

論文

[1173] 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

正会員 ○斎藤 裕 (東北電力 電力技術研究所)  
 正会員 三浦 尚 (東北大学土木工学科)  
 正会員 堀 宗朗 (東北大学土木工学科)  
 長田 光正 (東北大学大学院)

1. はじめに

厳しい環境下において使用される場合、コンクリート構造物にさまざまな劣化が発生することがあり、構造物の維持管理を図るために補修や改修を行う必要が生じる。この際、コンクリートの劣化の度合を診断し、適切な補修改修の規模及び方法を決定することが望ましい。通常、劣化度の診断は正確であることと同時に、診断時に構造物に与える損傷が少ないことが要求されるが、凍害のような劣化に対しては、表面からの深さによって異なる劣化の状況も診断できることも必要である。これは、凍害は水の浸透とともに構造物表面から内部へと進行していき、劣化の度合は深さ方向で一様ではないためである。したがって、凍害を被る構造物については、表面から得られる情報だけでは劣化を的確に診断することは難しく、有効な診断法を見つける必要があると思われる。

以上の点を基にして、凍害を被るコンクリート構造物の劣化度をよりの確に診断するために、著者らは、①できるだけ非破壊に近い形で、②健全と思われる構造物内部を基準とする、③定量的な劣化の目安を用いた、方法の可能性を検討している[1,2]。この条件を満たすために、構造物からボーリングによってコア供試体を抜き、適当な深さ毎にその供試体から採取された小型サンプルを室内実験に供し、劣化診断を行なうことを提案している(図1参照)。このような劣化診断では、供試体本数は少ないものの十分深くまで構造物からコア供試体を抜くことで条件①と②が、また、サンプルに施す室内実験を精密なものとすることで条件③が満たされると考えられる。

著者らが提案している劣化診断の問題は、劣化の適切な目安を選定し、そしてその目安を測定ないし推定することである。通常、凍害の目安には、たわみ振動数から算出される動弾性係数の低下が用いられる。しかし、設計において最重要視されること、一般に理解し易い力学量であること、等といった理由から、弾性係数とは別に、圧縮強度ないしその低下を低温劣化の目安にすることが考えられる。すなわち、凍害を被る場合、健全と思われる内部に比べ表面付近では圧縮強度が低下すると予想されるため、適当な深さ毎に強度を推定することで劣化の度合や進行の状況を判断し、構造物の劣化診断を行うのである。

圧縮強度やその低下を劣化診断の目安とする場合、上記の3つの条件を満たしながら、それを測定ないし推定しなければならない。本研究では、針貫入を用いた圧縮強度の推定方法を提案する。これは、小型サンプルに細い針を貫入し、針の貫入量と針に加わる荷重を連続的に測定し、その関係からコンクリートの圧縮強度を推定するものである。この方法自体は新規なものであるため、研究の第1段階では、針貫入による圧縮強度の推定方法自体を検討し、合理的と思われる推定方法を

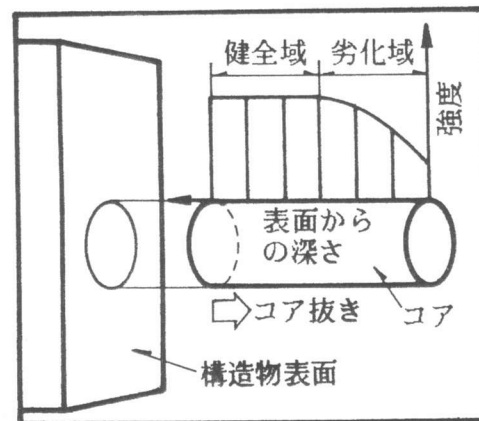


図1 構造物表面からの深さによる劣化度の分布の概念図

確立した。その結果を基に、研究の第2段階として、低温劣化の診断の可能性を探るために、凍結融解の繰り返しによって劣化した室内実験供試体にこの方法を適用し、強度推定の精度を調べた。

(なお、局所的な強度の推定には、微小硬度の利用も考えられるが、測定精度の点に問題があるようにであり、本研究では検討されなかった。)

## 2. 使用材料

実験には次の2つのグループのNON-AEコンクリート供試体を用いた。グループIは、5種の水セメント比によって強度が異なるコンクリートであり、針貫入法による圧縮強度の推定の可能性を探るためのもの

である。配合及び強度を表

1に示す。グ

ループIIは、

3種の水セメ

ント比で凍結

融解の繰り返

しの違いによる4段階の劣化

の割合を示すコンクリートで

あり、種類と劣化状態が異なる

コンクリートに対して針貫

入法による圧縮強度推定の可

能性を検討するためのもので

ある。配合を表2に、ASTMの標準凍結融解試験に則った+4~-20

℃まで凍結融解の繰り返しを適当な回数かけた後の相対動弾性係

数と強度を表3に示す。

各配合について、直径10cm高さ20cmの円柱供試体を6本用意した。このうち、2本の供試体表面からコア抜きドリルにより直径2.0cm長さ3.5cm程度の円柱状小型サンプルを8つ採取し、他の4本は圧縮強度の測定に用いた。なお、グループIIでは、6本の供試体全ての相対動弾性係数が測定された。

## 3. 針貫入試験の方法とその検討

針貫入は、鋼製の鋭敏な針と電動一軸圧縮試験機を用いて行なわれた。一定の速度(0.2mm/min.)で上昇する載荷台にサンプルを固定し、変位制御の下で針の貫入量と加わる荷重が測定された

(図2参照)。8個のサンプルに、粗骨材を避けたモルタル部に5箇所針を貫入し、1つの供試体につき、40のデータを得た。その際、試料を壊さない程度の荷重として10kgf程度まで荷重を行った。

一つのサンプルの針貫入の測定結果の例を図3に示す。xは針の貫入量、Pは針に加わる荷重である。xとPの関係は、貫入方向に存在する細骨材等の影響のため不滑であり、貫入箇所によっても大きく異なる。なお、同一供試体から採取されたサンプルの間では、測定データに明瞭な差は見られず、サンプルの違いを考慮する必要はないようであった。

表1 配合及び圧縮強度(グループI)

NO.	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
					W	C	S	G	減水剤	
1-1	25	8	36	38	174	489	622	1152	C×0.50%	703
1-2	25	7	51	41	176	345	720	1168	C×0.13%	511
1-3	25	8	56	42	176	314	749	1170	C×0.00%	466
1-4	25	10	61	43	180	295	768	1148	C×0.00%	416
1-5	25	11	66	44	184	279	787	1130	C×0.00%	365

表2 配合及び圧縮強度(グループII)

NO.	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	減水剤
2-1	25	9	46	40	175	383	689	1169	C×0.25%
2-2	25	7	56	42	176	314	749	1170	C×0.0%
2-3	25	12	66	44	184	279	787	1134	C×0.0%

表3 動弾性係数及び圧縮強度(グループII)

NO.	相対動弾性係数(%)	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
2-1	100.0	547
	71.6	430
	55.1	358
	37.6	378
2-2	100.0	447
	73.9	382
	57.1	356
	39.0	347
2-3	100.0	317
	74.7	274
	59.1	266
	40.9	257

このようなばらつきを除き、供試体の平均的な  $x$  と  $P$  の関係を得るため、適当な統計処理を加えることを試みる。最初に、測定データの不平滑性を除き、滑らかな  $x$  と  $P$  の関係を得るため、 $n$  番目の貫入箇所での測定データを2次曲線で回帰した ( $n = 1, \dots, 40$ )。

$$P = A_n x^2 + B_n x \quad (1)$$

ついで、貫入箇所の違いを除くため、1つの供試体で得られた40の  $A_n$  と  $B_n$  の平均値を係数とする次の2次回帰曲線を決定した。

$$P = A x^2 + B x \quad (2)$$

これを供試体の平均的な  $x$  と  $P$  の関係とする。

図3の測定データに対して、得られた回帰式に対するデータの標準偏差を表4に示す(標準偏差は  $P$  の平均値によって無次元化してある)。式(1)による回帰が概ね良好であることがわかる。また、貫入箇所の数が30を越えると、 $A_n$  と  $B_n$  の平均値や分散はほぼ一定の値を示すようになる。よって、40程度のデータを用いれば、回帰式(2)は十分信頼性の高いものになると考えられる。(内部の粗骨材に針が当たる等の理由により他と極端に異なる測定データが得られるが、そのような場合のデータは上記の処理から除かれた。)

針の貫入量と荷重の関係は、不均一性以外にも針の貫入速度によっても影響を受けることが予想される。これは、コンクリートの速度依存性のため、貫入速度が速い場合には針貫入に対する

抵抗が大きくなることである。この影響を除くために、十分遅い速度で針を貫入する必要がある。本研究で使用した載荷台の上昇速度の範囲から0.1、0.2、0.3、0.4mm/min. の4つの変位速度を選び、各々の速度で同一のサンプルに針を貫入し  $x$  と  $P$  を測定した。4つの貫入速度で

の測定データはほぼ同一であり、実際、後に4. で説明される針貫入に必要な平均仕事を計算すると、その値には大きな差が見られなかった(表5参照)。したがって、針貫入の変位速度は十分遅いものであると考えられる。本研究では、変位速度として0.2mm/minを採用した。

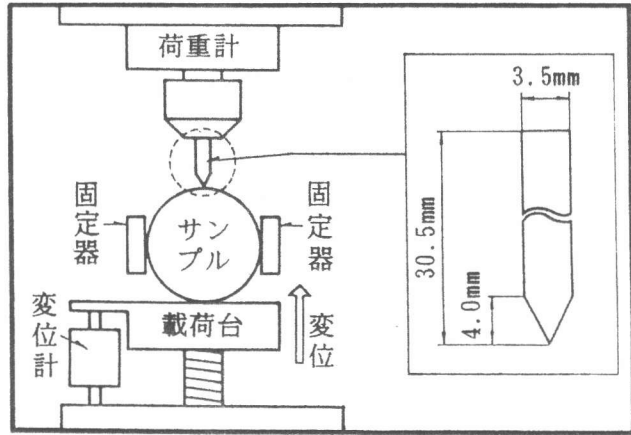


図2 針及び実験装置の簡略図

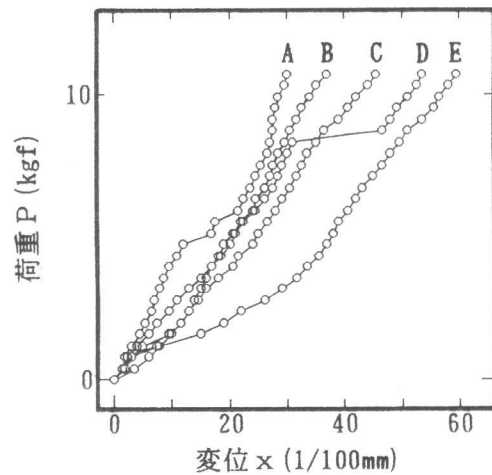


図3 測定された荷重と変位の関係 (一つのサンプルの5箇所に行われた針貫入の測定例)

表4 無次元化された回帰式からの標準偏差  $S_p$

図3中のNo.	無次元化された回帰式からの標準偏差の平均
A	0.1138
B	0.0400
C	0.0401
D	0.1096
E	0.0556

表5 異なる変位速度による平均仕事  $W$  の値

用いた配合No.	変位速度 (mm/min)	平均仕事 $W$ (1/100kgfmm)
1-2	0.1	49.7
	0.2	56.7
	0.3	57.2
	0.4	59.1

#### 4. 実験結果及び考察

3. の検討を基に、グループ I のコンクリートに対して針貫入による圧縮強度の推定の可能性を調べた。図4に、式(2)で与えられる各供試体の貫入量  $x$  と荷重  $P$  の関係を示す。強度の大きい供試体ほど針貫入に対する抵抗が大きいことがわかる。

圧縮強度を推定するため、適当な貫入量  $X$  までに必要とされた仕事  $W$  を推定の指標として用いることにした。式(2)より、 $W$  は次のように計算した。

$$W = \frac{1}{3} A X^3 + \frac{1}{2} B X^2 \quad (3)$$

式(3)で与えられる  $W$  は、式(1)から計算される各貫入箇所での針貫入の仕事の平均値となる。 $X$  を  $0.2\text{mm}$  と

した時の  $W$  を横軸に、供試体の圧縮強度  $\sigma$  を縦軸に取ったものを図5に示す。 $W$  と  $\sigma$  には原点付近を通る線形的な相関がみられる。他の  $X$  の値について式(3)から仕事  $W$  を計算した場合も、傾きは異なるものの  $W$  は  $\sigma$  との線形的な相関関係がみられた。したがって、次の仮定を設けた。

#### 局所的な針貫入に要する仕事が強度と線形の関係にある

この仮説の基で、本研究の目的である針貫入による凍害劣化の診断の可能性を探ることを試みる。凍結融解によって劣化したグループ II のコンクリートに対して上と同様の針貫入の際の測定と得られたデータの回帰計算を行なった。なお、表2に示すように、本研究で行なわれた室内実験の結果では、凍結融解の繰り返しによってコンクリートは弾性係数と同様に強度も低下することが示され、圧縮強度を劣化の目安にとることも可能であることが確認された。式(2)で与えられる貫入量と荷重の関係から、劣化の程度によらず、強度の大きい供試体ほど針貫入に対する抵抗が強いことが

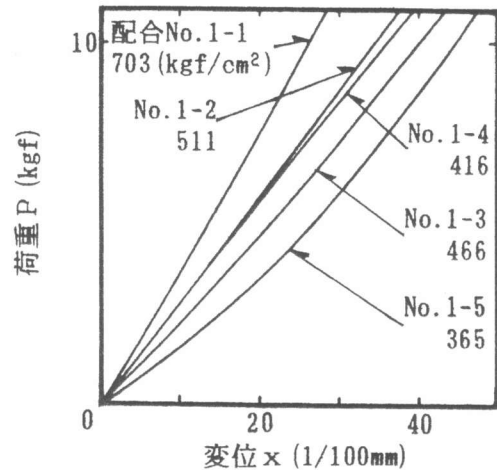


図4 供試体の平均的な荷重と変位の関係 (式(2))

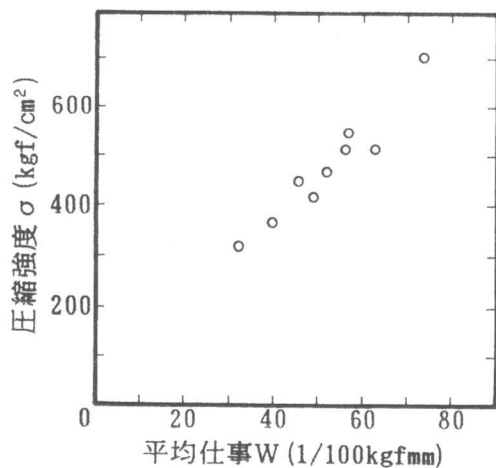


図5 圧縮強度と平均仕事  $W$  の関係 (グループ I の供試体)

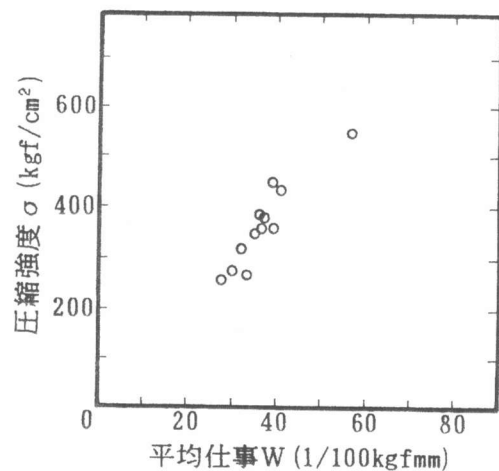


図6 圧縮強度と平均仕事  $W$  の関係 (グループ II の供試体)

わかったため、式(3)を用いて仕事Wを求め、供試体の強度 $\sigma$ との関係を調べた。その結果を図6に示す。図5と同様に、Wと $\sigma$ の間に線形的な相関が成立し、その相関関係は供試体の劣化の割合によらないようである。

以上のようにグループIとグループIIのどちらにおいても、針貫入試験より得られる平均仕事Wと供試体の圧縮強度 $\sigma$ の間に線形的な相関がみられた。双方の結果をまとめたものを図7に示す。Wと $\sigma$ の間には、水セメント比の違いや、凍結融解の繰り返しによる劣化の程度の違いによらずに、ほぼ同一の線形的な相関が成立することがうかがえる。最小2乗法によってWと $\sigma$ の関係を次の1次式で回帰した。

$$\sigma = CW + D \quad (4)$$

C =  $8.69 \times 10^3$  (1/cm<sup>3</sup>) と D = 33.33 (kgf/cm<sup>2</sup>) となり、回帰の標準偏差は 32.5 (kgf/cm<sup>2</sup>) が得られた。これは、強度推定の精度を90%の信頼性で行う場合、誤差は約  $\pm 50$  (kgf/cm<sup>2</sup>) に対応する。したがって、この精度で強度推定が可能であり、実用上良好であると思われる。

本研究の2つの実験では、同一種類で、凍結融解の繰り返しに対して耐久的な骨材が使用されたため、配合や劣化の違いによるコンクリートの圧縮強度の差は、モルタルの強度の差異に起因すると考えられる。したがって、式(4)では十分高い相関が得られるものの、骨材の種類が異なるコンクリートには、必ずしも適応できるとは限らない。しかしながら、実際のコンクリート構造物から1.に述べた方法で採取されるコア供試体では、骨材の種類はほぼ同一であると考えられる。骨材が良質であれば、凍害が引き起こすコンクリートの強度の低下はモルタルの強度の低下に起因するため、健全と思われる構造物深部を基準とし、その基準との差を利用して強度の低下量を推定することは可能であると思われる。このような場合、劣化したコンクリートの強度の値自体は必ずしも推定できるとは限らないが、本研究で提案されたように、多数の針貫入試験と回帰計算によるデータ処理を行い、適切な目安として針貫入に要した仕事を算出することで、健全な状態からの強度低下量を推定する可能性は大きいと思われる。

本研究で提案された針貫入試験方法は新しい手法であるため、実用を図るにはより詳細な検討が必要である。上記のように骨材の種類が異なる場合への対応や、ひび割れによるコンクリート強度低下が予想される場合は、今後の課題である。(著者らは、凍害による細孔構造の変化を基にして動弾性係数の低下の推定も試みており[1]、強度と動弾性係数の低下の推定から、凍害の診断をより合理的に行なうことを検討している。)

なお、圧縮強度の推定に採用された回帰式(4)に対しては、実験によるより多くの検証の他に、仮定された針貫入に要する仕事と強度の比例関係自体に理論的な裏付けを与え、信頼性を増すことも望まれる。本研究では、この仮定された比例関係に以下のような考察を加えている。貫入時に、針先端にはコンクリート圧縮強度の20~30倍程度の応力が働いていることが針の形状から計算される(貫入箇所は摩擦による拘束を受け多軸応力状態になることや、多数の細骨材に直接当たり大きな抵抗を受けることで、大きな圧縮応力が発生すると考えられる)。この先端圧縮応力により針がサンプルを局所的に破壊して貫入するため、この応力が大きいほど針貫入に必要な仕事は増加する。

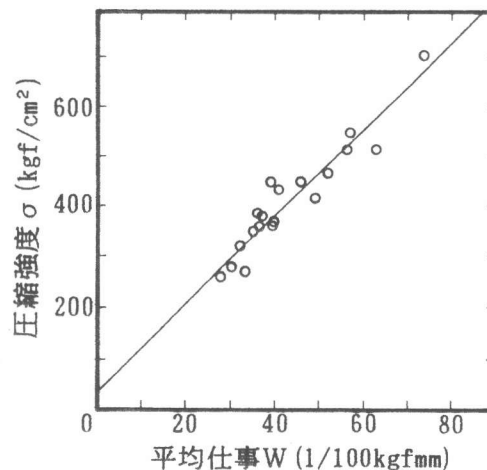


図7 圧縮強度と平均仕事Wの関係 (グループI、IIの供試体)

一方、上述のように、実験に供されたコンクリートの圧縮強度の差はモルタルの差に起因するため、強度が大きいコンクリートに針を貫入するには、より大きな先端圧縮応力が必要である。以上より、仕事先端圧縮応力に比例し、先端圧縮応力が強度に比例するのであれば、仕事と強度が比例関係にあると推定される。

また、本研究で検討されている圧縮強度の推定には、コンクリートの不均一性によるばらつきが強度に与える影響の評価が考慮されていない。ばらつきが強度に与える影響とは、通常材料において、局所的な強度の平均が同じであっても局所的な強度のばらつきが大きければ、材料全体での強度は低下すると考えられることである。式(1)や式(2)は測定値の平均によって決定され、針貫入に要する仕事もその平均によってのみ計算されている。現在、少なくとも室内実験においては十分な精度で圧縮強度を推定することが可能であるが、ばらつきの大きいと思われる実際の構造物から採取されるコンクリートを対象とする場合には、データのばらつきをなんらかの形で圧縮強度の推定に取り込み精度の向上を図ることが必要であると思われる(材料のばらつきが強度に及ぼす効果の検討については、参考文献[3]を参照)。

最後に、貫入量 $x$ と荷重 $P$ の関係を2次式の代わりに1次式で表し、針貫入試験の実用上の簡便さを図ることを検討した。すなわち、式(1)と(2)の $A_n$ や $A$ を0とすることである。 $A_n$ を0にしなかった場合に比べ、 $A_n$ を0とした式(1)の回帰は若干精度が悪いものの、 $A$ を0にしなかった場合と $A$ を0とした式(2)の回帰はほぼ同様の精度であった。また、式(2)の係数 $B$ は、強度の大きい供試体ほど大きな値となった。1次式を用いた場合、 $B X^2 / 2$ が針貫入に要する仕事 $W'$ を与え、異なる供試体での $W'$ の比は貫入量 $X$ に依存せず $B$ のみで決定される。さらに、図8に示すように、 $W'$ と圧縮強度 $\sigma$ は線形の相関関係が見られ、その相関の度合は図7と同程度である。したがって、1次回帰式を利用して、データ処理の簡便化を図ることも十分可能であると思われる。

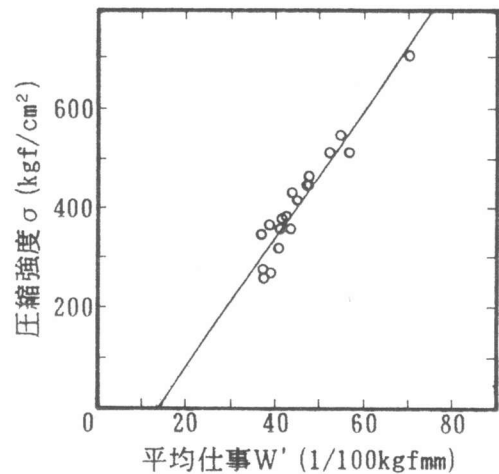


図8 圧縮強度と平均仕事 $W'$ の関係 (グループI、IIの供試体)

## 5. 結論

小型サンプルに針をコンクリートに貫入するために要する仕事から、コンクリートの強度を推定する可能性が示された。仕事の算出には、針の貫入量と加わる荷重の連続的な測定し、十分多数の貫入箇所が必要である。検討すべき課題は残されているものの、この針貫入を用いることで、凍害を被ったコンクリートの劣化の度合を診断することは可能であると考えられる。

謝辞：本研究にあたり多大な協力を頂いた東北大学工学部4年 盛岡義郎君に感謝の意を表します。

## 6. 参考文献

- 1) Hori, M. et al: Study of Diagnosis Method of Frost Damage of Concrete Based on Pore Structure Change, Transactions of The Japan Concret Institute, Vol.13, p.187-194, 1991
- 2) 長田 光正・三浦 尚・堀 宗朗・斎藤 裕：針貫入によるコンクリート劣化度推定のための基礎的研究、平成3年度土木学会年次講演会概要集
- 3) 長田 光正：コンクリート構造物の劣化度推定に関する基礎的研究(東北大学修士論文、1992)