機械インピーダンス法による各種劣化コンクリート強度の検討

Examination of the strength of various deteriorated concrete by mechanical impedance method

北見工業大学 技術部 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 日東建設㈱ アプライドリサーチ(株)

1.緒言

我が国の社会資本は、戦後の高度経済成長とともに整 備されてきたが、今後更新時期を迎え維持・管理費の膨 大化が懸念されている。社会資本の有効な維持管理にお いては、此までの損傷等が発生した後に対処する「事後 的管理」から、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置 するという「予防保全的管理」へと転換し、戦略的な維 持管理を実施することが求められている。

非破壊試験の中でハンマーによるコンクリート強度を 測定する手法としては、一般に広くリバウンドハンマー が使用されている。しかしこのリバウンドハンマーは、 強度の推定精度に課題¹⁾があり、近年国交省では新設 構造物を対象として超音波法及び衝撃弾性波試験法によ る強度測定手法が導入されている。

しかしながら、各種非破壊強度試験は、コンクリート の平滑な測定面を対象とするため、表面劣化が進行した 場合、その適用が難しいというのが実状である。

現行でリバウンドハンマー及び縦弾性波速度等による 強度を測定する際コンクリート面に凹凸がある場合等は、 研磨処理装置などで平滑に表面処理を施す前処理を行う 必要がある。しかし、一般的に非破壊試験では、構造物 に損傷を与えず性能を把握すること、調査時間・費用を 軽減できること等が求められる。

これらの要望に沿う手法として、最近,機械インピー ダンス法²⁾が開発・実用化されている。



写真1 ハンマー(機械インピーダンス法)

本研究で使用した機械インピーダンス法ハンマー(写 真1参照)は、ハンマー部に加速度計が内蔵されており、 コンクリートを打撃した際に加速度を計測し、打撃力の 時間波形を測定・解析することによりコンクリート表面 の強度の推定、表面劣化の度合い等を測定できる機能を 有している。

筆者らは、これまで機械インピーダンス法ハンマーを

正員 岡田 包儀 (Kaneyoshi Okada) 正員 井上 真澄 (Masumi Inoue) 学生員 須藤 貴史 (Takahumi Sudoh) 正員 久保 元 (Hajime Kubo) 正員 境 友昭 (Tomoaki Sakai)

使用し、前処理(表面を切削し平滑化)無しではその適 用が困難とされている表面劣化が進行したコンクリート 面を対象にした強度推定手法の検討を行ってきた³⁾。 既往の研究では、水路コンクリート等、土粒子を含む水 流の摩耗作用を受けたコンクリートにおいては、表面劣 化が進行するが表層内部強度が低下しないため機械イン ピーダンスハンマーを使用することにより表面劣化の影 響を受けず内部の強度を測定することが可能であること が明らかとなっている。

本研究は、この一環として機械インピーダンス法ハン マーを使用し通常よりも表面劣化に加え表層内部の脆弱 化が進んだコンクリートを対象とした強度の測定及び評 価手法の検討を行った。

2. 研究方法

2.1 コンクリート供試体の作成及び凍結融解試験によ る劣化コンクリートの作成

(1) 使用材料

コンクリートの使用材料を表1に示す。

表 1	コンクリ	ートの	D使用材料
-----	------	-----	-------

セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16 g/cm ³
粗骨材	陸砂利(幕別産)	表乾密度: 2.65 g/cm ³
		最大寸法: 25 mm
細骨材	陸砂(幕別産)	表乾密度: 2.62 g/cm ³
混和剤	AE剤 標準型	

(2) コンクリートの配合

コンクリートの配合については、通常の土木構造物 (W/C=55%以下)よりも W/C が大きい(70%)貧配合 のコンクリート(表2参照)を作成した。 表2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m³)				
(%)	(%)	W	С	S	G	AE剤
70	48	165	236	900	986	C × 0.006%

(3) コンクリートの練り上がり性状及びコンクリート の作成

コンクリートの練り上がり目標値については、スラン

プを 8.0cm ± 1.5cm, 空気量を 4.5% ± 1.0%に設定した。 コンクリートの練り上がり性状値については、スランプ が 8.5cm、空気量が 4.7%であった。練り上がったコン クリートは、角柱型枠(10×10×40cm:計3体)に打 ち込み、その後、材齢1日より標準養生を行った。 (4)凍結融解試験による劣化コンクリートの作成

養生後、凍結融解試験を JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」A 法に準じて凍結融解を 300 サイクル実施し劣化コンクリートを作成した。劣化コンクリート供試体(写真2参照)は、表面劣化部強度及び内部強度(20mm)測定用とした。

2.2 試験方法及び測定原理

(1) コンクリート供試体の劣化状況の測定

コンクリート供試体の劣化状況をおさえるため質量、 一次共鳴振動数(JIS A 1127-2001)を測定し凍結融解回 数 300 サイクル終了時の相対動弾性係数及び質量減少率 を求めた。

また、凍結融解回数 300 サイクル終了時におけるコン クリート表面の平均劣化深さを測定した。

- (2) 測定位置の設定
- a) 劣化表面

劣化コンクリートの測定面は,型枠の両側面部に位置 するコンクリート面を対象として各面 13 箇所、合計 26 箇所を設定した。(供試体:No.1・No.2) b)内部測定面(20mm)

前半の劣化面強度測定後、コンクリート内部において 劣化の影響が少ないと想定される深さ(20mm)まで、 切削・平滑化し内部測定面を設定した。測定面は、切削 した 1 側面とし、13 測定箇所を設定した。(供試体: No.1・No.2)

(3) 機械インピーダンス法の測定原理

機械インピーダンス法の測定原理は、コンクリート表 面のバネ係数を求める方法である。バネ係数、すなわち コンクリート表面の弾性的性質は、材料の弾性係数に依 存した量である。つまり、ある程度の誤差を認めれば、 弾性係数に比例する測定量を得ることによって、コンク リートの圧縮強度が推定できることを意味する。

機械インピーダンス法では、ハンマーで直接コンクリ ート面を打撃する。この時、ハンマーの持つ運動エネル ギーは、コンクリート表面の変形エネルギーと釣り合う。 すなわち、

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}KD^2$$
 (1)

である。ここで, M, V は、ハンマの質量, 衝突時の 初期速度、またK, D はバネ係数, コンクリート表面の 最大変位量である。

$$D = \frac{F}{K} \tag{2}$$

の関係があり,これを代入して、

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}\frac{F^2}{K}$$
(3)

よって、

$$\sqrt{MK} = \frac{F}{V} \qquad , \qquad K = \frac{1}{M} \left(\frac{F}{V}\right)^2 \qquad (4) , (5)$$

として、機械インピーダンス値及びコンクリート表面 のバネ係数が決定される。なお,Fは最大打撃力であり、 ハンマー側にセンサーをつけることによって、F及び V は測定することができる。機械インピーダンス法では、 リバウンド側の波形によってコンクリート表面のバネ係 数を求める方法を用いており、表面劣化の影響を回避す ることができる。

今回使用した機械インピーダンス法ハンマーは、表面 劣化が進行しているためハンマー質量 380g を使用した。 (4) 機械インピーダンス法ハンマーによる測定方法

機械インピーダンス法ハンマーによる強度測定を行う 際、日本材料学会の方法⁴⁾に準じ圧縮試験機を用い測 定供試体に圧縮応力 0.74N/mm²(7.5kg/cm²)をかけ圧定 して測定した。

強度測定用 No.1 強度測定用 No.2

No.3



写真2 劣化供試体(凍結融解300サイクル終了時)



写真3測定状況(左:劣化面,右:内部深さ20mm)

測定は前半(劣化面)と後半(内部測定面)に分け前 半は、劣化した測定部を前処理無しで打点領域の各測定 箇所において同一地点で10回連続打撃(合計26箇所) し強度指標値を測定(写真3参照)した。これは、同一 点を連続的に打撃することにより脆弱な劣化部を潰し、 表層研磨と同等の強度指標値が次第に得られるかどうか を確認するためである。

前半の劣化面測定後、劣化による強度低下の影響が少 ないと想定される内部強度測定用供試体を 20mm 切削 し作成した。この内部面の測定方法は、各打点領域内で 測定打撃点をずらし4点ずつデータ(合計 13箇所)を 測定(写真3参照)した。

3. 測定結果と考察

3.1 コンクリート供試体の劣化状況の測定結果

凍結融解300 サイクル終了後の強度の指標を示す相対 動弾性係数については、81.3%(No.1),87.9% (No.2)90.3%及び(No.3)で平均86.5%あった(図1 参照)。

凍結融解 300 サイクル終了後の表面劣化量の指標を示 す質量減少率については、それぞれ 4.40% (No.1), 3.21% (No.2) 及び 4.00% (No.3) で平均 3.87% あった (図 2 参照)。



図1 凍結融解回数と相対動弾性係数の関係



図2 凍結融解回数と質量減少率の関係

平均劣化深さについては、両側面部を測定対象として 求めたが、それぞれ 1.76mm (No.1)及び 1.41mm (No.2)で平均 1.59mm あった。

今回試験に用いた劣化供試体は、相対動弾性係数の結 果(平均 86.5%)から表面劣化のみならず内部への脆弱 化が進行していることが推察できた。

3.2 機械インピーダンス法による強度指標値の測定結 果及び考察

機械インピーダンス法ハンマー(380g)を使用した表 面劣化部(連続打撃:計 10 回)と切削後の内部測定面 (20mm)との強度指標値の結果を表3に示す。

表 3 機械インピーダンス法ハンマーを使用した表面劣 化部と内部測定面との強度指標値の結果

	切削・研磨前(前処理無し)			指標値比率
運続打撃 回数	累積平均指 標値	全平均に対する各 指標値の割合(%)	全数26中採用率 (偏差±02)	内部強度に対する 表層強度の割合 (%)
1	1.27	98.6	82.7	87.6
2	1.29	99.8	90.4	88.6
3	1.29	99.8	86.5	88.6
4	1.29	99.8	86.5	88.6
5	1.29	100.2	84.6	89.0
6	1.29	100.2	94.2	89.0
7	1.30	100.5	92.3	89.3
8	1.30	100.5	90.4	89.3
9	1.30	100.5	90.4	89.3
10	1.29	100.2	90.4	89.0

20mm 切削・研磨後の健全部の平均強度指標値:1.45 採用データ(偏差±0.2)全総数52点中採用率:98.1% 表3の結果は、No.1及びNo.2供試体の平均値である。 a)表面劣化部

表面劣化部の強度指標値については、1.27~1.30の範

囲(平均1.29)で同一点の連続打撃回数に関わらず比較 的安定した値を得た。各強度指標値の累積打撃回数の平 均値に対し1打撃目の打撃値については、98.6%と若干 の低下傾向が認められるが推定強度に大きな影響が少な いものといえる。この結果から打撃回数については、実 用上劣化面でも1打撃のみでデータを採用できることが 確認された。

b) 内部測定面(切削深さ:20mm)

表面の劣化強度に影響が少ないと想定される深さ (20mm)の内部面における平均強度指標値は、1.45 と なった。内部測定面に対する表面劣化部の強度指標値に ついては、全平均で88.8%となり表面劣化部が低い結果 が得られた。

この結果から、表面の劣化のみならず表層内部まで強 度の低下(組織の脆弱化)が確認された。

3.3 各種劣化コンクリートの測定結果からの考察

(1) 激しい凍結融解を受けた水セメント比の高い貧配合のコンクリート

前述の 3.1 及び 3.2 の結果から総合判断し本研究で使 用した劣化コンクリートは、表面部の劣化のみならず表 層内部の強度低下(組織脆弱性)が認められた。

また、比較的表層内部まで脆弱化が進行している場合、 機械インピーダンス法ハンマーの強度指標値は、コンク リート表層部の表面近傍部の値を取得していることが確 認できた。

(2) 農業用水路の水中部コンクリートの劣化検討事例

- a) 調査構造物の概要 用途:農業用水路コンクリート構造物, 供用年数:39年,環境:寒冷地内陸環境
- b) コンクリートの配合条件(当時の資料より)
 F'ck: 300kgf/cm²,スランプ:8.0cm,
 空気量:5.0%,最大水セメント比:55%,
 最小単位セメント量:280kg/m³,
 セメント種類:普通ポルトランドセメント
 c) 秋期と冬期の農業用水路の暴露状況

寒冷地内陸環境下に設置されている農業用水路の秋期

(渇水期)と冬期の暴露状況を示す(写真4参照)。この用水路においては、冬期において用水路が積雪に覆われ水中部においては凍結融解回数が気中部に比べ比較的少ないことが推察される。



写真4 農業用水路(左:秋期(渇水期),右:冬期) d) 農業用水路コンクリートの水中部における劣化状況 及び表層強度の推察

本用水路において気中部と比べ凍害の影響が比較的少 ない水中部コンクリートにおいては、Ca(OH)₂の溶脱に よる細孔構造の粗大化⁵⁾及び土粒子含む水流の摩耗作用 等で粗骨材及び細骨材が露出し表面劣化が進行(写真 5 参照)するが、一方で春期から秋期の水分の供給による 水和作用の働きで表層含め強度が確保される。このため 機械インピーダンス法ハンマーによる水中部の劣化面強 度は、コンクリート内部と比較的同等な強度が得られる ものと推察される。

従って、水中部コンクリートの表層部の脆弱化が進行 しない外的要因としては、 冬期における凍結融解回数 が積雪に覆われるため気中部に比べ比較的少ない、 土 粒子を含む水流の摩耗作用により極表面の細孔構造の粗 大化部の損失のみで深部には影響していない、 表層部 の水分の供給による水和作用で強度低下が抑制される。

また、内的要因として 当時、既に使用されていた AE 剤による凍害の抑制作用、 最大水セメント比が、 55%以下に設定されているため透水係数が小さく水密性 の確保⁶⁾等が挙げられる。



写真5 水中部劣化状況(左:表面,右:側面) このため、表面劣化コンクリートにおいては、マクロ 的にみれば深部にかけ脆弱化が進行しているケースと、 農業用水路の水中部コンクリートの様に表層部の脆弱化 が進行していないケースに大別されることが推察される (図3参照)。以上のことから、機械インピーダンス法 ハンマーを使用した際の劣化面の強度測定値の見解を表 4 に示す。



図3 表面劣化コンクリートの概念図

(左:水中部コンクリート,右:表層脆弱コンクリート)

表	4	機械インピーダンス法ハンマーを使用した各種強
度	則定	値の見解

-			
対象事例:	表面劣	農業用水路の水	激しい凍害
コンクリー	化が少	中部(W/C=55%以	(W/C大,貧配
F	ない	下,AE)	合, nonAE)
コンクリ	比較的	表面劣化:大	表面劣化
ートの劣	健全	+	+
化状態		表層内部健全	表層内部脆弱
同一点打	1打	通常1打(数	通常1打
撃数		打),380g	
前処理の有	不要	不要	不要
無			
取得強度	内部 (全	内部(全体)	表層近傍部強
	体) 強度	強度	度

4. 結論

4.1 凍結融解作用を受けた W/C が大きいコンクリート の表層部の強度指標値⁸⁾ (1) 凍結融解作用を受けた W/C が大きい(70%) 貧配合 コンクリートにおいて、機械インピーダンス法ハンマー (380g)による内部測定面に対する表面劣化部の強度指 標値については、全平均で88.8%となり、表層内部の強 度低下(組織の脆弱)を確認した。また、表層内部まで 脆弱化が進行している場合、機械インピーダンス法ハン マーの強度指標値は、コンクリート表層部の表面近傍部 の値を取得していることが確認できた。

 (2) ハンマーによる累積打撃回数(各点 10 回)の平均 強度指標値に対し1 打目の測定値は、98.6%となり比較 的安定した値を得た。従って、同一点を多数回打撃しつ つ劣化部分を除去するような所作は不必要である。
 (3) 表面劣化に加え表層内部が脆弱化したコンクリート 面に対しても機械インピーダンス法ハンマー(380g)による強度測定は、健全部と同様の調査方法が適用できる。

4.2 農業用水路の水中部コンクリートの劣化状況及び 強度の推察

凍害の影響が少ない水中部コンクリートは、Ca(OH)₂ の溶脱による細孔構造の粗大化⁵⁾及び土粒子含む水流の 摩耗作用等で表面劣化が生ずるが、水分の供給による水 和作用の働きで表層含め強度が確保される。このため機 械インピーダンス法ハンマーによる水中部の劣化面強度 測定値は、コンクリート内部と比較的同等な結果が得ら れるものと推察される。

参考文献

1) JSCE-G504-2007:硬化コンクリートのテストハンマ 一強度の試験方法(案),2007年制定コンクリート標 準示方書規準編,土木学会,pp253-256,2008.5

2) 久保元,金田重夫,久保元樹,極檀邦夫:ハンマ打
 撃によるコンクリート強度の推定,コンクリート工学,
 5 月号 Vol.44,No.5,pp41-44,2006.5

3) 岡田包儀,猪狩平三郎,久保元,金田重夫,久保元 樹,境友昭:機械インピーダンス法による表層劣化水路 コンクリートの強度推定,農業農村工学会北海道支部第 58 回研究発表会,2009.10.28

4) 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試験方法指針(案):材料試 験,第7巻,第59号,pp.427-430,1958.8

5) 地濃茂雄,平野隆,仕入豊和:養生条件とコンクリ ート表層部の細孔構造,セメント技術年報,38,pp266-269,1984

 6)施工標準 2.6 水密性,2007年制定コンクリート標準 示方書施工編,土木学会,pp39-40,2008.3

7) 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル:編著(独)土木研究所,(社)日本非破壊検査協会,pp148-153,2010.8.6

8) 岡田包儀,井上真澄,須藤貴史,久保元,境友昭: 表面劣化コンクリートの強度推定手法の検討,農業農村 工学会北海道支部第61回研究発表会,2012.10.30