論文　孔内局部載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究

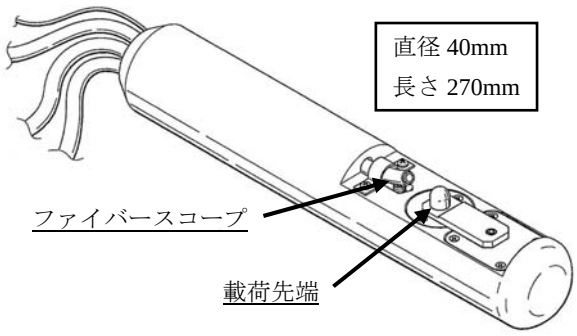
皿井　剛典[*1]・田中　徹[*2]・澤口　啓希[*3]

要旨：本稿は，構造物の深さ方向のコンクリートの圧縮強度の分布を“微破壊（φ42mm コア削孔）”により測定可能な「孔内局部載荷試験」を用い，施工不良や塩害，火害による強度低下深さの把握に関して検討したものである。また，これまで検討がなされてきた圧縮強度の推定に加え，静弾性係数の推定の可否についても検討した。実構造物および室内試験の結果，施工不良や火害といった，モルタル部分の物性低下がコンクリートの圧縮強度に影響するような劣化の強度低下深さの評価が可能であることが分かった。また，「孔内局部載荷試験」により，圧縮強度だけでなく静弾性係数についても推定可能であることが分かった。

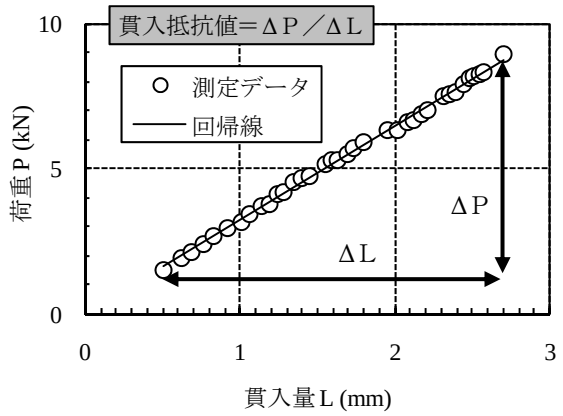
キーワード：孔内局部載荷試験，微破壊試験，劣化深さ，コンクリート強度，静弾性係数

1. はじめに

「孔内局部載荷試験」（以下，載荷試験）は，凍害によるコンクリート構造物の劣化深さを評価・診断することを目的として開発された試験手法である[1)]。載荷試験は，**図－１**に示す直径 40mm，長さ 270mm と小型の孔内局部載荷試験装置（以下，試験装置）を用い，小径の直径 42mm でコア削孔した孔内において実施できるため“微破壊試験”に位置づけることができる。



図－１　孔内局部載荷試験装置



図－２　貫入抵抗値の算出方法

筆者らは，これまでに，河川樋門[2)]や砂防堰堤[3)]などの実構造物を対象に，主に凍害劣化による劣化深さの評価・診断を行った結果として，載荷試験時に得られる荷重と貫入量（変位量）を基に算出される“貫入抵抗値”（**図－２**）と，採取したコア試料の圧縮強度試験結果との関係から，貫入抵抗値を約 4 倍することでコンクリートの圧縮強度を推定できること[2)]や，深さ 1cm ごとの測定により構造物の表層 1～3cm の物性変化を詳細に捉えることが可能であること[2)]を確認してきた。

本研究では，施工不良や塩害，外力による劣化程度・深さの把握や，火害による強度低下深さの評価への載荷試験の適用性について，実構造物および供試体により検討した。また，載荷試験時に採取したコア試料の圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施し，貫入抵抗値との関係について検討した。

2. 試験内容

2.1 試験対象

(1) 実構造物

実構造物における試験は，橋梁 3 構造物（1～3）およびトンネル 1 構造物の計 4 構造物で実施した。試験は，橋梁は上部工の床版において，トンネルは覆工において実施した。構造物の劣化状況と試験深度を**表－１**に示す。なお，いずれの構造物についても，コンクリートの設計基準強度は不明である。

橋梁上部工 1 は，北陸地方の竣工後 43 年が経過した PC プレテンション床版橋（橋長 11.7m）であり，PC 桁間の間詰めコンクリートの一部にジャンカが発生した状態である。橋梁は塩害環境にあるものの，現状では塩害

*1 川崎地質（株）　事業本部保全・エネルギー部課長代理　工修　(正会員)
*2 戸田建設（株）　土木営業統括部環境ソリューション部土木リニューアル課主任　工修　(正会員)
*3 川崎地質（株）　事業本部保全・エネルギー部主任　(正会員)

表－１　構造物の概要と試験条件

構造物		諸元等	経過年数	部位	劣化状況	試験深度 (cm) 孔内局部載荷試験	試験深度 (cm) φ33mmコア試験	部材厚 (cm)
橋梁上部工	1	PCﾌﾟﾚﾃﾝｼｮﾝ床版橋 橋長11.7m	43	健全	外観上の劣化なし	床版下面から 1,3,5,10,20	床版下面から 8～14,16～22	約500
				中間	軽度の骨材露出		床版下面から 0～6,8～14,16～22	
				劣化	ジャンカ，骨材露出		床版下面から 0～6,8～14	
	2	RC床版橋 橋長3.6m	48	劣化	ジャンカ，骨材・鉄筋露出	床版上面から 2,12,16,17,18,19,20,21	床版上面から 0～6,16～22	250
	3	RC床版橋 橋長3.05m	不明	健全	外観上の劣化なし	床版上面から 2,4,16,18,27,29,31	床版上面から 14～20,25～31	330
				劣化	剥離，鉄筋露出	床版上面から 2,4,6,14,16,18,27,29,31		
トンネル覆工		延長65m 幅6m 高さ6.1m	48	濁音	打音時に濁音発生	覆工表面から 1,2,4,8,10	覆工表面から 8～14	約70
				ひび割れ	ひび割れ			

による劣化は生じていない。また，桁下面への水分の供給は無いため，凍害劣化も生じていない。試験は，ジャンカが発生し骨材が露出した状態の劣化部と，骨材露出が軽度な中間部，外観上健全な健全部の 3 箇所で実施した。

橋梁上部工 2 は，北陸地方の竣工後 48 年が経過した RC 床版橋（橋長 3.6m）である。橋梁は，塩害環境にはおかれておらず，また，水分の供給が無いため凍害劣化も生じていない。桁下面への床版下面が施工時に発生したと考えられるジャンカとその後の剥落によって骨材および鉄筋が露出した状態である。そのため，現状では剥落していないものの，ジャンカの影響による強度低下範囲を把握するため，劣化部 1 箇所で試験を実施した。

橋梁下部工 3 は，北陸地方の経過年が不明な，RC 床版橋（橋長 3.05m）であり，塩害環境にあり，実際に床版下面に塩害劣化と考えられる剥離や鉄筋露出が発生した状態である。試験は，鉄筋露出が発生した劣化部と，外観上健全な健全部の 2 箇所で実施した。

トンネル覆工は, 関東地方の竣工後 48 年が経過した延長 65m の道路トンネルの覆工コンクリートを対象とした。トンネルは山間部に位置するが，コンクリートに凍害が発生する環境ではない。試験は，打音検査時に濁音が発生した濁音部と，ひび割れが発生しているひび割れ部の 2 箇所で実施した。

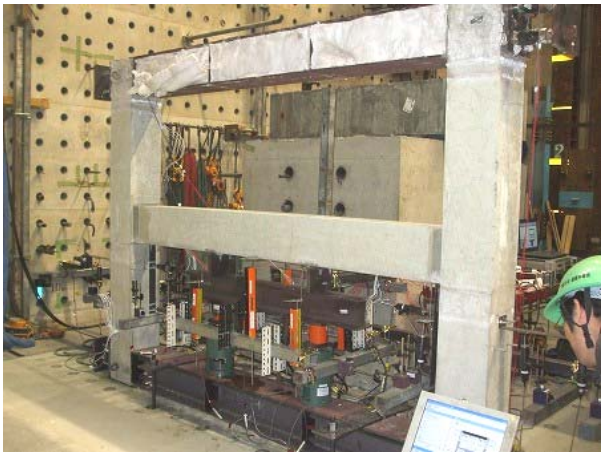
なお，試験は，原位置の直径 42mm コア孔内における載荷試験と，採取した直径 33mm コア試料を用いた圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。

表－２　火害供試体の試験条件

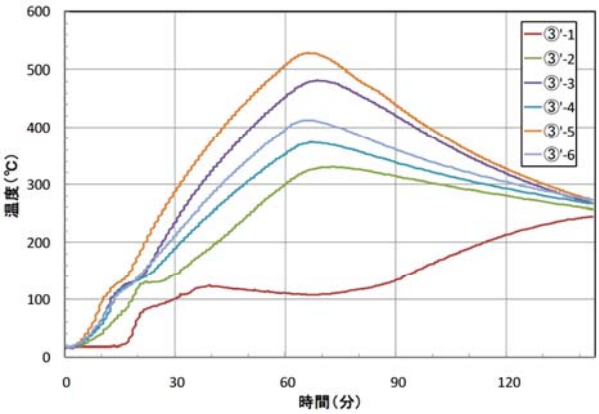
供試体	部位	試験深度 (cm) 孔内局部載荷試験
火害	健全	ｺﾝｸﾘｰﾄ表面から 1,3,6,12.5
	400℃（鉄筋位置の最高温度）	ｺﾝｸﾘｰﾄ表面から 1,2,3,4,5,6,8,10,12.5
	500℃（鉄筋位置の最高温度）	

(2) 火害供試体

火害による強度低下深さの評価の検討のため，試験に用いた供試体（火害供試体）は，**写真－１**に示すような 250mm×250mm の柱と 250mm×200mm の梁からなる大型供試体である。使用されたコンクリートの呼び強度は，



写真－１　火害供試体



図－３　鉄筋位置における温度履歴
鉄筋位置の最高温度 500℃

21N/mm^2 である。

この供試体に対し，部位により受熱温度が変わるように**図－３**に示すような温度履歴で加熱し，加熱後の柱部を試験対象とした。試験は，深さ 4cm の鉄筋位置の最高温度が 500℃および 400℃となった部位と，加熱しない健全部において実施した。試験の条件を**表－２**に示す。

なお，火害供試体では，試験時のコア削孔の際に，コア試料が細かく寸断され，室内試験が実施できる状態で採取することができなかった。そのため，火害供試体における試験は，載荷試験のみとし，コア試料の圧縮強度試験および静弾性係数試験は，実施していない。

2.2 試験方法

(1) 孔内局部載荷試験

載荷試験は，直径 42mm コア削孔した孔内において実施した。試験は，i) 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し，iii) 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) 貫入時の孔壁への荷重と貫入量をデータ収録，vi) 同一深度において測定方位を変え 6 点程度のデータを取得することにより行った。

試験により取得した荷重と貫入量のデータをもとに，荷重－貫入量曲線から貫入抵抗値を算出し，貫入抵抗値を 4 倍することでコンクリートの圧縮強度を推定した。

なお，荷重－貫入量曲線は，試験実施時にリアルタイムにノートパソコンに表示され，貫入抵抗値の暫定値が算出可能である。これまでの経験から，貫入抵抗値が 20kN/mm を超える場合には，骨材部分を載荷していることが分かっていることから，暫定値が 20kN/mm を超える場合には，骨材の影響としてデータを棄却した。

(2) 圧縮強度試験・静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験は，削孔時に採取された直径 33mm コア試料を用い，長さ約 66mm に切断・成形し実施した。試験用試料は，可能な限り載荷試験位置と対応する範囲を選定したが，コア試料の破断箇所や骨材の含有状況により，試料の選定ができない部位もあった。

なお，試験を実施した構造物の骨材の最大粒径は 20～25mm であり，供試体寸法に対する骨材寸法の影響が懸念される。そのため，小径コア試験による強度測定 [3)]で用いられている試験後のコア試料の破壊状況を基にした棄却方法を参考に，データを棄却した。

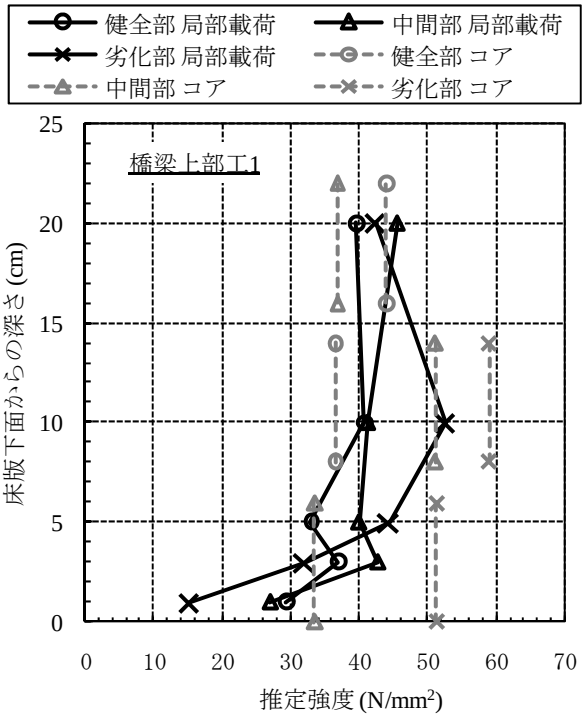
なお，静弾性係数試験は，長さ 30mm のひずみゲージをコア試料側面に貼り付け，圧縮強度試験と同時に試験を実施した。ひずみゲージは，極力，骨材部分を避け，モルタル部分に貼り付けた。

3. 試験結果および考察

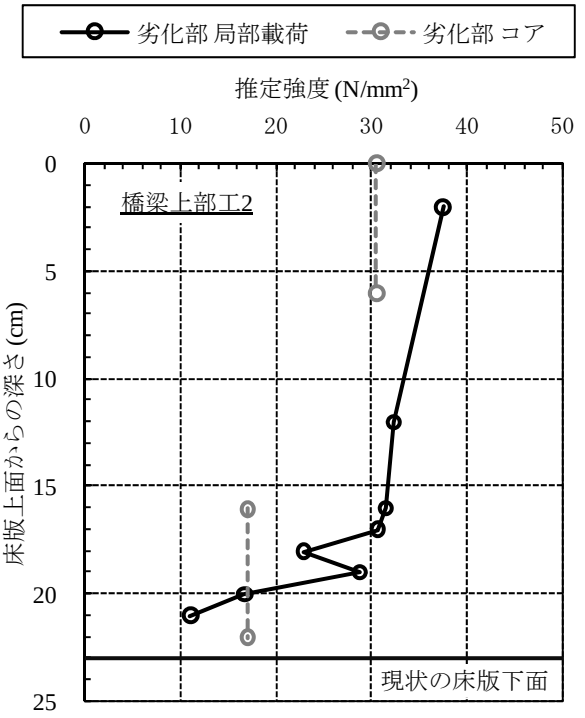
3.1 劣化程度・深さの把握に関する検討

(1) ジャンカ，骨材露出の影響の評価

橋梁上部工 1 の載荷試験およびコア試験の結果を**図－４**に，橋梁上部工 2 の結果を**図－５**に示す。橋梁上部工 1 および 2 の劣化部は，床版下面にジャンカが発生し，



図－４　載荷試験およびコア試験結果
橋梁上部工 1



図－５　載荷試験およびコア試験結果
橋梁上部工 2

骨材が露出した状態である。

橋梁上部工 1（**図－４**）では，載荷試験により，劣化部の深さ 1cm の推定強度が 15N/mm^2 程度，3cm が 32N/mm^2 程度であり，5cm 以深が 40N/mm^2 以上の強度を示すのに対し，2～6 割の強度低下が生じていることが分かる。また，中間部や健全部では，深さ 1cm の推定強度が，3cm 以深の強度と比べ 2～4 割低下しており，外観だけでは評価できない強度低下を捉えている。

コア試料の圧縮強度は，強度低下が確認された床版下面近傍も含めいずれも 34N/mm^2 以上であり，床版下面近傍の強度低下を表す結果とはなっていない。

橋梁上部工 2 （**図－５**）は，床版下面に剥落による断面欠損が生じている。載荷試験の結果，床版上部の推定強度が 30N/mm^2 以上であるのに対し，現状の床版下面から 3～5cm の範囲では 30N/mm^2 以下の強度となっていることが分かった。更に，床版下面近傍の深さ 20cm および 21cm 位置では，推定強度が 20N/mm^2 を下回っている。

コア試料の圧縮強度は，床版上部では 30N/mm^2 程度であるのに対し，床版下面近傍では 17N/mm^2 であった。コア試験の結果は，床版上部では載荷試験結果と同様であるものの，床版下面近傍では載荷試験における深さ 21cm 位置の強度低下を反映した結果とはなっていない。

以上のことから，施工不良により生じたジャンカや骨材露出の影響は，載荷試験による深さ方向の強度測定により，コンクリートの圧縮強度の低下範囲・深さを詳細に把握することで，より正確に評価できる。

一方，コア試験は，試験結果が試料の長さの平均値としてしか表すことができないことから，載荷試験で確認されたような強度低下を詳細に把握することができない。

(2) 剥離，濁音，ひび割れの影響の評価

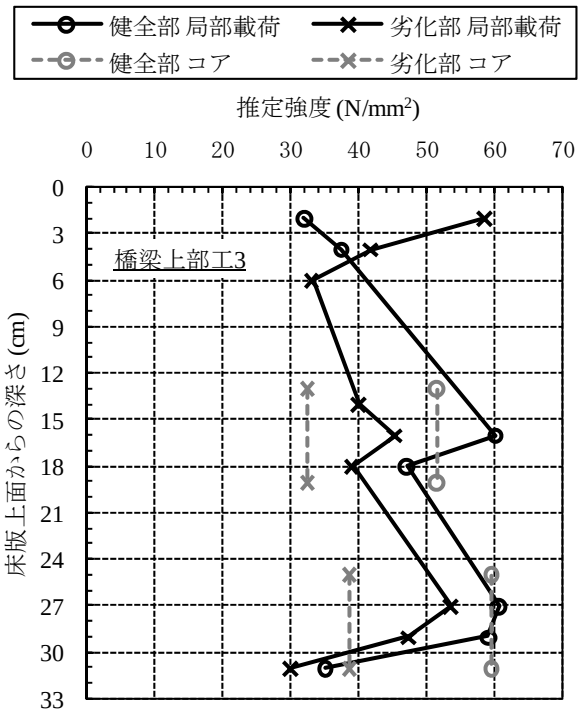
橋梁上部工 3 の載荷試験およびコア試験の結果を**図－６**に，トンネル覆工の結果を**図－７**に示す。橋梁上部工 3 の劣化部には塩害劣化と考えられる鉄筋腐食による剥離が，トンネル覆工には濁音やひび割れが発生した状態である。

橋梁上部工 3（**図－６**）の載荷試験の結果，健全部・劣化部ともに，いずれの深さにおいても 30N/mm^2 以上の圧縮強度であるが，深さごとの品質のばらつきが大きい状態であることが分かった。このばらつきの原因は，局部的なコンクリートの品質を捉えたためや測定誤差のためである可能性が考えられる。

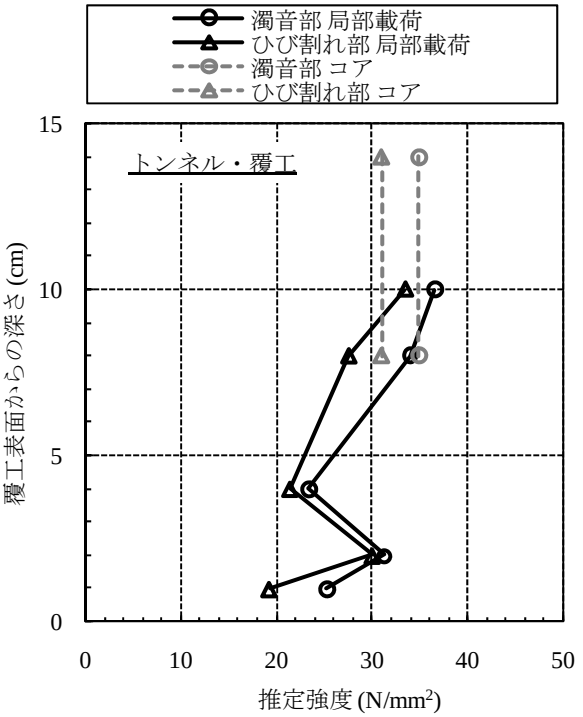
トンネル覆工（**図－７**）では，載荷試験により，深部（グラフ上側）で強度が高く，覆工表面で幾分強度低下が生じていることが分かった。但し，覆工表面付近では，前述の橋梁上部工(3)と同様に強度のばらつきが大きい。コア試料の圧縮強度は，載荷試験結果と同様の値を示している。

橋梁上部工 3 やトンネル覆工は，鉄筋腐食による剥離や外力による濁音・ひび割れが生じた構造物であり，前述の橋梁上部工 1 や 2 のジャンカやこれまでに行われた凍害劣化のように，モルタル部分の物性低下がコンクリートの圧縮強度に影響するケースとは異なる。

そのため，橋梁上部工 3 やトンネル覆工では，外観等



図－６　載荷試験およびコア試験結果
橋梁上部工 3



図－７　載荷試験およびコア試験結果
トンネル覆工

による劣化状況の判断と，コンクリートの圧縮強度による評価との関係が明確とはならなかったと考えられる。

(3) 火害の影響の評価

火害供試体における載荷試験の結果を**図－８**に示す。火害供試体では，加熱の影響を受けていない健全部，鉄筋位置（深さ 4cm）の最高温度が 400℃および 500℃となった部位で試験を実施した。

健全部の推定強度は 20～25N/mm^2 であり，いずれの深さにおいても概ね呼び強度 21N/mm^2 程度となっている。

一方，加熱の影響を受けた 400℃と 500℃の部位では，表層 1cm の推定強度が 5N/mm^2 以下と極端に低下している。また，推定強度は深部ほど高くなる傾向にあるが，呼び強度を超えるのは 400℃では深さ 8cm，500℃では深さ 10cm である。更に，推定強度は，400℃よりも 500℃の方がより低下しており，500℃では深さ 8cm まで 15N/mm^2 以下の値となっている。

一般に，熱を受けたコンクリートは圧縮強度の低下が生じ，温度が高いほど強度低下がより大きくなることが知られているが [4]，本試験の結果は，一般的な現象と同様の結果を示すだけでなく，構造物表面の加熱温度の違いが，強度低下深さに影響することを示している。

以上のことは，これまで定量的な評価が難しかった火害診断の一手法として，載荷試験の適用が可能であることを示唆している。

3.2 貫入抵抗値と圧縮強度・静弾性係数に関する検討

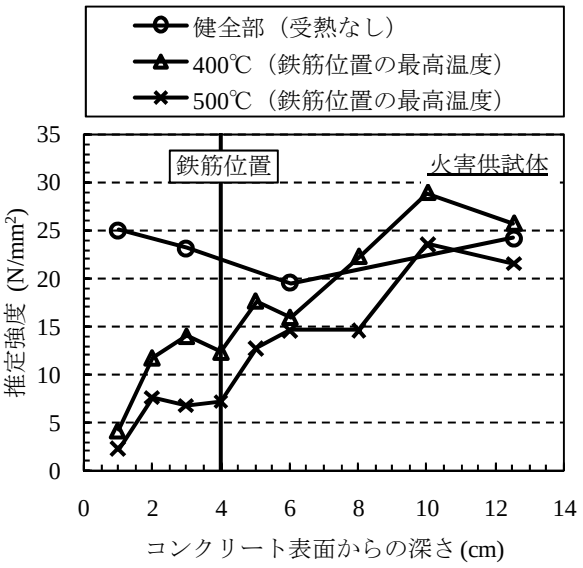
(1) 貫入抵抗値と圧縮強度

載荷試験により得られる貫入抵抗値と採取したコア試料の圧縮強度の関係は，これまでに実施した室内試験や実構造物での試験の結果，コンクリート強度が 29N/mm^2 以下の時，貫入抵抗値を約 4 倍することでコンクリートの圧縮強度を推定できることが分かっている [2]。

本研究における載荷試験およびコア試験の結果を**表－３**に示す。なお，表に示した載荷試験結果（貫入抵抗値，推定強度）は，φ33mm コア試料の採取範囲である約 6cm 範囲に含まれるデータを平均したものである。

載荷試験結果を 2～3 点平均すると，コア試料の圧縮強度と近似した値となることが分かる。これは，コア試料の圧縮強度が“長さの平均値”としての値であるのに対し，載荷試験が“点”の圧縮強度であり，点のデータの集合（平均）が長さのデータとなっていることを示している。なお，劣化部や中間部の表層は，強度低下部を含むため，コア試料の圧縮強度と近似しない場合もある。

これらのデータを，これまでに得られているデータに照らし合わせると**図－９**のようになる。なお，これまでのデータの一部は，載荷試験を平均化するデータ数や，載荷試験に対応するコア試料の圧縮強度試験のデータの棄却について再検討した結果を用いている。



図－８　載荷試験およびコア試験結果
火害供試体

表－３　載荷試験およびコア試験結果一覧

構造物		部位	深度 (cm)	孔内局部載荷試験 貫入抵抗値 (kN/mm)	孔内局部載荷試験 推定強度 (N/mm^2)	φ33mm コア試料 圧縮強度 (N/mm^2)	φ33mm コア試料 静弾性係数 (kN/mm^2)
橋梁上部工	1	健全	8～14	10.200	40.8	36.6	26.4
			16～22	9.875	39.5	44.0	23.4
		中間	0～6	9.125	36.5	33.5	47.9
			8～14	10.300	41.2	51.1	23.2
			16～22	11.400	45.6	36.9	25.4
		劣化	0～6	9.125	36.5	51.3	34.7
			8～14	13.125	52.5	59.0	29.7
	2	劣化	0～6	9.400	37.6	30.5	24.1
			16～22	5.900	23.6	17.0	12.1
	3	健全	14～20	13.425	53.7	51.5	27.9
			25～31	12.925	51.7	59.6	30.3
		劣化	14～20	10.375	41.5	32.5	26.9
			25～31	10.925	43.7	38.7	33.0
ﾄﾝﾈﾙ覆工		濁音	8～14	8.800	35.2	34.9	19.0
		ひび割れ	8～14	7.625	30.5	31.0	15.5

本研究で得られたデータは，これまでの貫入抵抗値とコンクリートの圧縮強度との関係と同様の傾向を示している。更に，これまで 29N/mm^2 以下という条件下で相関性が認められていたが，本研究の結果を含めることで，29N/mm^2 以上の強度であっても，これまでと同じように貫入抵抗値を約 4 倍することでコンクリートの圧縮強度が推定できることが分かった。

但し，これまでと同様に，圧縮強度が低いほど誤差が小さく，高いほど誤差が大きくなる傾向となっている。このため，圧縮強度が低いコンクリートではより精度の高い推定が可能であるが，強度が高いコンクリートでは 20%程度の誤差範囲での推定となる。

(2) 貫入抵抗値と静弾性係数

これまで，貫入抵抗値と圧縮強度との関係を検討してきたが，本研究では，コア試料の静弾性係数についても測定していることから，貫入抵抗値と静弾性係数の関係から，貫入抵抗値から静弾性係数を推定する際の推定式や係数について検討する。

橋梁上部工 1 の劣化部や中間部，橋梁上部工 2 の劣化部の表層 0～6cm 部分の結果は，ごく表層 1cm の劣化による極端な強度低下部分を含んだものであり，コア試料の試験結果の信頼性が低いと判断し，**表－３**の着色部分を除いたデータについて比較した。

その結果，**図－１０**に示す関係が得られ，データ数は少ないものの圧縮強度よりも高い相関となり，貫入抵抗値の 2 倍程度が静弾性係数となる結果となった。但し，現状ではデータ数が少ないことから，今後，更にデータを蓄積し，両者の関係を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では,孔内局部載荷試験による施工不良や塩害，火害といった，これまで検討してきた凍害劣化以外の劣化の評価への適用性について検討し，また，貫入抵抗値と圧縮強度，静弾性係数との関係について検討した。その結果，以下の知見が得られた。

(1) 孔内局部載荷試験は，ジャンカ等の施工不良や火害といった，モルタル部分の物性低下がコンクリートの圧縮強度に影響する劣化の，深さ方向の強度低下を把握するための微破壊試験手法として有効である。

(2) 孔内局部載荷試験は，深さ 1cm ごとに強度を測定できるため，外観上の判断やコア試験では把握不可能な強度低下範囲・深さの詳細な評価が可能である。

(3) 圧縮強度が 60N/mm^2 程度までであれば，圧縮強度と貫入抵抗値との関係から，貫入抵抗値を約 4 倍することでコンクリート強度の推定が可能である。

(4) 圧縮強度と同様に，貫入抵抗値からコンクリートの静弾性係数を推定できる可能性があることが分かった。但し，今後，データの蓄積により両者の関係を更に検討する必要がある。

謝辞

火害供試体を用いた検討の際には,（財）日本建築総合試験所の阪口明弘様，春畑仁一様に，供試体の提供，コア削孔などご協力頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

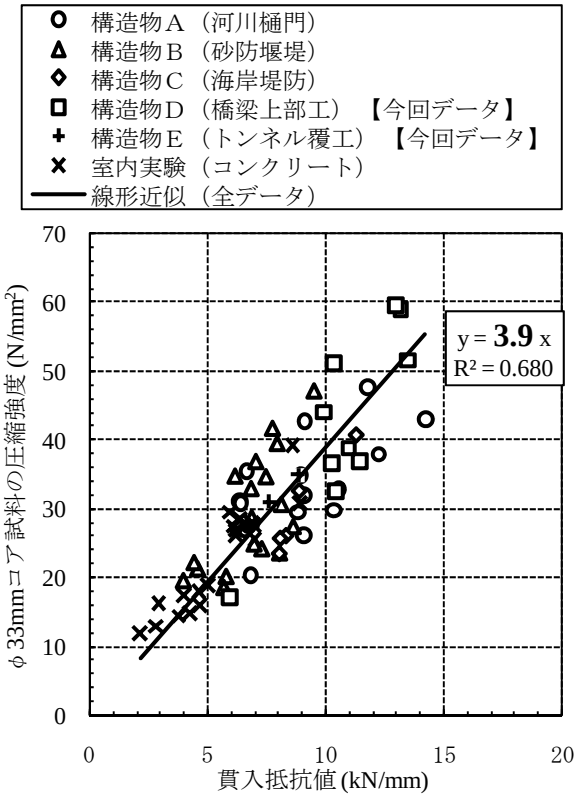
参考文献

1) 皿井剛典，田中　徹，清水陽一郎，高橋　輝：孔内局部載荷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

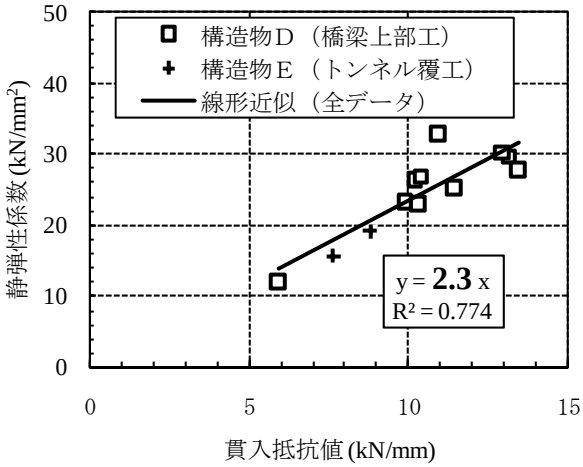
2) 皿井剛典，林田　宏，田中　徹，澤口啓希：孔内局部載荷試験による凍害劣化深さの把握に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.31, No.1, pp.1177-1182，2009.7

3) （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

4) （社）日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針（案）・同解説，pp.35，2010.2



図－９　貫入抵抗値とコンクリート強度



図－１０　貫入抵抗値と静弾性係数