

衝撃弾性波法によるコンクリート表層部の 品質評価に関する基礎的研究

岩野 聡史^{*1}・森濱 和正^{*2}・極壇 邦夫^{*3}・境 友昭^{*4}

1. はじめに

コンクリート表層部は、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、コンクリート表層部の品質を評価することは、有効な情報になると考えられる。

筆者らは衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の非破壊検査について研究をしてきた¹⁾²⁾。衝撃弾性波法は、コンクリート表面を鋼球等で打撃し、コンクリート内部に発生する弾性波を測定、解析する手法であるが、ここで、コンクリート表面と打撃物（以下、インパクトという）の接触時間は、コンクリート表面の弾性係数によって変化する性質がある。これから、この接触時間の測定値がコンクリート表層部の品質を評価する指標値になると期待される。今回は、供試体および新設構造物の複数点で接触時間を測定し、型枠の相違による比較、促進中性化試験結果との比較、これらを実施し、本法の有効性について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 測定原理

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とコンクリートとの接触時間 T_C は式(1)により示される³⁾。

$$T_C = 5.97 \left[\rho_S (\delta_S + \delta_P) \right]^{2/5} \frac{R}{h^{0.1}} \quad \left(\delta_P = (1 - \nu_P^2) / \pi E_P, \delta_S = (1 - \nu_S^2) / \pi E_S \right) \quad (1)$$

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 : コンクリートの弾性係数、 E_S : 鋼球の弾性係数である。

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表層部の弾性係数によって変化する事となる。例えば、コンクリート表層部の強度が強く、弾性係数 E_P が大きい測定点では、 δ_P が小さくなり、接触時間が短くなる事となる。これから、同じインパクト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部の品質評価に利用できると考えられる。

2. 2 実験内容

今回の実験内容を表-1に示す。実験1では、2箇所の新設の実構造物で接触時間を測定した。測定位置によりコンクリートの材齢が異なり、材齢の変化による接触時間の変化について実験した。実験2では、2供試体の8部位において接触時間を測定した。各部位では、型枠に合板型枠を使用した面と透水型枠を使用した面があり、型枠の相違による接触時間の変化を比較した。実験3では、配合、養生方法の異なる5種類の

*1 リック㈱技術研究所技術開発グループ 所長代理

*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 総括主任研究員

*3 iTECS 技術協会 理事長 工修

*4 アプライドリサーチ㈱ 代表取締役 工博

供試体で接触時間を測定した。接触時間の測定後に促進中性化試験を実施し、配合、養生方法の相違による中性化進行速度の変化と、接触時間の変化とを比較した。

2. 3 接触時間の測定方法

接触時間の測定状況を写真-1に示す。衝撃加速度計（PCB社製350B03型）を取り付けたインパクトにより、コンクリート表面を打撃し、入力波形を測定した。インパクトのコンクリートとの接触面は鋼球であり、衝撃加速度計を含む総質量は実験1では18g、実験2、3では8.4gである。ここで、インパクトの質量が重くなれば、接触時間は長くなり、広域の弾性係数を反映することとなる。本測定は、コンクリート表層部に限定した評価を対象としていることから、インパクトは小質量とした。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。

測定波形および周波数解析の例を図-1に示す。入力波形の凸部の横軸が接触時間 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困難となる。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 材齢による比較

(1) 実験方法

構造物 V、W のボックスカルバートの現場で実験を行った。測定位置を図-2に示す。構造物 V では底版と側壁の境界面に打継ぎ面があり、測定日の材齢は底版（測定位置 A、B）で42日、側壁（測定位置 C～J）と頂版で20日である。構造物 W では側壁の中段に打継ぎ面があり、測定日の材齢は側壁の下段（測定位置 A、B）で42日、側壁の上段（測定位置 C～F）と頂版で28日である。さらに、側壁の下段（測定位置 A、B）では材齢66日でも測定した。以上のとおり、同一配合であるが、測定材齢の異なる位置で測定したものである。

(2) 測定結果

構造物 V、W での接触時間の測定結果を表-2、図-3に示す。測定結果より、材齢経過に伴い、接触時間

表-1 実験内容

| 実験名称 | 実験内容 | 測定対象物 | 配合 | |
|-------|----------------------|---------|-----------|-----------|
| 実験1 | 材齢による比較 | 構造物V | 24-8-25BB | |
| | | 構造物W | 24-8-25BB | |
| 実験2 | 透水型枠、合板型枠を使用した場合での比較 | L型供試体 | A壁 | 18-8-25N |
| | | | A底版 | 18-8-40BB |
| | | | B壁 | 27-8-25N |
| | | ボックス供試体 | B底版 | 18-8-40BB |
| | | | C壁 | 40-8-25N |
| | | | C底版 | 27-8-40BB |
| 実験3 | 促進中性化試験結果との比較 | 曲げ供試体 | 薄壁 | 45-12-20N |
| | | | 厚壁 | 18-8-20N |
| | | | MN18 | 18-8-20N |
| | | | MN24 | 24-8-20N |
| | | | MN30 | 30-8-20N |
| MN60 | 60-15-20N | | | |
| MBB24 | 24-8-20BB | | | |



写真-1 接触時間の測定状況

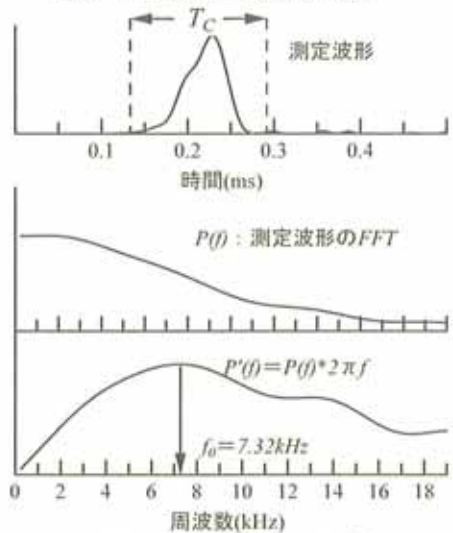


図-1 接触時間の測定例

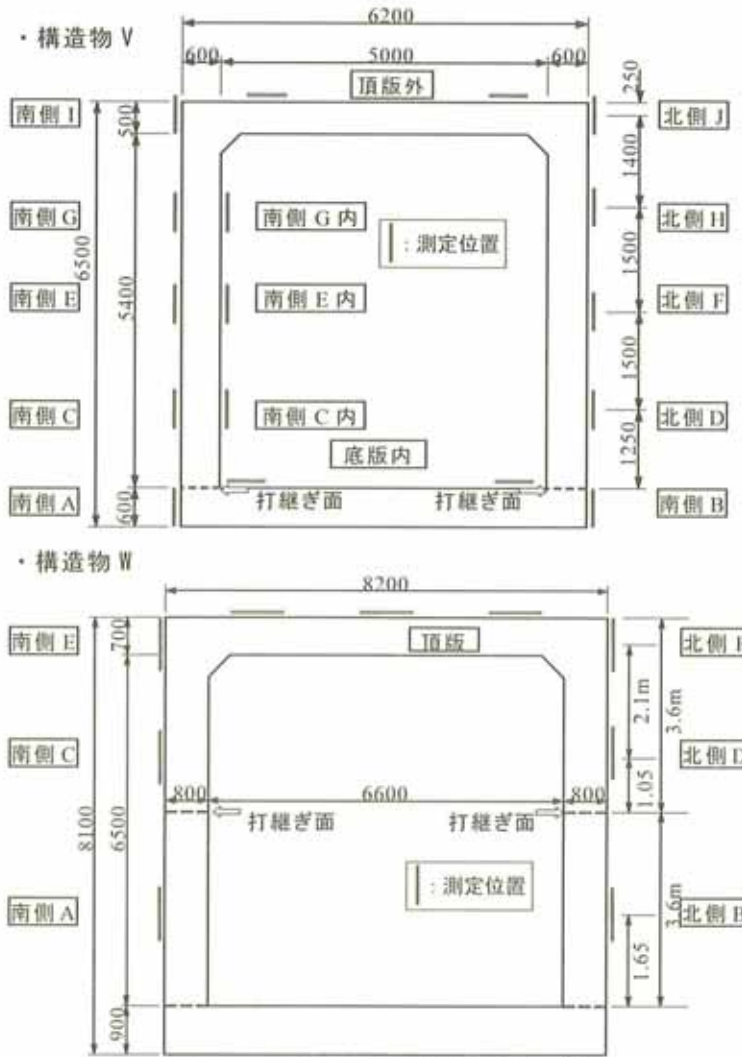


図-2 構造物 V, 構造物 W 測定位置

表-2 接触時間測定結果

| 測定位置名称 | 材齢 (日) | 接触時間 (μ秒) | |
|--------|--------|-----------|-------|
| | | 各測定値 | 平均値 |
| 南側頂版外 | 20 | 151.4 | 150.2 |
| 南側I | | 154.3 | |
| 南側G | | 146.0 | |
| 南側G内側 | | 155.2 | |
| 南側E | | 149.0 | |
| 南側E内側 | | 150.5 | |
| 南側C | | 147.7 | |
| 南側C内側 | | 150.3 | |
| 北側頂版外 | | 157.5 | |
| 北側J | | 149.0 | |
| 北側H | | 149.2 | |
| 北側F | | 142.5 | |
| 北側D | 150.0 | | |
| 南側A | 140.8 | 141.3 | |
| 南側底版内側 | 141.9 | | |
| 北側B | 142.9 | | |
| 北側底版内側 | 139.6 | 153.2 | |
| 頂版中央 | 149.3 | | |
| 南側頂版 | 151.8 | | |
| 南側E左側 | 148.5 | | |
| 南側E右側 | 144.8 | | |
| 南側C左側 | 147.2 | | |
| 南側C右側 | 155.3 | | |
| 北側頂版 | 153.6 | | |
| 北側F左側 | 162.3 | | |
| 北側F右側 | 157.4 | | |
| 北側D左側 | 158.3 | | |
| 北側D右側 | 156.4 | | |
| 南側A左側 | 138.3 | 144.8 | |
| 南側A右側 | 142.7 | | |
| 北側B左側 | 150.6 | | |
| 北側B右側 | 147.5 | 142.6 | |
| 南側A左側 | 134.3 | | |
| 南側A右側 | 141.0 | | |
| 北側B左側 | 148.5 | | |
| 北側B右側 | 146.5 | | |

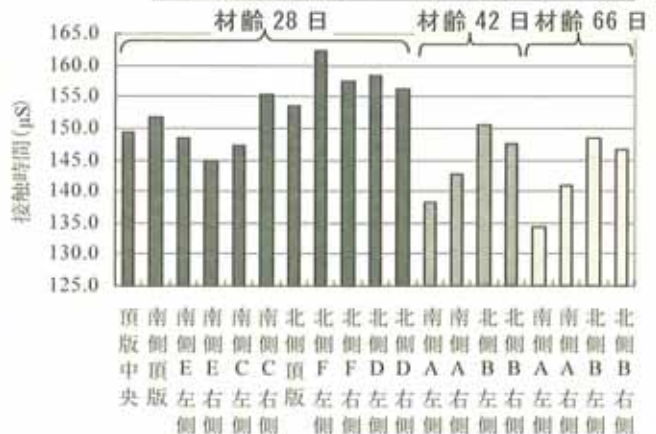
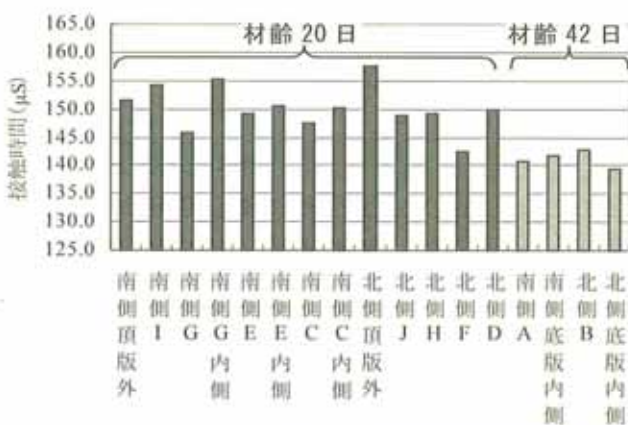


図-3 接触時間測定結果 (左図: 構造物 V, 右図: 構造物 W)

が短く変化する傾向が確認される。接触時間は、式(1)より、コンクリート表層部の弾性係数が大きくなれば短くなる。測定結果は、コンクリート表層部が材齢経過に伴い弾性係数が大きくなった結果を反映したものと考えられる。

また、構造物 W の南側 A と北側 B のように、同一配合、同一材齢であっても測定結果に差が生じる場合

がある、これは、各測定位置で弾性係数の差を反映したものと考えられ、このような測定結果の差が、コンクリート表層部の品質評価に利用できるものと期待される。

3. 2 型枠の相違での比較

(1) 実験方法

写真-2に示すL型供試体、ボックス供試体で実験を行った。両供試体の端面(L型供試体

はL字の面、ボックス供試体は口の字の面)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型供試体では、材齢25日で壁、底版の型枠の異なる両端面で接触時間を測定した。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接触時間を測定した。

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。

(2) 測定結果

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-4に示す。図-4より、例えばL型供試体Aの底版では、合板型枠での接触時間が約125 μ 秒であるのに対し、透水型枠では約100 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~40 μ 秒ほど接触時間が短くなることを確認された。

また、L型供試体では ϕ 25mmの小径コアを採取し、表面から深さ50mm付近まで圧縮強度を試験した。この結果を図-5に示すと、一般に透水型枠を使用すれば、コンクリート表層部の品質は改善されるが、図-5より、透水型枠を使用したことにより、圧縮強度が強くなっている傾向が確認される。

図-4の結果は、透水型枠を使用したことにより、コンクリート表層部の品質が改善された結果を反映したものと考えられる。

3. 3 促進中性化試験結果との比較

(1) 実験方法

写真-3に示す曲げ供試体で実験を行った。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脱型後から気乾養生、③材齢3日まで水中養生の後、気乾養生、③材齢7日まで水中養生の後、気乾養生、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、各養生方法で接触時間を測定し、材齢28日の測定後に測定点から ϕ 25mmの小径コアを採取して、促進中性化試験を行い、この中性化深さの測定結果と比較した。

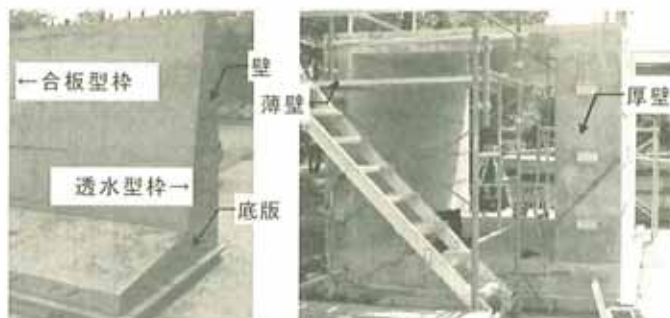


写真-2 実験2 供試体 (左: L型, 右: ボックス)

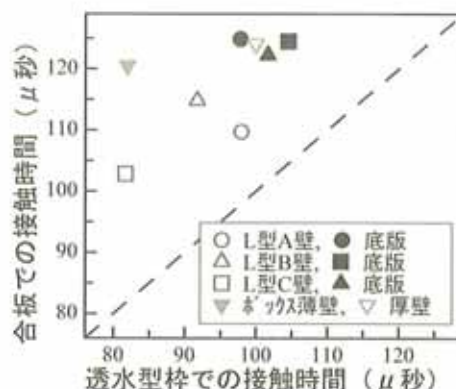


図-4 接触時間の比較結果

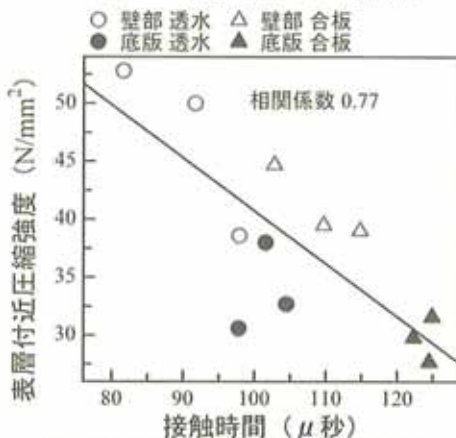


図-5 接触時間と圧縮強度の比較



写真-3 実験3 供試体

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。

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 | 3,7,17,31,66日 |

(2)測定結果

曲げ供試体の各配合、各水中養生日数の供試体で、材齢7日、28日に測定した接触時間を図-6に、材齢7日、28日に測定した接触時間と促進中性化試験の結果を表-4に示す。

接触時間の測定結果より、材齢7日と28日を比較すると、3.1節と同様に、ほとんどの供試体で材齢28日での接触時間が短くなっていることが確認される。また、配合で比較しても、呼び強度が強い供試体ほど、接触時間は短くなることが確認される。しかし、曲げ供試体では気乾養生前の水中養生の日数を0日、3日、7日と変化させたが、各配合での水中養生日数を比較すると、特に水中養生の日数を長くしても、接触時間が短くなるような変化は確認されなかった。

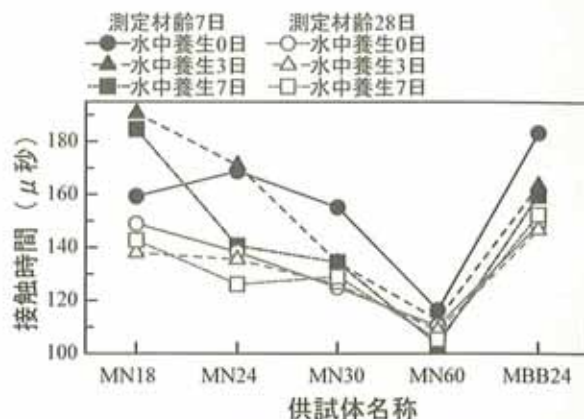


図-6 曲げ供試体での接触時間測定結果

一方、促進中性化試験は期間を3~66日の5回として中性化深さを測定したが、その結果から、式(3)に示す \sqrt{t} 則により、中性化速度係数*A*を求めた。

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

表-4より、中性化速度係数を各配合での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、中性化速度係数は0.1程度とわずかではあるが、進行速度が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、コンクリート表層部の品質は若干改善されているのに対し、接触時間の測定結果は、この若干の変化を反映できなかったものと考えられる。

表-4 曲げ供試体の接触時間測定結果および中性化深さ測定結果

| 名称 | 水中養生日数 | 接触時間(μ秒) | | 中性化深さ(mm) | | | | | 中性化速度係数 (mm/日 ^{0.5}) |
|-------|--------|----------|-------|------------|-----|-----|------|------|-----------------------------------|
| | | 測定材齢 | | 促進中性化期間(日) | | | | | |
| | | 7日 | 28日 | 3 | 7 | 0 | 31 | 66 | |
| MN18 | 0日 | 159.3 | 149.0 | 4.3 | 6.3 | 8.5 | 10.5 | 16.1 | 2.00 |
| | 3日 | 190.6 | 138.0 | 2.8 | 5.6 | 8.1 | 10.1 | 15.1 | 1.87 |
| | 7日 | 184.6 | 142.7 | 3.1 | 5.6 | 6.8 | 9.2 | 14.4 | 1.75 |
| MN24 | 0日 | 168.8 | 138.3 | 2.6 | 4.6 | 7.4 | 11.1 | 9.9 | 1.53 |
| | 3日 | 171.0 | 135.5 | 2.1 | 3.9 | 5.0 | 9.5 | 10.8 | 1.41 |
| | 7日 | 140.7 | 126.1 | 1.4 | 3.3 | 4.8 | 7.3 | 9.5 | 1.20 |
| MN30 | 0日 | 155.2 | 125.0 | 2.4 | 3.3 | 5.1 | 7.4 | 4.6 | 0.91 |
| | 3日 | 134.4 | 126.1 | 1.2 | 2.7 | 4.0 | 4.7 | 6.0 | 0.81 |
| | 7日 | 134.5 | 129.1 | 0.8 | 3.3 | 4.2 | 4.7 | 5.7 | 0.81 |
| MN60 | 0日 | 116.4 | 110.3 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.9 | 0.3 | 0.09 |
| | 3日 | 112.7 | 108.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.01 |
| | 7日 | 103.4 | 105.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.01 |
| MBB24 | 0日 | 183.4 | 148.7 | 6.6 | 9.2 | 9.9 | 11.2 | 16.9 | 2.23 |
| | 3日 | 163.4 | 146.8 | 4.7 | 6.1 | 6.0 | 10.8 | 14.9 | 1.86 |
| | 7日 | 159.8 | 152.4 | 3.2 | 4.8 | 5.5 | 9.1 | 15.5 | 1.75 |

全曲げ供試体の材齢 7, 28 日での接触時間と中性化速度係数との関係を図-7 に示す。図-7 より、中性化速度係数と接触時間は材齢 7 日では相関係数 0.91、材齢 28 日では 0.96 と、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。

しかし、材齢 7 日での相関係数は 28 日より劣る。これは材齢 7 日では水中養生後の日数が 0~7 日と短く、各供試体によってコンクリート表層部の含水率が異なり、何らかの影響を受けた可能性が考えられる。

4. まとめ

コンクリート表層部の品質を評価する方法として、衝撃弾性波法により、打撃物の接触時間を測定する方法を検討した。その結果、接触時間の測定結果は材齢経過や型枠の相違によるコンクリート表層部の弾性係数の変化を反映し、中性化速度係数と相関関係にあることが確認された。本法は、簡易な測定方法であり、また、非破壊であることから繰返しの測定が可能である。新設構造物で本法を適用し、中性化等の劣化の進行が懸念される位置を事前に把握して、以後の維持管理での試験実施箇所の判断に利用することや、測定結果を経年比較することにより、試験実施時期の判断に利用することなどが期待される。しかし、測定結果はコンクリート表層部の含水率の影響を受ける可能性があることや、若干の品質の変化を反映できない可能性があり、測定方法を改善することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正, 極壇邦夫, 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, 境友昭, 極壇邦夫: 衝撃弾性波法を適用した新設コンクリート構造物での圧縮強度推定および内部欠陥探査に関する検討, (社)日本非破壊検査協会コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集 Vol.2, pp.475-482, 2006.8
- 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

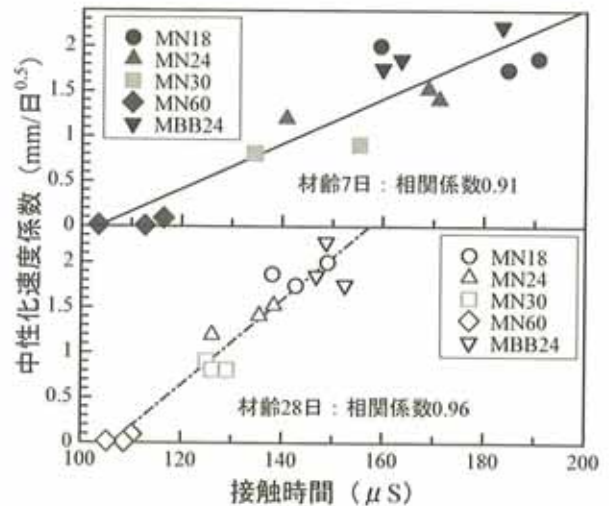


図-7 中性化速度係数と接触時間の比較