

新潟大学 正員 松野操平
 新潟大学 正員 米山紘一
 三菱重工(株) 正員 ○田村雄児

1. まえがき

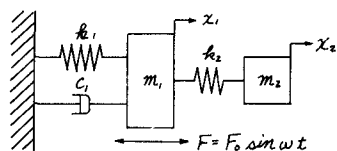
強制振動に対するコンクリートの動的性質を把握するために、従来比較的大型の起振機もしくは加振機が使用されていた。しかしながら、共振現象を利用すれば比較的小型の起振機を用いても大きな応答が得られるはずである。この観点から、共振を利用する小型の起振機を試作し、これをセメントモルタルおよびレジンモルタル供試体に適用して、その特性を確認した。さらにこれらの供試体について長時間動的載荷実験を行い、モルタル部材の動的諸元の繰返し荷重による変化の様子を調べた。

2. 振動機構のモデル化とその力学

研究の基礎段階として部材の弾性領域内における挙動を考えた。そのため図-1に示すような振動モデルを設定した。図中添字1を付した諸元は供試体を含む主振動系に関するものであり、添字2を付した諸元は従来の起振機を改良するために取付けた補助振動系に関するものである。

図-1に示す振動系の運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 &= F_0 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - k_2 x_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



	振動系		振動外力	F
	主	補助		
質量	m_1	m_2	起振力	F_0
バネ定数	k_1	k_2	振動外力	ω
減衰係数	c_1	—	角速度	
応答変位	x_1	x_2		

図-1 部材の動的性質を抽象させるためのモデル

この解は定常状態を考えると次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \left[F_0 (k_2 - m_2 \omega^2) / \sqrt{\{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2\}^2 + \{c_1 \omega (k_2 - m_2 \omega^2)\}^2} \right] \sin(\omega t + \phi_1) \\ x_2 &= \left[F_0 k_2 / \sqrt{\{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2\}^2 + \{c_1 \omega (k_2 - m_2 \omega^2)\}^2} \right] \sin(\omega t + \phi_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $\phi_1, \phi_2 = \tan^{-1} \left[c_1 \omega (k_2 - m_2 \omega^2) / \{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2\} \right]$

この解の根号内の第一項を0とするような補助振動系の k_2, m_2 の組合せが得られれば、主振動系の変位を最大にすることができる。この時の主、補助振動系の挙動は次式で与えられる。

$$x_1 = (F_0 / c_1 \omega) \sin(\omega t + \pi/2), \quad x_2 = \{F_0 k_2 / (k_2 - m_2 \omega^2) c_1 \omega\} \sin(\omega t + \pi/2) \quad (3)$$

この状態における補助振動系の k_2, m_2 を求めると次のようになる。

$$k_2 = k_1 (\omega_1^2 - \omega^2) (\omega_2^2 - \omega^2) / \omega^2 \omega^2, \quad m_2 = k_1 k_2 (\omega_1^2 - \omega^2) / \{k_2 \omega^2 \omega^2 + k_1 \omega^2 (\omega_1^2 - \omega^2)\} \quad (4)$$

ただし、 ω_1, ω_2 は主、補助振動系の固有角速度である。

上記のような働きを有する補助振動系を備えた起振機を以後、共振型起振機 (RESONANCE CREATING EXCITER, 略称 RECRES) と呼ぶことにする。

3. 使用機器、供試体、材料、等

RECRESは起振部と補助振動部から構成されている。起振部の重量は1.164 K γ でありこれは主振動系に属する。補助振動部は鋼製カンチレバーをバネとし、その先端に錘(質量)をネジ止めする構造とした。

供試体(図-2)はセメントモルタルおよびレジンモルタルで造った。前者は、振動載荷直前まで20℃の水中に設置され、載荷時も霧吹きで湿潤状態に保った湿潤供試体と、振動載荷の3日前まで20℃の水中に設置され、その後3日間110℃で炉乾燥した乾燥供試体の2種類である。後者は、振

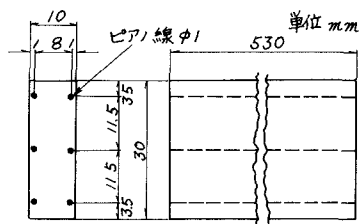


図-2 供試体

この材料における供試体の曲げに対する抵抗性の平均値は次のようである。

モルタルの種類		モルタルの配合強度		材令養生	
$\frac{C}{S}$	$\frac{R_o}{S_2}$	$\frac{C}{W}$	70-値強度 (kg/cm ²)	曲げ圧縮	
セメント	0.20	0.45	263	102 550	60~80日・20℃水中
レシ	0.20			342 729	60~80日・20℃60%RH空中

Figure 1 is a schematic diagram of the experimental apparatus, showing both a front view (正面図) and a side view (側面図).

Front View (正面図):

- The apparatus consists of a vertical column with a diameter of $\phi = 45.5 \text{ mm}$.
- At the top is the **起振部** (Excitation section) containing two coils.
- Below the excitation section is the **補助振動部** (Auxiliary vibration section), which includes a spring (**ばね**) and a damper (**ダンパ**).
- The main body of the column is labeled **供試体** (Test specimen).
- At the bottom, a **変圧器** (Transformer) is connected to a **ゴニオメータ** (Goniometer).

Side View (側面図):

- The **モーター** (Motor) is connected to the excitation section.
- The excitation section is connected to a **差動変圧器** (Differential transformer).
- The differential transformer is connected to an **増幅器** (Amplifier).
- The amplifier is connected to the **電磁コア** (Electromagnetic core) at the bottom.
- Arrows indicate the **起振力および変位方向** (Direction of vibration force and displacement) and the **重力方向** (Direction of gravity).

- 378 -

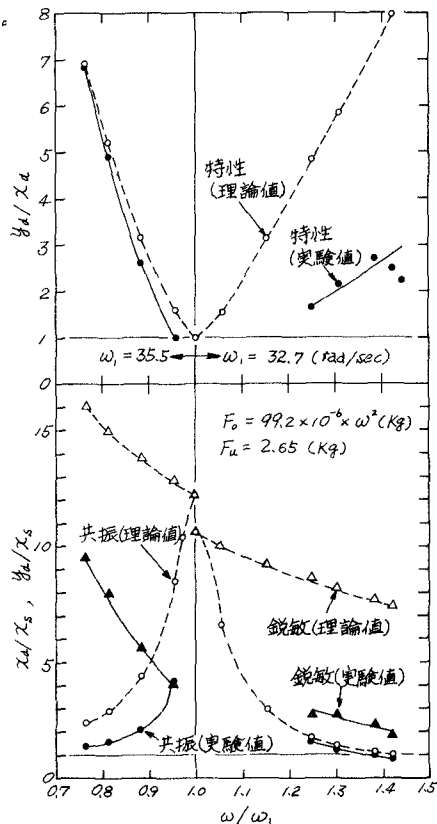
振動数で強制振動を開始する。この時の応答変位を最初の変位とする。(iii)約1時間後に応答変位を記録し振動を止める。自由振動を行って、 α_d , α_s , C_1 を測定する。その後また強制振動を継続する。(iv)以下、約2, 4, 8, 12, 16, 24時間後に(iii)と同じ測定を行って終了とした。

5. 実験結果とその考察

5・1 RECREXの特性実験について

得られた現象を三つの形にとりまとめ図示した。ここでそれらの名称の定義をしておく。(i)特性曲線：RECREXによる動的荷重下の最大応答変位 y_d とRECREXの起振部のみによる動的荷重下の最大応答変位 x_d との比 y_d/x_d と、外力角速度 ω と供試体の固有角速度 ω_1 との比 ω/ω_1 との関係を示す曲線で、これがRECREXの補助振動系取付け効果を示すものである。(ii)共振曲線： x_d と振動外力を静的に載荷した場合の変位 x_s との比 x_d/x_s と、 ω/ω_1 との関係を示す曲線。(iii)鋭敏曲線： y_d と x_s の比 y_d/x_s と ω/ω_1 との関係を示す曲線で、いわばこれがRECREXを用いた場合の共振曲線にあたるものである。

湿潤セメントモルタル供試体に対する特性、共振、鋭敏曲線の一例を図-5に示す。この図において、共振点($\omega/\omega_1=1$)付近の測定結果がない理由は、供試体が塑性領域に入る可能性があり、また計算によって求まる m_2 が不釣合に大きくなるため実験を行えなかったことによる。また共振、鋭敏曲線において共振点を境に曲線がずれている理由は、補助振動系を調律するために必要な主振動系の諸元が共振点の左右で異なることによる。特性曲線の実験値は $\omega/\omega_1 < 1$ で理論値とほぼ一致している。しかし $\omega/\omega_1 > 1$ では拡大効果が比較的小さい。一方、共振曲線の実験値は逆に $\omega/\omega_1 > 1$ で理論値により近い値を示している。図-5 湿潤セメントモルタル供試体の特性、共振、鋭敏曲線の一例



りもかなり小さい。また共振、鋭敏曲線の実験値から推定すると、両者は共振点で一致した値を示さず $\omega/\omega_1 < 1$ では $\omega/\omega_1 = 0.95$ 近辺で、 $\omega/\omega_1 > 1$ では $\omega/\omega_1 = 1.15$ 近辺で一致するものと考えられる。このことは特性曲線が理論上共振点で1の値を示すのに対して、実験では共振点も含めたその近辺($\omega/\omega_1 = 0.95 \sim 1.15$ 程度)で1以下の値を示すこと、すなわちこの領域においてはRECREXは期待された効果を発揮せず、補助振動系による応答変位拡大能力が1以下になることを示すものと考えられる。

$\omega/\omega_1 > 1$ の領域でRECREXの効果が理論の場合よりも低い結果となった理由については次のようなことが考えられる。(i)補助振動系および供試体自身が ω の大きい領域では高次のモードで振動すること。(ii) ω が大きくなることは補助振動系を調律する時の対象となる振動の周期が短くなること。すなわち補助振動系の調律精度にはおのずと限界があるため、その誤差に伴う固有周期の誤差が外力周期に対して相対的に大きくなることである。また共振点付近で特性曲線が1以下になることが推察されたが、これは供試体の諸元が同一の ω に対する x_d , y_d の測定時で多少異なるため、厳密に言って x_d と y_d とが1対1に対応しないことによるものと考えられる。

乾燥セメントモルタル供試体に対するRECREXの特性は湿潤供試体の場合とほとんど等しかった。またレジシモルタル供試体に対する特性もほぼ同様であるが、補助振動系による応答変位拡大能力が1以下となる領域はセメントモルタル供試体の場合よりも幅の狭いものとなること、すなわち共振点により近くなることが推察された。

5・2 長時間動的載荷実験について

長時間動的載荷を受けるモルタル供試体の諸元の変化については、一例として湿潤セメントモルタル供試体の

場合を図-6に示す。この図の横軸は累積載荷サイクル数を、縦軸は載荷開始時の諸元に対する各経過時点での諸元の比を示す。この図から次の事がわかる。(i) 累積載荷サイクル数の増加に伴うバネ定数の低下の程度は、 $\omega/\omega_1=1$, $\omega/\omega_1 > 1$, $\omega/\omega_1 < 1$ の載荷条件の順に大きく、 $\omega/\omega_1 < 1$ ではほとんど低下が認められない。

(ii) $\omega/\omega_1 \geq 1$ の載荷では、静的バネ定数の低下率の方が動的バネ定

数のそれよりも大きい。(iii) $\omega/\omega_1=1$ の載荷で 1×10^5 サイクル後、動的、静的バネ定数はそれぞれ70%, 55%に低下している。また $\omega/\omega_1 > 1$ の載荷ではそれらは70%, 80%に低下している。(iv) 減衰係数については、 $\omega/\omega_1 \leq 1$ の載荷ではほとんど変化が認められず、 $\omega/\omega_1 > 1$ の載荷では増加している。(v) 減衰係数の変化現象は、部材が塑性をもつための履歴減衰が現われているものと考えられる。全体を通じて、その値の変化が累積載荷サイクル数との間に明確な相関性がないことは、部材のひび割れ現象が一定しないこと、およびそれを粘性減衰に置換える時の誤差にもとづくものと考えられる。(vi) 応答変位については、 $\omega/\omega_1 < 1$ の載荷の時だけ増加が認められ、その他の場合は最初の値の約75%に漸次減少していく。これは $\omega/\omega_1 \geq 1$ の載荷では図に見られる如くバネ定数が次第に減少して行くことから、供試体の固有角速度が低下すること、従って一層共振点から離れた実験となることで説明される。また、 $\omega/\omega_1 < 1$ の場合は、バネ定数の低下により共振点に近づいて行くと考えられるが、図に見られる如くバネ定数、減衰係数の値は変化していない。応答変位が最初の2倍にも達する原因は不明である。

乾燥セメントモルタルおよびレジンモルタル供試体の動的諸元の変化についても同様にとりまめと考察を行ったが、紙面の都合でここではこれらを割愛し、その要点のみをあとがきに記すことにする。なおこれらについては講演時に触れることにする。

6. あとがき

RECREXの特性については実験の範囲内で次のことが言える。(i) あらゆる条件下で例外なく RECREX がその効果を発揮し得るのは、供試体の固有角速度より小さな角速度の低周波外力に対してである。(ii) RECREXの欠点としては、繰返し載荷によってその動的性質が著しく変化するような供試体の場合、実験中に RECREX を調律し直さなければならない煩しさのあることが挙げられる。

長時間動的載荷を受けるモルタル供試体の動的諸元の変化については実験の範囲内で次のことが言える。(i) セメントモルタル供試体の動的、静的バネ定数はいずれも低下する。レジンモルタル供試体のそれらについてはほとんど低下が認められず、むしろ幾分増大する。(ii) セメントモルタル供試体については、湿潤供試体の動的バネ定数の低下率は静的バネ定数の低下率よりも小さく、乾燥供試体の両者の低下率はほとんど同じである。(iii) セメントモルタル供試体のバネ定数の低下については、供試体の固有角速度で載荷する場合に最も大きくなる。(iv) セメントおよびレジンモルタル供試体のいずれにおいても、繰返し載荷数の増加に伴う減衰係数の変化には法則性が明確でない。(v) セメントおよびレジンモルタル供試体の応答変位は、動的バネ定数と減衰係数の変化に関連して変化する。

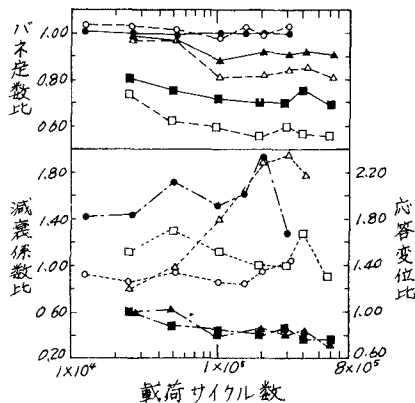


図-6 湿潤セメントモルタル供試体のバネ定数、減衰係数、応答変位の推移の一例

	ω/ω_1		
	< 1	$= 1$	> 1
ω (rad/sec)	29.3	29.5	31.0
ω (rad/sec)	18.8	28.2	37.9
F_0 (Kg)	0.035	0.079	0.143
F_0/F_u (%)	1.21	2.72	4.93
バネ定数比	静的 ○---	静的 □---	静的 △---
動的	●---	●---	●---
減衰係数比	○---	□---	△---
応答変位比	●---	●---	●---