

EMSシステムを用いた
硬化コンクリートの凍結融解試験
について

平成 15 年 5 月 16 日

熊本大学工学部環境システム工学科

1. 凍結融解試験について

凍結融解試験は、コンクリート構造物の凍結融解作用に対する耐久性を検討するために行われる。自然条件下において、コンクリートが受ける凍結融解作用に対する抵抗性を、室内実験によって評価するにあたって重要な要因は凍結速度および凍結される時の環境条件である。すなわち、凍結速度が早ければ、コンクリート内部に生じる圧力変動も大きくなり、より厳しい損傷を受けることとなる。また、水中凍結は気中凍結よりも厳しい条件である。

我が国では、土木学会基準として水中凍結の急速繰り返し法（A法）による「コンクリートの凍結融解試験方法（JSCE-G501）」が規定されている。この試験方法は水中における凍結融解の急速繰り返しによる、コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を試験するものである。

以下、本試験においては原則として上記の規定に拠って、株式会社 アースマテリアルより提供された、比較のための標準配合された硬化コンクリート供試体と、EMSシステムを用いた硬化コンクリート供試体4種の凍結融解試験の方法と結果について報告する。

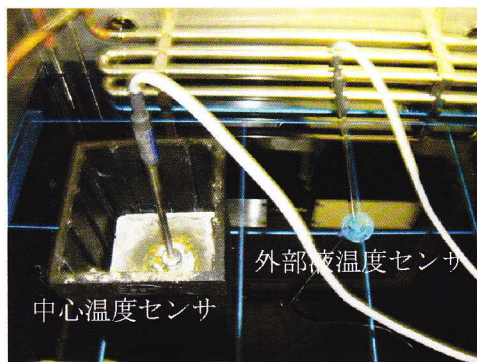
2. 供試体ならびに試験装置、器具

- (1) 試験装置は、コンクリートに所定の凍結融解サイクルを与えるのに必要な冷却および加熱装置、試験槽、温度測定装置ならびに制御装置を兼ね備えるものとして全自動凍結融解試験装置(朝日科学株式会社製)ARFT-10型(図1)を用いた。



図1

- (2) この試験装置は図2に示すように、温度制御にあたっては、コンクリート供試体の中心温度と、外部冷媒にそれぞれ配した温度センサによって1℃以内の精度で温度測定を行った。



- (3) 凍結融解の繰り返しによってコンクリート供試体が受けた損傷度を定量的に評価するために、超音波非破壊試験機(東京三和商工株式会社製)SIT-021型(図3)を使用して縦波超音波の伝播速度を計測した。

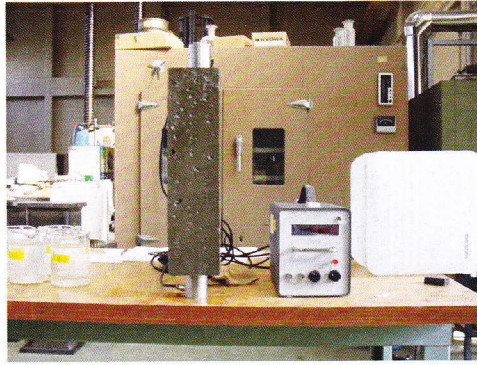


図 3

- (4) 加えて、損傷度の定量評価を質量減少率によって検討するために、はかりは、ひょう量 5kg 以上で、感量 2g 以上のものを用いた。
- (5) 供試体は、JIS A 1132 に規定された作製方法に拠って株式会社 アースマテリアルにより作製された、10×10×40cm の角柱供試体とした。また、供試体は型枠を外した直後に搬入され、温度 20±2℃の恒温室中に設置された水槽中で養生された。
- (6) 作製された供試体についての材齢 28 日における強度特性を計測するため、JIS A 1132 ならびに JIS A 1149 による圧縮強度ならびに静弾性係数を、万能試験機 100 t (島津製作所)、共和電業製 PCD-300A によるひずみ計測機器 (図 4) を用いて行った。

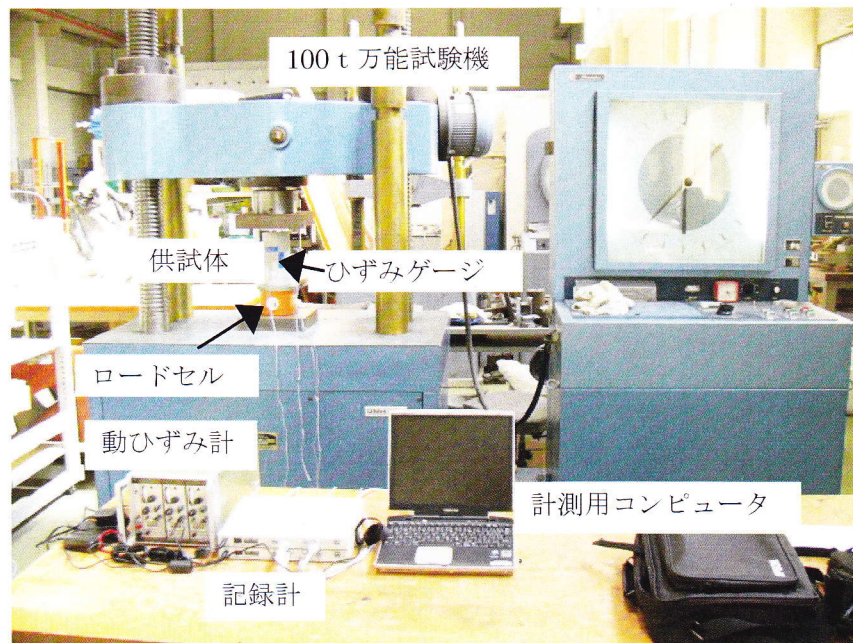


図 4

3. 試験方法

- (1) 供試体は、凍結融解の行程中、常に約 3mm 厚の水で全面を覆うものとし、そのため図 5 に示すような、内面に突起部を持つ硬質ゴム容器を使用した。なお、容器中の水は凍結融解の行程中のある任意の時点での供試体からの溶出成分濃度の水質分析に供するため抜き取った。そのため、液面が一定となるように適宜水道水を補充した。



図 5

- (2) 凍結融解の 1 サイクルは、図 6 に示すように、供試体の中心温度が 5°C から -18°C に下がり、また、 -18°C から 5°C に上がるものとし、各サイクルの最高、最低温度範囲はそれぞれ $5 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、および $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ となるように温度制御した。また、1 サイクルの所要時間は、十分な凍結と融解の実現を図るため、4 時間とした。

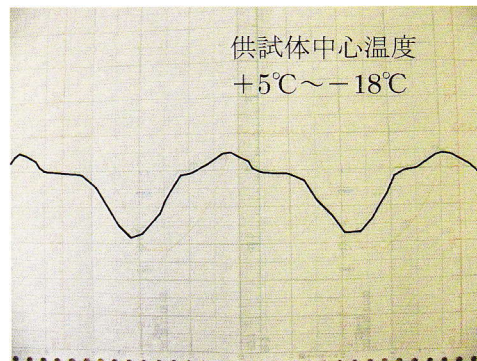


図 6

- (3) 試験は材齢 14 日まで養生された後、直ちに開始し、凍結融解の繰り返しが 300 サイクルに達した時点で終了した。
- (4) 試験開始前、および凍結融解の繰り返し 60 サイクルに一回の間隔で、また凍結融解行程終了直後に、質量および縦波超音波伝播速度を測定した。

4. 試験結果

- (1) 試験結果表示の簡略化のため、株式会社 アースマテリアルにより作製された供試体の諸元に基づき、供試体名称を次の表に示すように定義した。配合の詳細は、別途示される。

表 1 供試体の種類と名称

| 供試体名称 (X は供試体番号) | 粗骨材 | 練り混ぜ水 |
|---------------------|----------------|----------------------|
| A | 碎石のみ | 水道水 |
| B-1-X | 焼却灰固化骨材を 25%使用 | EMS システム, 50 倍希釈 P 液 |
| B-2-X | 焼却灰固化骨材を 25%使用 | EMS システム, 50 倍希釈 S 液 |
| C-1-X | ヘドロ固化骨材を 25%使用 | EMS システム, 50 倍希釈 P 液 |
| C-2-X | ヘドロ固化骨材を 25%使用 | EMS システム, 50 倍希釈 S 液 |

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

凍結融解試験に供した供試体と同配合により作製された円柱供試体（材齢 28 日）による圧縮強度と静弾性係数試験については、下表のような結果となった。

表 2 圧縮強度および静弾性係数試験結果（材齢 28 日）

平成 15 年 2 月 5 日実施

| 供試体番号 | 重量 (kg) | 密度 (g/cm ³) | 最大荷重 (kN) | 最大応力 (N/mm ²) | 静弾性係数 (N/mm ²) | ポアソン 比 |
|-------|------------|----------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|
| A-1 | 3.70 | 2.36 | 254 | 32.4 | 2.36E+04 | |
| A-2 | 3.69 | 2.35 | 256 | 32.6 | | |
| A-3 | 3.71 | 2.36 | 304 | 38.7 | 2.41E+04 | |
| 平均 | 3.70 | 2.36 | 271 | 34.5 | 2.39E+04 | 0.18 |
| B-1-1 | 3.67 | 2.34 | 321 | 40.9 | 2.47E+04 | |
| B-1-2 | 3.63 | 2.31 | 294 | 37.4 | 2.39E+04 | |
| B-1-3 | 3.59 | 2.29 | 277 | 35.3 | 2.61E+04 | |
| 平均 | 3.63 | 2.31 | 297 | 37.8 | 2.49E+04 | 0.21 |
| B-2-1 | 3.60 | 2.29 | 262 | 33.4 | 2.53E+04 | |
| B-2-2 | 3.61 | 2.30 | 280 | 35.7 | | |
| B-2-3 | 3.65 | 2.32 | 287 | 36.5 | 2.30E+04 | |
| 平均 | 3.62 | 2.31 | 276 | 35.2 | 2.41E+04 | 0.21 |
| C-1-1 | 3.65 | 2.32 | 265 | 33.8 | 2.45E+04 | |
| C-1-2 | 3.66 | 2.33 | 267 | 34.1 | 2.34E+04 | |
| C-1-3 | 3.65 | 2.33 | 287 | 36.5 | | |
| 平均 | 3.66 | 2.33 | 273 | 34.8 | 2.39E+04 | 0.19 |
| C-2-1 | 3.62 | 2.30 | 273 | 34.8 | 2.39E+04 | |
| C-2-2 | 3.62 | 2.30 | 253 | 32.2 | | |
| C-2-3 | 3.62 | 2.30 | 277 | 35.3 | 2.48E+04 | |
| 平均 | 3.62 | 2.30 | 268 | 34.1 | 2.43E+04 | 0.18 |

以上の結果から、最大応力の比較において、EMS システムによるコンクリート供試体の圧縮強度は、標準配合のコンクリート供試体（A）に対していずれも同等または、大きい結果が得られている。また、静弾性係数試験の結果においても、圧縮強度の試験結果と同様な結果を示している。

(3) 凍結融解試験行程中、および終了直後の供試体外観

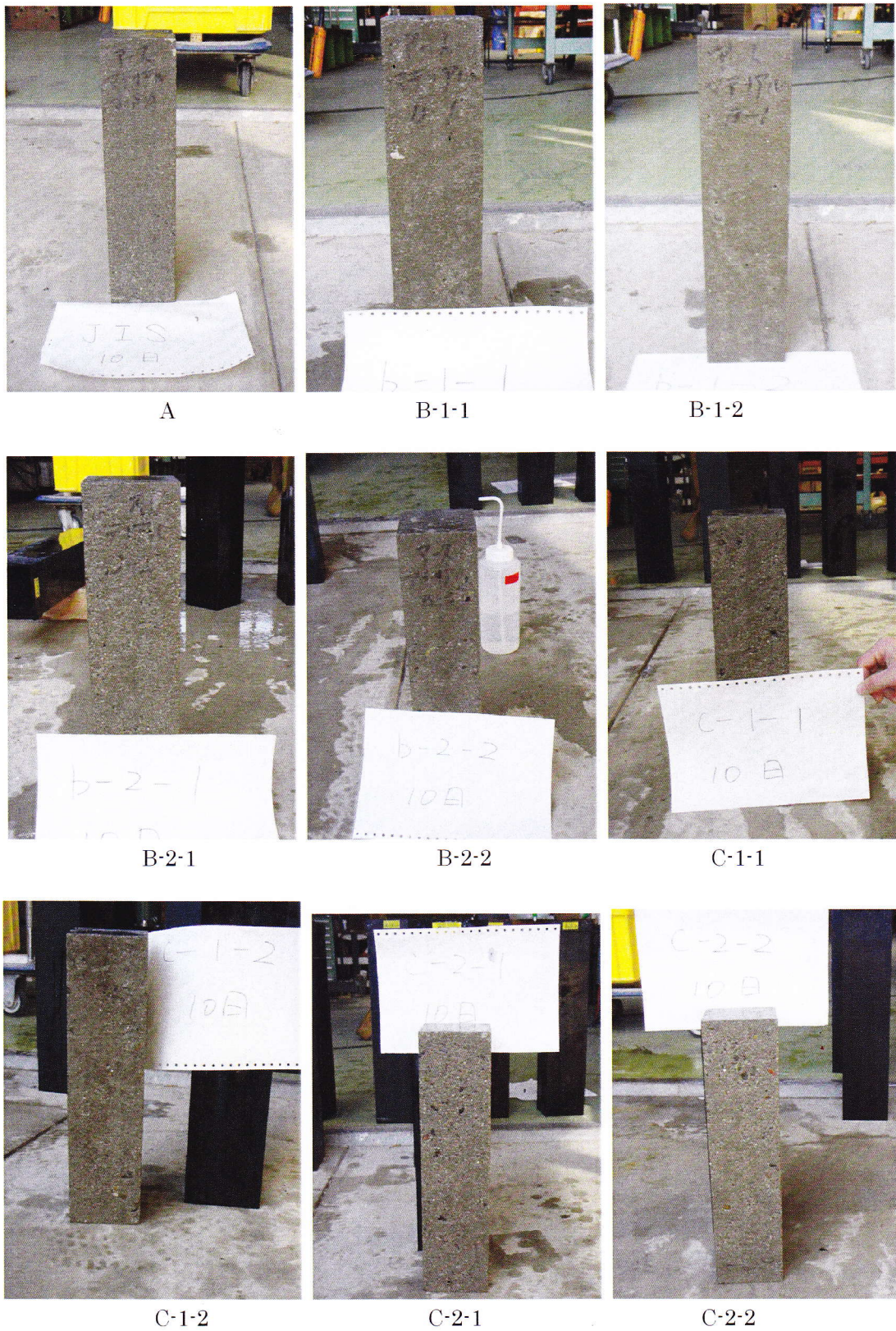


図7 凍結融解試験 10日(60 サイクル)

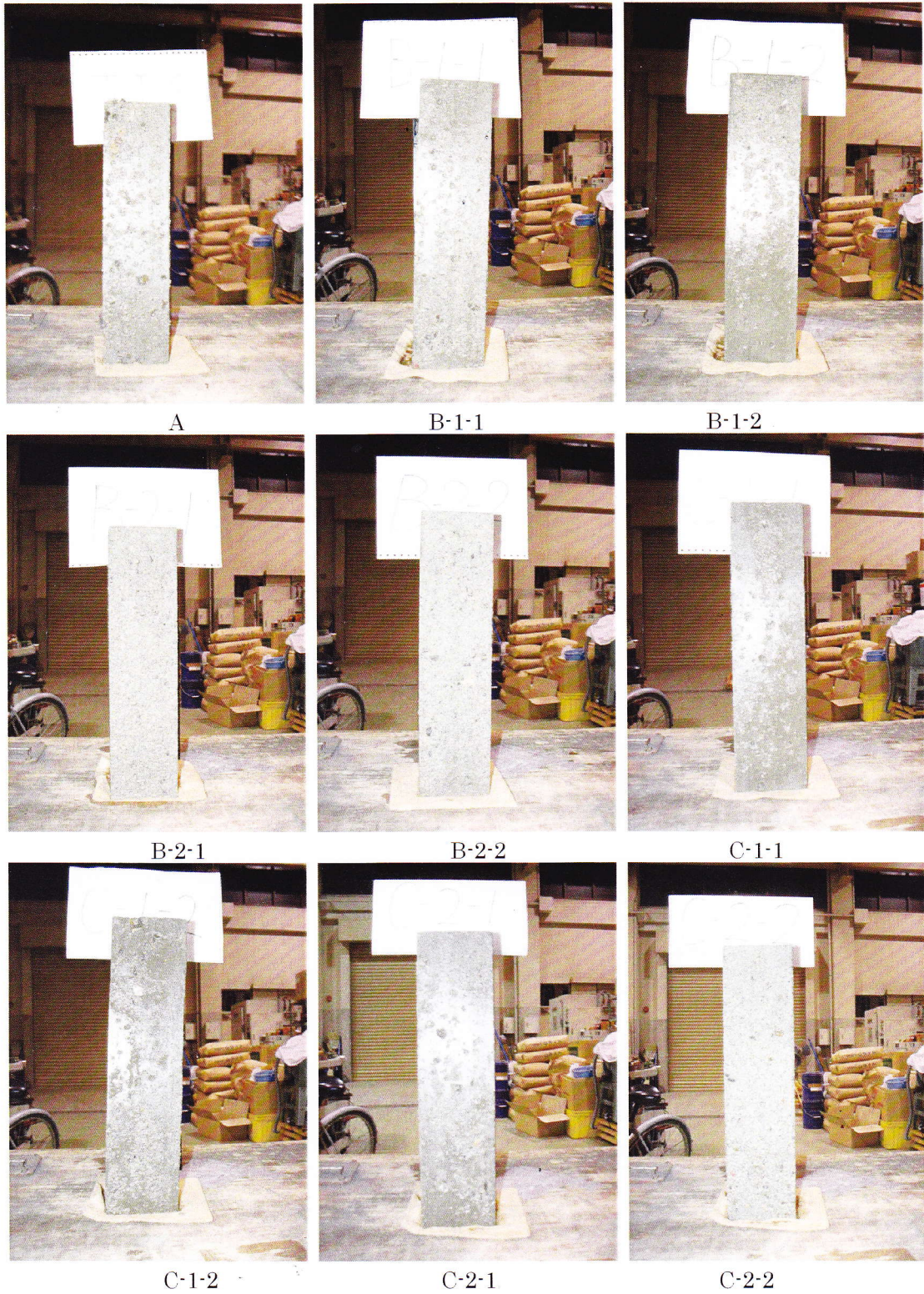


図8 凍結融解試験 20日(120 サイクル)

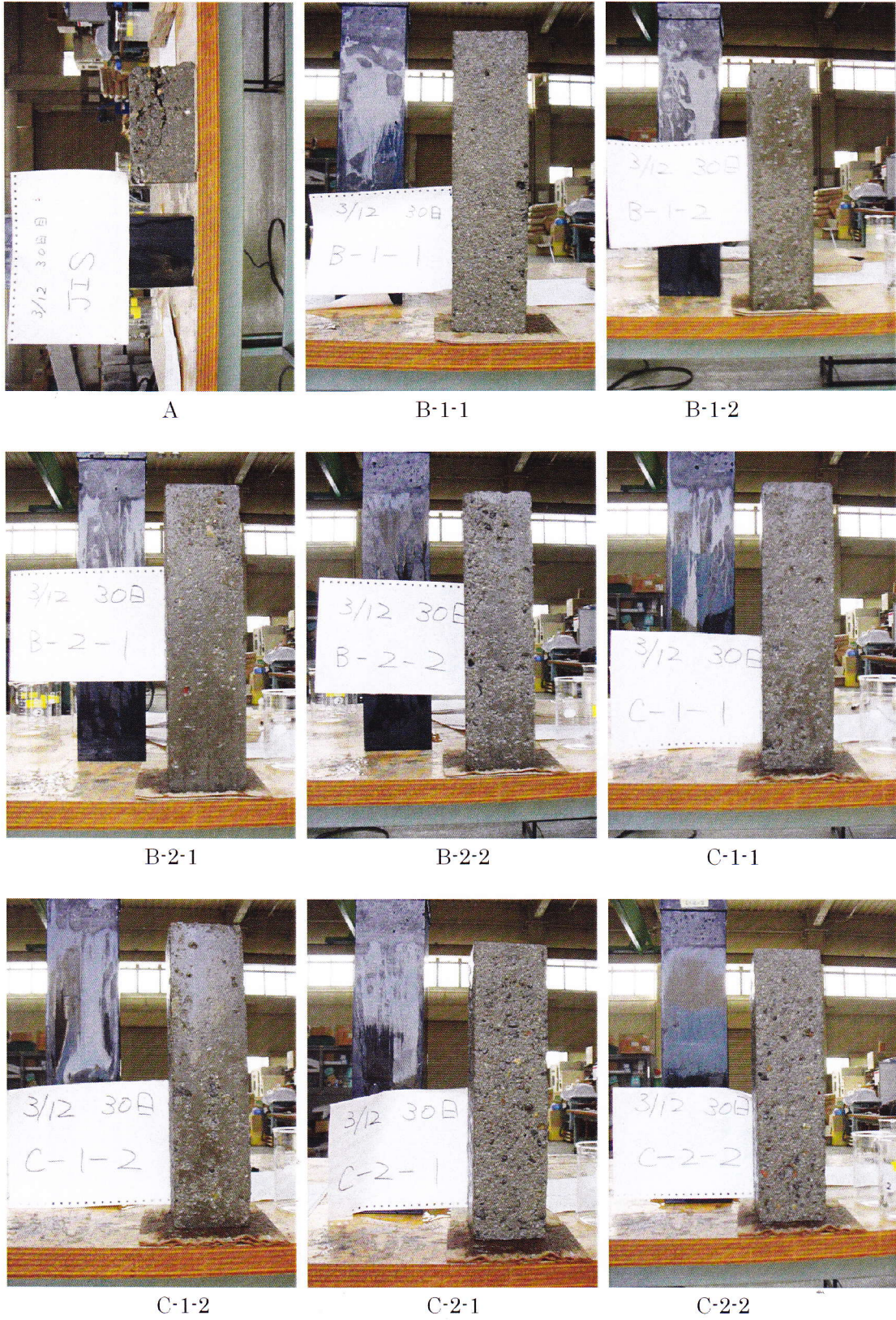
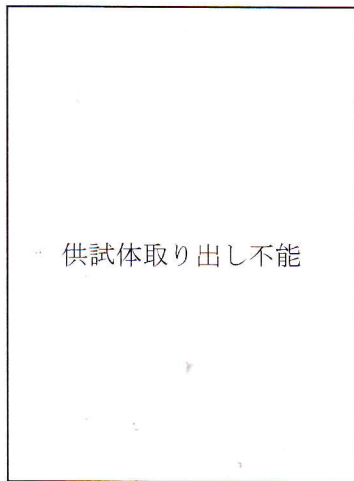
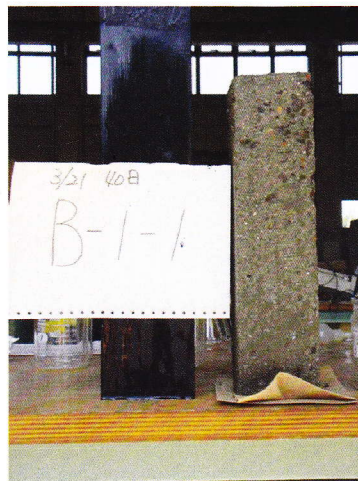


図9 凍結融解試験 30日(180 サイクル)



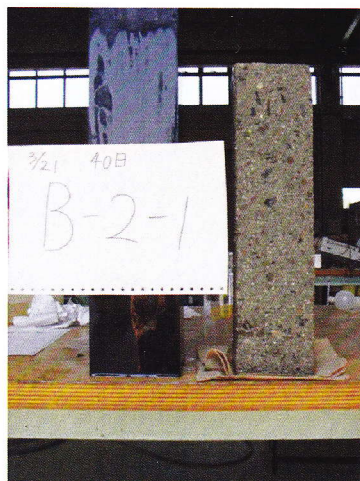
A



B-1-1



B-1-2



B-2-1



B-2-2



C-1-1



C-1-2



C-2-1



C-2-2

図10 凍結融解試験 40日(240 サイクル)

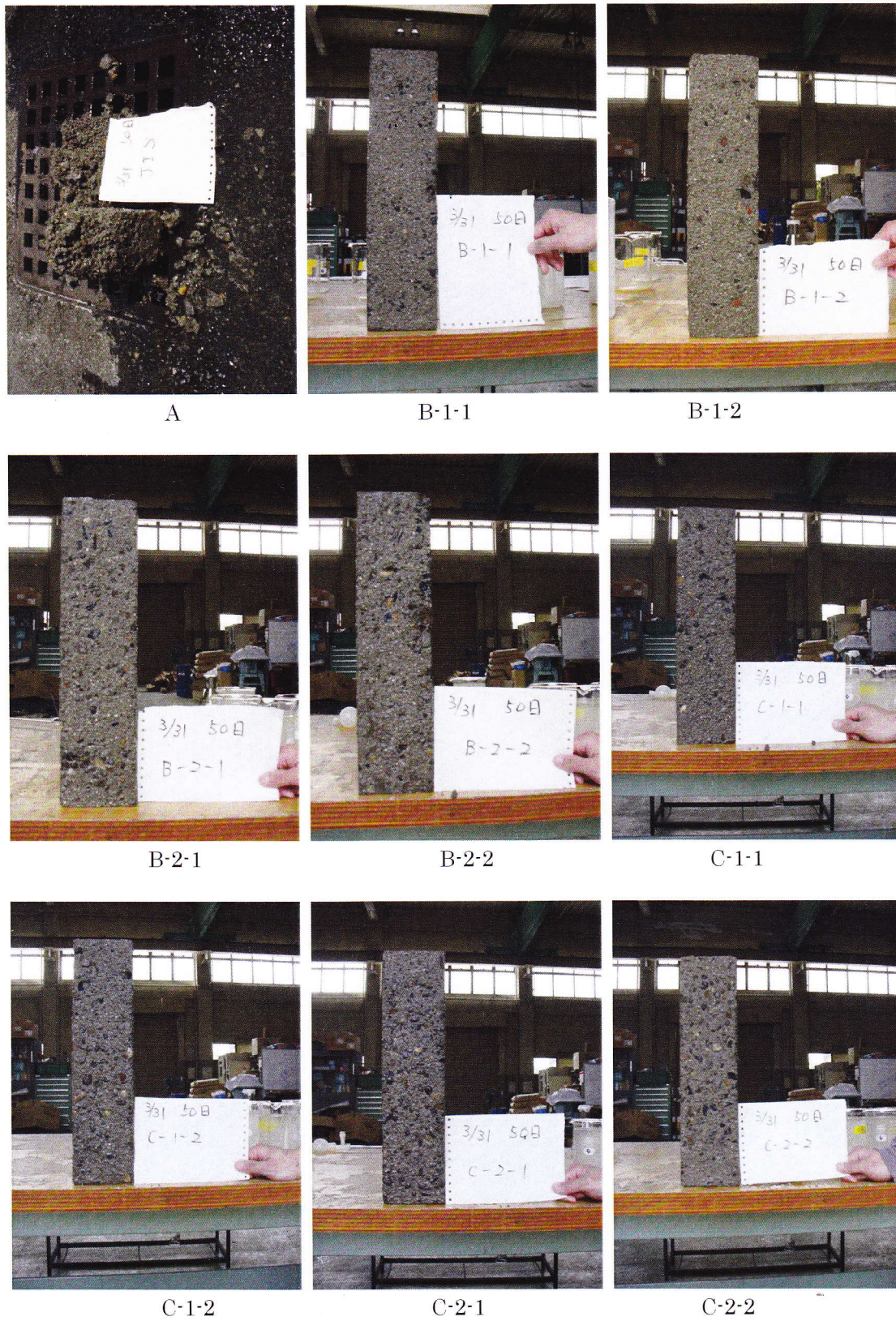


図 1 1 凍結融解試験 50 日(300 サイクル)

(4) 凍結融解試験開始前, 行程中, および終了直後の供試体中の縦波弾性波伝播速度測定結果

表 3 縦波弾性波 (超音波) 伝播速度測定結果

| 供試体 | 開始前 2/5 (m/s) | 10 サイクル 2/7 (m/s) | 60 サイクル 2/17 (m/s) | 120 サイクル 2/28 (m/s) | 180 サイクル 3/10 (m/s) | 240 サイクル 3/21 (m/s) | 300 サイクル 3/31 (m/s) |
|-------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A | 4086 | 4274 | 2466 | 3300 | 398 | — | — |
| 相対係数 (%) | 100 | 109 | 36 | 65 | 1 | — | — |
| B-1-1 | 3895 | 4158 | 4103 | 3929 | 3735 | 3390 | — |
| B-1-2 | 4061 | 4188 | 4016 | 3781 | 3331 | 3150 | 2959 |
| 平均 | 3978 | 4173 | 4059 | 3855 | 3533 | 3270 | 2959 |
| 相対係数 (%) | 100 | 110 | 104 | 94 | 79 | 68 | 55 |
| B-2-1 | 4115 | 4154 | 4167 | 4167 | 4107 | 3540 | 3704 |
| B-2-2 | 3984 | 3968 | 4158 | 4132 | 4111 | 4000 | 3660 |
| 平均 | 4050 | 4061 | 4162 | 4149 | 4109 | 3770 | 3682 |
| 相対係数 (%) | 100 | 101 | 106 | 105 | 103 | 84 | 83 |
| C-1-1 | 4065 | 4228 | 4184 | 4145 | 4111 | 3988 | 3781 |
| C-1-2 | 3976 | 4260 | 4090 | 4149 | 4016 | 3968 | 3717 |
| 平均 | 4021 | 4244 | 4137 | 4147 | 4064 | 3978 | 3749 |
| 相対係数 (%) | 100 | 111 | 106 | 106 | 102 | 96 | 87 |
| C-2-1 | 4073 | 3876 | 4237 | 4246 | 4251 | 4107 | 3735 |
| C-2-2 | 3918 | 4193 | 4215 | 4233 | 4206 | 4103 | 3626 |
| 平均 | 3996 | 4034 | 4226 | 4240 | 4228 | 4105 | 3681 |
| 相対係数 (%) | 100 | 102 | 112 | 113 | 112 | 106 | 85 |

縦波弾性波の伝播速度は、一般に弾性波の伝播媒体である材料の動弾性率に依存しており、今回の凍結融解試験結果からは、標準配合によるコンクリート供試体 (JIS) においては、凍結融解繰り返しにより急速に損傷を受けていることが伺える一方で、EMS システムによるコンクリート供試体のうち、種別 B-1 において遞減的な剛性低下がみられるが、他の EMS システムによるコンクリート供試体では、凍結融解繰り返し 300 サイクルに対し、10%以内の剛性低下に留まることが推測される。

(5) 凍結融解試験開始前，行程中，および終了直後の供試体の質量測定および減少率計算結果

表 4・質量減少率計算結果

| 供試体 | 開始前 2/5 (g) | 10 サイクル 2/7 (g) | 60 サイクル 2/17 (g) | 120 サイクル 2/28 (g) | 180 サイクル 3/10 (g) | 240 サイクル 3/21 (g) | 300 サイクル 3/31 (g) |
|------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| A | 9580 | 9572 | 9537 | 9496 | 9448 | — | — |
| 減少率 (%) | | 0 | 0 | 1 | 1 | — | — |
| B-1-1 | 9370 | 9361 | 9324 | 9279 | 9233 | 9167 | 9057 |
| B-1-2 | 9310 | 9306 | 9288 | 9266 | 9244 | 9206 | 9122 |
| 平均 | 9340 | 9334 | 9306 | 9273 | 9239 | 9187 | 9090 |
| 減少率 (%) | | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| B-2-1 | 9270 | 9261 | 9223 | 9175 | 9127 | 9023 | 8906 |
| B-2-2 | 9160 | 9159 | 9110 | 9049 | 8988 | 8910 | 8800 |
| 平均 | 9215 | 9210 | 9167 | 9112 | 9058 | 8967 | 8853 |
| 減少率 (%) | | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| C-1-1 | 9320 | 9314 | 9288 | 9256 | 9224 | 9167 | 9075 |
| C-1-2 | 9410 | 9400 | 9357 | 9304 | 9251 | 9183 | 9088 |
| 平均 | 9365 | 9357 | 9323 | 9280 | 9238 | 9175 | 9082 |
| 減少率 (%) | | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| C-2-1 | 9330 | 9320 | 9280 | 9230 | 9180 | 9114 | 9021 |
| C-2-2 | 9370 | 9361 | 9324 | 9279 | 9233 | 9171 | 9074 |
| 平均 | 9350 | 9341 | 9302 | 9255 | 9207 | 9143 | 9048 |
| 減少率 (%) | | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |

初期値の質量に個体差があるものの，質量減少傾向については，供試体間にさほど大きな差異は見られないことが減少率の推移から伺える。

5. まとめ

- (1) 材齢 28 日において実施した円柱供試体を用いた強度試験ならびに静弾性係数試験の結果、図 1 2 および図 1 3 が得られた。この結果、強度試験結果による最大応力の比較において、EMS システムによるコンクリート供試体の圧縮強度は、標準配合のコンクリート供試体 (A) に対していずれも同等または、大きい結果が得られている。また、静弾性係数試験の結果においても、圧縮強度の試験結果と同様な結果を得た。

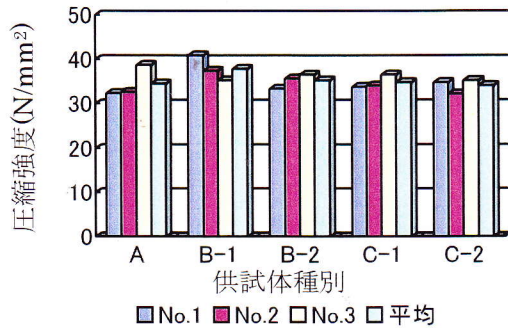


図 1 2

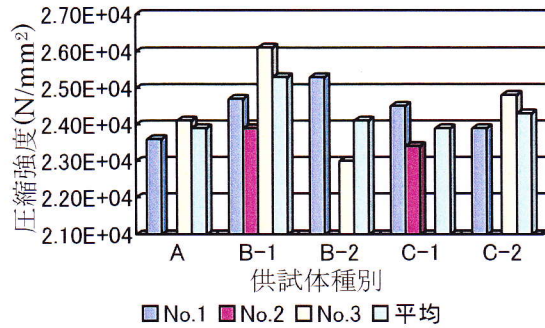


図 1 3

- (2) 標準配合のコンクリート供試体 (A) については、凍結融解試験 180 サイクルで供試体の形状を留めず、崩壊した。一方、EMS システムを用いたコンクリート供試体については、いずれも凍結融解試験終了の 300 サイクルまで形状を留めた。
- (3) 凍結融解行程中の供試体を受ける損傷度を定量的に評価するために、供試体中を伝播する縦波弾性波 (超音波) の伝播速度計測を行った結果、図 1 4 に示されるような超音波速度の低下傾向が確かめられた。超音波の伝播速度は、一般に弾性波の伝播媒体である材料の動的剛性に依存しており、今回の凍結融解試験結果からは、標準配合によるコンクリート供試体 (JIS) においては、凍結融解繰り返しにより急速に損傷を受けていることが伺える一方で、EMS システムによるコンクリート供試体のうち、種別 B-1 において遞減的な剛性低下がみられるが、他の EMS システムによるコンクリート供試体では、凍結融解繰り返し 300 サイクルに対し、10% 以内の剛性低下に留まることが推測される。

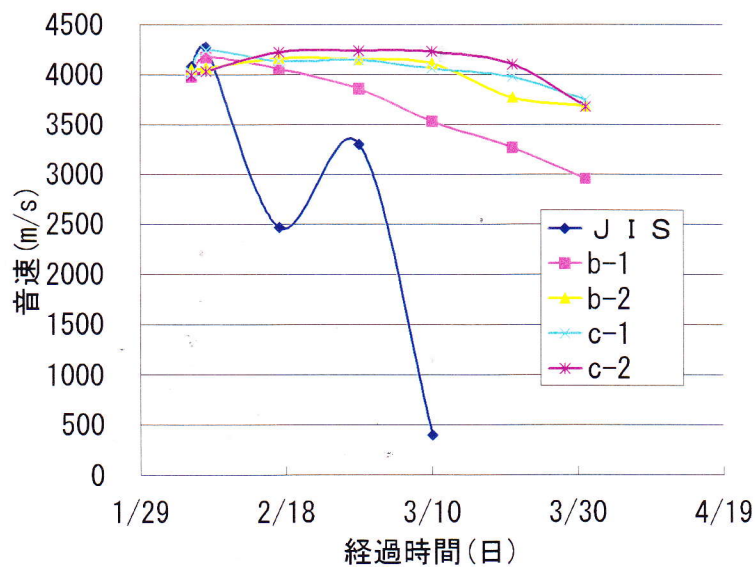


図 1 4

- (4) 供試体の質量計測結果により、下図に示されるような質量減少傾向が確かめられた。初期値の質量に個体差があるものの、質量減少傾向については、供試体間にさほど大きな差異は見られない。これらのことから、表層モルタル部の欠損が生じるなど、いずれの供試体においても凍結融解繰り返しによって確実に損傷を受けていることが推測されるが、EMS システムによるコンクリート供試体では、内部への損傷が低く抑えられるために、形状と剛性が保持されているものと想像される。

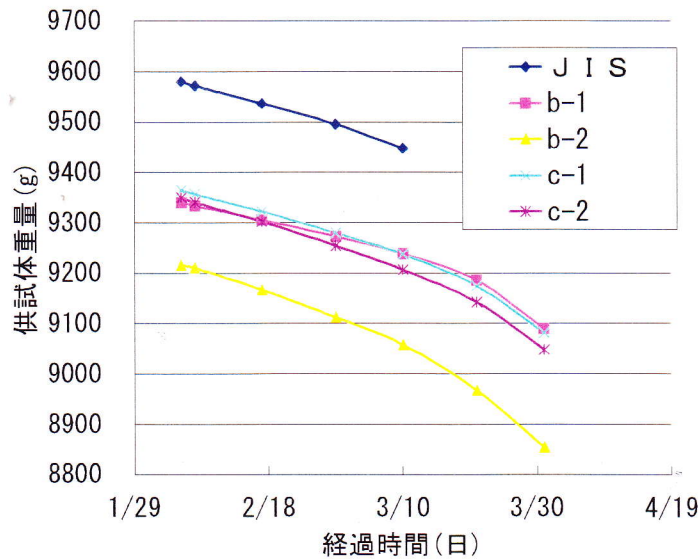
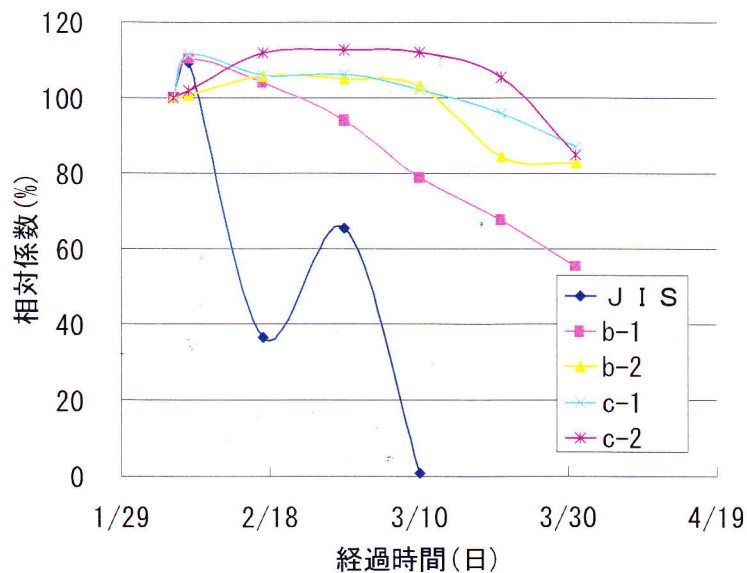


図 1 4

6. 本試験結果の取り扱い上の留意点

- (1) 本試験の試験方法は、土木学会基準に定めるところの凍結融解試験に準拠している。
- (2) 供試体の凍結融解行程中における弾性波伝播速度から求められる動弾性係数と一次共鳴振動数から求められる動弾性係数とは近似できる。尚、弾性波伝播速度から求められる動弾性係数算定式は別に定められる。
- (3) 上記によって求めた、相対動弾性係数[%]の変化は、下図で示され、縦波弾性波伝播速度と密な相関性がある。



付図 1

- (4) ASTM C666 が定めるところの DF: Durability Factor については、別に定められる。