

# 論文 孔内局部載荷試験による凍害劣化深さの把握に関する研究

皿井 剛典<sup>\*1</sup>・林田 宏<sup>\*2</sup>・田中 徹<sup>\*3</sup>・澤口 啓希<sup>\*4</sup>

**要旨**：本稿は、構造物の任意の深度におけるコンクリート強度を推定することが可能な「孔内局部載荷試験」による、凍害環境下にある実構造物の凍害劣化深さの把握に関して検討したものである。実構造物における試験結果は、これまでの供試体を用いた室内実験結果と同等の結果を示し、試験によって得られる“貫入抵抗値”からコンクリート強度を推定できることが分かった。また、構造物の表層数 cm (1~3cm) 位置においても試験が可能であり、凍害による劣化深さ (強度低下範囲) を評価できることが分かった。

**キーワード**：孔内局部載荷試験, 実構造物, 凍害劣化深さ, コンクリート強度推定, 貫入抵抗値

## 1. はじめに

筆者らは、構造物の任意の深度で実施可能な「孔内局部載荷試験」(以下、載荷試験)によるコンクリート強度の推定に関して、これまでに種々の供試体(モルタル、コンクリート)を用いた室内実験を行うことにより、試験によって得られる“貫入抵抗値”(コア孔壁を局部載荷した際の貫入量と載荷荷重から算出)を約4倍した値がコンクリート強度と推定できることを確認した(図-1)<sup>1)2)3)</sup>。また、載荷試験による強度評価の妥当性を、微視的な観察および土質力学における基礎の支持力問題の適用により証明してきた<sup>4)</sup>。

一方、現在、凍害による実構造物の劣化(深さ、程度)に関する診断手法としては、コア孔内や採取コア、コンクリート表面における超音波伝播速度の測定や、採取試料における微細ひび割れや細孔径分布の測定、現地での改良プルオフ法、採取コア試料(小径コアを含む)の強度測定<sup>5)</sup>などが用いられている。しかし、いずれの手法も定量的な評価が難しく、更に構造物の深度方向の評価が深さ数 cm の平均としての評価となるなど、評価手法として確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、凍害環境下の実構造物において載荷試験を実施し、構造物のごく表層からのコンクリート強度を推定し、凍害による劣化深さの把握が可能かどうか検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 対象構造物

対象構造物は、北海道中川郡音威子府村の河川樋門である「構造物 A」、同じく美深町の河川樋門「構造物 B」、「構造物 C」の3箇所である(図-2、図-3)。構造物 A は供用開始後 10 年以上、構造物 B および C は 30 年以上が経過している。

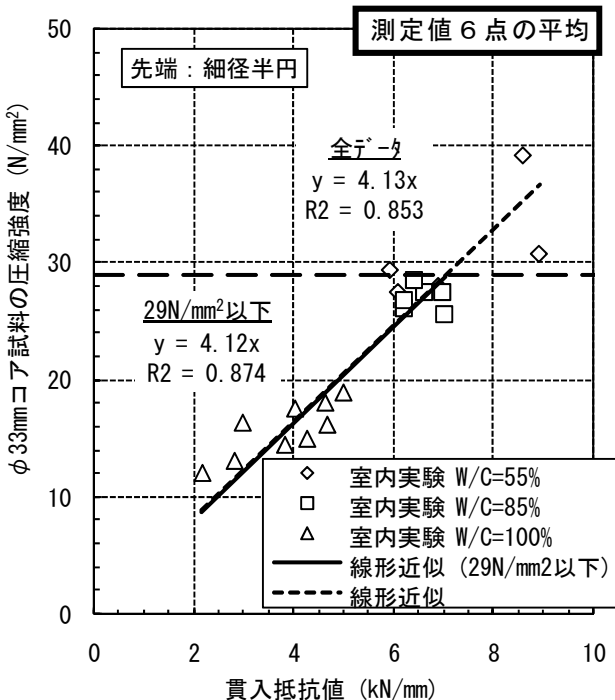


図-1 室内実験により確認された貫入抵抗値とコンクリート強度との関係

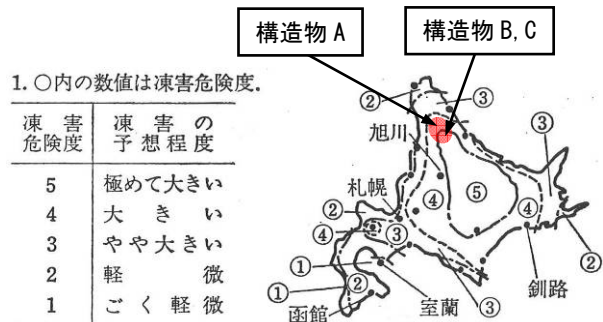


図-2 凍害危険度<sup>6)</sup>

\*1 川崎地質(株) 事業本部保全技術部保全技術グループ課長代理 工修 (正会員)

\*2 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ耐寒材料チーム主任研究員 (正会員)

\*3 戸田建設(株) 土木営業統括部環境ソリューション部主管 工修 (正会員)

\*4 川崎地質(株) 事業本部保全技術部保全技術グループ

対象構造物は、凍害危険度<sup>6)</sup>が「4：大きい」～「5：極めて大きい」に位置しており、凍結融解作用を受けやすい環境と言える。

## 2.2 試験実施箇所

載荷試験は、各構造物の「擁壁」で実施した。河川に向かって右側を「右岸擁壁」、左側を「左岸擁壁」とし、擁壁天端近傍を「上部」、喫水近傍を「喫水部」、これらの中間付近を「中間部」とした。

各構造物の試験実施箇所は、構造物 A の右岸擁壁・中間部および左岸擁壁・上部、左岸擁壁・喫水部、構造物 B の右岸擁壁・喫水部および左岸擁壁・中間部、構造物 C の右岸擁壁・喫水部および左岸擁壁・上部である。

なお、各試験実施箇所の周辺は、ごく僅かに粗骨材が露出している程度の凍害劣化を受けていた。

## 2.3 試験方法

### (1) 載荷試験

載荷試験は、各試験実施箇所に削孔（直径 42mm、深さ 200mm 程度）したコア孔内において実施した。試験



図-3 対象構造物（河川樋門）

は、i) “載荷先端” や “ファイバースコープ” を備えた「孔内局部載荷試験装置」（以下、試験装置）に「加圧ポンプ」（圧力計を含む）、「変位計」（貫入量を表示）、「ノートパソコン」（データ収録用）を接続し、ii)試験装置をコア孔内へ挿入、iii)ファイバースコープにより孔壁を観察しながら任意の深度（測定深度）へ固定した後、iv)加圧により孔壁へ載荷先端を貫入させ、v)貫入時の孔壁への貫入量と荷重をリアルタイムでデータ収録することにより行った。

### (2) 試験深度・載荷点

試験深度は、孔内状況により構造物表面から深さ 1,2,3,5,7,15cm のうちのいずれかとし、また、各試験深度



図-4 試験実施位置

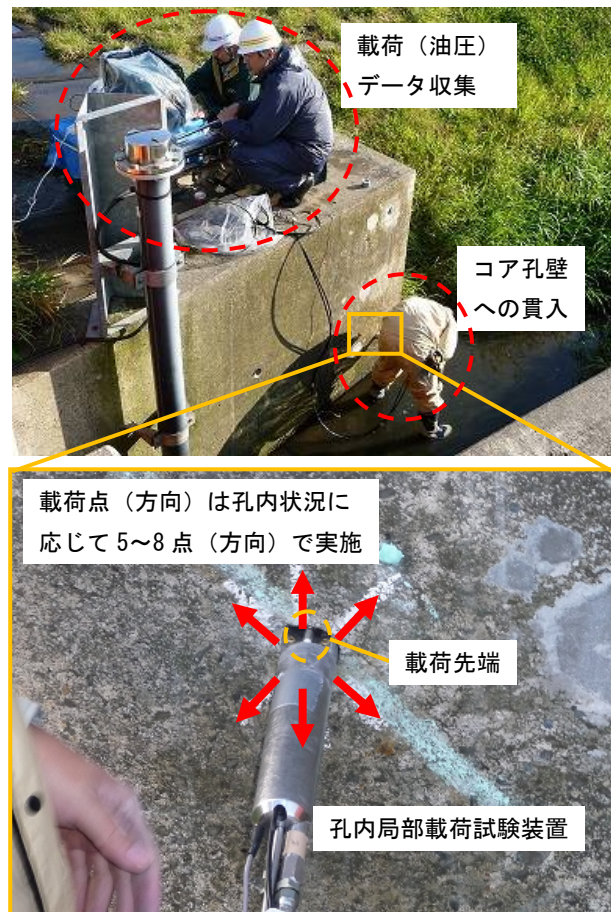


図-5 孔内局部載荷試験実施状況

における載荷点（方向）についても孔内状況により5～8点（方向）を設定した。

なお、孔内状況とは、試験装置に備えられているファイバースコープにより確認できる、載荷先端を貫入する位置周辺の孔壁の状況のことである。貫入位置周辺に粗骨材が多く存在すると、貫入位置となるモルタル部分の領域が狭く、貫入が困難となることから、試験深度や載荷点（方向）の数が限られることとなる。

以上の条件により、載荷試験は、構造物Aで3箇所×4深度＝12測点、構造物Bで2箇所×3深度＝6測点、構造物Cで（1箇所×5深度＝5測点）＋（1箇所×3深度＝3測点）＝8測点で実施した。

### (3) 採取コア試料の圧縮強度試験

各試験実施箇所を削孔した際に抜いたコア試料は、構造物表面から長さ約6cmずつに切断し（コア試料が破断している場合は、位置をずらして切断）、1箇所につき3本（深度）のコア試料（直径33mm×成形後の長さ66mm程度）の圧縮強度試験を実施した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 試験データの棄却

載荷試験により得られるデータは、図-6に示すような貫入量-荷重曲線であり、コンクリート強度の推定のために算出する“貫入抵抗値”は、この曲線の傾きより求める。筆者らが実施した室内実験の結果<sup>1),2),3)</sup>，“貫入抵抗値”は「同条件の6点の測定」により、圧縮強度の推定が可能となることが分かっている。

しかし、“貫入抵抗値”の算出の元となる貫入量-荷重曲線は、図-6で分かるように、同条件（同一コア孔内の同一深度）における載荷試験であっても、多少のばらつきが生ずる。これらのばらつきは、孔壁へ載荷先端を貫入する際の、微小範囲（載荷先端は直径6mm）のコンクリート強度のばらつきをとらえているだけでなく、骨材や空隙の影響も含んでいると考えられる。

なお、筆者らの確認<sup>3)</sup>によると、載荷先端が粗骨材に当たると貫入量-荷重曲線の傾きが異常に大きくなり（曲線が立ち上がる）、空隙を押し潰すと貫入量が急激に増加するものの荷重が増加しない（曲線がねてしまう）ことが分かっている。

このため、これまでは、上記のような謂わば経験則によって異常値の除去を行ってきた。しかし、経験則による方法であると、試験実施者・データ解析者の違いによってデータ除去基準にばらつきが生じることが予測される。そのため、本研究では、小径コア試験による強度測定<sup>7)</sup>で用いられているGrubbs法による棄却検定により、試験データの棄却を行った。

なお、Grubbs法とは、得られたデータ（ここでは、貫入抵抗値の試験値Kn）の最大値Xnあるいは最小値X1について、大きさnの標本における最大偏差とその標本の標準偏差sの比を用いて検定する方法である。実際には小径コア試験による強度測定<sup>7)</sup>で用いられている手順に準じて、載荷試験によって得られたデータの最小値および最大値に対して、以下の条件で棄却検定を行った。

- ・最小値X1に対して式(1)が成立する場合、危険率 $\alpha=10\%$ で異常値として棄却する。

$$Tl = (Xa - X1) / s > Ta \quad (1)$$

- ・最大値Xnに対して式(2)が成立する場合、危険率 $\alpha=10\%$ で異常値として棄却する。

$$Tn = (Xn - Xa) / s > Ta \quad (2)$$

ここで、Xa：平均値、Ta：棄却判定の有意点、 $\alpha$ ：危険率（10%）であり、データ数n=7の時、有意点Ta=1.828となる。

図-6および表-1に、構造物B・右岸擁壁・喫水部・深度3cmと構造物C・左岸擁壁・上部・深度3cmのGrubbs法によるデータ棄却の例を示す。いずれの測点においても、7データのうちの最大値を示したデータが棄却の対象となった。

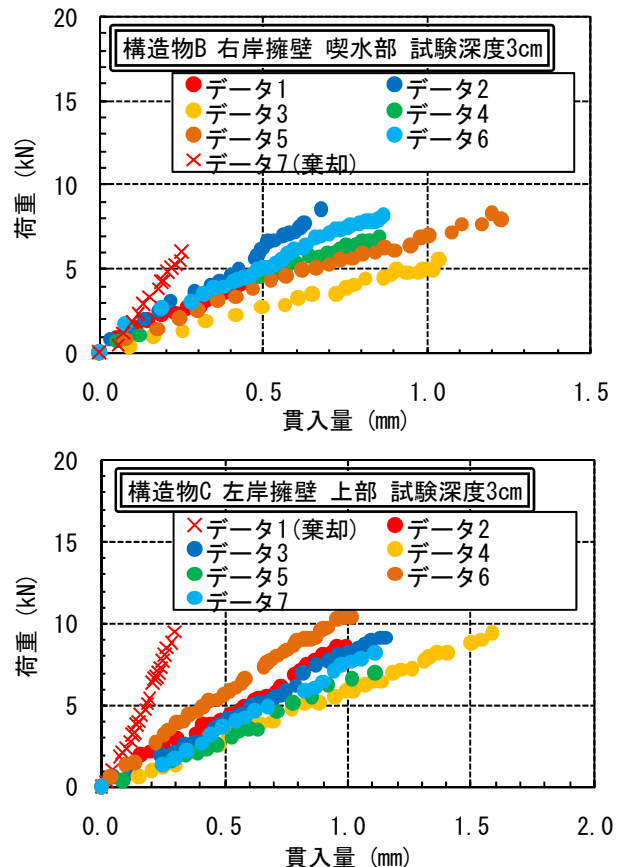


図-6 載荷試験結果 データ棄却例

表-1 載荷試験結果 データ棄却例

構造物	擁壁	部位	試験深度 (cm)	データ No.	貫入抵抗値						
					試験値 $K_n$ (kN/mm)	平均値 $K_a$ (kN/mm)	標準偏差	Grubbs法による棄却検定			棄却後 $K$ (kN/mm)
								最大・最小値の検定	有意点	判定	
B	右岸	喫水	3	1	9.464	10.664	5.634	0.975	1.828	棄却せず	8.713
				2	12.340						
				3	5.169						
				4	8.347						
				5	7.059						
				6	9.900						
				7	22.370						
C	左岸	上	3	1	28.890	10.836	8.133	2.220	1.828	棄却	7.827
				2	8.708						
				3	8.048						
				4	5.858						
				5	6.235						
				6	10.840						
				7	7.270						

棄却されたデータの貫入量-荷重曲線 (図-6) は、いずれの測点についても他の6データよりも傾きが大きい (貫入抵抗値が大きな値となる) ことが見て取れる。これは、前述の、載荷先端が粗骨材に触れている際の挙動に似ており、実際に現地での測定時にはそのように判断し、データ除去対象としていた。

3 構造物計 26 測点のうちデータ棄却を行ったのは 11 測点であり、いずれもここで挙げた事例と同様に全データのうちの最大値の棄却であった。これらについても、現地測定時にデータ除去対象としていたものであり、Grubbs 法によるデータ棄却と経験則によるデータ除去が一致していた。

なお、構造物 B・右岸擁壁・喫水部・深度 3cm では、現地測定時に、データ 3 を空隙の影響による異常値の疑いがあると考え、データ除去対象となりうると考えていた。しかし、Grubbs 法による棄却検定では、このデータは棄却の対象とはならず、ばらつきの範囲内のデータとして扱うことができると判断された。このような結果となったのは、実際には空隙の影響が無かったか、影響が小さかったためと考えられ、経験則では一定の判断が難しいケースと言える。

以上のことは、経験を積んだ試験実施者・データ解析者であれば、粗骨材や空隙の影響が大きな場合には、ほぼ一定の基準でのデータ除去が可能であることを示している。しかし一方で、経験の有無によるばらつきが生じることや、粗骨材や空隙の影響が小さい場合の一定の判断が難しいことも示している。

このため、これまで異常値として認識してきた値を的確に棄却でき、また、経験則では異常値と断定できなかった値を一定の基準で判定できる Grubbs 法は、孔内局部載荷試験のデータ棄却手法として用いることが妥当と言える。

表-2 貫入抵抗値とコンクリート強度

構造物	擁壁	部位	コアの圧縮強度試験		孔内局部載荷試験	
			深度 (cm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験深度 (cm)	貫入抵抗値 (kN/mm)
A	右岸	中間	0~6	26.1	1	8.513
					3	9.604
			6~10	31.0	7	6.330
			12~18	31.9	15	9.013
	左岸	上	0~6	26.9	1	3.865
					3	8.125
					5	7.692
			6~12	32.8	-	-
		14~20	32.9	15	10.514	
	左岸	喫水	0~6	34.9	1	3.903
					3	13.894
			6~12	29.8	7	10.309
				15	8.770	
16~22			29.5	15	8.770	
				15	8.770	
B	右岸	喫水	0~6	35.4	1	4.564
					3	8.713
			6~12	37.9	7	12.197
			12~18	31.8	-	-
	左岸	中間	0~6	20.3	1	4.515
					3	9.105
			6~12	27.4	7	6.730
			12~18	26.3	-	-
C	右岸	喫水	0~6	42.6	1	8.659
					2	9.922
					3	8.647
			6~11	43.0	7	14.187
			13~18	47.7	15	11.742
					15	11.742
	左岸	上	0~6	30.7	1	4.963
					3	7.827
			6~12	38.5	7	20.919
			12~18	39.4	-	-

### 3.2 貫入抵抗値とコンクリート強度

各試験実施箇所の貫入抵抗値と採取コア試料の圧縮強度の関係を表-2に示す。

載荷試験によって得られた貫入抵抗値は、構造物 A・

右岸擁壁・中間部や構造物 C・右岸擁壁・喫水部以外の全てが表層 1cm の値が深部よりも低い傾向にあり、およそ 1/2~1/4 に低下している。これまでの室内実験の結果から、貫入抵抗値が低いほどコンクリート強度の推定値が低くなるということが分かっているため、載荷試験結果からは、構造物のごく表層数 cm に強度低下が生じた領域が存在すると推測できる。

一方、採取コア試料の圧縮強度は 20.3~47.7N/mm<sup>2</sup> であり、表層の値が深部よりも幾分小さな値となっているものがほとんどだが、貫入抵抗値ほど低下していない。これは、圧縮強度試験を実施したコア試料は長さ 6cm 程度であり、試験によって得られた圧縮強度はコア試料全体の“平均値”となっており<sup>5)</sup>、凍害劣化を生じているであろう表層数 cm 部分の強度低下の影響が平均化されているためと考えられる。

ここで、コア試料の圧縮強度と貫入抵抗値の位置関係

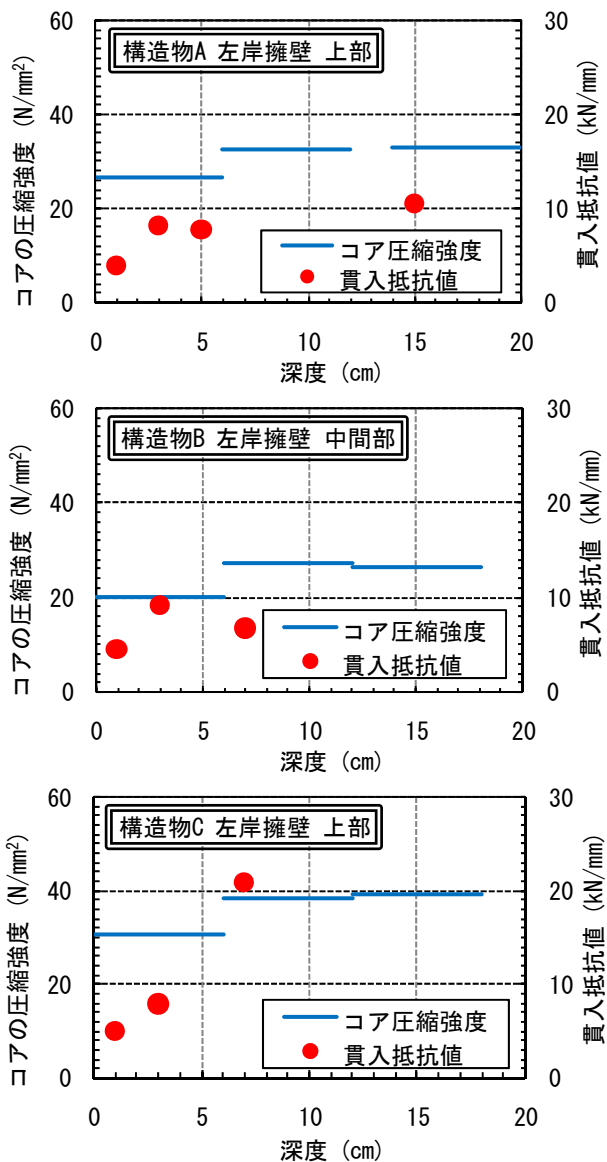


図-7 コアの圧縮強度と貫入抵抗値の位置関係

を図-7に示す。この図では、コアの圧縮強度は長さ約 6cm 範囲の値（平均値）であるため、グラフが階段状の表現となるのに対し、載荷試験は数 cm ピッチで実施可能なため、グラフはより詳細なものとなる。

これらを見ると、コア試料の圧縮強度試験では明確でなかったごく表層の物性変化（強度低下）を、構造物の表層で実施した載荷試験ではより詳細に捉えていることが分かる。

### 3.3 コンクリート強度の推定

貫入抵抗値とコンクリート強度との関係は、これまでの室内実験の結果、29N/mm<sup>2</sup>以下の範囲では比較的データのばらつきが小さく、貫入抵抗値に 4.12 倍（約 4 倍）がコンクリート強度と推定できることが分かっている<sup>3)</sup>。

ここで、本研究で実施した実構造物における貫入抵抗値とコンクリート強度との関係を、これまでに実施してきた室内実験の結果とともに考えることとする。

なお、前述のように、実構造物では構造物の表層数 cm で強度低下が生じていると考えられるため、載荷試験によって表層数 cm の強度低下を捉えたと考えられるデータと、約 6cm 範囲の平均値であるコア試料の圧縮強度試験のデータとを一对で取り扱えない場合が生ずる。

そこで、載荷試験によって表層の物性変化を捉えたとと思われる値や、図-7に示した構造物 B・左岸擁壁・中間部のように近傍のものと大きく異なる値を示しているデータを除去し（表-3の着色した値）、その他については一对の値として取り扱うこととした。

図-8に室内実験および実構造物における貫入抵抗値とコンクリート強度との関係を示す。

室内実験では、コア試料の圧縮強度が高いほどばらつきが大きくなる傾向にあったが、実構造物のデータも同様の傾向を示している。これは、コンクリート強度が高い範囲の強度推定には、載荷試験が適用できないことを示している。しかしながら、ばらつきは大きくなるものの、強度推定の際に強度を低く算出してしまうような、極端に小さな貫入抵抗値を示すことは無いことから、ある程度の強度を有しているという指標として用いる分には問題無いと言える。

ここで、室内実験において相関が高く、試験装置の適用範囲とする意味で設定した 29N/mm<sup>2</sup>以下の値のみの関係を見てみると、室内実験ほど相関はよくないものの、貫入抵抗値からコンクリート強度を推定する際の係数として 3.77 という値が得られた（室内実験では 4.12）。このため、コンクリート強度が 29N/mm<sup>2</sup>以下である場合、貫入抵抗値をおおよそ 4 倍した値がコンクリート強度の推定値とすることができる。

なお、表-3に実構造物における結果をふまえた係数 (3.77) による圧縮強度の推定値を示した。

表-3 圧縮強度の推定値

構造物	擁壁	部位	コア試料の圧縮強度試験		孔内局部荷重試験		<参考> 圧縮強度の推定値 $3.77 \times K$ ( $N/mm^2$ )
			深度 (cm)	圧縮強度 ( $N/mm^2$ )	試験深度 (cm)	貫入抵抗値 K ( $kN/mm$ )	
A	右岸	中間	0~6	26.1	1	8.513	32.1
			6~10	31.0	3	9.604	36.2
			12~18	31.9	7	6.330	23.9
	左岸	上	0~6	26.9	15	9.013	34.0
			6~12	32.8	1	3.865	14.6
			14~20	32.9	3	8.125	30.6
	左岸	喫水	0~6	34.9	5	7.692	29.0
			6~12	29.8	1	3.903	14.7
			16~22	29.5	3	13.894	52.4
B	右岸	喫水	0~6	35.4	1	4.564	17.2
			6~12	37.9	3	8.713	32.8
			12~18	31.8	7	12.197	46.0
	左岸	中間	0~6	20.3	1	4.515	17.0
			6~12	27.4	3	9.105	34.3
			12~18	26.3	7	6.730	25.4
C	右岸	喫水	0~6	42.6	1	8.659	32.6
			6~11	43.0	2	9.922	37.4
			13~18	47.7	3	8.647	32.6
	左岸	上	0~6	30.7	7	14.187	53.5
			6~12	38.5	15	11.742	44.3
			12~18	39.4	1	4.963	18.7
					3	7.827	29.5
					7	20.919	78.9
					-	-	-

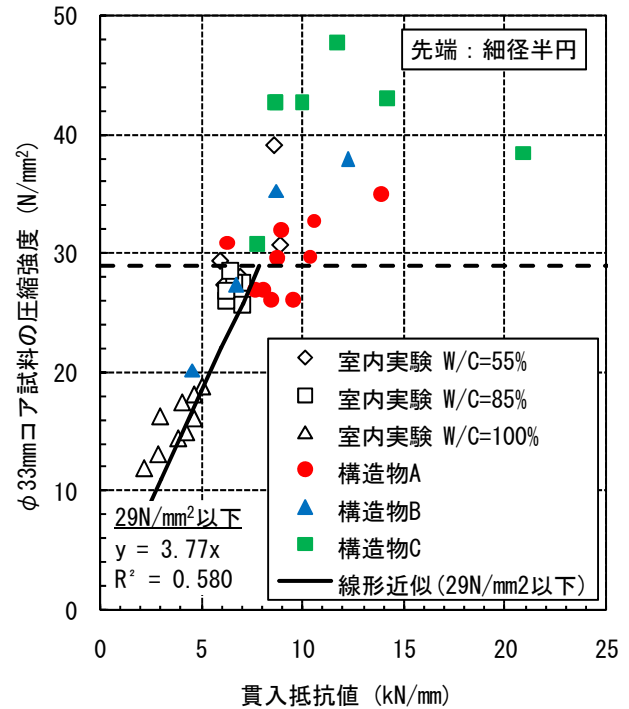


図-8 貫入抵抗値とコンクリート強度

4. まとめ

凍害環境下にある実構造物（河川樋門）において孔内局部荷重試験を行い、凍害による劣化深さ（強度低下の範囲）の把握に関する検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 孔内局部荷重試験は、構造物表層 1~3cm における試験実施が可能であり、構造物表層の物性変化を詳細に捉えることが可能であった。
- (2) 試験データの異常値の棄却は、Grubbs 法を用いることで、経験則ではなく、一定基準の判断ができることが分かった。
- (3) コンクリート強度が  $29N/mm^2$  以下の場合、孔内局部荷重試験によるコンクリート強度の推定値は、貫入抵抗値の約 4 倍となることが分かった。

参考文献

- 1) 皿井剛典, 高橋 輝, 田中 徹, 清水陽一郎: コア

孔を利用した孔内局部荷重試験装置の開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集 6-129, pp.257-258, 2006.9

- 2) 清水陽一郎, 田中 徹, 高橋 輝, 皿井剛典: 孔内局部荷重試験によるコンクリート構造物の強度推定方法に関する研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集 6-130, pp.259-260, 2006.9
- 3) 皿井剛典, 田中 徹, 清水陽一郎, 高橋 輝: 孔内局部荷重試験によるコンクリート性状の把握に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.709-714, 2007.7
- 4) 皿井剛典, 田中 徹, 北山穂高, 金子勝比古: 孔内局部荷重試験によるコンクリート強度推定に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.891-896, 2008.7
- 5) (社) 日本コンクリート工学協会北海道支部: 凍害と耐久性設計研究委員会報告書, 2008.10
- 6) 長谷川寿夫, 藤原忠司: コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害, 技報堂出版, 1988.2
- 7) (株) 銭高組, 前田建設工業 (株), 日本国土開発 (株), (独) 土木研究所: 小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領 (案), 2006.5
- 8) 林田 宏, 田口史雄, 遠藤裕丈, 草間祥吾: 環境因子と実構造物の凍害劣化との関連性, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, pp.249-256, 2008.8