

論文 鋼球接触時間の測定によるコンクリート表層部の品質評価

岩野 聡史*1・森濱 和正*2・極壇 邦夫*3・境 友昭*4

要旨: コンクリートの表層付近は劣化進行や鉄筋腐食抑制に重要な役割を果たすことから、維持管理において表層付近を評価することは重要であると考えられる。評価方法としての非破壊試験には、維持管理における経済性に着目すれば、簡易な検査手法が要求されると考えられる。そこで、簡易に測定が可能な鋼球打撃における鋼球とコンクリート表面との接触時間に着目し、鋼球接触時間の比較により表層付近の品質評価が可能であるかについて実験した。その結果、現状の測定方法では詳細な品質評価には課題はあるが、圧縮強度や中性化進行深さと相関関係にあり、表層付近の品質を簡易に評価できる可能性が示された。

キーワード: 表層部の品質評価, 衝撃弾性波法, 鋼球接触時間

1. はじめに

コンクリートの表層付近は、中性化や塩害などの劣化機構に対し、劣化進行の抑制や鉄筋の腐食抑制に重要な役割を果たすことから、コンクリート構造物の維持管理において、コンクリートの表層付近の品質を評価することは、重要な情報になると考えられる。評価方法として、非破壊試験は有効な手段であるが、維持管理における経済性に着目すれば、より簡易に評価できる検査手法が要求されると考えられる。

筆者らは、コンクリート表面への鋼球打撃による、衝撃弾性波法でのコンクリート構造物の非破壊試験による検査について研究してきたが^{1) 2)}、鋼球打撃での鋼球とコンクリート表面との接触時間は接触面の弾性率によって変化することから、鋼球接触時間を比較すれば、コンクリートの表層付近の品質評価が可能になると期待される。そこで、今回は型枠、配合、養生方法の違いにより、表層付近の品質を変化させた供試体を用いて、鋼球接触時間を測定し、圧縮強度測定結果や促進中性化試験による中性化進行深さと比較する実験を行った。この結果から、簡易な手法である鋼球接触時間の測定・比

較により、コンクリートの表層付近の品質評価が可能であるかについて検討した。

2. 実験概要

2.1 測定原理

鋼球接触時間は、コンクリート表面への鋼球打撃により測定するが、ヘルツの衝突理論によれば、コンクリートに鋼球を落下させたときの鋼球接触時間 T_C は式(1)により示される³⁾。

$$T_C = 5.97[\rho_S(\delta_S + \delta_P)]^{2/5} \frac{R}{h^{0.1}} \quad (1)$$

ただし、 $\left(\delta_P = \frac{1 - \nu_P^2}{\pi E_P}, \delta_S = \frac{1 - \nu_S^2}{\pi E_S} \right)$

ここに、 ρ_S : 鋼球密度, R : 鋼球半径, h : 落下高さ, ν_P : コンクリートのポアソン比, ν_S : 鋼球のポアソン比, E_P : コンクリートのヤング率, E_S : 鋼球のヤング率である。

式(1)より、同じ鋼球で打撃を与えると、鋼球とコンクリートとの接触時間はコンクリートの表層付近のヤング率によって変化することとなる。例えば、コンクリートの表層付近の強度が強く、ヤング率 E_P が大きい測定点では、 δ_P が

*1 伊藤建設(株)技術研究所技術開発グループ 主任研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

*3 東海大学助教授 工学部土木工学科 工修 (正会員)

*4 アプライドリサーチ(株)代表取締役 工博

表-1 実験に用いた供試体の配合

名称	セメント種類	呼び強度	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
L型供試体	A	壁 普通	18	25	8	63.0	4.5	44.9	158	251	824	1026	2.69
		底版 高炉B	18	40	8	59.0	4.5	43.0	148	251	799	1070	2.69
	B	壁 普通	27	25	8	49.5	4.5	43.2	158	320	771	1023	3.42
		底版 高炉B	18	40	8	59.0	4.5	43.0	148	251	799	1070	2.69
	C	壁 普通	40	25	8	38.0	4.5	41.0	159	419	696	1015	4.48
		底版 高炉B	27	40	8	45.5	4.5	41.3	148	326	740	1064	3.49
ボックス供試体	厚壁 普通	18	20	8	70.0	4.5	47.0	161	230	885	1031	2.44	
	薄壁 普通	45	20	12	35.0	3.0	39.9	163	466	686	1072	5.13	
曲げ供試体	MN18 普通	18	20	8	67.0	4.5	44.9	160	239	849	1049	2.55	
	MN24 普通	24	20	8	57.5	4.5	43.5	157	274	813	1065	2.92	
	MN30 普通	30	20	8	49.5	4.5	42.3	157	318	776	1065	3.39	
	MN60 普通	60	20	15	30.0	3.5	42.5	160	534	710	970	6.94	
	MBB24 高炉B	24	20	8	56.5	4.5	43.6	153	271	818	1065	2.89	

表-2 実験内容

名称	使用した供試体	品質変化内容	鋼球接触時間測定材齢	品質評価方法
実験1	L型供試体	透水型枠, 合板型枠の使用	25日	小径コアによる圧縮強度
	ボックス供試体		29日	促進中性化試験による中性化深さ
実験2	曲げ供試体	配合, 水中養生日数	7日, 28日	促進中性化試験による中性化深さ

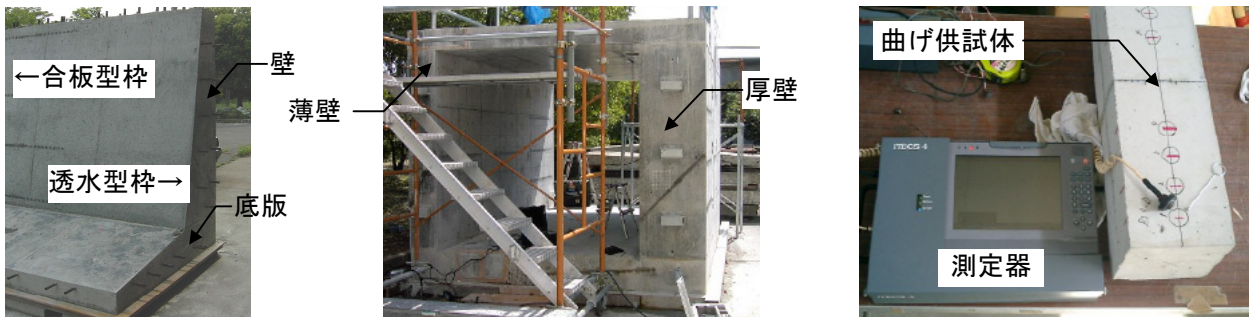


写真-1 実験に用いた供試体（左：L型供試体，中：ボックス供試体，右：曲げ供試体）

小さくなり、鋼球接触時間が短くなることとなる。これから、同じ鋼球で接触時間を測定し、測定結果を比較すればコンクリート表層付近の品質の評価に利用できると考えられる。

2.2 実験内容

実験に用いた供試体の配合表を表-1, 実験内容を表-2に示す。供試体は写真-1に示す擁壁を模擬したL型供試体, ボックスカルバート状のボックス供試体, 曲げ供試体の3種類である。

L型供試体, ボックス供試体の端面(L型はL字の面, ボックスは口の字の面)は, 片側の面は合板型枠でコンクリートを打設したのに対し, 反対面は透水型枠を施工してコンクリートを打設した。L型供試体は材齢25日で, 壁, 底版の型枠の異なる両端面で鋼球接触時間を測定し, φ25mmの小径コアを採取して行った圧縮強度

表-3 促進中性化試験方法

項目	条件
温度	20℃
湿度	R.H.60%
炭酸ガス濃度	5%
促進中性化試験期間	ボックス供試体：28,56,91,182日
	曲げ供試体：3,7,17,31,66日

試験結果と比較した。

ボックス供試体は材齢29日で, 薄壁, 厚壁の型枠の異なる両端面で鋼球接触時間を測定し, φ25mmの小径コアを採取して行った, 促進中性化試験での中性化深さ測定結果と比較した。

曲げ供試体は5種類の配合の供試体を製作したが, 各配合の供試体について, (1)脱型後から乾燥, (2)材齢3日まで水中養生の後乾燥, (3)材齢7日まで水中養生の後乾燥, の3種類の養

生方法に分けた。材齢 7, 28 日に各配合の供試体, 各養生方法で鋼球接触時間を測定し, 材齢 28 日後に測定点から $\phi 25\text{mm}$ の小径コアを採取して行った促進中性化試験での中性化深さ測定結果と比較した。

使用した透水型枠は, 合板に透水シートを貼り付けたもので, 透水シートはコンクリート側にポリエチレン系フィルム, 型枠側にポリプロピレン系不織布を貼り合わせたものである。

促進中性化試験の条件は表-3 のとおりである。中性化深さは, 小径コアを 1 本ずつ取り出し, カッターで半分に切断し, フェノールフタレイン溶液を散布して無着色域の深さをノギスによって測定した。測定位置は, 切断面の両面を 5mm 間隔に 5 点ずつ測定した。

2.3 測定方法

鋼球接触時間の測定状況を写真-2 に示す。衝撃加速度計 (PCB 社製 350B03 型) を取り付け直径 10mm の鋼球 (合計質量 8.4g) でコンクリート表面を打撃し, 入力波形を測定した。ここで, 打撃強さは特に規定せずに, 入力波形の振幅値が測定器の測定範囲内であることを確認し, 測定器に記録した。測定波形例, 周波数解析例を図-1 に示す。入力波形の凸部の横軸が鋼球接触時間 T_C であるが, 客観的に T_C を決定するため FFT による周波数解析を行い, 振幅が最大となる周波数 f_0 の逆数から T_C を決定した。ただし, パルス状の波形では直流成分を含む広帯域の周波数特性を持ち, f_0 を正確に定めることが難しい, そこで, 式(2)のように, 波形を微分して往復正弦波状とした時の $P'(f)$ を求め, $P'(f)$ の最大値から f_0 を求める方法を用いた。

$$P'(f) = P(f) \cdot 2\pi f \quad (2)$$

3. 実験結果

3.1 L 型供試体での実験結果

L 型供試体の各部位では材齢 25 日に鋼球接触時間を測定したが, 透水型枠での測定結果と合板型枠での測定結果との比較結果を図-2 に示す。図-2 より, 例えば L 型供試体 A の底版で



写真-2 鋼球接触時間測定状況

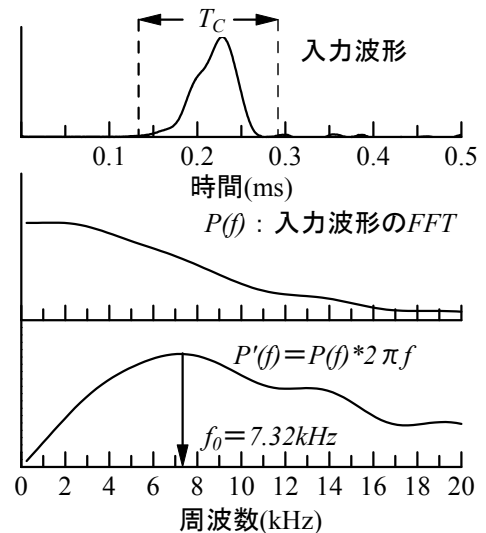


図-1 鋼球接触時間測定例

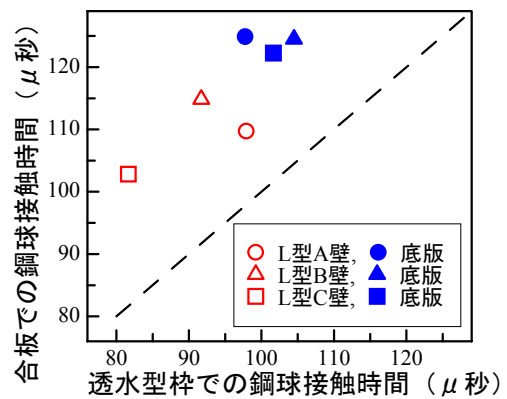


図-2 鋼球接触時間の比較結果

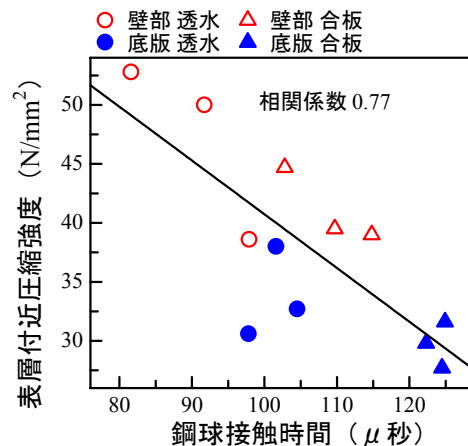


図-3 鋼球接触時間と圧縮強度の比較

は、合板型枠での鋼球接触時間が約 125 μ 秒であるのに対し、透水型枠では約 98 μ 秒となるように、同一部位で比較すれば、各部位とも透水型枠の方が合板型枠に比べて 20 μ 秒ほど短くなることが確認された。一般に透水型枠を使用すると、コンクリートの表層付近の品質は改善されるが、式(1)より、鋼球接触時間はコンクリートの接触面のヤング率が大きくなれば短くなることから、測定結果は、透水型枠によりコンクリートの表層付近の品質が改善したことを明確に反映したものであるといえる。

また、各測定面で $\phi 25\text{mm}$ の小径コアを採取し、表面から深さ 50mm 付近までの圧縮強度を測定した結果と、鋼球接触時間との比較を図-3に示す。図-3より、直線回帰による相関係数は 0.77 となり、鋼球接触時間の測定結果から圧縮強度を推定するまでには至らないが、両者には強い相関関係があることが確認された。

3.2 ボックス供試体での実験結果

ボックス供試体の各部位で、材齢 29 日に測定した鋼球接触時間を表-4に示す。表-4より、L型供試体と同様に透水型枠での鋼球接触時間は合板型枠に比べて短くなることが確認された。

また、ボックス供試体では $\phi 25\text{mm}$ の小径コアを 4 本採取し、促進中性化試験期間を 4 回に分けて中性化深さを測定したが、その結果を表-5に示す。なお、表-5中の中性化速度係数は、中性化深さ C と促進中性化試験期間 t を式(3)に示す \sqrt{t} 則により回帰し、求めた係数 A である。

$$C = A\sqrt{t} \quad (3)$$

中性化速度係数と鋼球接触時間の関係を図-4に示す。図-4より、鋼球接触時間が短ければ中性化の進行速度が遅くなる関係が確認される。これは、鋼球接触時間はコンクリートの表層付近のヤング率によって変化することと、中性化の進行速度はコンクリート表層付近の緻密性によって変化することが対応ものと考えられる。

3.3 曲げ供試体での実験結果

曲げ供試体の各配合、各水中養生日数の供試

表-4 ボックス供試体の鋼球接触時間測定結果

測定面		鋼球接触時間(μ 秒)
薄壁	透水型枠	81.9
	合板型枠	120.5
厚壁	透水型枠	99.9
	合板型枠	124.1

表-5 ボックス供試体での中性化深さ測定結果

測定面		中性化深さ(mm)				中性化速度係数 ($\text{mm}/\text{日}^{0.5}$)
		促進中性化期間(日)				
		28	56	91	182	
薄壁	透水型枠	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
	合板型枠	0.0	7.4	0.0	13.2	0.65
厚壁	透水型枠	0.0	0.0	9.1	0.0	0.24
	合板型枠	12.0	17.9	23.0	28.3	2.24

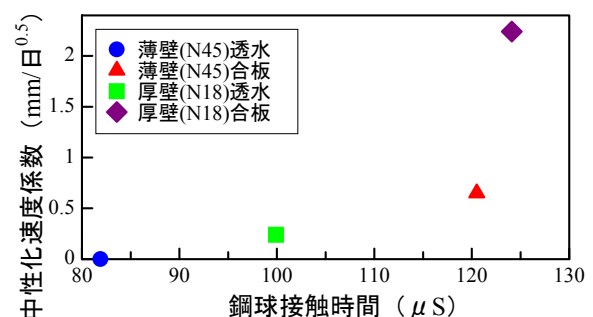


図-4 中性化速度係数と鋼球接触時間の比較

表-6 曲げ供試体の鋼球接触時間測定結果

名称	水中養生日数	鋼球接触時間(μ 秒)	
		測定材齢	
		7日	28日
MN18	0日	159.3	149.0
	3日	190.6	138.0
	7日	184.6	142.7
MN24	0日	168.8	138.3
	3日	171.0	135.5
	7日	140.7	126.1
MN30	0日	155.2	125.0
	3日	134.4	126.1
	7日	134.5	129.1
MN60	0日	116.4	110.3
	3日	112.7	108.7
	7日	103.4	105.3
MBB24	0日	183.4	148.7
	3日	163.4	146.8
	7日	159.8	152.4

体で、材齢 7 日、28 日に測定した鋼球接触時間を表-6、図-5に示す。測定結果より、材齢 7 日と 28 日を比較すると、ほとんどの供試体で材齢 28 日の方が材齢 7 日より鋼球接触時間が短くなっていることが確認される。これは材齢の経過により、コンクリートの表層付近のヤング率

が大きくなった結果であると考えられる。また、配合で比較しても、呼び強度が強い供試体ほど、鋼球接触時間は短くなることが確認される。しかし、曲げ供試体では乾燥養生をする前の水中養生の日数を0日、3日、7日と変化させて、コンクリートの表層付近の品質を変化させたが、各配合において水中養生日数で比較すると、特に水中養生の日数を長くしても、鋼球接触時間が短くなるような変化は確認されなかった。

一方、曲げ供試体ではφ25mmの小径コアを5本採取し、促進中性化試験期間を3~66日の5回として中性化深さを測定したが、その結果と3.2節と同様に中性化速度係数を求めた結果を表-7に示す。測定結果を各配合において水中養生日数で比較すると、水中養生の日数を長くすれば、中性化速度係数で0.1程度とわずかではあるが、中性化の進行速度は遅くなることが確認される。これから、水中養生の日数を長くすることにより、コンクリートの表層付近の品質は若干改善されているものと考えられる。

全曲げ供試体での材齢7、28日での鋼球接触時間と中性化速度係数との関係を図-6に示す。図-6より、中性化速度係数と鋼球接触時間は材齢7日では相関係数0.91、材齢28日では0.96と、鋼球接触時間が短ければ中性化の進行速度は遅くなる強い相関関係を示した。材齢7日での相関係数は28日より劣るが、これは材齢7日では水中養生後の日数が7、3、0日と短く、各供試体によってコンクリートの表層付近の含水率が異なり、何らかの影響を受けた可能性が考えられる。また、同一配合の結果で比較すると、MN18などでは、材齢7、28日とも鋼球接触時間と中性化速度係数の関係は逆転している。これは前述のとおり、水中養生の日数の変化によりコンクリートの表層付近の品質は若干変化し、中性化の進行速度には差が生じたのに対し、鋼球接触時間は反映されなかったことによる。

4. 実験結果考察

3章より、鋼球接触時間は、(1)透水性と合

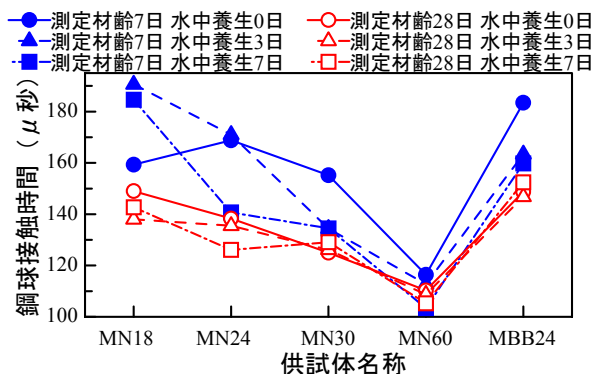


図-5 曲げ供試体での鋼球接触時間測定結果

表-7 曲げ供試体での中性化深さ測定結果

名称	水中養生日数	中性化深さ(mm)					中性化速度係数 (mm/日 ^{0.5})
		促進中性化期間(日)					
		3	7	17	31	66	
MN18	0日	4.3	6.3	8.5	10.5	16.1	2.00
	3日	2.8	5.6	8.1	10.1	15.1	1.87
	7日	3.1	5.6	6.8	9.2	14.4	1.75
MN24	0日	2.6	4.6	7.4	11.1	9.9	1.53
	3日	2.1	3.9	5.0	9.5	10.8	1.41
	7日	1.4	3.3	4.8	7.3	9.5	1.20
MN30	0日	2.4	3.3	5.1	7.4	4.6	0.91
	3日	1.2	2.7	4.0	4.7	6.0	0.81
	7日	0.8	3.3	4.2	4.7	5.7	0.81
MN60	0日	0.2	0.5	0.5	0.9	0.3	0.09
	3日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.01
	7日	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.01
MBB24	0日	6.6	9.2	9.9	11.2	16.9	2.23
	3日	4.7	6.1	6.0	10.8	14.9	1.86
	7日	3.2	4.8	5.5	9.1	15.5	1.75

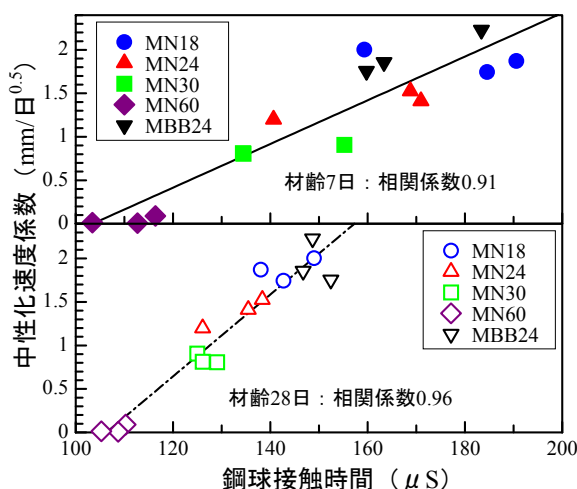


図-6 中性化速度係数と鋼球接触時間の比較

板型枠の違い、(2)材齢の違い、(3)呼び強度の違い、これらの条件によるコンクリート表層付近のヤング率の変化に対応し、圧縮強度測定結果

や中性化の進行速度と強い相関関係にあることが確認された。しかし、コンクリート表層付近の含水率が異なる場合では相関係数は低下した。また、水中養生日数の違いにより、中性化速度係数が 0.1 程度となる若干の変化には対応されない結果であった。後者の原因について検討すると、式(1)より、鋼球接触時間は、同じ鋼球で同じコンクリートを打撃しても、落下高さによって変化することが分かる。ここで、同じ鋼球で同じコンクリートを打撃し、落下高さが 5cm で鋼球接触時間が 150 μ 秒になった場合を想定すると、式(1)より、落下高さ h と鋼球接触時間 T_C は式(4)、図-7 の関係となる。

$$T_C = \frac{1.11 \times 10^{-4}}{h^{0.1}} \quad (4)$$

この場合、例えば落下高さが 10cm になると鋼球接触時間は約 140 μ 秒となり、落下高さ 5cm と比較して、10 μ 秒もの差が生じることとなる。

今回の実験では、人的な打撃より鋼球接触時間を測定したが、打撃強さの違いは式(4)の落下高さ h に相当する。従って、人的な打撃による打撃強さの違いは鋼球接触時間の測定結果にある程度の影響を及ぼし、若干の品質変化には対応できなかったものと考えられる。従って、コンクリートの表層付近の品質をより正確に評価するには、打撃強さを一定にすることや、落下高さが高くなれば鋼球接触時間は収束することから、打撃強さをより強くすることなど測定方法を改善することが必要となる。

5. まとめ

簡易に測定が可能な衝撃弾性波法での鋼球接触時間は、コンクリートの表層付近のヤング率によって変化することに着目し、鋼球接触時間の測定によりコンクリートの表層付近の品質評価が可能であるかについて実験した。その結果、鋼球接触時間は、(1)透水型枠と合板型枠、(2)材齢、(3)呼び強度、これらの条件の違いにより明確に変化し、これらによって変化する圧縮強度や中性化進行速度と強い相関関係にあること

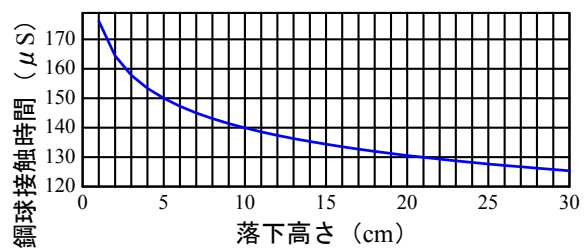


図-7 落下高さによる鋼球接触時間の変化例
(高さ5cmで150 μ 秒の想定)

が確認された。しかし、コンクリート表面の含水率の影響を受ける可能性があり、また、打撃強さによっても変化することから、人的な打撃により測定した今回の実験では、養生方法の違いによる若干の品質変化には対応できなかった。

以上から、測定する材齢や測定環境を考慮することや、打撃強さを一定にするなど測定方法を改善して鋼球接触時間を測定すれば、コンクリートの表層付近の品質をより正確に評価でき、例えば竣工検査等に本手法を適用すれば、同一部材の中で劣化進行が懸念される位置を事前に把握でき、コンクリート構造物の維持管理計画において参考となる情報を提供できるものと期待される。

なお、本研究は独立行政法人土木研究所との共同研究で行ったものであり、論文は研究成果の一部である。

最後に促進中性化試験では戸田建設株式会社技術研究所のご協力を得たことに感謝致します。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭 : 弾性波速度の測定にコンクリートの圧縮強度の測定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.1637-1642, 2003.7
- 2) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭 : 縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1887-1892, 2004.6
- 3) N.J.Carino, M.Sansalone, N.N.Hsu : A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI JOURNAL / March-April 1986, pp.189-208