

針貫入試験によるコンクリート構造物の劣化診断に関する研究

三浦尚¹・岩城一郎²・板橋洋房³

¹フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工修 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

³正会員 工学士 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

本研究は、コンクリート構造物から採取した比較的径の小さいコア側面に鋼製の針を貫入し、針に作用する荷重と貫入量との関係から、劣化したコンクリートの圧縮強度や強度分布の推定を試みるものである。針に作用する荷重と貫入量との間には良好な相関が認められ、これらのデータに統計処理を加えることにより、コンクリートの圧縮強度を推定する指標として十分適用可能であることが明らかになった。また、凍結融解作用を受けた供試体からコアを採取し、針貫入試験を行うことにより、強度分布の推定も可能であることが確認された。さらに、本試験方法に適した針形状の選定を行うと共に、針貫入試験装置の全自動化を試みた。以上の検討結果から、針貫入試験によるコンクリート構造物の劣化診断は十分に可能であるとの結論に達した。

Key Words: needle penetration test, deterioration, compressive strength, strength distribution, B value, regression, correlation

1. はじめに

コンクリートは、厳しい環境にさらされると様々な要因により劣化し、品質が次第に低下していくことが知られている。また、施工上の問題により、供用直後から所定の性能が得られないコンクリート構造物が建設される例もないとは言えないのが実状である。これらのコンクリート構造物の危険を未然に察知し、適切な補修補強を行って、構造物を長くかつ経済的に使用していくためには、構造物の品質を迅速かつ的確に診断し、要求される性能を満足しているかどうか検討を行う必要がある。コンクリートに要求される性能のうち、強度について検討を行う場合、圧縮強度により評価することが多い。その場合、構造物に損傷を与えることなくコンクリートの圧縮強度を正確に測定することは困難であり、コンクリート構造物から比較的径の大きなコアを採取し、それらの圧縮強度を測定している場合が一般的である。このような方法によりコンクリートの圧縮強度を測定することは、採取場所の選定が難しいこと、コアを採取するのに経費がかかること、構造物を部分的に損傷させることなどの問題があり¹⁾、最善の策とはいえない。そのため、長年にわたりコンクリート強度を推定するための様々な非破壊検査方法が提

案されてきた。このうち構造物に損傷を与えない純非破壊検査方法として、シュミットハンマー法をはじめとする打撃法、超音波を用いた振動法等が挙げられる²⁾。一方、構造物に部分破壊を生じさせる広義の非破壊検査として、引抜き法、ブレイクオフ法、プルオフ法、貫入抵抗法などが挙げられる³⁾。しかし、これらの検査方法による強度推定の信頼性は、必ずしも満足いくものではなく、理論的な裏付けも十分でないことが指摘されている⁴⁾。さらには、これらの非破壊試験のほとんどはコンクリート表面近くの強度を推定するためのものであり、コンクリート内部の強度を推定するための検査方法については未だ十分に確立されていないのが実状である。そこで、非破壊もしくは非破壊に近い形で、精度良くコンクリート内部まで強度推定が可能となる検査方法の確立が望まれている。

寒冷地に建設されたコンクリート構造物は、凍結融解作用を受けて劣化し、コンクリート強度が次第に低下していく恐れがあることが知られている。このような凍害によるコンクリートの劣化は構造物の表面部付近でより顕著に現れると考えられるため、強度の低下は構造物表面から内部に向かって徐々に進行していくと推察される。また、凍害による劣化の程度は近年問題となっている融雪剤の影響により、

助長する危険性が指摘されている²⁾。このような劣化形態によるコンクリートの強度低下を評価するためには、凍害が内部にどれくらい進行しているか、構造物表面からの強度分布を推定し、劣化域つまり凍害深さを把握することが必要であると思われる。図-1に凍害を受けたコンクリート構造物の強度低下の概念図を示す。このようなコンクリート構造物に対して、前述のようにコアを採取して圧縮強度を測定するだけでは、強度分布を推定するには至らず、また、強度分布を推定するに十分なコアを採取しようとするれば、構造物に与える損傷の度合いが激しくなることは明らかである。近年、構造物の超音波伝播速度や細孔径分布を測定し、その変化点から凍害深さを推定する研究が行われている³⁾⁴⁾が、この方法では強度に関する情報が得られないため、構造物の残留耐力を評価したり、具体的な対策を講じるための劣化診断法として十分であるとは言いがたい。以上の背景から、本研究ではコンクリート構造物に与える損傷の度合いをできるだけ抑えて、精度良くコンクリート構造物内部の圧縮強度や強度分布の推定を可能とする試験方法を考案することを目的とした。

本研究で提案する針貫入試験は、コンクリート構造物から採取した比較的径の小さいコア側面に鋼製の針を貫入し、針に作用する荷重と貫入量との関係から、劣化したコンクリートの圧縮強度や強度分布の推定を試みるものである。

骨材の強度がペースト部の強度と比較して高い場合、コンクリートの強度はモルタル部の強度に依存すると考えられる。モルタル強度が高ければ、モルタルに針を貫入させた時の局所的な破壊耐力も大きくなるため、コンクリート中のモルタル部に針を貫入させたときの針に作用する荷重と貫入量の関係が得られれば、コンクリートの強度推定が可能になると思われる。予備試験の結果⁵⁾、モルタル部に針を貫入させた時の針に作用する荷重と貫入量の関係からコンクリートの圧縮強度を推定することが可能であるとの見通しが得られたため、本研究によりさらに詳細な検討を行うこととした。

既往の研究⁵⁾で用いた針貫入試験装置は電動一軸圧縮試験機を改良したものであり、データの精度や作業の効率性に課題を残す結果となった。そこで本研究では、新たに針貫入試験装置を開発し、得られたデータに適切な統計処理を加えることにより、より精度の高いコンクリートの圧縮強度及び強度分布の推定方法について検討することとした。また、本試験方法に適した針形状の選定を行うと共に、針貫入試験装置の全自動化も試みた。

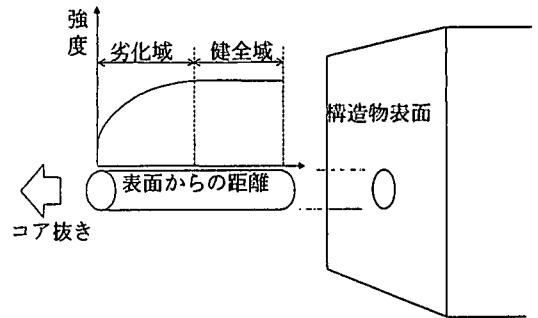


図-1 凍害を受けたコンクリート構造物の強度低下の概念図

尚、本試験は、コンクリートの強度がペースト部の強度に依存する場合、つまり骨材の強度がペースト部の強度と比較して高い場合、十分適用可能であると判断される。つまり、コンクリートの強度が配合や養生条件等の違いによるペースト部の強度に依存する場合や、凍結融解作用を受けたコンクリートのように、ペースト部の組織の弛緩による劣化が原因となって強度低下を引き起こす場合、本試験方法により十分な精度でコンクリート強度の推定が可能となる。一方、骨材の強度がペースト部の強度より低い場合には、粗骨材部も含めて針貫入試験を行うことにより、その影響を考慮することは可能であるが、強度推定の精度の面で今後更に改善する余地がある。さらに、ペースト部は健全であるがマクロなひび割れが原因となって、耐力が低下する場合などでは、本試験方法の適用は難しいと判断される。

2. 実験概要

本研究は、以下の4つの検討課題に大別される。(1)針貫入試験による圧縮強度の推定、(2)針貫入試験による強度分布の推定、(3)本試験方法に適した針形状の選定、(4)全自動化した針貫入試験装置による強度の推定である。以下に各検討課題に対する実験概要を述べる。

(1) 針貫入試験による圧縮強度の推定

a) 針貫入試験装置

針貫入試験装置は本研究のために新たに開発されたものであり、現場に搬入して構造物の劣化診断が可能となるよう、軽量でコンパクトなものになっている。試験機本体の寸法は、W250×H400×D200(mm)で、質量は約9kgである。針はコンクリートピンテスター用の針を使用した。針貫入試験装置を図-2及び写真-1に示す。

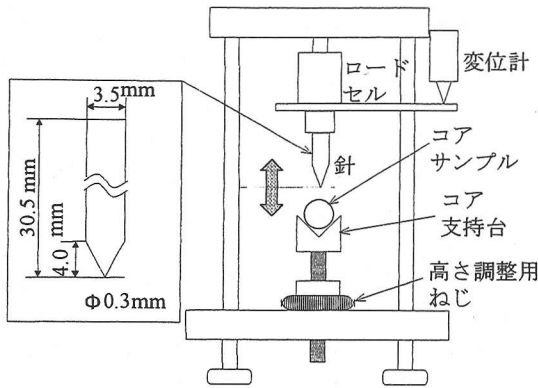


図-2 針貫入試験装置の概念図

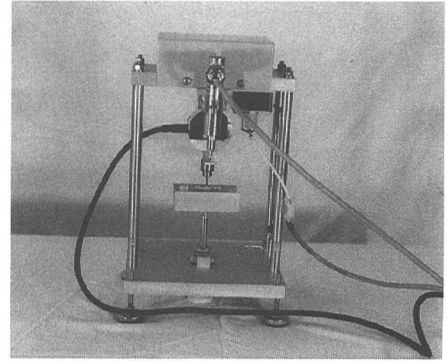


写真-1 針貫入試験装置

表-1 配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					備考※
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 A (g/m ³)	
25	70	43	179	256	782	1170	0	(1)
25	68	43	179	263	779	1166	0	(1)
25	65	43	179	275	776	1160	0	(1),(3)-1,(3)-2
25	60	42	179	298	750	1166	0	(1)
25	58	42	181	312	743	1156	0	(1)
25	55	41	181	329	720	1166	0	(1),(3)-1,(3)-2
25	53	41	181	342	716	1160	0	(1)
25	50	40	183	366	689	1164	0	(1)
25	48	42	168	350	744	1159	2100	(1)
25	45	42	168	373	736	1146	2238	(1),(3)-1,(3)-2
25	43	42	168	391	731	1136	2346	(1)
25	40	42	170	425	717	1115	2550	(1)
25	37	39	175	473	646	1139	2838	(1)
25	35	38	175	500	620	1140	3000	(1), (3)-1
25	56	40	180	321	706	1194	803	(2), (4)
25	75	45	179	239	824	1138	0	(3)-1
25	25	37	175	700	545	1045	7700	(3)-1
25	100	50	179	179	948	1127	0	(3)-2
25	90	48	179	199	903	1097	0	(3)-2
25	80	46	179	224	856	1064	0	(3)-2

※備考欄に示す数字はその配合を使用した実験項目を示す。

b) 使用材料及び配合

セメントは早強ポルトランドセメント（比重3.13），細骨材は宮城県大和町産の山砂（比重2.53，粗粒率2.71），粗骨材は宮城県丸森産碎石（最大寸法25mm，比重2.86，粗粒率6.92）を使用した。減水剤は，ナフタリンスルホン酸塩を主成分とするものを使用した。表-1(1)に本実験に使用したコンクリート（Non-AE）の配合を示す。これらの配合は，針貫入試験によるコンクリート圧縮強度の推定精度を検討するために

選定されたものであり，幅広い圧縮強度が得られるよう合計14種類の水セメント比からなる。

c) 実験方法

各配合に対して，φ10×20cmの円柱供試体を7本製作し，うち2本を強度推定のためのコア採取用，残りの5本を圧縮強度測定用供試体とした。養生方法は標準水中養生とし，材齢28日において直径2cmのコアを2本の円柱供試体からそれぞれ3本ずつ，計6本採取した。コアサンプリングの概念図を図-3に示す。

針の貫入箇所は、コア側面のモルタル部に限定した。その理由は、粗骨材自体が良質で、打設したコンクリートに材料分離等の悪影響がなければ、コンクリート強度はモルタル部の強度に依存すると考えられること、凍結融解作用を受けた場合にも、粗骨材自体が耐久的であればコンクリート強度の低下はモルタル部の強度低下に支配されると考えられるためである。ただし、比較的大きな細骨材に針を直接貫入させた場合や粗骨材の界面近傍に針を貫入させた場合、針に作用する荷重と貫入量の関係が他のデータと異なる傾向を示す可能性がある。そこで、得られたデータに対して統計処理を行い、不適切なデータや特異なデータについては検討の対象から外すこととした。こうして1本のコアに対して20箇所程度針を貫入し、合計80点の針に作用する荷重と貫入量の関係が得られるまで試験を行った。針の貫入速度は3mm/minとし、針に作用する荷重と貫入量は、それぞれロードセルと変位計により0.1秒間隔毎に測定される。得られたデータはデータロガーを介してパソコンに転送され、統計処理が行われる。尚、針に作用する荷重の上限は、98Nに設定した。その理由は、様々な強度の供試体で針貫入試験を行った結果、荷重の上限レベルが98Nであれば、この間の荷重と貫入量の関係から十分な精度で回帰直線が得られること、また、これ以上荷重を上げると、強度の低いコンクリートから採取したコアでは針貫入周辺部でモルタルが損傷し、隣接する測定点に影響を及ぼすことが明らかになったためである。

(2) 針貫入試験による強度分布の推定

使用材料は、2. (1) b)に示したものと同一である。水セメント比56%のNon-AEコンクリート(表-1(2)参照)を、20×20×20cmの立方体型枠に打設し、標準水中養生後、材齢14日よりASTM C666 A法で規定されている試験装置を用いて凍結融解試験を行った。ここで、供試体の形状を通常の10×10×40cmよりマッシュなものとした理由は、コアを採取する供試体表面以外からの凍害による影響をできるだけ避けるためである。供試体は、ゴムスリーブの代わりに板厚の十分に薄い亜鉛鉄板で加工した容器(W230×H350×D230mm)に入れて、供試体と容器との間を水で満たし、凍結融解サイクルを与えた。供試体は2本作製し、凍結融解サイクルが120サイクル及び180サイクルに達した時点で1本ずつ取り出し、供試体中央部付近より直径2cmのコアを3本採取した。各サイクルにおける供試体の質量損失率はそれぞれ2.5%、3.5%であった。そして、供試体表面から2.5mm間隔ごとに3本のコアからそれぞれ10-15点程度、合計40

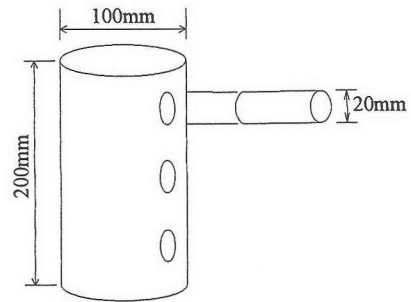


図-3 コアサンプリングの概念図 (1)

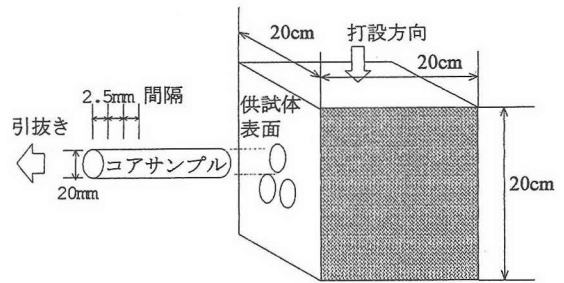


図-4 コアサンプリングの概念図 (2)

点の荷重と貫入量の関係が得られるまで針貫入試験を行った。なお、同じ配合により凍結融解サイクルを与えない場合(0サイクル)についても同様の方法により針貫入試験を行い、凍結融解サイクルを与えた場合との強度分布の比較を行った。本実験で使用した供試体形状とコアサンプリングの概念図を図-4に示す。

(3) 本試験方法に適した針形状の選定

本実験に使用した配合は、(1)の実験で使用した水セメント比35%、45%、55%、65%の配合に水セメント比25%及び75%の配合を加えた計6種類である(表-1(3)-1参照)。実験は、上記の配合から粗骨材を取り除いたモルタル供試体により行うこととした。その理由は、本実験の目的である針形状の違いが強度の推定精度に及ぼす影響を調べるのであれば、ばらつきが少なく、簡便なモルタル供試体により実験を行っても問題ないと判断されたためである。供試体は、各配合に対してコア採取用に10×10×40cmの角柱供試体1本、圧縮強度測定用にφ5×10cmの円柱供試体を3本作製した。そして、標準水中養生後、材齢28日で角柱供試体の打設側面より直径2cmのコアを5本採取した。針貫入試験は、形状の異なる5種類の針を用いて、1種類の針につき各配合で合計40点の荷重と貫入量の関係が得られるまで行った。

さらに、以上の実験結果より、本試験方法に最適であると判断された針に対して、コンクリート圧縮強度の推定精度を確認することとした。配合は、(1)の実験で使用した水セメント比45%、55%、65%の配合に、水セメント比80%、90%、100%の低強度コンクリートを加えた計6種類である(表-1(3)-2参照)。これらの配合に対してφ10×20cmの円柱供試体をコア採取用に1本、圧縮強度測定用に3本、計4本作製した。コアの採取は、標準水中養生後、材齢28日において図-3と同様の方法により行った。そして、各配合で合計40点の荷重と貫入量の関係が得られるまで針貫入試験を行い、得られた指標と圧縮強度との関係を調べた。

(4) 全自動化した針貫入試験装置による強度の推定

これまでに述べた針貫入試験方法では、針の貫入箇所をモルタル部に限定しているため、目視により人為的にモルタル部を探す必要が生じた。しかし、この作業は試験者にとって骨の折れる作業であるとともに針貫入試験の合理化を妨げるものである。そこで本実験では目視によりモルタル部を探すという作業を省略し、代わって針貫入試験開始から終了までの一連の作業を全自動化できるように試験装置の改良を試みた。具体的には、針を一カ所貫入させる度にコアを機械的に軸方向と回転方向に移動させて、コアの側面を螺旋状に針を貫入させていくというものである。このように針貫入試験装置が全自動化されれば、作業性が著しく向上し、試験時間の大幅な短縮が可能となる。一方で、得られたデータ中には粗骨材部に針を貫入させたデータも含まれるため、針貫入箇所をモルタル部に限定した場合と比べデータのばらつきが大きくなることも確かである。しかし、粗骨材部に針を貫入させた場合の針に作用する荷重と貫入量との関係は、一般的なモルタル部のそれとは明らかに異なる性質を示すため、適切な統計処理を用いれば粗骨材部に貫入したデータを自動的に削除することは可能であると考えられる。本実験に使用した配合は、(2)の実験で使用した水セメント比56%の配合と同じである(表-1(4)参照)。供試体はφ10×20cmの円柱供試体であり、コアの採取方法は図-3と同様である。全自動化した針貫入試験装置により2mmピッチで合計80点の針に作用する荷重と貫入量との関係を測定し、統計処理を用いて粗骨材部に貫入したと思われるデータを削除し、残ったデータから圧縮強度の推定精度について検討を行った。

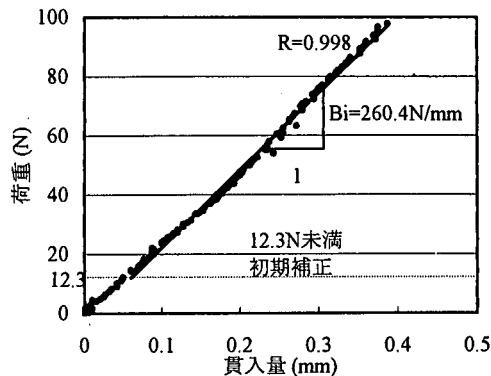


図-5 針に作用する荷重と貫入量との関係

3. 結果及び考察

(1) 針貫入試験による圧縮強度の推定

図-5に針に作用する荷重と貫入量を測定した結果の一例を示す。図より荷重と貫入量との関係は、ほぼ比例関係にあり、線形回帰が適用できると判断される⁹⁾。しかしながら、針に作用する荷重が小さいレベル、すなわち貫入初期の段階では、データが多少ばらつき、回帰分析の精度が低下する場合が生じた。この理由は、コアドリルによるサンプリング時にコア表面が荒らされたため等によると推察される。しかし、このような貫入初期のデータのばらつきは、荷重があるレベルに達するとほぼ解消されることが確認された。本研究では、その値を12.3N(ロードセルで測定される電圧レベルで0.15mV)であると判断し、12.3N未満のデータは初期補正として削除し、それ以上のデータのみを線形回帰することとした。そして、その時に得られる荷重を貫入量で除した値、すなわち図中の回帰直線の傾きを B_i とし、 i 番目の貫入箇所($i=1,2,\dots,n$)において得られる針に作用する荷重と貫入量との関係を表す指標として用いることとした。

$$P = B_i \delta + A_i \quad (1)$$

ここで、

P : 針に作用する荷重(N)

δ : 針の貫入量(mm)

A_i : 線形回帰式のY軸との切片(N)

B_i : 線形回帰式の傾き(N/mm)

以上の手順に従って、図-5に示す荷重と貫入量との関係を線形回帰した結果、 B_i は260.4N/mmであり、相関係数は0.998と非常に高い値を示すことが確認された。しかし、モルタル直下の空隙部に針を貫入さ

せてしまった場合には、針の貫入途中で荷重が除荷され、貫入量だけが増加するといった傾向が認められた。このように、適切な箇所に針が貫入していない場合、荷重と貫入量の関係は明らかに低い相関を示した。そこで本実験では、相関係数0.95未満のデータは、適切な箇所に針を貫入していない場合と判断し、検討の対象から外し、相関係数0.95以上のデータにより以降の検討を行うこととした。この時のデータの採択率は全貫入箇所数のおよそ7割程度である。

こうして得られた80点のBiをヒストグラムにより表した結果を図-6に示す。図より、Biが900N/mm以上の非常に高い値は、比較的大きな細骨材部やモルタル直下の粗骨材部に貫入した場合であり、Biが100N/mm程度の小さい値は、骨材界面近傍などの脆弱部に針を貫入したデータであると判断される。このように、針貫入試験により得られるBiは、針の貫入箇所におけるモルタルの性質や支持状態によってかなり変動することがわかる。そして、Biの代表値からのばらつきが著しく大きい値については、その発生確率が十分に低いデータであると判断される。そこで本研究では、Biのヒストグラムが正規分布に従うと仮定し、近似した正規分布の平均値からの偏差が標準偏差の3倍を越えるBiについては、特異なデータであると判断し、検討の対象から外すこととした。図中の実線は正規分布によりヒストグラムを近似した結果である。図より、近似した正規分布の平均値 μ は481.7N/mm、標準偏差 σ は114.6N/mmで、相関係数は0.978と十分に高い。以上の検討結果から、対象とするBiを平均した値をB値と定義し、このB値をコンクリートの圧縮強度を推定するための指標として用いることとした。

$$B = \frac{\sum B_i}{N} \quad (2)$$

ここで、

B : B値 (N/mm)

$\sum B_i$: $\mu - 3\sigma \leq B_i \leq \mu + 3\sigma$ に存在する B_i の合計

N : 上記範囲内に存在する B_i の数

図-7に14種類の配合から得られたB値と円柱供試体による圧縮強度との関係を示す。図よりB値と圧縮強度の相関係数は0.987と良好で、標準誤差は1.9MPaと十分に小さいことが確認された。この程度の精度であれば、B値を強度推定の指標として適用することが十分に可能であると判断される。また、本実験では合計80点の針に作用する荷重と貫入量の関係からB値を算出したが、40点の荷重と貫入量の

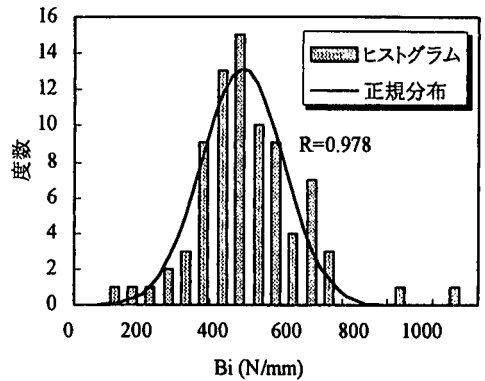


図-6 Biのヒストグラムと正規分布による近似結果

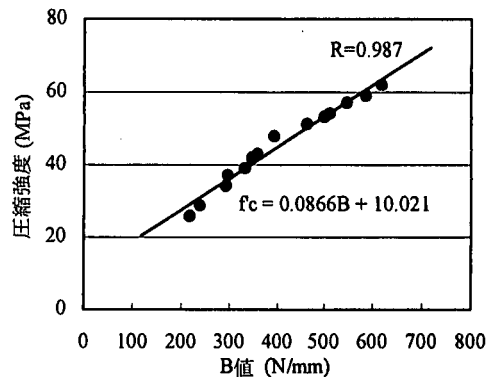


図-7 圧縮強度とB値との関係

関係が得られれば、十分な精度でB値の算出が可能であることも確認された。

(2) 針貫入試験による強度分布の推定

図-8、図-9に凍結融解サイクルを120サイクル及び180サイクル与えた場合のコンクリート供試体の強度分布を推定した結果を示す。図-8、図-9における図中の点は各測定区間(2.5mm間隔)における1本のコアサンプルより測定したB値を図-7の圧縮強度とB値の回帰式に代入し、得られた圧縮強度の値を示したものである。1本の供試体からは3本のコアサンプルを採取しているため、各測定区間に対して3点の圧縮強度がプロットされている。また、図中の実線はこれら3本のコアから推定した各測定区間における圧縮強度の平均値を結んだものである。図-8、図-9より、各コアから算出された3点の推定圧縮強度の値は多少ばらつくものの、供試体表面近くで強度が顕著に低下していることがわかる。図-10に図-8と図-9の強度分布を比較した結果を示す。図中の点は、各凍結融解サイクルに対する3本のコアから推定される圧縮強度の平均値を示したものである。図より、凍結融解サイクルが120サイクルから180サイクルに増加した

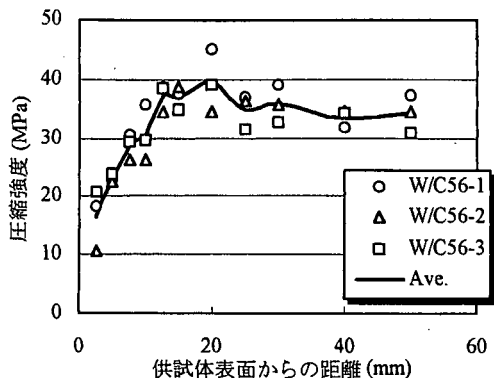


図-8 120サイクル時における供試体表面からの強度分布

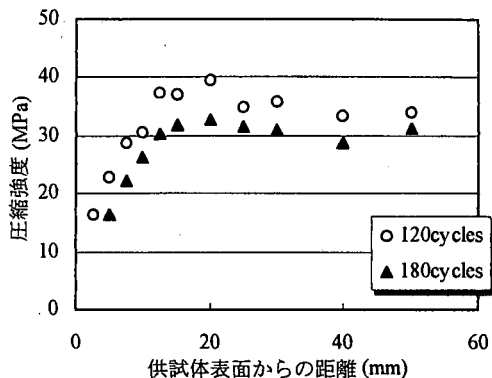


図-10 凍結融解サイクルの違いによる強度分布

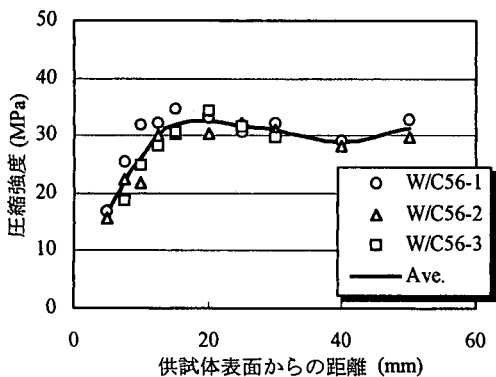


図-9 180サイクル時における供試体表面からの強度分布

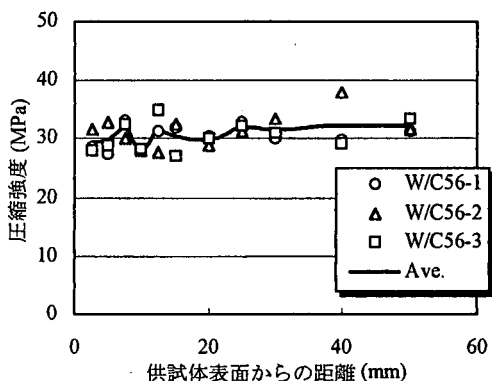


図-11 凍結融解サイクルを与えない場合の供試体表面からの強度分布

結果、強度低下する位置がわずかに供試体内部にシフトし、強度の絶対値も全体的に低下する傾向を示していることがわかる。一方、図-11に凍結融解サイクルを与えない場合（0サイクル）の強度分布の推定結果を示す。図より凍結融解サイクルを与えない場合、供試体表面部付近の強度の低下は見られず、強度分布は供試体表面からの距離に関わらずほぼ一定であることが確認された。従って、図-8、図-9で確認された供試体表面付近での顕著な強度低下は、凍結融解作用によるものであると判断される。以上の検討結果より、針貫入試験により、凍結融解作用を受けたコンクリートの強度分布を精度良く推定し、凍害による劣化の程度を圧縮強度によって定量的に把握することが可能であることが確認された。

(3) 本試験方法に適した針形状の選定

これまでの実験では、コンクリートピンテスター用の針を用いて針貫入試験を行ってきた。しかしながら、高強度コンクリートのモルタル部や粗骨材部に針を貫入した場合、針の貫入量に比して荷重が大

きくなりすぎて、Biの測定精度が低下するという問題が生じた。さらに、針貫入回数が著しく増加すると針先端部が摩耗し、断面積が次第に増加するため、結果としてBiが高く評価されるという問題も生じた。そこで、これらの問題点を解決あるいは軽減するため、針形状の見直しを行い、本試験方法に適した針を選定することとした。針形状の選定にあたっては針先端部の直径及び角度に着目し、図-12に示す5種類の針を用いて実験を行うこととした。Type-Aはこれまで使用してきた針の先端形状と同じであり、Type-BはType-Aと針先端直径が同じで針の先端角度を 30° と鋭角的にしたものである。Type-CはType-Bと比較して、針先端部の角度が同じで直径を0.15mmと小さくしたものである。Type-Dは針先端部の直径をType-Cと等しくすると共に、針が貫入する部分の先端角度を 0° にしたものである。Type-Eは針先端部の直径を0.15mm、角度を $16^\circ 51'$ とできるだけ小さくすると共に、針先端部の付け根に $R=1\text{mm}$ の円弧をつけたものである。針の長さは30mm、針の基部の

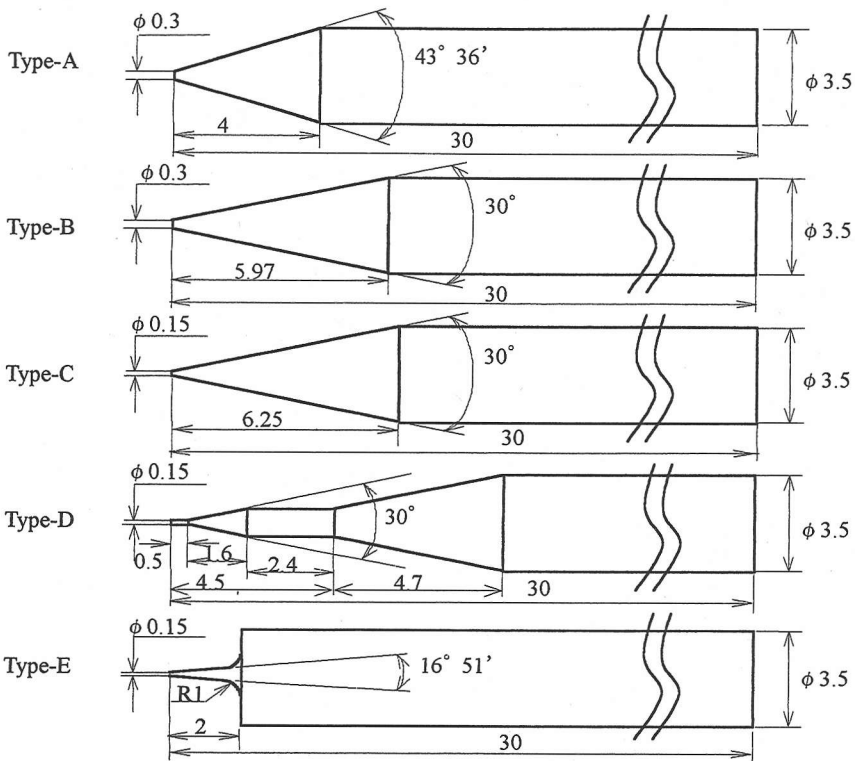


図-12 針形状図：単位 (mm)

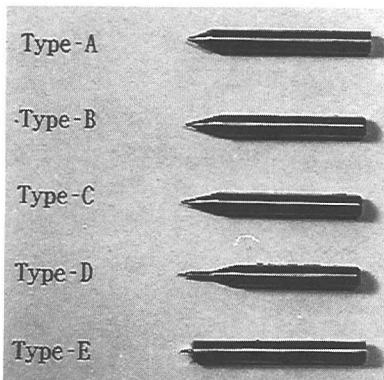


写真-2 針形状図

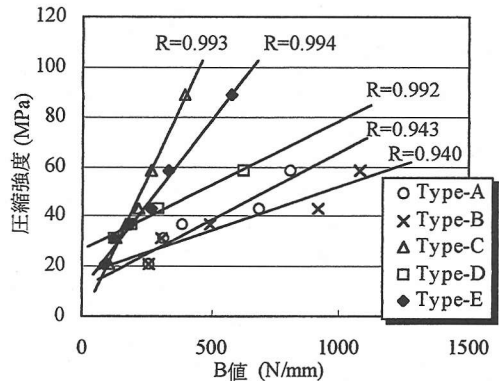


図-13 針形状の違いによる圧縮強度とB値との関係

直径は3.5mmに統一した。針形状の違いを写真-2に示す。

図-13に各針を用いて圧縮強度の推定精度について検討した結果を示す。図よりType-A、Type-Bの針に比べ、Type-C、Type-D、Type-Eの針の圧縮強度とB値の相関係数が明らかに高いことがわかる。つまり、針先端部の直径が小さい方が、圧縮強度の推定精度が高くなるという結果になった。また、Type-Dについては針の先端部が非常にもろく、針に大きな力が作用すると、簡単に折れてしまうという耐力上の欠

点が見つかった。以上の実験結果より、高い精度で圧縮強度の推定が可能で、耐力上の問題もないType-CとType-Eの針が、本試験に適した針であると判断される。さらに、Type-Eの針は、他の針に比べて針の先端角度が小さいことから、針が多少摩耗してもBiの測定精度に与える影響が少ないことが確認された。従って、本研究では、Type-Eを用いて以降の研究を行うこととした。

図-14に、Type-Eの針を使用した場合のB値とコンクリートの圧縮強度との関係について示す。これま

での実験では普通強度から高強度領域におけるコンクリート圧縮強度の推定精度について検討してきたが、本実験では、劣化して著しく強度低下したコンクリートの圧縮強度や強度分布の推定に適用できるよう、圧縮強度10MPaから20MPaという低強度領域を含めたB値と圧縮強度との関係を算出することとした。図より、Type-Eの針を用いることにより低強度領域においても精度良くコンクリートの圧縮強度を推定することが可能であると判断される。圧縮強度とB値との間の相関係数は0.991と良好で、標準誤差も2.1MPaと十分に低い。また、図-13中のType-Eの結果と図-14を比較すると、両者はモルタル供試体とコンクリート供試体の違いにより、多少のばらつきはあるが、同様の傾向を示しており、整合のとれた結果となっている。以上のことから、図-14に示す式を一般式として用いることにより、低強度から高強度に至るコンクリートの圧縮強度及び強度分布を十分な精度で推定することが可能であると判断される。

(4) 全自動化した針貫入試験装置による強度の推定

図-15及び写真-3に新たに開発された針貫入試験装置を示す。針の貫入箇所は、コアを支持している固定テーブルの移動とドラムの回転により自動的に変化する。前述の通り、針に作用する荷重と貫入量の

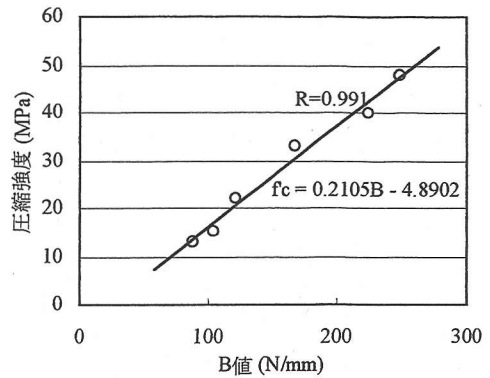


図-14 Type-Eの針に対する圧縮強度とB値との関係

関係は、粗骨材部も含めて採取される。

図-16に測定されたBiのヒストグラムを示す。図より、Biが175N/mm付近で最頻値が確認されたが、その後もBiの度数は急激に低下するというのではなく、Biが1000N/mm付近で再び度数が増加する傾向を示している。この理由は、針が強度の高い粗骨材部に貫入しているためであると考えられる。従って、これまでの方法と同様にコンクリートの圧縮強度をコンクリート中のモルタル部で評価しようとするならば、粗骨材部に貫入したデータを取り除く必要がある。

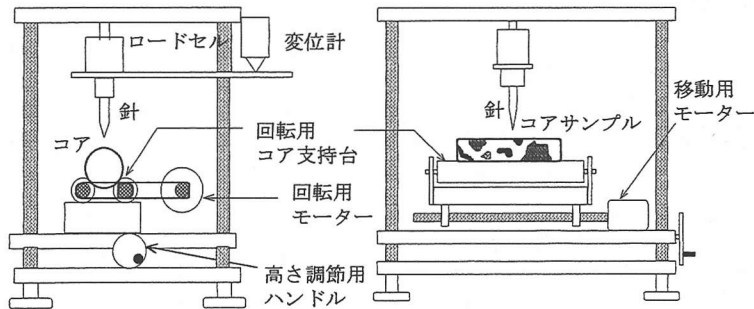


図-15 新たに開発された針貫入試験装置の概念図

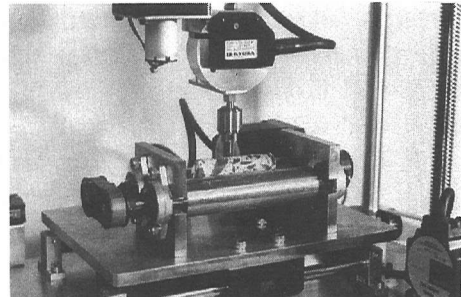
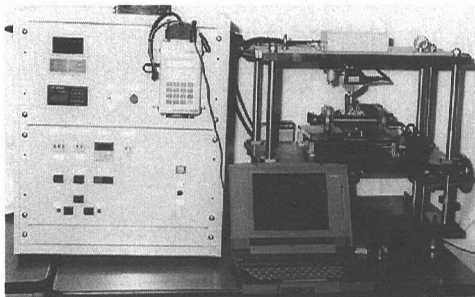


写真-3 全自動針貫入試験装置

る。本研究では、粗骨材部のデータを客観的に削除するため、以下の統計処理を行うこととした。

まず、データ処理の迅速化を図るため、粗骨材部に貫入したと思われるデータについては、あらかじめ検討の対象から外すこととした。実施工に使用される一般のコンクリートでは、単位粗骨材容積⁷⁾から換算されるコンクリート1m³当たりの粗骨材容積は少なくとも0.3 m³、通常は0.4 m³前後であることが知られている。また、粗骨材が健全であれば、粗骨材の強度はモルタルの強度に比べて十分に大きいと考えられる。そこで本研究では、針貫入試験を行って得られたBiのうち、値の大きな上位30%のデータについては、そのほとんどが粗骨材部に貫入したデータであると判断し、事前に削除することとした。結果を図-17に示す。通常のコンクリートであれば、この段階ではまだ粗骨材部に貫入したデータが若干含まれているため、これらのデータについても削除する必要がある。前述の通り、モルタル部だけに針を貫入させた場合（図-6参照）、Biのヒストグラムは正規分布により精度良く近似できることが確認されている。そこで、図-17に示すヒストグラムについても正規分布による近似を試みる。図より、ヒストグラムと近似した正規分布との間には良好な相関が認められたが、Biが500N/mm以上のヒストグラムについては正規分布からやや外れる結果となった。これらのデータは主に粗骨材部に貫入したデータであると判断されるため、前述の3.(1)に示す方法に従い、近似した正規分布の平均値からの偏差が標準偏差の3倍を越えるBiについては、検討の対象から外すこととした。そして、式(2)に従い、残ったBiの平均値をB値とみなし、コンクリートの圧縮強度を推定する上での指標とした。そして、この値を図-14中の回帰式に代入し、得られた値を圧縮強度の推定値とした。以上のデータ処理を行った結果、推定した圧縮強度は41.2MPaとなり、実際に測定した圧縮強度(40.0MPa)と非常に近い値を示した。

粗骨材部に貫入したデータを精度良く取り除く方法については今後もデータを蓄積し、検討を重ねていく必要があると思われるが、適切な統計処理を行うことにより、針貫入箇所をモルタル部に特定しなくても圧縮強度の推定は十分に可能であると思われる。つまり、針貫入試験の全自動化は十分に可能であるとの見通しを得ることができた。

4. 結論

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

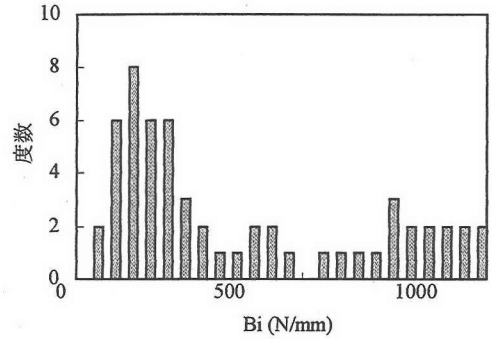


図-16 ランダムに針を貫入させたときのBiのヒストグラム

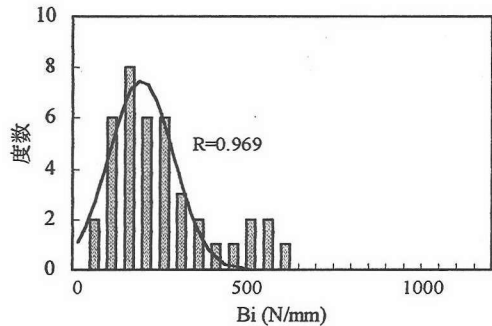


図-17 上位30%のデータを削除したときのBiのヒストグラムと正規分布による近似結果

1. 針貫入試験により得られる針に作用する荷重と貫入量との関係から、コンクリートの圧縮強度を精度良く推定することが可能である。
2. 針貫入試験により、コンクリート構造物内部のコンクリートの強度やコンクリートの表面から内部に向けての強度分布を推定することが可能である。これにより、残留耐力や劣化深さを圧縮強度の分布により評価することが可能である。
3. 針貫入試験に適した針形状の選定を行うことができた。
4. 適切な統計処理を用いて粗骨材部に貫入したデータを削除することにより、針貫入試験の全自動化が可能であるとの見通しが得られた。

謝辞：本研究は東北建設協会の技術開発助成金を受けて行われたものである。なお、本研究の実験及びデータ整理に際し、多大な協力を得た東北大学大学院博士課程前期2年の山田義博君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔編集, 魚本健人, 加藤潔, 広野進共著: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, 1990.
- 2) 例えば Miura, T. and Itabashi, H.: Effect of de-icing salts on frost damage of high-strength concrete, *Proceedings of the International Conference Concrete Under Severe Conditions*, E & FN Spon. pp.265-272, 1995.
- 3) 山下英俊, 堀孝司, 佐伯昇: 超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定, コンクリート工学論文集, 第7巻第22号, pp.179-186, 1996.
- 4) 堀宗朗, 多田浩治, 斎藤裕, 三浦尚: 細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp.723-728, 1991.
- 5) 斎藤裕, 三浦尚, 堀宗朗, 長田光正: 針貫入を用いたコンクリートの凍害劣化の診断について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp.997-1002, 1992.
- 6) 山守亨, 三浦尚, 西丸知範: 新針貫入試験によるコンクリートの劣化度推定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp.1251-1256, 1996.
- 7) Neville, A. M.: *Properties of Concrete, Fourth Edition*, Longman, 1995.
- 8) コンクリート標準示方書(施工編): 土木学会, 1996.
- 9) 山田義博, 岩城一郎, 三浦尚: 針貫入試験を用いた劣化度診断に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 1998.
- 10) Ang, A. H-S. and Tang, W. H.: 土木建築のための確率・統計の基礎, 伊藤學・亀田弘行訳, 丸善, 1977.

(1998. 8. 10受付)

STUDY ON EVALUATING DETERIORATION OF CONCRETE STRUCTURE USING NEEDLE PENETRATION TEST

Takashi MIURA, Ichiro IWAKI and Hirofusa ITABASHI

In this study, the evaluation of the compressive strength and the strength distribution of concrete deteriorated is attempted by needle penetration test. A steel needle is penetrated on the side surface of core sample pulled out of concrete structure and the relationship between load acting to the needle and the amount of penetration is measured. As the experimental result, the compressive strength and the strength distribution of concrete can be evaluated by the relationship between load and the amount of penetration. Further, the shape of needle suitable for this testing method and the automatization of the needle penetration testing device are investigated. Based on these experimental results, it is concluded that this testing method can be applied to evaluating the deterioration of concrete structures.