)反発度の測定方法

調査結果には、一部、鉛直方向の上向きおよび下向きのデータが含まれていたので、図－10 に示すとおり、打撃方向について、反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響を確認した。打撃方向の影響は、ハンマー中のおもりにかかる重力の作用に関係するもので、傾きによって作用する力の方向が変化することに伴うものである。一般には、土木学会規準 [4]に示された換算図を用いて、測定反発度の補正が行われ、反発度が大きくなるにしたがい、補正値が小さくなる傾向がある。換算図では反発度が 50 までしか記載されないが、図－10 の反発度 56 についてはおおよその値を計算して補正を行った。工場調査の中では、打撃方向を変えたものは 3 例のみであるが、いずれも、測定反発度は上向きの方が大きくなっている。しかし、補正後の基準反発度は、2 例（灰色、白色の印）は水平と下向きでほぼ一致するものの、1 例は、通常の補正値では 3 方向の基準反発度が一致しない。製品の場合には 3 方向の打撃方向の相違は、同時に測定面が異なることになり、その状態（凹凸、モルタル分の偏在など）が一定ではないので、いずれの影響であるか明らかではない。

3. 反発度への影響要因に関する要素試験

3.1 目的

2 章の工場調査の実施により、反発度と圧縮強度の関係は高強度域ほどばらつきが大きく、一般的に用いられる日本材料学会式と一致しなくなることを大まかに把握することができた。しかし、工場調査の結果には影響要因が複雑に関係し合うことから、個々の要因の影響度が明らかでない。今後、テストハンマー試験の実施が必要になった場合に、試験を実施する上での留意すべき事柄やばらつきを生じた原因の推定が難しい。また、これまでにも、配合や供試体の湿潤度などの要因に関する研究が行われているが、対象とした PC 部材に使用する高強度コンクリートでの影響度は必ずしも明らかになっていない。そこで、PC 部材に使用する高強度域のコンクリートを主たる対象として、反発度に対する諸要因の影響度を確認することにした。

なお、以降に記載する反発度とは、断りのない限り、湿潤度などの一般的な補正を行わない、水平方向の測定反発度を表すものとする。

3.2 コンクリートの条件

コンクリートの使用材料を、表－3 に示す。セメントには PC 部材の製造に最も多用される早強ポルトランドセメントを使用した。骨材は、川砂と砕砂の混合砂（容積混合比 1:1）と砕石 2005（硬質砂岩）を標準とし、一部、軽量骨材を用いた配合を加えた。スランプと空気量の調整には、高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）と AE 剤を併用した。

コンクリートの配合を、表－4 に示す。試験の対象が高強度コンクリートを使用した PC 部材である一方、テストハンマーの製造・販売会社が示した適用上限が 70N/mm^2 であることを考慮し、これまでの共同研究成果を参考に、材齢 28 日の圧縮強度が 50～60N/mm^2 となる水セメント比 40%を基準とした。比較した使用材料および配合の要因は、以下の 3 パターンに大別される。なお、スランプは、コンクリートの材料分離の有無、供試体の仕上がり、初期強度の著しい遅延の抑制などを総合的に考慮し、8～21cm の範囲において水セメント比が小さいほど大きくなるように調整した。

表－3　使用材料

材料名	種類、物性、成分	記号	
水	水道水	W	
セメント	早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm^3,比表面積4480cm^2/g)	C	
細骨材	鬼怒川産川砂(表乾密度2.58g/cm^3, 吸水率2.68%, F.M 2.75)と葛生産砕砂(硬質砂岩, 表乾密度2.64 g/cm^3, 吸水率0.94%, F.M2.99)の混合(容積比1：1)	NS	S
	造粒型膨張頁岩系軽量骨材(絶乾密度1.49g/cm^3, 24時間吸水率16.4%)	LS	
粗骨材	葛生産砕石2005A(硬質砂岩, 密度2.65g/cm^3, 吸水率0.60%,F.M6.65)	NG	G
	造粒型膨張頁岩系軽量骨材(絶乾密度1.35g/cm^3, 24時間吸水率8.8%, 最大寸法15mm)	LG	
混和剤	高性能AE減水剤,ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体	SP	
	AE剤,変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	AE	

表－4　コンクリートの配合

配合の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				絶対容積(m^3/m^3)		
				W	C	S	G	Vp	Vm	Vg
基本配合(B)		70.0	47.0	170	243	868	994	0.247	0.580	0.375
		65.0	46.6		262	853		0.253		
		60.0	46.0		283	835		0.260		
		55.0	45.4		309	813		0.268		
		50.0	44.6		340	787		0.278		
		45.0	43.6		378	756		0.290		
	基準	40.0	42.3		425	717		0.305		
		35.0	40.5		486	666		0.325		
		30.0	38.0		567	599		0.350		
骨材量変化配合	S	40.0	53.8	170	425	913	795	0.305	0.655	0.300
	T		50.4	195	488	795		0.350		
	U		69.2	170	425	1174	530	0.305	0.755	0.200
	M		100	272	680	1139	0	0.489	0.925	0
	P			557	1393	0		1	0	0
軽量骨材配合	NL	30.0	45.0	160	533	640	506	0.330	0.575	0.375
	LN					365	994			
	LL						506			

W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, W,C,S,G:水, セメント, 細骨材,粗骨材の単位量,
Vp,Vm,Vg:ペースト, モルタル, 粗骨材の単位量の絶対容積,
骨材の単位量:普通骨材は表乾密度,軽量骨材は絶乾密度

(1)基本配合

基本配合は、単位水量を 170kg/m^3、単位粗骨材絶対容積を 0.375m^3/m^3 および空気量を 4.5%とし、水セメント比 30～70%まで 5%ごとに変化させた。なお、今回の試験の目的が高強度域の検討であるので、水セメント比 60～70%については当初計画していなかったが、低強度域を中心とした既往研究との関連性が不明瞭であることから、試験途中で追加した。

反発度にはコンクリートの単位骨材量が影響するとした文献 9,10)を参考に、粗骨材量を一定にしてその要因を排除した。ただし、細骨材量も一定にすることも考えられたが、その場合には実際の構造物、工場製品に使用されている配合とはかなり異なる配合になることから、今回の試験では細骨材量は一定にしていない。また、基本配合の試験では、基準配合については、反発度に対する空気量の影響も確認するために空気量を 2 倍（約 9%）に増加したコンクリートについても確認した。なお、空気量は±0.5%の範囲を目標とし、ほとんどが目標の範囲であったが、配合及び練混ぜ量が多いことから、一部、±1.0%の範囲まで許容した。

(2)骨材量変化配合

水セメント比を基準配合と同一の 40%とし、それよりも骨材量を減少させた配合（S～P）の反発度を比較した。なお、基本配合についても細骨材量が変化しているわけであるが、ここで言う骨材量変化配合とは、水セメント比 40%において基本配合に対し、骨材量を変化させたものを対象とする。5 種類の配合のうち、配合 S～U は、高流動コンクリートなどを想定したものであり、基準配合よりも粗骨材量を減らし、その代わりに単位ペースト量を増やした。配合 U は配合 S と単位ペースト量を同一とし、単位粗骨材量の絶対容積をさらに 0.100m^3/m^3 減じたものである。配合 M はモルタル、配合 P はペーストである。配合 S～U の空気量

は、基準配合と同じ4.5%としたが、モルタルは、圧縮強度がコンクリートと大きく変わらないように、空気量を7.5%まで増やした。すなわち、1m^{3}の基準配合から粗骨材のみを除き、同一の配合比率で改めて1m^{3}になるよう計算し直したものである。ペーストに関しても同様の手法を考えたが、10%を超える過大な空気量を安定して確保することができないので、空気量は増加させなかった。そのため、後述のように他の配合よりも圧縮強度がかなり大きな値になった。

(3)軽量骨材配合

PC部材に対しても、軽量骨材コンクリートが使用されることがあることから、細骨材もしくは粗骨材に軽量骨材を使用した配合（軽量骨材配合と称す）を加えた。PC部材への適用を考慮し、材齢28日圧縮強度が50N/mm^{2}以上であることを前提にし、細骨材、粗骨材の双方に軽量骨材を使用した配合LLがその強度を満足する水セメント比30%にした。単位粗骨材量の絶対容積は基本配合と同様に0.375m^3/m^{3}としたが、材料分離の観点から単位水量を160kg/m^3、凍結融解抵抗性の観点からJIS A 5308に準じて空気量を5%にした。記号は、普通骨材をN、軽量骨材をLで表し、細骨材、粗骨材の順でNN、NL、LNおよびLLとしたが、NNは水セメント比30%の基本配合であるため、前述のとおり、単位水量などが他の配合とは多少異なる。

3.3 供試体の条件

容量100リットルの強制2軸ミキサを使用し、1バッチ当たり60リットル前後のコンクリートを製造した。普通骨材を使用した場合の練混ぜ方法は、セメントと細骨材を15秒間空練りしたのち、水と混和剤を投入して90秒間、最後に粗骨材を投入して90秒間とした。一方、絶乾状態の軽量骨材を使用した場合には、練混ぜ水が軽量骨材中に急激に吸水されるので、最初に軽量骨材と水の一部（0.5時間吸水率に相当する量よりも若干多め）を投入し、軽量骨材が羽根であまり粉砕しない程度として30秒間の撹拌を行い、その後は普通骨材の順序で練混ぜを行った。

圧縮強度試験にはφ100×200mmの円柱供試体を、テストハンマー試験には日本材料学会の試験[2)]と同様に200mm角の小型供試体を標準とし、一部、打撃数の影響を確認するために200×400×800mmの大型供試体を使用した。テストハンマー用の型枠には、PC工場を想定して鋼板を使用したが、大型供試体においては1面に合板を用い、両者の比較を行った。

圧縮強度用供試体は、JIS法に準じて突固めで作製したが、粘性の高いコンクリートも含まれるので、テストハンマー用供試体の製作には、突き棒と棒状バイブレータ（小型供試体は中央1個所、大型供試体は長手方向に中央部3個所）を併用した。供試体の養生方法は、標準水中養生（養生CN）、3日間湿潤養生以後気中養生（養生CA）、およびプレキャストPC桁製造ラインでの蒸気養生を行った後に気中養生（養生CS）である。試験時の供試体の材齢は1日～182日である。

3.4 テストハンマー試験の条件

テストハンマーには、シュミットハンマー（P社製）のN型とL型（軽量骨材配合のみ）を使用した。テストハンマー試験の測定面は、供試体の凹凸や付着物がないことを確認した。砥石などによる研磨は人為差が生じ、強度域やペースト量の相違によって研磨量が異なる可能性があると判断されたので行わないことと

した。しかし、テストハンマーの反発度には表面のモルタル（ペースト）層の影響があると思われたことから、一部の配合において供試体の表面から 2cm 程度を切断した面の粗骨材の切断面に対し、反発度を測定した。これにより、コンクリートの反発度のほぼ上限値を確認することになる。

1 面当たりの打撃数は、小型供試体では 20 点、大型供試体では 100 点とし、異常値を除いて平均値を反発度とした。土木学会規準に従い、測定した反発度の平均値の 20%以上のデータは異常値として除外した。養生 CN および養生 CA は、水中から供試体を取り出した後、5 分後に試験を開始することを標準としたが、一部の試験では、5 分後から 12 時間後までの反発度と表面含水率の変化を調べた。また、通常の試験は、測定点 1 個所あたり 1 回の測定であるが、PC 部材を対象とした文献 11)では、連続打撃による反発度の変化を調べている。そこで、今回の試験においても、材齢 28 日の一部の配合において、同一個所を 10 回連続的に打撃した場合の反発度を調べた。

また、今回の試験は PC 部材を対象にしているので、小型供試体の打撃方向に対して直角な圧縮応力を与え、供試体を加圧した場合の反発度の変化を調べた。日本材料学会の方法に準じ、0.74 N/mm^2(7.5kgf/cm^2) を標準とし、最大 9.8N/mm^2(100kgf/cm^2)までの圧縮応力が作用するように載荷した。なお、大型供試体は無載荷状態で試験を行った。

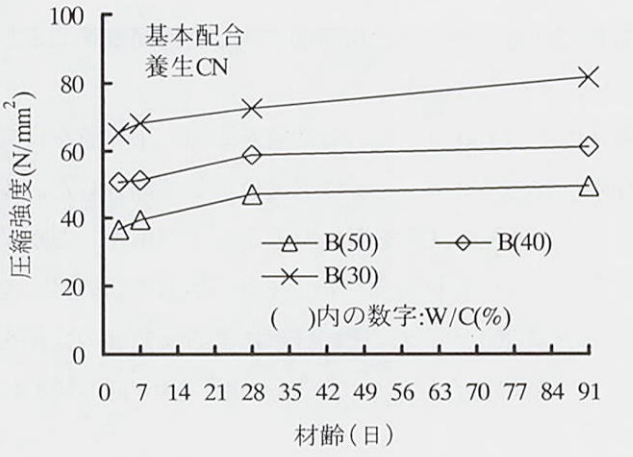
3.5 テストハンマー以外の試験

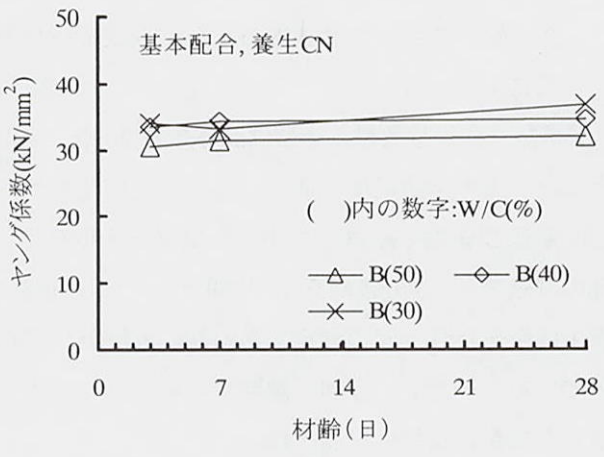
テストハンマー以外に実施した試験は、フレッシュ性状を確認するためのスランプ試験、空気量試験およびコンクリート温度の測定を行った。また、反発度との関係を調べるための圧縮強度試験、静弾性係数試験を、テストハンマー用供試体の表面含水率の測定である。表面含水率の測定にはハンディータイプの K 社製水分計（高周波容量式、20MHz、測定範囲：コンクリートは 0～12%、モルタルは 0～15%、人工軽量骨材コンクリートは 0～23%、測定精度：±0.5%）を使用した。

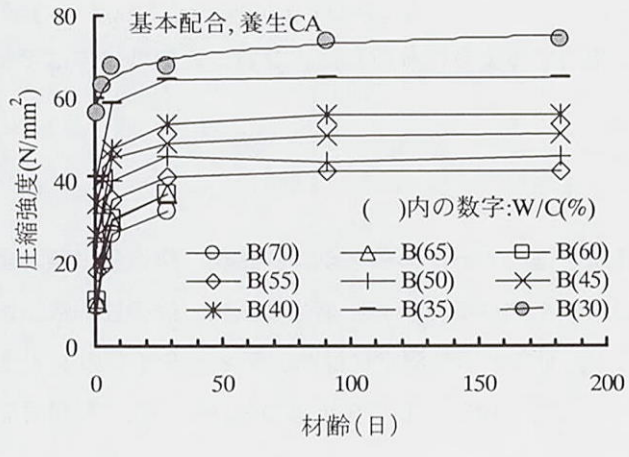
3.6 試験結果および考察

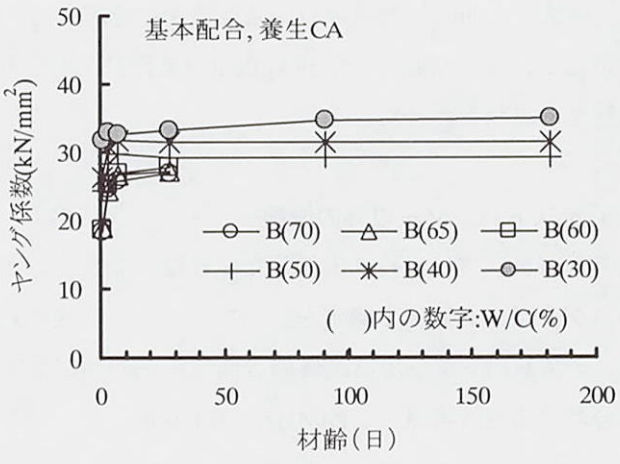
3.6.1 試験に供したコンクリートの圧縮強度およびヤング係数

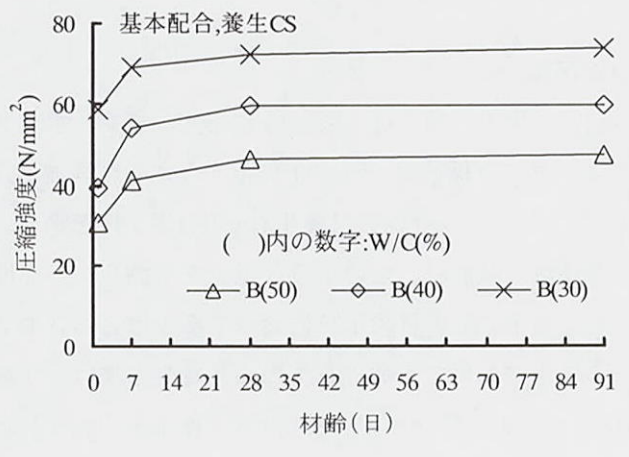
試験に供したコンクリートの圧縮強度とヤング係数の試験結果を、図－11～図－14 に示す。まず、水セメント比を 30～70%まで変化させた基本配合の圧縮強度およびヤング係数は、図－11 に示すとおり、早強ポルトランドセメントを使用しているために長期な増進が小さく、特にヤング係数は養生 CA の材齢 1 日を除き、材齢に伴う増加量は極めて小さい。圧縮強度およびヤング係数の試験は、このような現象を予測し、2 点間を補間によっても支障のない部分については測定を除いた。養生 CA の材齢 1 日において多少ばらつきも見られるものの、セメント水比と圧縮強度の関係はいずれの養生においても成立している。養生方法は、圧縮強度に多少影響を及ぼしており、養生 CA（湿潤 3 日以後気中）の圧縮強度は、養生 CN（標準水中養生）と養生 CS（蒸気養生）よりも 1 割前後小さい傾向にある。テストハンマーの供試体(200mm 角)は、圧縮強度の供試体（φ100×200mm）よりも断面が大きい。乾燥の程度が供試体全体を評価する圧縮強度に及ぼす影響は小さいものの、反発度を測定する極表層部分の圧縮強度には影響する可能性があるので、反発度と圧縮強度の関係において確認する必要があるものと思われる。圧縮強度とヤング係数の関係は、土木学会コンクリ

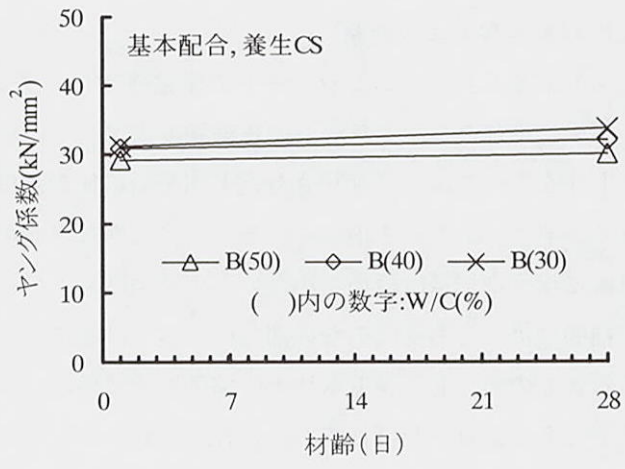




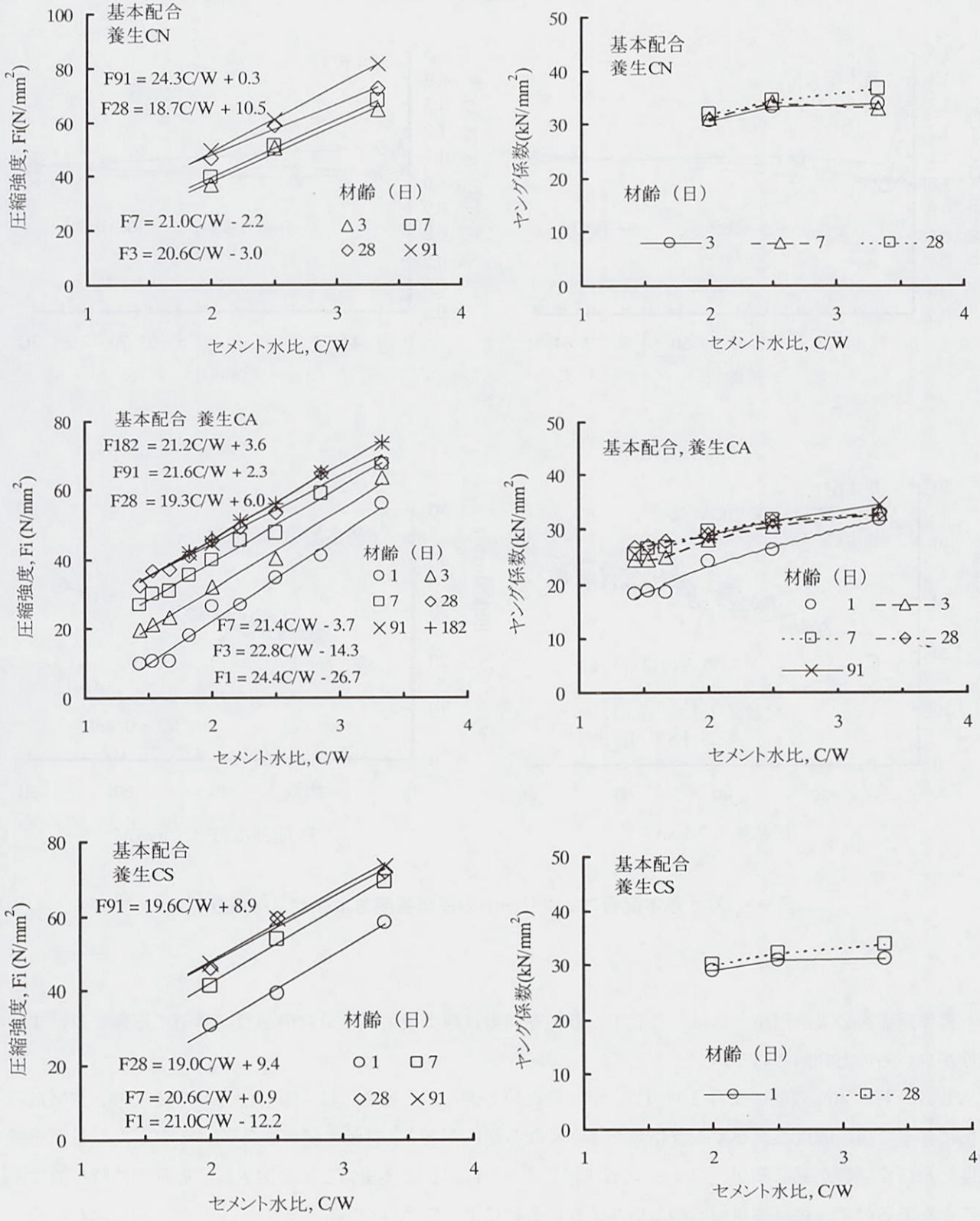




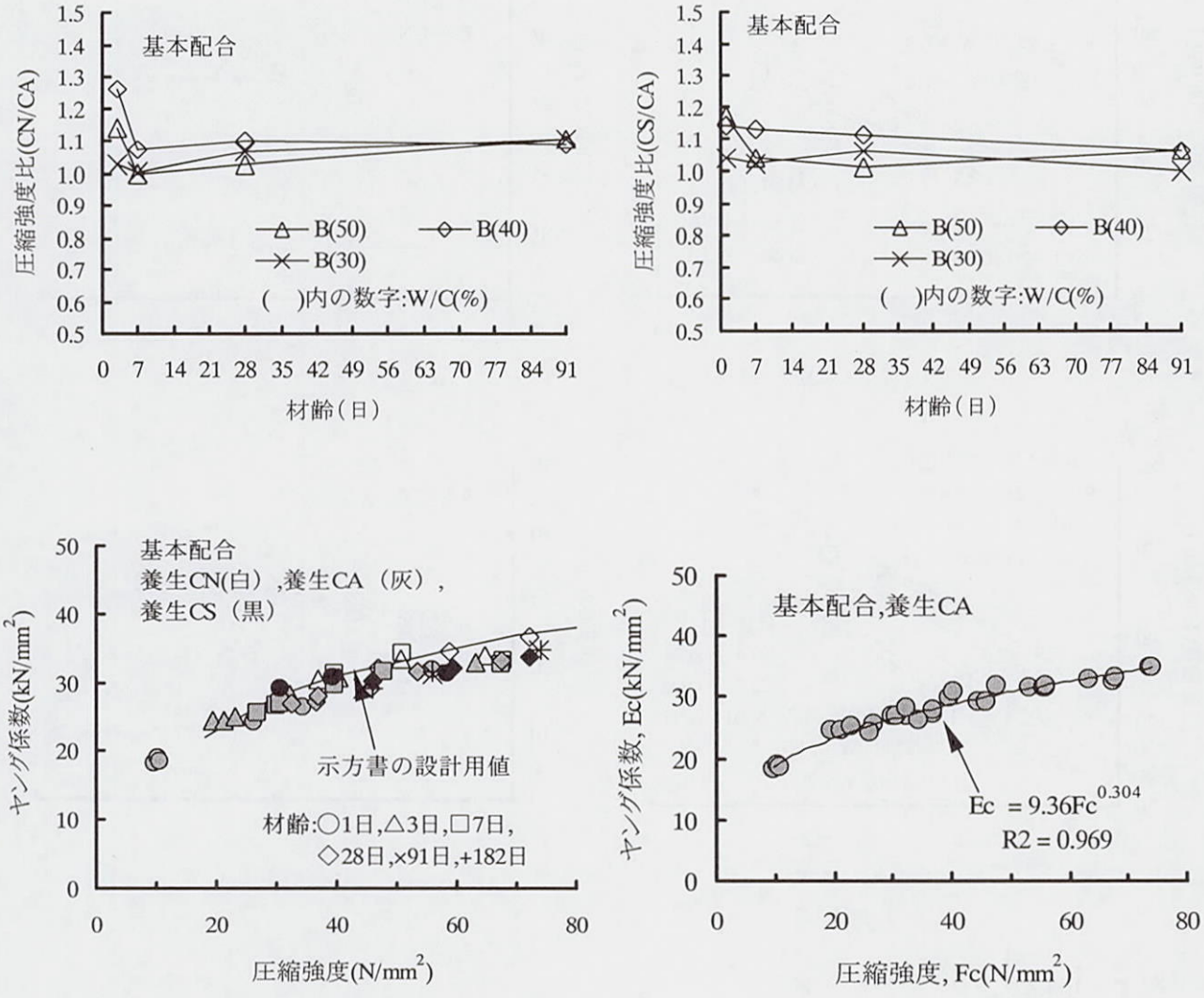




図－11(1)　基本配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数



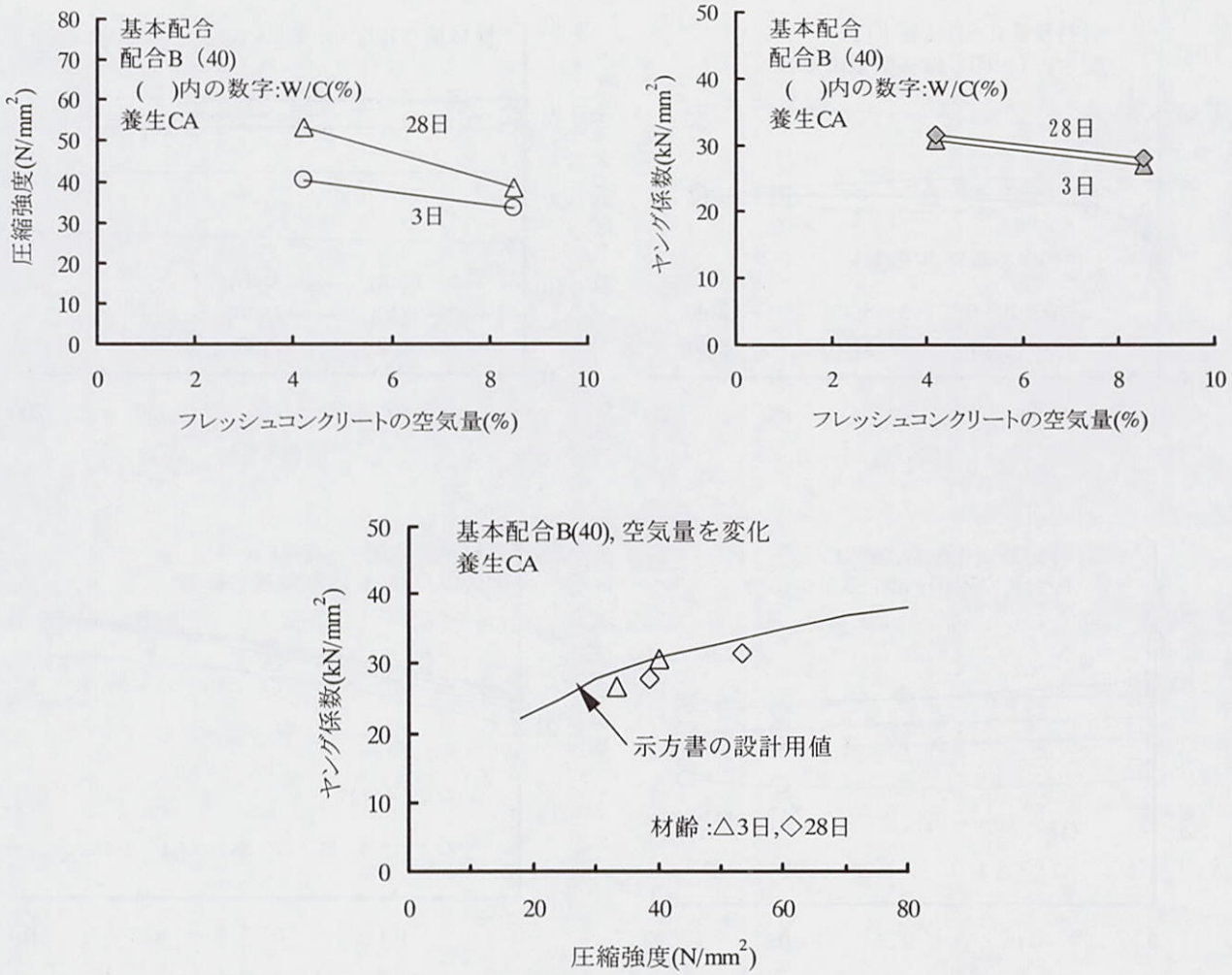
図－11(2)　基本配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数



図－11(3)　基本配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

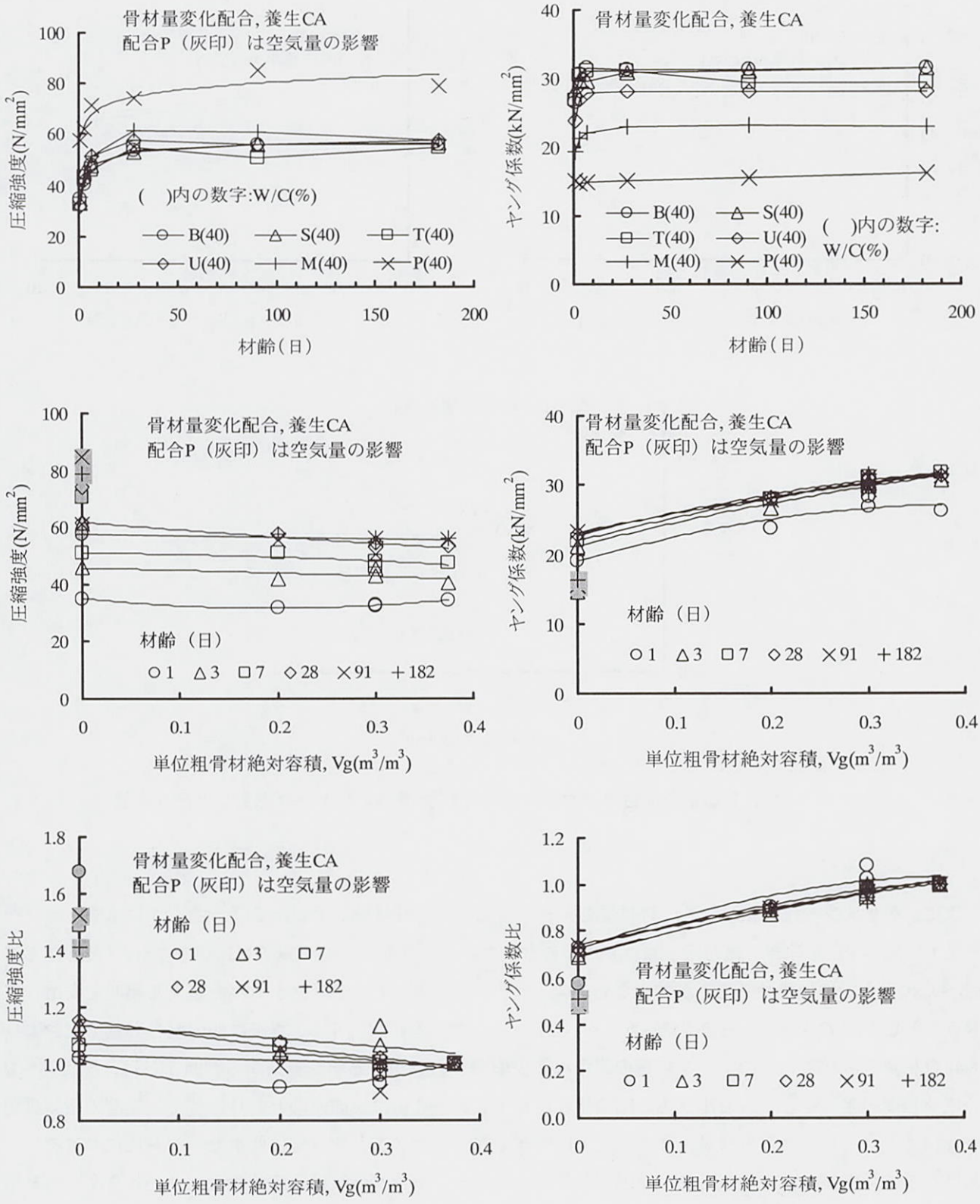
ート標準示方書の設計用値とほぼ一致しており、今回の試験で使用した骨材の品質が諸値に影響を及ぼす可能性がないものと判断される。

水セメント比 40%の基準配合において、空気量を約 2 倍とした場合には、図－12 に示すとおり、空気量の増加に伴って圧縮強度およびヤング係数が小さくなる傾向がある。材齢 3 日と 28 日において、空気量が圧縮強度に及ぼす影響が異なるが、フレッシュコンクリートに対して多量に空気を混入しても締固め時に減少することがあるので、供試体作製時の微妙な条件の違いによって残存空気量に違いが生じたものと思われる。一般には、空気量 1%の増加によって圧縮強度が 5%程度低下すると言われているので、材齢 28 日の方が空気量の影響を表しているようである。なお、圧縮強度とヤング係数の関係は、空気量 4.5%とした基本配合および示方書の設計用値と同等である。

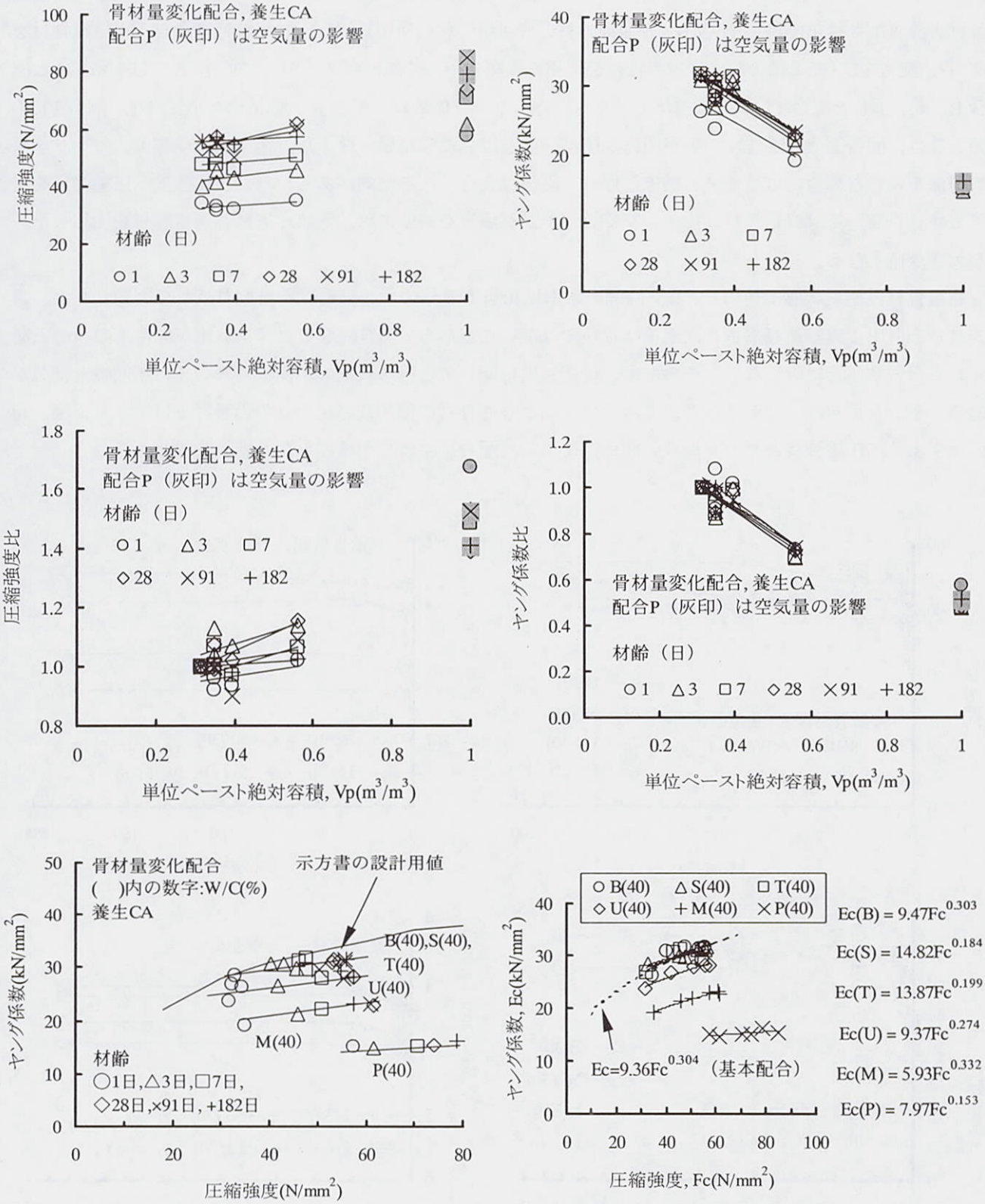


図－12　空気量が基準配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数に及ぼす影響

次に、水セメント比を 40%とし、骨材量を大きく変化させた骨材量変化配合では、図－13 に示すようにペースト（配合 P）を除き、概ね同一強度レベルになった。モルタルは、空気量の目標値を 7.5%（実測値では 6.5～6.8%）まで増加させることができたものの、ペーストに関しては空気量を 10%を超える範囲で安定して混入することができず、実測の空気量が 4.0%程度であったことに起因する。本来は他の配合も基準配合よりも粗骨材量を減じているので、空気量の設定は多少増やす必要があるが、結果から判断すれば、配合 S～U の圧縮強度の差は小さい。モルタルの圧縮強度が若干大きい理由は、前述のとおり、若干、実測の空気量が少ないこと、もしくは粗骨材最大寸法の減少に伴って同一水セメント比（特に低水セメント比における）における圧縮強度が大きくなることが原因であると思われる。ヤング係数は、圧縮強度にかかわらず、骨材量の影響を受け、モルタル（配合 M）およびペースト（配合 P）は極めて小さい。単位粗骨材絶対容積の減少、単位ペースト絶対容積の増加に伴ってヤング係数が小さくなる傾向があるが、コンクリートでは単位粗骨材絶対容積を 0.200m^3/m^3 まで減じた配合 U において基準配合よりも約 1 割小さくなる程度である。



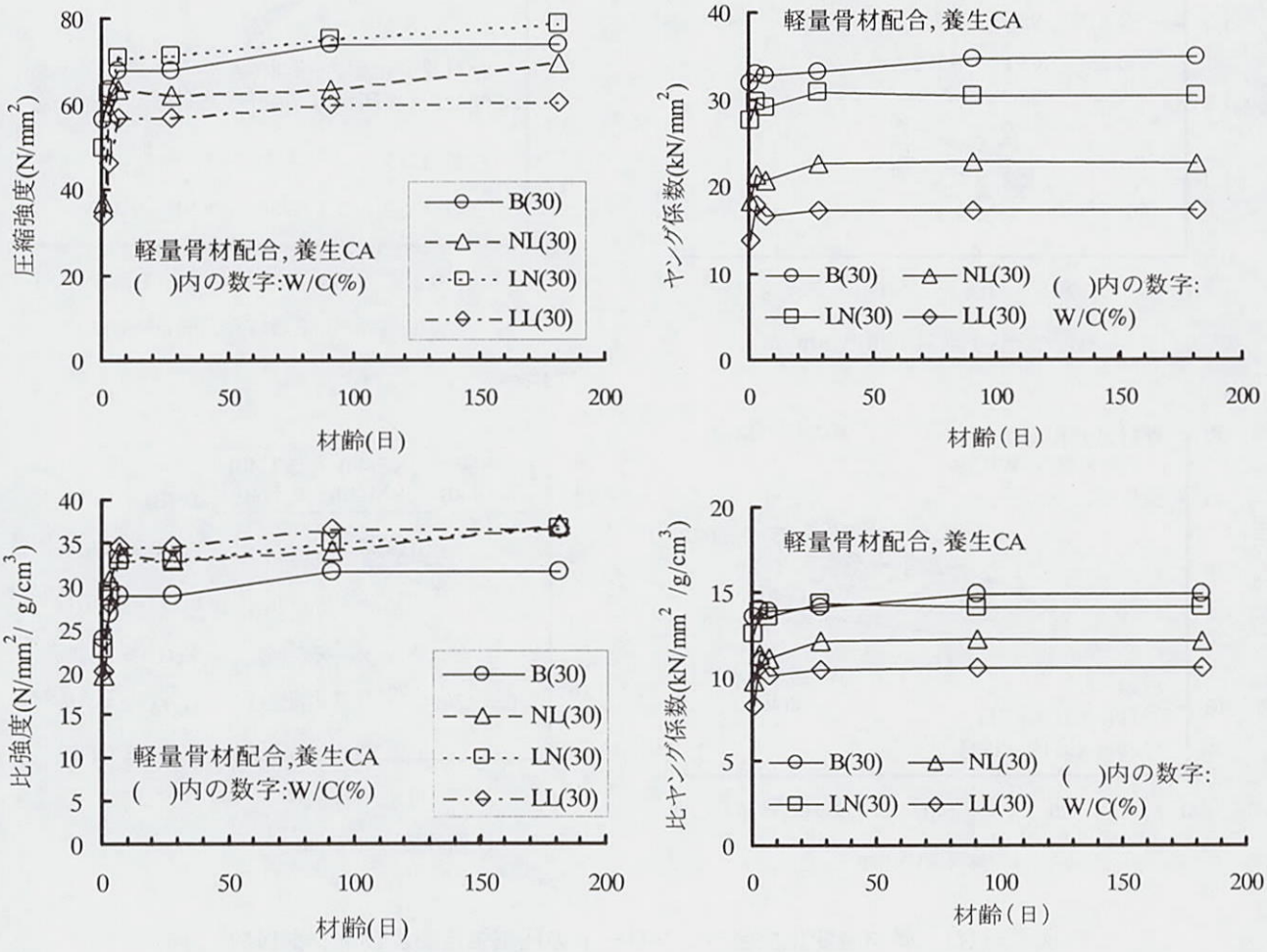
図－13(1)　骨材量変化配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数



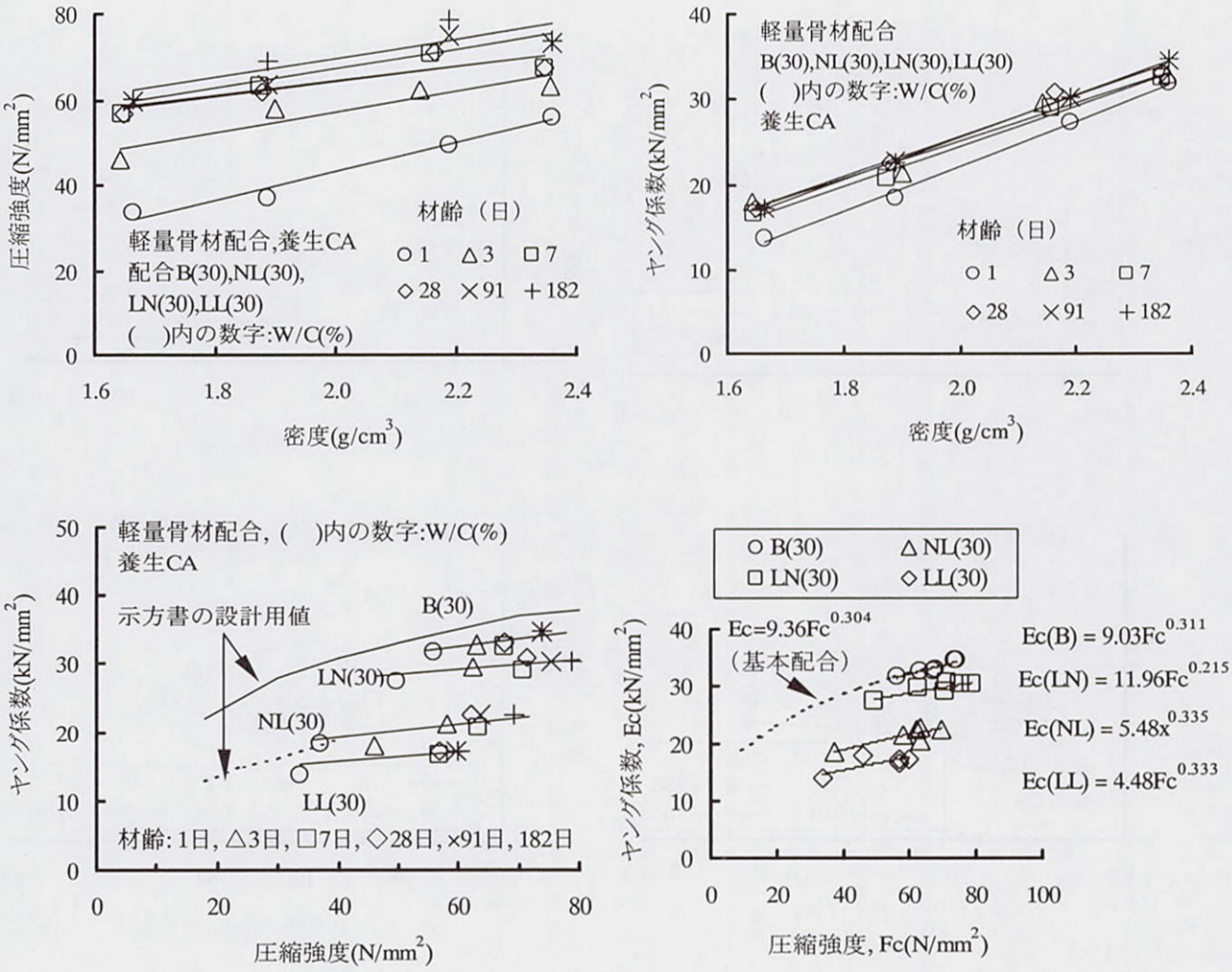
図－13(2)　骨材量変化配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

水セメント比を30%とした軽量骨材コンクリートの圧縮強度は、図－14に示すとおり、配合LN（軽量細骨材、普通粗骨材を使用）、配合B（普通細骨材、普通粗骨材を使用）、配合NL（普通細骨材、軽量粗骨材を使用）、配合LL（軽量細骨材、軽量粗骨材を使用）の順で小さく傾向があるが、材齢91日では配合LNと配合B、配合NLと配合LLがほぼ同値である。一方、ヤング係数は、配合B、配合LN、配合NL、配合LLの順となり、配合Bと配合LNの大小関係が圧縮強度とは異なる結果となった。密度と圧縮強度、ヤング係数の関係を表した場合には、密度の増加に伴って両値は大きくなる傾向がある。なお、比強度（圧縮強度を密度で除した値）では軽量骨材、比ヤング係数（ヤング係数を密度で除した値）では普通粗骨材を使用した方が大きな値となる。

軽量骨材は絶乾状態で使用し、0.5時間吸水率に相当する分の水を練混ぜ水を割り増して製造したが、コンクリート中で実際に吸水された水量は定かではないことから、実質的な水セメント比が配合上の30%と必ずしも一致するとは限らない。そのため、圧縮強度に関しては得られた大小関係やその差に不明瞭な部分がある。ヤング係数は、水セメント比の若干の変動よりも骨材の種類及び組合せの影響を受けやすく、図－14に示すように圧縮強度とヤング係数の関係は使用した配合によって明確に異なる結果を得た。



図－14(1)　軽量骨材配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

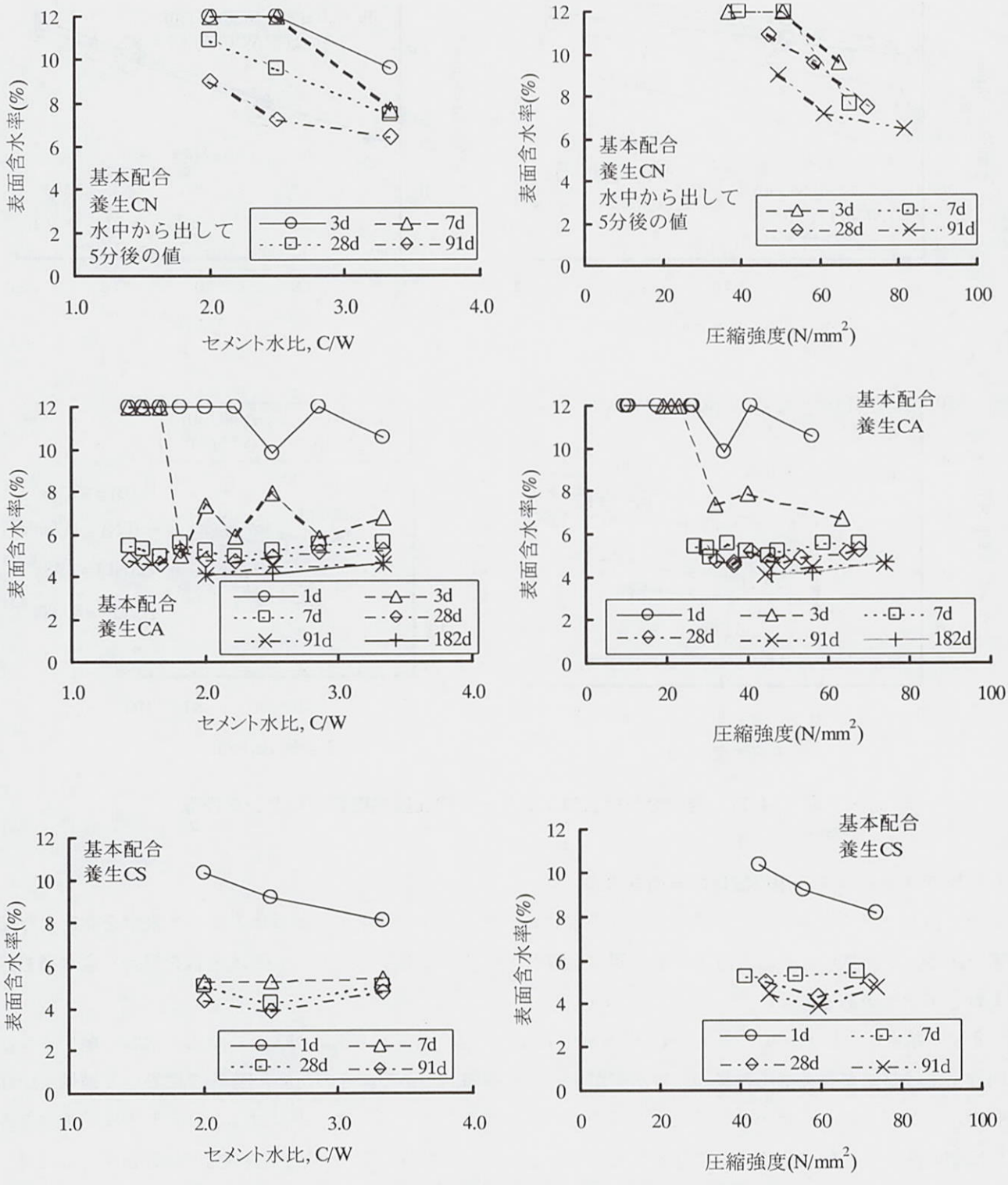


図－14(2)　軽量骨材配合コンクリートの圧縮強度およびヤング係数

3.6.2 テストハンマー用供試体の表面含水率

図－15 は、テストハンマー試験を実施する前に、テストハンマー用小型供試体表面の含水率を測定した結果である。コンクリートの表面含水率の測定上限が 12%であるので、図中の 12%はそれを超える含水率も含まれる可能性がある。

まず、基本配合において、養生 CN（標準水中養生）では、セメント水比が大きいほど、含水率が小さく、同養生では材齢が長くなるに従い、含水率が小さくなる傾向がある。そのため、図－15 において横軸を圧縮強度としたグラフからわかるように、乾燥を伴わない養生条件では、含水率はコンクリートの圧縮強度あるいは緻密性を間接的に表すことになる。養生 CA（3 日間湿潤以後気中）及び養生 CS（蒸気養生）下では、材齢 1 日の含水率のほとんどが測定上限であることや湿潤養生の程度によるばらつきなどから明らかではない。養生 CA、材齢 3 日におけるセメント水比及び圧縮強度と表面含水率の関係を見ると、セメント水比で 1.8 以上（水セメント比 55%以下）、圧縮強度では約 30N/mm^2 以上で、表面含水率が急激に小さな値になっており、湿潤状態から乾燥状態に置かれた際の乾燥速度の相違を大まかにとらえることができる。

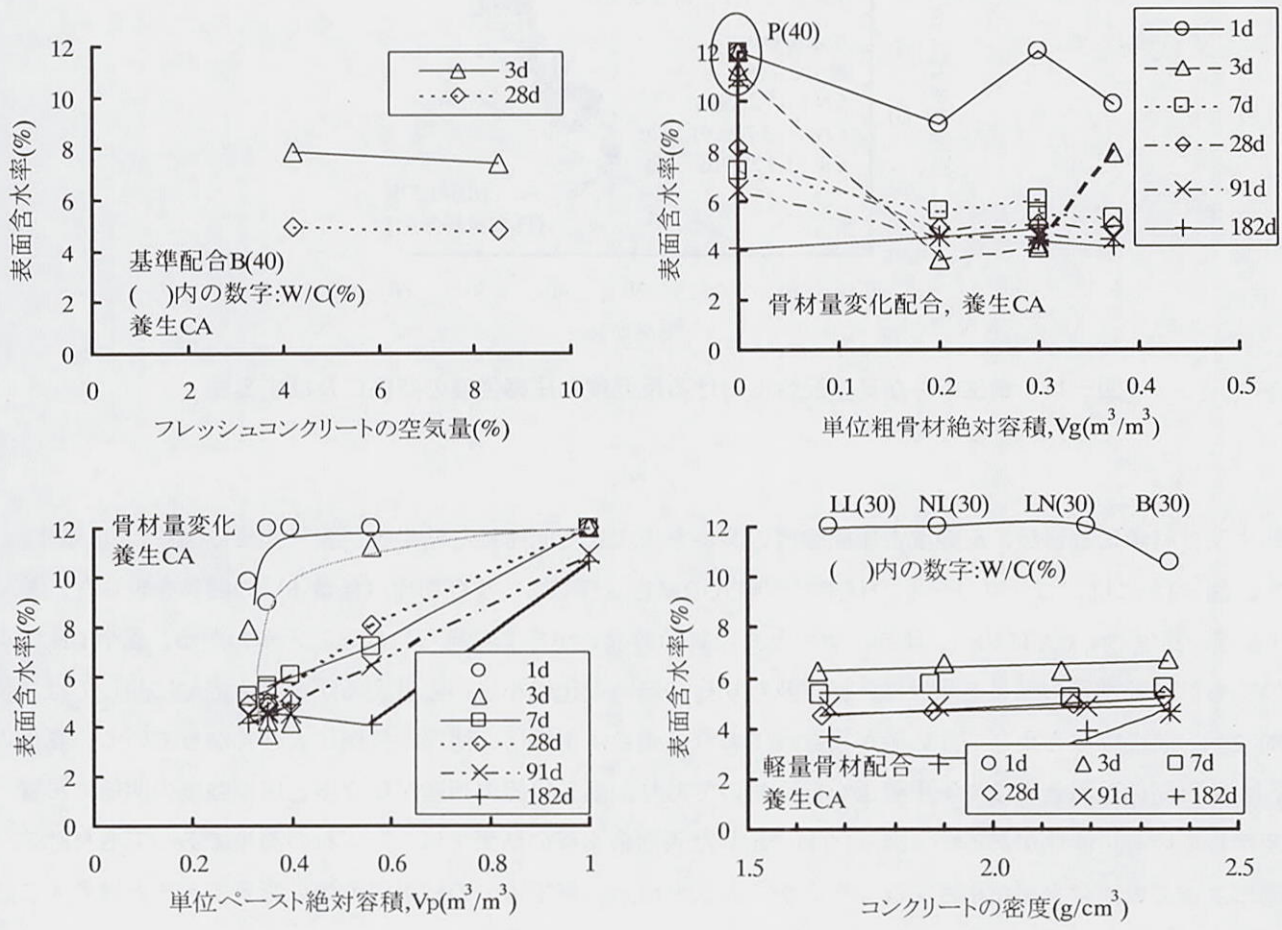


図－15(1)　テストハンマー試験前に測定した供試体表面の含水率

なお、養生 CA,CS ともに材齢 7 日以降の表面含水率に関しては、ほとんど変化が見られない。

空気量を変化させた場合には、材齢 3,28 日の含水率は空気量の大小に影響を受けていない。しかし、水セメント比 40%で空気量を 8.5%に増加させた場合であっても材齢 3 日の圧縮強度は 33.4N/mm^2 で、空気量 4.5%における水セメント比約 50%相当にしており、前述の養生 CA におけるセメント水比あるいは圧縮強度と表面含水率の関係から空気量の影響が明確に現れない可能性がある。

骨材量変化配合では、単位粗骨材絶対容積よりも単位ペースト絶対容積を横軸にしたグラフの方が、表面含水率の変化を把握しやすい。すなわち、単位ペースト絶対容積 0.3～0.4m^3/m^3 はコンクリート、0.56m^3/m^3 はモルタル及び 1m^3/m^3 はペーストに該当するが、得られた表面含水率はこの順で大きくなっている。ペーストは材齢 91 日においても高い含水率（10.9%）の状態が保持されている。これは、表－4 に示したように、モルタル及びペーストの単位水量が、コンクリートに比べて極めて多いことに起因していると思われる。一方、軽量骨材配合における含水率および材齢に伴う変化には、普通骨材および軽量骨材の組合せによる相違はほとんど見られない。材齢 1 日において、普通細骨材、普通粗骨材の配合 B(30)が軽量骨材を使用したものよりも 2%小さくなっているが、前述のように養生 CA の初期材齢には含水率のばらつきがあり、軽量骨材の影響とは言い難い。なお、使用した水分計の測定上限は、モルタルの場合には 15%、人工軽量骨材コンク

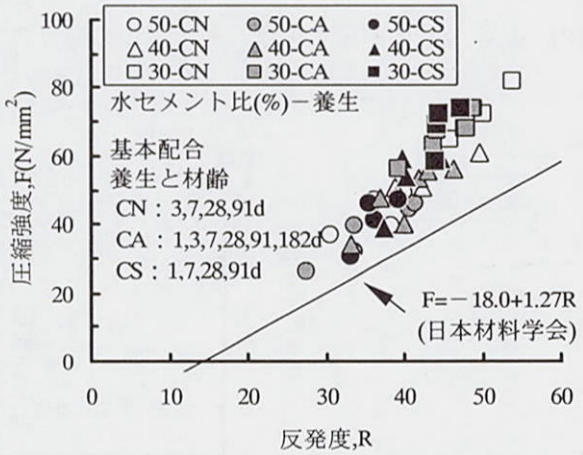


図－15(2)　テストハンマー試験前に測定した供試体表面の含水率

リートの場合には23%とされるが、今回の試験では普通コンクリートと同様に12%を超える値は測定されなかった。これは、基本配合の養生CAの結果から判断すれば、モルタルの水セメント比が40%、軽量骨材コンクリートでは30%と低水セメント比（高強度）という配合条件であることに起因している可能性がある。なお、使用した水分計が開発される段階において、今回の試験で使用した特殊な配合によって水分計の値と実際の含水率の関係が検証されているとは限らない。

3.6.3 基本配合における反発度と圧縮強度の関係（養生、材齢の影響を含む）

図－16は、養生条件を変えた場合の基本配合における反発度と圧縮強度の関係を表したものである。この図から明らかなように、水セメント比30,40,50%において養生CN,CA,CSを総合的に比較しても、反発度と圧縮強度の関係には養生に伴う明確な相違は見られない。しかし、反発度と圧縮強度の関係には、材齢の相違が影響する[2)]と言われることから、図－16の結果は、材齢および養生の双方を個々に検討する必要がある。



図－16　養生条件が基本配合における反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響

養生及び材齢に着目し、反発度と圧縮強度の関係を一次式で回帰した結果を、表－5及び図－17に示す。また、図－18には、コンクリートの材齢と回帰式の傾き（係数a）及び切片（係数b）の関係を表した。養生CSは、養生CN, CAに比べ、傾き、切片ともに材齢の違いがあまり見られないことがわかる。養生CNにおいても、材齢7日の結果を除けば、傾き及び切片の経時変化は小さいと言えるが、養生CAに関しては、材齢28日前後で傾き及び切片の値が異なっており、傾きは正側に、切片は負側に大きくなっている。養生CAは3日間の湿潤養生後に気中養生を行うものであり、湿潤状態の相違が反発度と圧縮強度の関係に影響を及ぼしている可能性があるが、図－15(1)に示した表面含水率の結果では、いずれの養生であっても材齢の経過によって表面含水率が小さくなる傾向があることから、養生CAの結果が乾燥の影響であるとは考えにくい。

表－5　養生、材齢別の一次式による回帰結果

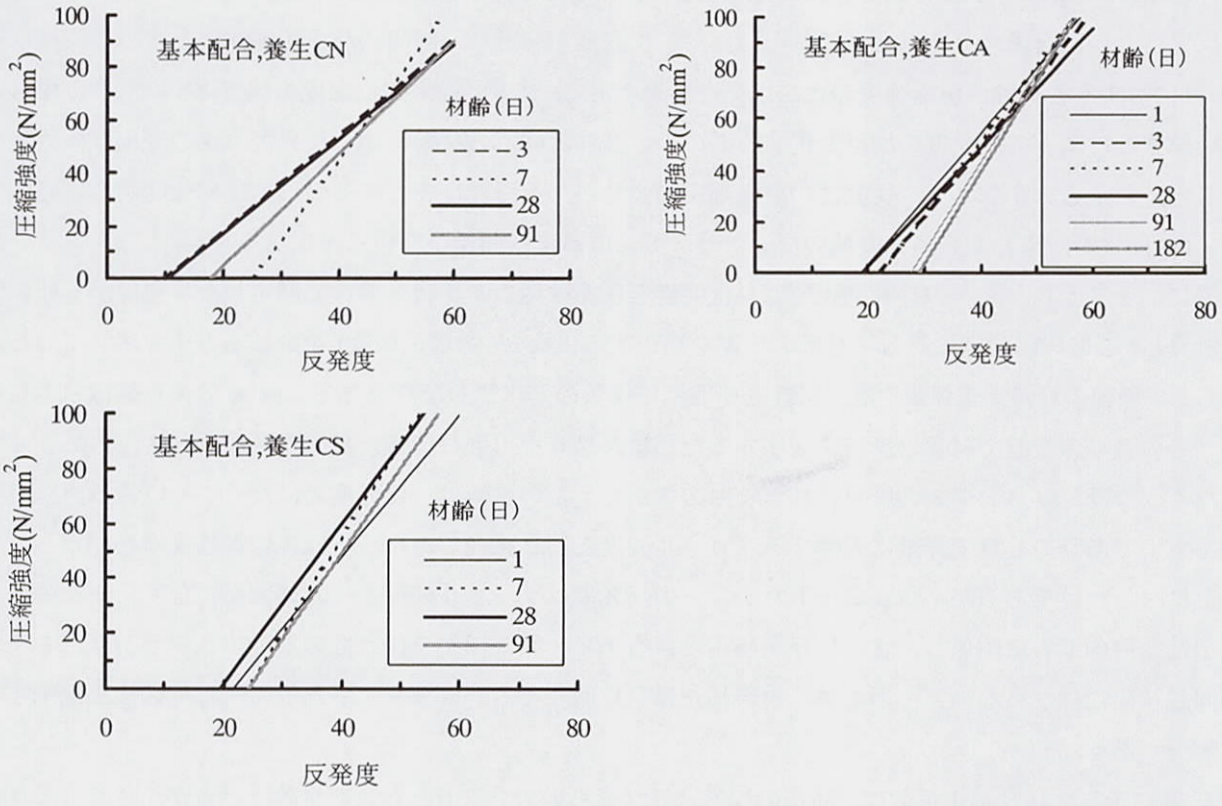
養生	材齢(日)	a	b
CN	3	1.83	-19.5
	7	3.01	-76.1
	28	1.78	-18.5
	91	2.13	-37.9
CA	1	2.56	-47.6
	3	2.66	-57.9
	7	2.87	-63.7
	28	2.33	-44.2
	91	3.48	-95.7
	182	3.58	-103.8
CS	1	2.59	-56.0
	7	3.42	-82.8
	28	2.90	-56.6
	91	3.11	-76.0

$F = aR + b$

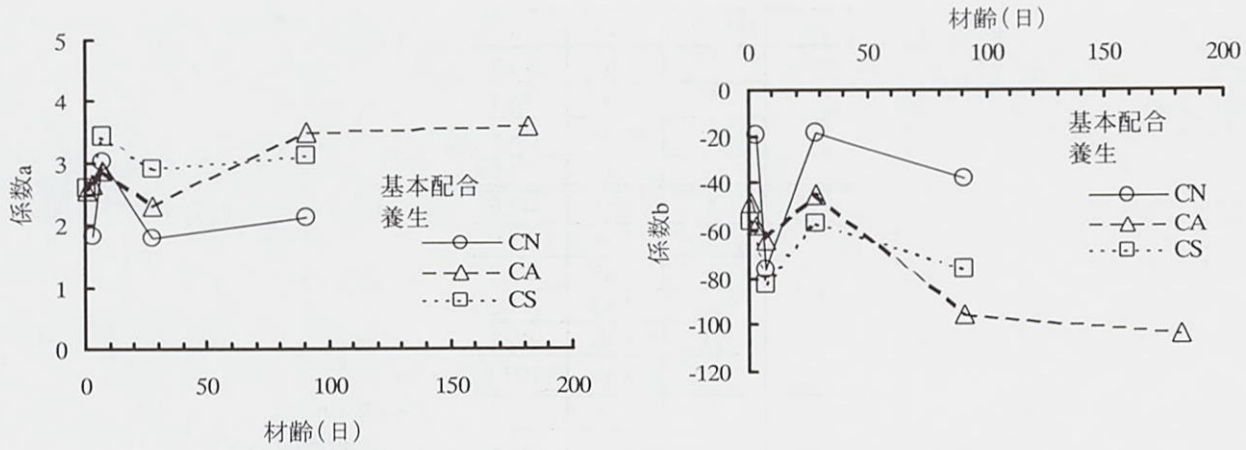
F:圧縮強度(N/mm^2)

R:反発度

a,b：係数



図－17　反発度と圧縮強度の１次回帰線



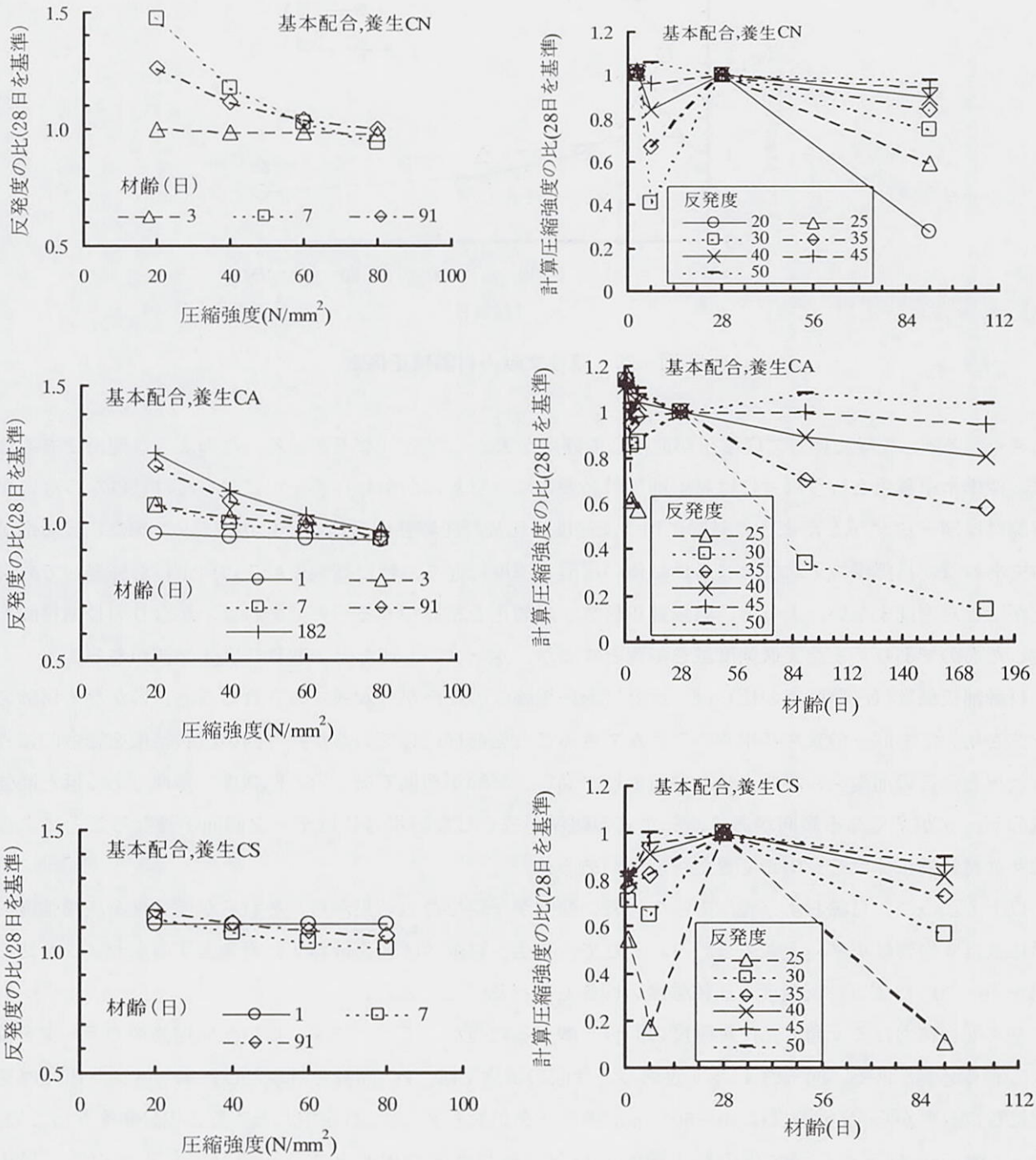
図－18　反発度と圧縮強度の 1 次回帰線における係数の経時変化

図－19 は、圧縮強度を想定した場合の反発度を回帰式から求め、材齢 28 日の反発度を基準として、各材齢の反発度との比を求めた結果と、これとは反対に反発度を想定し、回帰式から圧縮強度を求めて同様に材齢 28 日に対する各材齢の圧縮強度の比を求めた結果である。まず、前者の反発度の比では、いずれの場合にも、圧縮強度によって反発度の比は変化するものの、高強度域での材齢に伴う反発度の比の変化は極めて小さいことがわかる。すなわち、反発度の材齢補正が必要になる可能性を有するのは、圧縮強度が低い範囲であり、PC 部材で対象とする高強度域のコンクリートにはあまり関係しないことになる。

一般に、テストハンマーの材齢補正では、反発度と圧縮強度の関係式を用いて測定した反発度から圧縮強度を計算し、この圧縮強度に対して材齢の相違を補正する係数（材齢補正係数）を乗じる方法を用いている。しかし、2 種類の材料補正係数 [6]は、材齢に伴う補正係数の変化がかなり異なる。例 A の換算値は日本材料学会 [2]等の多くの文献で材齢の影響を説明するためにかなり引用されてきたが、これはシュミットハンマーではなく、フランクハンマーの結果に基づくものである。この試験は、反発度ではなく、くぼみの直径を測定するものであり、4 章で詳細に説明するブリネル硬度と同じ原理である。くぼみは塑性変形を測定していることになるわけであるが、シュミットハンマーの反発度はブリネル硬度と一次の関係になく、また弾性変形と塑性変形の双方に関係し、さらに反発作用に伴うエネルギー損失を伴うものなので、フランクハンマーとは同じ結果にはならない。そのため、材料補正係数に関しても、シュミットハンマーにそのまま適用するのは無理がある。

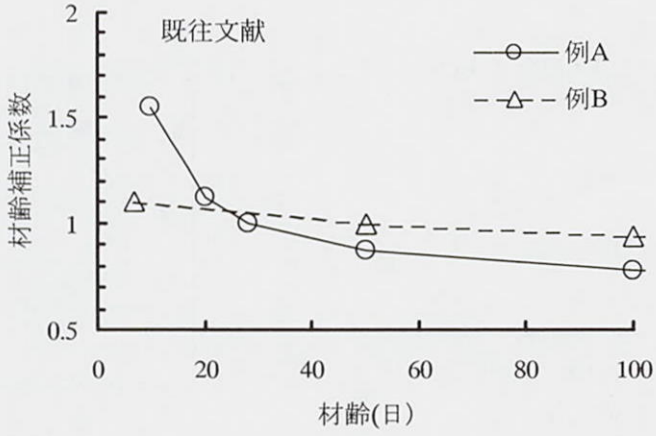
図－20 に示した材齢補正係数は、補正の程度は異なるものの、双方とも長期材齢ほど値が小さくなる傾向にある。図－19 に示した圧縮強度の比は、材齢 28 日に対する各材齢の圧縮強度の比であるので、この材齢補正係数に相当する値であると判断されるが、図－20 に示した一般的な係数のように一定の傾向が見られない。試験結果によれば、想定した反発度によって材齢による圧縮強度の比の変化が異なることがわかる。また、材齢 28 日よりも初期材齢においても、係数が 1 よりも小さくなる場合がかなり多い。図－20 のように材齢の経過とともに係数が徐々に小さくなるものは、各養生において特定の想定反発度に限られる。

材齢補正係数の必要性の説明としては、年数を経過し、乾燥状態に保たれたコンクリートは硬度がかなり



図－19　材齢の変化に伴う反発度及び圧縮強度の変化に対する検討

（材齢 28 日を基準とした反発度の比及び計算圧縮強度の比の変化）



図－20　既往文献の材齢補正係数

大きくなる[2]、乾燥に伴って炭酸化が進行して硬度が大きくなる[15]などがある。このような理由であるならば、標準水中養生を行う場合には材齢補正は必要なく、材齢にかかわらず一定にならなければならないが、実際には図－19 に示したように材齢に伴う反発度の比及び圧縮強度の比の変化が大きい。また、炭酸化が理由であれば、自然環境下に置かれる供試体の炭酸化速度は遅く、特に高強度域では何十年も経過しても炭酸化がほとんど進まない。よって、材齢補正係数と炭酸化を結びつけるものであれば、かなりの長期材齢を想定したものであり、また、低強度域を対象とするか、水セメント比などの関数で表す必要がある。

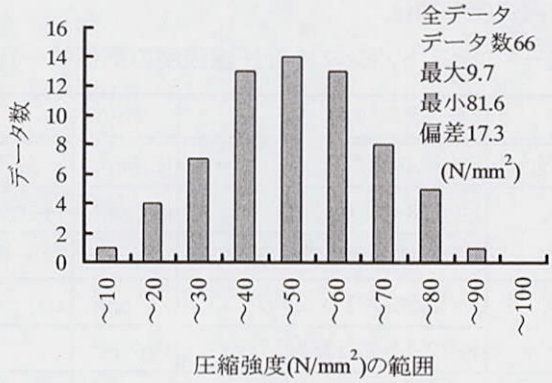
材齢補正係数（圧縮強度の比）は、反発度と圧縮強度の関係が一次式で表されること、いかなる材齢のデータを用いても同一の式を適用することができることを前提にしているが、今回の試験結果を総合的に判断した場合、この前提条件が成立しない可能性が高い。材齢が初期であるほど低強度、長期であるほど高強度域のデータが多くなる傾向があり、一次式の関係が成立しない場合にはデータ範囲が異なることによって様々な材齢補正係数を算出してきた可能性がある。

以上のように、材齢および養生方法の影響の傾向が一定でない結果から、それらが反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響は小さいと考えられる。そこで、養生、材齢の区別を行わず、対象とする水セメント比の範囲を 30～70%に広げ、反発度と圧縮強度の関係を調べることにした。

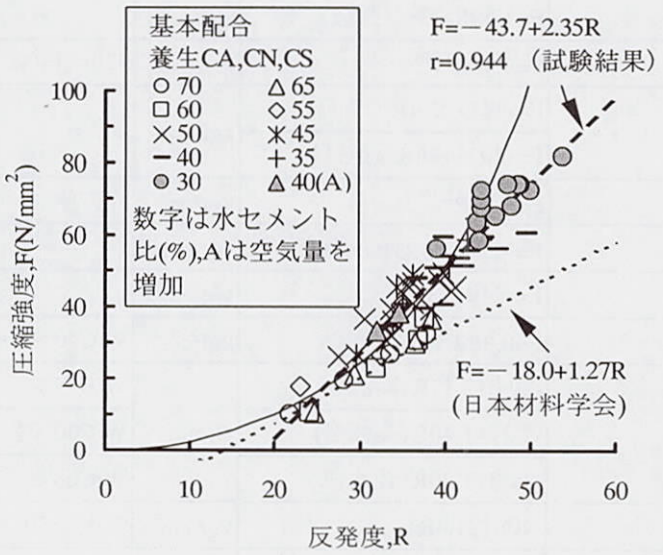
基本配合における反発度と圧縮強度の関係を調べるに当たっては、まず、用いた圧縮強度のデータを確認しておく必要がある。図－21 に示すとおり、今回の試験では、PC 部材を対象とし、水セメント比 40%を基準にしたことから、圧縮強度は 40～50N/mm^2 のデータが最も多く、これを中心とする正規分布をなっている。30～60N/mm^2 のデータが全体の約半数を占めた、高強度域を中心とするデータであるものの、最小値 9.7N/mm^2 から最大 81.6N/mm^2 までのデータを含む広範囲の検討を行うものと位置づけられる。このデータを用いて、反発度と圧縮強度の関係を調べたものが、図－22 である。このような基本配合におけるデータの偏りの影響を調べるため、図－23 においては、圧縮強度の順にデータを整理した上で、10～80N/mm^2 までのデータを 10N/mm^2 台、20N/mm^2 台というように 10N/mm^2 毎に分類し、圧縮強度 10N/mm^2 台のデータのデータ数を合わせて、4 データずつのデータをプロットしたものである。4 データ以上のデータがある圧縮強度範囲では、小さい順に並べた場合の中央 4 データを抽出した。図－22 と図－23 を比較すると、データ数を揃えた

図－23 の方が、データの偏りが少なく、一次式回帰による相関係数もわずかに大きい。しかし、一次式の切片、傾きにはほとんど違いがなく、基本的には、図－22 に示すように全データを用いて評価しても問題ないものと判断される。

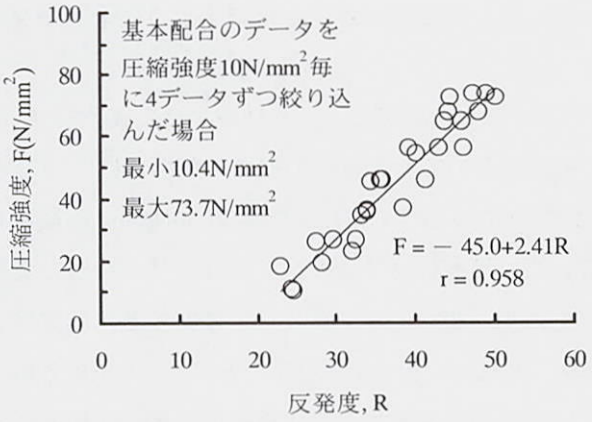
図－22 によれば、試験結果を回帰した一次式は、日本材料学会の式[2,4]よりも傾きが 2 倍程度大きいことがわかる。一部、水セメント比 40%において空気量を増加させた場合についても、通常の空気量 4.5%の結果と相違ない。試験結果は、反発度が 30 前後もしくは圧縮強度が 30N/mm^2 前後よりも小さい範囲においては、日本材料学会式とほぼ一致している。日本材料学会の式は、坂ら[14]が行った実験をもとに決められたものである。この実験では、水セメント比 42～80%のコンクリートに対する圧縮強度と反発度の関係を調べ、日本材料学会式と同一の回帰式を求めているが、表－6 に示すとおり、その圧縮強度（円柱供試体）は 5～40N/mm^2 までの低強度の範囲であり、今回の試験とは使用した圧縮強度のデータ範囲が異なる。表－6 によれば、多



図－21 基本配合において反発度と圧縮強度の関係に調べるために使用した圧縮強度データの分布



図－22 基本配合の全データを用いた反発度と圧縮強度の関係



図－23 基本配合において圧縮強度 10N/mm² 毎に 4 データずつに絞り込んだ場合の反発度と圧縮強度の関係

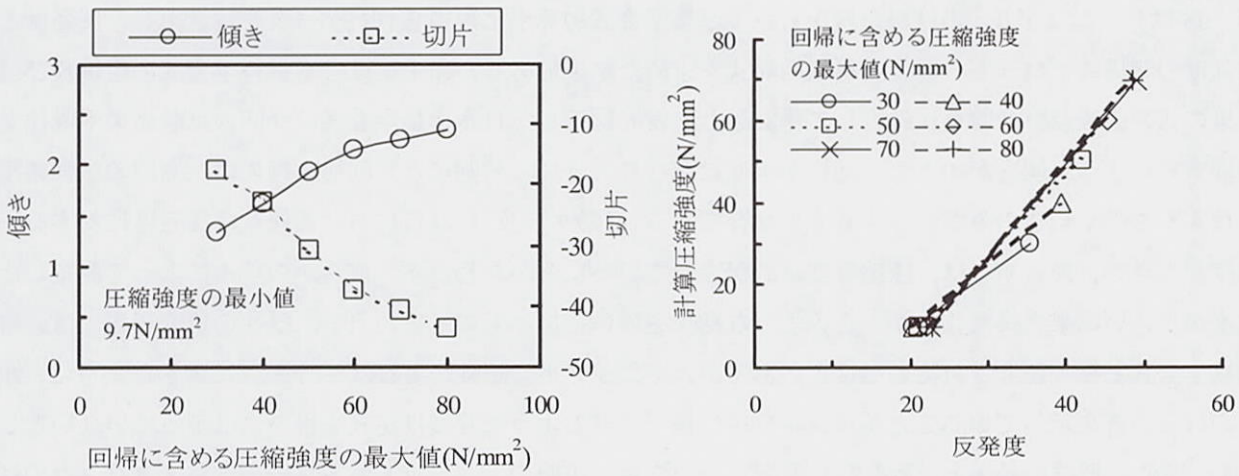
表－6 テストハンマーと圧縮強度の関係式一覧

研究者	推定式	単位	強度範囲等
日本材料学会,土木学会他[2,4]	F=-18.0+1.27R	N/mm^2	5～40(文献14)
日本建築学会[5]	F=7.3R+100（普通）	kgf/cm^2	144～479(W/C50～70%)
	F=10.1R+2（軽量）	kgf/cm^2	79～496(W/C50～65%)
小坂・谷川ら	F=20.5R-281（湿潤）	kgf/cm^2	100～400
	F=22.9R-432(乾燥）	kgf/cm^2	
梧原	F=10R-110	kgf/cm^2	210～320
明石ら	$F=-0.27R+0.29R^2$	kgf/cm^2	
関ら	F=11.7R-237（気中）	kgf/cm^2	
	F=12.9R-338（封緘）	kgf/cm^2	
Boundyら	$F=9.97R^{1.818}$	psi	720～1400
沢田ら	F=-441+23.4R（単打）	kgf/cm^2	200～
	F=-2054+46R（連打）		
伴ら	$F=1.76R^{1.49}$	kgf/cm^2	立方体
木村	$F=-57+6.95R+0.065R^2$	kgf/cm^2	
坂ら	F=-249+13.9R	kgf/cm^2	
大場ら	$F=0.36R^2-1.07R-40.6$	kgf/cm^2	W/C40～90%
添田ら[11]	-29.0+2.17R(高流動)	N/mm^2	W/B35%
	-2.27+1.40R(高強度)		W/C40.5%
	-11.3+1.26R(普通)		W/C68%
松下ら[12]	-408+21.4R	kgf/cm^2	150～550
舟川ら[10]	-30.7+2.0R(高流動,構造物)	N/mm^2	30～60

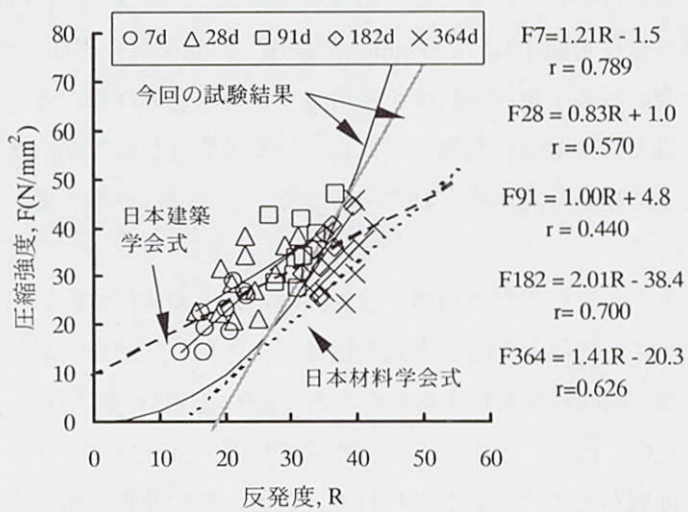
)内の数字は文献番号，無記入は日本建築学会5)内で紹介されたもの

表－7　基本配合において使用するデータの範囲を変えて、一次式で回帰を行った結果

データの使用範囲	データ数	切片	傾き	相関係数
全データ	66	-43.7	2.35	0.944
10N/mm^{2}毎に4データに調整	28	-45.0	2.41	0.958
30N/mm^{2}まで	12	-17.6	1.34	0.855
40N/mm^{2}まで	25	-22.9	1.60	0.854
50N/mm^{2}まで	39	-30.9	1.92	0.842
60N/mm^{2}まで	52	-37.5	2.14	0.897
70N/mm^{2}まで	60	-40.8	2.25	0.918
80N/mm^{2}まで	65	-43.8	2.34	0.930
40N/mm^{2}以上	41	-27.5	1.99	0.879
40±10N/mm^2	28	7.8	0.89	0.382



図－24　回帰に含める圧縮強度の最大値の変化が一次式の傾き及び切片に及ぼす影響



図－25　日本建築学会が実施した共通試験データとの比較

くの研究者によって発表された式及び圧縮強度の範囲も様々であることがわかる。

そこで、今回の試験結果に関し、回帰に用いる圧縮強度の範囲を変えた場合の一次式の傾きと切片の相違を調べることにした。表－7 においては、最小値 9.7N/mm^2 から最大値 81.6N/mm^2 の全データに対し、最大値を 30～80N/mm^2 まで 10N/mm^2 毎に変化させた場合の回帰式を求めている。また、40N/mm^2 以上の高強度域及び 40±10N/mm^2 の狭い範囲に絞り込んだ場合の値も求めた。図－24 に示すとおり、回帰式を求めるために使用した圧縮強度の最大値が大きくなるほど、一次回帰式の傾きは増加し、切片は小さくなっている。すなわち、対象とする圧縮強度域によって得られる回帰式は異なるわけである。今回の PC 部材を対象とした高強度域を中心とする試験では、傾き 2.35 を得ているが、これは、2 章の工場調査や表中の沢田ら、添田ら、松下ら、舟川らなどの結果と概ね一致している。特に、PC 部材を対象とした沢田らの研究 [11]とは傾き、切片ともにほぼ完全に一致する。その反対に、日本材料学会式をはじめとする低強度が中心となるものでは、傾きがそれよりも小さいものが多い。前述の材齢補正係数の問題についても、このような強度域による傾きの違いと、テストハンマーの原理から曲線回帰の方が適当であることに起因している可能性が高い。

図－25 は、マニュアル [5]の付録資料から日本建築学会式の算出に用いられたデータを抜き出し、反発度と圧縮強度の関係にプロットし、材齢毎に回帰式を求めた結果である。図中には日本材料学会式の直線及び試験結果の式の直線及び曲線も比較として併記した。表-6 に示した日本建築学会式は今回の試験結果や既往文献の提案式に比べ、傾きが小さく、切片が正側にかなり大きい。材齢ごとに回帰を行えば、今回の試験結果と一致するものや傾きのみが一致するものが存在する。材齢 7 日及び 28 日における任意の反発度に対する圧縮強度が大きい、換言すれば、圧縮強度は確保されているにもかかわらず、何らかの理由によって測定した反発度が小さい結果を得たことが、このような結果を導いているものと思われる。既往の研究報告では、日本建築学会式として紹介されていることがあるが、マニュアルの記載によれば、図－26 に示したように、かなりのばらつきを示していることから、本文中に提示できるような強度推定式を得るには至っていないとしている。また、既往の結果と一致しない原因については、市販のシュミットハンマーの内蔵スプリングのばね定数や衝撃子の質量・寸法などが製造年度によって変遷があり、最近の機種は当初のものよりも反発度がやや小さくなる傾向にあると言われていることも記載している。マニュアル資料によれば、使用した供試体はφ150×300mm の標準円柱体を使用し、2.5N/mm^2 で加圧した状態で、円柱供試体の側面を打撃しており、今回の試験や日本材料学会の試験が角柱供試体を使用している点と異なる。そのため、円柱供試体を使用した場合のプランジャー先端との接触面の状態が影響している可能性があるが、その影響は定かではない。いずれにしても、前述のように曖昧な点が残されているので、ここでは日本建築学会の式とは対比しないこととする。

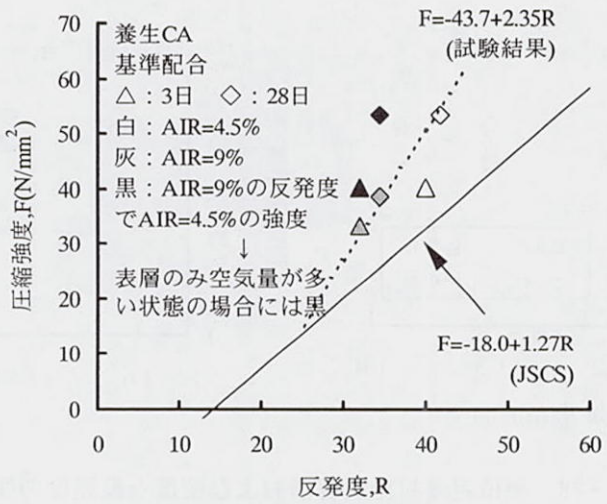
明石 [15]によれば、テストハンマーの動作機構から反発度と強度の関係は直線回帰ではなく曲線回帰が適当であるとしている。表－6 に示したように 2 次式や指数式で表現した回帰式が数多く紹介されており、今回の試験結果も、そのような曲線回帰を実証するものである。圧縮強度の最大値を 30N/mm^2 までとした今回の結果は、日本材料学会の式のとほぼ一致することを考慮すれば、図－22 に示すように、低強度域で日本材料学会式の直線と一致する曲線が妥当であると思われる。なお、この曲線の根拠については、4 章において詳細に説明する。

表中に示した 40N/mm^2 以上を対象とした場合の傾きと切片は、40N/mm^2 未満を含む場合とは多少異なる値を示しており、対象とする圧縮強度前後のデータが偏在せずに存在するのがよい。一方、圧縮強度のデータを 40±10N/mm^2 といった狭い範囲にした場合には、相関係数が小さく、得られた回帰式の傾き及び切片が大幅に異なる結果となることから、PC 部材・製品が高強度域のコンクリートを使用するからといって、圧縮強度があまりにも狭い範囲にならないように注意する必要がある。

前述のように曲線回帰が適用可能であるとしても、実務に重点を置いた構造物検査等においては、広範囲の強度の推定を対象にしないのであれば、必ずしも曲線回帰は必要でなく、日本材料学会式のような一次式でもよく、データから求める回帰式やその相関係数などの計算も容易である。その場合には、回帰式の元となる強度データの範囲（データの偏在を含めて）を明確にし、その範囲を超える圧縮強度に対する推定は精度が低下する必要がある。また、そのように厳密な条件で回帰式を求めたとしても、図－22 においてデータが多い反発度 35 に対する圧縮強度が 25～45N/mm^2 での範囲を有するように、反発度から推定される圧縮強度は、検査時に期待される圧縮強度の精度を満足しない可能性があることを認識する必要がある。

3.6.4 フレッシュコンクリートの空気量の増加が反発度に及ぼす影響

図－22 に示したとおり、フレッシュコンクリートの空気量を増加させても、反発度と圧縮強度の関係には標準空気量の場合との相違が見られない。すなわち、空気量の増加に伴って圧縮強度の低下を生じれば、反発度も同様に低下するだけのことである。しかし、この結果を別の見方をすれば、上面や傾きのある面に空気が浮上し、極表層だけ空気量が多い状態になった場合には、極表層の圧縮強度、反発度ともに小さくなる。極表層の圧縮強度が低下しても、部材全体の圧縮強度はほとんど変化しないにも関わらず、テストハンマーの反発度から推定される強度は極表層を評価し、部材の強度を過小評価する結果を招く可能性が考えられる。このことを図－26 中で表現すれば、図中の灰色印（表層の強度）と黒色印（部材の強度）の関係が生じる結果になるわけである。工場製品や現場打ちの構造物には、部材寸法が大きく、形状が複雑なものがあるので、振動・締固めによってコンクリート表面近くの空気量が増加する可能性がある。室内試験による図－22 に比

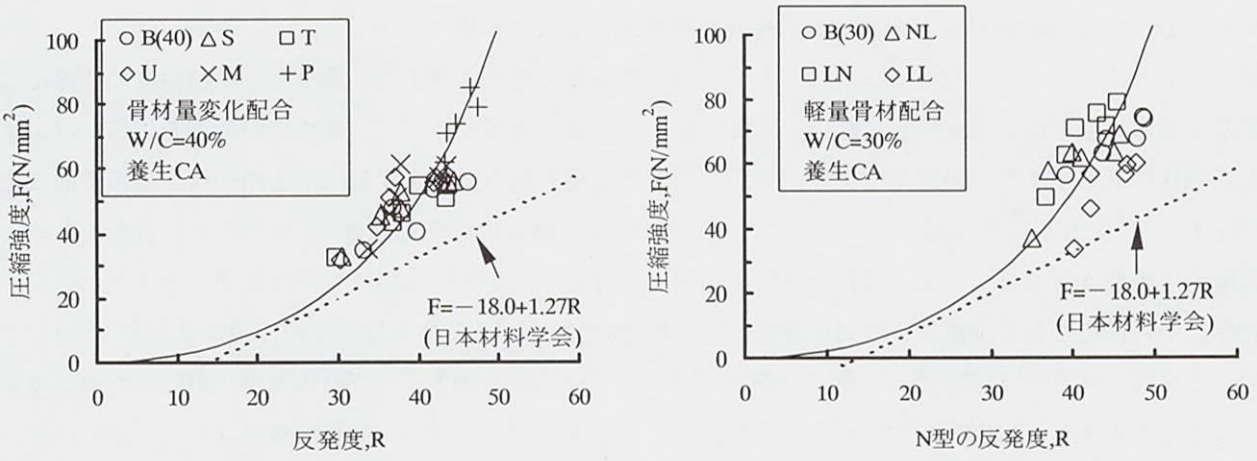


図－26　空気量の影響

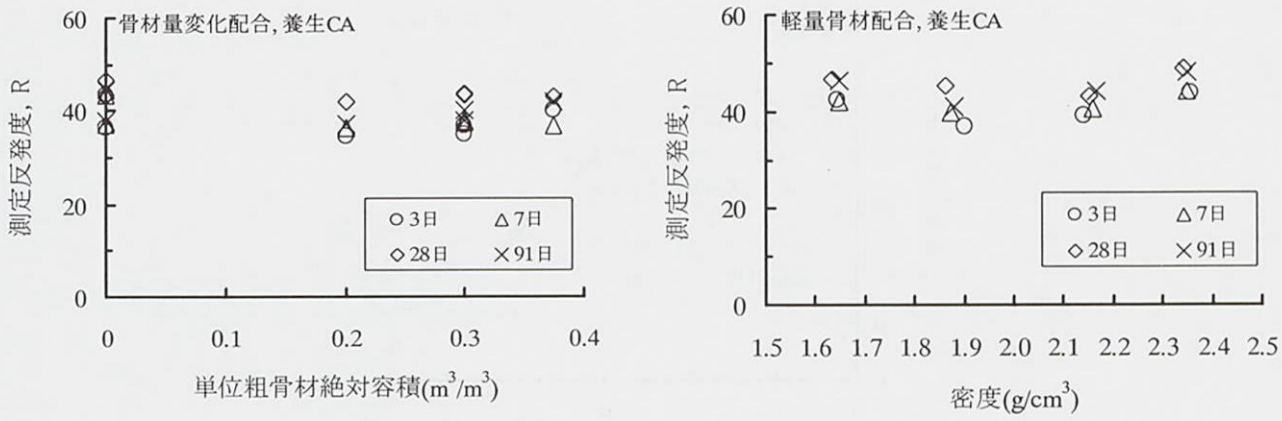
べ、工場調査の図－9 では図中の MAX 線側のデータが多い理由の一つとして考えられる。空気量の偏りの影響を受けているとすれば、任意の反発度に対する圧縮強度の値が高い方にプロットされることになることを意味し、一次回帰式は、それらのデータの影響を受け、室内試験よりも傾きは小さく、切片は大きくなる結果を招く。

3.6.5 骨材量および軽量骨材が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響

基準配合に対して骨材量を変化（減少）させた場合と、骨材を軽量骨材に変えた場合の反発度と圧縮強度の関係を、図－27 に示す。また、図－28 は、それぞれの影響を単位絶対粗骨材容積と密度で表し、反発度との関係を調べたものである。骨材量の変化、軽量骨材の使用の双方とも、反発度が 30～40 で日本材料学会の直線に近いところにプロットされるものの、基本配合で用いた曲線と同様に、反発度が大きくなるにしたが



図－27　骨材量の変化および軽量骨材の使用が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響



図－28　単位粗骨材絶対容積および密度と反発度の関係

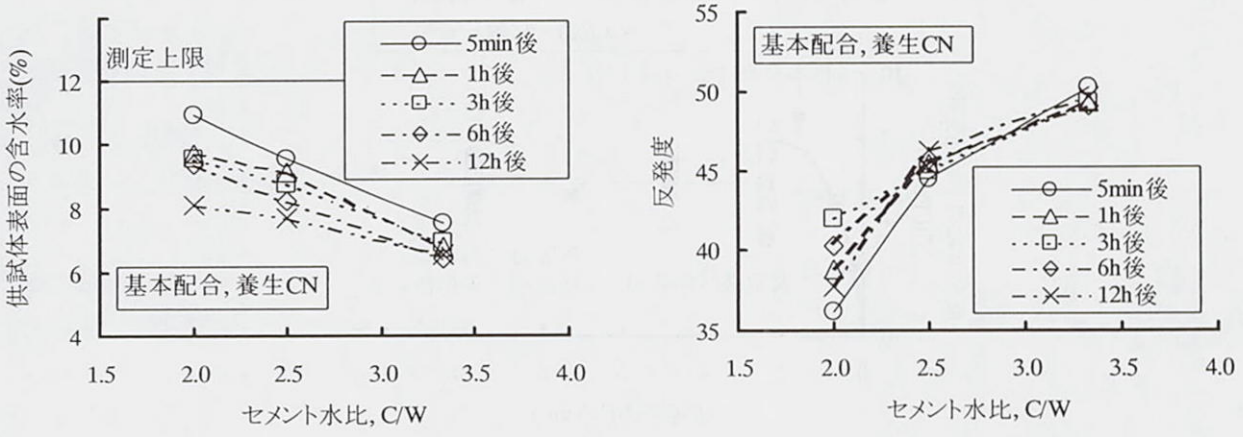
い、圧縮強度は日本材料学会式から計算される値よりも大きくなる傾向にある。今回の試験では、骨材量の影響を報告した文献[9,10]よりもさらに大幅に骨材量を変化させた。しかし、粗骨材を含まないモルタル(配合 M)、骨材を全く含まないペースト(配合 P)であっても、基本配合と顕著な相違は認められない。敢えて言及すれば、任意の反発度に対する圧縮強度が若干大きく、基本配合をもとに描いた曲線よりも上側にプロットされる点が多いように見られる。

一方、軽量骨材を使用した配合であっても、図－27 に示すとおり、基本配合と同一の曲線がデータの中心を通っており、反発度と圧縮強度の関係に対し、骨材条件が顕著に現れていない。確かに、普通骨材と軽量骨材の細骨材、粗骨材における組合せの仕方によって、任意の反発度に対する圧縮強度が曲線よりも大きい場合とそうでない場合があるが、その傾向は一貫していない。図－28 においても、密度の変化に伴う反発度の変化が小さく、軽量骨材の使用が反発度にあまり影響していないことがわかる。

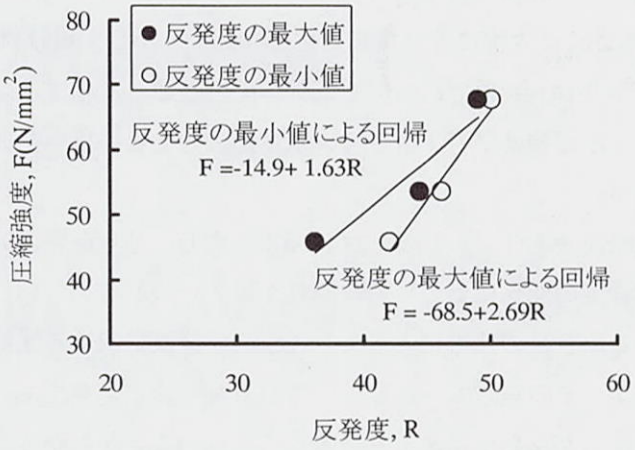
3.6.6 供試体の湿潤状態が反発度に及ぼす影響

図－15 では小型供試体の表面含水率の変化を示し、反発度への影響を検討したが、材齢及び水セメント比と乾燥状態の複合要因となり、明確な傾向を示すことができなかった。そこで、基本配合の小型供試体に対して材齢 28 日まで養生 CN を施した後、水中から供試体を取り出した後の経過時間に着目し、セメント水比と供試体表面の含水率および反発度の関係を調べた。なお、日本材料学会では、水中養生の供試体を乾かさずに測定した反発度には＋5 の補正を行うことになっている。

図－29 によれば、含水率は、水中から取り出した直後（5 分後）では、セメント水比が大きくなるに従って小さくなり、セメント水比 2.00（水セメント比 50%）では 10.9%であるのに対し、セメント水比 3.33(水セメント比 30%)では 7.5%であった。また、その後の乾燥に伴う含水率の低下は、セメント水比が小さいほど顕著である。一方、反発度はセメント水比の増加に伴って大きくなるが、反発度に対する乾燥時間（含水率の変化）の影響もセメント水比によってかなり異なる。すなわち、セメント水比 2.50 および 3.33 においては時間が経過しても反発度の変化は小さいが、セメント水比 2.00 では 5 分後から最大約 6 の増加が見られる。よって、低強度コンクリートにおいては、湿潤状態の相違によって反発度が変化するが、PC 部材で対象とす



図－29　セメント水比と供試体表面の含水率および反発度の関係

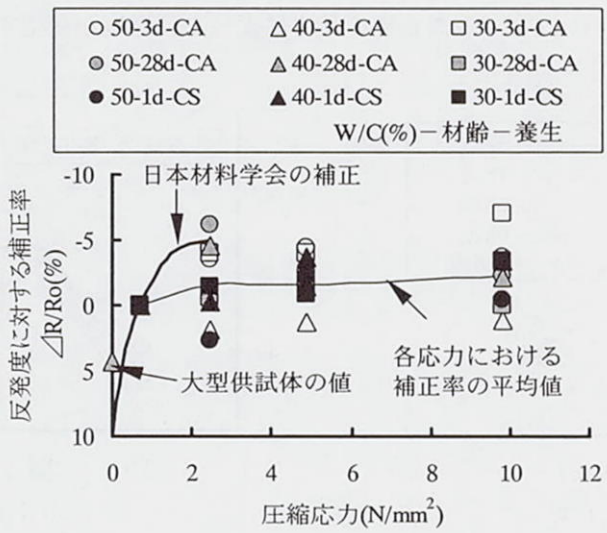


図－30　湿潤状態の相違が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響

る高強度コンクリートではその影響は小さいと判断される。しかし、図－30 に示すとおり、図－29 における低強度域の湿潤状態の相違による反発度の変化が、反発度と圧縮強度の直線回帰式に大きく影響を及ぼすことになる。低強度域でテストハンマーを使用する場合には、試験面の湿潤状態の管理を十分に行う必要がある。

3.6.7 圧縮応力が反発度に及ぼす影響

図－31 は、小型供試体に載荷し、打撃方向に直角な圧縮圧力を与えた場合の反発度の補正率を表したものである。図中には、日本材料学会の補正曲線を併記している。今回の試験結果とその補正曲線を比較した場合、0N/mm² の状態は大型供試体の値しかないので明らかではないが、標準とした 0.74N/mm² よりも圧縮応力を増加させても、その補正率は日本材料学会の補正曲線よりも小さいものがほとんどであり、各圧力での



図－31　圧縮圧力と反発度に対する補正率の関係

変化率を平均すると、概ね 2%前後になった。これは、反発度の変化量で言えば、わずか 1 程度の変化に過ぎない。水セメント比、材齢及び養生の条件の影響を調べても、圧縮応力と反発度の補正率の関係は必ずしも明確ではない。後述の表－8 に示すように反発度のばらつきが圧縮応力の補正値よりも大きいほか、高強度域（圧縮強度の範囲：30.6～67.7N/mm^2、平均：47.8N/mm^2）の供試体を使用しているので、図－22 に示したとおり、圧縮強度の変化に対する反発度の変化が小さいことから、圧縮応力が加わっても反発度にあまり影響を及ぼさないように思われる。いずれにしろ、圧縮応力が作用した PC 部材であっても、反発度の補正はほとんど必要ないものと判断される。

3.6.8 供試体の寸法、型枠の種類および測点数が反発度に及ぼす影響

表－8 は、大型供試体と小型供試体の反発度およびその変動係数を比較したものである。大型供試体は、400×800mm の面に対し、100 点（400mm 方向に 5 列、800mm 方向 1 列当たり 20 点）の測定を行った。小型供試体は、通常は 1 面 20 点の測定のみであるが、ここでは、供試体の 4 側面に対し、20 点ずつ、合計 80 点を測定した。まず、大型供試体には、鋼製型枠と合板型枠（化粧型枠）を使用したが、両者の平均反発度に有意な差異は認められない。大型供試体、小型供試体ともに全点の変動係数は 7%程度である。全点の平均反発度は、大型供試体よりも小型供試体の方が約 2 大きく、前述の圧縮圧力の影響があるという理解もできるが、小型供試体において 1 面のみが 43.4 と他面よりも大きな値があり、これを除いた 3 面の平均は大型供試体との差はわずか 1 程度である。同一の供試体であっても、20 点ごとの平均反発度は、測定した列（大型供試体）もしくは面（小型供試体）によって 2～3 の平均反発度の相違を生じることから、この程度の測定値の差を持って影響要因の評価を行うのは必ずしも適当とは言えないことになる。

表－8　大型供試体と小型供試体の反発度の比較

圧縮応力 (N/mm^2)	寸法 (mm)	型枠	約20点の平均反発度	約20点の変動係数 (%)	全点の平均反発度	全点の変動係数 (%)
0	200×400×800	合板	39.0	8.0	39.5	7.5
			38.9	7.5		
			39.2	6.7		
			39.8	8.3		
			40.9	6.4		
0	200×400×800	鋼板	39.3	4.9	39.1	7.4
			39.6	9.5		
			38.6	7.5		
			39.8	6.6		
			38.3	7.6		
0.74	200角	鋼板	40.5	8.6	40.9	7.6
			39.8	7.0		
			39.8	6.4		
			43.4	5.0		

基準配合, 養生CA, 材齢28日, 約20点とは20個所のうち異常値が存在した場合にはそれを除いた測点を指す

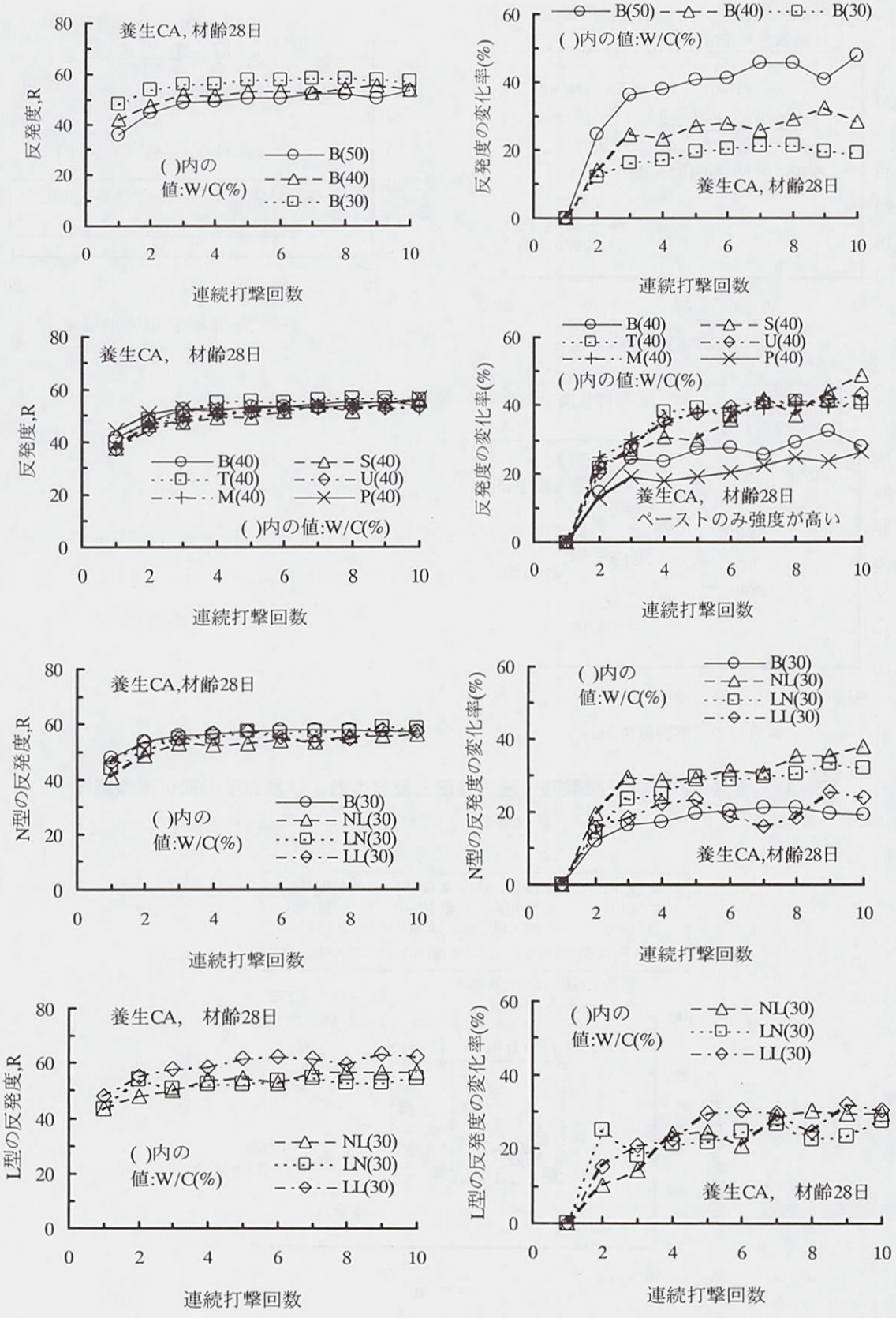
3.6.9 同一個所連続打撃による反発度の変化

図－32 は、連続打撃回数と反発度および反発度の変化率の関係を表したものである。同一個所を連続打撃することにより、いずれの配合も、通常の 1 回打撃よりも反発度は大きくなる。また、打撃 3 回程度までの繰返し打撃に伴う反発度の増加が大きく、その後は増加率は小さいものが多い。基本配合において水セメント比による反発度の変化を比較すれば、水セメント比が大きいほど反発度が増加し、特に水セメント比 50%では打撃 3 回以降の増加率も大きく、3 回から 10 回までに約 10%の変化が見られる。

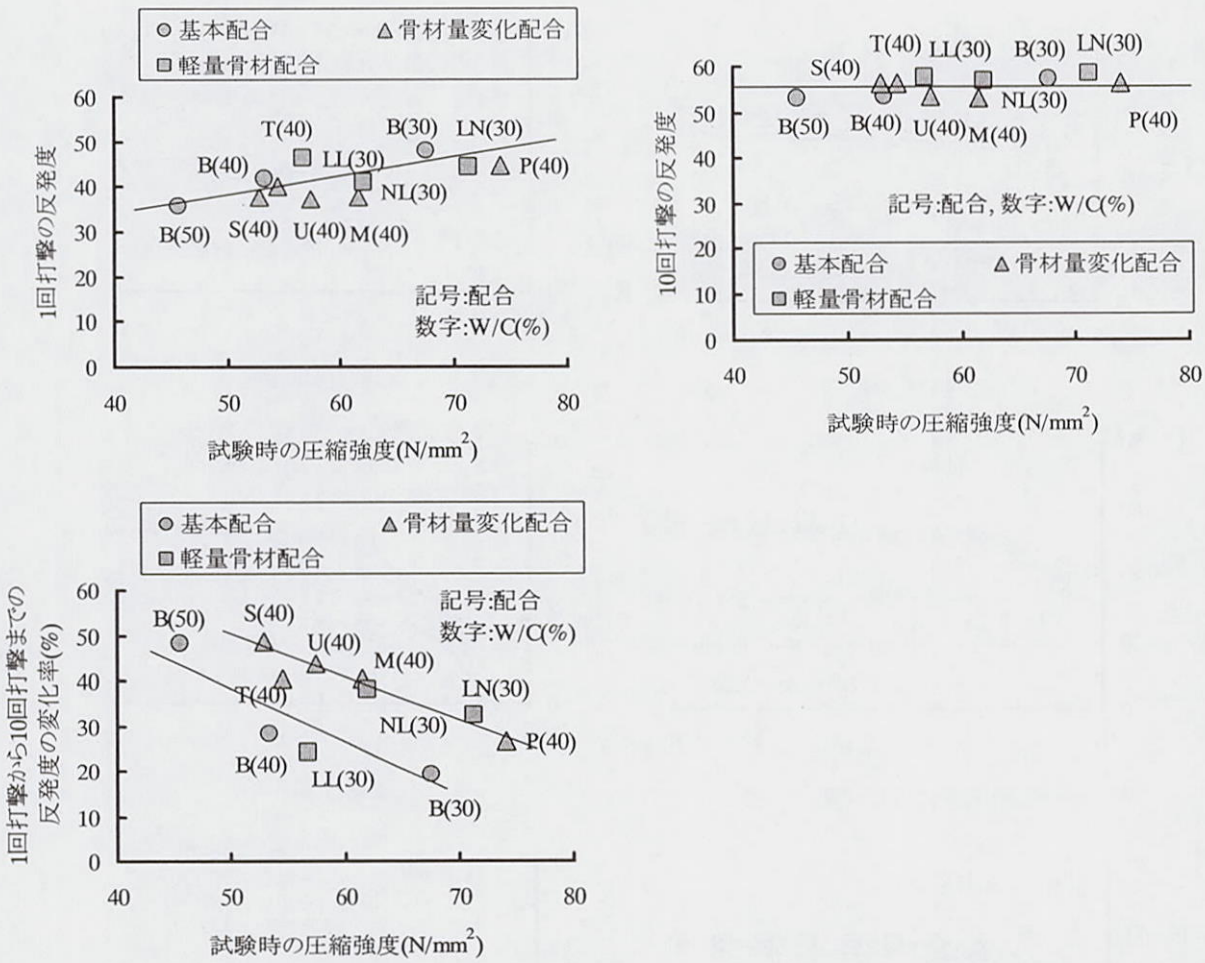
骨材量変化配合での比較では、配合 S,T,U,M で反発度の変化率に顕著な差異は認められないが、骨材量変化配合と基本配合（B）では 10 回時の変化率で 10～15%の違いがあり、反発度の変化率には単位粗骨材量の影響が多少あるように思われる。最も変化率が大きいと予想された配合 P のペーストは、反対に他よりも反発度の変化率が小さい。これは、図－13 に示したとおり、配合 P が約 74N/mm^2 と極めて高強度であることに起因しているものと思われる。そのため、約 53N/mm^2 の配合 B(40)ではなく、約 68N/mm^2 の配合 B(30) との比較が適当であると考えられる。なお、軽量骨材配合においては、骨材の組合せによる反発度の変化が明確ではない。連続打撃による反発度の変化に関しては、強度と骨材量の双方を考慮する必要がある。

そこで、図－33 に示すように、テストハンマー試験時の圧縮強度を横軸にとり、反発度および反発度の変化率の関係を調べた。1 回打撃の反発度は、圧縮強度が大きいものほど、大きいことがわかる。一方、10 回打撃を行った反発度は、圧縮強度との関係が見られず、ほぼ一定（約 55）である。このことは裏返せば、図－28 に示すとおり、1 回打撃から 10 回打撃までの反発度の変化率と圧縮強度の間に負の関係がある。図中に引いた 2 本の直線は、下方が基本配合で、上方が骨材量変化配合と軽量骨材配合であるが、配合 LL のみ、下方の基本配合と同等の結果になった。

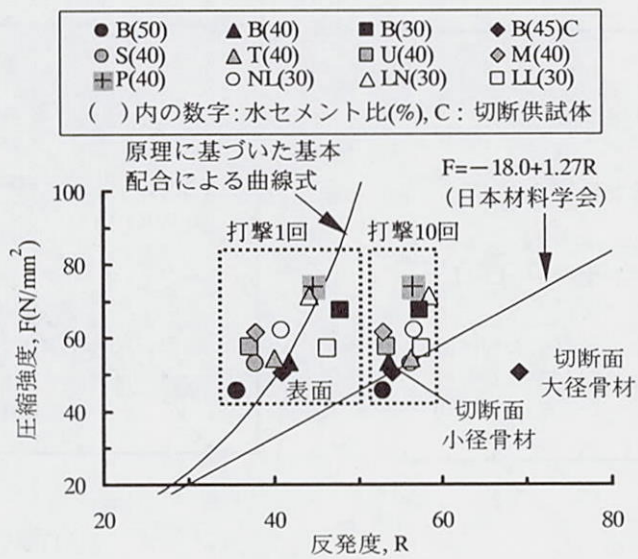
このような連続打撃を行う方法は、1974 年に発表された沢田ら[11]の報告を参考にしたものであるが、この報告以後には同種の方法は全く見られない。シュミットハンマーが国内に導入され始め、PC 部材にも適用した結果、一般の強度推定式では圧縮強度が過小に評価されることを考え、発案されたものであると思われる。しかしながら、沢田らの研究によって得られた単打の直線回帰式は、表－6 及び図－22 に示すとおり、今回の試験で実施した基本配合の直線回帰式と完全に一致している。図－34 においても、10 回打撃によって得られた反発度は日本材料学会式の直線近くにプロットされており、日本材料学会式が正しいとする認識においては、既往文献と同様に 10 回打撃が必要であることになる。しかし、どのような配合であっても反発度が 55 程度になるという事実は、コンクリートの品質（強度）が評価されていないことを意味する。この連打の方法を用いることは、テストハンマーの本質的な問題を見誤る可能性があるので、実施するのは適当ではないと判断される。



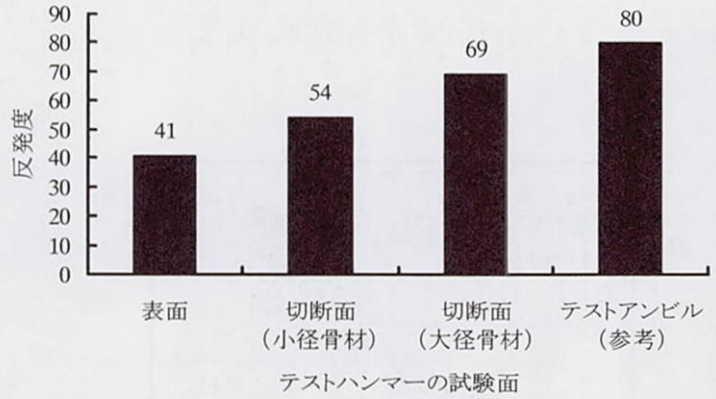
図－32　連続打撃回数と反発度および反発度の変化率の関係



図－33　テストハンマー試験時の圧縮強度と反発度および反発度の変化率の関係



図－34　反発度と圧縮強度の関係（同一個所連打、切断面）



図－35　テストハンマーの試験面の状態と反発度の関係（切断の影響）

3.6.10 供試体の表面を切断した面における粗骨材部分の反発度

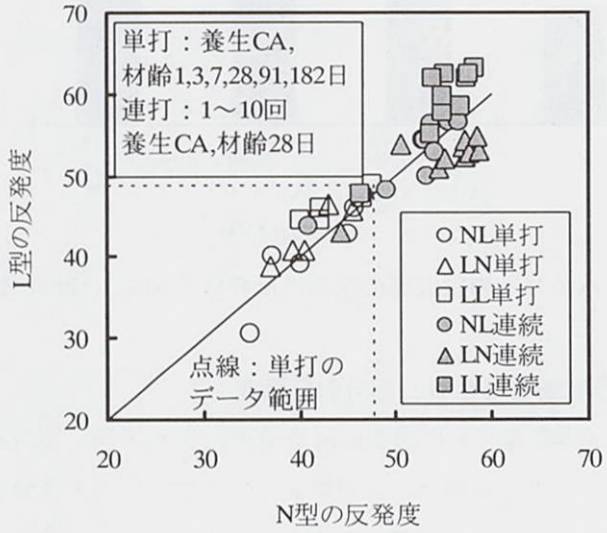
図－34 の一部と図－35 は、供試体の表面から約 20mm を切断し、その面に現れた粗骨材部分に対してテストハンマー試験を実施した結果である。試験は、骨材断面が大きな部分（大径骨材）と小さな部分（小径骨材）の双方を対象にした。なお、断面が小さな部分が必ずしも小径であるとは限らず、大径骨材の一部である可能性もあるが、なるべく、断面が小さい骨材が集まった箇所で大径骨材でないと推測されるものを対象にした。この試験の目的は、粗骨材の反発度を測定することにより、前述のように反発度を左右するコンクリート表面近くのモルタルの影響を排除し、コンクリートから得られる反発度の最大値を確認するものである。

図－35 に示すとおり、コンクリート表面で実施した反発度は 41 であるのに対し、大径骨材に対して測定した反発度は 69 となり、粗骨材を覆うモルタルの強度が反発度に大きく影響することがわかる。また、粗骨材の切断面で測定しても、その大きさによって反発度が異なり、小径骨材では 54 まで低下している。このことにより、反発度は、骨材自体とそれを固定するモルタルの双方の性質に影響されるものと言える。また、表層近くの粗骨材の寸法や扁平の程度によって、テストハンマーの力（エネルギー）の伝達・分散が変化し、測定される反発度のばらつきになる可能性がある。

図－34 では、コンクリート表面を打撃した場合よりも、切断面の小径骨材に対して打撃した場合の反発度の方が、日本材料学会式と一致することがわかる。そのため、今回は供試体表面の凹凸が小さいので無処理でテストハンマー試験を行ったが、コンクリート表面を入念に研磨した場合には粗骨材までの距離が近く、もしくは露出することによって反発度が大きくなり、日本材料学会式と一致する可能性がある。また、前述の 10 回連続打撃を行った場合の反発度とも一致していることから、10 回の連続打撃によって表面のモルタル層が圧密された状態となることでクッションの働き（反発係数、エネルギー吸収能力）が小さく、場合によっては粗骨材までの距離が短くなることが考えられ、切断面の結果と近い値になるものと思われる。

文献 15）では、表層 10mm を研磨した場合の反発度と圧縮強度の関係には長期材齢の影響をかなりうち消すことができるとする Schmidt の報告を引用し、この方法を提案している。この方法は、なるべく粗骨材がない部分で試験を行うものであるが、そうであっても、供試体の表面で実施するものとは異なり、Schmidt

の試験結果にもばらつきが見られる。表層を除去する方法を採用するのであれば、材齢が初期段階から同様に表層を除去したものの値を確認しておく必要があるものと思われる。



図－36　軽量骨材を使用した供試体に対する 2 種類のテストハンマーの反発度の関係

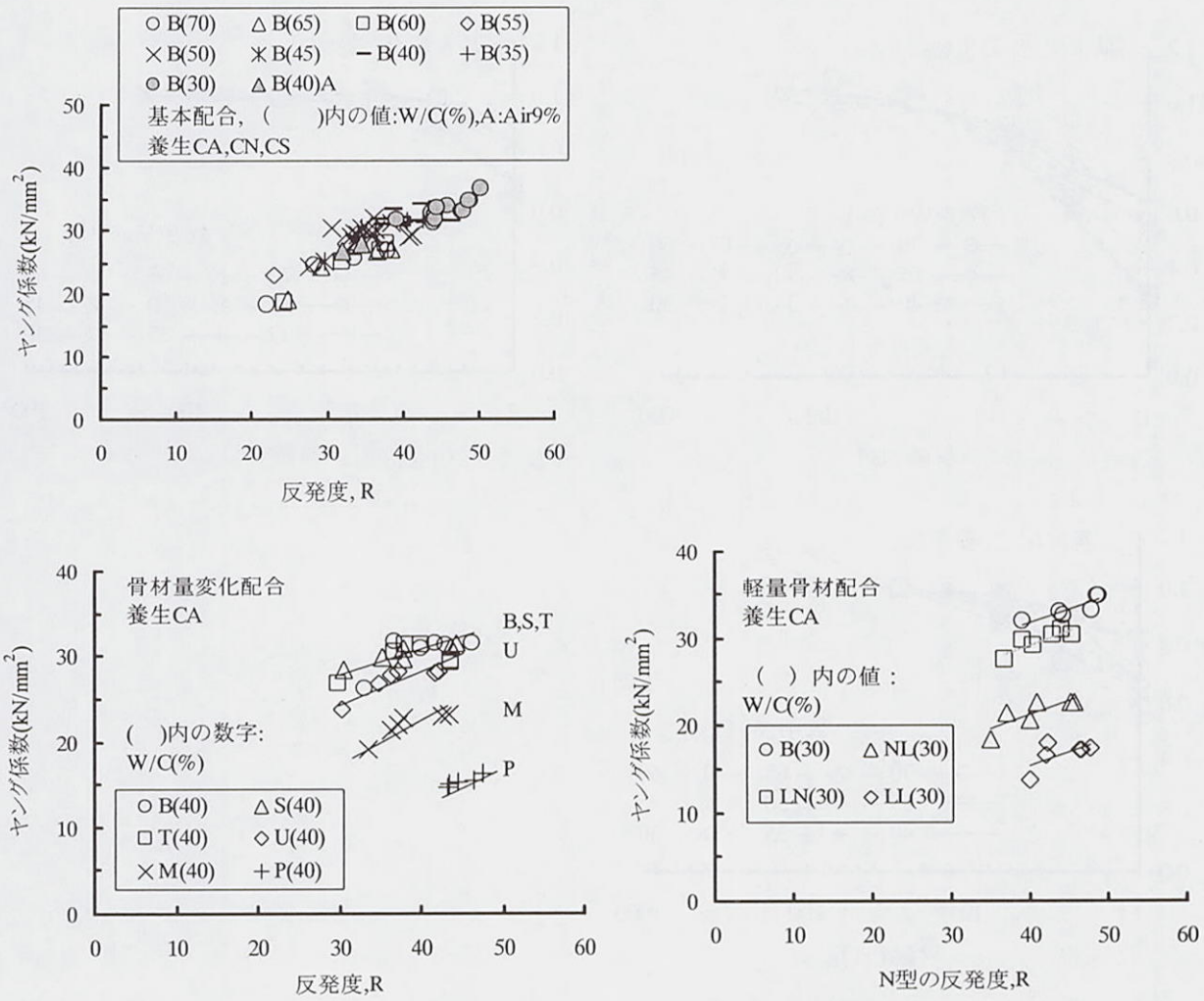
3.6.11 軽量骨材を用いた供試体におけるテストハンマーの種類が反発度に及ぼす影響

軽量骨材を使用する場合には、テストハンマーN 型よりも衝撃エネルギーが小さなテストハンマーL 型が使用されている。そこで、今回の試験においても、N 型と L 型のテストハンマーの反発度を比較することにした。図－36 に示すとおり、双方の試験器で得られた反発度に顕著な相違は見られない。高強度域の軽量コンクリートの強度推定に関してはテストハンマーN 型でも十分であるものと思われる。

3.6.12 反発度とヤング係数の関係

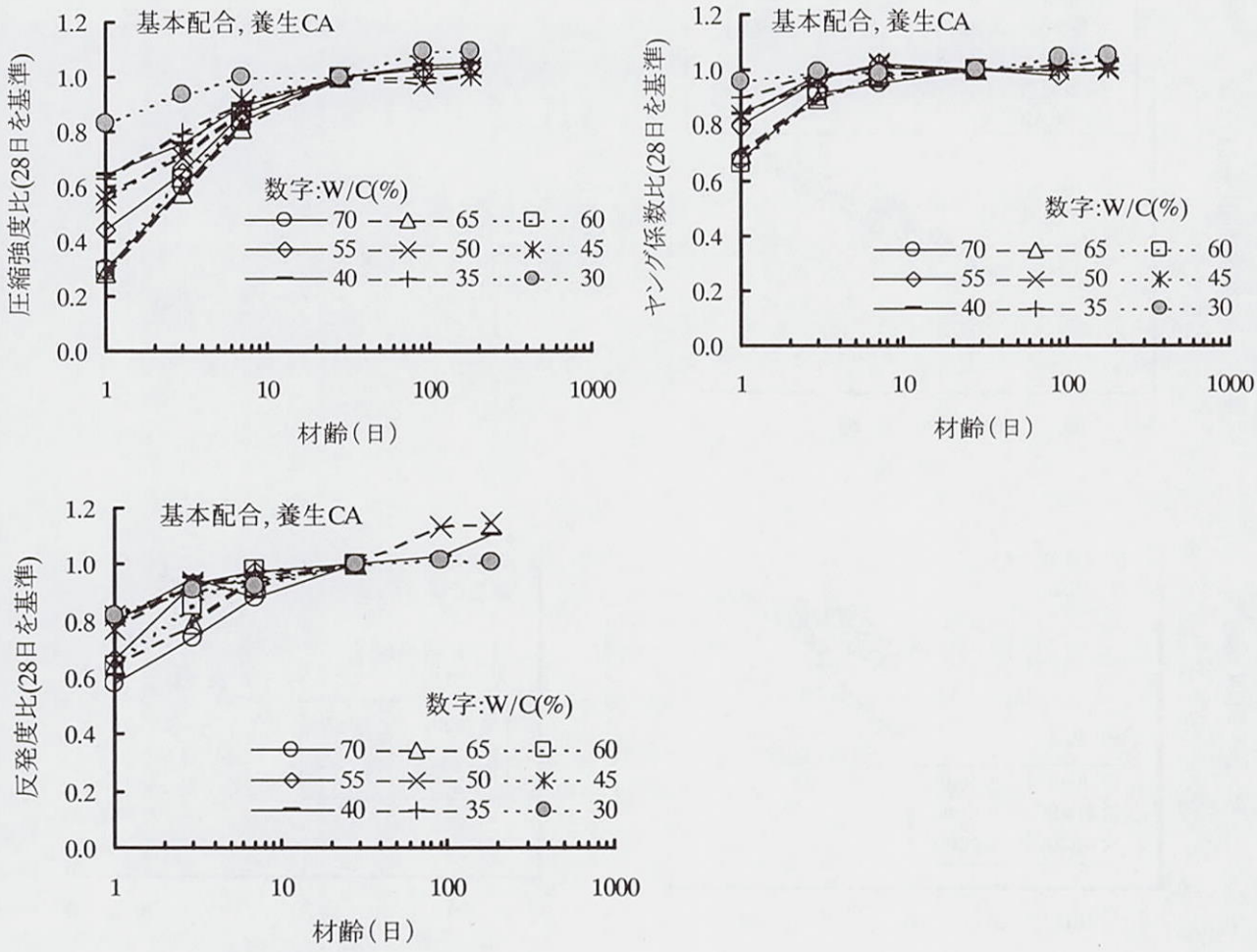
一般には、テストハンマーの反発度は、コンクリートの圧縮強度との関係で表したものが多い。しかし、反発度と圧縮強度の関係では、図－22 に示したように直線ではなく、曲線の回帰の方が一致した。また、テストハンマーのエネルギーの吸収能力や反発係数に対して、コンクリートの弾性体としての性質が現れることになり、その場合には圧縮強度よりもヤング係数の方が相関があると考えた。文献 16)においても、テストハンマーの原理の説明として、反発度は弾性係数と比例関係があり、弾性係数と圧縮強度とは関係があるので、反発度から圧縮強度を推定するものであるとしている。

図－37 に示すとおり、基本配合においては、反発度とヤング係数に相関が見られ、反発度はヤング係数を間接的に表現するものと思われた。しかし、骨材量変化配合および軽量骨材配合では、個々の配合においては直線回帰できるものの、ヤング係数が基本配合と大幅に異なるものに対し、反発度と圧縮強度の関係のように一つの回帰式で表すことができない。



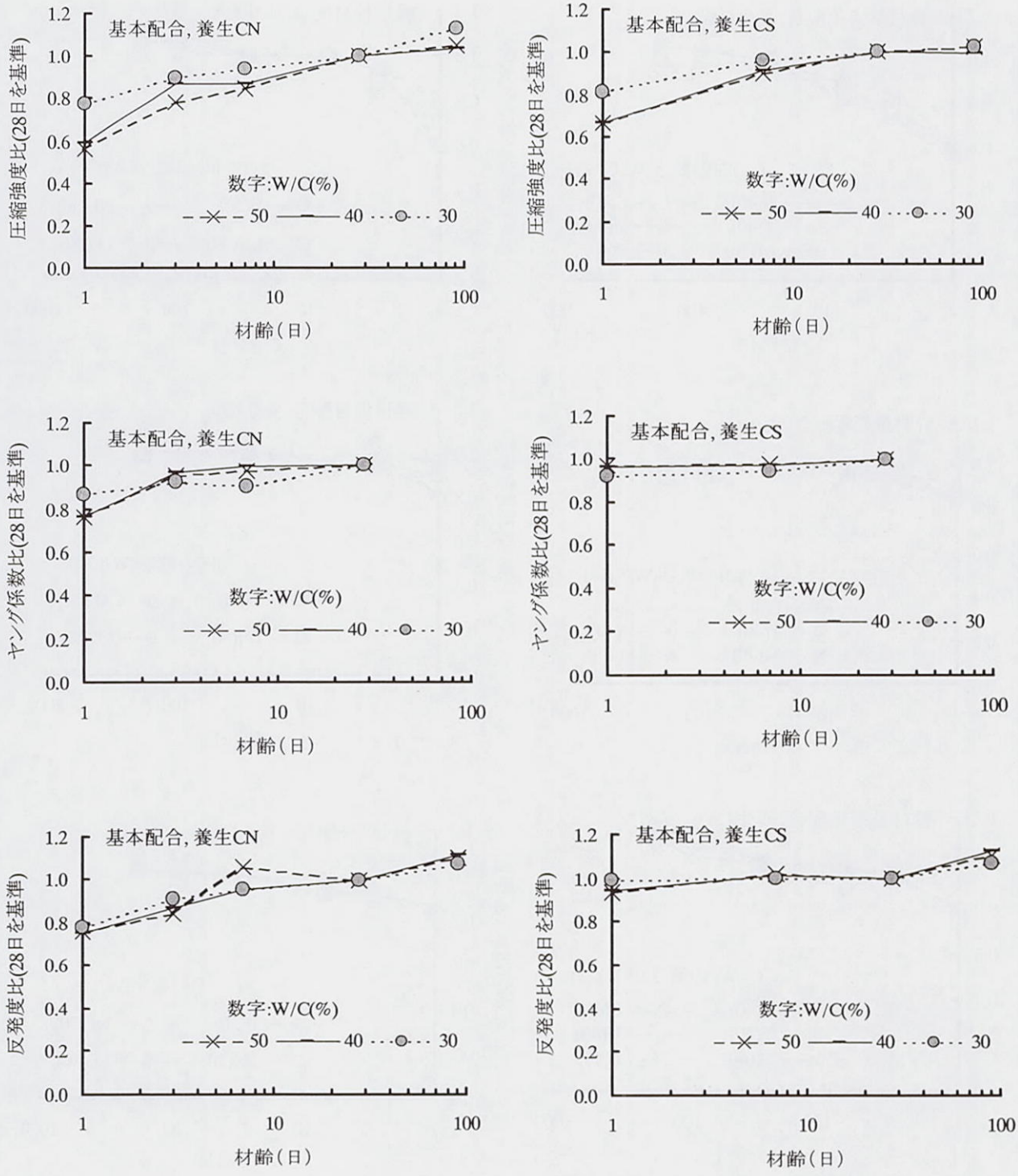
図－37　反発度とヤング係数の関係

図－38 は、材齢 28 日を基準とした場合の各材齢の圧縮強度、ヤング係数および反発度との比を表したものである。これは、言い換えれば、それぞれの値の材齢に伴う発現率のようなものを表していることになる。以下、発現率と表現する。まず、図－38(1)に示すとおり、基本配合（養生 CA）では、全体的な傾向として、初期材齢の発現率は、圧縮強度、反発度、ヤング係数の順で高くなることがわかる。材齢 1 日における反発度の発現率は、0.6～0.8 の範囲であり、ヤング係数と一致するものが多い。このことが反発度とヤング係数との関係を調べた場合に比較的直線関係になる理由であると思われる。また、圧縮強度の初期材齢における発現率が水セメント比の影響を大きく受け、0.3～0.8 の広範囲にばらつきを生じるが、材齢 7 日以降の発現率のばらつきは小さくなる。反発度と圧縮強度の関係を見い出そうとした場合、この発現率の相違によって特定の直線回帰式にならないことを意味するものであるが、初期材齢のデータを除けば、両者の発現率の傾向がほぼ一致するので直線回帰も可能であることになる。

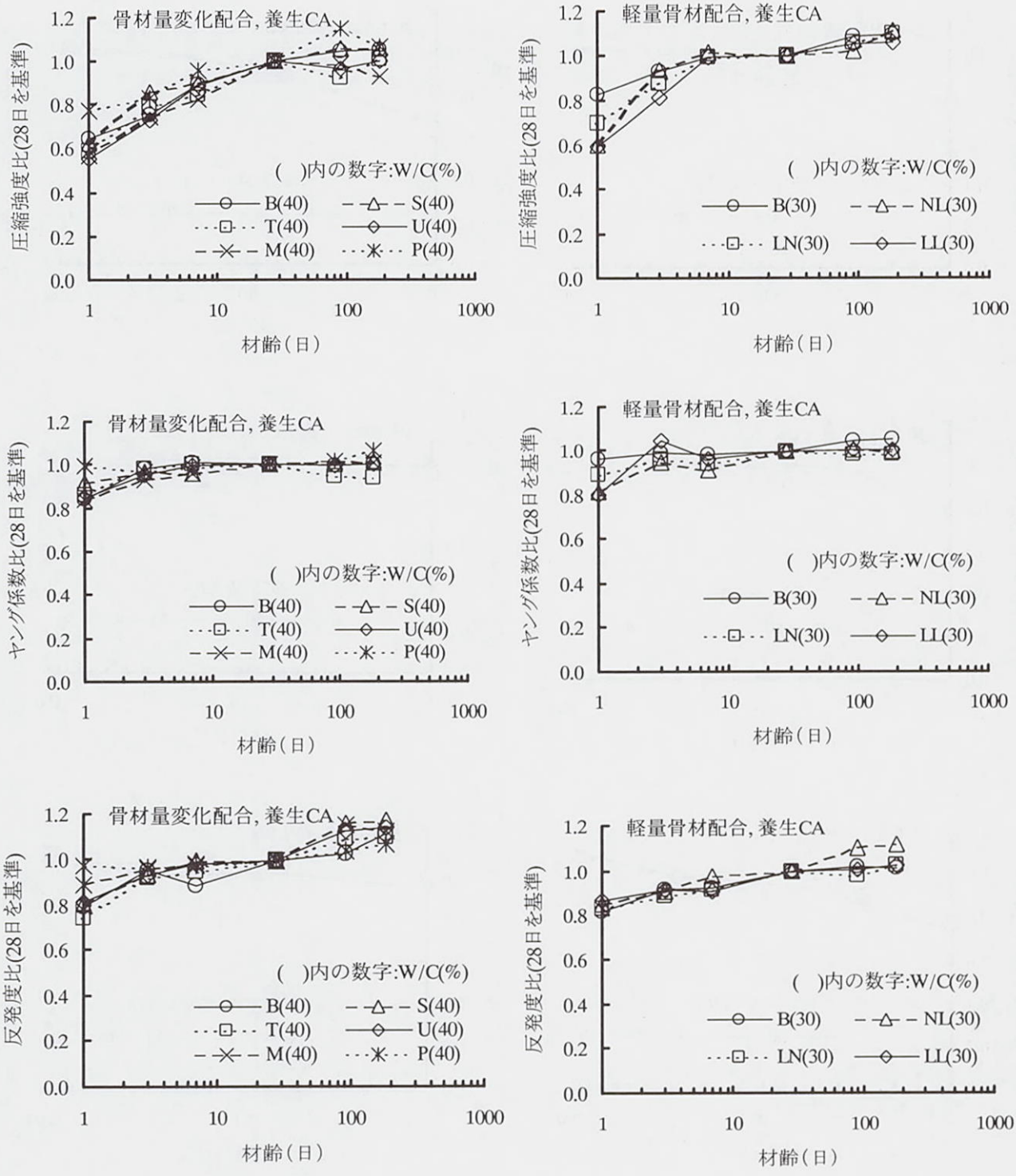


図－38(1)　基準配合（養生 CA）における材齢 28 日を基準とした場合の
圧縮強度比、ヤング係数比および反発度比の経時変化

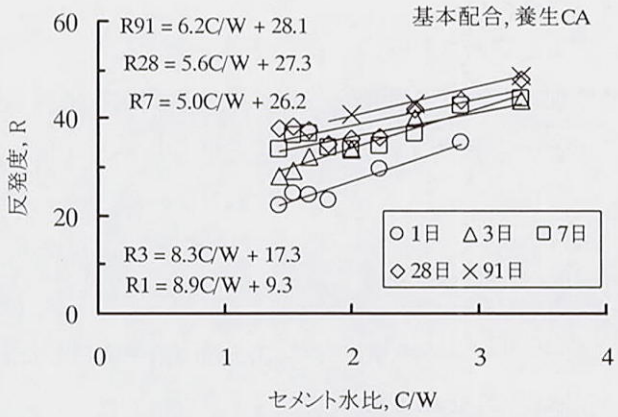
図－38(2)は、基本配合の養生 CN,CS、図－34(3)に示した骨材量変化配合および軽量骨材について調べたものである。基本配合の養生 CA の場合と顕著な違いは見られない。全体を通して、発現率という観点から見れば、初期材齢を含めた場合には反発度とヤング係数が比較的近くように見える。しかし、材齢 91 日においては、ヤング係数の増加がほとんどないのに対し、圧縮強度と反発度には増加が見られる。



図－38(2)　基準配合(養生 CN, CS)における材齢 28 日を基準とした場合の
圧縮強度比、ヤング係数比および反発度比の経時変化



図－38(3)　骨材量変化配合および軽量骨材配合における材齢 28 日を基準とした場合の圧縮強度比、ヤング係数比および反発度比の経時変化



図－39 基本配合におけるセメント水比と反発度の関係

図－39 に示すようにセメント水比と圧縮強度の関係で表し、直線回帰した場合の各材齢の傾きは、図－11(2)に示したセメント水比と圧縮強度またはヤング係数の関係との相違が確認できる。このことからも、反発度が圧縮強度またはヤング係数を直接的に表すものではないことがわかる。

このように試験結果から反発度と圧縮強度またはヤング係数の関係を調べた場合には、データのとり方によって関連付けが可能であるとする判断と、反対に関連付けが難しいとする判断が生まれる。硬度もしくは反発度とコンクリートの圧縮強度及びヤング係数の間に何らかの原理的な裏付けを行わないで、圧縮強度を推測しようとするものであるから、あまりにも精度に期待した現在のテストハンマーの位置づけに問題があるものと思われる。

4. テストハンマーの原理に関する試験

4.1 目的

2 章において、PC 工場の工場製品に対する実態調査の結果、反発度と圧縮強度の関係は、高強度域ほど、日本材料学会の式とは一致せず、その式で計算された圧縮強度は実際の値よりも小さくなることがわかった。これは、3 章の反発度に及ぼす影響要因に関する試験においても同様の傾向を確認した。また、反発度 35 前後を境界に、これよりも小さい領域では日本材料学会式に合致するものの、大きい場合には反発度に対する圧縮強度の増大量が大きくなることから、広範囲の強度域に対しては反発度と圧縮強度の直線回帰を行うことが適切ではなく、曲線回帰が適当であると判断された。

以前よりテストハンマーの動作機構の特徴に基づくと、より適切な回帰であると報告されている[15]。しかし、複雑な曲線の式を求めて検査に利用するのは煩雑であることや、低強度域では動作機構から得られる曲線と直線回帰との誤差が小さいことなどから、一般には直線（一次式）で回帰するようになった。しかしながら、対象とした圧縮強度の範囲やその偏りによって様々な一次式が示される結果を招くことになり、現状の研究や検査の対象は、この一次式が成り立つことを前提とし、その精度を上げることに偏重しているように思われる。3 章で説明したとおり、対象とした強度域によって一次式が変化し、全体として曲線的な変化

を示すことが明らかであることを考えれば、テストハンマーの原理から見直しを行い、原理に基づいたテストハンマーの活用が必要であるものと判断される。

本章では、テストハンマーの原理、関連する弾塑性変形、硬度の問題を把握し、供試体へのプランジャーの静的圧入によって、弾塑性変形とテストハンマーの反発度の関係を明らかにした。

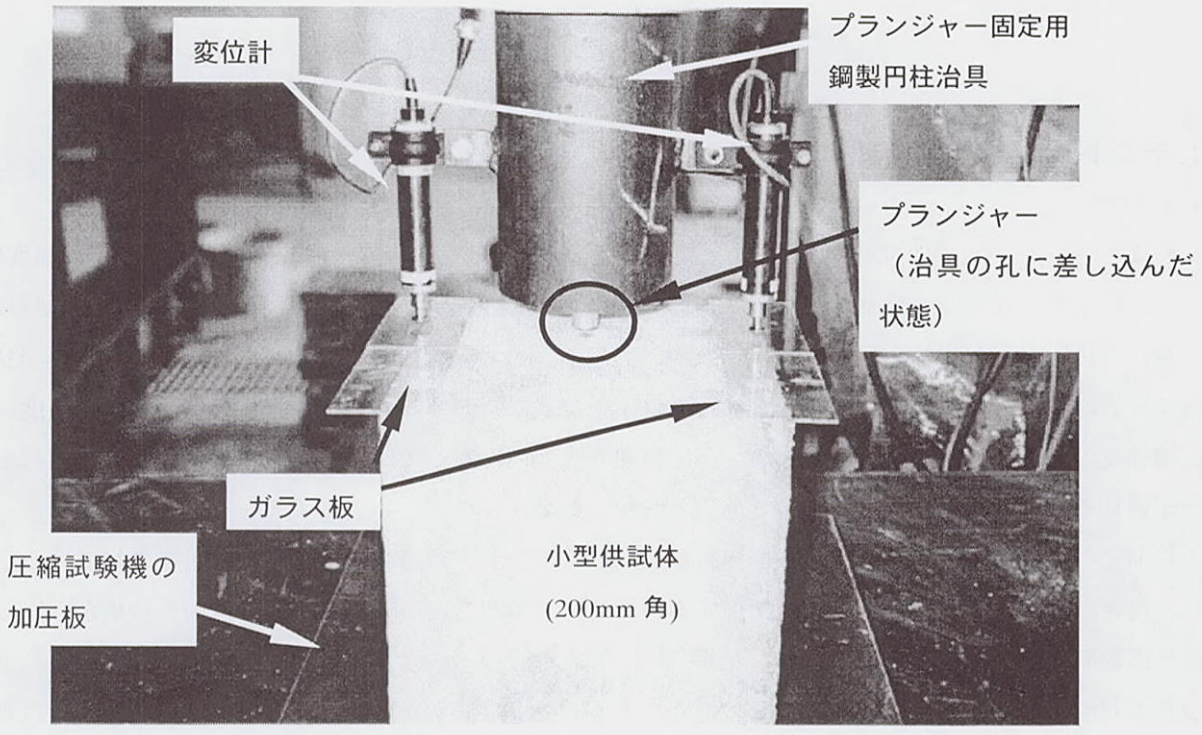
4.2 試験条件

(1)コンクリート及び供試体の条件

3 章で実施した試験と同一のコンクリート、小型供試体(200mm 角)を使用した。供試体の養生は、養生 CA を中心とし、一部の配合において養生 CS を加えた。

(2) 静的圧入試験の条件

静的圧入試験は、図－40 に示すように圧縮試験機の加圧板上に小型供試体を設置し、上方からテストハンマーのプランジャーで供試体表面を加圧するものである。プランジャーは加圧時に偏心する可能性があったことから、鋼製円柱治具（直径 100mm, 高さ 160mm）に設けた孔（プランジャーの径が 15mm であることを考慮し、直径 15.2mm とした）内を 70mm まで差し込んだ。そのため、テストハンマーとはプランジャーの長さがかなり異なり、プランジャーの弾性変形量の扱いが若干異なる。治具の側面には変位計を取り付けて試験時の変位を測定した。変位計の接する面には凹凸や変形がないよう、供試体の試験面の両端にガラス板を貼り付けた。変形量は、2 本の変位計から測定された値の平均とした。静的圧入試験の規定は存在しない



図－40　静的圧入試験の試験方法

ので、今回の試験では、JIS A 1108 の圧縮強度試験を参考にした。プランジャーの断面積 177mm^2 (先端は曲率があるが、最大直径 15mm で計算した)に対し、圧縮強度試験と同程度の載荷速度（0.4～0.6N/mm^2/s）をかけることにより、荷重増加率は約 0.1kN/s となった。最大荷重は、シュミットハンマーの考案者 Schmidt も同種の試験[18]を実施しており、試験時の荷重を 5.88～11.76kN(600～1200kgf)としている。しかし、荷重が大きい場合の圧痕深さがテストハンマー試験のものよりもかなり大きく、6～8kN 程度の状態が近いように思われたことから、その範囲を中心に 4, 6, 8, 10kN の 4 水準とした。

(3)静的圧入試験以外の条件

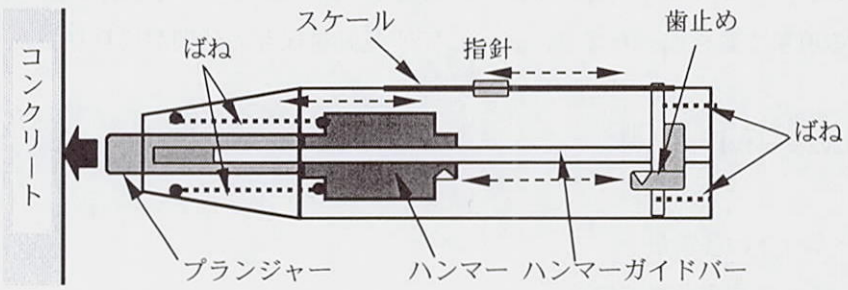
テストハンマーの反発度、圧縮強度、表面含水率は、3 章に記載した試験方法とその結果である。

4.3 テストハンマーの原理

4.3.1 テストハンマーの動作機構及び基本的な考え方

今回の試験で、テストハンマーの試験器として使用したシュミットハンマーN 型の内部構造を、図－41 に示す。図は文献 16,17)に掲載されたものを参考に作成したもので、説明に必要な部品のみに簡略化している。また、テストハンマーの原理を考える上で、シュミットハンマーの開発者である Schmidt の論文 18)を参考にした。

テストハンマーは、まず、試験器のプランジャー先端をコンクリート表面に押しつけると、先端が歯止めで固定されていたハンマーが外れ、ハンマーと本体を接続したばねの力でハンマーがプランジャーに衝突する。次に、この衝突エネルギーはコンクリートとの接触に伴って反発エネルギーとなり、プランジャー、ハンマーガイドバーを介して指針の運動（移動）エネルギーに変換される。最終的にスケールの中でこの指針が止まった位置を反発度として読みとっているわけである。簡単に言えば、バネの力を利用して跳ね返りの程度を測定する試験器である。また、反発度とは、試験器の目盛全体の中での移動距離を全長の比で表して無次元化したものであり、その比を 100 倍（百分率表示）して整数で表したものを一般には用いている。コンクリートとプランジャーの衝突現象は、2 固体の衝突であると言える。プランジャーに比べて、コンクリート供試体または構造物の質量が極めて大きく、また供試体ならば圧縮試験機で固定されていることから、反発係数およびエネルギーロスは、プランジャーの速度、質量で与えられることになる。一方、微視的に見れば、プランジャーとコンクリートとの衝突によって双方には何らかの変形を伴うものと考えられる。最も



図－41　シュミットハンマーN 型の内部構造

わかりやすいのが、テストハンマー試験を行った時に観察されるコンクリート表面に生じたくぼみ（塑性変形）である。これ以外に、コンクリート及びプランジャー（鋼材）が弾性体であることから考えれば、双方には衝突に伴う弾性変形を生じるものと判断される。

最後に、シュミットハンマーが考案され、現在のように普及するまでの表面硬度の測定方法としては、吉田の鉄筋の落下法[19]や伴らの落下式押込み硬度試験[20]、Einbeck の回転式ハンマーや Frank のばね式ハンマー[21]などが行われてきた。シュミットハンマーは Frank のばね式ハンマー（通称、Frank hammer）の特徴を活かしたものであるが、これは、鋼球をコンクリート表面にぶつけた時に発生するくぼみの直径を測定して表面硬度を求めるものである。この考え方は、金属やセラミックスの硬度を測定する方法の一つであるブリネル硬度[22]の試験と概ね一致する。ブリネル硬度は、鋼球に与えた荷重と比例、発生したくぼみの直径及び深さとは反比例の関係にある指標である。金属の場合には硬度との関係には降伏強度と、セラミックスの場合には圧縮強度、引張強度、ヤング係数と関連づけ、直線回帰を用いてそれらの推定方法としている場合が多い。シュミットハンマーも、このブリネル硬度を応用したものであり、また、セラミックスと同様にコンクリートの圧縮強度との関係を直線回帰したものである。

テストハンマー（シュミットハンマー）に関する基本的な考え方をまとめると、以下のとおりである。

1) テストハンマーの動きは、バネ（弾性体）のエネルギーを利用したものである。
2) 複数の部品が連動し、最終的な読み値である反発度を得ているので、機械的な摩擦などが生じることになり、バネのエネルギーに対するロスを考慮する必要がある。
3) 反発度は、コンクリートとの反発エネルギー（反発係数）を表す指標であるが、最終的に読みとられる反発度は、指針の移動距離をスケールの全長で除して無次元化した値で表される。
4) テストハンマーの動作はコンクリートとプランジャーの衝突現象であり、さらにコンクリートは静止しているので、プランジャーの衝突前後のエネルギー変化で考えることができる。
5) 衝突後にはコンクリートの塑性変形（くぼみ）を生じ、衝突中にはコンクリートとプランジャーの弾性変形を伴う可能性が高い。
6) ブリネル硬度は、発生したくぼみ（塑性変形）の大きさによって計算される。
7) ブリネル硬度は、金属などと同じように強度と比例関係になることを前提にしている。

4.3.2 反発度の数式化

まず、プランジャーとコンクリート供試体との衝突を、図－42 に示す 2 個体が同一直線上を運動し、衝突によって跳ね返る現象で置き換えた場合、式(1)に示す運動量保存の法則が成り立つ。

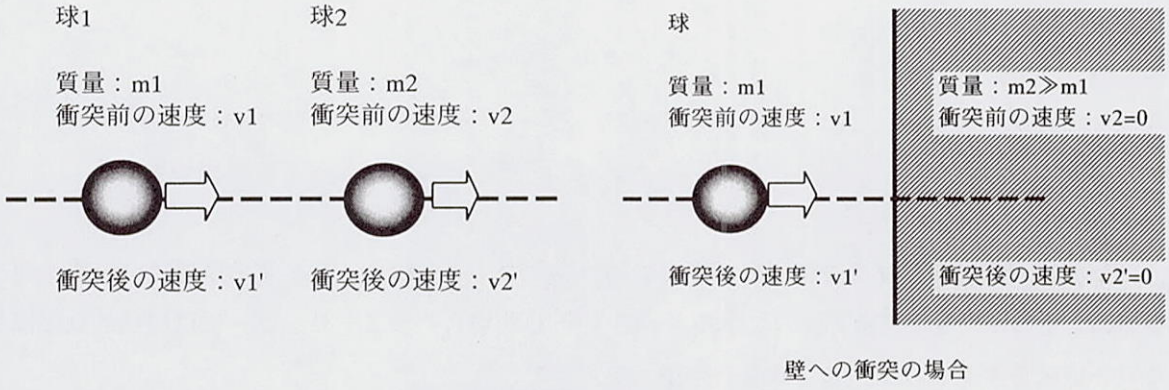
$$m1v1 + m2v2 = m1v1' + m2v2' \quad (1)$$

ここに、

m1,m2：球 1,2 の各質量

v1,v1'：球 1 の衝突前後の速度

v2,v2'：球 2 の衝突前後の速度



図－42　2 個体間の衝突の問題

反発係数（跳ね返り係数）e は、式(2)のとおりである。また、衝突におけるエネルギーの損失⊿E を考慮した衝突前後のエネルギー保存則は、式(3)で表すことができる。

$$e = \frac{v2' - v1'}{v1 - v2} \tag{2}$$

$$\frac{1}{2}m1v1^2 + \frac{1}{2}m2v2^2 = \frac{1}{2}m1v1'^2 + \frac{1}{2}m2v2'^2 + \Delta E \tag{3}$$

テストハンマーのプランジャーとコンクリート供試体・構造物の衝突現象であり、プランジャーに比べて、コンクリート構造物は極めて大きいことから、質量は無限大の扱いができる。つまり、コンクリート構造物は静止した状態である。よって、式(2)及び式(3)は、以下のように簡略化した式で表される。コンクリート供試体に対し、テストハンマーの試験で使用する場合においても同様の扱いができる状態（供試体の寸法や固定方法）でなければならないと言える。

$$e = -\frac{v1'}{v1} \tag{4}$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}m1(v1^2 - v1'^2)$$

$$= \frac{1}{2}m1v1^2(1 - e^2) \tag{5}$$

衝突問題と同様の考え方で、テストハンマー内部でのばねのエネルギーを考えれば、ばねのエネルギー損失⊿E は、ばね定数 k と距離 x（前）, x'（後）によって、以下のように表すことができる。テストハンマーの衝突エネルギーは指針の移動距離に変換されるので、式(6)における反発係数は、移動距離をスケールの全長で除して無次元化した反発度と一致する。

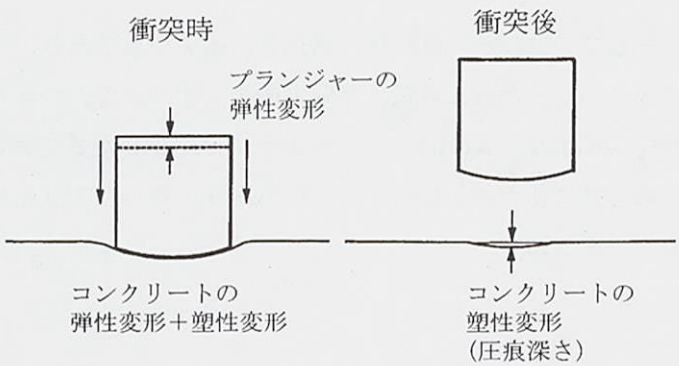
$$\Delta E = \frac{1}{2}k(x^2 - x'^2)$$

$$= \frac{1}{2}kx^2(1 - e^2) \tag{6}$$

次に、コンクリート表面とプランジャーの衝突におけるエネルギー収支と発生する変形について検討を行う。衝突前のエネルギーを E, 衝突後のエネルギーを E'とした場合、テストハンマーには機械的な摩擦などのエネルギーロスを考慮すれば、エネルギー効率 η を用いて、

$$\eta = E'/E \tag{7}$$

と表現できる。すなわち、衝突後には、E'または ηE のエネルギーを持つ状態になると言える。Schmidt は、装置内の個々の摩擦について考慮している[18]が、今回の試験で使用したテストハンマーの諸値が明らかではない上に、式の展開が複雑になり、本質的な問題を明確にすることができない可能性があるので、衝突前後のエネルギー収支全体をとらえた形とした。



図－43　コンクリート表面とプランジャーの衝突によって発生する変形

テストハンマー試験を行うと、プランジャーが衝突したコンクリート表面には、わずかながらくぼみを生じていることが観察される。これは、プランジャーの衝突エネルギーによってコンクリートの塑性変形が生じたことを意味するものである。また、目視で観察することはできないものの、鋼製のプランジャーとコンクリートは弾性体であるので、衝突時にはさらに双方の弾性変形を伴うものと推測される。これらを簡単に表現したものが、図－43 である。衝突時の変形は、式(8)のように表すことができる。なお、衝突力が小さいので、プランジャーの塑性変形は生じないものとする。

$$\theta all = \theta e + \theta cp$$
$$= \theta pe + \theta ce + \theta cp \quad (8)$$

ここに、

θall :衝突によって生じる全変形

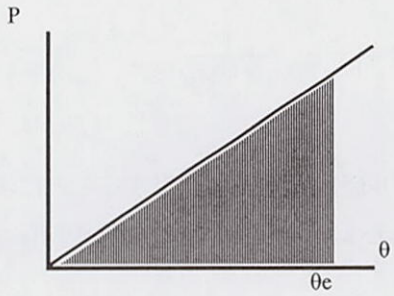
θe:衝突時の弾性変形

θpe:プランジャーの弾性変形

θce:コンクリートの弾性変形

θcp:コンクリートの塑性変形（衝突後には圧痕深さ）

図－44 に示すとおり、 弾性変形は、荷重 P と変形 θe は 1 次の関係にあり、弾性エネルギーEe は、図中の三角形の面積に相当するので、以下の式(9)のように表現される。式(11)では、最終的に単位荷重当たりの弾性変形で表した。



図－44　弾性体の荷重と変形の関係

$$Ee = 1/2\,\theta e \cdot P$$
$$= 1/2\,(\theta e/P) \cdot P^2$$
$$= 1/2\,\theta' e \cdot P^2 \quad (9)$$

ここに、

Ee:弾性変形に伴うエネルギー

θe:弾性変形

P:荷重

$\theta' e$:単位荷重当たりの弾性変形, $\theta' e = \theta e/P$

一方、弾性変形とは異なり、塑性変形が荷重と一次の関係にあるとは限らないが、Schmidt はブリネル硬度の定義を利用し、弾性変形と同様の表現ができるものとしている [18]。ブリネル硬度とは、式(10)で定義されるものである [22]。

$$H_B = \frac{P}{2\pi r \theta cp} \quad (10)$$

ここに、

H_B:ブリネル硬度

P :荷重

r :プランジャー先端（ブリネル硬度試験では球形）の曲率半径

θcp:コンクリートの塑性変形

ブリネル硬度は、荷重を試験器の接触面積（分母は球の一部分の表面積に対する計算式）で除した一種の応力を表すものであり、次元は圧縮強度など同様に $[FL^{-2}]$となる。式(10)のブリネル硬度が成立し、任意の材料のブリネル硬度が一定のものであるとするならば、荷重に比例して塑性変形が増加することになり、弾性変形と同様に式(11)が成り立つことになる。また、この関係より、式(10)は式(12)に示すように表現できる。

$$\theta cp = \theta'cp \cdot P \tag{11}$$

$$\theta'cp = \frac{1}{2\pi r H_B} \tag{12}$$

ブリネル硬度の定義を利用することによって塑性変形は弾性変形と同様な式の展開が可能になり、塑性変形に伴うエネルギーも式(9)と同様の関係で表すことができる。

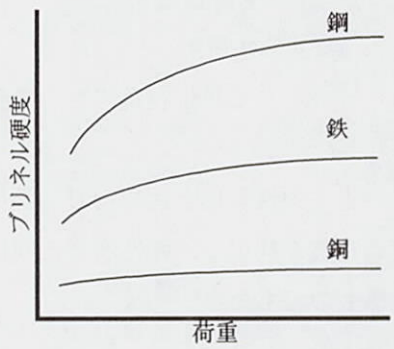
$$\begin{aligned} Ecp &= 1/2\,\theta cp \cdot P \\ &= 1/2\,(\theta cp/P) \cdot P^2 \\ &= 1/2\,\theta'cp \cdot P^2 \end{aligned} \tag{13}$$

以上の式の展開は、ブリネル硬度が荷重にかかわらず一定になることが成立していることを前提にしたものである。しかし、金属製の供試体に対してブリネル硬度を測定した結果[23]を簡略化して表せば、図－45 に示すとおり、金属の種類によっては荷重の増加に伴ってブリネル硬度が大幅に変化しているものがある。コンクリートに対するブリネル硬度の変化に関しても検討を要するものと思われる。

ブリネル硬度の荷重依存性がないことを前提とする Schmidt の考え方に従えば、式(9)と式(11)によって式(14)を導くことができる。

$$Ee/Ecp = \theta'e/\theta'cp \tag{14}$$

また、式(7)における衝突後のエネルギーE'は Ee と Ecp の和であることを踏まえ、式(14)を代入すると、次のようになる。



図－44　金属に対する荷重とブリネル硬度の関係

$$\begin{aligned} \eta E &= Ee + Ecp \\ &= Ee\,(1+\theta'cp/\theta'e) \\ Ee/E &= \eta/(1+\theta'cp/\theta'e) \end{aligned} \tag{15}$$

$$= \eta\,\frac{\theta'e}{\theta'e + \theta'cp} \tag{16}$$

式(16)は、弾性変形のエネルギーEe をテストハンマーの指針が移動するエネルギーに変えるものであるので、塑性変形で失われたエネルギーEcp は移動エネルギーに影響しないことを考慮している。エネルギーは、式(6)に示したとおり、反発係数の 2 乗で表されることから、式(16)は、式(17)に書き換えることができる。なお、式(6)中の⊿E は、エネルギー損失なので、Ee/E が反発度ρの 2 乗に相当する。

$$\rho = \sqrt{\eta \frac{\theta'e}{\theta'e + \theta'cp}} = \sqrt{\eta \frac{Ee}{Ee + Ecp}} \tag{17}$$

以上の式の展開において、反発度と圧縮強度の関係は存在しない。

式(10)～式(12)において塑性変形とブリネル硬度の関係を仮定したことに加え、式(17)によって反発度が弾性変形と塑性変形で表されることから、以下のとおり、式を展開することができる。

式(12)により、

$$H_B = \frac{1}{2\pi r \theta'cp} \tag{18}$$

式(17)により、

$$\rho^2(\theta'e + \theta'cp) = \eta\,\theta'e$$
$$\theta'cp = \eta\,\theta'e/\rho^2 - \theta'e$$
$$= \theta'e(\eta/\rho^2 - 1) \tag{19}$$

式(19)を式(18)に代入し、

$$H_B = \frac{1}{2\pi r \theta'e(\eta/\rho^2 - 1)} = \frac{\rho^2}{2\pi r \theta'e(\eta - \rho^2)} \tag{20}$$

と表すことができる。式(21)のように式(20)の反発度の項をκと置けば、ブリネル硬度と反発度の関係は、式(22)のように表すこともできる。

$$\kappa = \frac{\rho^2}{\eta - \rho^2} \tag{21}$$

$$H_B = \frac{\kappa}{2\pi r \theta' e} \tag{22}$$

なお、式(18)と式(22)を見比べれば、式(21)は、

$$\kappa = \theta' e / \theta' cp \tag{23}$$

という関係になり、右辺は式(14)と同じ形になる。

ブリネル硬度は、式(22)に示したとおり、反発度の２乗の式で表されており、両者には一次の関係はない。また、これまでの式の展開において、コンクリートの圧縮強度やヤング係数などの物性は全く含まれていない。ここで、Schmidt は、式(24)に示すように、圧縮強度がブリネル硬度に比例すると仮定している [18]。

$$H_B = \alpha \sigma c \tag{24}$$

ここに、

H_B:ブリネル硬度

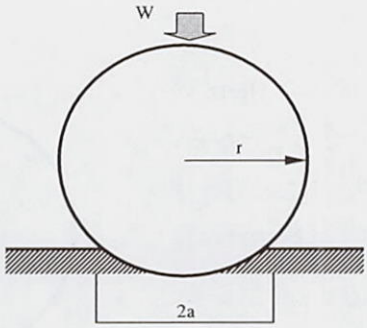
α:定数

σc:圧縮強度（立方体）

シュミットハンマーの考案段階に立ち戻れば、ブリネル硬度と反発度の関係と同様に、圧縮強度と反発度は一次式の関係にはないことになり、試験結果に対して直線回帰を行い、その精度を高めようとすることは、基本的にテストハンマーの原理から矛盾するものである。式(23)までの展開が理論的なものであるのに対し、ブリネル硬度と圧縮強度の関係は実験で得られたものであることに最も注意しなければならない。式(24)の仮定に関し、Schmidt が示す定数 α は、K.Steinwende の実験を引用して 8～12、6～14（2 種類の実験結果）という範囲を示している [18]。すなわち、コンクリートなどの条件によって、定数は±20%または±40%の変化があることを意味し、仮に反発度とブリネル硬度の関係が成立していたとしても、最終的に圧縮強度を推定する段階においてはその程度の誤差を生じることになる。よって、反発度から圧縮強度の推定精度を上げようとしても、このブリネル硬度と圧縮強度の関係を明らかにできない限り、本質的な改善が期待できないものと思われる。なお、硬度の問題については後述する。

4.3.3 弾塑性力学における２物体の接触問題

ブリネル硬度のような球と板の接触の際に生じる現象は、Hertz の接触理論 [23]で説明されることが多い。この理論に基づけば、図－46 に示す球の接触部分の半径及び平均圧力は、式(25)、式(26)によって与えられる。



図－46　球圧子による試料の変形

$$a = \{\frac{3}{4} Wr(\frac{1-\nu_1^{\ 2}}{E_1} + \frac{1-\nu_2^{\ 2}}{E_2})\}^{1/3} \tag{25}$$

$$Pm = \frac{W}{\pi a^2} \tag{26}$$

ここに、

a:接触部の半径

W:荷重

r:球の半径

E_1, ν_1:球のヤング係数、ポアソン比

E_2, ν_2:板のヤング係数、ポアソン比

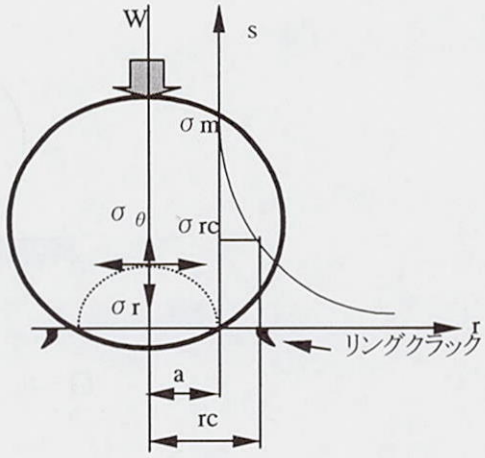
Pm：平均応力

式(18)に示したブリネル硬度が球の接触部分の表面積で除している点で、式(26)の平均圧力とは異なるが、球と板の接触問題としては同じことである。式(26)における半径 a が、式(25)に示すようにヤング係数の関数であることから、この理論が適用できるのであれば、テストハンマーにおける変形においても、圧縮強度ではなく、ヤング係数を指標として考える方がよい。

一方、塑性変形を考慮した場合には、平均応力 Pm は降伏応力 Y と比例するものとして取り扱っていることが多い[22]。すなわち、Tresca の降伏条件を適用した場合には最大せん断応力 0.47Pm が降伏応力 Y の 1/2 に達すると、接触円直下 0.5a の深さのところが完全に塑性変形状態になり、平均応力としては 1.1Y が得られる。Ishlinsky の解析では、圧痕直下の変形が降伏応力を超えてくると、材料の応力－ひずみ特性によって関係が変化し、完全塑性体の場合には 2.66Y となる。さらに、Tabor は閉経が降伏の始まりから完全塑性状態への進行によって 1.1～3.0Y が導き出され、実験的に確認された完全塑性体の平均圧力は 2.6～2.9Y で一般には 2.8Y としている。よって、ブリネル硬度が対象とする供試体の強度と比例関係にあるとする考え方は、このような研究背景から理解できるものである。ただし、いずれも平均応力であり、ブリネル硬度とは異なるものである。テストハンマーの反発度が、弾性変形と塑性変形の組合せであることを考えると、弾性変形

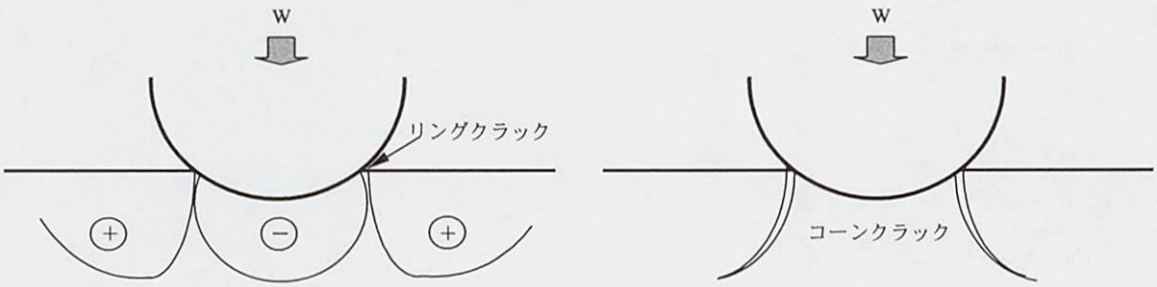
にはヤング係数、塑性変形には強度との関係を調べる必要があるものと思われる。

セラミックスの加工などの分野では、前述の Hertz の理論が、図－47 に示すような応力分布になることから、半径方向の引張応力にも着目している[24]。すなわち、球が接触した範囲では、圧縮応力が働くが、外側では半径方向に引張応力 σr、円周方向に圧縮応力 σ_θ を生じる。脆性破壊の発生に最も深く関係する引張応力の最大値 σm は接触円境界の表面に生じ、式(27)で表される。式(27)は、式(26)にポアソン比を考慮した形である。



図－47　球圧子が試料に接触した場合の応力

$$\sigma m = \frac{1-2\nu_2}{2} Pm = \frac{(1-2\nu_2)W}{2\pi a^2} \qquad (27)$$



図－48　球圧子の接触による試料のひび割れ

球のように鈍い圧子が押しつけられた場合には、図－48 に示すとおり、リングクラックやコーンクラックを生じ、リングクラックに達する応力が、図－47 の σrc である。すべり球圧子の接触に伴って発生した応力分布の解析によれば、最大主応力の分布は球圧子が接した直近では大きな値を示すものの、図－48 に示した負の応力線は接触半径 a の値とほぼ同じ深さにおいて 0 となる結果を報告している[24]。これは、式(27)において平均応力が接触半径の 2 乗で反比例することを意味するものである。

コンクリート、あるいはモルタル及びペーストの供試体に対してテストハンマー試験を実施しても、図－48 に示したようなリングクラックは目視では確認されておらず、わずかなくぼみが存在するだけである。これは、セラミックスという素材が極めて脆性的な破壊を示すことに起因するものと思われる。そのため、今回の試験においてはペースト供試体に関しては同様な現象を生じる可能性があるが、ペースト供試体にもリングクラックが生じていないのは、セラミックス（狭義の意味で、焼成したものを対象）よりも塑性を含む材料特性を有するものと判断される。

ところで、セラミックスの球圧子の問題は、土木工学、地盤工学の世界では、半無限板に対する 1 点集中

荷重を作用させている状態を考えた場合でも同様の結果を示している。J.Boussinesq によれば、図－49 に示すような 3 次元の鉛直方向の応力を式(28)として表している [25]。

$$\sigma z = \frac{3W}{2\pi z^2}\cos^5\varphi = \frac{3W}{2\pi} rz^2 (r^2 + z^2)^{-5/2} \qquad (28)$$

ここに、

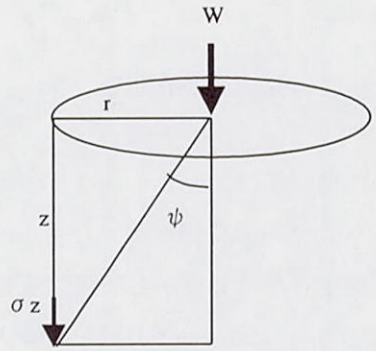
σ z:鉛直方向の応力

W:弾性体表面に作用する荷重

z:弾性体表面からの鉛直距離（深さ）

r:荷重作用点から任意の点までの水平距離

ψ:角度(図－49 参照)



図－49　半無限の弾性体に対する集中荷重

ここで、作用点直下の鉛直方向の応力は、式(34)において r=0 とした場合であるので、セラミックスの球圧子の問題で示した式(26)、式(27)と同じく、式(29)に示すように鉛直距離の 2 乗で反比例する形で表すことができる。

$$\sigma z = \frac{3W}{2\pi z^2} \qquad (29)$$

コンクリートの供試体あるいは構造物とテストハンマーのプランジャーの関係は、反発係数の説明で記載したように、コンクリートの供試体あるいは構造物がプランジャーに比べて極めて大きい。そのため、半無限板に対する 1 点集中荷重を作用させている状態と同様に扱えるものと思われる。また、セラミックスの応力分布で記載したように、接触半径とほぼ同程度の深さまでに影響するとすれば、テストハンマーのプランジャーの曲率半径 25mm 及び発生したくぼみの径（数 mm）であることから、試験によって得られる結果は、供試体の極表層の性能に大きく左右されることになる。

4.3.4 硬度の位置付け

硬度（硬さ）は、材料の弾塑性変形に対する抵抗を表す一つの尺度であるが、モース、ビッカース、ロックウェル、ショア、ヌープ、マイヤー、ブリネルなどの考案者の名前をとった様々な硬度が存在し、その試験方法も統一したものではない [22]。基本的には、硬度というものの実態は明らかにはなっておらず、現状では、圧縮強度などの他の物性を簡易的に推定する指標として利用しているだけである [26]。その意味では、「硬度」と表現するよりも「硬さ」の方が適切であるかもしれない。

試験方法は静的な硬度試験と動的な硬度試験に大別され、さらに前者には引っ掻き法と押込み法がある。後者の代表的なものはショア硬度試験であり、これは材料の弾性を反映していると考えられている。テスト

ハンマー試験は、前述のとおり、球圧子を静的に押し込むブリネル硬度試験を応用したものである。しかし、バネの力を利用して動的な衝撃力を与え、反発度（反発係数）を測定するという点では、動的な硬度試験の性質も含まれる。金属の場合、ブリネル硬度 H_B と引張強度 σu の間には、式(30)の関係があるとされる[22]。

$$\sigma u/H_B=0.37\sim0.38 \tag{30}$$

この比例関係は、セラミックスの球圧子の問題で取り上げた、平均応力と降伏応力の関係と同様である。テストハンマーの反発度がブリネル硬度を反映し、かつ式(30)の関係が成立するとすれば、金属の供試体に対して測定した反発度から引張強度を精度よく推定できることになる。文献 27)によれば、6 種類の金属に対し、降伏応力 0～2kN/mm^2 の範囲で降伏応力と硬さ（この場合にはビッカース硬さ）の関係を示しており、全体的には両者は比例関係にあると判断されるが、任意の降伏応力に対する硬さに 150 程度のばらつきが存在したところもあり、硬度のみから複数の金属の降伏応力を推定するのは必ずしも精度がよいとは言えない。コンクリートの圧縮強度は、かなり狭い範囲（前章の試験では 10～80N/mm^2）であるので、金属よりもばらつきを生じるように見えるが、金属においても±20%程度のばらつきは存在するので、コンクリートの均一性などの問題だけではなく、硬度から強度を推定する本質的な問題があるように思われる。

セラミックスの場合には圧痕周囲の変形が金属のように大きくなく、前述のようにクラックの発生などの現象が起こることから、例えば、破壊応力に対する硬度の値は金属の場合よりも大きくなることが考えられる。Rice の実験[22]によれば、金属との類推から微視的降伏応力は硬度の 1/3 で評価できることや、微視的降伏応力は圧縮強度の上限値であることを見出している。しかし、以下の理由より、一般には硬度の 1/3 よりも小さくなると考えられている。

1) 圧縮強度と硬度の測定精度に限界がある。すなわち、圧縮強度は小さく、硬度は大きく測定される可能性がある。
2) セラミックスには粒界、気孔、不純物などの欠陥を有しており、これらは硬度にはほとんど影響しないが、圧縮強度を下げる作用がある。
3) セラミックスは熱膨張と弾性異方性によって内部応力をもっており、これは硬さよりも圧縮強度を下げる可能性がある。
4) 双晶はセラミックスにおいては重要な破壊機構であり、圧痕周囲の応力以下でも十分に起こり得るため、やはり圧縮強度を下げる可能性がある。

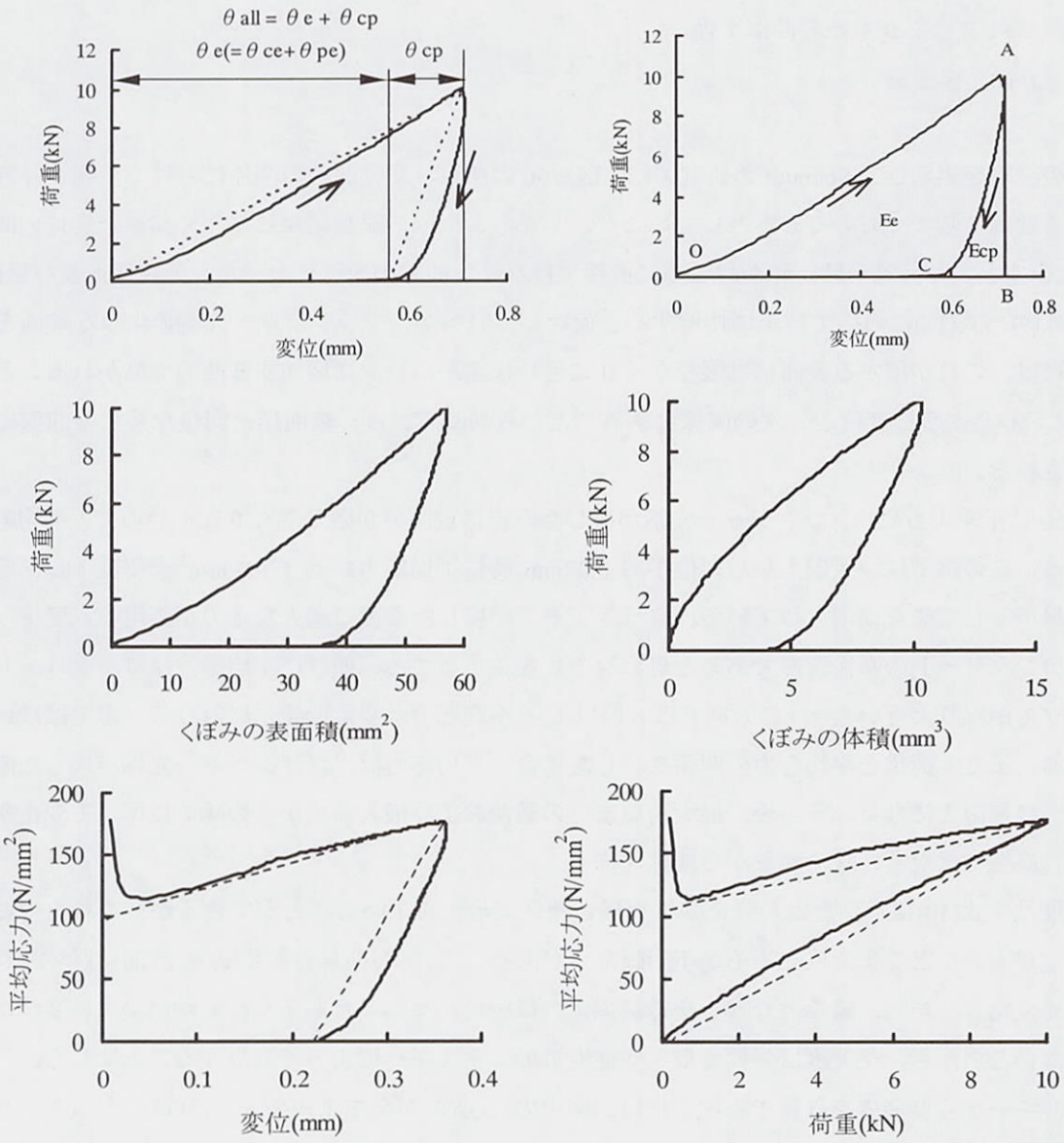
コンクリートも広義ではセラミックスに属し、共通する部分は多いものと思われる。セラミックスにおいても、圧縮強度、引張強度及びヤング係数と硬度の関係を調べ、それぞれについて一次の関係があることを期待した図が作成されているが[22]、上記のような諸問題があってばらつきを生じている。いずれにしても、冒頭に記載したとおり、硬度は圧縮強度などの物性自体を表しているわけではなく、比較的相関があることを利用して簡易的に用いている指標であることから、どのような指標と関係を調べるかは利用目的等にも関係する。コンクリートの場合には、構造体コンクリートの強度が知りたい情報であることが多いことから、硬度（反発度）と圧縮強度との関係を調べているに過ぎない。なお、理論、原理的な関係が分からずに反発

度と圧縮強度の関係を調べる場合にはやはり直線回帰をすることが多いが、これは反発度と硬度の関係から原理的には正しくないことを行っているわけであり、少なくとも、低強度から高強度までの広範囲を評価しようとする上では、テストハンマーの原理、その背景となる弾塑性力学及びその限界から発生するばらつきを理解した上で、テストハンマーの試験結果の検討を行う必要があるものと判断される。

4.4 試験結果および考察

4.4.1 静的圧入試験での荷重－変位曲線

図－50 は、静的圧入試験における荷重－変位曲線の一例（W/C=55%, 養生 CA, 材齢 1 日, 最大荷重 10kN）



図－50　静的圧入試験における荷重、変位、表面積、体積および平均応力に関する諸値間の関係
（W/C=55%, 養生 CA, 材齢 1 日, 最大荷重 10kN の試験値）

である。ここで変位とは、式(8)に示したプランジャーの弾性変形、コンクリートの弾性変形及び塑性変形を足し合わせた全変位を指す。図－50 には、荷重と変位の関係以外にも、プランジャー先端のコンクリートに接した部分の表面積（くぼみの表面積）、式(31)で計算されるくぼみの体積、荷重を表面積で除した平均応力も併記してそれぞれの関係を調べた。平均応力は荷重を接地面積で除したものであり、ブリネル硬度を塑性変形で定義した式(10)に対し、弾性変形も含めた値に相当する。

$$Vall = \pi \theta all^2(3r - \theta all)/3 \qquad (31)$$

ここに、

Vall：変形に伴う体積

r：プランジャーの曲率半径

θ all：全変位

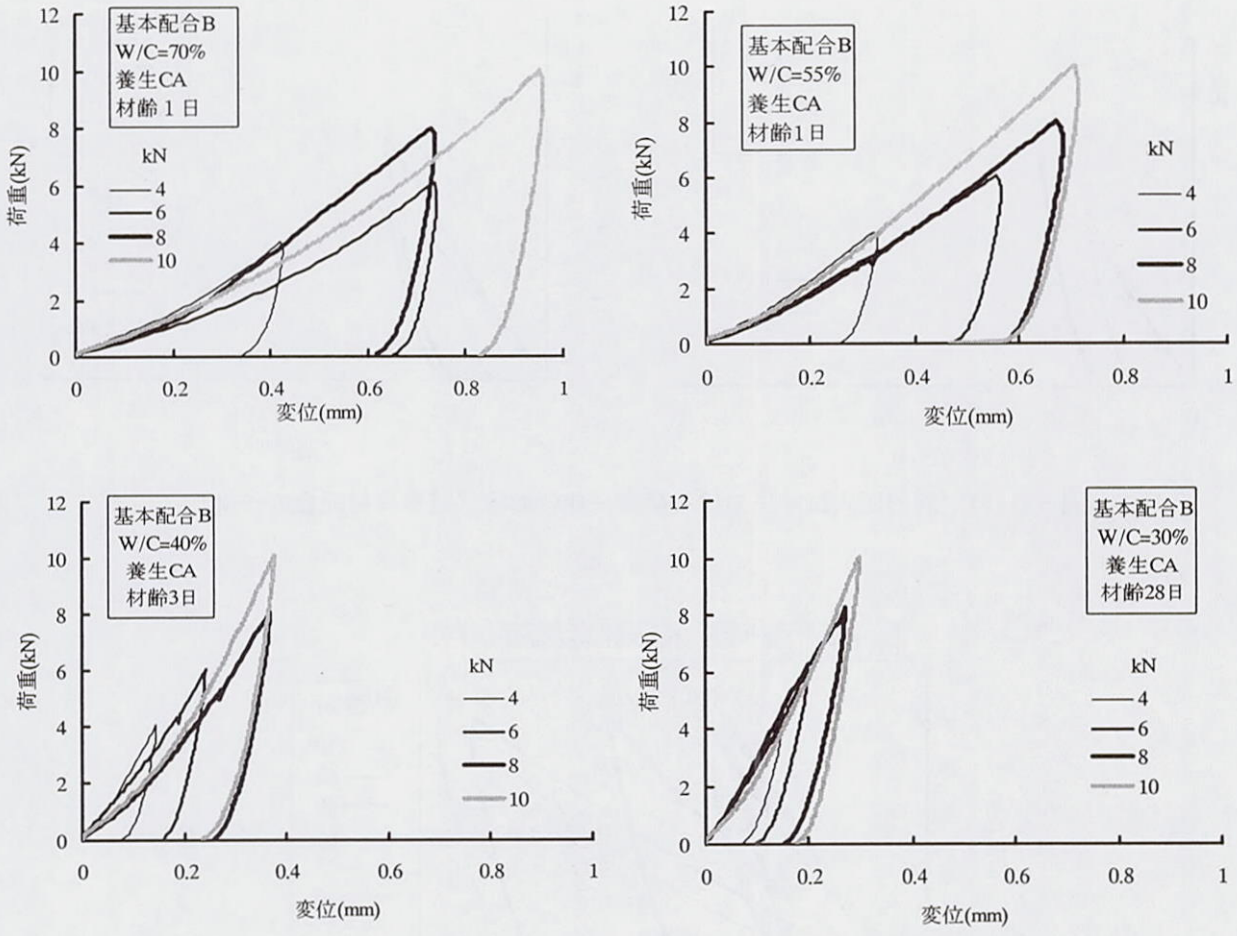
同種の試験を実施して Schmidt の研究では、図－50 の荷重－変位曲線の関係における点線を静的圧入試験における理論に基づくものであるとしている[18]。しかし、今回の試験結果に基づく荷重と変位の関係は、図－50 に示すとおり、載荷時、除荷時ともに直線ではなく、曲線の変化になった。弾性変形及び塑性変形は、確かに式(9)、式(11)において荷重に比例すると仮定しているが、プランジャー先端のような球面を押しつけた場合には、これが接する表面積は限りなく 0 に近い状態から急激に増加する曲線で描かれること、並びに式(10)に示したように変位と一次の関係にあることから判断すれば、表面積と同様な形状の曲線になるものと判断される。

図－50 に示すように、プランジャー先端が接した直後は表面積が限りなく 0 に近いので、平均応力は無限大になる。この例では、無限大から変位が約 0.02mm 時に平均応力が約 120N/mm^2 まで低下し、その後、この値を最小として徐々に増大している。プランジャーが接した直後は過大な応力が作用し、変位（これはおそらくコンクリートの塑性変形であると思われる）を生じること、並びに平均応力はコンクリートの圧縮強度に比べてかなり大きいこと（この例では 6 倍以上）、平均応力は変位の変化に対して一定ではないことが挙げられる。また、荷重と平均応力の関係を表した場合、平均応力は、プランジャー先端が接した直後には前述のように無限大になり、その後、最大荷重までの載荷および最大荷重からの除荷に伴って変化する。その変化は、直線ではなく、緩やかながら曲線を描く。

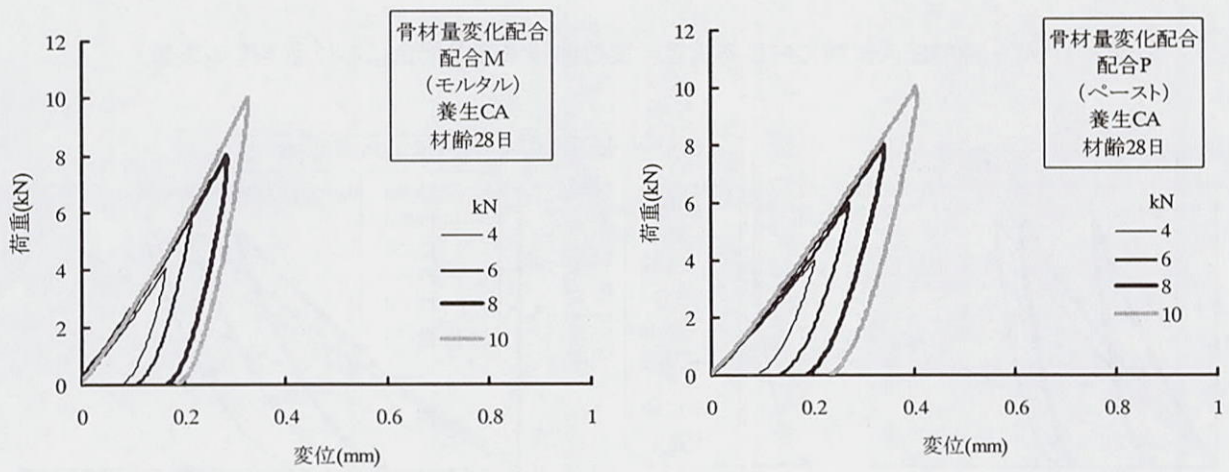
反発度は、式(19)に示したとおり、弾性変形と塑性変形から求めることができるが、これまでに述べたように仮定が実際にどこまで成立するか不明瞭な点があること、除荷曲線と荷重 0kN 直前（球体が離れる直前）に大きく変化し、また、読みとりピッチの関係上、最終値がない場合もあり、x 軸の交点の変位が正確に読みとれないことから、反発度は弾性変形と塑性変形のエネルギーによって計算することにした。

エネルギーから反発度を計算する場合には、図中の△OAB が全エネルギー、△OAC がコンクリートの塑性変形、よって△CAB がプランジャーとコンクリートの弾性変形の和に相当する。

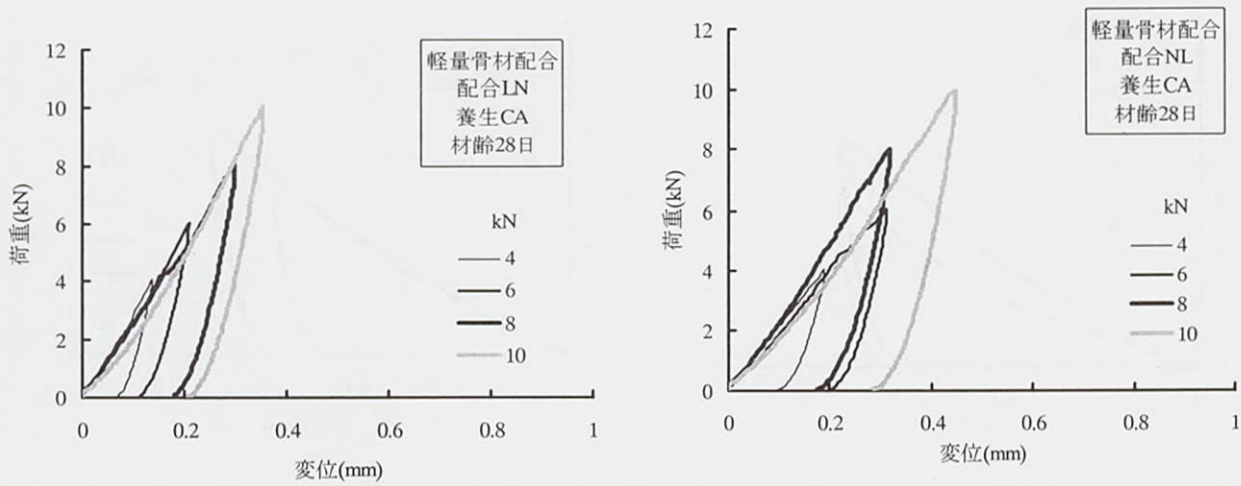
図－51(1)～(10)は、静的圧入試験における代表的な荷重－変位曲線を示したものである。水セメント比が小さく、長期材齢になるほど、全体的には変位が小さくなる傾向があると言える。しかし、図-51(4)のよう



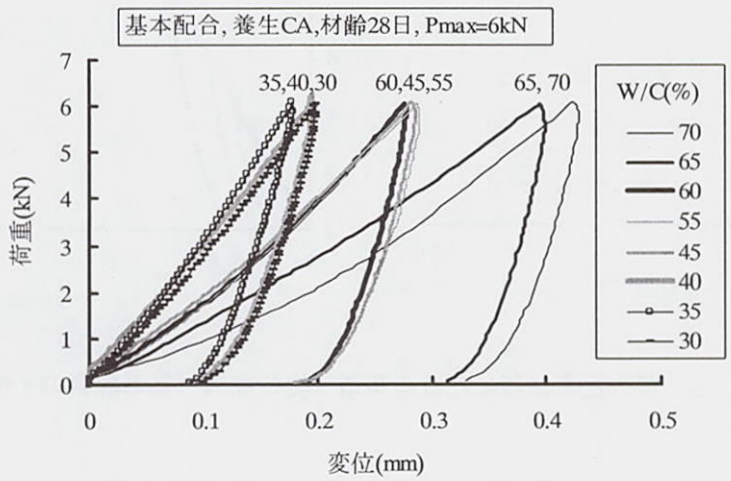
図－51(1)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（基準配合の一例）



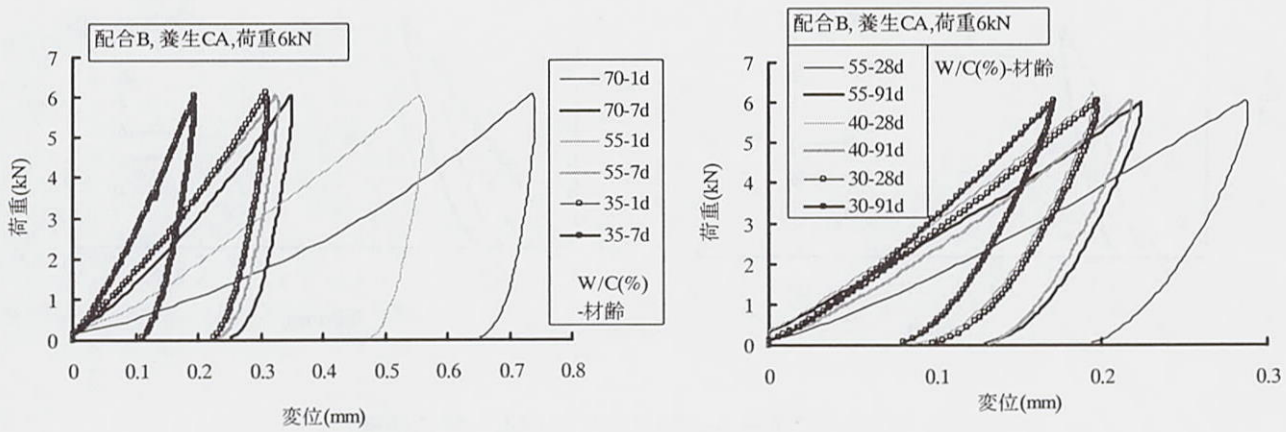
図－51(2)　静的圧入試験における荷重－変位曲線
（骨材量変化配合のモルタルおよびペーストの例）



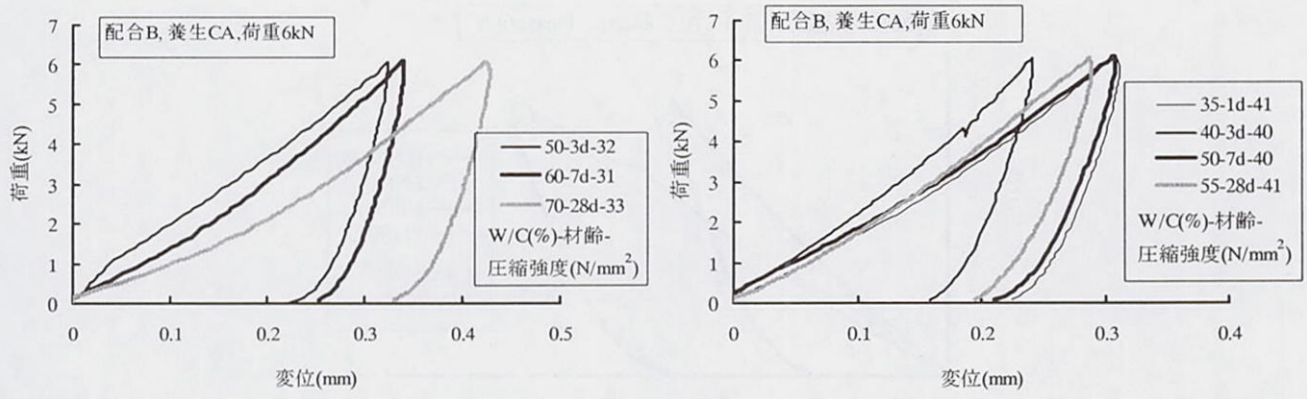
図－51(3)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（軽量骨材配合の一例）



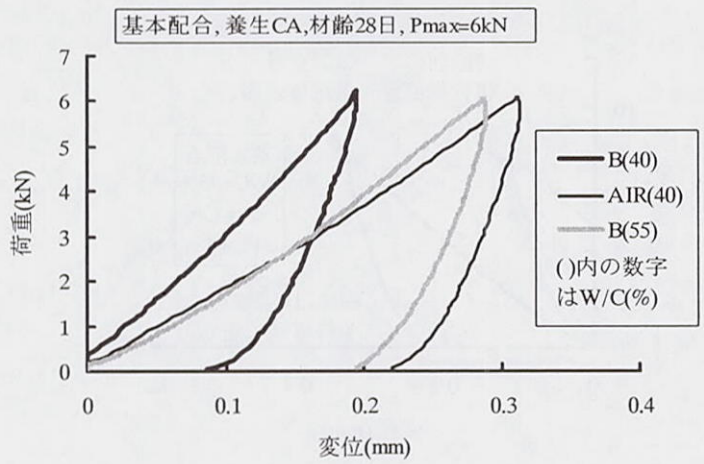
図－51(4)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（基準配合における W/C の影響）



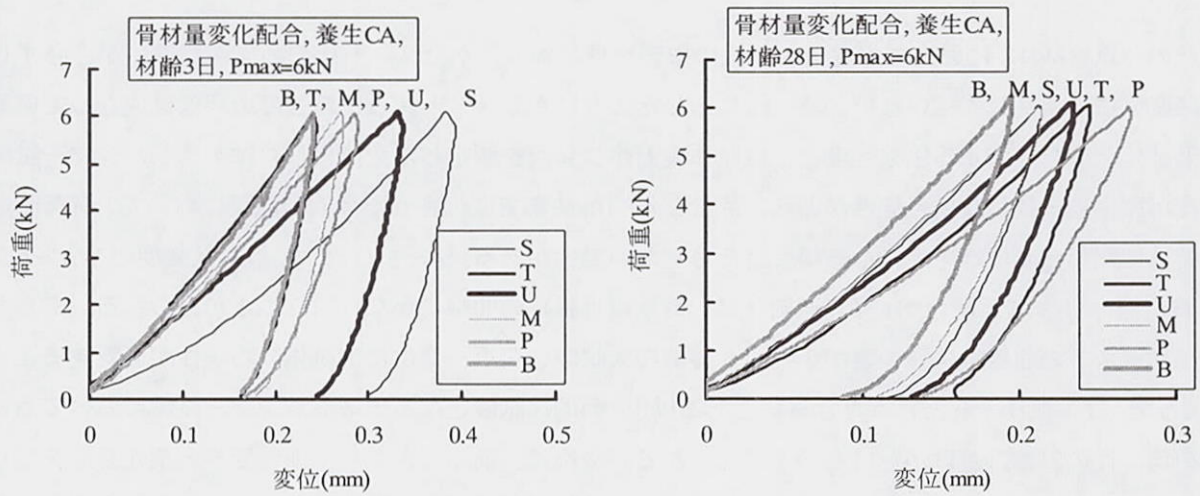
図－51(5)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（基準配合における材齢の影響）



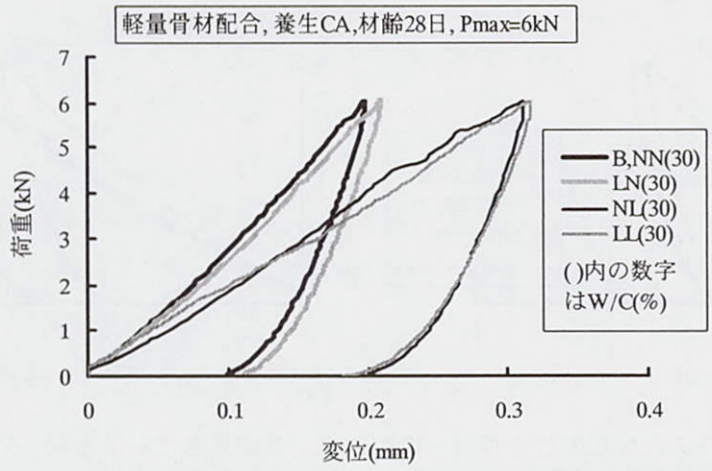
図－51(6)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（基準配合における同一強度での比較）



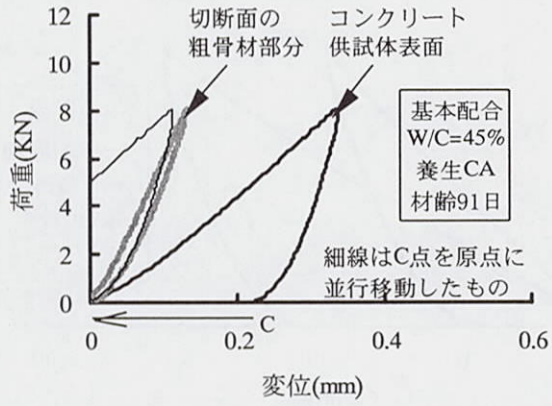
図－51(7)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（空気量の影響）



図－51(8)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（骨材量の変化の影響）



図－51(9)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（軽量骨材の影響）



図－51(10)　静的圧入試験における荷重－変位曲線（切断面の粗骨材の影響）

に、任意の荷重（6kN）において水セメント比の影響を見た場合、水セメント比のわずかな違いが、必ずしも明確に変位に反映されてはいない。図－11 に示したように水セメント比と圧縮強度の関係は成立しているので、供試体全体を評価する圧縮強度と、供試体表面かつ局所を測定した変位もしくはテストハンマー試験の反発度が完全に一致しない可能性がある。荷重を 4～10kN まで変化させた今回の試験において、載荷時の曲線が荷重に関わらずほぼ一定になる場合とそうでない場合がある。図－51(1)では、最も低強度の W/C=70%、材齢 1 日、図－51(3)では配合 NL（普通細骨材、軽量粗骨材）の曲線にかなりばらつきが見られる。モルタルおよびペーストの曲線はばらつきが小さく、静的圧入試験の荷重－変位に供試体の均一性が影響すると言える。よって、コンクリートという複合材料である以上、動的な試験となるテストハンマー試験においても、供試体の均一性の影響は避けがたいものと考えられる。変位は、前述のとおり、弾性変形と塑性変形を足し合わせたものであるが、図－51 の曲線から判断すれば、塑性変形は大きく変化するものの、弾性変形の変化はわずかである。ただし、図－51(1)、(2)においてコンクリート、モルタルおよびペーストを見比べた場合、

ペーストは、コンクリートよりも弾性変形が大きく、ヤング係数の違いが弾性変形に反映されているようである。

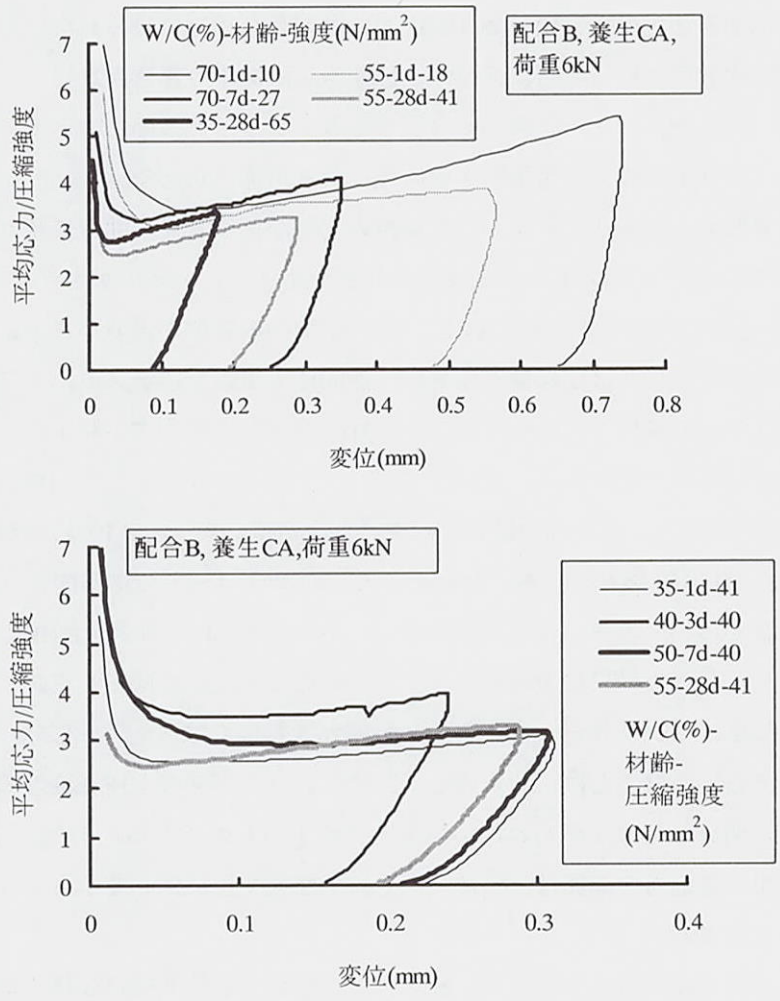
図－51(5)に示すように、水セメント比3水準について材齢に伴う荷重－変位曲線の変化を比較すると、材齢1日から7日までの変化が最も大きいが、低水セメント比ではその変化が小さくなる。セメント水比と圧縮強度の関係式では、2章の要素試験で示した図－11のように、材齢が異なっても一次式の傾きはあまり変わらない。静的圧入試験の変位の変化が高強度域ほど小さい性質は、低強度域よりも高強度域の方が高い精度を要求することになる。そのため、この変位を利用したテストハンマーの反発度も、高強度域ほど変化量が小さくなり、供試体等のわずかな相違が反発度の値に影響し、推定される圧縮強度のばらつきを大きくする傾向を生み出す可能性を有している。

図－51(6)は、概ね同一強度となる水セメント比と材齢が異なる基本配合の荷重－変位曲線である。変位は、圧縮強度がほぼ同一であっても、水セメント比と材齢が異なることによって一致しないものが存在しており、供試体の局所的な評価は、必ずしも供試体全体の圧縮強度を反映しない可能性がある。図－51(7)は、水セメント比40%の基本配合の空気量を8.5%まで増加させた場合の荷重－変位曲線を表したものである。空気量の増加によって、圧縮強度は53.3N/mm^{2}から38.5N/mm^{2}まで低下し、水セメント比55%（40.8N/mm^2）と同程度になった。空気量を増加させた配合AIRと配合B(55)には顕著な相違は見られない。水セメント比、空気量のどちらの影響で圧縮強度が変化しても、荷重－変位曲線にはあまり影響がないことになる。また、コンクリート構造物の中で、テストハンマー試験の対象とするコンクリート表面において、いずれの要因が変動しても、構造物全体とは異なる圧縮強度を推定する結果になる可能性がある。

図－51(8)は、荷重、材齢および養生を限定し、骨材量の変化が荷重－変位曲線に及ぼす影響を表したものである。基本配合(B)に対し、いずれの配合も載荷時の傾きが小さく、全変位が大きくなる傾向が見られる。材齢3日と28日の荷重と変位の関係を比較すると、基本配合(B)の変位が最も小さいこと以外には、配合の種類（骨材量の変化）が全変位に及ぼす影響が小さい。静的圧入試験及びテストハンマー試験のいずれも、供試体のある狭い範囲に対して実施しているので、図－51(8)に示したように、材齢によって傾向が異なる結果を生じることもあり得るものと思われる。この中では、モルタル(M)とペースト(P)は、粗骨材分布の不均一性の影響を受ける可能性がなく、2材齢の結果で示された全変位の順（B,M,P）は確かなものであると考えられる。モルタル(M)は、基本配合(B)の曲線に比較的近く、コンクリートである配合S,T,Uの方が基本配合と異なる曲線である場合が多い。表－4に示したとおり、モルタル(M)は基本配合(B)のモルタル部分と全く同一の配合であることや、せき板効果によってコンクリートの表面近くではモルタル・ペーストリッチの状態であること等を考えると、コンクリート中のモルタル部分（もしくはペースト部分）の配合比率が変位に関係している可能性がある。このことは、3章の要素試験における反発度と圧縮強度の関係（図－27）が、基本配合（図－22）とは明確な相違が見られない事実と一致するものである。また、式(28)～(31)において、表面に接した荷重が作用する応力の範囲は、距離（深さ）の2乗で反比例して小さくなり、極表層の影響が大きいとしたこととも一致する。

図－51(9)は、荷重、材齢および養生を限定し、軽量骨材が荷重－変位曲線に及ぼす影響を表したものである。この結果によれば、粗骨材の種類が同一であれば、荷重－変位曲線はほぼ一致する。ただし、細骨材の

種類の影響も多少見られ、軽量細骨材の変位が普通細骨材よりも若干大きい。しかし、軽量骨材配合では、粗骨材の種類によって圧縮強度及びヤング係数が異なり、普通粗骨材を使用した場合には 70N/mm^2 前後及び 32kN/mm^2 前後、軽量粗骨材では 60N/mm^2 前後及び 20kN/mm^2 前後であり、前述の骨材量変化配合とは条件が多少違う。図－51(9)の結果から粗骨材の種類によって弾性変形の変化が変位に影響していると言える。切断面の粗骨材にプランジャーを押し付けた場合には、図－51(10)に示すとおり、コンクリート表面の曲線とは大きく異なり、塑性変形が生じず、ほぼ弾性変形の曲線を描く。図中には、コンクリート表面に対して試験を行った場合の曲線から塑性変形分を除いて、弾性変形のみの曲線を表した。コンクリート表面の弾性変形のみの曲線は、粗骨材断面の曲線とほぼ一致している。すなわち、コンクリート表面と粗骨材断面の弾性変形は同程度であることを意味する。粗骨材の圧縮強度やヤング係数は測定していないので定量的に評価することができないが、図－13(2)に示した圧縮強度とヤング係数の関係において、モルタルとコンクリートの違いから、使用した粗骨材のヤング係数はコンクリートよりも大きいと判断される。コンクリート表面と粗骨材断面の弾性変形は同程度であることは、コンクリート表面で得られる弾性変形が粗骨材のヤング係数に



図－52　静的圧入試験における平均応力／圧縮強度－変位曲線

よるか、その反対に粗骨材断面の弾性変形が粗骨材背後に存在するモルタル部分のヤング係数によるものであると考えられる。これらの荷重－変位曲線の結果を総合的に判断すれば、テストハンマー試験の反発度から圧縮強度を精度よく推定するためには、コンクリート及びこれと同一配合のモルタルの双方から関係を導き出すのがよいものと思われる。

図－51 に示した平均応力を圧縮強度で除した比と変位の関係を、図－52 に示す。ここでは、圧縮強度が異なるものと同一のものを一例として取り上げた。プランジャーが供試体に接した直後は球体の点接触になるので、その比は無限大になるが、一度、3 前後まで小さくなっている。その後にはその 3 程度の値を基点とし、載荷に伴って徐々に増加している。静的圧入試験とテストハンマー試験では荷重が異なるものの、テストハンマーの荷重レベルであっても、局所的には圧縮強度の 3 倍の圧縮応力が作用し、局所的な破壊（塑性変形）を生じることになる。

4.4.2 変形に対する荷重の影響

図－53 は、静的圧入試験における荷重の相違が変形に及ぼす影響を表したもので、図－54 は図－53 の縦軸を単位荷重当たりの変形に置き換えたものである。ここで、コンクリートの弾性変形とプランジャーの弾性変形は、いずれか一方を仮定しないと、全弾性変形から求めることができないので、ここでは、プランジャーの弾性変形を荷重に比例するものとして、式(32)によって計算した。

$$\theta pe = \frac{PLp}{\pi Ep(D/2)^2} \tag{32}$$

ここに、

θ pe:プランジャーの弾性変形

P:荷重

Lp:プランジャーの長さ（93mm）

Ep:プランジャーの弾性係数（200kN/mm^2 と仮定）

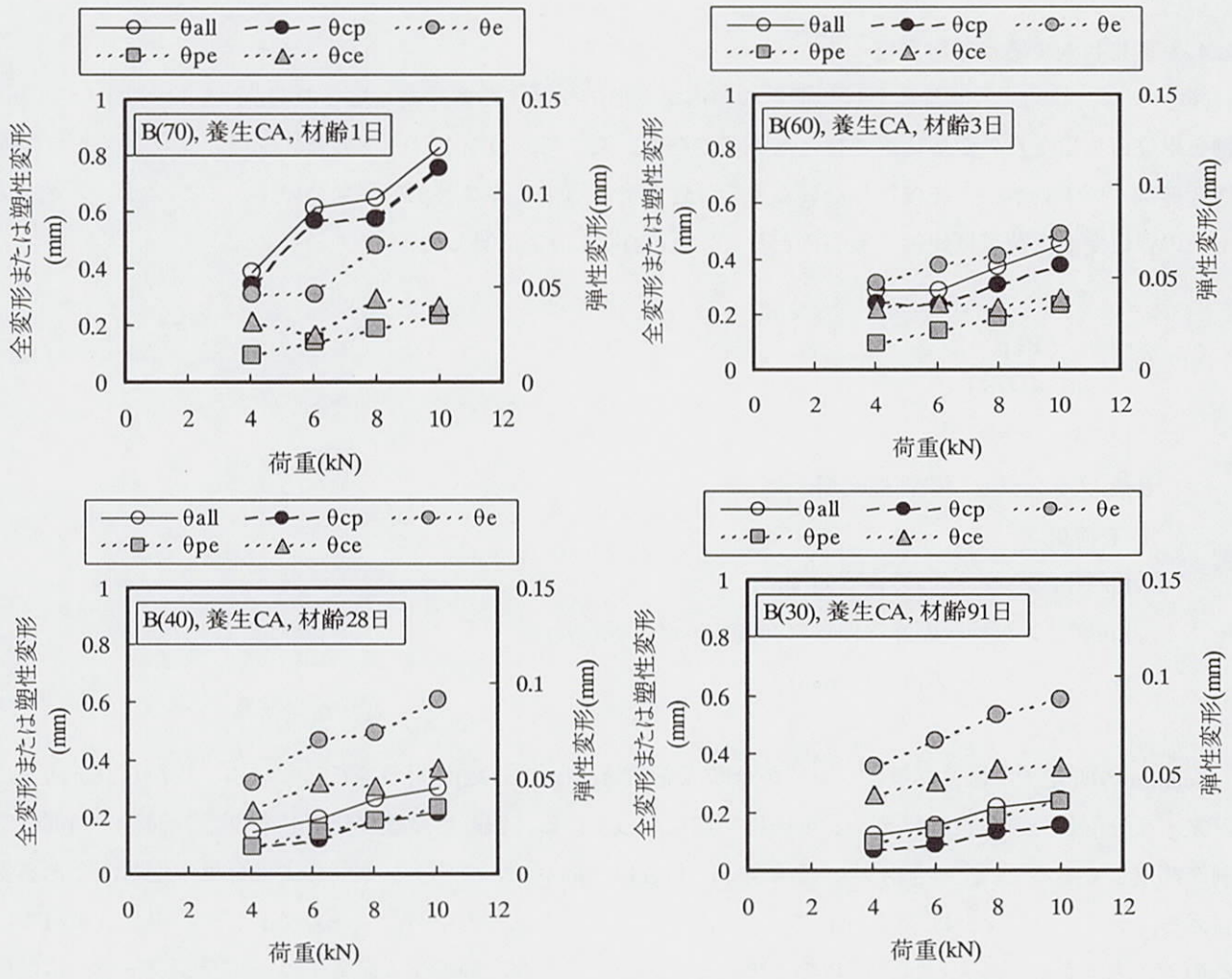
D:プランジャーの直径(15mm)

Schmitt の研究[18]では、プランジャーの全断面を有効として式(32)の計算を行っている。しかし、テストハンマーを分解してみると、プランジャーは中空になっている。実際に試験に使用したプランジャー内部の空洞を測定してみると、空洞部分の直径は 8mm、長さは 70mm で、プランジャーの大部分は中空断面であると言える。テストハンマーは、図－41 に示したようにプランジャー内にハンマーガイドバーが差し込まれているので、大まかにとらえれば、一体のものとして評価できるが、静的圧入試験では、プランジャー内には何も存在しないので、空洞の影響を考慮する必要がある。そこで、式(32)の分母の断面積は、中空の断面積を考慮して計算することにした。

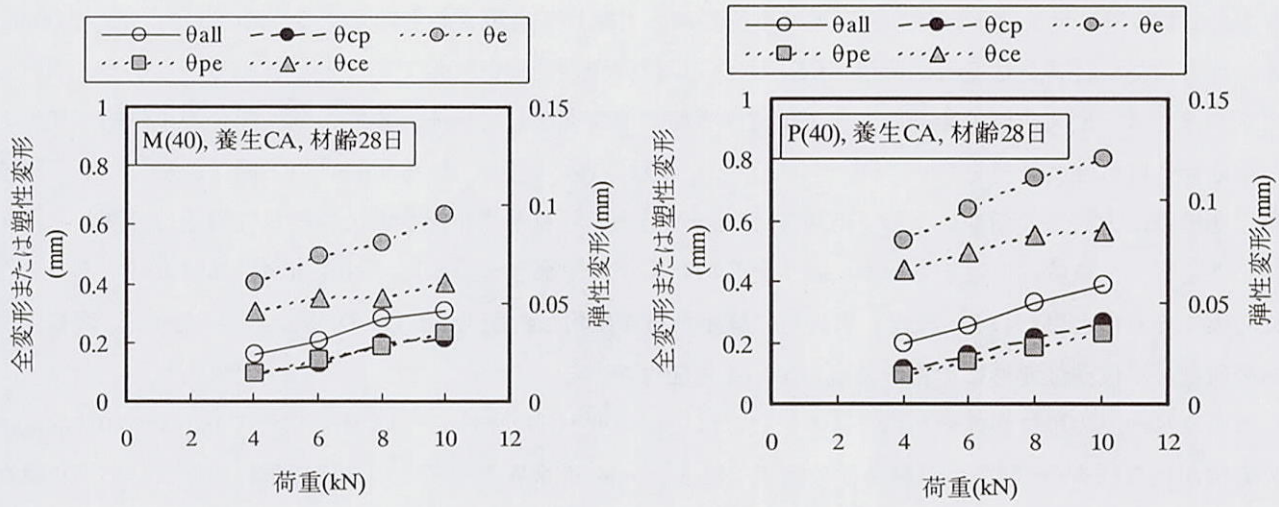
また、静的圧入試験は、図－40 のとおり、直径 100mm の円柱状の治具にプランジャーを差し込んだ状態で実施している。プランジャーは差し込んだだけで治具とは一体になっていないので、プランジャーの側面

で接した治具部分は力を伝達する断面としては有効でない可能性が高い。そこで、プランジャー全長とプランジャーから圧縮試験機の治具固定部分を弾性変形の対象個所にして計算した。なお、治具はプランジャーに比べて断面が極めて大きいことから、計算値にはほとんど影響しない。テストハンマー試験と静的圧入試験の結果を比較する上では、プランジャーの有効断面に関して若干の相違を生じる可能性がある。

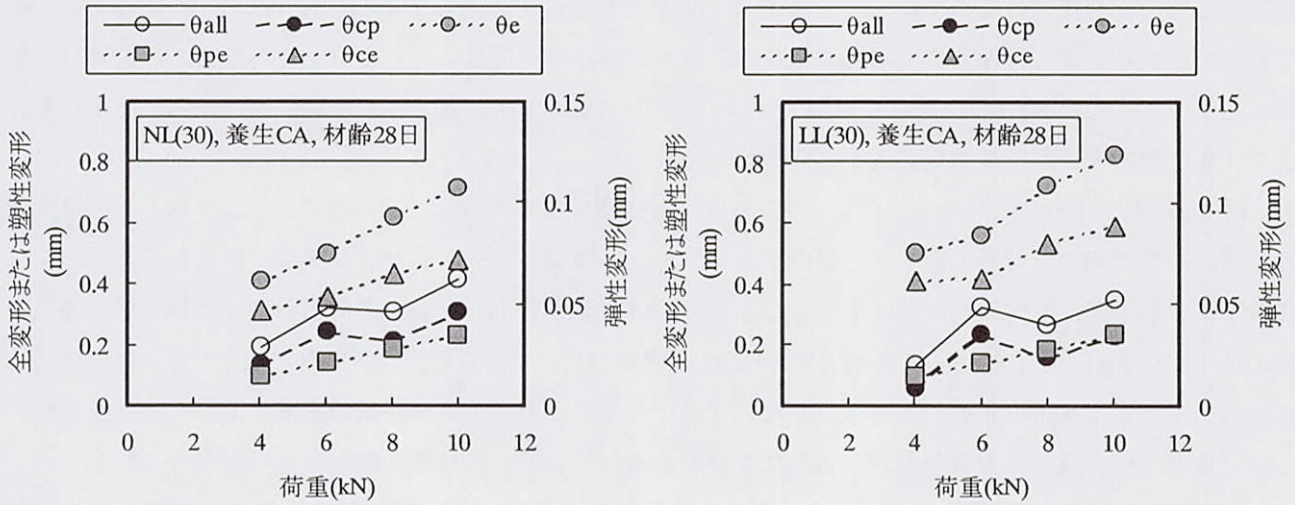
静的圧入試験における荷重の最大値（4～10kN）の変化が全変形、塑性変形及び弾性変形に及ぼす影響を、図－53 に示す。コンクリートの配合条件によらず、荷重の増加に伴って変形が大きくなるが、荷重と変形の関係を直線で近似しようとした場合、プランジャーの弾性変形を除き、いずれの変形も切片を生じ、原点を通らないことがわかる。



図－53(1)　静的圧入試験における荷重の相違が変形に及ぼす影響（基本配合）



図－53(2)　静的圧入試験における荷重の相違が変形に及ぼす影響（骨材量変化配合）



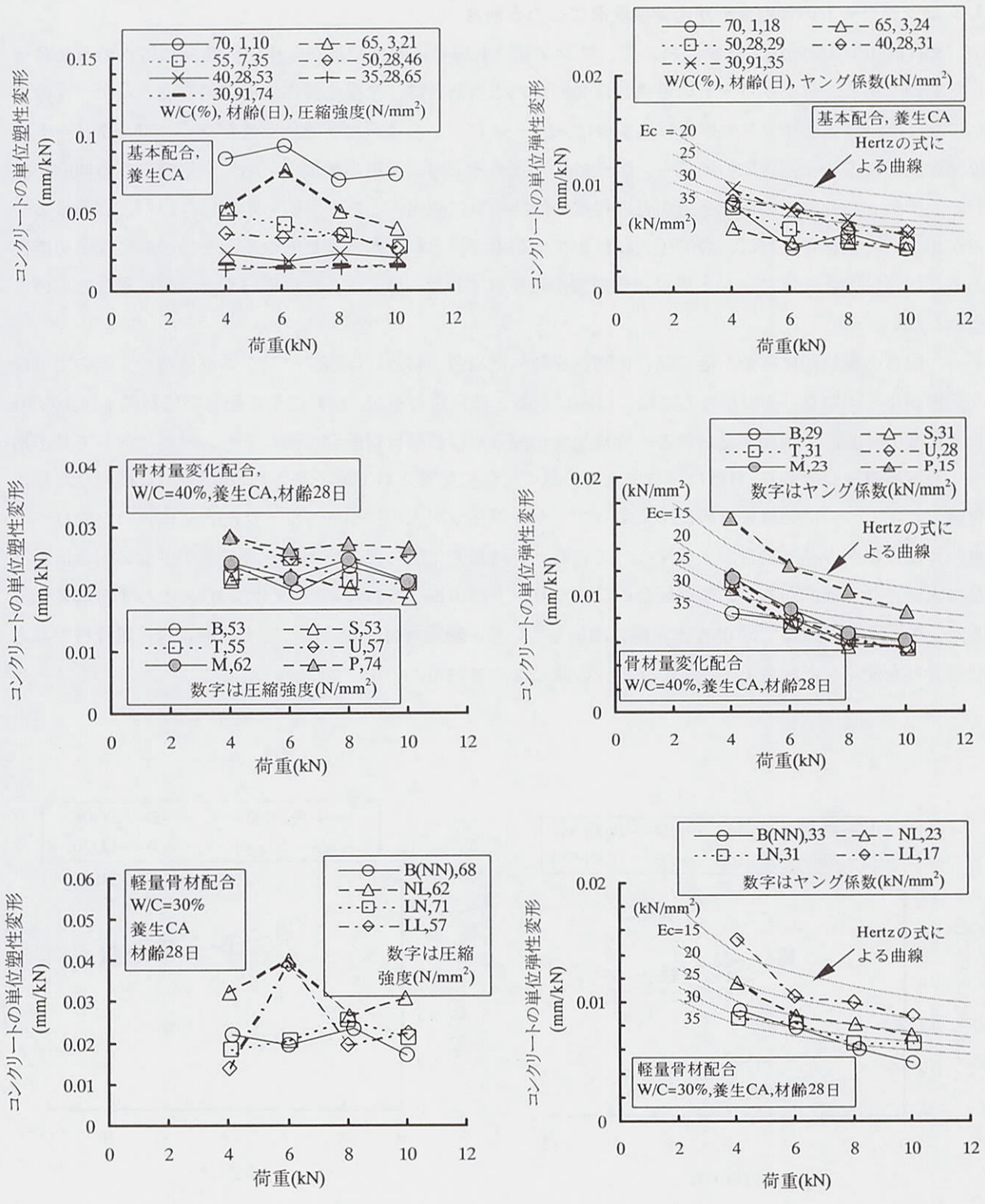
図－53(3)　静的圧入試験における荷重の相違が変形に及ぼす影響（軽量骨材配合）

図－54 は、静的圧入試験における最大荷重とコンクリートの単位弾塑性変形の関係を表したものである。なお、これ以降、単位荷重当たりの変形は単位変形と省略して表現するものとする。式(9),(11)では、Schmidt の考え方に従い、弾塑性変形は荷重に依存せず、単位弾塑性変形は一定であるとしている。しかし、図－54 に示すとおり、最大荷重の相違によって単位弾塑性変形は変化している。まず、基本配合の単位塑性変形の荷重依存性は低強度域で見られ、図－54 に示した試験条件の範囲では 35N/mm^2 以下のコンクリートの単位塑性変形は最大荷重の増加に伴って低下する傾向がある。骨材量変化配合および軽量骨材配合に関しては単位塑性変形の荷重依存性は小さいが、基本配合の結果より、水セメント比が 40%,30%の高強度域であることに起因するものと思われる。また、粗骨材に軽量骨材を使用した配合 NL,LL のばらつきが大きく、軽量粗骨材の偏在が単位塑性変形に影響を及ぼしている可能性がある。

コンクリートの単位塑性変形は、基本配合では圧縮強度 10～74N/mm^2 の変化によって 0.093～0.017mm/kN の変化が見られるが、図中の試験条件の範囲では 53N/mm^2 を境界としてその前後で単位塑性変形の変化量が異なり、53N/mm^2 以上では極めて小さいことがわかる。すなわち、単位塑性変形と圧縮強度との間には一次関係が成立しないことになる。骨材量の変化に伴う単位塑性変形の変化は小さいものの、配合別に見れば、配合 P（ペースト）は圧縮強度、単位塑性変形ともに最大であることから，単位塑性変形には骨材の存在が影響するものと判断される。また、配合 B と同一の配合比率のモルタルである配合 M が配合 B と同様の値であることから、単位塑性変形にはモルタルの品質、材料比率が関与している可能性がある。軽量骨材を使用した場合には配合 NL,LL のばらつきが大きいので明確ではないが、配合 NL の単位塑性変形が他よりも大きく、単位塑性変形が圧縮強度の大小と関係していない。

式(25)に示した Hertz の理論（ただし，コンクリートに関する項のみ）に基づけば、コンクリートの単位弾性変形は荷重の増加に伴って低下する傾向がある。また、コンクリートのヤング係数に影響を受け、ヤング係数が大きいほど、単位弾性変形は小さくなる。図－54 に示すとおり、前者の荷重の増加に伴う単位弾性変形の低下はいずれの配合においても見られ、Hertz の理論が成立し、弾性変形が荷重に依存せず、単位弾塑性変形は一定とする Schmidt の仮定は成立しないことになる。一方、ヤング係数の影響に関しては、基本配合と骨材量変化配合及び軽量骨材配合では異なる傾向を示している。骨材量変化配合及び軽量骨材配合では、Hertz の理論に基づいて計算した曲線変化とかなり一致しており、ヤング係数が大きいものほど単位弾性変形が小さくなっている。ところが、基本配合においてはヤング係数が小さい配合(W/C=50,65,70%)の単位弾性変形が却って小さくなっている。基本配合と骨材量変化配合及び軽量骨材配合のヤング係数は、前者が水セメント比に起因するものであるのに対し、後者は骨材量と骨材の種類に起因するものである．そのため、前者はヤング係数と同時に圧縮強度も変化するが、後者は多少の圧縮強度の相違はあるものの、概ね同レベルで、かつ高強度域である。また、水セメント比 40%以下では単位塑性変形の変化が小さい。これらの結果を鑑みれば、任意の荷重が供試体に作用した場合、圧縮強度が小さいものでは塑性域に達する比率が高くなり、単位弾性変形が小さくなることが考えられる。

なお、ブリネル硬度は、式(12)に示したように単位塑性変形によって計算されるので、図－53 の単位塑性変形の傾向と同様である。荷重によるブリネル硬度の変化量は小さく、概ね、荷重 4 水準の平均を用いても支障がないものと判断される。



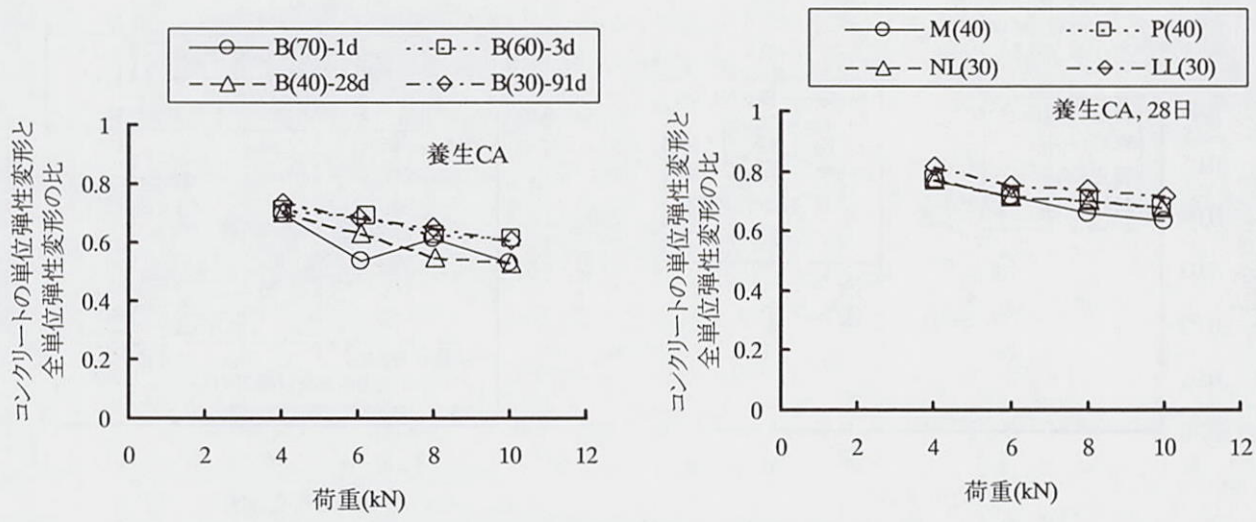
図－54　静的圧入試験における荷重の相違がコンクリートの単位弾塑性変形に及ぼす影響

（単位とは単位荷重当たりを意味する）

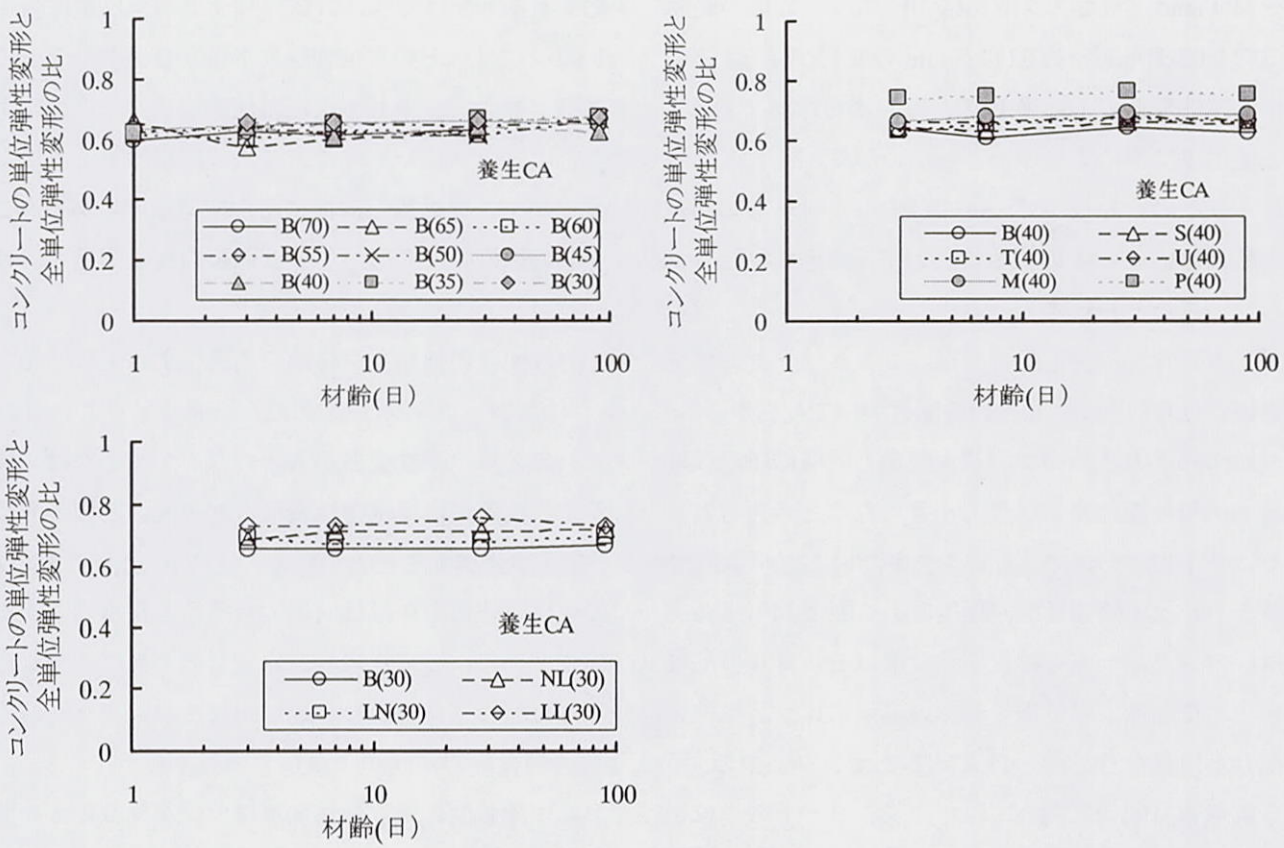
4.4.3 コンクリートの弾性変形が全弾性変形に占める割合

図－55(1),(2)は、静的圧入試験において、コンクリートの単位弾性変形が全単位弾性変形に占める割合を表したものである。コンクリートの単位弾性変形が占める割合は、全単位弾性変形の約 0.66（全データの平均）になった。コンクリートの単位弾性変形は、図－54 に示したように荷重依存性があり、コンクリートの単位弾性変形に占める割合についても、図－55(1)に示すとおり、荷重の増加とともにやや減少する傾向が見られる。テストハンマーの衝撃荷重がどの程度の静的荷重に相当するものか明らかではないが、試験後のくぼみが小さいことを考えれば、静的圧入試験の平均荷重で得られた割合よりもやや大きめの値になる可能性がある。ただし、図－55 に示した単位弾性変形から推察すれば、静的圧入試験の結果と大幅に異なるものとは思われない。

一方、配合の種類別に材齢とその割合の関係を調べた場合、材齢に伴ってヤング係数は増加するので単位弾性変形が小さくなり、その割合も同様の傾向になると考えられるが、反対に基本配合では材齢 1 日から 91 日までに 0.02～0.03 の増加が見られる。骨材量変化配合及び軽量骨材配合に関しても、材齢に伴って若干増加もしくは増減なしであり、材齢に伴うヤング係数の変化に影響されて低下するものは見られない。ただし、骨材量の変化もしくは軽量骨材の使用によって、ヤング係数が大幅に小さくなった配合では、コンクリートの単位弾性変形が占める割合が大きくなっている。骨材量変化配合においては、骨材量が少ない配合ほど、割合は大きくなる傾向があり、基準配合のコンクリートが 0.66 に対し、モルタルは 0.68 とわずかな変化であるが、ペーストに関しては 0.75 と大幅に増加している。軽量骨材配合に関しても、細骨材、粗骨材の双方に軽量骨材を使用した配合 LL では 0.74 程度の値になっている。



図－55(1)　コンクリートの単位弾性変形が全単位弾性変形に占める割合



図－55(2)　コンクリートの単位弾性変形が全単位弾性変形に占める割合

4.4.4 変形、ブリネル硬度及び計算反発度とコンクリートの特性の関係

図－56 以降は、静的圧入試験で得られた諸値とコンクリートの特性の関係を調べたものである。ここで、静的圧入試験の諸値とは、コンクリートの単位弾塑性変形、その逆数、ブリネル硬度及び計算反発度を、コンクリートの特性とは、配合（水セメント比、骨材量、軽量、空気量）、材齢及び養生の各要因の影響と、圧縮強度およびヤング係数という物性を意味する。前述のように、単位弾性変形には静的圧入試験の荷重依存性が認められるが、ここでは、全体的な傾向を把握する目的で、荷重 4 水準の平均値を用いることにした。なお、計算反発度とは、静的圧入試験で得られた単位弾塑性変形によって計算された反発度であるが、静的圧入試験が式(17)のエネルギー効率 η を 1 と置いた理想的な状態であると仮定したものであって、テストハンマー試験で測定される反発度（以下、測定反発度）を表すものではない。

(1)小型供試体の表面に対する試験

図－56、図－57 は、小型供試体の表面に対して静的圧入試験を実施した場合のコンクリートの単位弾塑性変形、その逆数、ブリネル硬度及び計算反発度を表したものである。図－56 に示すとおり、圧縮強度が 10

～74N/mm^2（水セメント比は 30～70%）の広い範囲で変化する基本配合では、コンクリートの単位塑性変形は約 0.02kN/mm～約 0.08kN/mm の変化が見られる。一方、コンクリートの単位弾性変形は、コンクリートの単位塑性変形の 1/10 程度のかなり小さな値であることに加え、水セメント比（または圧縮強度）の違いによる変化量は極めて小さいことがわかる。図－11 に示したようにコンクリートのヤング係数は材齢とともに大きくなるのに対し、図－56 ではコンクリートの単位弾性変形がヤング係数と同様に増加する傾向にある。この結果は、図－54 の説明において、測定されたコンクリートの単位弾性変形がヤング係数の大小関係と一致しないことと一致する。

一方、骨材量変化配合では、コンクリートの単位塑性変形は配合の種類及び材齢の相違によってほとんど違いが見られない。6 種類の配合の中で配合 P（ペースト）は、図－13 に示したとおり、他の配合よりも 15～20N/mm^2 大きいので、基本配合と同様に圧縮強度が大きいほど単位塑性変形が大きくなるのであれば、配合 P の単位塑性変形は最も小さくなると考えられる。しかし、実際には単位塑性変形は他の配合と同等もしくは若干大きいので、骨材を含まないことが単位塑性変形に多少影響することになる。配合 B,S,T,U（コンクリート）と圧縮強度が同程度である配合 M（モルタル）の単位塑性変形がほぼ同値であることから判断すれば、コンクリートの単位塑性変形はモルタルの品質（圧縮強度）によって決まり、粗骨材の有無は関与しないことになる。単位塑性変形の結果に比べ、単位弾性変形には配合（骨材量）の違いが見られ、また、基本配合とは異なり、図－13 に示したヤング係数の大小と単位弾性変形の傾向が一致している。

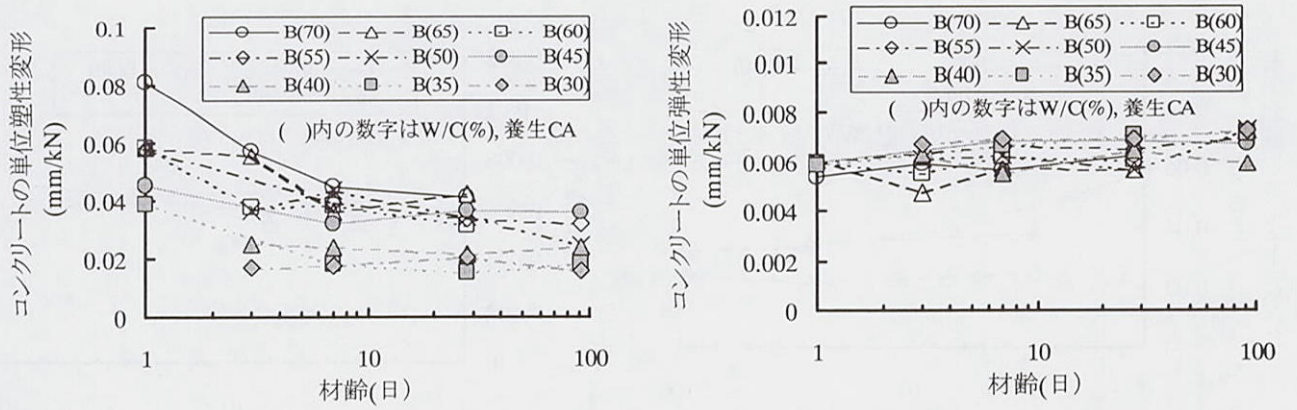
軽量骨材配合に関しては、コンクリートの単位塑性変形は圧縮強度、単位弾性変形はヤング係数の大小関係とうまく対応している。ただし、ペーストを使用した場合や軽量粗骨材を使用した場合であっても、単位弾性変形は約 0.01mm/kN で、基本配合の値（0.006mm/kN 程度）の 1.7 倍程度と、その変化量は単位塑性変形に比べて小さい。

空気量の影響については、圧縮強度がほぼ同じ配合 B(55)の単位塑性変形および単位弾性変形と配合 AIR の値が一致している。単位弾塑性変形には、水セメント比と AE 剤使用量の違いによるセメント硬化体（モルタルもしくはペースト）中に発生する気泡条件（気泡の径、種類等）には関係なく、結果的に得られた圧縮強度によって評価できることになる。養生の影響に関しても、湿潤養生 3 日以後気中養生(CA)と蒸気養生以後気中養生(CS)の比較であるので、図－11 に示したように圧縮強度が異なること等から、多少のばらつきは見られるものの、単位弾塑性変形にはほとんど違いが見られない。

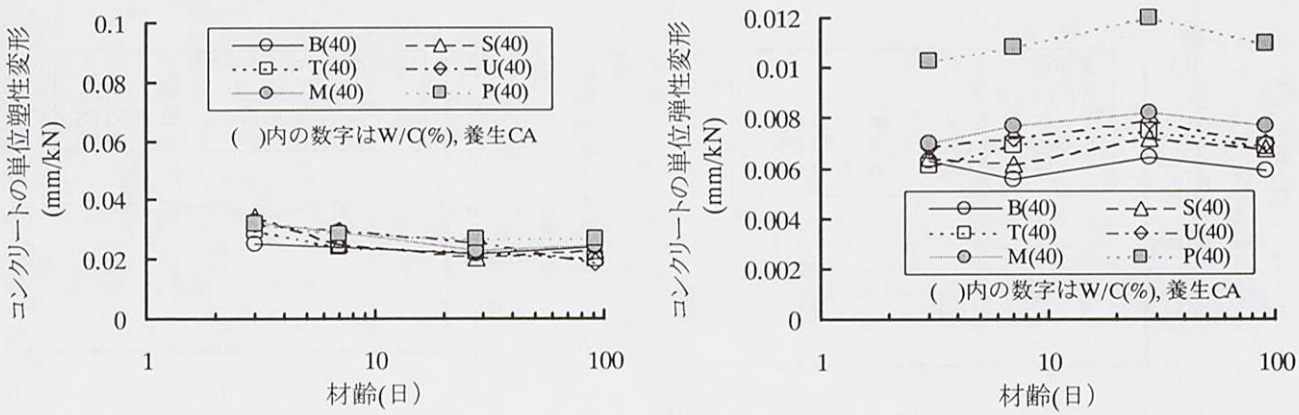
図－57 に示すように、ブリネル硬度および計算反発度は材齢とともに増加する傾向があり、特に圧縮強度の範囲が広い基本配合では明確である。ブリネル硬度及び計算反発度は、材齢が長いほど、水セメント比が小さいほど大きくなる傾向があるので、両値が圧縮強度と密接であることには間違いない。しかし、水セメント比 5%もしくは 10%の違いが、個々の材齢における両値の大小関係と完全には一致しておらず、かなりばらつきが見られる。骨材量変化配合では、ブリネル硬度および計算反発度の値に対する骨材量の影響は小さい。ただし、ペーストに関しては、前述のように圧縮強度がかなり異なるので、図－57 よりもブリネル硬度が小さくなる可能性がある。軽量骨材配合に関しては、軽量骨材の使用が、計算反発度に及ぼす影響も小さいが、ブリネル硬度のばらつきが普通骨材の配合に比べて大きいようである。

ブリネル硬度で表した場合には、全体的に計算反発度の場合に比べてばらつきが大きいように思われる。

ブリネル硬度は、式(18)に示したとおり、コンクリートの単位塑性変形から計算される。そのため、ブリネル硬度のばらつきは、コンクリートの単位塑性変形に起因するものである。一方、計算反発度は、式(20)に示したように、コンクリートの単位塑性変形から計算されたブリネル硬度以外に、全弾性変形とエネルギー効率の項が加わり、さらにブリネル硬度と曲線関係にある。図－58 は、ブリネル硬度と反発度の関係を表す曲線を示したものである。この図では、エネルギー効率を一定(0.55)とし、全弾性変形 2 値を与えて曲線を描いている。ブリネル硬度が大きくなるに従って、計算反発度の増加量がかなり小さくなることから、ブリネル硬度にばらつきがあっても、計算反発度の値があまり変化しない。また、ブリネル硬度が大きい場合に全弾性変形が計算反発度に影響しやすい。これらのことが、ブリネル硬度よりも計算反発度の方がばらつきが小さいように見える理由である。

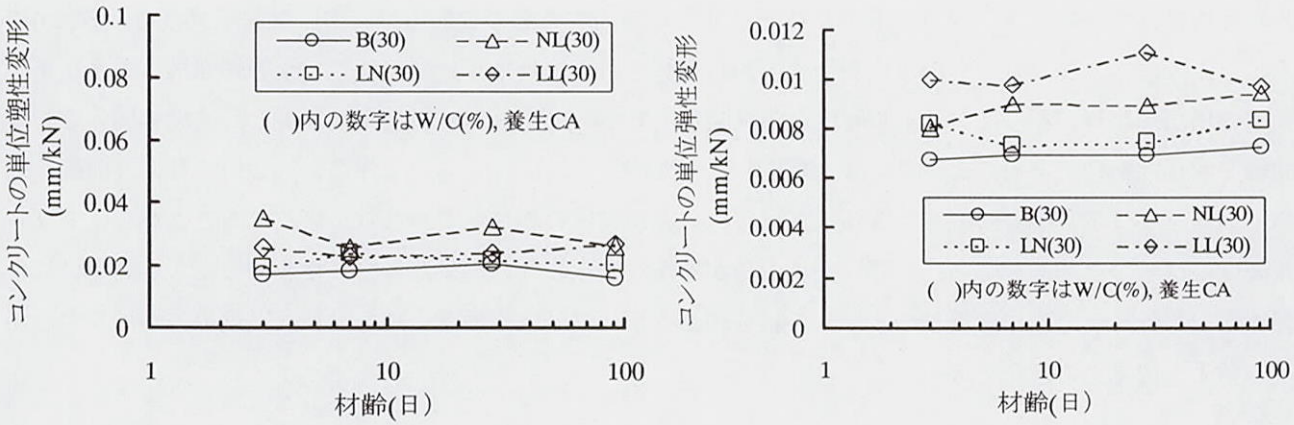


(a)基本配合

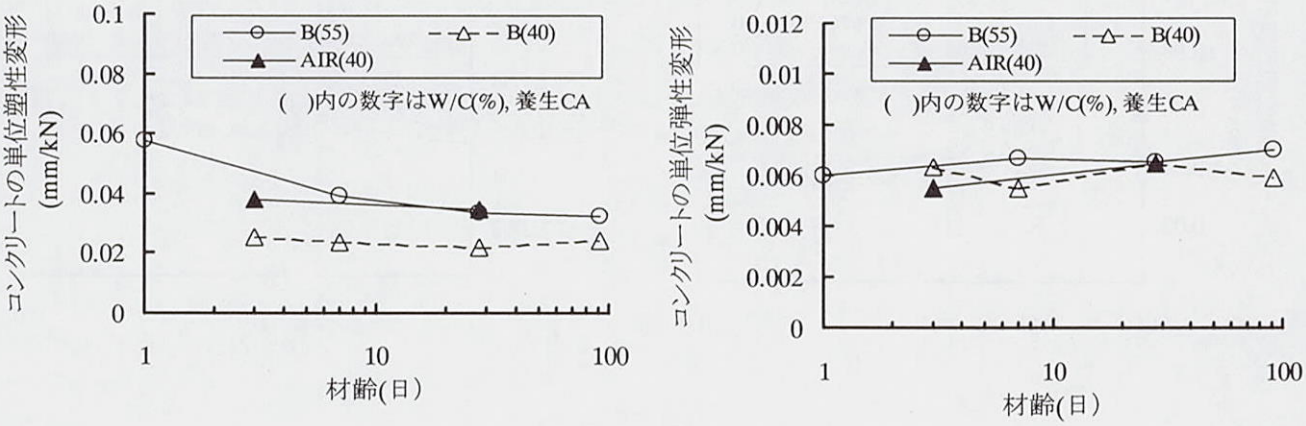


(b)骨材量変化配合

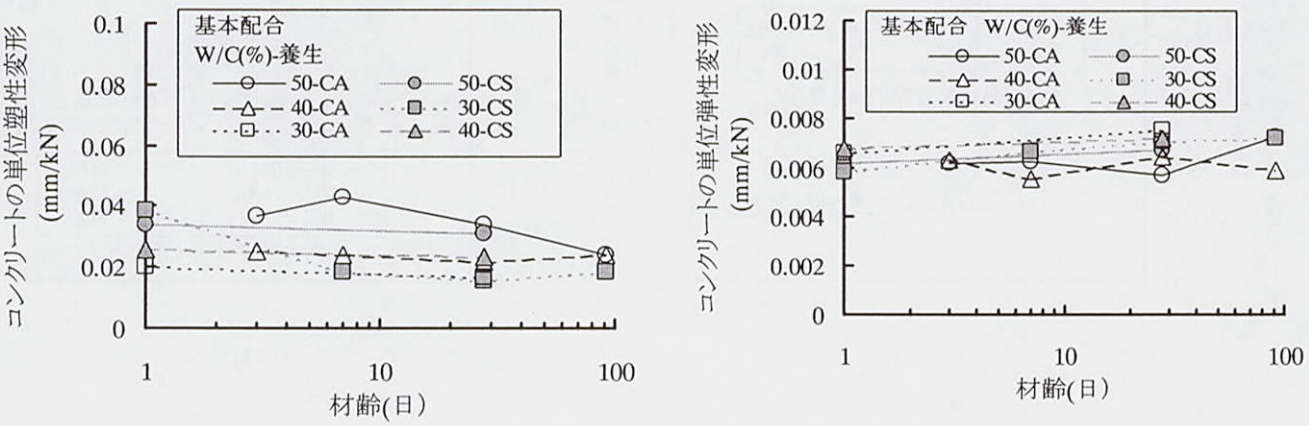
図－56(1)　コンクリートの材齢と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾塑性変形の関係



(c)軽量骨材配合

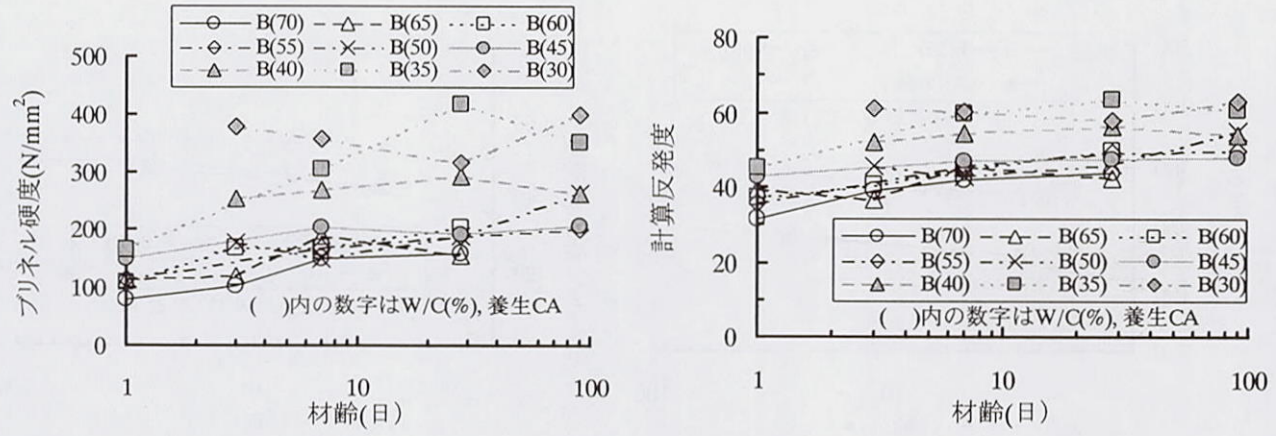


(d)空気量の影響

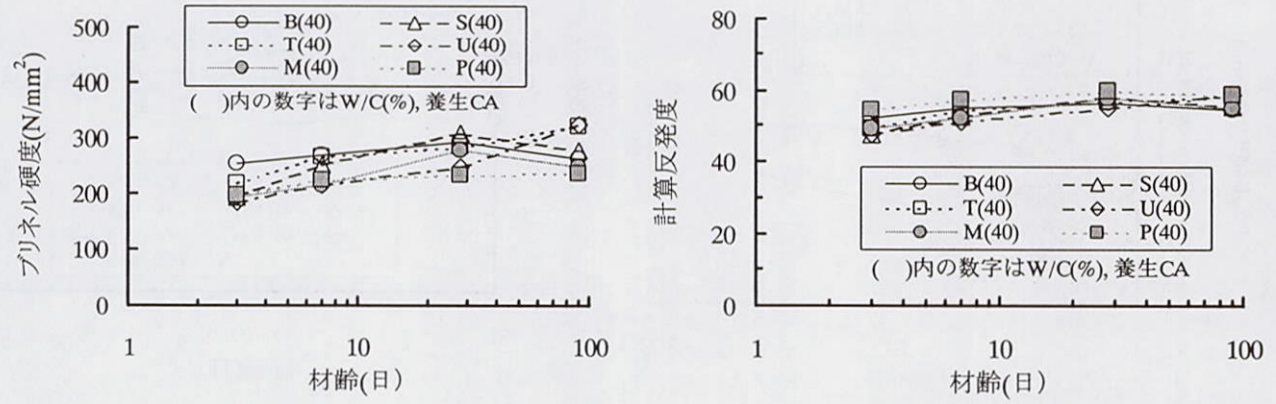


(e)養生の影響

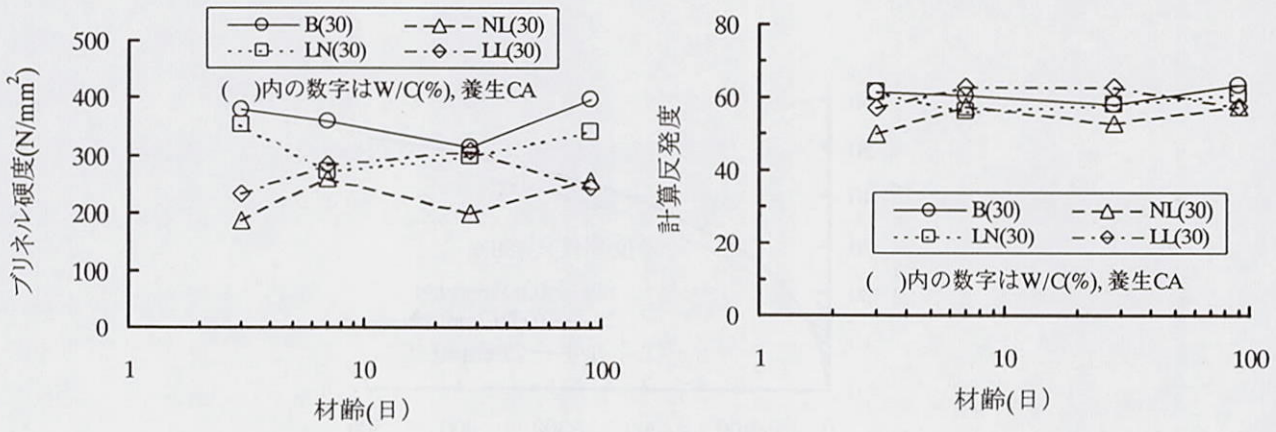
図－56(2)　コンクリートの材齢と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾塑性変形の関係



(a)基本配合

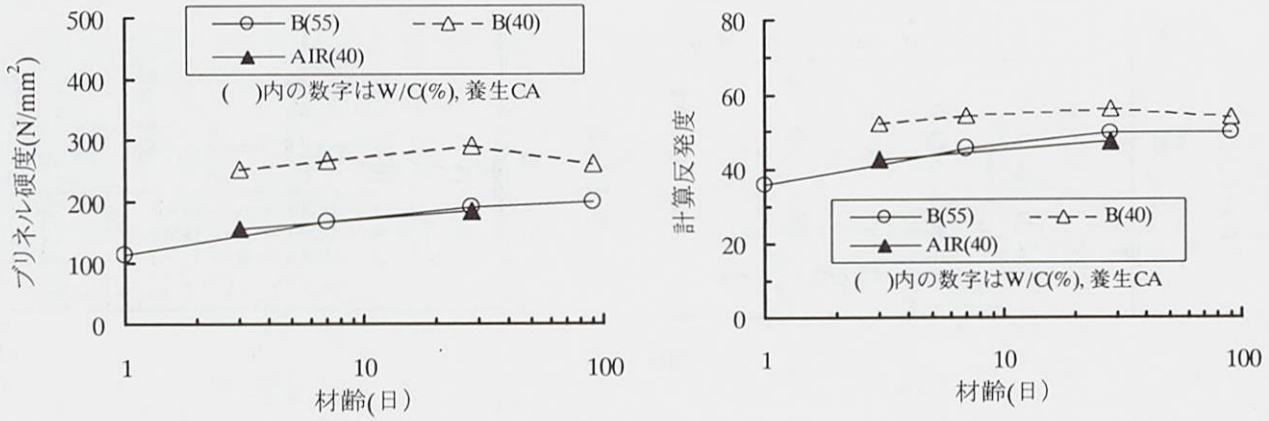


(b)骨材量変化配合

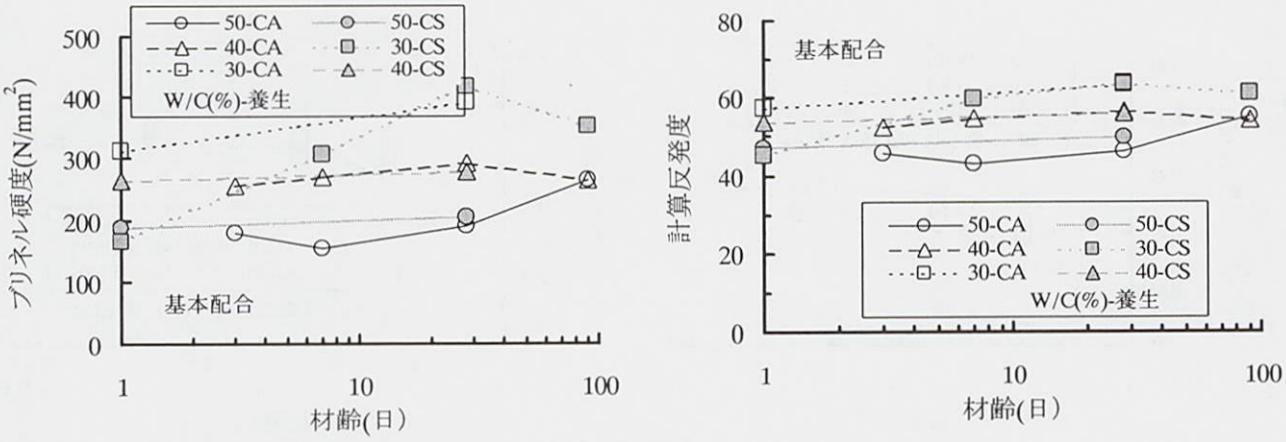


(c)軽量骨材配合

図－57(1)　コンクリートの材齢と静的圧入試験におけるブリネル硬度および計算反発度の関係

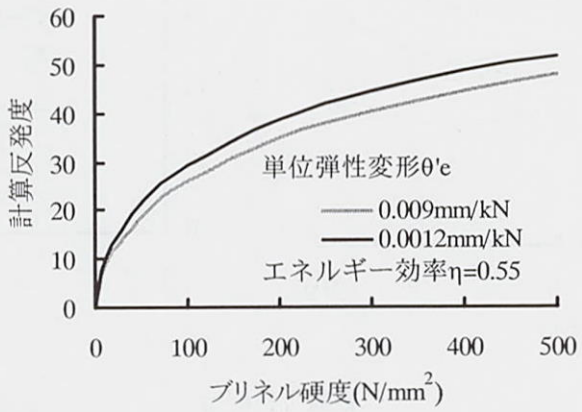


(d) 空気量の影響



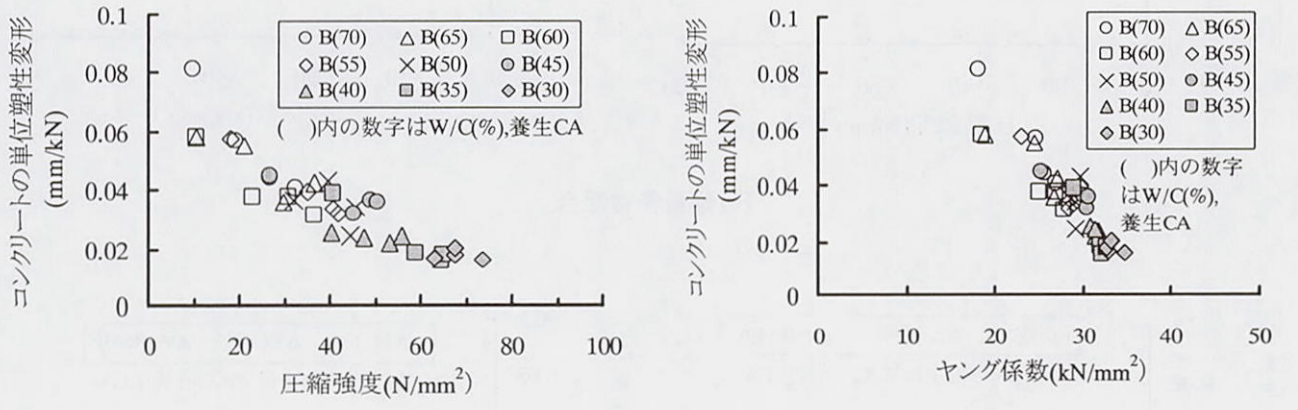
(e) 養生の影響

図－57(2)　コンクリートの材齢と静的圧入試験におけるブリネル硬度および計算反発度の関係

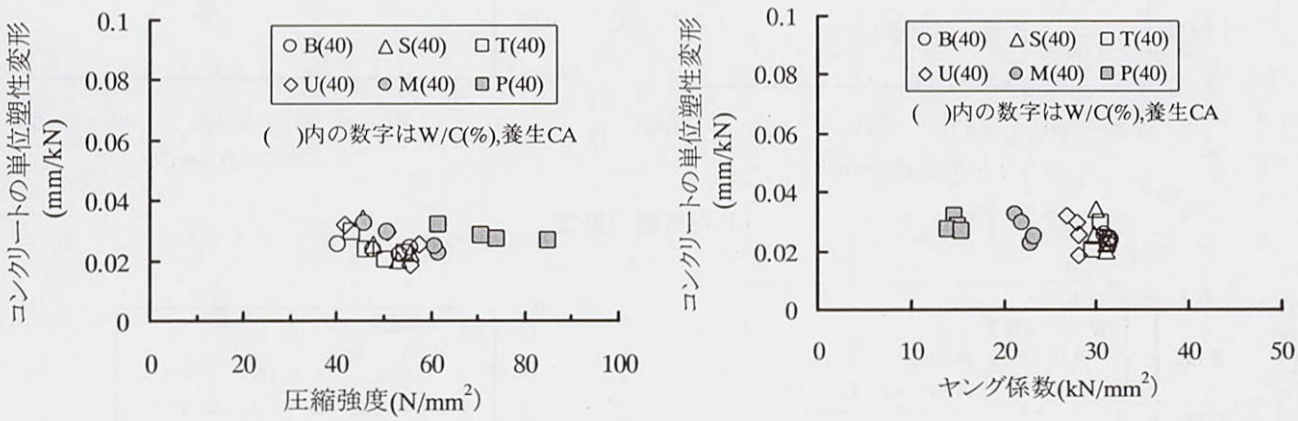


図－58　ブリネル硬度と計算反発度の関係

図－59、図－60 は、圧縮強度及びヤング係数と単位弾塑性変形の関係を、図－61、図－62 は単位弾塑性変形の逆数に置き換えたものである。式(18)、式(20)においてブリネル硬度が単位塑性変形または単位弾性変形と反比例の関係にあるとし、また式(24)において圧縮強度がブリネル硬度と比例の関係にあると仮定したことから、ここでは単位弾塑性変形の逆数で検討を進める。

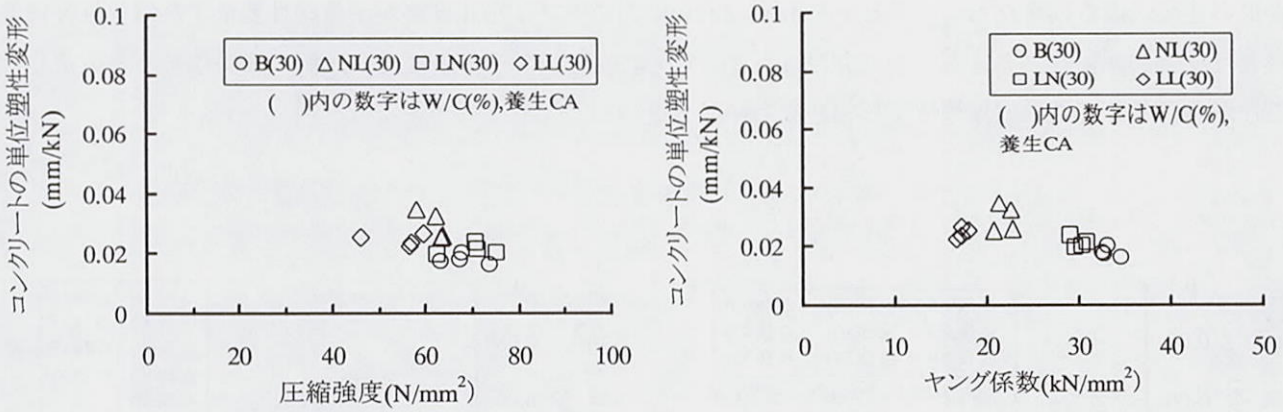


(a)基本配合

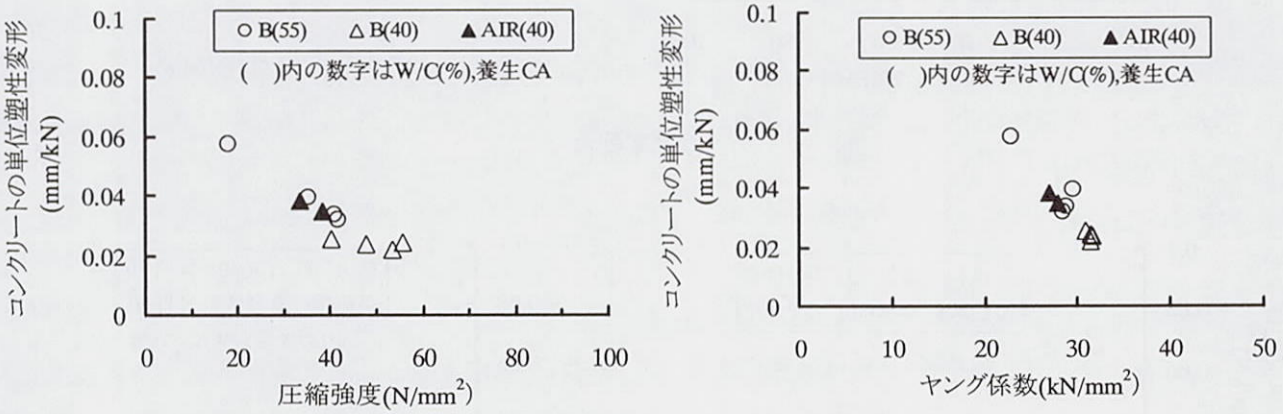


(b)骨材量変化配合

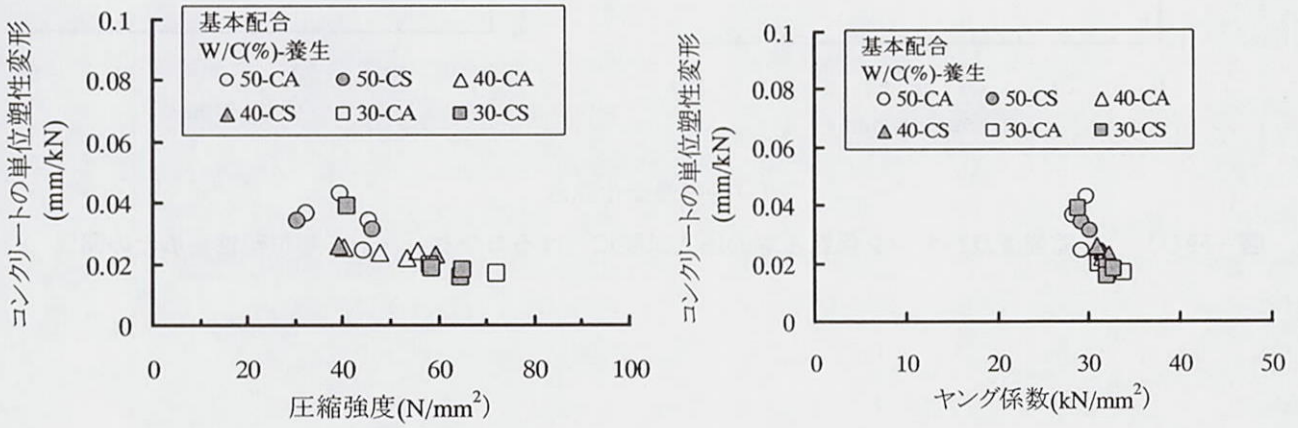
図－59(1)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位塑性変形との関係



(c)軽量骨材配合

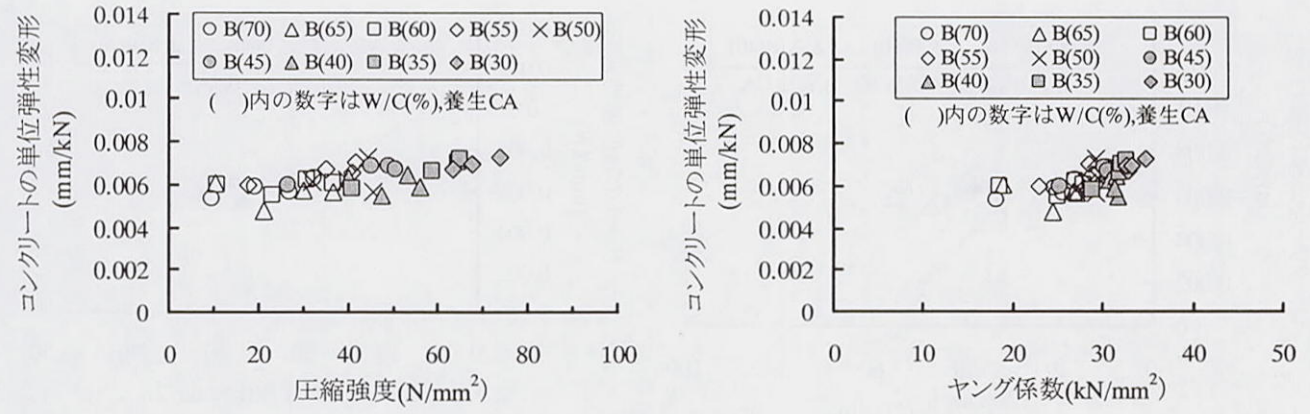


(d)空気量の影響

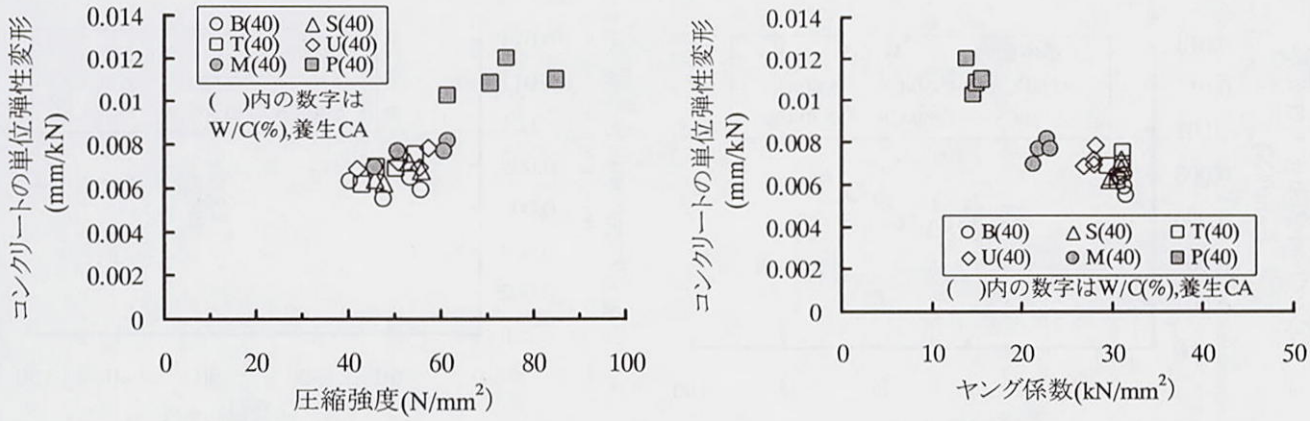


(e)養生の影響

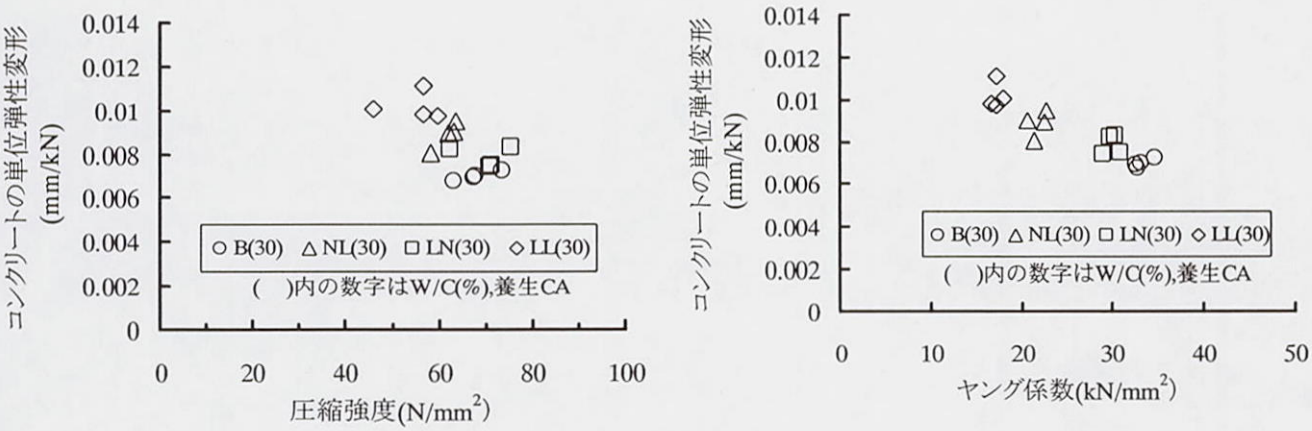
図－59(2)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位塑性変形との関係



(a)基本配合

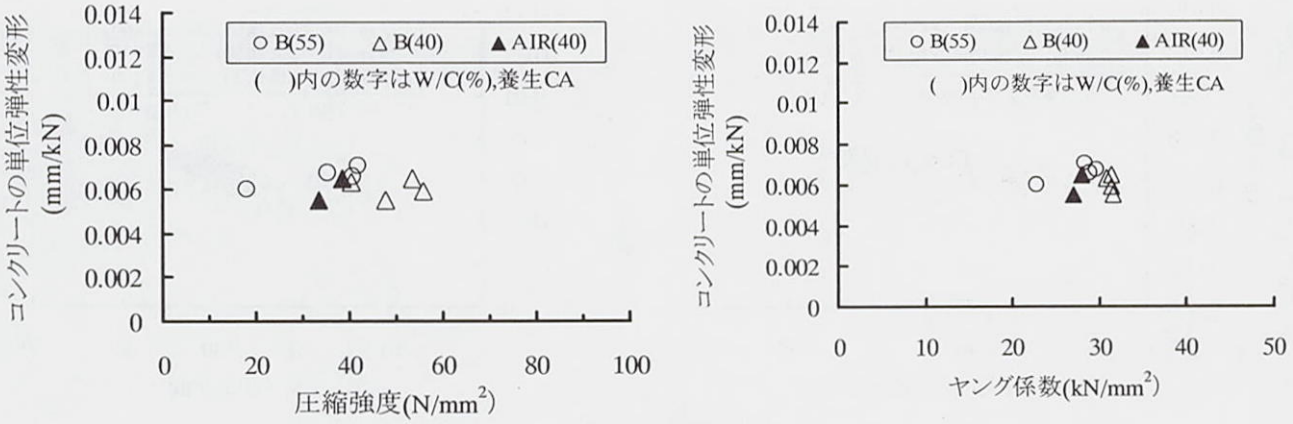


(b)骨材量変化配合

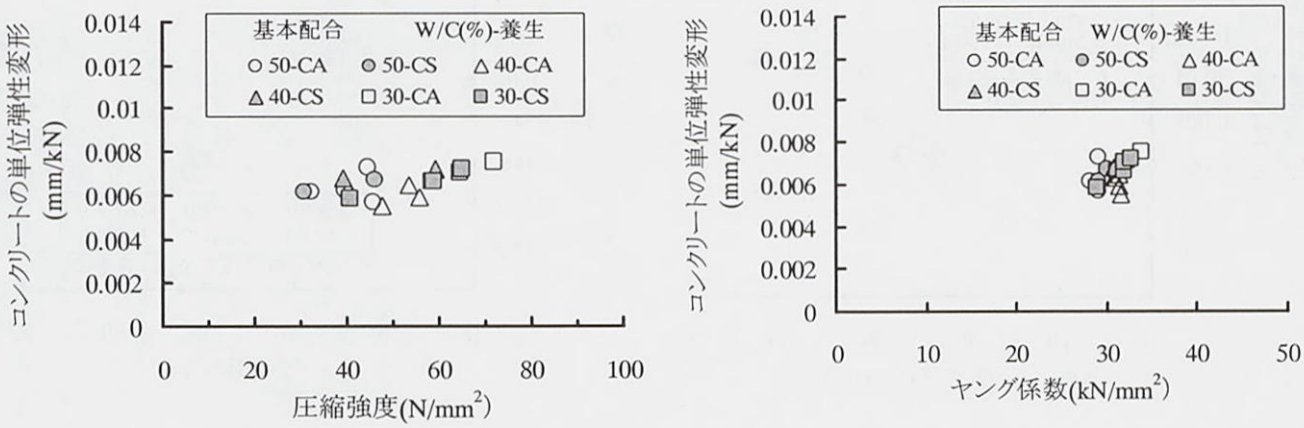


(c)軽量骨材配合

図－60(1)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾性変形との関係

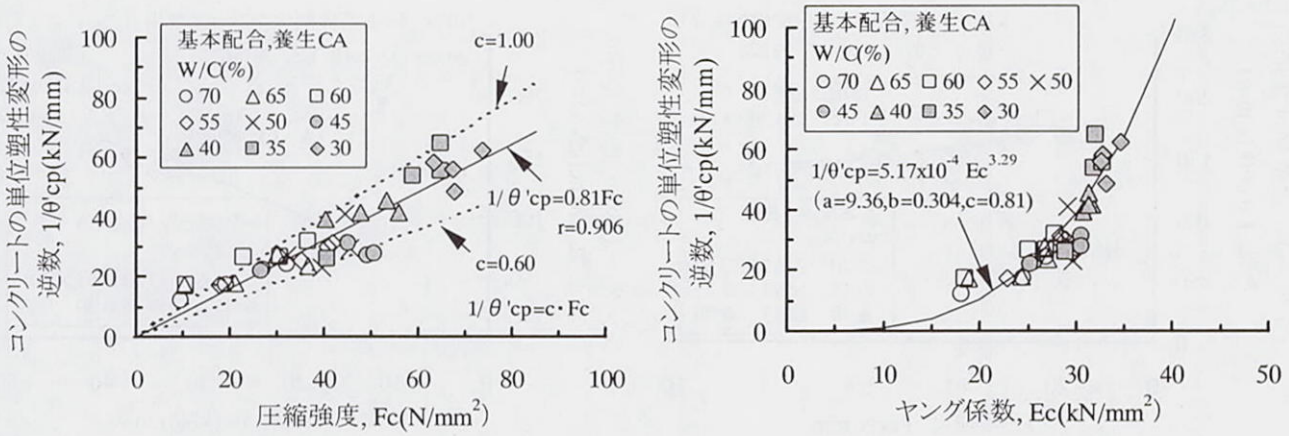


(d)空気量の影響

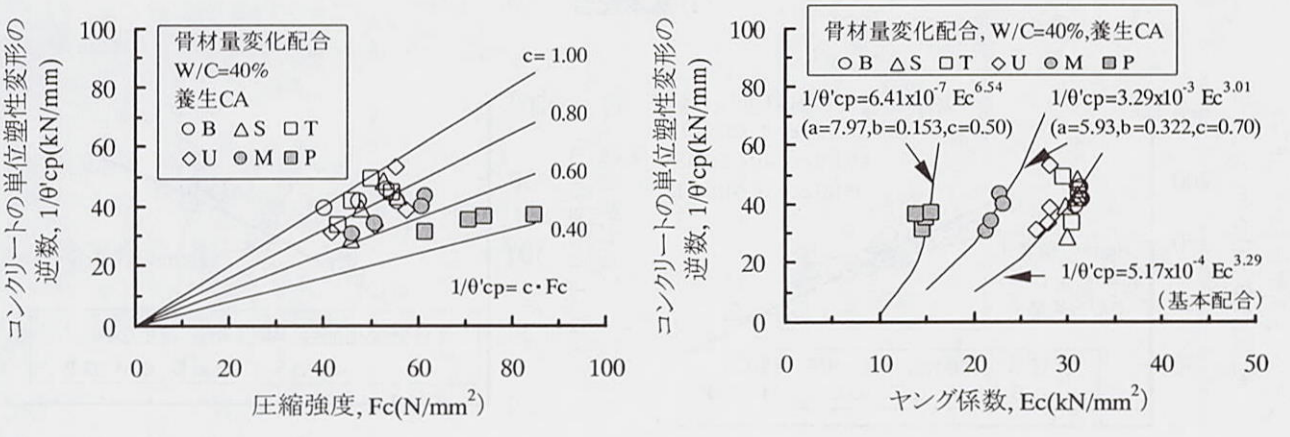


(e)養生の影響

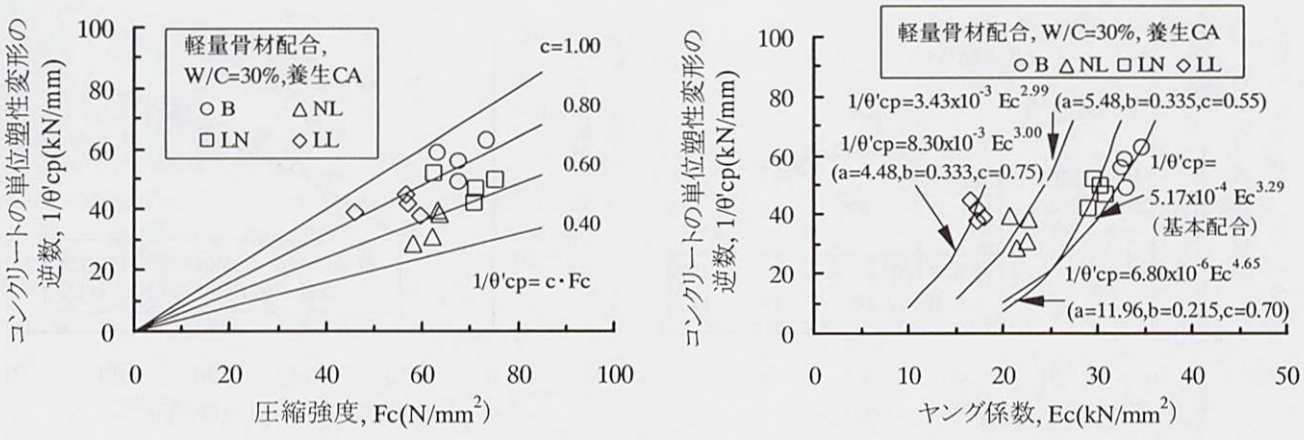
図－60(2)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾性変形との関係



(a)基本配合

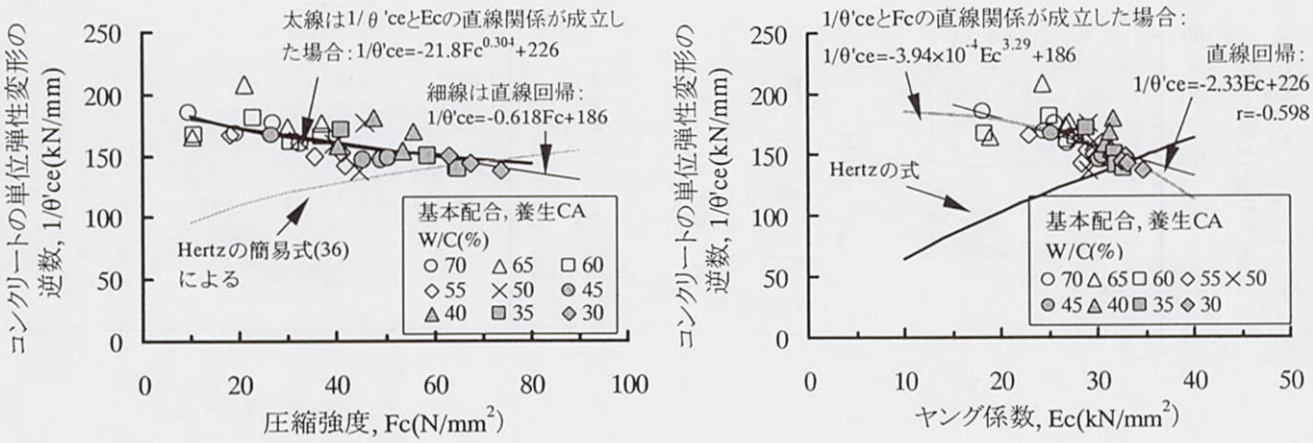


(b)骨材量変化配合

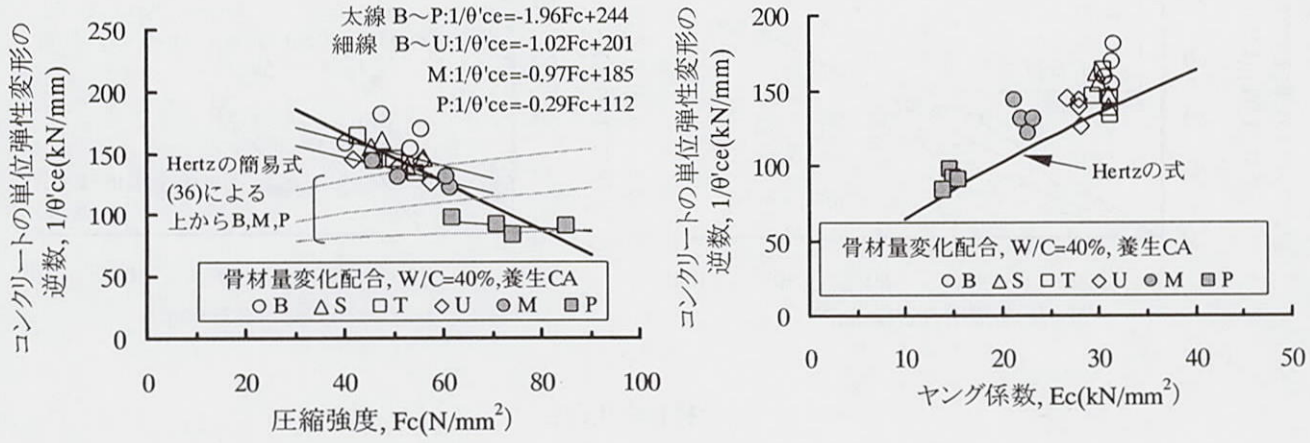


(c)軽量骨材配合

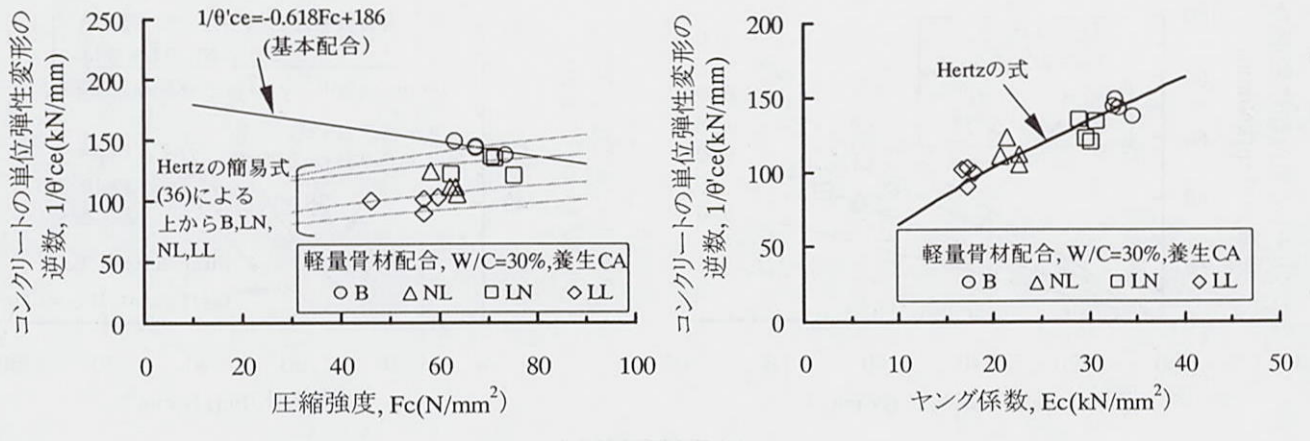
図－61　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位塑性変形の逆数との関係



(a)基本配合



(b)骨材量変化配合



(c)軽量骨材配合

図－62　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾性変形の逆数の関係

コンクリートの圧縮強度 Fc(単位は N/mm^2)とヤング係数 Ec(単位は kN/mm^2)の関係は、図－11(3)などで示したとおり、式(33)で表すことができる。表－9 は、各配合に対し、式(33)による回帰で得られた係数 a, b である。

$$Ec = a \ Fc^b \tag{33}$$

式(18)に示したとおり、ブリネル硬度と単位塑性変形は反比例の関係にあり、式(20)のようにブリネル硬度と圧縮強度が比例の関係にあるものであれば、圧縮強度と単位塑性変形の反比例の関係が成り立ち、$2\pi r \cdot \alpha$ を c とおけば、式(34)のように表される。圧縮強度とヤング係数には、式(33)の関係が成立しているので、式(34)は式(35)のようにも表すことができる。式(35)中の係数 a, b はコンクリートの種類によって定まる値である。なお、式(20)は立方体の圧縮強度であるが、一般に円柱供試体の圧縮強度とは比例関係にあるので特に問題ない。

$$\frac{1}{\theta'cp} = cFc \tag{34}$$

$$\frac{1}{\theta'cp} = c(Ec/a)^{1/b} \tag{35}$$

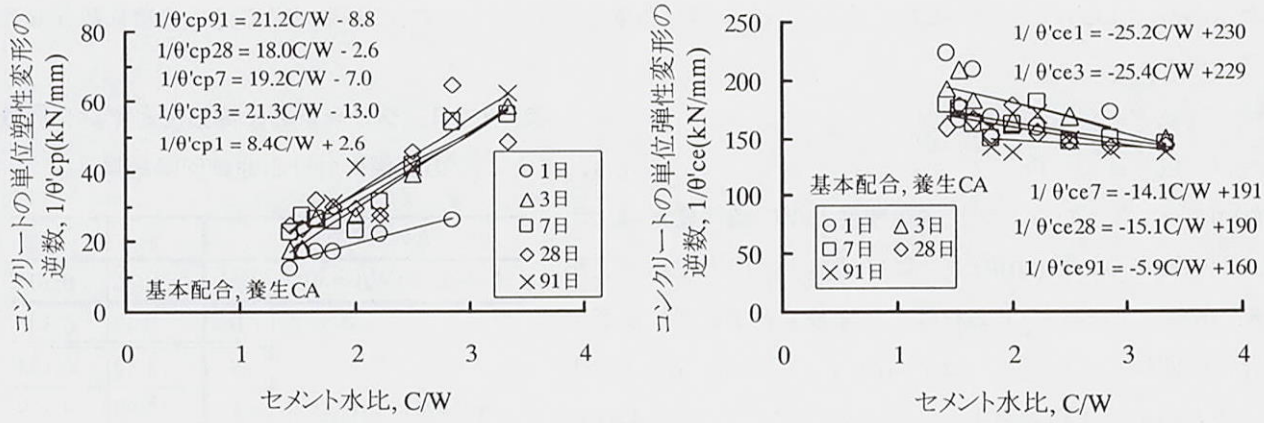
表－9　コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係における曲線回帰結果

配合の種類		a	b
基本配合(W/C=30～70%)		9.36	0.304
骨材量変化配合 (W/C=40%)	B	9.47	0.303
	S	14.82	0.184
	T	13.87	0.199
	U	9.37	0.274
	M	5.93	0.332
	P	7.97	0.153
軽量骨材配合 (W/C=30%)	B	9.03	0.311
	NL	5.48	0.335
	LN	11.96	0.215
	LL	4.48	0.333

ただし，養生CAのみの回帰

基本配合における圧縮強度と単位塑性変形の逆数の関係を式(22)で回帰すると、図－61 に示すとおり、係数 c は 0.81(≒0.8)、相関係数 r は 0.906 となり、式(34)の関係が概ね成立している。しかし、係数 c は概ね 0.8 ±0.2(±25%)の範囲を有し、一部、低強度域においては 1.0 を超えるデータも存在する。単位塑性変形の逆数を定数 $2\pi r$ で除したものがブリネル硬度であるが、配合条件を限定した基本配合であっても±25%程度のばらつきを有することは、コンクリートの表面硬度から圧縮強度を推定することに根本的な限界が存在することを意味する。このばらつきは、Schmidt の論文 18)において定数 α のばらつきが±20%（または±40%）という結果とも概ね一致するものである。

静的圧入試験及びテストハンマー試験は、ブリネル硬度試験と同様に曲率を持つ先端を押しつけることになり、供試体との接触が点接触から部分球の状態に変化する。そのため、鉛直方向に加えた加重は、集中荷重から球の曲率に伴う不均一分布荷重に変化することになることから、等面積で除して評価する圧縮強度とは完全に一致しない可能性がある。図－63 に示すように、セメント水比と単位塑性変形の逆数の関係を調べた場合、材齢 3 日以後では直線回帰式の傾きが概ね一致するが、材齢 1 日についてはかなり異なる。図－11 に示したセメント水比と圧縮強度の関係では、いずれの材齢においても直線回帰の傾きがほぼ一致しているので、圧縮強度とブリネル硬度（単位塑性変形の逆数）には何らかの相違がある。



図－63　基本配合におけるセメント水比と静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾性変形の逆数の関係

一方、骨材量変化配合及び軽量骨材配合における係数 c の範囲は 0.4～1.0 で基本配合よりも広がり、個々の配合条件によって係数 c の分布がかなり異なる。ペースト、モルタル及び軽量骨材配合は基本配合よりも係数 c が小さくなる傾向があるが、配合 M(モルタル)の係数 c は約 0.7 程度で基本配合と大幅に異なるものではない。コンクリートを使用する限りは、骨材量の変化の影響は、基本配合のばらつきの範囲に収まるものであり、係数 c に対して骨材量の変化はあまり考慮する必要がない。軽量骨材配合に関しても、配合 NL の 2 点が係数 c=0.6 を下回っているものの、前述のように軽量骨材配合の単位塑性変形のばらつきが大きいことを考慮すれば、概ね基本配合と同様に 0.6～1.0 の範囲であると考えても支障がないものと思われる。なお、双方ともと高強度域の配合（水セメント比 40,30%）であるので、低強度域での影響は定かではない。

以上のように、圧縮強度と単位塑性変形の逆数、圧縮強度とヤング係数の両関係が成立すれば、ヤング係数と単位塑性変形の関係では、試験値が式(35)を表した曲線上にプロットされることがわかる。よって、圧縮強度、ヤング係数のいずれと単位塑性変形の関係を調べても同じことである。

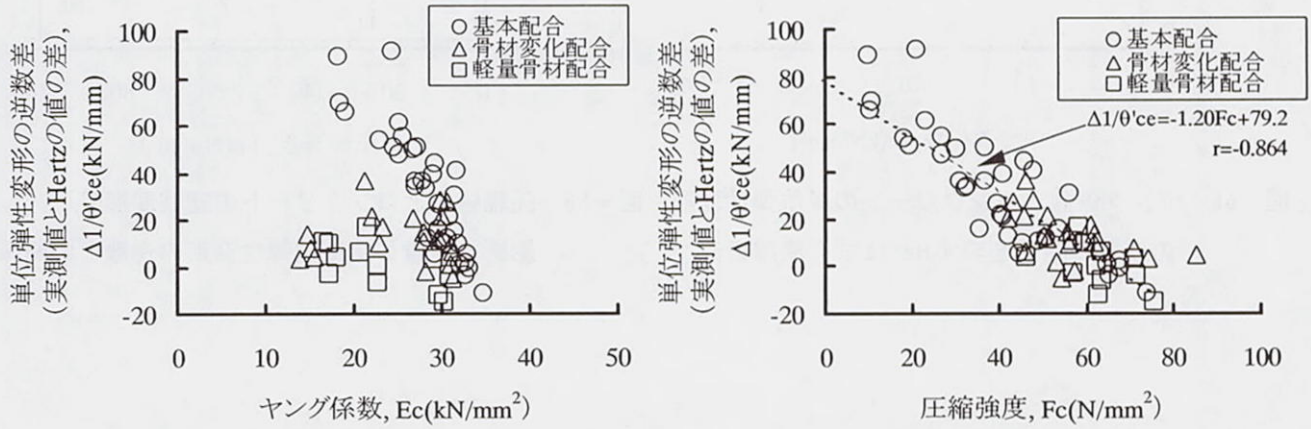
次に、圧縮強度及びヤング係数とコンクリートの単位弾性変形の関係を調べたものが、図－62 である。Schmitt は単位弾性変形を定数と見なしている。基本配合の場合には、圧縮強度の増加に伴い、単位弾性変形の逆数が若干低下する傾向があるが、圧縮強度 10～80N/mm^2 に対し、単位弾性変形の逆数は 160±20kN/mm（±12.5%）である。単位塑性変形の係数 c に±25%のばらつきがあり、これを許容するのであれば、Schmitt の仮定どおり、一定の値であると見なしてもよいと思われる。しかし、骨材量変化配合では直線回帰式の傾き及び切片が基本配合と異なり、軽量骨材配合の結果では圧縮強度の増加に伴って単位弾性変形の逆数が低下する傾向が見られない。

ヤング係数を横軸にとった場合には、基本配合では圧縮強度と同様にヤング係数の増加とともに単位弾性変形の逆数が低下する傾向があり、圧縮強度と単位弾性変形の関係における直線回帰式及び圧縮強度とヤング係数の関係式から求めた曲線と比較的一致している。骨材量変化配合及び軽量骨材配合は、水セメント比を限定しており、個々の配合で得られたヤング係数の範囲が狭いことから、個別の関係は把握できないが、骨材量変化配合及び軽量骨材配合に分類されるすべての配合を併せて評価した場合には、基本配合とは反対

に右上がりの傾向が見られる。

一般に、ヤング係数が大きいほど、弾性変形は小さくなり、式(25)に示したHertzの理論式においても同様であることから、今回の試験結果における基本配合の傾向は矛盾し、骨材量変化配合及び軽量骨材配合の右上がりの傾向が妥当であると判断される。そこで、式(25)においてコンクリートの弾性変形の項のみを対象とし、プランジャー先端の接触部の半径を計算し、さらにプランジャーの曲率半径と接触部の半径から鉛直方向の変形（単位弾性変形）を求めた。なお、荷重は4,6,810kNの平均値7kNとした。図－62に示すとおり、Hertzの理論式から求めた曲線は、骨材量変化配合及び軽量骨材配合の結果とかなり一致している。また、基本配合においてもヤング係数 30～35kN/mm^2 の単位弾性変形はその曲線と一致している。基本配合では、ヤング係数が 30kN/mm^2 よりも小さい場合においてHertz理論以外の要因が単位弾性変形の逆数を増加させる要因の影響が強くなると考えられる。これらの結果から判断すれば、静的圧入試験及びテストハンマー試験では、塑性変形と弾性変形の両方を生じるものであるために、測定された単位弾性変形に塑性変形の影響分が含まれるものと推測される。

そこで、単位弾性変形の逆数に関し、実測値とHertzの理論値の差（以下、単位弾性変形の逆数差と称す）を求め、ヤング係数及び圧縮強度との関係を調べた。図－64に示すとおり、ヤング係数と単位弾性変形の逆数差の関係では、骨材量変化配合及び軽量骨材配合が基本配合とは異なる傾向を示し、一元的に関係を見い出すことができない。一方、圧縮強度を横軸にとった場合には配合の相違が見られず、単位弾性変形の逆数差と圧縮強度は概ね直線関係で表すことが可能である。



図－64　圧縮強度及びヤング係数とコンクリートの単位弾性変形の逆数差の関係

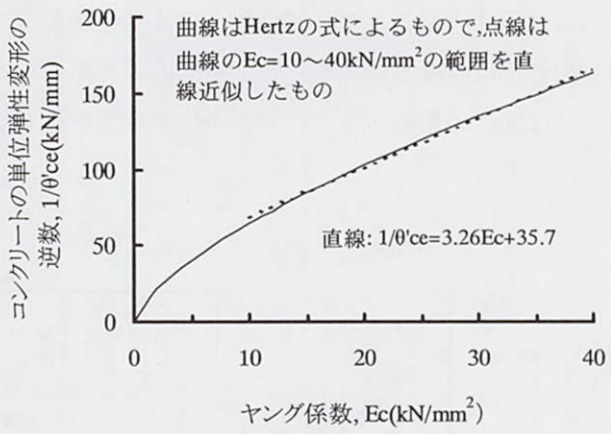
Hertz理論式に基づく単位弾性変形の式は極めて複雑になるが、図－65に示すとおり、ヤング係数が極めて小さい範囲では曲線を描くものの、今回の実験が対象とする 10～40kN/mm^2 の範囲を直線で回帰しても全く支障がないことがわかる。この回帰直線式を用いた場合の実測の単位弾性変形の逆数(kN/mm)は、ヤング係数(kN/mm^2)と圧縮強度(N/mm^2)で構成される式(36)で表すことができる。ここで、係数a, bは、コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を表す値（表－9）である。なお、図－62において圧縮強度とコンクリートの単位弾性変形の逆数の関係を示したグラフ中に、「Hertz の簡易式」と記載した曲線は、この式(36)を用

いて計算したものである。

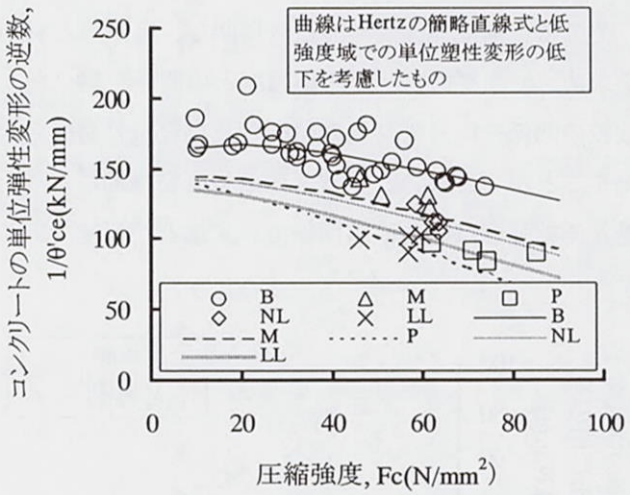
$$\frac{1}{\theta' ce} = 3.26Ec - 1.20Fc + 115$$

$$= 3.26aFc^{b} - 1.20Fc + 115 \qquad (36)$$

図－66 は、圧縮強度を横軸にとり、実測の単位弾性変形の逆数と式(36)の曲線を比較したものである。基本配合でのばらつきや骨材量変化配合及び軽量骨材配合の低強度域のデータが存在しないことによる不確かさの問題を残しているものの、式(36)は概ね全配合の傾向を表している。このように、ヤング係数で導かれる Hertz の式に対し、圧縮強度の関数で補正を必要とする結果は、塑性変形の影響を意味するものと思われる。

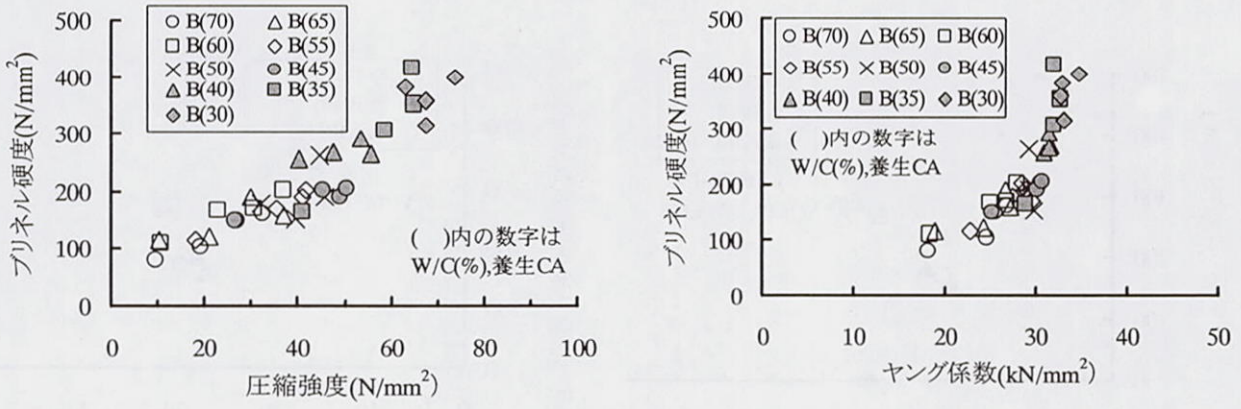


図－65　ヤング係数とコンクリートの単位弾性変形の逆数の関係を表すHertz式の直線近似

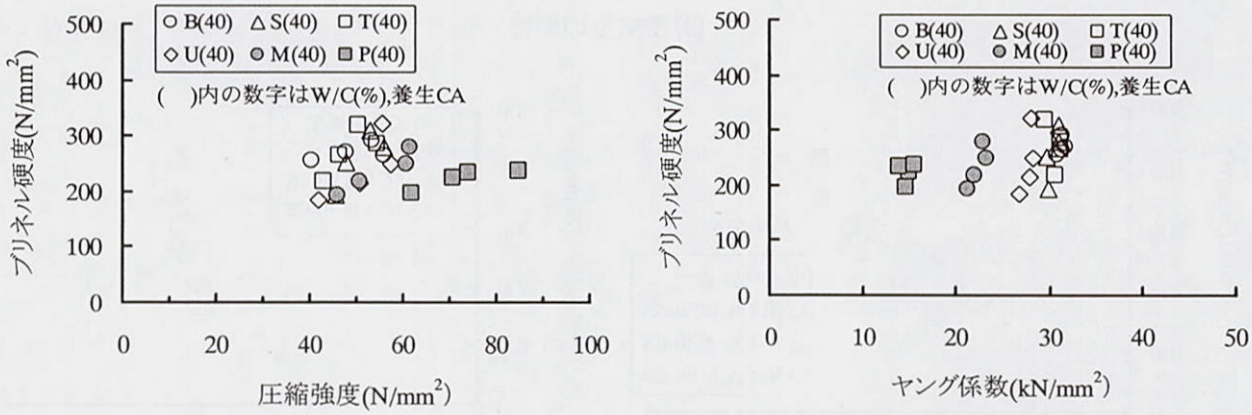


図－66　圧縮強度とコンクリートの塑性変形の影響を考慮した単位弾性変形の逆数との関係

図－67、図－68 は、圧縮強度及びヤング係数とブリネル硬度及び計算反発度の関係を表したものである。ブリネル硬度は、前述の単位塑性変形の逆数を定数 $2\pi r$ で除した値であるので、圧縮強度及びヤング係数との関係は全く同じである。また、計算反発度は、ブリネル硬度で表すよりもばらつきが小さく見える点に関しても、図－58 を用いて説明した。計算反発度とヤング係数の関係が、基本配合と骨材量変化配合及び軽量骨材配合では異なる結果など、計算反発度の結果は実測の反発度と圧縮強度及びヤング係数の関係とかなり一致している。計算反発度に対する詳細な検討は、4.4.6 で行うものとする。

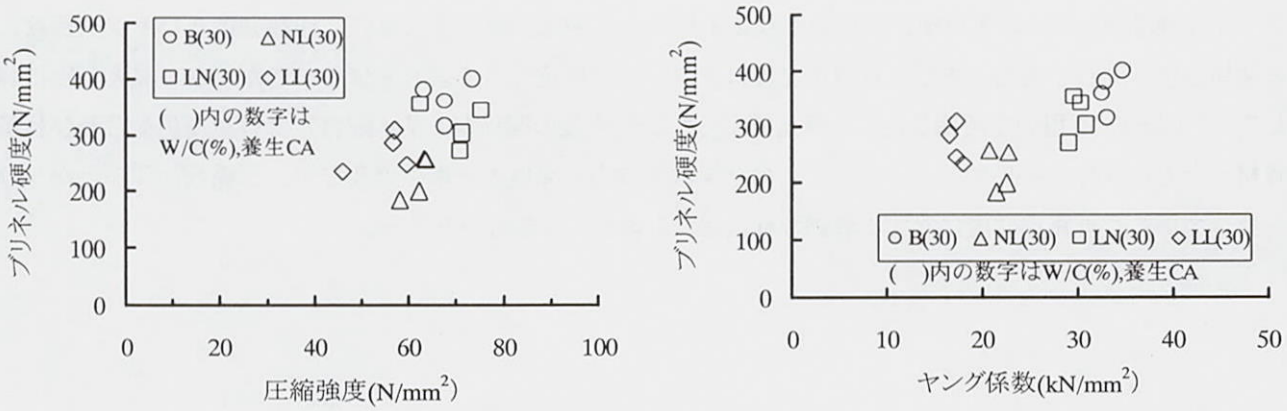


(a)基本配合

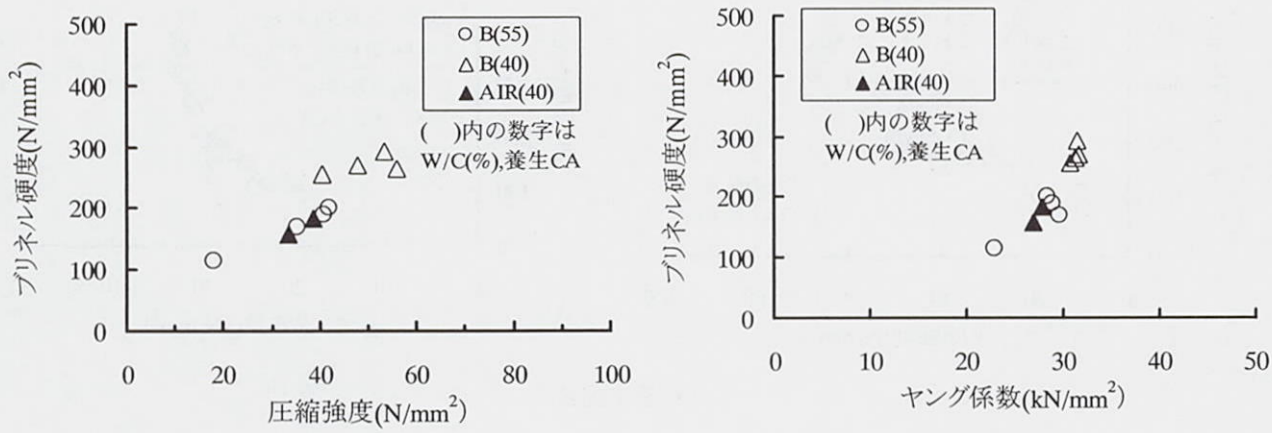


(b)骨材量変化配合

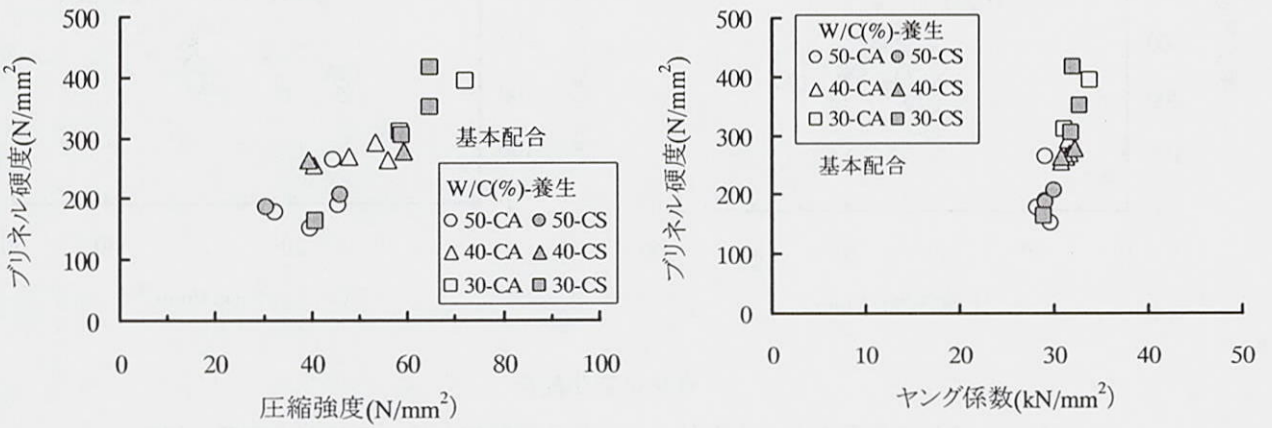
図－67(1)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるブリネル硬度の関係



(c)軽量骨材配合

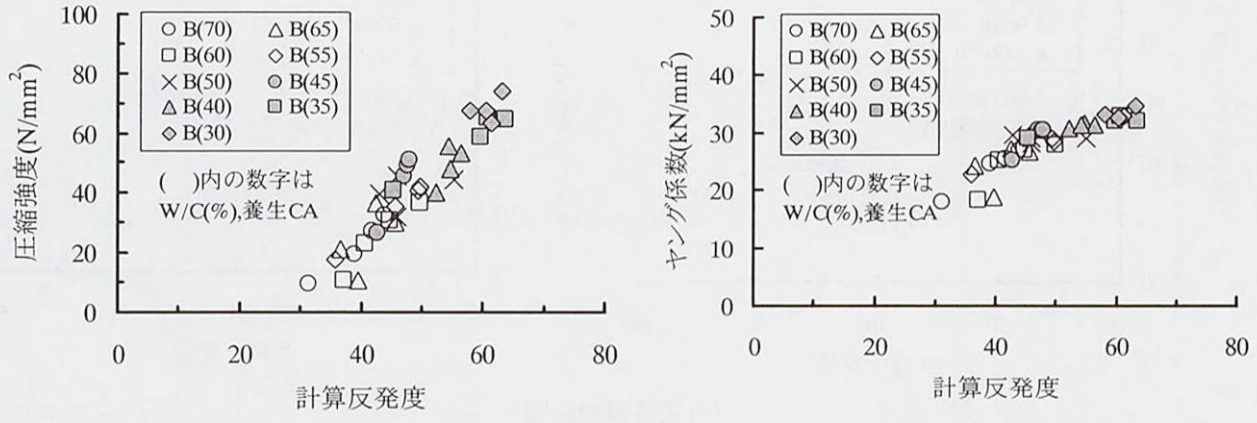


(d)空気量の影響

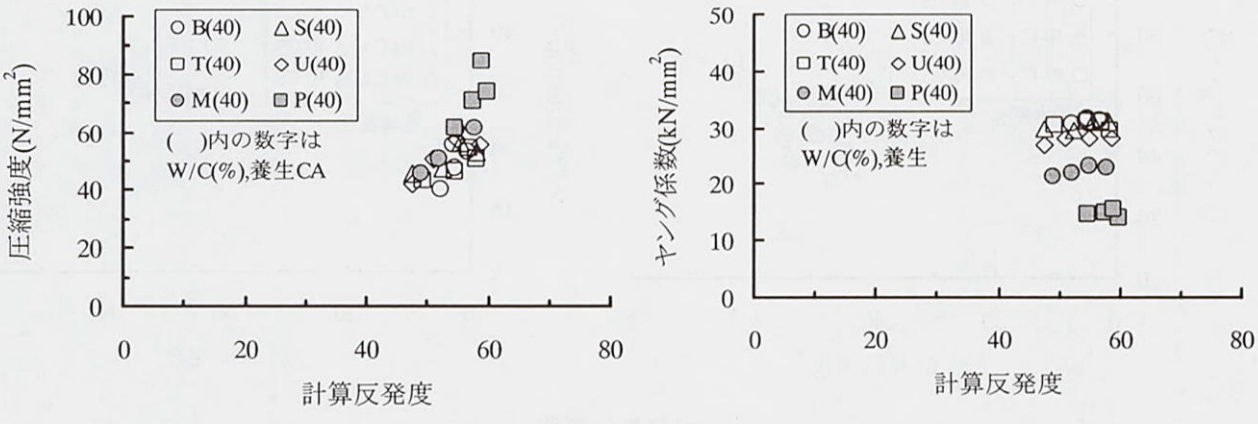


(e)養生の影響

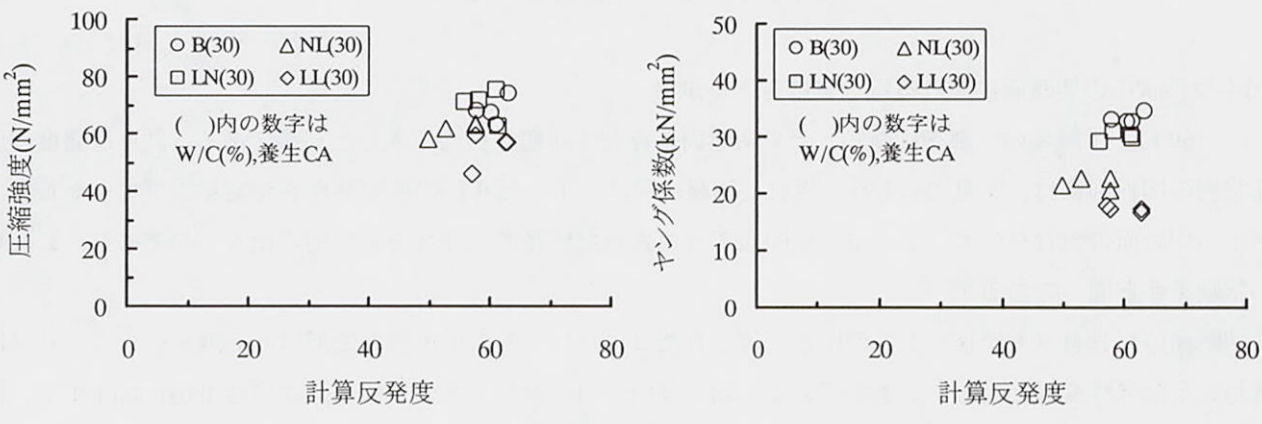
図－67(2)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験におけるブリネル硬度の関係



(a)基本配合



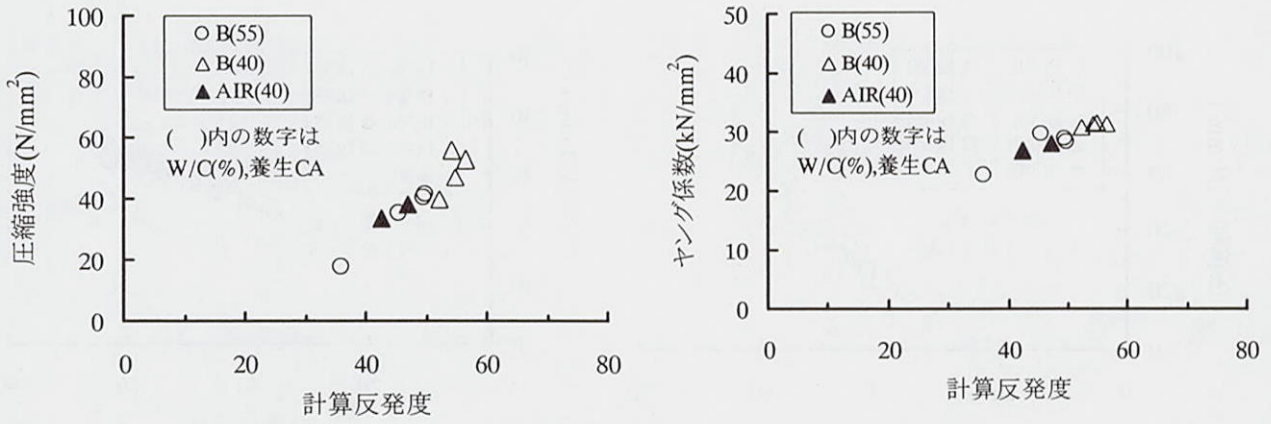
(b)骨材量変化配合



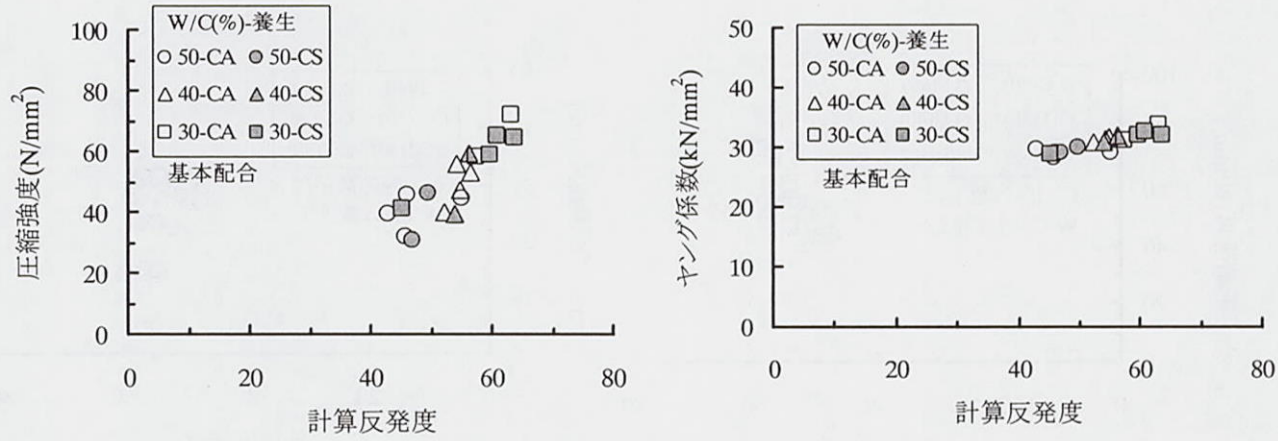
(c)軽量骨材配合

図－68(1)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験における計算反発度の関係

(計算反発度は 100 倍した値で表示)



(d)空気量の影響



(e)養生の影響

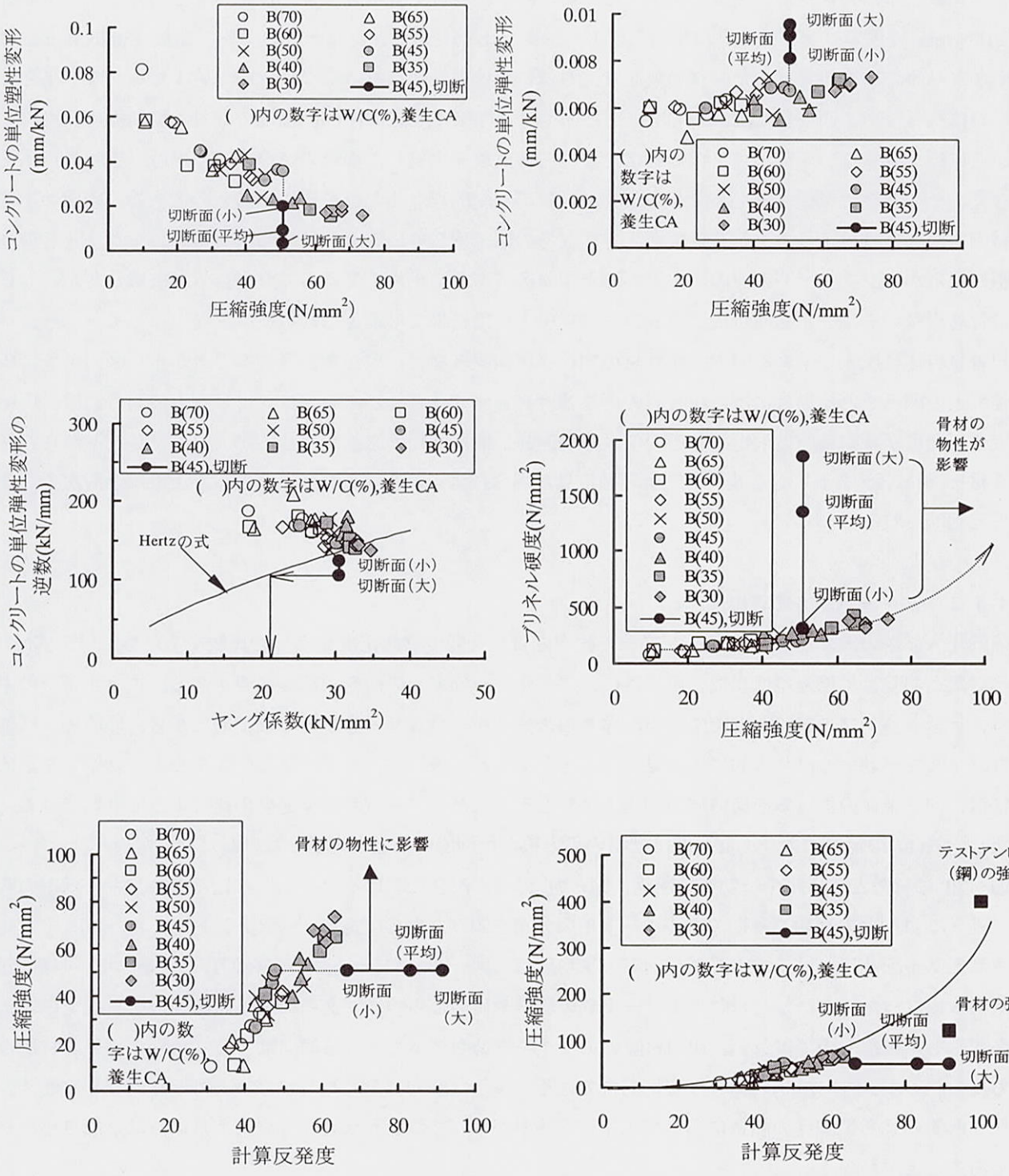
図－68(2)　圧縮強度及びヤング係数と静的圧入試験における計算反発度の関係

（計算反発度は 100 倍した値で表示）

(2)小型供試体の切断面における粗骨材に対する試験

図－69 は、供試体の一部を切断し、その切断面に存在する粗骨材に圧入した結果である。計算反発度と圧縮強度の関係図には、文献 28)より、骨材と鋼材（テストアンビル）の圧縮強度を想定してプロットした。図中の切断面の粗骨材の大、小とは、切断面で確認された粒径の大きさを定性的に指すものであり、3.6.10 の試験条件と同一である。

切断面の粗骨材（大粒径）上での圧入で得られたコンクリートの単位塑性変形は 0mm/kN に近く、結果は概ね完全な弾性変形と見なすことができる。同一箇所のコンクリートの単位弾性変形は 0.010mm/kN で、同一水セメント比 45%ではコンクリート表面での値（0.0055mm/kN）よりもかなり大きく、図－69 に示すように水セメント比 30%のコンクリート表面の値よりも大きいことがわかる。モルタルとコンクリートのヤング係数の相違からも明らかなように、普通骨材はコンクリートよりもヤング係数が大きい。ヤング係数の大きい方がコンクリートの単位弾性変形が大きいという基本配合特有の矛盾が再認される。しかし、Hertz 理論の



図－69　供試体切断面の圧縮強度と静的圧入試験のブリネル硬度および計算反発度の関係

ヤング係数と単位弾性変形の逆数の関係では、切断面の粗骨材上の値は、図－69 に示すとおり、ヤング係数が 21kN/mm^2 程度のコンクリートに相当し、水セメント比 45%のコンクリートのヤング係数（30kN/mm^2）よりもかなり小さい。粗骨材のヤング係数を考えれば、単位弾性変形はコンクリートの値よりもかなり小さくなければならない。図－13(2)によれば、モルタルのヤング係数は 20kN/mm^2 程度であり、切断面の粗骨材上の値とほぼ一致する。すなわち、粗骨材に対して圧入試験を実施した場合の単位弾性変形は、粗骨材自体ではなく、その背後に存在するモルタルのヤング係数が支配的となることを示唆するものである。図中の小径骨材の方が大径骨材よりもヤング係数が大きくなるのは矛盾しているように思われるが、コンクリートの単位塑性変形がコンクリート表面の値と近いことが原因である。小片であるので骨材自体が破壊したか、もしくは骨材周りのモルタルも同時にプランジャーで圧入した結果であると思われる。

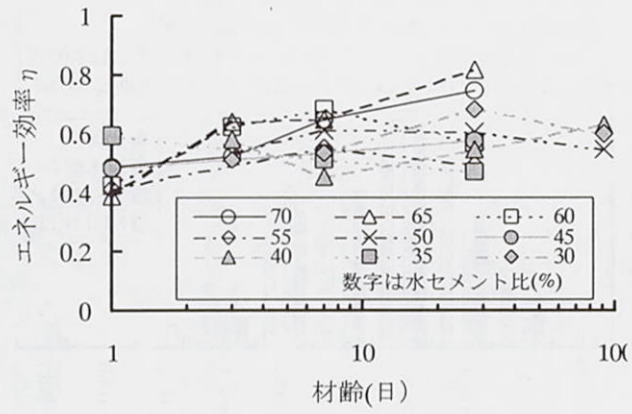
粗骨材自体に圧入しているので、粗骨材の物性（圧縮強度など）の影響を受けることから、図のように圧縮強度との関係をとる場合には、粗骨材の圧縮強度を考慮する必要がある。コンクリートの場合には、圧縮強度や反発度が狭い範囲に限定されるので、直線回帰、曲線回帰の議論が生じるが、コンクリートから石材（骨材）、鋼材（テストアンビル）まで広範囲に見た場合には、両者に直線関係を得ることには矛盾が生じるものと判断される。

4.4.5 エネルギー効率 η の算出

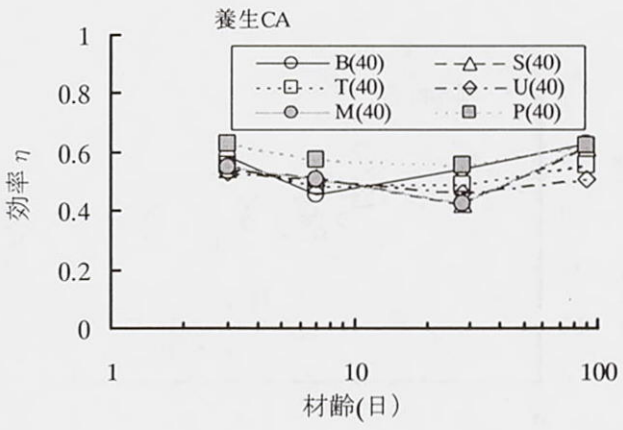
静的圧入試験の計算値とテストハンマーで測定された反発度（測定反発度）を比較するためには、式(17)に示したとおり、単位弾塑性変形の値以外に、エネルギー効率 η の値を求める必要がある。エネルギー効率とは、テストハンマー試験器内で生じる摩擦等のエネルギーロスを考慮するものであるから、静的圧入試験ではエネルギー効率 η は基本的に 1 と見なすことができる。テストハンマー試験のエネルギー効率 η を求めるには、同一条件の供試体を用いた静的圧入試験とテストハンマー試験の反発度の比によって計算できる。ただし、式(17)の定義により、反発度は効率の平方根と比例することを考慮しなければならない。

図－70 は材齢とエネルギー効率の関係、図－71 は基本配合におけるセメント水比とエネルギー効率の関係、図－72 は配合の種類ごとにエネルギー効率の分布を調べたものである。水セメント比を 30～70%まで変化させた基本配合におけるエネルギー効率の平均値は、図－70(a)に示すように材齢 1 日が最小で、材齢 28 日が最大になった。ただし、材齢毎のデータ数の違いや値のばらつきがあるので、材齢 3～91 日までの変化は必ずしも明確なものではない。初期材齢のエネルギー効率が小さくなる傾向は、図－70(c)の軽量骨材配合でも見られるが、図－70(b)の骨材量変化配合ではそのような傾向は全く見られない。図－71 では、水セメント比 50%を超える低強度の配合においてエネルギー効率のばらつきが大きく、材齢 1 日の値はかなり小さな値であることがわかる。

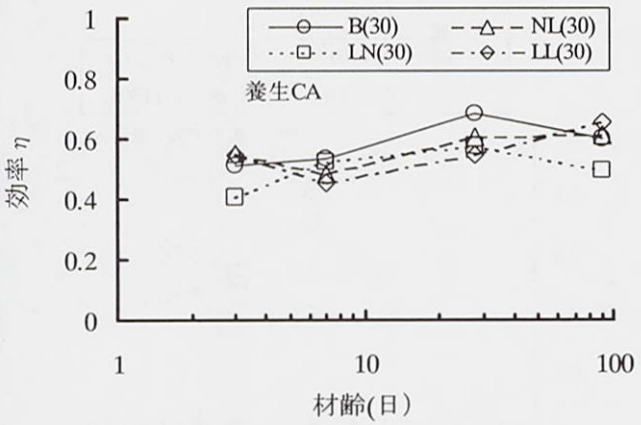
エネルギー効率は、個々に見れば、水セメント比や材齢などによって多少異なるようであるが、ばらつきが大きいので、全体の傾向を把握する上では 0.55 程度の値を用いて評価すればよいものと思われる。また、図－72 に示すとおり、エネルギー効率は荷重の増加によってやや大きくなる場合もあるが、その変化量は小さく、ばらつきがそれ以上に大きいので、荷重 4 水準を平均した効率で評価しても差し支えないものと判断される。



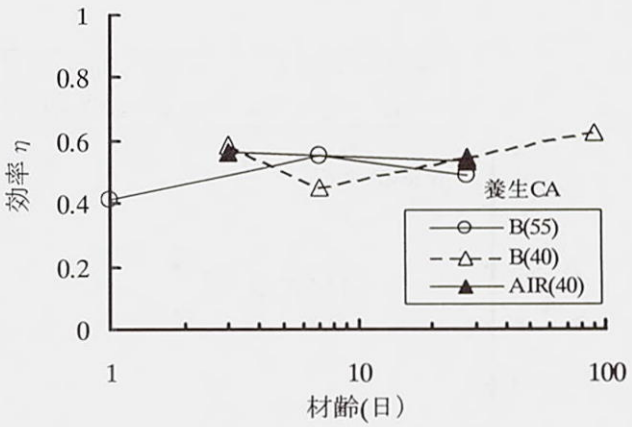
(a)基本配合



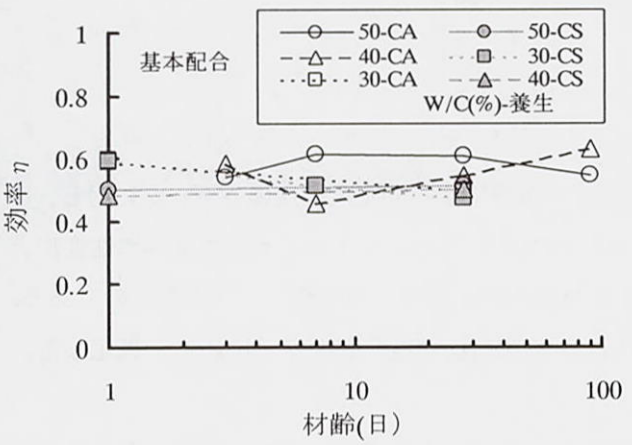
(b)骨材量変化配合



(c)軽量骨材配合

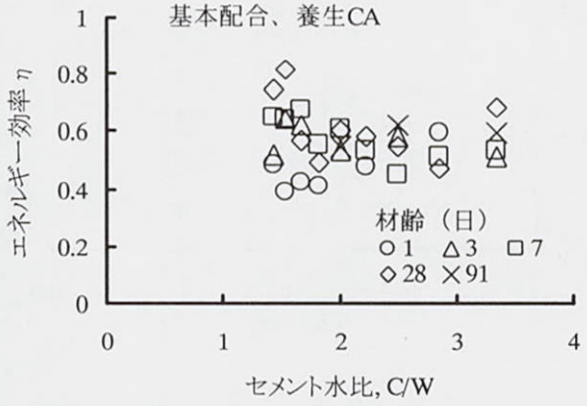


(d)空気量の影響

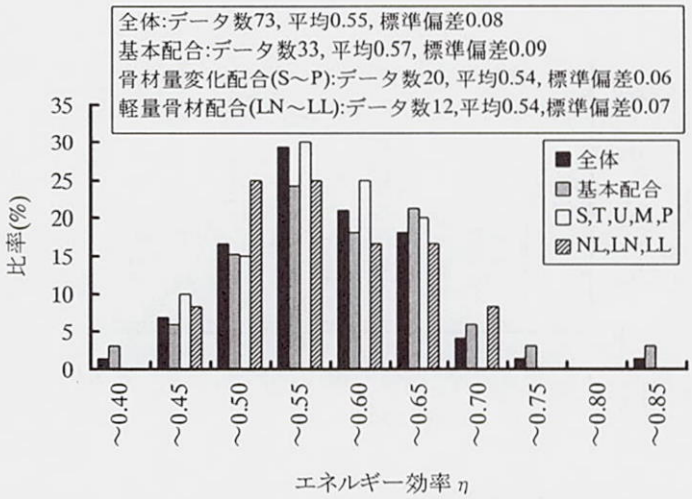


(e)養生の影響

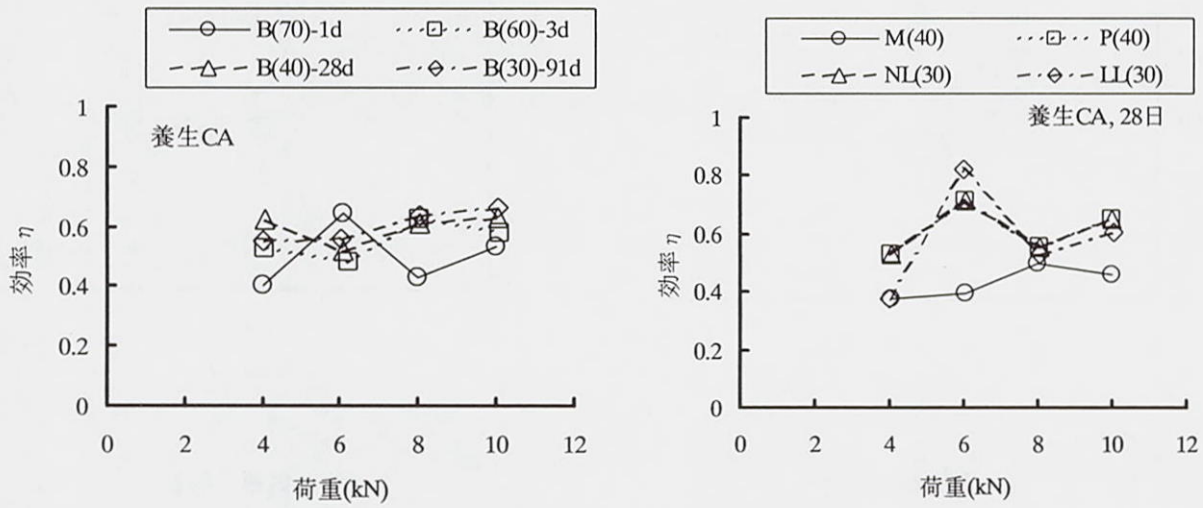
図－70　材齢によるエネルギー効率



図－70　基本配合におけるセメント水比とエネルギー効率の関係



図－71　エネルギー効率の分布

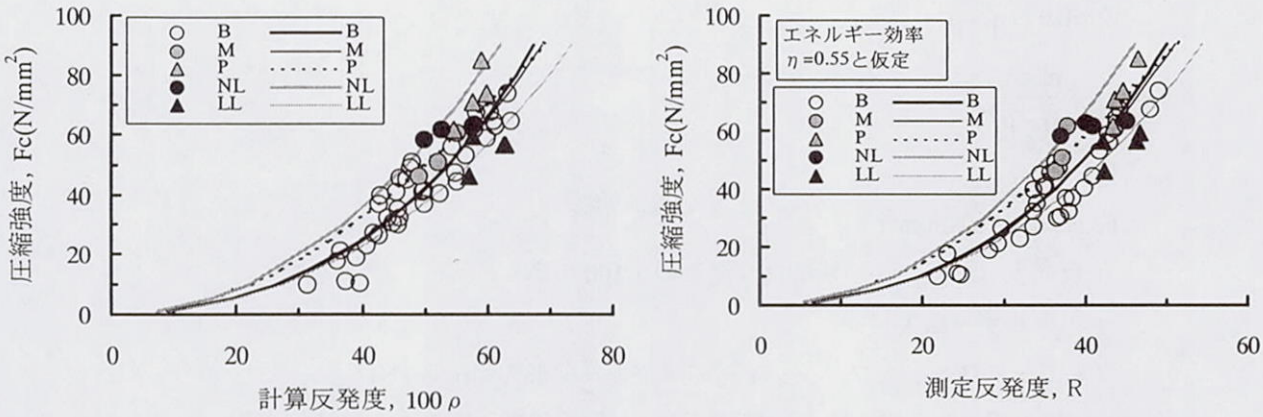


図－72　荷重とエネルギー効率の関係

4.4.6 計算反発度と測定反発度

図－73 は、静的圧入試験による計算反発度とテストハンマー試験による測定反発度の各データに対し、反発度と単位弾塑性変形及びエネルギー効率の関係を表した式(17)、並びにコンクリートの単位弾塑性変形と圧縮強度の関係を示した式(34)、式(36)によって導き出した反発度の式(37)の曲線を当てはめたものである。エネルギー効率 η は、計算反発度を横軸にしたグラフでは 1 とし、測定反発度のグラフでは 0.55 と仮定した。プランジャーの単位弾性変形は 0.0035mm/kN とした。

例えば、圧縮強度 Fc が 40N/mm^2 の基本配合では、各係数は、a=9.36、b=0.304、c=0.8 となり、エネルギー効率 η を 0.55 とおけば、反発度は 36.3（ただし、100 倍した値 100ρ）と計算される。図－73 に示すとおり、反発度の式を表す曲線は、各配合の計算反発度、測定反発度のデータとかなり一致している。よって、今回



図－73　計算反発度及び測定反発度と圧縮強度の関係

の試験で使用したコンクリートであれば、これまでに求めた各係数の値を与えることによって反発度と圧縮強度の関係を導き出すことができる。

$$\rho = \sqrt{\eta \frac{cF_C(aF_C^{\ b} - 0.368F_C + 123)}{acF_C^{\ b+1} + 286aF_C^{\ b} - 0.368cF_C^{\ 2} + (123c - 105)F_C + 1.01\times10^4}} \qquad (37)$$

ここに、

ρ:反発度（ただし、一般的な反発度の 1/100 の値）

Fc:圧縮強度(N/mm²)

η:エネルギー損失（テストハンマーの値と比較する場合には 0.55 程度、静的圧入試験の計算反発度との比較では 1）

a,b:圧縮強度とヤング係数の関係から得られる係数（表－9 参照）

c:コンクリートの単位塑性変形の逆数と圧縮強度の関係から得られる係数（図－61 参照）

式(37)は極めて複雑であることから、測定した反発度と圧縮強度によって関係式を求める上では、もう少し簡易で、かつ応用性のある式の形を検討する必要がある。式(20)、式(24)の関係により、圧縮強度は式(38)のように表すことができる。式(20)は、Schimidt の仮定に基づくものである。しかし、今回の試験においても、コンクリートの単位塑性変形の逆数と圧縮強度の関係は、図－61 に示したとおり、コンクリートの種類によって係数 c が変化するものの、配合等の条件を限定し、ある程度のばらつきを許容するという前提であれば、式(34)の一次式で表すことできることを確認している。

$$Fc = \frac{\rho^2}{2\pi r\alpha\theta' e(\eta - \rho^2)}$$

$$= \frac{\rho^2}{c\theta' e(\eta - \rho^2)} \tag{38}$$

ここに、

Fc:圧縮強度(N/mm^2)

ρ:反発度（ただし、一般的な反発度の 1/100 の値）

η:エネルギー損失

θ'e:コンクリートとプランジャーの単位弾性変形の和(mm/kN)

α:式(24)で示した立方体の圧縮強度とブリネル硬度の関係を表す比例定数

r:プランジャーの曲率半径(25mm)

$c=2\pi r\alpha$

式(38)が成立するのであれば、係数 c、単位弾性変形 θ'e 及びエネルギー損失 η によって圧縮強度と反発度の関係式を導き出すことができる。係数 c は、図－61 の結果により、基本配合では 0.8 前後（±0.2 の範囲）、骨材量変化配合ではモルタルが 0.7 程度、ペーストが 0.5 程度、軽量骨材配合では 0.6 程度（組合せによる）の値である。コンクリートの単位弾性変形は、本来、ヤング係数によって変化するものであるが、塑性変形の影響を受け、配合を限定すれば、その変化量がかなり小さい。ここでは、コンクリートの単位弾性変形を一定であると考えれば、図－56 により、基本配合では 0.006mm/kN、骨材量変化配合ではモルタルが 0.0075mm/kN、ペーストが 0.011mm/kN、軽量骨材配合では 0.009mm/kN 前後（組合せによる）である。プランジャーの単位弾性変形は約 0.0035mm/kN なので、単位弾性変形が各配合で一定の値となる。

以下に示すとおり、大まかな計算を行った限りでは、計算された $c\theta$'e 及びその逆数は、配合の種類によって大きく変化しないことがわかる。

基本配合：$c\theta$'e =(0.8±0.2)×(0.006+0.0035)=0.0057～0.0095

$1/(c\theta'e)$ =132 (105～175)

モルタル：0.7×(0.0075+0.0035)=0.0077

$1/(c\theta'e)$ =130

ペースト：0.5×(0.011+0.0035)=0.0073

$1/(c\theta'e)$ =138

軽量骨材：0.6×(0.009+0.0035)=0.0075

$1/(c\theta'e)$ =133

そこで、式(39)のように、式(38)の $c\theta$'e の逆数を係数 β と置き換え、各配合の係数 β，η を計算することにした。

表－10　反発度と圧縮強度の関係を表す曲線の係数β、ηの計算結果

配合区別	配合	養生	β		η	
			結果	概数 ($\times 10^2$)	結果	概数 (0.05単位)
基本配合	B(70)	CA	123	1.2	0.66	0.65
	B(65)	CA	120	1.2	0.64	0.65
	B(60)	CA	110	1.1	0.60	0.60
	B(55)	CA	128	1.3	0.51	0.50
	B(50)	CA	128	1.3	0.56	0.55
	B(45)	CA	158	1.6	0.56	0.55
	B(40)	CA	117	1.2	0.56	0.55
	B(35)	CA	106	1.1	0.50	0.50
	B(30)	CA	115	1.1	0.59	0.60
	B(70～30)	CA	118	1.2	0.57	0.55
	B(50)	CS	127	1.3	0.51	0.50
	B(40)	CS	114	1.1	0.49	0.50
	B(30)	CS	113	1.1	0.54	0.55
	B(50,40,30)	CS	115	1.2	0.52	0.50
	AIR(40)	CA	141	1.4	0.55	0.55
骨材量変化配合	S(40)	CA	121	1.2	0.53	0.55
	T(40)	CA	110	1.1	0.53	0.55
	U(40)	CA	125	1.3	0.50	0.50
	M(40)	CA	134	1.3	0.54	0.55
	P(40)	CA	145	1.5	0.59	0.60
軽量骨材配合	NL(30)	CA	141	1.4	0.57	0.55
	LN(30)	CA	127	1.3	0.50	0.50
	LL(30)	CA	95	1.0	0.55	0.55

記号につけた(　)内の数字はW/C(%)を表す.

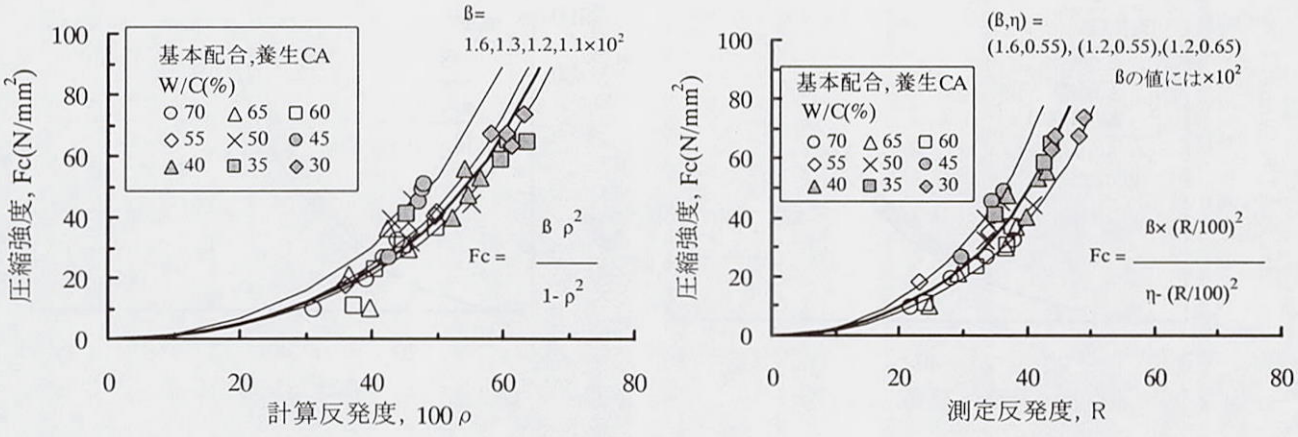
$$Fc = \frac{\beta\rho^2}{\eta - \rho^2} \tag{39}$$

係数β、ηの計算結果を、表－10 に示す。係数βは、式(39)の係数ηを 1 とし、静的圧入試験から得られた計算反発度と圧縮強度を用いて最小 2 乗法で求めた。次いで、得られた係数β、テストハンマーによる測定反発度及び圧縮強度により、係数βの計算と同様に最小 2 乗法で係数ηを求めた。得られた係数は、データ数の問題や、荷重依存性等の計算過程における問題が含まれるので、最終的に有効数字 2 桁の概数で表した。さらに、図－71 には、反発度と圧縮強度の関係を表し、試験データと式(39)の曲線を比較した。図中の計算反発度は、測定反発度に合わせ、100 倍した値（100ρ）で表している。

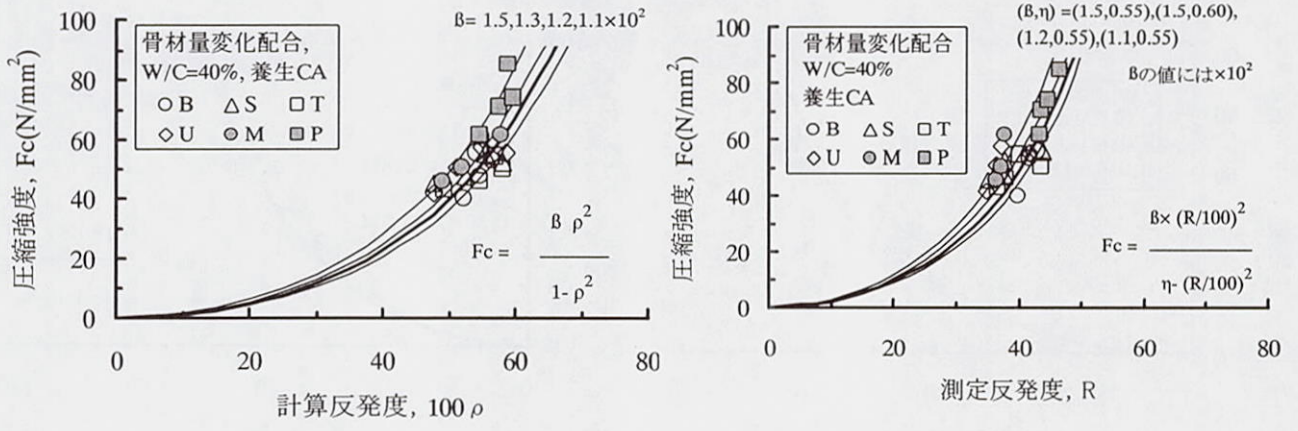
表－10 に示すとおり、基本配合の養生 CA の全データを使用した場合には、係数 β が 1.2×10^2、係数 η は 0.55 になった。水セメント比 45%の係数 β は異常値であるとしても、係数 β は $1.2\pm0.1\times10^2$、係数 η は 0.55 ±0.05 の範囲である。骨材量変化配合、軽量骨材配合についても、エネルギー効率 η は、0.55±0.05 の範囲と判断される。配合 P(40)の値は 0.60 であるが、図－71 における実測値との関係を考えれば、（ ）中の 0.55 という値の方が実測値と適合している。骨材量変化配合の係数 β は、配合 U(40)、配合 M(40)及び配合 P(40)が基本配合よりも大きく、骨材量の減少が係数 β の増大に影響している可能性がある。一方、軽量骨材配合では、骨材の組合せによって係数 β がかなり異なり、同一水セメント比の基本配合 B(30)と比べ、配合 NL(30)、LN(30)は大きく、配合 LL(30)は反対に小さい。空気量を増加させた場合には、係数 β が 1.4 に増加しているが、図－71 に示すように 2 点の結果であり、標準空気量のものとあまり相違が見られないので、基本的には影響ないものと判断される。養生を変化させた場合にも、図－71 の計算反発度にややばらつきが見られるものの、実測反発度にすれば、そのばらつきは小さくなっており、養生の影響も小さいと思われる。ただし、個々の配合の検討では、データの個数及びその範囲が限定され、計算結果のばらつきに影響を及ぼしている可能性がある。

式(39)の曲線は、図－71 に示すとおり、計算反発度、測定反発度ともに試験データの分布の全体的な傾向に一致している。すなわち、静的圧入試験の結果は、テストハンマー試験を十分に反映するものであり、今回の試験結果の有効性を示すものと判断される。圧縮強度、反発度のデータを十分に確保し、係数 β、η を精度良く求めれば、式(39)は、低強度から高強度まで、広い範囲の圧縮強度と反発度の関係を表すことができるものである。ただし、条件を限定した基本配合での試験であっても、係数 β で $\pm0.1\times10^2$、係数 η で 0.55 ±0.05 のばらつきは生じており、圧縮強度の推定には限界があることを念頭に置く必要がある。

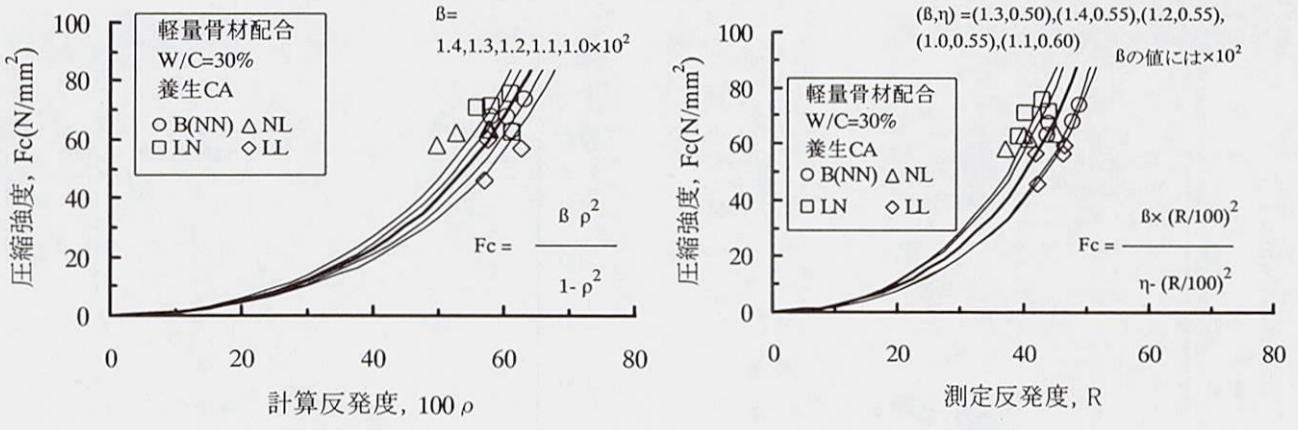
なお、参考として、供試体切断面の粗骨材部分の試験結果およびテストアンビルの値を想定したものを、図－71(3)に示した。このように広い範囲の圧縮強度で反発度との関係を考えれば、反発度の定義に則した曲線で回帰する必要があることが明白である。



(a)基本配合

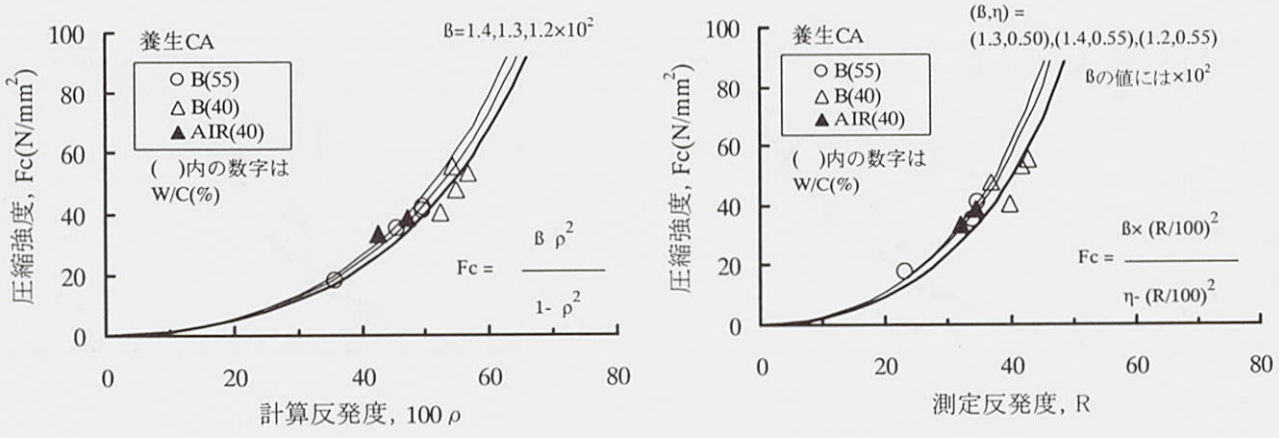


(b)骨材量変化配合

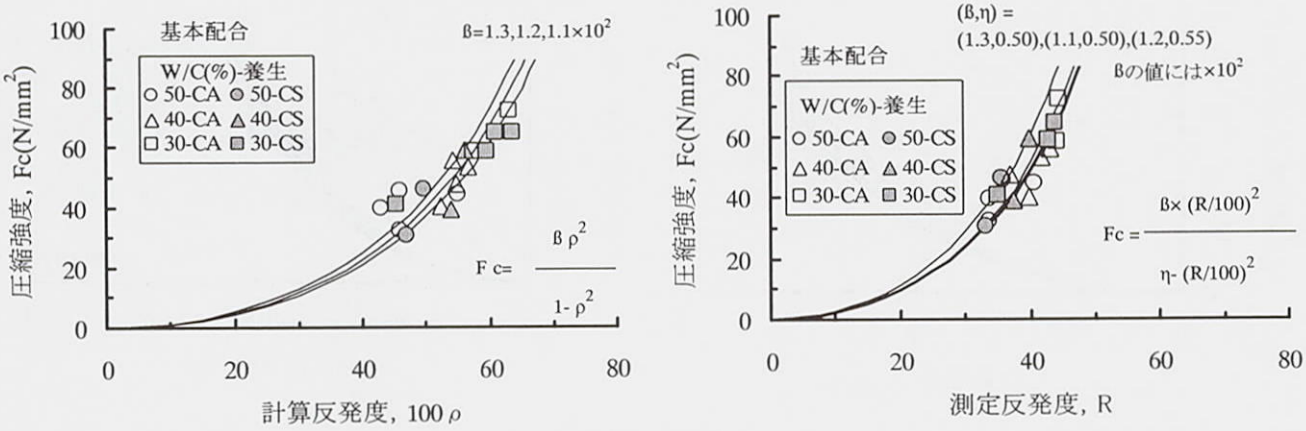


(c)軽量骨材配合

図－71(1)　計算反発度及び測定反発度と圧縮強度の関係

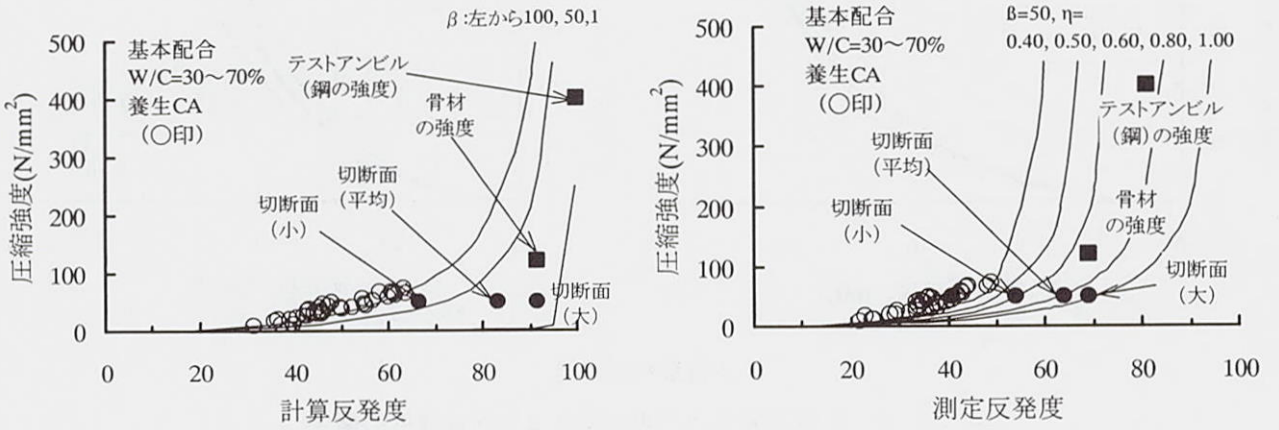


(d)空気量の影響



(e)養生の影響

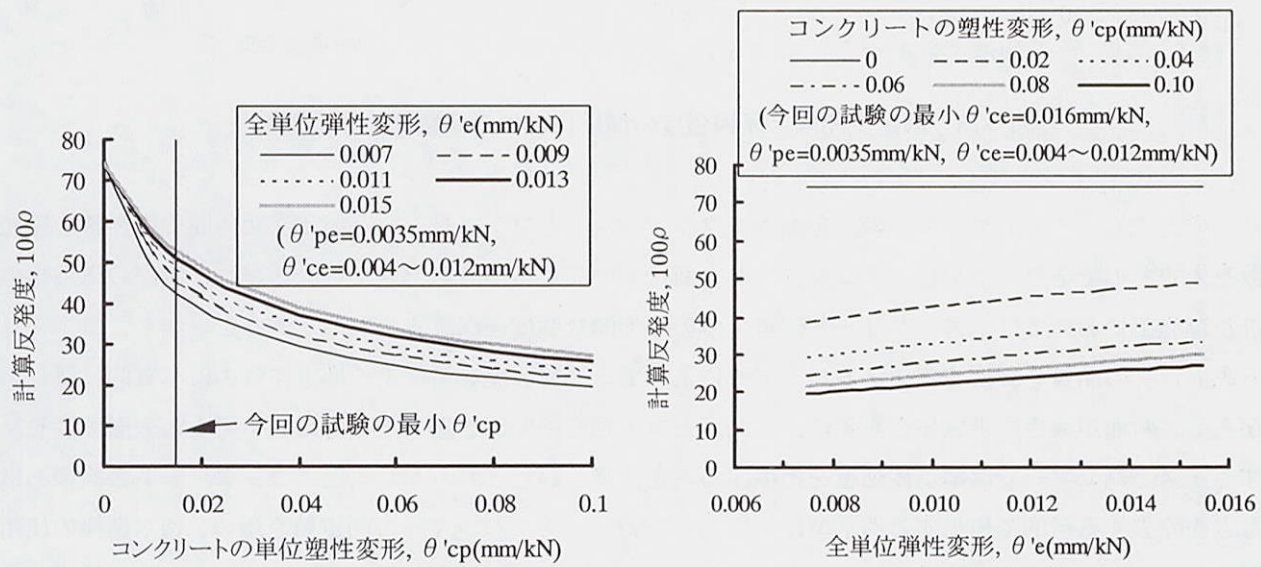
図－71(2)　計算反発度及び測定反発度と圧縮強度の関係



図－71(3)　計算反発度及び測定反発度と圧縮強度の関係

4.4.7 反発度と圧縮強度の関係における高強度域特有の問題

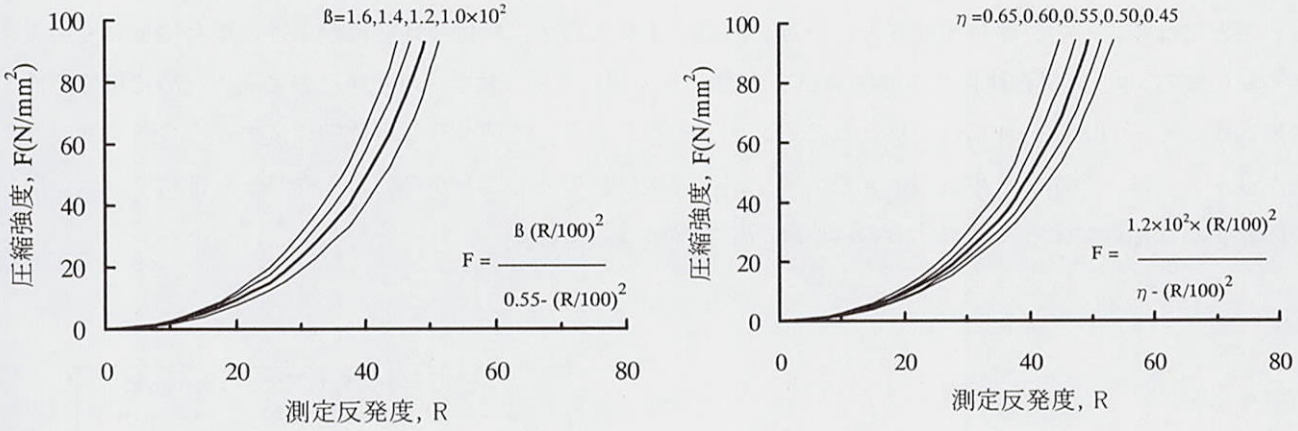
高強度域における反発度と圧縮強度のばらつきの問題は、まず、図－72 に示した単位弾性変形、単位塑性変形と反発度の関係から説明できる。図－72 は、静的圧入試験によって得られた単位弾性変形と単位塑性変形の範囲を考慮し、双方の値を変化させた場合の計算反発度を表したものである。反発度は、式(17)に示したとおり、単位弾性変形と単位塑性変形の式で表されるが、分母、分子の双方に単位弾性変形の項があるので、単位弾性変形が多少変化しても、反発度の値はあまり変化しない。よって、軽量骨材や骨材量を変化させたコンクリートにおいて、ヤング係数が変化しても塑性変形の変化がなければ、反発度には大きく影響しないことになる。一方、単位塑性変形は分母のみに含まれるので、単位塑性変形が小さい場合に反発度が大きく変化する。PC 部材に使用する高強度コンクリートの場合には、強度、硬度がともに高いために単位塑性変形は小さく、0.02mm/kN 前後の値になるものが多く存在した。このような単位塑性変形が小さな高強度コンクリートでは、わずかな単位塑性変形の変化が反発度に影響することから、コンクリート部材や試験の条件のわずかな相違によって変動するのは原理的に当然のことである。



図－72　コンクリートの単位塑性変形および単位弾性変形が計算反発度に及ぼす影響

図－73 は、測定反発度と圧縮強度の関係において、係数 β, η の影響度を表したものである。前述の塑性変形、弾性変形の問題は、結局、強度が高いほど（反発度が大きいほど）、図－73 に示した係数 β の相違によって大きく変化する結果を導くわけである。また、図－73 に示した係数 η に関しても、係数 β と同様に測定反発度と圧縮強度の関係に大きな影響を及ぼす値である。この図から判断すれば、係数 η の 0.05 は、係数 β の 0.2 程度に相当する。係数 η とはエネルギー効率であり、テストハンマー中の機械的な摩擦などに伴うものとされる。同一のテストハンマーを使用しているので、エネルギー効率に変化はないとするのが基本的な考え方であるが、使用回数に伴うばね能力（定数）の低下、機械的な摩擦の増加、供試体の凹凸等に伴う

打撃面での有効面積の変化などが考えられる。さらには、テストハンマーは、静的圧入試験とは異なり、コンクリートに衝撃力を加えるので、反発度（反発係数）が見かけ上の弾性変形のみならず、コンクリート中に弾性波の伝達・吸収されることにも影響される可能性がある。図－70においては、エネルギー効率が一定とならない結果を示したとおり、エネルギー効率についてもある程度の範囲を考慮する必要があり、特に高強度域にはその影響が大きいことに注意しなければならない。



図－73　測定反発度と圧縮強度の関係における係数β，ηの影響

結局のところ、テストハンマーの反発度は、プランジャーとコンクリートという２個体間の衝突時の反発係数を表すものであることから、コンクリート表面近くの品質しか評価できない。しかし、実際の構造物の設計及び施工においては、コンクリート部材全体の平均的な強度を保証するものであることから、コンクリート表面近くの品質を評価するテストハンマーによって、部材強度を精度よく推定するのは本質的に難しい面がある。断面が大きな供試体を対象に、反発度とコア強度の関係を調べた報告においても、表層強度を反映するテストハンマーでは構造体強度を把握することが難しいとされる[10]。また、コンクリート表面のあばたなどを除去する目的で使用する透水型枠の研究[29]では、テストハンマーの測定値を用い、透水型枠の使用がコンクリートの表面近くを緻密にする内容を報告しているが、透水型枠によって水セメント比が低下する範囲は表面から2cm程度であり、反発度の測定結果はコンクリート表面近くの品質変化を表していることになる。

5. まとめ

テストハンマーによる強度推定法のプレスレストコンクリートへの適用性を検討するため、工場製品を用いたテストハンマーによる強度推定精度の実態調査、高強度コンクリートを含む種々のコンクリートを用いた反発度への影響要因に関する試験並びに打撃時の弾塑性変形を考慮したテストハンマーの原理に関する試験を行った。

工場製品を用いた実態調査によって、以下のことがわかった。

(1)工場製品を用いて測定したテストハンマーの反発度 R と標準供試体の圧縮強度 Fc に対し、直線回帰を行った結果、次式を得ることができた。ただし、主に PC 製品を対象としていることから、圧縮強度の平均値は 53.4N/mm^2 で、50～70N/mm^2 のデータが他の範囲よりも多い。

$$Fc = -35 + 2.06R \quad (相関係数:r=0.775)$$

(2)日本材料学会式と一致するデータは少なく、高強度域ほど任意の反発度に対する圧縮強度とそのばらつきが大きくなる傾向がある。

次いで、反発度の影響要因に関する試験によって、以下の結果を得ることができた。

(1)養生の相違が反発度と圧縮強度の関係に及ぼす影響は小さい。

(2)3 養生（標準水中養生、3 日湿潤以降気中養生、蒸気養生後気中養生）を施した基本配合(水セメント比 30～70%)のコンクリートの反発度 R と圧縮強度 Fc を用いて直線回帰を行った。使用したコンクリートの圧縮強度は 9.7～81.6N/mm^2 であるが、データ数の調整を行わない場合には 40～50N/mm^2 のデータ数が最も多く、ほぼ正規分布となる。得られた回帰式は、以下のとおりである。今回の試験では、基本配合の回帰式はデータの偏りの影響はほとんどないと判断される。

a)データ数の調整を行わない場合（データ数 66）：

$$Fc = -43.7 + 2.35R \quad (相関係数:r=0.944)$$

b)圧縮強度 10N/mm^2 毎に使用するデータ数を一致させた場合（データ数 28）：

$$Fc = -45.0 + 2.41R \quad (相関係数:r=0.958)$$

(3)反発度と圧縮強度の一次回帰式の傾き及び切片は、圧縮強度 30N/mm^2 までのデータを使用した場合には、日本材料学会式とほぼ一致する。しかし、回帰に含める圧縮強度の最大値を広げるに従って、回帰式の傾きは増加し、切片は減少する傾向がある。すなわち、反発度と圧縮強度の関係を低強度域から高強度域ま

で総括的に表そうとした場合、直線回帰には限界があり、テストハンマーの原理を考慮した曲線回帰が必要である。強度推定式は、回帰に用いた元データの圧縮強度域を明確にした上で、その範囲を超える圧縮強度の推定には同一の回帰式を用いないことが重要である。

(4)材齢の影響は一定の傾向を示さず、一般に用いられる材齢補正係数とは一致しない。これは、材齢自体の問題よりも材齢によって圧縮強度の範囲に偏りを生じること、並びに前述のように反発度と圧縮強度の関係が曲線的に変化することに起因するところが大きいものと判断される。

(5)今回の試験では、限定された配合条件であっても、任意の反発度に対応する圧縮強度は$\pm 10 N/mm^2$程度の範囲を持つことから、その精度を理解した上でテストハンマーを使用することが望ましい。

(6)骨材量を大幅に変化させた配合や軽量骨材を使用した配合であっても、反発度と圧縮強度の関係は大きく変化しない。

(7)空気量を増加させた場合には、圧縮強度とともに反発度も低下し、得られた反発度は水セメント比を大きくし、同程度の圧縮強度としたコンクリートの反発度と大きく異ならない。すなわち、コンクリート全体のが、水セメント比、空気量のいずれによって低下しても、圧縮強度と反発度の関係には影響しない。

(8)供試体表面の含水率は、低強度域では反発度に影響を及ぼすが、PC 部材で対象とする水セメント比 40%以下の高強度域ではその影響は小さい。しかし、反発度と圧縮強度の関係式を得ようとする場合には、低強度域のコンクリートも必要になることから、供試体の湿潤状態にも注意した方が良い。

(9)打撃方向に直角な圧縮応力を受けた場合の影響は、これまでの見解よりも小さく、PC 部材においても圧縮応力の影響をほとんど加味する必要はない。

(10)試験の範囲では、型枠の種類、供試体の寸法、測点数が反発度に及ぼす影響は小さい。

(11)同一箇所を連続打撃した場合の反発度は、打撃 3 回程度まで急増し、その後は一定もしくは緩やかな増加となる。また、10 回打撃を行った反発度は、日本材料学会式で得られる計算値に近い値になるものの、配合の影響は全く見られず、ほぼ一定の値となり、得られた反発度は強度推定の意味をなさない。

(12)高強度軽量コンクリートに対しては、テストハンマーの形式による相違(N 型,L 型)は明確でない。

(13)反発度は、圧縮強度、ヤング係数と同様に材齢に伴って大きくなるが、材齢 28 日を基準とした発現率で評価した場合、反発度は圧縮強度及びヤング係数とは必ずしも一致しない。すなわち、反発度は圧縮強度及びヤング係数自体を表すものではない。

テストハンマーの原理に関する試験によって、以下のことが明らかになった。

(1)テストハンマーの原理を明らかにすることにより、コンクリートとプランジャーの単位弾性変形θ'_e、コンクリートの単位塑性変形θ'_{cp}およびエネルギー効率ηで表される反発度ρの式を導いた。また、ブリネル硬度H_Bは、反発度の 2 乗を含む式で表されることから、ブリネル硬度と反発度は一次の関係にないことを明らかにした。なお、式中の反発度は、テストハンマーで測定される値の 1/100 である。

$$\rho = \sqrt{\eta \frac{\theta' e}{\theta' e + \theta' cp}}$$

$$H_B = \frac{\rho^2}{2\pi r \theta' e(\eta - \rho^2)}$$

(2)ブリネル硬度を初めとする硬度（硬さ）は、圧縮強度などのように実態が明らかになったものではない。ブリネル硬度と圧縮強度の関係には理論的な裏付けはなく、コンクリートの分野では便宜的に圧縮強度を指標としているが、金属、セラミックスの分野では引張強度やヤング係数との関係で表している場合もある。また、弾塑性力学分野では、弾性域での球圧子によって作用する応力は、ヤング係数及びポアソン比の関係で表されるが、塑性領域では明確な関係式は存在せず、実験によって降伏応力に比例することを導き出している。その応力は、接触半径及び鉛直方向の距離の2乗と反比例することから、ブリネル硬度に関しても、供試体の極表面近くでの物性に影響される可能性があることがわかった。

(3)先端に曲率を有するプランジャーを用いて静的圧入試験を行った場合の荷重－変位の関係は曲線的な変化を示し、最大変位から除荷までの変位を弾性変形、最大変位と弾性変形の差を塑性変形と理解することができる。

(4)静的圧入試験におけるコンクリートの単位弾性変形は、全弾性変形の約 66%（全配合の平均）を占める。ただし、モルタル、ペースト及び軽量骨材を使用したコンクリートでは全平均よりもやや大きな値となる。

(5)コンクリートの単位塑性変形は静的圧入試験時の最大荷重の影響をあまり受けない。しかし、Schmidt の仮定において一定値としたコンクリートの単位弾性変形には荷重依存性が認められた。試験で得られたコンクリートの単位弾性変形の変化は、荷重の増加に伴って弾性変形が小さくなる Hertz の接触理論式と一致する。ただし、基本配合では、Hertz の接触理論の計算値とはヤング係数の大小関係が一致せず、ヤング係数が大きいほど、単位弾性変形が大きくなる結果になった。

(6)コンクリートの単位塑性変形は、圧縮強度の増加に伴って急激に減少する。高強度域を中心とした今回の試験では、骨材量変化配合及び軽量骨材配合における単位塑性変形には顕著な相違は見られない。コンクリートの単位塑性変形の逆数 $1/\theta'cp$ は、概ね圧縮強度 Fc と次式のように比例関係にあることがわかった。コンクリートの単位塑性変形の逆数 $1/\theta'cp$ を $2\pi r$(r はプランジャー先端の曲率半径である)で除したものがブリネル硬度であることから、ブリネル硬度と圧縮強度が比例関係にあるとしたテストハンマーの原理における仮定の成立を意味する。

$$\frac{1}{\theta' cp} = cFc$$

係数 c は、基本配合では 0.8 程度、モルタル、ペースト及び軽量骨材を使用したコンクリートではそれよりもやや小さくなる傾向があるが、基本配合であっても±0.2 程度のばらつきを生じており、硬度と圧縮強度の関係に理論的な裏付けがない状況下では、圧縮強度の推定精度の問題を回避することが難しい。な

お、配合の種類ごとに圧縮強度とヤング係数の関係が成立することから、コンクリートの単位塑性変形は、圧縮強度、ヤング係数のいずれを用いて関係を導き出しても良いものと判断される。

(7)コンクリートの単位弾性変形は、単位塑性変形に比べて小さく、単位塑性変形の 1/10 程度の値である。コンクリートの単位弾性変形は、ヤング係数（または圧縮強度）の増加に伴い、基本配合では若干増加する傾向が、骨材量変化配合及び軽量骨材配合では減少する傾向がある。しかし、基本配合の結果は、前述の荷重依存性に関する検討においても確認されたとおり、一般的な見解や Hertz の接触理論による計算値とは矛盾するものである。

(8)コンクリートの単位弾性変形の逆数と Hertz の接触理論を用いて計算した単位弾性変形の逆数の差が、コンクリートの圧縮強度とほぼ直線関係であることがわかった。すなわち、基本配合においてコンクリートの単位弾性変形がヤング係数の増加に伴って増加する結果は、低強度域における塑性変形に起因するものと推測された。コンクリートの単位弾性変形の逆数 $1/\theta'ce$ は、次式のとおり、圧縮強度 $Fc(N/mm^2)$、圧縮強度とヤング係数の関係から得られる係数 a,b で表すことができる。なお、コンクリートの単位弾性変形は単位塑性変形に比べて小さく、ヤング係数や圧縮強度の変化に伴う変化量も小さいので、ペーストや軽量骨材配合などの特殊な場合を除き、一定であるとしても支障がない。

$$\frac{1}{\theta' ce} = 3.26aF_C{}^b - 1.20Fc + 115$$

(9)反発度 ρ（一般的な反発度の 1/100 の値）は、圧縮強度 $Fc(N/mm^2)$とヤング係数(kN/mm^2)の関係から得られた係数 a,b、コンクリートの単位塑性変形の逆数と圧縮強度の関係から得られる係数 c 及びエネルギー損失を表す係数 η によって、次式のように表される。

$$\rho = \sqrt{\eta \frac{cF_C(aF_C{}^b - 0.368F_C + 123)}{acF_C{}^{b+1} + 286aF_C{}^b - 0.368cF_C{}^2 + (123c - 105)F_C + 1.01\times10^4}}$$

(10)圧縮強度 $Fc(N/mm^2)$と反発度 ρ（テストハンマーで測定される値の 1/100）の関係は、弾性変形に関する係数 β とエネルギー損失に関する係数 η を用いて次式のように表される。圧縮強度と反発度の試験データを用い、最小二乗法によって係数 β、η の値を得ることができる。

$$Fc = \frac{\beta\rho^2}{\eta - \rho^2}$$

エネルギー効率 η は材齢の変化による若干増加や各配合でのばらつきがあるものの、0.55 程度の値になった。係数 β は、基本配合で 1.2×10^2、骨材量変化配合で $1.1\sim1.5\times10^2$、軽量骨材配合で $1.0\sim1.4\times10^2$ と

いう値が得られた。静的圧入試験によって得られた計算式を用い、係数β、ηを適切に与えれば、静的圧入試験による計算反発度及びテストハンマー試験による測定反発度と圧縮強度の関係をいずれも明確に表現することができる。すなわち、実施した静的圧入試験はテストハンマーの原理を検証し得るものであると判断される。ただし、反発度から圧縮強度の推定を行う場合には、基本配合のように限定した配合条件であっても、係数βは$1.2\pm0.1\times10^2$、ηは0.55 ± 0.05のばらつきがあることを念頭に置く必要がある。

(11)反発度と単位弾塑性変形の関係式から明らかなように、単位弾性変形は分子、分母の双方に存在しており、また、単位弾性変形は単位塑性変形に比べて小さいことから、反発度には単位弾性変形よりも単位塑性変形の影響が大きい。高強度域では単位塑性変形の変化に対する反発度の変化が大きく、単位塑性変形も極めて小さいことから、コンクリート表面のわずかな状態の相違が反発度の値に影響を及ぼす可能性がある。さらに、本試験で提案した反発度と圧縮強度の関係式で検討した場合、係数β、ηのわずかな変化は、高強度域ほど計算される圧縮強度に影響することがわかった。以上のことより、反発度による圧縮強度の推定を高強度コンクリートに対して適用する場合には、本質的にばらつきを生じやすいことに注意する必要がある。

謝辞

工場調査では、ご多忙の中、PC 建協会員会社の皆様の多大な協力を賜りました。また、PC 建協専務理事安井常二氏、同技術次長以後有希夫氏には、本業務を進めるにあたり、会員会社への協力依頼などにご便宜を図っていただきました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 例えば，国土交通省道路局国道課ほか：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究－コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査－，土木研究所資料，第 3811 号，2001.3.
2) 日本材料試験協会：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.427-430, 1958.8.（土木学会：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.85-90,1974.9.への転載内容を参考）
3) 建設省土木研究所：コンクリートの検査方法に関する試験調査報告書(Ⅱ)－テストハンマーの検査への適用についての検討－，土木研究所資料第 818 号，1973.3.
4) 土木学会：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.
5) 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.
6) 古賀裕久，河野広隆：テストハンマーによるコンクリート強度の推定調査について，コンクリート工学，Vol.40, No.2, pp.3-7, 2002.2.
7) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会:プレストレストコンクリート，第 29 報，2002 年版，2002.10.
8) 日本道路公団試験研究所橋梁研究室：打設コンクリートの品質等の調査結果報告書（その 8）－昭和 54

～平成3年度しゅん功工事のコンクリートー，試験研究所技術資料，第419号，1996.8.
9) 谷川恭雄，山田和夫：複合非破壊試験によるコンクリートの強度推定，セメント・コンクリート，No.393, pp10-17, 1979.11.
10)舟川勲，谷口秀明，牛島栄：高流動コンクリートのテストハンマーによる強度推定に関する研究，セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.322-327, 1997.
11)沢田守雄，兼子政志，沢田兼二：シュミットハンマーの単打および連打によるコンクリートの強度判定について，プレストレストコンクリート，Vol0.18, No.3, pp.22-28, 1976.6.
12)松下博通，徳光善治，溜淵誠一：シュミットハンマーによるコンクリートの強度推定，セメント技術年報，Vol.33, pp.253-256, 1979.
13)添田政司，徳光卓，濱尚史，大和竹史：テストハンマーによる高強度・高流動コンクリートの強度推定に関する実験的研究，Cement Science and Concrete Technology, No.55, pp.245-249, 2001.
14)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,ＸⅠ, pp.395-401, 1955.
15)明石外世樹：コンクリートの非破壊試験（Ⅰ），材料, Vol.28, No.313, pp.919-927, 1979.10.
16)（社）日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，1994.12.
17)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02[基礎編]，2002.1.
18)Gaede K. , Schmidt E. : 厚い構造を有するコンクリートの反発試験（訳文），コンクリートの非破壊試験法，柏忠二編，技報堂，1981.
19)吉田徳次郎：コンクリート及び鉄筋コンクリート施工方法，丸善，1954.
20)伴潔，木村恵雄：打撃硬度試験によるコンクリート強度の判定，セメント技術年報，Vol.9, pp.401-407, 1955.
21)岡田清，六車熙編：改訂新版コンクリートハンドブック，朝倉書店，1991.
22)産業技術センター編集委員会編：セラミックス材料技術集成，1979.4.
23)(社)日本材料試験協会：材料試験便覧，丸善，1957.
24)杉田忠彰：セラミックスの機械加工，養賢堂，1985.
25)(社)土質工学会：入門シリーズ9，土質工学数式入門，1984.
26)寺澤正男：硬さのおはなし，日本規格協会，1981.
27)日本金属学会：改訂3版金属便覧，丸善，1971.
28)(社)日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'02, 2002.9.
29)菅原隆，佐伯昇，庄谷征美：透水・吸水性シートを用いたコンクリートの表層強度特性について，セメント・コンクリート論文集，Vol.45, pp.672-677, 1991.