

衝撃弾性波法による RC 造マンションでの非破壊調査結果

Nondestructive Investigation by Impact Elastic Wave Method to RC-Condominium Building

リック㈱ 岩野 聡史

リック㈱ 平尾 幹也

㈱ジャスコ 松本 章

1. はじめに

コンクリート構造物の非破壊検査の 1 手法に衝撃弾性波法がある¹⁾。衝撃弾性波法はコンクリート表面にセンサーを設置し、その近傍を鋼球やハンマーにより打撃して、この衝撃により発生する弾性波を観測する手法である。コンクリート中に発生する弾性波はコンクリートの内部状況によって、伝搬速度や伝搬経路等が変化することから、弾性波を観測することにより、コンクリートの強度や厚さ、内部欠陥の有無を測定することが可能となる。また、簡易な測定方法であることから短時間で測定できること、内部の鉄筋や骨材の影響を受けずに測定できることなどの特長がある。今回はこの衝撃弾性波法を適用して、RC 造マンションにおいて圧縮強度の推定、内部欠陥の探査、構造目地（耐震スリット）の有無調査を行ったので、その結果について報告する。

2. 調査概要

2. 1 調査対象建物概要

調査対象建物の概要について、本調査に関連する項目を以下に示す。

①竣工年月日：平成 16 年 9 月

②階数・戸数：住宅棟 地上 9 階 1 棟 23 戸

③構造：鉄筋コンクリート造（地上 9 階建・共同住宅・陸屋根）

④主たる仕上げ〔専有部分（居室）〕（床、壁）

・床：コンクリート金ゴテ押え（25mm）下地、防音フローリング貼り・畳敷き

・壁：コンクリート打放し補修下地 ビニールクロス貼り

⑤コンクリート設計標準仕様：基礎・基礎梁、柱・梁・床・壁

普通 設計基準強度 24N/mm² 品質管理強度 27N/mm²

2. 2 調査内容、実施部位

①測定器：弾性波レーダシステム iTECS-4（アイテックス 4）

②圧縮強度の推定：梁 5 部位、床 3 部位、壁 7 部位

③内部欠陥探査：梁 5 部位、床 3 部位

④構造目地（耐震スリット）有無調査：壁間（垂直）1 箇所、床・壁間（水平）1 箇所

3. コンクリートの圧縮強度推定結果

3. 1 測定原理²⁾

本測定は、①コンクリート中を伝搬する弾性波の速度は、ポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例すること、②弾性係数とコンクリートの圧縮強度には正の相関関係があること、①、②より、弾性波速度と圧縮強度には相関関係があることを利用して、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を推定するものである。

(1) 構造体コンクリートでの縦弾性波速度の測定方法



図 1 弾性波速度測定状況

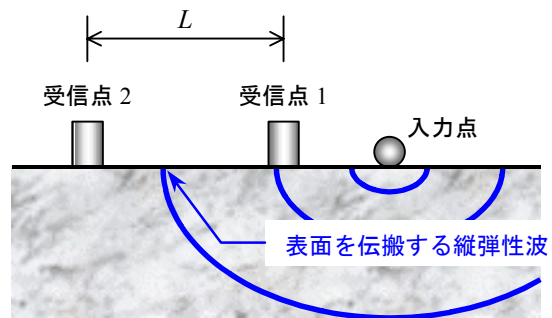


図 2 弾性波伝搬模式図

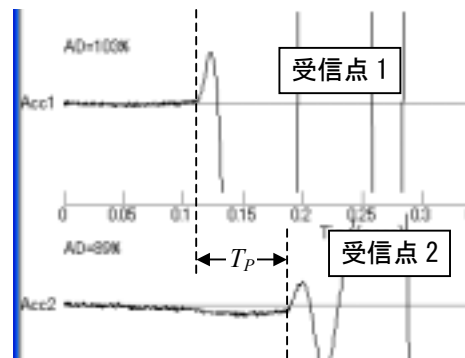


図 3 弾性波の到達時間差測定例

弾性波速度の測定状況を図 1 に示す。コンクリート表面に鋼球で打撃を与えると、図 2 の模式図に示すとおり、内部を球面状に伝搬する弾性波が発生する。鋼球打撃による弾性波の入力点、加速度センサーを設置する受信点 1,2 を一直線上に設定し、コンクリート表面を伝搬する縦弾性波の到達時間差 T_p を計測し(図 3)、受信点 1,2 の距離差 L から弾性波速度 V_p を測定する。

弾性波速度 V_p は受信点 1,2 の距離差 L を 200, 300, 400mm と 100mm 間隔で 1000mm まで変えて測定し、全測定結果の平均値から弾性波速度 V_p を決定する。

(2) 圧縮強度の測定方法

構造体コンクリートで測定した弾性波速度から、弾性波速度と圧縮強度の関係式を換算式として圧縮強度を推定するが、弾性波速度とコンクリートの圧縮強度との関係は、コン

クリートの配合によって変化する性質がある。そこで、本構造物ではコア採取により7箇所
 で圧縮試験を実施したが、コア採取箇所では弾性波速度を測定し、この測定結果と圧縮試験
 の結果から弾性波速度と圧縮強度の関係式を最小二乗法により求め（図4）、ここで得ら
 れた関係式（1）を換算式として設定した。

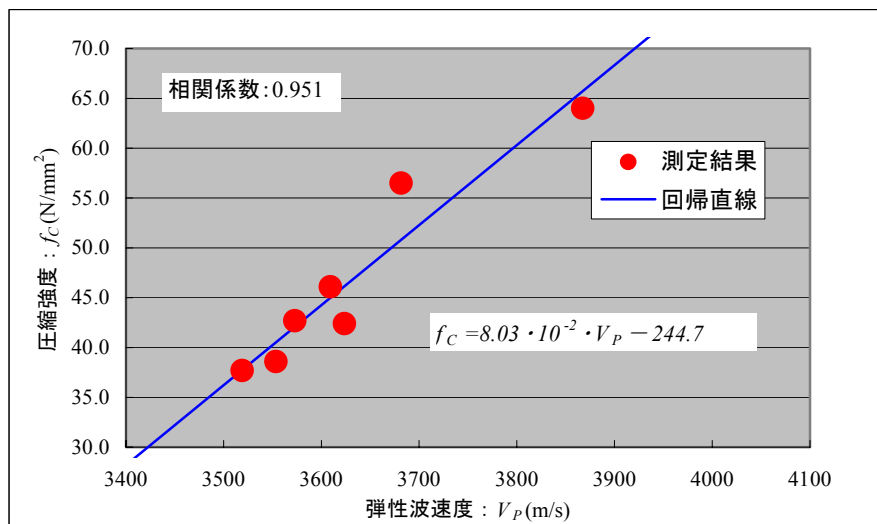


図4 弾性波速度とコア採取による圧縮強度との関係調査結果

$$f_c = 8.03 \cdot 10^{-2} \cdot V_p - 244.7 \quad (1)$$

3. 2 推定結果

各部位で弾性波速度を測定し、圧縮強度を推定した結果を図5、表1に示す。推定強度
 は $32.1\text{N/mm}^2 \sim 65.7\text{N/mm}^2$ となり、全部位ともコンクリート設計標準仕様の設計基準強度
 24N/mm^2 、品質管理強度 27N/mm^2 を満足することが確認された。

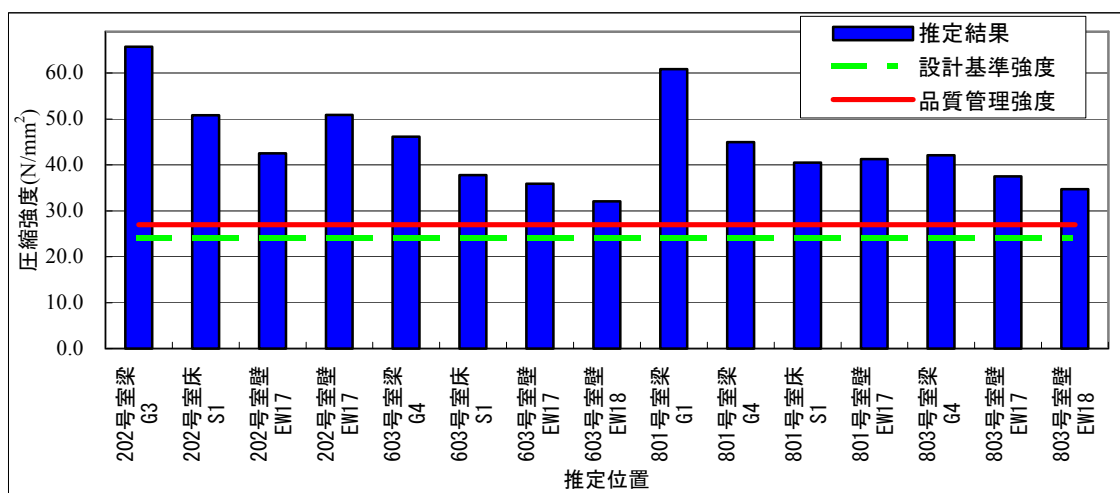


図5 衝撃弾性波法による圧縮強度推定結果

表1 衝撃弾性波法による圧縮強度推定結果

推定位置名称		弾性波速度 (m/s)	推定圧縮強度 (N/mm ²)
号室	部位		
202号室	梁 G3	3868	65.7
	床 S1	3681	50.8
	壁 EW17	3578	42.5
	壁 EW17	3683	50.9
603号室	梁 G4	3624	46.2
	床 S1	3519	37.8
	壁 EW17	3496	35.9
	壁 EW18	3448	32.1
801号室	梁 G1	3807	60.8
	梁 G4	3609	45.0
	床 S1	3554	40.5
	壁 EW17	3563	41.3
803号室	梁 G4	3573	42.1
	壁 EW17	3516	37.5
	壁 EW18	3481	34.7

4. コンクリート内部の欠陥探査

4. 1 測定原理

(1) 弾性波の反射深さの測定方法

1) 反射深さの計算式

本測定では弾性波の反射深さを測定し、この結果と設計厚さを比較することにより、コンクリート内部にジャンカや空洞等が存在するかを調査するものである。

弾性波の反射深さ D は、「3.」で測定した弾性波速度 V_p と、以下2)により測定する弾性波の多重反射により生成される周波数 f_0 から式(2)により測定する。

$$D = V_p / (2f_0) \quad (2)$$



図6 測定状況例（左：近影）

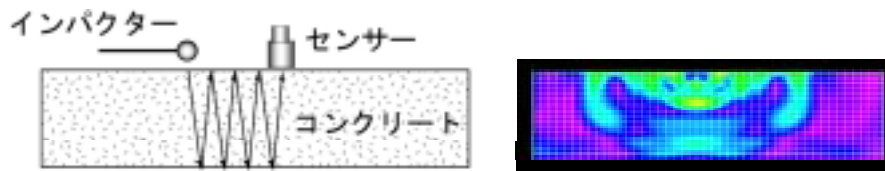


図7 コンクリート内部で多重反射する弾性波の模式図

2) 周波数 f_0 の測定方法

測定状況を図6に示す。コンクリート表面に加速度センサーを設置して、その近傍を鋼球で打撃し、iTECS-4により発生する振動を測定する。コンクリート表面を鋼球で打撃し

たときに発生する弾性波の模式図を図 7 に示す。発生する弾性波は内部を球面上に伝搬し、コンクリートと音響インピーダンス（密度と弾性波速度の積）が異なる材質との境界面を反射面とすることから、入力面と反射面で多重反射を繰り返すこととなる。

コンクリート表面に設置した加速度センサーでは、弾性波が往復して表面に到達する毎に振動が観測されることから、この多重反射による周期性が生成されることとなる。これから、加速度センサーの測定波形に対して周波数解析を行ない、振幅が最大となる周波数から弾性波の往復時間の逆数となる周波数 f_0 を決定することができる（図 8）。

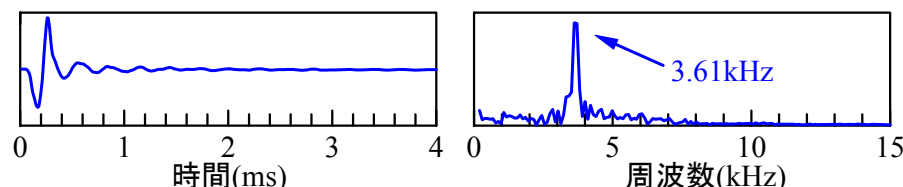


図 8 iTECS-4 による測定波形（左図）と周波数解析結果（右図）の例

(2) 内部欠陥有無の判定方法

各コンクリート状況での弾性波の多重反射の模式図を図 9 に示す。（1）により測定した弾性波の反射深さ D は、コンクリートが健全であれば、弾性波はコンクリートの背面で多重反射することから実際の厚さと一致する。これに対し、コンクリート内部に空洞が存在している場合には、弾性波は空洞部との境界面で反射することから反射深さ D は実際の厚さよりも薄くなる。また、空洞には至らないまでも、ジャンカ等によりセメント硬化体が脆弱化している場合には、脆弱部を迂回して弾性波の伝搬経路が長くなることや脆弱部での弾性波速度は低下することから、弾性波の往復時間が長くなり、反射深さ D は実際の厚さよりも厚くなる。



図 9 各コンクリート状況で多重反射する弾性波の模式図

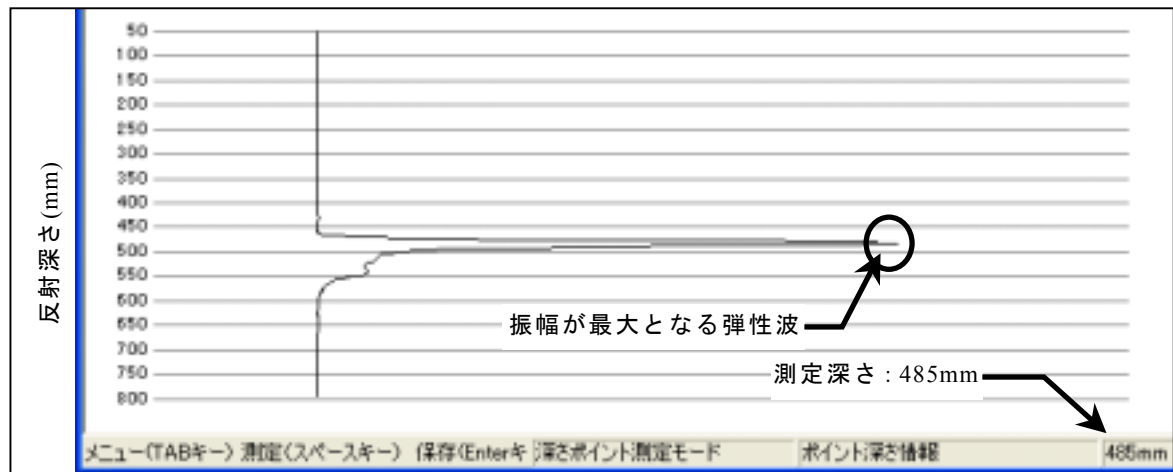
以上から、（1）により測定した弾性波の反射深さ D と設計厚さとを比較することにより、コンクリート内部にジャンカや空洞等が存在しているかを判断することが可能となる。

4. 2 測定結果

測定結果例を図 10 に、全測定部位での測定結果を表 2 に示す。図 10 は縦軸に弾性波の反射深さ、横軸に弾性波の反射強さ（振幅）を示したグラフであり、振幅が最大となる深さから弾性波の反射深さを決定した。図 10 より、603 号室梁 G4 での反射深さは 485mm となり、設計厚さ 500mm に対する測定値の比率は 0.97 となった。本測定器の精度は $\pm 5\%$ であることから¹⁾、測定結果は誤差の範囲内であり、603 号室梁 G4 のコンクリート内部は健

全であると判断される。これに対し 801 号室 G4 での反射深さは 447mm となり設計厚さ 500mm に対する測定値の比率は 0.89 となり、深さ 447mm 付近のコンクリート内部に何らかの反射面が存在すると推測される。しかし、比率 1.00 となる 502mm で反射する弾性波も同時にある程度の振幅値で観測されている。この結果は、表面から入力した弾性波は内部の反射面で全反射することなく、背面の 502mm まで伝搬する成分も存在していることを示しており、内部の反射面は軽微なものであると推測される。

測定例①：603 号室 梁 G4（設計厚さ 500mm）



測定例②：801 号室梁 G4（設計厚さ 500mm）

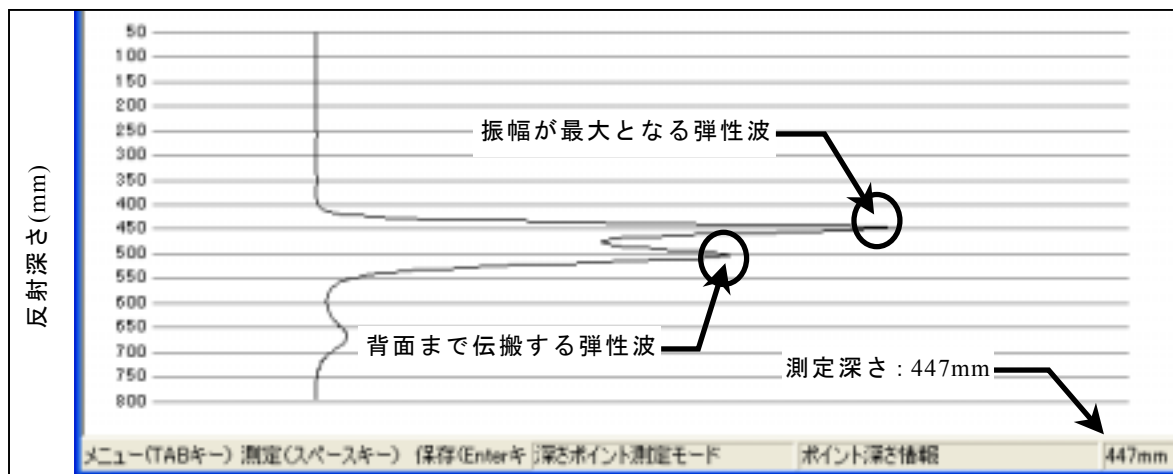


図 10 衝撃弾性波法による弾性波反射深さの測定例（上図：603 号室梁，下図：801 号室梁）

表2 衝撃弾性波法による内部欠陥探査結果

推定位置名称		①設計厚さ (mm)	②反射深さ測定結果 (mm)	設計値と測定値の 比率 (②/①)	判定結果
号室	部位				
202号室	梁 G3	500	507	1.01	健全部
	床 S1	200	197	0.99	健全部
603号室	梁 G4	500	485	0.97	健全部
	床 S1	200	204	1.02	健全部
801号室	梁 G1	300	305	1.02	健全部
	梁 G4	500	447, 502	0.89, 1.00	軽微な反射面
803号室	梁 G4	500	492	0.98	健全部

5. 構造目地有無調査

5. 1 測定方法

構造目地（耐震スリット）は地震等の振動を部位間で伝搬させない材料である。従って、衝撃弾性波法での鋼球打撃により入力した弾性波も、伝搬経路中に構造目地が存在すれば、伝搬されないと考えられる。これから、「3. 1」に示した弾性波速度の測定を2点の受信点間に構造目地を挟んだ状態で実施すれば、伝搬経路は変化し、測定上の弾性波速度は変化するものと考えられる。

これから、設計上構造目地が存在する部材において、弾性波速度の測定を測定①：受信点1,2間に構造目地を挟まない場合、測定②：受信点1,2間に構造目地を挟んだ場合、以上の2通りで実施し（図11）、測定結果を比較することにより構造目地の有無を判断した。

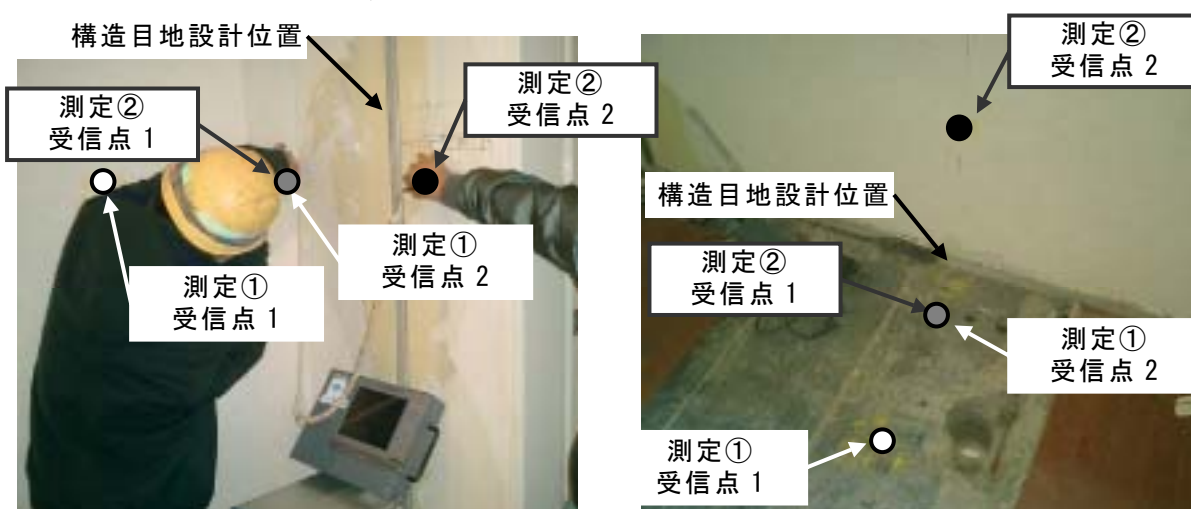


図11 構造目地有無調査の測定状況（左図：壁間垂直，右図：床・壁間水平）

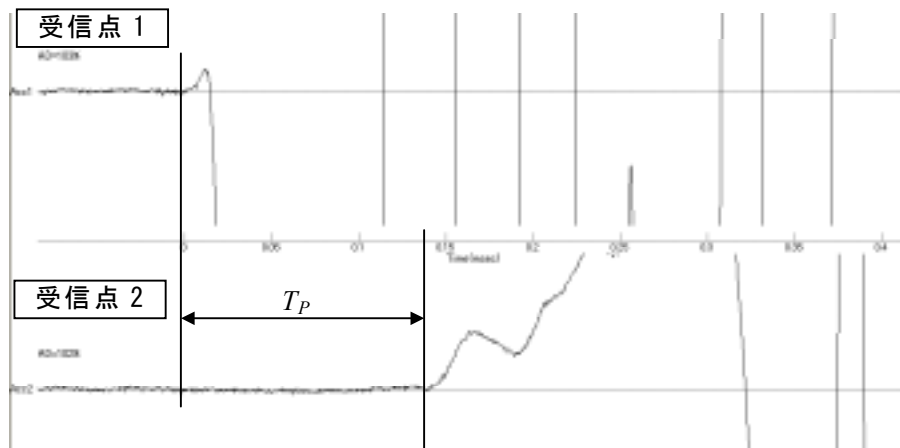
5. 2 測定結果

表3 構造目地有無調査結果

測定部位	測定（受信点間）状況	弾性波速度(m/s)	判定結果
壁間 （垂直）	測定①：設計上目地無し	3398	—
	測定②：設計上目地有り	2232	目地有り
床・壁間 （水平）	測定①：設計上目地無し	3459	—
	測定②：設計上目地有り	2932	目地有り

測定結果例として壁間での測定結果を図12に、両部位での弾性波速度測定結果および測定結果を表3に示す。図12より、受信点間に構造目地を挟まない場合の測定①では、受信点1、受信点2間での弾性波速度は3398m/sとなるのに対し、受信点間に構造目地を挟んだ場合の測定②では、弾性波速度は2232m/sと大きく低下した。また、受信点2の測定波形はノイズ成分が大きくなり、鋼球打撃により入力した弾性波は大きく減衰して、受信点2に到達していると判断できる。これは、構造目地が存在することにより、弾性波の伝搬経路が長く変化したことを示すものであり、この位置には構造目地が存在していると判断できる。床・壁間についても、同様の結果となり、両部位とも設計通りに構造目地が存在していると判断できる。

測定①（設計上受信点間に目地無し）：弾性波速度測定結果 3398m/s



測定②（設計上受信点間に目地有り）：弾性波速度測定結果 2232m/s

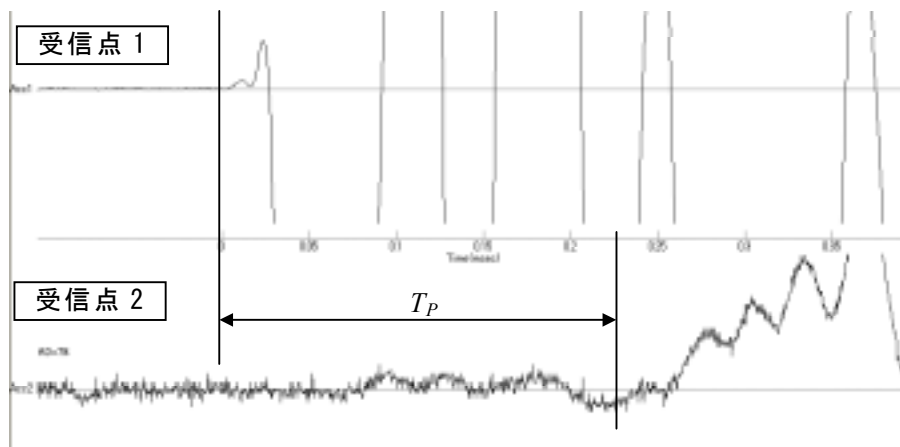


図 12 構造目地有無調査の測定例（測定部位：壁間垂直，上図：測定①，下図：測定②）

6. まとめ

衝撃弾性波法を適用した今回の調査結果を以下にまとめる。①7箇所採取したコアを用いて弾性波速度と圧縮強度の関係式を求め、計15箇所弾性波速度を測定し圧縮強度を推定した。その結果、全測定点とも品質管理強度を満足していることが確認できた。本測定は関係式の設定に一部のコア採取を必要とするが、設定完了後は完全な非破壊での測定であり、多くの箇所での強度推定が可能となる。②弾性波の反射深さを測定し、設計厚さと比較することにより、コンクリート内部の欠陥探査を行った。一部では軽微な反射面が測定されたが、特に内部欠陥は測定されなかった。③構造目地（耐震スリット）は弾性波を伝搬させない性質を利用して、構造目地の有無を調査した。その結果、弾性波の伝搬速度が大きく低下することが確認され、設計通りに構造目地が存在していると判断できた。

参考文献

- 1)非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究報告書(6)，独立行政法人土木研究所 共同研究報告書 第316号，2005.3
- 2)リック株，独立行政法人土木研究所：衝撃弾性波試験 iTECS 法による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006.4