

機械インピーダンスによる表層劣化コンクリートの強度推定に関する検討

Examination concerning strength presumption of surface course deterioration concrete
by mechanical impedance method

北見工業大学 ○正員 岡田包儀, 正員 猪狩 平三郎
日東建設(株) 正員 久保 元, 正員 久保 元樹, 正員 金田 重夫
アプライドリサーチ(株) 正員 境 友昭

1. 序論

建設材料のコンクリートは、戦後の高度経済成長期以降社会資本基盤材料として膨大に使用され現在までに推計蓄積量が、100 億 m^3 ともいわれている。

今後財政制約下の中で、社会基盤施設の運用を適切に図るアセットマネジメント手法の導入が求められており、施設を縦横断的にとらえ社会資本の有効利用を図ることの重要性が高まっている。この中で、個々の社会資本基盤施設においては、適切な維持管理を実施し、ライフサイクルコストの縮減が急務である。

このような背景下、既存のコンクリート構造物に損傷を与えずコンクリートの経時劣化・性能低下を計測する非破壊検査技術の社会的要請が近年急速に高まり、技術開発も進展をみせている。

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（テストハンマー）が普及・利用されている。また、国交省では新設構造物を対象として試行的に縦弾性波速度による強度推定手法を導入している。しかしながら、非破壊検査技術は、コンクリートの表面を対象とするため、写真1（本研究の調査対象面）に示すようなかなり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。

今後、維持管理の際の定期点検等において表層部が経年劣化したコンクリート構造物の非破壊試験強度を把握する需要が益々高まっている。



写真1 水路コンクリートの表面劣化

現行でリバウンドハンマーによるコンクリートの反発度を測定する際（JIS A 1155）は、測定箇所は、表面組織が均一で、かつ、平滑な表面とする、測定面に凹凸等がある場合は、研磨処理装置などで平滑に処理を行うことになっている。また、縦弾性波速度による強度を推定する際も同様に測定面に凹凸がある場合等は、研磨処理装置などで平滑に処理を行うことになっている。こ

のため両者の測定法は、前処理無しで測定することは困難な状況である。しかし、一般的に非破壊試験に求められる点は、構造物に損傷を与えず性能を把握することができ、調査時間・費用の軽減等が挙げられている。

一方、近年、機械インピーダンス法¹⁾によるハンマー（写真2参照）が開発・実用化されている。



写真2 ハンマー（機械インピーダンス法）

本論で使用した機械インピーダンス法によるハンマーは、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ときの加速度を計測し、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、表面の劣化の度合い及び表面近傍の浮きを測定できる機能を有している。

本研究は、機械インピーダンス法によるハンマーを使用し、これまで前処理（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・測定手法の提案を行ったものである。

2. 構造物の概要及び調査・試験方法²⁾

(1) 調査構造物の概要及びコンクリートの配合条件

a) 調査構造物の概要

構造物用途：水路用コンクリート構造物

種別：鉄筋コンクリート造

建設年度：昭和48年(1973年)，経過年数：35年

環境：寒冷地内陸環境下

b) 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W/C：55%，最小セメント量：280kg/m³，

セメント：普通ポルトランドセメント

(2) 試験箇所

測定箇所：水路側壁部（写真3参照）

測定対象面をそれぞれ 気中部、気水境界部、常時水中部にブロック分けした。

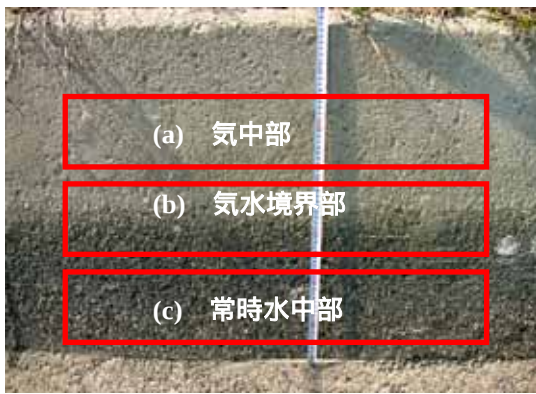


写真3 試験箇所

(3) ハンマー（機械インピーダンス法）による強度測定

機械インピーダンス法による測定は、水路コンクリートの劣化状態の違いを考慮し、前述のようにブロック分けした。測定数は、同一点を連続 50 回打撃し各ブロック計 4 点、強度を測定した。これは、同一点を連続的打撃により表面劣化面の極脆弱劣化部を潰し・排除することによって、内部のコンクリート強度と同等の結果が得られるかどうかを確認するために実施した。

(4) コンクリートコア採取による圧縮強度等の測定

内部のコンクリート強度を測定するためにコンクリートコアを採取し圧縮強度・超音波伝播速度を算出した。

(5) 表面劣化深さの測定

表面劣化深さを測定するためのデプスゲージ（写真 4 参照）を用い測定を行った。測定点は、測定ブロック毎、格子（4 行 4 列）を設定し交点を測定した。（各部 計 25 点（5×5））広範囲に劣化した部分の深さ測定においては、デプスゲージの底板部のみでは基準面が確保できないことから L 型アングル鋼を用い劣化の進行していない部分に橋渡しをして基準面を確保し測定を行った。



写真4 デプスゲージ（左）及び
劣化深さ測定用基準面定規（右）

(6) 表層部から内部方向への硬度分布の測定

コンクリートは、劣化要因により表層部から経時的な経過とともに劣化が進行する。外観的には劣化面積率や劣化深さ等から表面劣化量を算定することができる。また、一方では、表層内部が劣化による組織脆弱化が進行しているケースも想定される。

コンクリートの劣化状況を把握する場合、経時的な劣化作用により表層部の欠損状態及び表層内部の組織脆弱度に注目する必要がある。経時的な各種劣化作用により表層部からどの程度内部領域まで影響を及ぼしているか把握することは、構造物の性能を評価する上で重要な点である。

しかし、現状のコアによる圧縮強度試験では、通常表層劣化部を除き健全部で供試体を成型し、比較的健全部

の強度値を算出しているのが現状である。しかし、この方法では、表層部の微小深度のコンクリート強度を測定するのは現状では困難である。また、現状では健全部と脆弱部を定量的に評価する試験方法は十分確立されていない状況下にある。

しかし、表層部の脆弱性評価試験³⁾には、各種の試験方法が提案されており、その一つに微小硬度試験法がある。この手法は近年試みられており、耐久性に対する情報を取得できる可能性がある。

微小硬度には、主に金属分野に於いて各種の試験方法があるが、今回この中のショア硬度試験器（写真 5 参照）を使用してショア硬さ試験（JIS B 7727）を実施した。試料は、劣化が激しかった水中部分のコア供試体を成形し、深度方向の硬度を測定した。



写真5 ショア硬度試験器（左）及び測定供試体（右）

試料採取及び測定手順

- (1) 現地構造物のコア供試体採取
- (2) コア供試体を長軸方向に板状に切断し成形・研磨
- (3) 表層部から 5mm 間隔にラインを引き各層毎にショア硬度を測定した。測定の際は、骨材部・空隙部を外して測定した。

3. 測定結果と考察

(1) 劣化要因

目視観察より表面劣化状況は、気中部と水中部では大きな違いが生じていた。気中部の劣化の主要因は、凍結融解作用による凍害と推測され、表層スケーリングまでは進行しておらずピーリング程度で留まっている段階である。これに対して水中部に常時接触されている面では土粒子を含む流水によるすり減り作用等が主要因と推定され表面のモルタル等は損失し細・粗骨材が露出し劣化深さも気中部と比較して顕著となっている。（写真 1 参照）

(2) コア供試体による圧縮強度試験結果

コア供試体の圧縮強度試験結果を表 1-1、コア供試体の超音波速度試験結果を表 1-2 に示す。圧縮強度と超音波速度試験結果から算出した推定強度（日本建築学会算定式）を比較した場合、超音波速度推定強度が若干 7.7%大きくなったがほぼ同程度の結果がえられた。

表 1-1 コア供試体による圧縮強度試験結果

No	平均直径 mm	平均高さ mm	最大荷重 N	h/d	補正係数	圧縮強度 N/mm ²	平均圧縮強度 N/mm ²
1	99.6	164.9	215000	1.656	0.972	26.8	28.4
2	99.6	174.2	216000	1.749	0.980	27.2	
3	99.6	174	249000	1.747	0.980	31.3	

表 1-2 コア供試体による超音波速度試験結果

No	平均長 mm	超音波伝播時間 (μs)			平均値 (μs)	超音波伝播速度 (m/s)	平均速度 (m/s)
		No.1	No.2	No.3			
1	164.9	38.8	38.8	38.7	38.8	4254	4329
2	174.2	40.4	40.4	40.4	40.4	4312	
3	174	39.4	39.4	39.3	39.4	4420	

超音波速度からの強度算定（日本建築学会算定式）

$$F_c = 21.2 \times V_p - 61.2 = 21.2 \times 4.329 - 61.2 = 30.6 \text{ N/mm}^2$$

（3）表面劣化深さ及び中性化深さの試験結果

各部の表面劣化深さを表 2 に示す。

また、各部の中性化深さを表 3 に示す。

表面劣化深さについては、3.（1）にも示したが、気中部は、ピーリングの発生程度で凍害は軽微なものだが、水中部に接触されている面では土粒子を含む流水によるすり減り作用等で、劣化深さが顕著である。

表 2 表面劣化深さ

測定部位	平均劣化深さ mm (計25点)	標準偏差 mm	変動係数 %	目視観察状況
気中部	0.7	0.22	33.8	表面部にピーリング発生
気中境界部	2.6	0.75	29.2	気中部と水中部の境界が明瞭
常時水中部	3.2	0.73	22.9	細・粗骨材が一面露出

中性化深さは、表面の劣化深さを考慮した場合、6～9mm 程度進行している。水中部（春期～秋期）は、大気に接触する期間が少ないため気中部と比較して劣化を考慮した中性化深さが7割程度となっている。

表 3 中性化深さ

測定部位	計測データ(mm)				補正前平均 (mm)	劣化深さ (mm)	補正後平均 (mm)
	12.77	2.53	6.94	9.41			
気中部	3.76	11.61	6.80	9.28	7.89	0.66	8.5
気中境界部	2.56	4.63	1.60	5.19	3.29	2.57	5.9
常時水中部	6.44	1.59	1.89	4.34	2.92	3.16	6.1
	5.03	1.40	0.80	1.84			

（4）表層部から内部方向の硬度分布の測定

劣化によるコンクリート表層内部の組織脆弱度を測定するためショア硬度試験器による測定結果を、表 4 に示す。

表 4 ショア硬度試験結果

表面からの深さ mm	硬度平均値(各 測定数:12) Hg	コア中央部(95- 100)との硬度比%	標準偏差	変動係数 %	備考
0-5	25.6	97.4	2.81	11.0	各層の測定箇所は、 細骨材・粗骨材・空隙 等を外して測定した値 である
5-10	26.5	100.9	2.71	10.2	
10-15	26.1	99.5	2.55	9.8	
15-20	25.4	96.8	2.95	11.6	
20-25	24.6	93.8	2.93	11.9	
25-30	26.5	100.8	2.95	11.2	
30-35	26.0	99.0	3.93	15.1	
35-40	26.2	99.8	3.81	14.5	
40-45	26.8	102.1	2.54	9.5	
45-50	24.7	94.1	2.62	10.6	
50-55	25.0	95.4	2.71	10.8	
55-60	23.7	90.3	2.41	10.2	
60-65	25.8	98.4	3.00	11.6	
65-70	25.9	98.6	3.53	13.6	
70-75	26.5	101.0	3.12	11.8	
75-80	25.0	95.1	2.50	10.0	
80-85	24.9	94.8	3.47	13.9	
85-90	26.2	99.8	3.40	13.0	
90-95	26.5	101.1	3.84	14.5	
95-100	26.0	98.9	4.14	15.9	

ショア硬度試験結果から、表層内部の硬度の低下傾向はみられなかった。部材断面中央部付近の硬度に対する

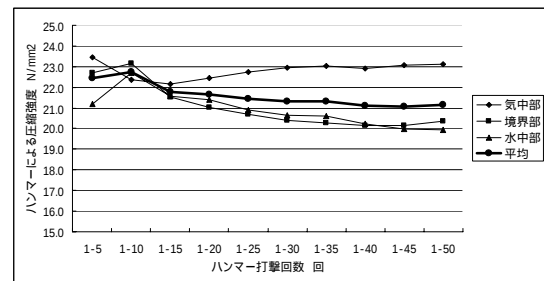
各層の硬度を比較した場合、全体的に 90%～102%の範囲で極表層部でも 97%程度で測定誤差等を考慮した場合殆ど内部と同じ硬度であった。

以上の結果から、今回の調査研究を行った水路構造物においては、コンクリート表面は表層部の脆弱化が進行していないためハンマーによる非破壊試験（機械インピーダンス法）を行った場合、内部のコンクリート強度（コア強度）を比較的反映する結果が得られていると判断した。

（5）機械インピーダンス法による強度測定結果

ハンマー（機械インピーダンス法）による打撃総数は同一点で連続 50 回測定したが、5 回毎の累加した強度・標準偏差・変動係数を算出した。採取されたデータの選定については、極表面部に劣化作用より残留した細骨材や表層部と乖離した脆弱なモルタル等により、特に過小なデータがハンマー打撃初期等に発生するため、各平均値からの偏差が 20%未満のものは採用しなかった。

ハンマーの打撃回数と圧縮強度の関係図を図 1 に示す。

図 1 ハンマーの打撃回数と圧縮強度の関係図（N/mm²）試験結果

ハンマーの打撃回数と採取されたデータ数を表 5 に示す。

表 5 採取されたデータ数

部位	1-5	1-10	1-15	1-20	1-25	1-30	1-35	1-40	1-45	1-50
気中部	2	7	12	15	20	24	29	34	38	43
	-	5	10	15	19	24	29	34	39	44
	5	10	14	18	23	28	31	36	40	45
気中境界部	3	7	11	16	21	26	31	36	41	45
	2	7	10	13	17	20	24	28	32	34
	2	6	10	12	16	20	23	27	30	35
常時水中部	4	6	10	15	19	23	27	32	37	41
	3	6	10	14	19	22	26	30	33	37
	3	6	7	10	13	15	19	23	28	33
水中部	2	6	9	11	14	19	22	26	30	35
	3	6	9	12	17	21	26	30	35	40
	2	5	10	12	15	19	22	26	29	33

ハンマーの打撃回数と圧縮強度の標準偏差の関係を図 2 に示す。

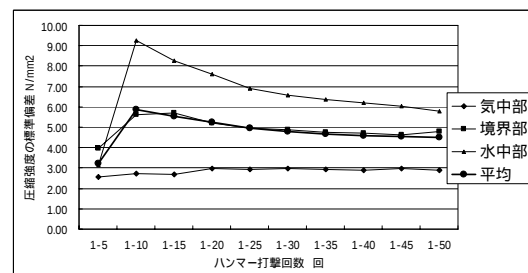


図 2 ハンマーの打撃回数と標準偏差の関係図

ハンマーの打撃回数と圧縮強度の変動係数の関係を図 3 に示す。

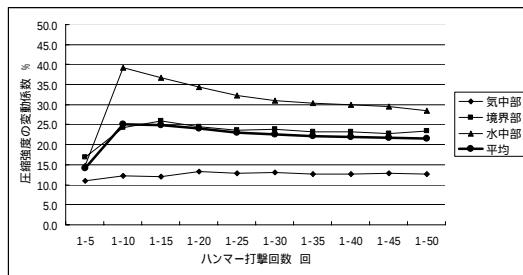


図3 ハンマーの打撃回数と圧縮強度の変動係数の関係図

ハンマーによる同一点を連続 50 回打撃した結果、次の点が明らかになった。

劣化の少ない気中部では、連続打撃した際、ハンマーがコンクリート面に局所的に打撃されず、衝撃力が分散されることから連続打撃を行っても比較的圧縮強度は安定しており、その変動係数は小さな値となっている。

劣化の激しい水中部・境界部では、打撃回数の増加（10 回を越える場合）により全般的に強度の低下傾向がみられる。このことは、ハンマー打撃により骨材露出部等に集中して衝撃が加わるため組織が緩み強度の低下傾向が発生すると推察される。

測定回数については、測定面にハンマーの衝撃の影響が比較的少ない 5 回の打撃数では、全般的に変動係数も低く（平均：14%）水中部の強度低下傾向も比較的小さく（水中部最大強度値との比：- 6.7%）、比較的有効なデータが採取できた。

コア供試体との強度比較表を表 6 に示す。ハンマー強度について、気中部と劣化の激しい水中部の比較では 2.3N/mm^2 水中部の強度低下がみられた。コア強度からハンマー強度の補正を行わずコアとの強度比較を行った場合、全体的には 21%、水中部では、25%の強度低下があったが、水中部においても測定値は採用可能といえる⁴⁾。但し、ハンマー強度の採用にあたり本ケースでは、コア強度が把握されているため、ハンマー強度に補正を行う方がより実用的である。

表 6 ハンマー強度とコア供試体強度の比較

部位	ハンマーによる推定強度 (N/mm ²) ハンマー打撃回数 (5回)	コア供試体強度との比率 (%)
気中部	23.5	82.5
境界部	22.7	79.8
水中部	21.2	74.5
平均	22.5	79.0

4. 機械インピーダンス法による劣化したコンクリート面の測定手法の提案

リバウンドハンマーによるコンクリートの反発度を測定する際は、JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」、JSCE-G504（土木学会規準）「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」等に基づいて実施されている。両者の測定に関する手法は基本的に変わらないが、大きく異なる点は測定箇所の測定打撃点数に違いがある。JSCE-G504 は 1999 年に制定され、20 点の測定数が必要とされるが、その後 2003 年に制定された JIS A 1155 では、9 点のみの測定数となっている。JIS A 1155 の解説によれば、国際基準との整合性確保の観点から 9 個の測定値の平均を算出し反発度としている。また、独自に推定精度の確認の検討を行った結果、測定

点数を 20 点から 9 点に減少させると推定精度はやや悪くなるが、測定装置の反発度の精度や、機器の個体差、測定面の含水状態等を加味した結果、9 点の測定点によって算出した反発度で実用上は、十分な精度が得られるとしている。この結果、機械インピーダンス法によるハンマーにおける測定に関しては、これまでリバウンドハンマーと同水準の測定精度が既往の研究で得られていることから、測定数において各々 JIS A 1155 に準じた 9 点の測定数で実施できる。

また、測定対象面が表面劣化している場合、リバウンドハンマー（テストハンマー）では、前述したが強度を推定する場合には、測定面を切削し平滑にする必要がある。本研究において機械インピーダンス法によるハンマーでは、表面が相当劣化して骨材が露出面した面でも前処理無しで測定可能であり、劣化状況に合わせた同一箇所打撃回数の設定（今ケース：5 回程度）で十分有意な強度データを取得できることが明らかとなった。

5. 結論

- (1) 表面劣化が進行したコンクリート面に対して機械インピーダンス法による非破壊強度試験は、前処理無しで測定が可能である。
測定の際は、JIS A 1155 に準じた 9 測定点で実施し、表面劣化が進行したコンクリート面の場合、同一箇所を連続 5 回（本ケースの劣化程度）打撃しデータの採取を行うことにより実用上強度推定が可能である。
- (2) 表層内部の組織脆弱度を判断するためにショア硬度試験を行ったが、ショア硬度試験は、有効な脆弱度の指標値が得られる。今回の試験試料の測定結果は、表層内部の硬度の低下傾向はみられなかった。従って、本ケースでは、ハンマーの推定強度をコア強度と同一視して評価することが可能であった。
- (3) 今回、調査対象となった水路用コンクリート構造物は、35 年経過にも関わらず気中部において凍害による劣化は軽微（1mm 程度弱）であったが、一方の水中部は、土粒子含む水流の摩耗作用等で 3.2mm（平均）の劣化が生じていた。

謝辞

本研究実施にあたり北海道開発局網走開発建設部、網走川土地改良区の各機関にご協力を頂いた。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 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，会誌コンクリート工学，5月号 Vol. 44, No. 5, pp41-44, 2006.5
- 2) 久保元樹，境友昭，岡田包儀，五味慎太郎，荒川潤；機械インピーダンスによる表層劣化コンクリートの強度推定に関する実験的検討，農業農村工学会北海道支部第 57 回研究発表会，2008.10.22
- 3) 蔵重勲；微小硬度分布測定，構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告集，土木学会コンクリート委員会，pp176-182，2008.4.23
- 4) 宮本一成，高羅信彦，林田博明，西村次男，魚本健人；既設 30 年以上のコンクリート建築物の劣化調査，東京大学生産研究所発行生産研究，54 巻 3 号，pp222-225，2002.3.6