

招待論文
Invited Paper

招待論文

振動によるフレッシュコンクリートの液状化と内部振動機の作用領域に関する考察

LIQUEFACTION OF FRESH CONCRETE DUE TO VIBRATION AND THE SPHERE OF ACTION OF INTERNAL VIBRATOR

岩崎 訓明*

By Noriaki IWASAKI

1. 緒 論

コンクリート用振動機は70年以上前から使われている。初期の振動機は振動数が低く、使用されるコンクリートも単位水量の多い軟練りのものであったため、振動機を用いるとかえって強度が低下することがあったようであるが、高振動数の内部振動機が硬練りコンクリートに適用されるようになり、コンクリート工事での振動機の使用は定着した¹⁾。現在でも、コンクリートの打込み速度が締固め速度によって支配される場合が多いことから、起振方式、原動機、動力伝達装置、振動部の形状、軽量化、耐久性、など、種々の点で機構上の改良が進められ、内部振動機のほか、使用目的に応じて型枠振動機、表面振動機、テーブル振動機、振動ローラなど、各種の形式のものが使用されている。

その一方で、振動機を有効に用いるために、振動がコンクリートに及ぼす作用についての研究が行われているが、振動機のなかで最も多く用いられている内部振動機に関しては、従来からその有効範囲についての研究が重点的に行われ、特にスラブ状コンクリートに対する水平方向の有効半径については数多くの実験結果が報告されている^{2)~6)}。このような場合、振動機の有効半径は、締固めに必要な振動の強さ、振動時間、および振動の強さの分布に関連しているので、振動の締固め作用を表わすパラメーターとしては、加速度振幅や総仕事量⁷⁾（振動の運動エネルギーと振動時間の積）が用いられ、これら

と有効半径との関係が検討されている。これらのパラメーターは、加速度計をコンクリート中に埋設することによって測定することができるので、無筋コンクリートのスラブに振動機を挿入した場合のように、振動の強さが伝播の方向とは無関係に、振動機からの距離だけで定まる場合には、これらの場所的な変化状況を実測できるという大きな利点がある。しかし、実際の鉄筋コンクリート部材において、耐久性のうえで最も重要な部分はかぶり部であって、たとえば、はりの側面では、かぶり部のコンクリート中に直接振動機を挿入することが困難であるため、一般にはスターラップ越しにウェブの内側から締固めが行われるが、その場合には、かぶりを厚くして直接振動機を挿入した場合に比べて、表面部のコンクリートの密実さが劣るといわれている⁸⁾。これは、かぶり部の振動の状態が鉄筋と型枠の影響を大きく受けることを示すものであるが、そのような場合の振動の強さの分布を実験的な手段で詳しく知ることは容易ではない。

さらに根本的な問題は、内部振動機では振動台や振動ローラの場合と異なり、振動力とコンクリートの沈下方向とが一致しないため、振動の主作用はコンクリートを液状化することにあって、締固めは、液状化したコンクリートの自重による流動と沈下の結果としてとらえる必要があることである。

本論文は、このような観点から、コンクリート中を伝播する振動のコンクリートに対する液状化作用、液状化作用を受けたときのフレッシュコンクリートの応答特性ならびにその測定方法、振動時間と締固め完了域との関係、型枠および鉄筋が存在する場合の液状化作用への影響、等を解析して、内部振動機によるコンクリートの締固め問題を理論的に体系化しようとするものである。

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科
(〒350 川崎市鯉井中野台 2100)

Keywords: internal vibrator, consolidation, liquefaction, radius of action, effects of reflection

2. フレッシュコンクリートに及ぼす振動の液状化作用

(1) 内部振動機から伝播するコンクリート中の波動
 内部振動機からコンクリート中に伝播する波動について解析と実験を行った結果^{9),10)}によれば、振動機内部の偏心重錘の回転に起因する振動においては、重錘の重心 W が向いている方向よりも $\pi/2$ だけ遅れた方向に変位の最大値が生じ、コンクリートに伝達された変位は、重錘の角速度 ω に等しい角振動数の波動となってコンクリート中を伝播する。そして伝播中における振幅の減少は、 $\sqrt{R_v/(l+R_v)} e^{-\beta l}$ (R_v : 振動機の半径, l : 伝播距離, β : 減衰係数) で表わされる。

そこで、Fig.1 のように直交座標 x, y をとり、振動機の中心位置 O_1 を (x_1, y_1) 、コンクリート中の任意の点を $P(x, y)$ とすると、 O, O_1, P の間の位置関係は

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \tan^{-1}(y/x)$$

$$r_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\{(y-y_1)/(x-x_1)\}$$

$$\theta_v = \tan^{-1}(y_1/x_1)$$

である。

ここで、重錘の重心が x 軸の正の方向に対して反時計回りに θ_w の角をなす位置にきた瞬間を時間の原点にとり、現時刻を t (s) とすると、点 P に現在到達している波動が振動機表面から放射された時刻 t_1 は、波の速さを c (cm/s) として $t_1 = t - l/c = t - (r_1 - R_v)/c$ であり、この時刻における重心 W の位置は $\omega t_1 + \theta_w$ であるから、変位の最大値の方向 θ_m は

$$\theta_m = \omega t_1 + \theta_w - \pi/2$$

である (Fig.2)。したがって、この時点における θ_1 方向の変位 ϕ_{θ_1} は、変位の最大値を ϕ_0 、 $k = \omega/c$ として

$$\phi_{\theta_1} = \phi_0 \cos(\theta_m - \theta_1)$$

$$= \phi_0 \sin\{\omega t - k(r_1 - R_v) + \theta_w - \theta_1\}$$

である。そして、点 P に到達する波動 ϕ_p は、エネルギー

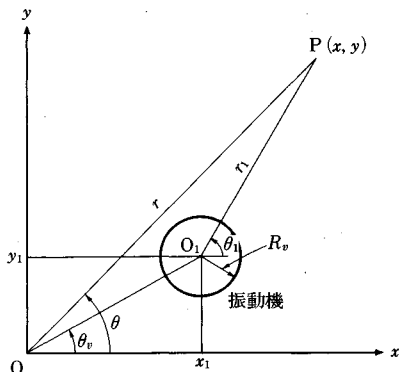


Fig. 1

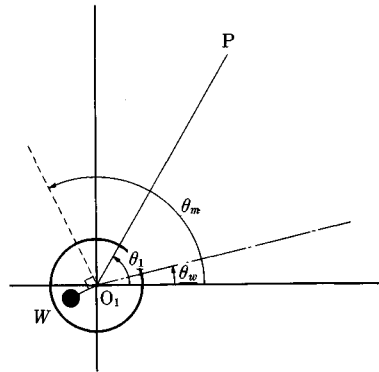


Fig. 2

密度の幾何学的な減少と粘性減衰により次式となる。

$$\phi_p = \phi_0 \sqrt{R_v/r_1} e^{-\beta(r_1 - R_v)} \sin\{\omega t - k(r_1 - R_v) + \theta_w - \theta_1\} \dots \dots \dots (1)$$

振動機の中心 O_1 が原点にあり、また、 $t=0$ において W が x 軸上の正の位置にあったとすれば、式 (1) は次のようになる。

$$\phi_p = \phi_0 \sqrt{R_v/r} e^{-\beta(r - R_v)} \sin\{\omega t - k(r - R_v) - \theta\} \dots \dots \dots (2)$$

この式は渦巻き状の波面をもつ波動を表わす⁹⁾。

(2) 振動機から伝播する波動の液状化作用の評価方法

振動機の中心位置に原点をとり、コンクリート中の任意の点 $P(r, \theta)$ に Fig.3 のような正方形素片 $PQRS$ を考える。

ある時刻において、点 P の変位が $\phi(r, \theta)$ であったとすると、 Q, R, S 各点の変位はそれぞれ

$$Q: \phi + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \Delta \theta$$

$$R: \phi + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial \phi}{\partial r} \Delta r$$

$$S: \phi + \frac{\partial \phi}{\partial r} \Delta r$$

である。したがって点 P, Q, R, S の変位後の位置は、Fig.4 (a) の点 P', Q', R', S' になるが、四辺形 $P'Q'R'S'$ を平行移動して P' を P に一致させたものを

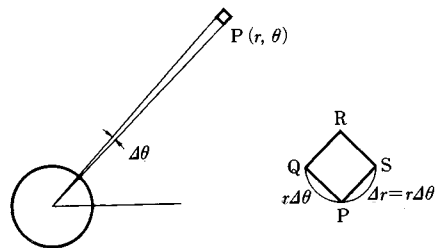


Fig. 3

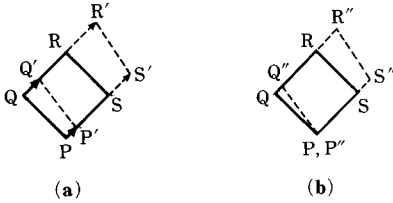


Fig. 4

$P''Q''R''S''$ とすれば、 $PQRS$ と $P''Q''R''S''$ は Fig. 4(b) で表わされる。すなわち、正方形 $PQRS$ は、伸縮変形とせん断変形によって平行四辺形になり、変形における伸縮ひずみとせん断ひずみを ϵ および γ とすると

$$\epsilon = \frac{SS''}{PS} = \frac{SS'' - PP'}{PS} = \frac{|\psi + (\partial\psi/\partial r)\Delta r| - \psi}{\Delta r} = \frac{\partial\psi}{\partial r}$$

$$\gamma = \frac{QQ''}{PQ} = \frac{QQ'' - PP'}{PQ} = \frac{|\psi + (\partial\psi/\partial\theta)\Delta\theta| - \psi}{r\Delta\theta}$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta}$$

である。

いま、Fig. 5 に示すように、長方形の頂点 R が x 軸方向に Δx だけ変位したとき、対角線の長さ l が $l + \Delta l$ になったとすると

$$l = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\Delta l = \frac{\partial l}{\partial x} \Delta x = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \Delta x$$

l の変化率は

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{x}{x^2 + y^2} \Delta x$$

この式において、 x 、 y および Δx は

$$x = \Delta r$$

$$y = r\Delta\theta = \Delta r$$

$$\Delta x = RR'' = RR' - PP' = \left(\psi + \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \Delta\theta + \frac{\partial\psi}{\partial r} \Delta r\right) - \psi$$

$$= \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \Delta\theta + \frac{\partial\psi}{\partial r} \Delta r = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial\psi}{\partial r}\right) \Delta r$$

であるから

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta r}{(\Delta r)^2 + (\Delta r)^2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial\psi}{\partial r}\right) \Delta r$$

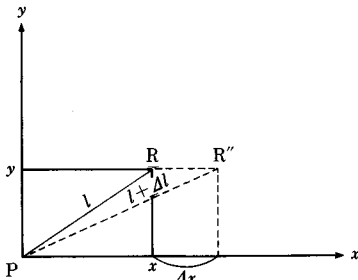


Fig. 5

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial\psi}{\partial r} \right) = \frac{1}{2} (\gamma + \epsilon) \dots \dots \dots (3)$$

となる。

振動がフレッシュコンクリートに及ぼす液状化作用を L とし、これを正方形素片の対角線ひずみ $\Delta l/l$ と単位時間にひずみの生じる回数、すなわち周波数 f との積で評価することにすれば

$$L = f \cdot \frac{\Delta l}{l} = \frac{\omega}{4\pi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial\psi}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (4)$$

波動関数として式 (2) を用いると

$$\psi = A \sin \phi$$

ここに

$$A = \phi_0 \sqrt{R_0/r} e^{-\beta(r-R_0)}$$

$$\phi = \omega t - k(r - R_0) - \theta, \quad k = \omega/c = 2\pi f/c$$

その場合には

$$\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial\theta} A \cos \phi = -\frac{A}{r} \cos \phi$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial r} = \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right) \sin \phi + A \frac{\partial}{\partial r} (\sin \phi)$$

$$= -A \left(\beta + \frac{1}{2r} \right) \sin \phi - A k \cos \phi$$

したがって

$$\frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \frac{\partial\psi}{\partial r} = -A \left[\left(k + \frac{1}{r} \right) \cos \phi + \left(\beta + \frac{1}{2r} \right) \sin \phi \right]$$

$$= -AL_r \sin(\phi + \alpha)$$

ただし、

$$L_r = \sqrt{\left(k + \frac{1}{r} \right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r} \right)^2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2(kr + 1)}{2\beta r + 1} \dots \dots \dots (6)$$

となり、 L は次式となる。

$$L = -\frac{\omega A}{4\pi} L_r \sin(\phi + \alpha) \dots \dots \dots (7)$$

L の最大値によって液状化作用の強さを表わすこととし、これを液状化作用値 L_q (s^{-1}) とよぶことにすれば

$$L_q = \frac{Af}{2} L_r = \frac{\omega A}{4\pi} L_r \dots \dots \dots (8)$$

加速度振幅を a 、重力加速度 g に対する比で表わした加速度振幅を a_c 、とすると

$$L_q = \frac{a}{4\pi\omega} L_r = \frac{ga_c}{4\pi\omega} L_r \dots \dots \dots (9)$$

$$L_r = \sqrt{\left(k + \frac{1}{r} \right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r} \right)^2}$$

である。

このように、振動機中心からの距離が r の位置における振動の液状化作用値 L_q はその点での振動の加速度

a , 波数 k , および減衰係数 β から計算されるが, β は k よりかなり値が小さいので, 実測値がないときはすでに報告されている数値を用いても影響は少ない. また, $k=2\pi f/c$ における波速 c は次式によっても推定することができる⁹⁾.

$$c = \sqrt{\frac{1}{A_i(1-A_i)} \frac{K_A}{\rho_0}} \dots\dots\dots(10)$$

ここに, A_i : 空気量 (体積比), ρ_0 : 空気を含まないコンクリートの密度 (kg/m^3), K_A : 空気の体積弾性率 ($\cong 1.43 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)

なお, 振動機中心からの距離が異なる数か所で加速度が測定されている場合には, 振動機とコンクリートの接触面におけるコンクリートの加速度 a_0 と減衰係数 β は容易に求められる⁹⁾から, これらを用いて, 任意の位置における液状化作用値を次式で計算することができる.

$$\begin{aligned} L_q &= \frac{a_0 L_r}{4\pi\omega} \sqrt{\frac{R_v}{r}} e^{-\beta(r-R_v)} \\ &= \frac{a_0}{4\pi\omega} \sqrt{\frac{R_v}{r} \left[\left(k + \frac{1}{r}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r}\right)^2 \right]} e^{-\beta(r-R_v)} \end{aligned} \dots\dots\dots(11)$$

一例として, スランプ 5~8 cm 程度のやや硬練りの AE コンクリートを想定して, 後掲の Table 1 に示している ASP-200 の数値を用い, 直径 40, 50 および 60 mm の各振動機に対して a_0 をそれぞれ 12, 15 および $20 \times g$ (g : 重力加速度) として, r と L_q 値との関係を計算した結果を Fig. 6 に示した.

(3) 平面波の液状化作用とせん断ひずみ成分の影響
振動機からの距離が大きく

$$k \gg \frac{1}{r}, \quad k \gg \beta + \frac{1}{2r}$$

とみなせるときは $L_r \cong k$ となるので式 (9) は

$$L_q = \frac{ak}{4\pi\omega} = \frac{a}{4\pi c} \dots\dots\dots(12)$$

となり, 液状化作用値は加速度振幅に比例し, 振動の伝播速度に反比例することになる.

一方, ϕ が

$$\phi = A \sin \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \dots\dots\dots(13)$$

のように表わされる平面波あるいは円筒波の場合には,

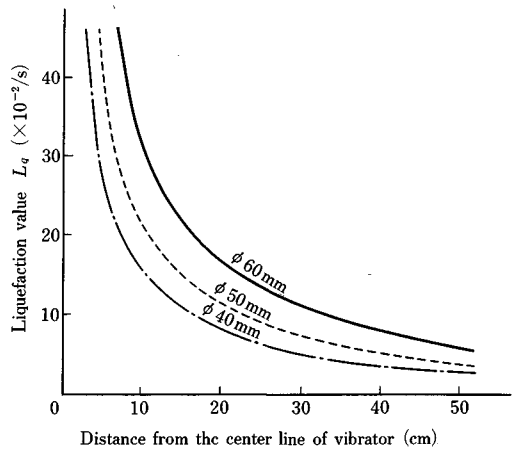


Fig. 6 Examples of L_q values.

$\Delta l/l$ は伸縮ひずみ成分だけになるから

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{2} \frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{\omega A}{2c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$\therefore L = f \cdot \frac{\Delta l}{l} = -\frac{\omega^2 A}{4\pi c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$= -\frac{a}{4\pi c} \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

したがって, 液状化作用値は

$$L_q = \frac{a}{4\pi c}$$

となって式 (12) に一致する. これは, 振動機からの距離が大きくなると, 波面が平面波に近づくことによるものである.

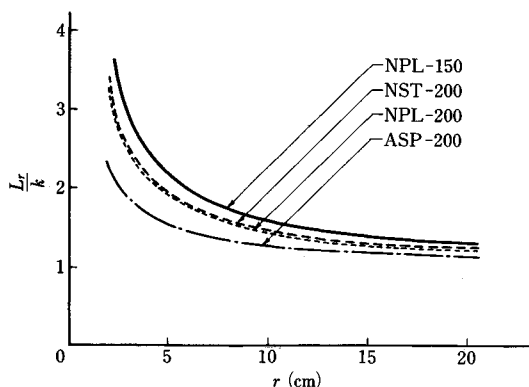
L_q 値に及ぼすせん断ひずみ成分の効果を調べるため, L_r/k と r との関係を図示したものが Fig. 7 である. 計算に用いた c, β, f の数値は Table 1 のとおりである. c, β については実験結果^{7), 9), 11)}を参考にした.

Fig. 7 をみると, r が小さいときは L_r/k は 2 以上で, せん断ひずみ成分の方が伸縮ひずみ成分より大きい, r が大きくなると L_r/k は急速に減少して, たとえば NPL-200 の場合 $r=20 \text{ cm}$ で約 1.2 となり, せん断ひずみ成分は伸縮ひずみ成分の 20% に低下している. 振動機の近傍に観測される“乱れ”の領域¹²⁾は, せん断ひずみ成分の影響の強い領域であると考えられる.

なお, L_r/k は AE コンクリートよりも普通コンク

Table 1 f, c, β

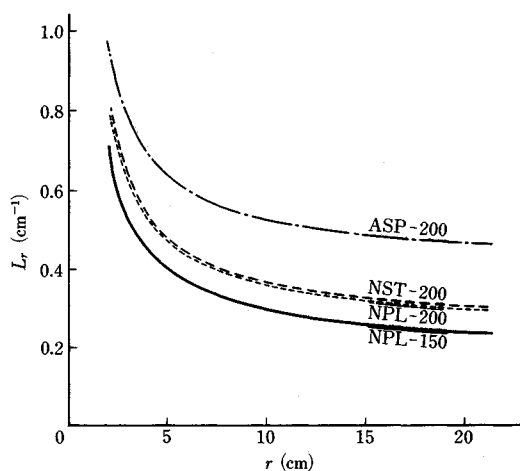
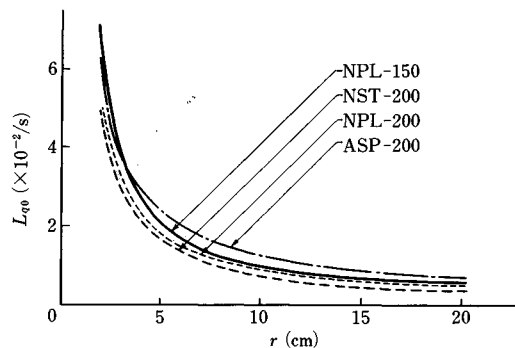
Case	Concrete		f (Hz)	c (m/s)	β (cm^{-1})
	Air	Consistency			
NST-200	Non-air-entrained	Stiff	200	50	0.034
NPL-150		Plastic	150		0.017
NPL-200			200		0.017
ASP-200	Air-entrained	Stiff plastic	200	30	0.017

Fig. 7 L_r/k vs r .

リートの方が大きく、また、振動数が200 Hzの場合よりも150 Hzの方が大きくなっているが、 L_r の大きさは k によって相違し、液状化作用値 L_q は L_r に比例するので、 L_q に対する L_r の影響をみるためには、 L_r の値の r による変化を調べる必要がある。

Fig. 8にその結果を示すが、 L_r では L_r/k と傾向が反対になり、普通コンクリートよりもAEコンクリートの方が大きく、150 Hzよりも200 Hzの方が L_r は大きくなっている。

r による L_q の変化を比較するために、振動機表面の位置におけるコンクリートの加速度 a_0 を1 (G)としたときの L_q (L_{q0} とする)を考え、Table 1の数値を用いて得た結果がFig. 9である。 a_0 および r が一定の場合、 L_q 値が最も大きいのはASP-200であって、AEコンクリートでは振動機の有効範囲が広く、硬練り普通コンクリートNST-200では有効範囲が狭いことがわかる。また、振動機に近い部分では振動数の低いNPL-150の方がNPL-200より L_q 値が大きくなってい

Fig. 8 L_r vs r .Fig. 9 L_{q0} vs r .

て、振動の加速度が一定であれば振動数の低い方、すなわち振幅の大きい方が液状化作用は大きい結果となっているが、振動機の加速度は振動数の2乗に比例して増大するので、締固め性能上からは、かなり振動数の高い領域に最適の振動数が存在すると考えられる。このことは実験的にも認められている^{4),13)}。

3. 振動によるセメントペーストの液状化と締固めの完了条件

(1) 振動締固めにおけるセメントペーストの液状化の役割

スラブ状試験体による締固め実験において、フレッシュコンクリートの間隙水圧の変化を測定した結果¹⁴⁾によれば、振動機の有効範囲内では振動によって間隙水圧が上昇し、スランプ8 cmおよび12 cmのコンクリートではほぼ静水圧になっている。また、超硬練りコンクリートが振動を受けた場合の挙動について行われた可視化実験の報告¹⁵⁾によれば、締固め開始と同時にコンクリート表面は数cm急速に沈下し、表面から約5 cmの部分のアクリル板がセメントペーストで覆われること、次いで空気泡の上昇、セメントペーストおよびモルタルの下降とこれらによる骨材間隙の充填に伴って、セメントペーストで覆われるアクリル板の面積は下方に向かって徐々に増大することが認められている。このことはRCDコンクリートのような超硬練りコンクリートにおいても、振動によるコンクリートの締固まりは振動によって液状化したセメントペーストの流動を通して進行することを示すもので、内部振動機によるコンクリートの締固めは、基本的には、振動によるセメントペーストの液状化と自重によるコンクリートの流動および沈下と考えることができる。実務において、「コンクリートとせき板との接触面にセメントペーストの線が現われること」、「コンクリートの容積の減っていくのが認められなくなり、モルタルまたは水の光が表面に現われてコンクリート全体が均一に溶けあつたようにみえること」を締固め完了の目

安としている¹⁶⁾のは根拠のあることといえる。

(2) 振動によって固体粒子が液化化する条件

粉体の溶解速度に関する実験などで知られているとおり、水中にある固体粒子の表面には、攪拌しても付着していて動かない拡散層といわれる薄い水の層があり、その厚さ δ_0 は、多くの場合物質に無関係に約 10^{-3} cm である¹⁷⁾。

そこで、接触している2個の粒子が振動を受けた場合、接点が $2\delta_0$ だけ離れたときにその結合が解けるものとし、これをこの粒子の液化化と考える。

前章で導入した振動の液化化作用 L はひずみ速度の次元 s^{-1} をもつ周期変化をする量で、その大きさの平均値は $2L_0/\pi$ であるから、粒子の中心間距離を粒子直径 d_c として、振動時間 t の間の粒子間距離の変化 Δd は

$$\Delta d = \frac{2}{\pi} L_0 t d_c \dots\dots\dots (14)$$

である。しかし、後述するように、粒子間距離を拡大するのに必要な最小ひずみ速度があると考えられるので、これを考慮すれば式(14)は次式となる。

$$\Delta d = \frac{2}{\pi} (L_0 - L_0) t d_c \dots\dots\dots (15)$$

ただし、必要最小ひずみ速度 $= 2L_0/\pi$

実際のコンクリートで、セメントペーストの量が骨材粒子の間隙を充填するのに必要な量よりも多い、いわゆる余剰ペースト¹⁸⁾が存在する状態では、セメントの表面に粒子間隙を満たした余剰水による水膜があるから、この膜厚 δ を考慮して、液化化が起こり得る条件は $\Delta d \geq 2\delta_0 - \delta$ すなわち、

$$(L_0 - L_0) t \geq \frac{\pi(2\delta_0 - \delta)}{2d_c} \dots\dots\dots (16)$$

となる。

δ の値は、セメントペーストの水セメント比 W/C とセメントの比表面積 S_0 によって次のように概算できる。

$$\delta = \frac{W - Ce/g_c}{CS_0} = \left(\frac{W}{C} - \frac{e}{g_c} \right) / S_0 \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 W ：単位体積のセメントペースト中の水の質量
 C ：単位体積のセメントペースト中のセメントの質量
 e ：セメントの間隙率
 g_c ：セメントの密度
 S_0 ：セメントの比表面積

$e = 0.50$, $g_c = 3.17$ とすれば

$$\delta = \left(\frac{W}{C} - 0.16 \right) / S_0 \dots\dots\dots (18)$$

であり、 $W/C = 0.50$, $S_0 = 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ では $\delta = 1.1 \times 10^{-4}$ cm で $2\delta_0$ よりかなり小さい。 $\delta = 0$ とみなせば式

(16) は簡単な次式になる。

$$(L_0 - L_0) t \geq \frac{\pi}{d_c} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (19)$$

式(16), (19) が示すように、粒径の小さい粒子ほど液化化は起こりにくいから、ある大きさの $(L_0 - L_0)t$ に対して、一般には液化化している粒子と液化化していない粒子が混在することとなる。そこで粒子群の粒径 D の分布を表わす密度関数を $f(D)$ 、最大粒径を d_m とすると $D \geq d_c$ である粒子の全粒子に対する重量比 $F(d_c)$ は

$$F(d_c) = \int_{d_c}^{d_m} f(D) dD \dots\dots\dots (20)$$

ただし、

$$\int_0^{d_m} f(D) dD = 1$$

であるから、 $F(d_c)$ は

$$d_c \geq \frac{\pi(2\delta_0 - \delta)}{2(L_0 - L_0)t} = \frac{\pi\delta_0}{(L_0 - L_0)t} \left(1 - \frac{\delta}{2\delta_0} \right) \dots\dots\dots (21)$$

を満たす粒子の比率、すなわち液化化している粒子の比率を表わす。したがって、セメントの粒径分布がわかれば、与えられた $(L_0 - L_0)t$ に対して、セメントペースト中で液化化する粒子の比率を求めることができる。

前述のように、 $\delta \cong 1.1 \times 10^{-4}$ cm とすれば、 $\delta/2\delta_0 \cong 0.055$ であるので、これを無視すると、式(21)は次式となる。

$$d_c \geq \frac{\pi\delta_0}{(L_0 - L_0)t} = \frac{\pi}{(L_0 - L_0)t} \times 10^{-3} \text{ (cm)} \dots\dots\dots (22)$$

(3) セメントペーストの液化化率

Fig. 10 は、ポルトランドセメントの粒径の測定結果として書物^{19), 20)}に紹介されている資料から作成した粒径曲線である。セメントの粒径分布としてこれを用いると、 $d_c = 50 \mu\text{m}$ ではセメントペースト中で液化化する粒子の比率は約 18%、 $d_c = 5 \mu\text{m}$ では約 85% であり、そのと

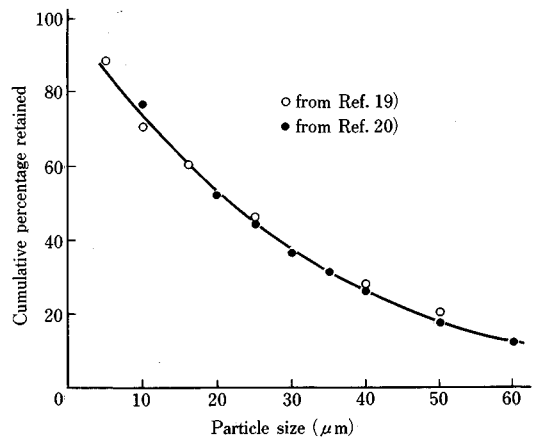


Fig. 10 Particle size distribution of typical Portland cement.

きの $(L_q - L_0)t$ の値を式 (22) から求めればそれぞれ 0.63 および 6.28 である。

ペースト中で液状化する粒子の重量比 $F(d_c)$ を液状化率 L_p とし、 L_p によって液状化の程度を表わすこととして、 $(L_q - L_0)t$ と L_p との関係を探めたものが Fig. 11 である。これをさらに $(L_q - L_0)t \sim \log_e(0.86 - L_p)$ で表わすと Fig. 12 のようになり、 $(L_q - L_0)t$ と L_p との関係を表わす次式が得られる。

$$L_p = 0.86 - e^{-0.661(L_q - L_0)t} \dots\dots\dots (23)$$

なお、余剰水の膜厚 δ を考慮する場合には、この式の $(L_q - L_0)t$ を $(L_q - L_0)t / (1 - \delta/2\delta_0)$ に置き換えた式 (24) となるが、これ以降の考察においては $\delta/2\delta_0 \equiv 0$ とする。その影響が小さいことは後掲の Table 2 に示されている。

$$L_p = 0.86 - \exp \left\{ -0.661 (L_q - L_0)t / \left(1 - \frac{\delta}{2\delta_0} \right) \right\} \dots\dots\dots (24)$$

(4) 締固め完了の条件

コンクリートの締固めの進行は、振動による液状化作

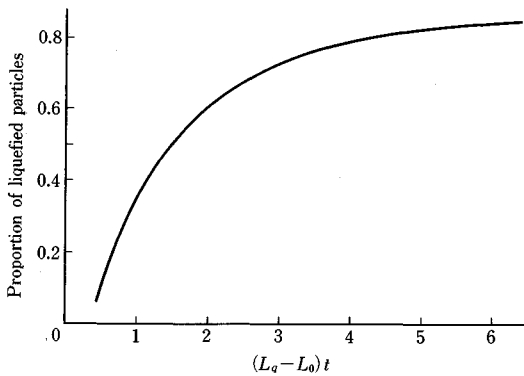


Fig. 11 Relationship between $(L_q - L_0)t$ and proportion of liquefied cement particles.

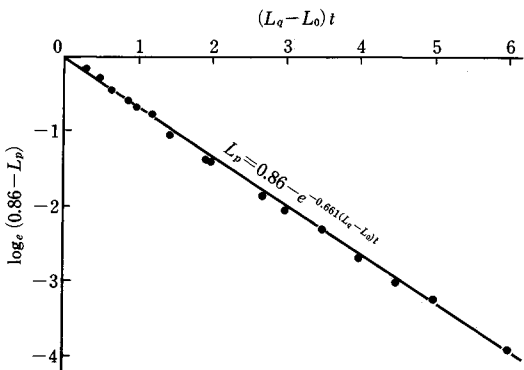


Fig. 12 Relationship between $(L_q - L_0)t$ and liquefaction ratio of cement paste.

用と、液状化作用を受けたときのフレッシュコンクリートの応答特性とによって定まる。そこで、コンクリートの締固まりをセメントペーストの液状化によるコンクリートの沈降距離 z で評価することとし、沈降速度がセメントペーストの液状化率に比例するものと考え

$$\frac{dz}{dt} = v_0 L_p = v_0 (b - e^{-\alpha t}) \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 $v_0 : L_p = 1$ のときの沈降速度

$$b : 0.86$$

$$\alpha : 0.661(L_q - L_0)$$

$$\therefore z = \int v_0 (b - e^{-\alpha t}) dt = v_0 \left(bt + \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \right) + C_1$$

初期条件 $t=0, z=0$ から C_1 を定めると

$$z = v_0 \left\{ bt - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right\} \dots\dots\dots (26)$$

締固めが完了するときの沈降距離を z_0 とすれば、締固め完了の条件は

$$\frac{z_0}{v_0} \leq bt - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \dots\dots\dots (27)$$

となる。 z_0/v_0 は、液状化率が 100% ($L_p=1$) のときに締固めに要する時間であって、主としてコンクリートのコンシステンシーと締固めの一層の厚さによって定まる定数であるが、水平鉄筋など、コンクリートの沈降を阻害するものの影響も含んでいる。

$z_0/v_0 = T_0$ とおくと式 (27) は

$$T_0 - bt + \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \leq 0 \dots\dots\dots (28)$$

となる。 b, α の値を入れれば、締固めが完了するときの振動時間 t と液状化作用値 L_q との関係を与える次の式が得られる。

$$T_0 - 0.86t + \frac{1}{0.661(L_q - L_0)} [1 - e^{-0.661(L_q - L_0)t}] = 0 \dots\dots\dots (29)$$

4. 振動締固めに対するコンクリートの特性と振動機の有効半径との関係

(1) コンクリートの振動締固め特性を表わすパラメーター

式 (29) に含まれている L_0 は、3.(2) で述べたように、水中で接触している 2 個の粒子の中心間距離を拡大させるのに必要な最小限のひずみ速度に関係している。これを直接測定した実験結果は見当たらないが、低せん断速度領域におけるセメントペーストのレオロジー特性についての研究結果²¹⁾によれば、 W/C 30% の場合、ひずみ速度 $0.007 \sim 0.03 \text{ s}^{-1}$ で見掛け粘度が増大し、 0.07 s^{-1} 程度まで一定している。すなわち、この範囲でセメントペーストはグイレイタンシー性状を示している。この値は W/C が大きくなれば減少するが、コンク

リート中でのセメントペーストはニートセメントペーストより流動しにくいと考えられるので、通常用いられている W/C の場合でも、必要最小ひずみ速度はこの程度の値であると推測される。したがって L_0 はその $\pi/2$ 倍ということになる。

このように、 L_0 はセメントペーストに液状化を起こさせるのに必要な最小の液状化作用を表わすので、これを液状化抵抗値とよぶことにする。

一方、 T_0 は $L_0=1$ 、すなわちセメントペーストが完全に液状化した状態で締固めに要する振動時間であるから、これを基本振動時間と称することにすれば、振動締固めに対するフレッシュコンクリートの性質は、液状化抵抗値 L_0 (s^{-1}) と基本振動時間 T_0 (s) の2つの特性値で表わせることとなる。なお、 $L_0=0$ はフレッシュコンクリートをビンガム体で近似したときの降伏値=0に対応し、 $T_0=0$ は粘性係数=0に対応する。

(2) 振動時間と締固め完了領域との関係

式 (29) に含まれているパラメーター L_0 、および T_0 が与えられたとき、振動時間 t (s) で締固めが完了する領域の L_q の最小値、すなわち締固めに必要な液状化作用値 L_q (s^{-1}) は

$$T(t, L_q) = T_0 - 0.86 t + \frac{1}{0.667(L_q - L_0)} \{1 - e^{-0.667(L_q - L_0)t}\} \quad \dots\dots\dots(30)$$

とおいて $T(t, L_q)=0$ となる L_q を数値計算することによって得ることができる。一方、振動機中心からの距離

r における L_q は式 (11) によって計算されるから、振動時間 t で締固めが完了する領域は次式で表わされる。

$$L_q \leq \frac{a_0}{4 \pi \omega} \sqrt{\frac{R_v}{r} \left[\left(k + \frac{1}{r}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r}\right)^2 \right]} e^{-\beta(r-R_v)} \quad \dots\dots\dots(31)$$

逆に、締固めの範囲を定めて所要の振動時間を求める場合には、式 (9) または式 (11) で所要の L_q 値を計算し、これを式 (30) に代入して、 $T(t, L_q)=0$ となる t を数値計算すればよい。

これらの式を用いて実際に計算を行うためには、コンクリートの液状化抵抗値 L_0 と基本振動時間 T_0 をあらかじめ実験を行うか、または実験資料によるかして定める必要があるが、ここでは $L_0=3.0 \times 10^{-2}/s$ および $5.0 \times 10^{-2}/s$ に対して T_0 をそれぞれ $0 \sim 7.0$ (s) に変化させて計算した振動時間 t と所要の L_q 値との関係を Table 2 に示す。

振動時間 t と締固めが完了する領域 r との関係は、 L_q 値が表の値以上となる条件として定まるから、一例として、スランプ $5 \sim 8$ cm 程度のやや硬練りの AE コンクリートを想定した Table 1 の ASP-200 の数値を用いて、直径 50 mm の振動機に対する振動時間と締固め完了領域との関係を求めたものが Fig. 13 である。

得られた曲線は、実験において振動時間と有効半径との関係として得られている結果^{2), 4), 22)} と同じように、振動時間のある程度以上長くても、締め固められる範囲はそれほど拡大しないことを示している。実務上の振動

Table 2 Required L_q values ($\times 10^{-2}/s$).

L_0 ($10^{-2}/s$)	T_0 (s)	t (s)							remarks
		5	10	15	20	30	45	60	
3.0	0	12.3	7.6	6.1	5.3	4.5	4.0	3.8	$\delta=0$
	0.5	20.3	9.6	6.9	5.8	4.8	4.1	3.8	
	1.0	29.9	11.6	7.8	6.3	5.0	4.2	3.9	
	2.0	*	16.5	9.8	7.3	5.4	4.4	4.0	
	3.0	*	22.5	12.0	8.5	5.9	4.6	4.1	
	5.0	*	41.5	17.6	11.1	6.9	5.0	4.3	
	7.0	*	*	25.8	14.6	8.1	5.5	4.6	
5.0	0	14.3	9.6	8.1	7.3	6.5	6.0	5.8	Eq. (29)
	0.5	22.3	11.6	8.9	7.8	6.8	6.1	5.8	
	1.0	31.9	13.6	9.8	8.3	7.0	6.2	5.9	
	2.0	*	18.5	11.8	9.3	7.4	6.4	6.0	
	3.0	*	24.5	14.0	10.5	7.9	6.6	6.1	
	5.0	*	43.5	19.6	13.1	8.9	7.0	6.3	
	7.0	*	*	27.8	16.6	10.1	7.5	6.6	
	0	13.8	9.4	7.9	7.2	6.5	6.0	5.8	$\delta=1.1 \times 10^{-4}$ cm
	0.5	21.3	11.2	8.7	7.6	6.7	6.1	5.8	
	1.0	30.5	13.2	9.6	8.1	6.9	6.1	5.8	
	2.0	*	17.7	11.4	9.1	7.3	6.3	5.9	
	3.0	*	23.4	13.5	10.2	7.7	6.5	6.0	
	5.0	*	41.3	18.8	12.7	8.7	6.9	6.2	
	7.0	*	*	26.6	15.9	9.8	7.4	6.5	

* $> 50.0 \times 10^{-2}/s$

時間は通常の場合1か所について5~20秒程度であり、振動機の有効半径は13~25cm程度²³⁾であるが、これは、Fig. 13における $T_0=0.5\sim 2.0$ sの範囲とほぼ一致している。

(3) 締固め完了条件式の修正と提案式

3.(4)において、締固めが完了するときの条件として次の形の式が得られた。

$$T_0 - bt + \frac{1}{h(L_q - L_0)} [1 - e^{-h(L_q - L_0)t}] \leq 0 \dots\dots\dots(32)$$

この式に含まれる b 、 h はセメント粒子の粒径分布に関係した定数で、前章においては試験結果に基づいて、 $b=0.86$ 、 $h=0.661$ とした。しかし、ペーストの液状化率 L_p が次式で表わされることから、この値を用いるとどんな場合にも液状化率は0.86以上にならないことになる。

$$L_p = b - e^{-h(L_q - L_0)t} \dots\dots\dots(33)$$

また、Fig. 10はセメントの粒径分布の一例であるので、 L_0 、 T_0 の2個のパラメーターを導入した段階では、この数値にいくぶんの修正を加えても式(33)の意味は変わらない。

そこで、 $(L_q - L_0)t$ が非常に大きい場合に $L_p=1$ となるように $b=1$ とし、 h は $0.661 \approx 2/3$ とみなすと、式(30)および式(32)は次の提案式

$$T(t, L_q) = (t - T_0) - \frac{3}{2(L_q - L_0)} [1 - e^{-\frac{2}{3}(L_q - L_0)t}] \geq 0 \dots\dots\dots(34)$$

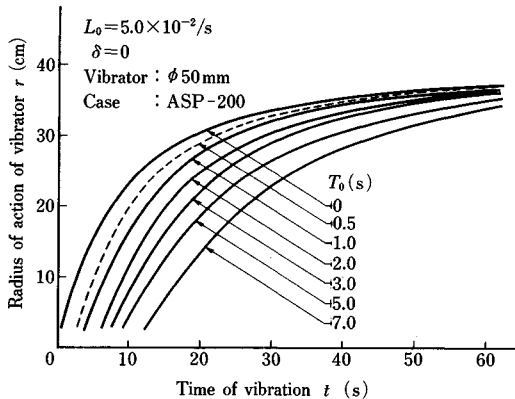


Fig. 13 Relationship between time of vibration and radius of action of vibrator.

となる。

(4) 液状化抵抗値と基本振動時間の測定方法

振動機の有効半径の算定、あるいは1か所当たりの振動時間の決定に、式(34)を適用するためには、2個のパラメーター L_0 、 T_0 に適正な数値を与えなければならないから、実験によってこれらの値を求める必要がある。振動台を用いて円柱供試体に振動を加える実験もその1つの方法であって、振動の強さを広範囲に変化させて、締固めに必要な最小限の振動の強さから L_0 を、また、非常に強い振動を与えたときの沈下速度から T_0 を求めることが可能と思われる。しかし、スラブ状試験体を用いた締固め実験において振動時間と有効半径との関係から、 L_0 と T_0 が求められればそれが最も直接的な方法である。その手法は種々考えられるが、Fig. 13にみられるように、 t と r との関係を表わす曲線は、 t が小さいときに T_0 による差が大きくなり、 $t=60$ s程度になると T_0 の影響がかなり小さくなることを利用した以下の方法が実際的である。ただし、振動特性 a_0 、 f 、 c 、 β はすでに求まっているか、あるいは実験時に加速度を測定して求めるものとする。

- ① 振動時間 $t=5, 10, 15$ および60sにおける締固め完了域の半径 $R_5, R_{10}, R_{15}, R_{60}$ を測定する。
 - ② 式(11)を用いて $r=R_5 \sim R_{60}$ に対する L_q 値、 $L_5 \sim L_{60}$ を計算する。
 - ③ 式(34)において、 $t=60, T_0=0, L_q=L_{60}$ として $T(t, L_q)=0$ を満たす L_0 を数値計算する。
 - ④
- $$T_0 = t - \frac{3}{2(L_q - L_0)} [1 - e^{-\frac{2}{3}(L_q - L_0)t}] \dots\dots\dots(35)$$
- を用いて $t=5, 10, 15$ sとしたときの T_0 を求め、これらを T_5, T_{10}, T_{15} とする。
- ⑤ $T_5 \sim T_{15}$ の平均値を求めてこれを T_0 とする。
- $$T_0 = (T_5 + T_{10} + T_{15}) / 3$$

Table 3は、スランプ2.5cmの普通コンクリートを $\phi 40$ mmと $\phi 50$ mmの振動機を用いて締め固めた実験¹¹⁾における振動時間と浮水の発生範囲との関係、およびこの実験結果から前記の方法で求めた液状化抵抗値 L_0 と基本振動時間 T_0 である。また、この値を用いて式(34)、(31)から振動時間 t と締固め完了域 r との関係を求め、計算結果がどの程度実験結果を再現するかを確かめたも

Table 3 Values of L_0 and T_0 obtained from experimental results.

Concrete	Vibrator	Characteristics of vibration				radius of action (cm)	Experimental data						Calculated results	
		f (Hz)	a_0 (G)	c (m/s)	β (cm ⁻¹)		Time of vibration (s)						L_0 ($\times 10^{-2}$ /s)	T_0 (s)
							5	10	15	20	30	60		
Non-AE Slump 2.5 cm	$\phi 40$ mm	200	14.23	50	0.030	5.5	9	11	12.5	13	13.5	8.00	1.27	
	$\phi 50$ mm		17.03		0.031	10	16	19.5	21.5	22.5	23.5	5.37	0.96	

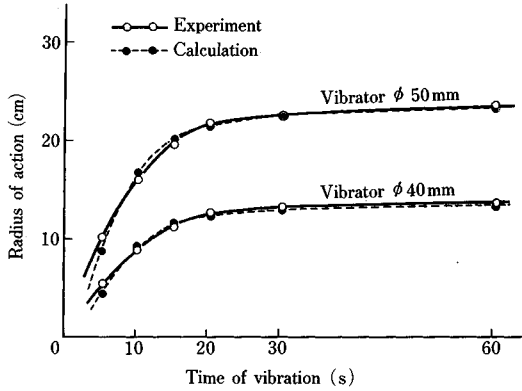


Fig. 14 Comparison of calculation with experiment.

のが Fig. 14 である。

Fig. 14 では、 L_0, T_0 の算出に用いた実験結果を計算結果と比較しているから、計算結果が部分的に実験結果と一致するのは当然であるが、Fig. 14 にみられるように、曲線全般にわたってよく一致していることは、この計算方法が妥当であることを示すものである。したがって、実験を重ねて、コンクリートの配合、コンシステンシーその他の性質、打込みの1層の厚さ、水平鉄筋の状態等と L_0, T_0 との関係についての資料が集積されれば、締め固め実験を行わずにこれらの値を選定できるようになることが期待される。また、2個のパラメーター間の関係が見出されれば、これらの値の選定はさらに容易になると思われる。

5. 鉄筋およびせき板が振動の液状化作用に及ぼす影響

(1) 鉄筋表面からの反射波

音響学の分野などでは、円筒形物体による平面波の散乱が理論的に取り扱われている。その手法は、平面波が円筒に入射したとき、散乱波は円筒を中心とする外向円筒波になるとし、入射波と散乱波の円筒表面における合成速度が円筒面に垂直な方向で0になる、という条件を用いて、級数形で表わした波動関数の係数を定めるものである。しかし、内部振動機からコンクリート中に伝播する波動は、単純な平面波ではないため、このような一般解を求めることは非常に困難であるので、ここでは、振動機からの波動を表わす式(2)を用いて、鉄筋表面上の点 Q からの反射波を古典的な方法で求め、直接波と反射波による液状化作用を合成した。

まず、Fig. 15 のように、振動機を中心位置を原点 O とし、円形の鉄筋の中心の位置を $S(x_s, y_s)$ 、極座標で (r_s, θ_s) とした座標軸を定める。また、コンクリート中の着目点を $P(x, y; r, \theta)$ 、鉄筋表面で反射されて P 点

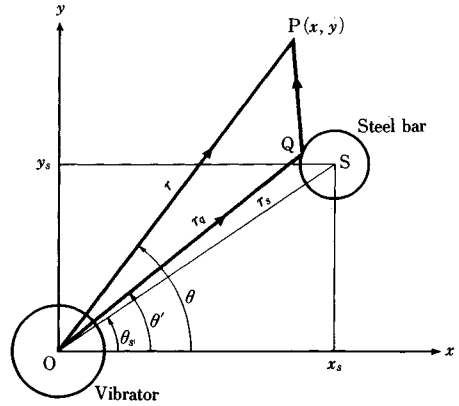


Fig. 15 Positions of vibrator and steel bar.

に到達する波動を ψ' 、 ψ' の反射点を Q 、 \overrightarrow{OQ} が x 軸の正の方向となす角を θ' 、 $\overrightarrow{OQ} = r_a$ とする。

次に鉄筋の中心 S を基点にとり、Fig. 16 のように $\overrightarrow{SP} = \rho$ 、 \overrightarrow{SP} が x 軸の正の方向となす角を φ_p 、 $\overrightarrow{SQ} = R_s$ 、 \overrightarrow{SQ} が \overrightarrow{OS} の方向となす角を φ_a 、入射波 \overrightarrow{OQ} が \overrightarrow{SQ} の方向となす入射角を φ_i 、さらに、 $\overrightarrow{PQ} = r_p$ 、 $r' = r_p + r_s$ 、 \overrightarrow{QP} が x 軸の正の方向となす角を η とする。なお角度はすべて反時計回りを正として測るものとする。

このとき、鉄筋上の反射点 Q は次のようにして定まる。

$$\rho = \sqrt{r^2 + r_s^2 - 2 r r_s \cos(\theta - \theta_s)} \dots \dots \dots (36)$$

$$l_s = r \sin(\theta - \theta_s)$$

$$l_c = r \cos(\theta - \theta_s) - r_s$$

として

$$\varphi_p = \tan^{-1}(l_s/l_c) + \theta_s \dots \dots \dots (37)$$

φ_q は次の方程式を満たす z として求められる。

$$f(z) = \frac{1}{\tan z} - \frac{1}{\tan(\varphi_p - \theta_s - z)} + \frac{R_s}{r_s \sin z}$$

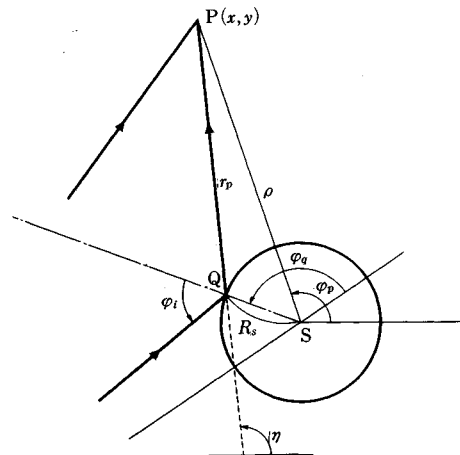


Fig. 16 Position of $P(x, y)$ on the basis of steel bar.

$$+\frac{R_s}{\rho \sin(\varphi_p - \theta_s - z)} = 0 \dots\dots\dots (38)$$

$f(z)=0$ の解 φ_q は、 Q の位置によってある一定の範囲内にあることが明らかであるので、 Q の位置に応じて解の存在範囲 z_0, z_1 ($z_0 < \varphi_q < z_1$) を初期値として与え、区間探索法によって求めることができる。

鉄筋中心 S が x 軸上または第 1 象限にある場合と、 S が第 4 象限にある場合について考えることとすれば、ここまでで得られている各式は、この両方の場合に共通して適用できる。そして、おのおの場合について、Fig. 17 のように、 OS より上方で鉄筋の影になる領域を Range 1、鉄筋の影に入らない領域を Range 2、 OS より下方についても同様に Range 4 および Range 3 とす

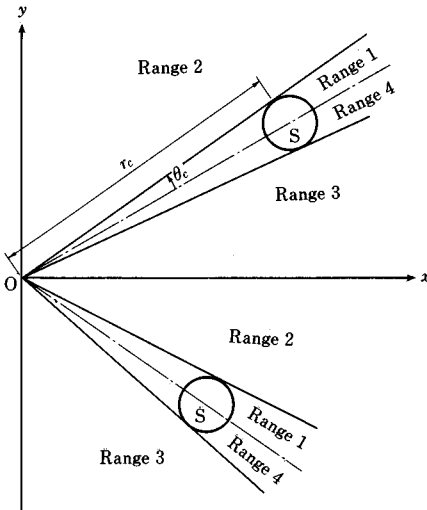


Fig. 17 Divisions of plane.

Table 4 Range of φ_q .

Range	Position of P (r, θ)	Range of φ_q
1	$\theta_s < \theta < \theta_s + \theta_c$ and $r \geq r_c$	$0 < \varphi_q < \varphi_p - \theta_s$
2	$\theta_s < \theta < \theta_s + \theta_c$ and $r < r_c$	$\varphi_p - \theta_s < \varphi_q < \pi$
	$\theta_s + \theta_c < \theta < \theta_s + \pi$ and $\theta = \theta_s + \theta_c$	$\varphi_q = \theta_c + \pi/2$
3	$\theta_s - \theta_c + 2\pi < \theta < \theta_s + 2\pi$ and $r < r_c$	$\pi < \varphi_q < \varphi_p - \theta_s$
	$\theta_s + \pi < \theta < \theta_s - \theta_c + 2\pi$ and $\theta = \theta_s - \theta_c + 2\pi$	$\varphi_q = \theta_c + 3\pi/2$
4	$\theta_s - \theta_c + 2\pi < \theta < \theta_s + 2\pi$ and $r \geq r_c$	$\varphi_p - \theta_s < \varphi_q < 2\pi$
on the elongation of OS	$\theta = \theta_s$ and $r > r_s$	$\varphi_q = 0$
on the OS	$\theta = \theta_s$ and $r < r_s$	$\varphi_q = \pi$

る。そうすれば、点 $P(r, \theta)$ がこれらの領域に入る条件と、点 P がこれらの領域に入っているときの反射点 Q の位置の範囲は Table 4 のようになる。ただし

$$r_c = \sqrt{r_s^2 - R_s^2} \dots\dots\dots (39)$$

$$\theta_c = \tan^{-1}(R_s/r_c) \dots\dots\dots (40)$$

$$(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 > R_s^2 \dots\dots\dots (41)$$

また、

$$m_s = r_s \sin \varphi_q$$

$$m_c = r_s \cos \varphi_q + R_s$$

として

$$\varphi_i = -\tan^{-1}(m_s/m_c) \dots\dots\dots (42)$$

$$r_q = \sqrt{m_s^2 + m_c^2} \dots\dots\dots (43)$$

$$\theta' = \varphi_q + \varphi_i + \theta_s - \pi \dots\dots\dots (44)$$

$$r_p = \rho^2 + R_s^2 - 2\rho R_s \cos(\varphi_q - \varphi_p + \theta_s) \dots\dots\dots (45)$$

$$\eta = \varphi_q - \varphi_i + \theta_s \dots\dots\dots (46)$$

$$r' = r_p + r_q \dots\dots\dots (47)$$

以上により、鉄筋表面からの反射波が振動機表面から放射された時刻 t' は、現時刻を t とすると $t' = t - (r_p + r_q)/c$ であり、放射された方向は θ' である。そして、伝播による振幅の減少率は

$$\text{振動機} \sim \text{点 } Q \text{ において } \sqrt{\frac{R_v}{r_q}} e^{-\beta(r_q - R_v)}$$

$$\text{点 } Q \sim \text{点 } P \text{ において } \sqrt{\frac{R_s}{r_p + R_s}} e^{-\beta r_p}$$

であるから、反射波は次式で表わされる。

$$\psi' = A' \sin \phi' \dots\dots\dots (48)$$

ここに

$$A' = R_r \psi_0 \sqrt{\frac{R_s R_v}{r_q(r_p + R_s)}} e^{-\beta(r_p + r_q - R_v)} \dots\dots\dots (49)$$

$$\phi' = \omega t - k(r_p + r_q - R_v) - \theta' \dots\dots\dots (50)$$

R_r : 反射率

(2) 鉄筋表面からの反射波の液状化作用

Fig. 18 のように、点 P において微小な正方形素片 $PLMN$ を考え、 $r' = r_p + r_q$ として $PN = \Delta r'$ 、 $PL = nr' \Delta \theta'$ とする。 n は、入射波の方向が $\Delta \theta'$ だけ変化したときの入射点のずれによる反射方向の変化の影響を考慮した係数であり、 Q の位置によって異なるが、これを 1 とみなせば 2. (2) の場合と同様の考察により、 P 点における反射波の液状化作用は次式で表わされる。

$$L' = \frac{\omega}{4\pi} \left(\frac{1}{r'} \frac{\partial \psi'}{\partial \theta'} + \frac{\partial \psi'}{\partial r'} \right) \dots\dots\dots (51)$$

ここで、式 (49) における $\sqrt{r_q(r_p + R_s)}$ を r' で近似するために

$$\sqrt{r_q(r_p + R_s)} \approx \frac{1}{2}(r_q + r_p + R_s) = \frac{1}{2}(r' + R_s) \dots\dots\dots (52)$$

とおけば

$$A' = 2 R_r \psi_0 \sqrt{R_s R_v} \frac{1}{r' + R_s} e^{-\beta(r' - R_v)} \dots\dots\dots (53)$$

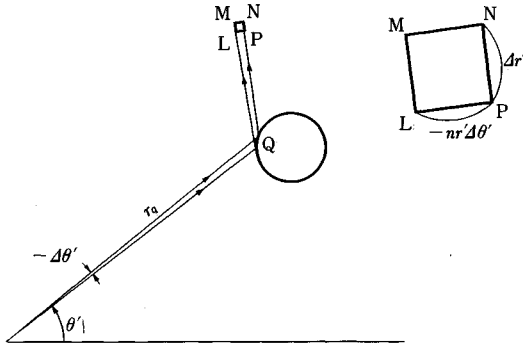


Fig. 18

となるので

$$\begin{aligned} \frac{1}{r'} \frac{\partial \psi'}{\partial \theta'} + \frac{\partial \psi'}{\partial r'} &= -\frac{A'}{r'} \cos \phi' - A' \left(\beta + \frac{1}{r' + R_s} \right) \sin \phi' \\ &= -A' k \cos \phi' = -A' \left\{ \left(k + \frac{1}{r'} \right) \cos \phi' \right. \\ &\quad \left. + \left(\beta + \frac{1}{r' + R_s} \right) \sin \phi' \right\} \dots\dots\dots(54) \end{aligned}$$

したがって、 L' は次式で与えられる。

$$L' = -\frac{\omega A'}{4\pi} \sqrt{\left(k + \frac{1}{r'} \right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{r' + R_s} \right)^2} \sin(\phi' + \alpha') \dots\dots\dots(55)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{k + 1/r'}{\beta + 1/(r' + R_s)} \dots\dots\dots(56)$$

ただし、 A' は再び式 (52) を用いて

$$A' = R_s \phi_0 \sqrt{\frac{R_s R_v}{r_0(r_0 + R_s)}} e^{-\beta(r' - R_v)} \dots\dots\dots(57)$$

である。

なお、入射点の法線方向のずれの影響を考慮した場合には、 $\Delta\theta'/\Delta r' = -1/nr'$ となるので式 (51) は

$$L' = \frac{\omega}{4\pi} \left(\frac{1}{nr'} \frac{\partial \psi'}{\partial \theta'} + \frac{\partial \psi'}{\partial r'} \right)$$

となり、式 (55)、(56) は次のようになる。

$$L' = -\frac{\omega A'}{4\pi} \sqrt{\left(k + \frac{1}{nr'} \right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{r' + R_s} \right)^2} \sin(\phi' + \alpha') \dots\dots\dots(58)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \frac{k + 1/(nr')}{\beta + 1/(r' + R_s)} \dots\dots\dots(59)$$

この式は n の値によって式 (55) と振幅が異なるが、 r' は鉄筋への入射距離と反射後の距離の和であってそれほど小さくないから $n=1$ としても影響は小さい。

(3) せき板からの反射波の液状化作用

Fig. 19 のように、振動機を中心とした座標軸上で、 x_f の位置に垂直な平板があるときは、 P 点への反射波は、板の表面に関する O の鏡像点を M として MP の方向に向かうから

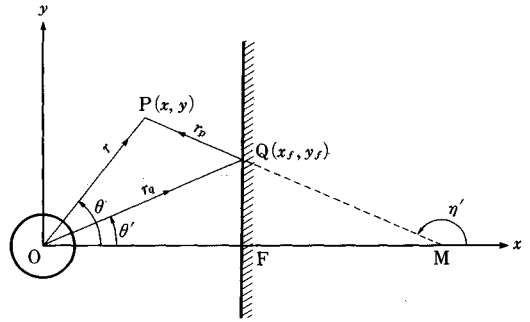


Fig. 19 Reflection of wave at the surface of a solid plate.

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{y}{2x_f - x}$$

$$\eta' = \pi - \theta'$$

$$r' = \sqrt{(2x_f - x)^2 + y^2}$$

反射波の式は反射率を R_r として

$$\psi' = R_r \phi_0 \sqrt{\frac{R_v}{r'}} e^{-\beta(r' - R_v)} \sin \{ \omega t - k(r' - R_v) - \theta' \} \dots\dots\dots(60)$$

であり、液状化作用 L' は L の式 (7) で L_r に含まれている r を r' に置き換えた式となる。

6. 複数の鉄筋とせき板の影響がある場合の振動機の作用領域

(1) 直接波と反射波による合成液状化作用

Fig. 20 のように、振動機中心を原点 O として座標軸をとり、任意の点 $P(x, y)$ における液状化作用を考える。 P に到達する波動には振動機からの直接波、鉄筋からの反射波、せき板からの反射波および2次反射波があるが、反射波の影響は比較的小さいと考えられるので、ここでは2次反射波は無視することとする。これらの波動はそれぞれが独立した液状化作用をもつが、それらは大きさが周期変化をするベクトルと考えることができるので、合成ベクトルの絶対値の最大値がこの点の液状化作用値 L_q となる。

鉄筋の本数を N とし、 $i=0$ のとき振動機からの直接波の液状化作用、 $i=1 \sim N$ のとき i 番目の鉄筋からの反射波の液状化作用、 $i=N+1$ のときせき板からの反射波の液状化作用を表わすものとする、 L_q は次式のようになる。

$$L_q = \left[\sqrt{\left(\sum_{i=0}^{N+1} L_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{N+1} L_{yi} \right)^2} \right]_{\max} \dots\dots\dots(61)$$

ここに、 $L_{xi} = L_i \cos \eta_i$

$$L_{yi} = L_i \sin \eta_i$$

L_i : i 番目の波動の液状化作用

η_i : P 点に到達する波動の進行方向が x 軸と

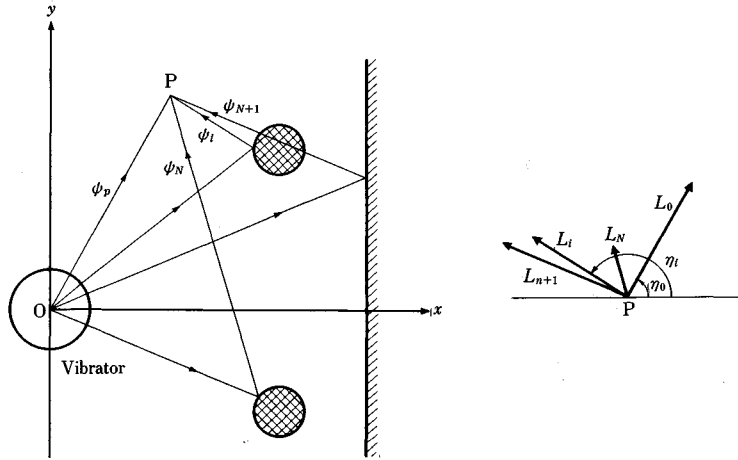


Fig. 20 Waves and their liquefactions as vectors at a point P.

なす角

L_i は式 (7) および式 (58) として求まっているが、振動機表面位置におけるコンクリートの加速度 a_0 ($=ga_0$, cm/s^2) を用いて表わすと

$$L_i = -L_m \sin(\phi + \alpha) \dots\dots\dots (62)$$

ここに

① 振動機からの直接波に対して

$$L_m = \frac{a_0}{4\pi\omega} \sqrt{\frac{R_v}{r} \left\{ \left(k + \frac{1}{r}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{2r}\right)^2 \right\}} e^{-\beta(r-R_v)} \dots\dots\dots (63)$$

$$\phi = \omega t - k(r - R_v) - \theta \dots\dots\dots (64)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{2(kr+1)}{2\beta r+1} \dots\dots\dots (65)$$

② 鉄筋からの反射波に対して

$$L_m = \frac{R_f a_0}{4\pi\omega} \sqrt{\frac{R_s R_v}{r_d(r_d + R_s)} \left\{ \left(k + \frac{1}{r'}\right)^2 + \left(\beta + \frac{1}{r' + R_s}\right)^2 \right\}} \cdot e^{-\beta(r' - R_v)} \dots\dots\dots (66)$$

$$\phi = \omega t - k(r' - R_v) - \theta' \dots\dots\dots (67)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{k+1/r'}{\beta+1/(r'+R_s)} \dots\dots\dots (68)$$

③ せき板からの反射波に対して

①の各式の r を r' に置き換えた式

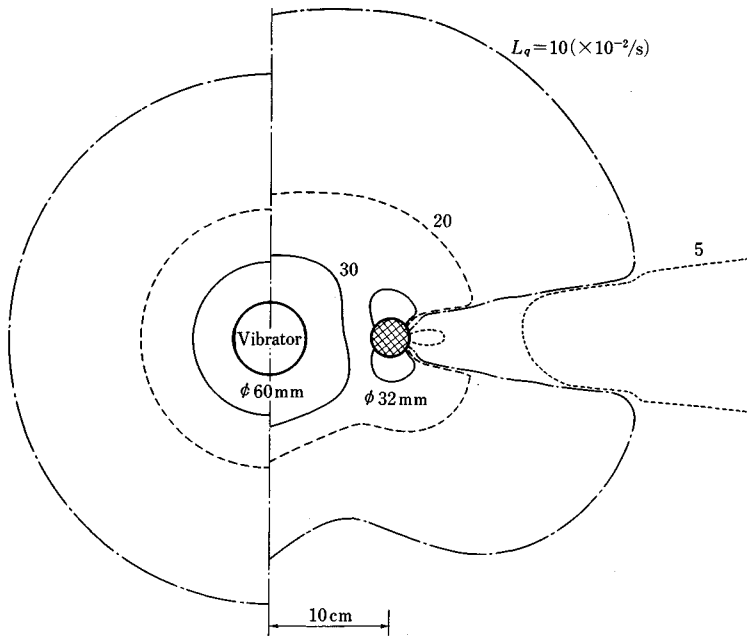


Fig. 21 Isometric lines of L_q value under the influence of a reinforcing steel bar (Non-AE concrete : $c=50$ m/s).

であり、 L_q は、 ϕ に含まれる t を $t=0 \sim T$ (T : 周期) の範囲で変化させて $|L| = \sqrt{(\sum L_x)^2 + (\sum L_y)^2}$ を計算し、その最大値として得られる。

(2) 振動機的作用領域の計算方法

鉄筋およびせき板の影響がない場合には、式 (34) の締め完了条件から振動時間 t に対して必要な液状化作用値 L_q を計算し、これを L_q と r との関係を表わす式 (11) に入れることによって振動時間 t で締め目が完了する領域を知ることができた。しかし、鉄筋などからの反射波の影響がある場合には、 L_q 値は振動機からの距離だけでは定まらず、きわめて複雑な分布状況となるので、あらかじめ式 (61) を用いて L_q 値の分布を詳細に求めておくか、あるいは所要の L_q 値に対する等値線を描くことによって締め目領域を得ることとなる。

(3) 等値線の計算例

Fig. 21 ~ Fig. 26 は Table 5 に示した 6 case に対して式 (61) を用いて L_q 値の等値線を描いたもので、Fig. 21, 22 の左半部には、比較のために反射の影響がない場合の等値線が示してある。なお、 $|L|$ の最大値の計算の際の t の刻みは $T/60$ とした。

これらの結果のうち、Fig. 21 ~ Fig. 23 は単独の鉄筋の影響を示すもので、鉄筋の後方に液状化作用の非常に小さい領域がすい星の尾のような形で生じること、鉄筋の側面に液状化作用の大きい領域が狭い範囲ではあるが生じること、などが共通して認められる。また、Fig. 21 は Non-AE コンクリートを想定して $c=50$ m/s とした場合の結果であるが、 c 以外の条件が全く同一である Fig. 22 と比較して鉄筋の影が強く現われている。なお、

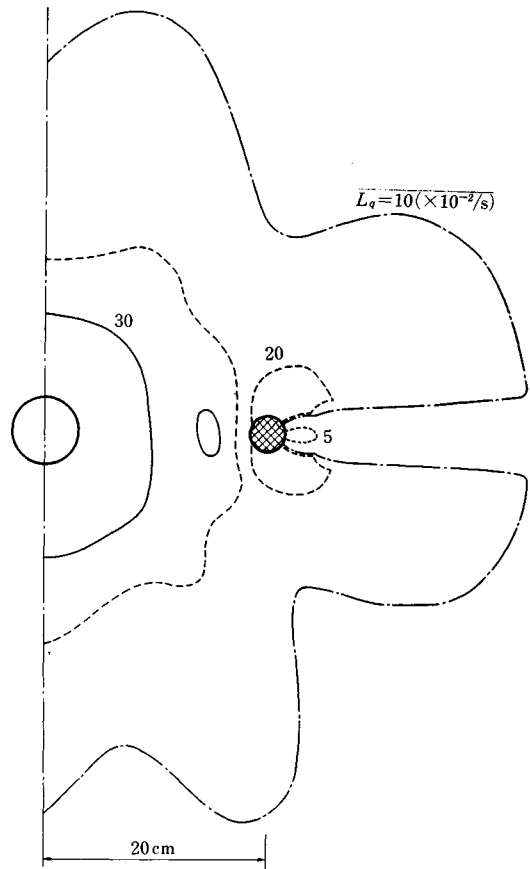


Fig. 23 Isometric lines of L_q value.

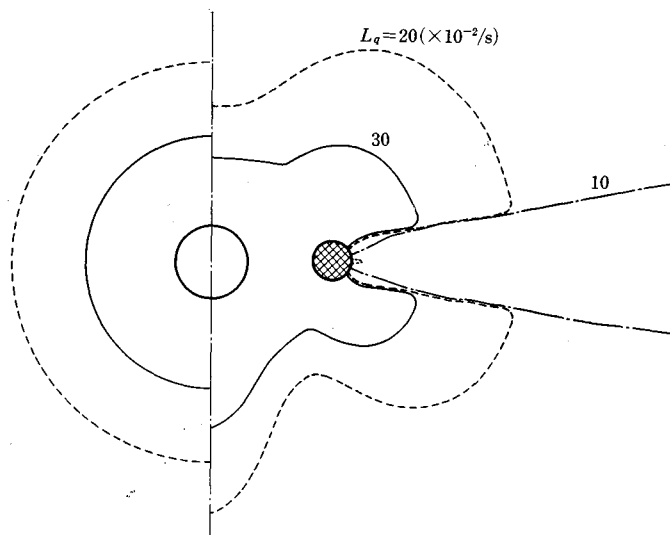


Fig. 22 Isometric lines of L_q value under the influence of a reinforcing steel bar (AE concrete : $c=30$ m/s).

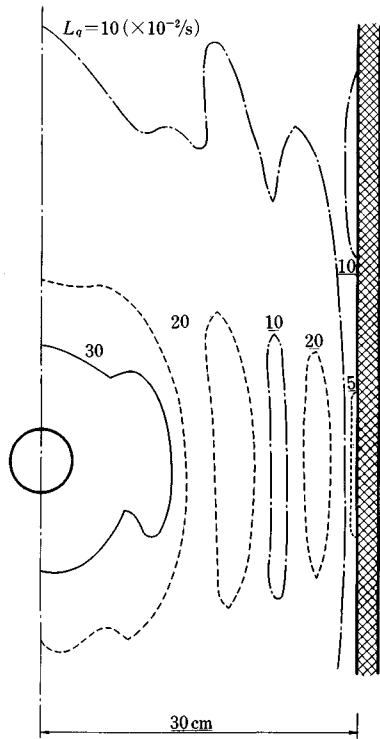


Fig. 24 Isometric lines of L_q value under the influence of a solid form plate (AE concrete).

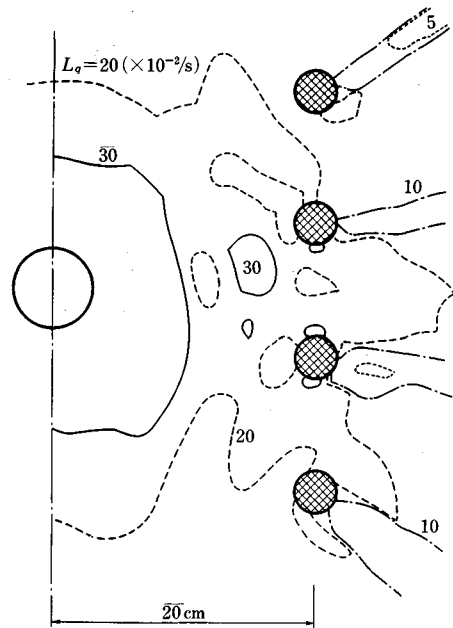


Fig. 25 Isometric lines of L_q value under the influence of reinforcing steel bars arranged in a line.

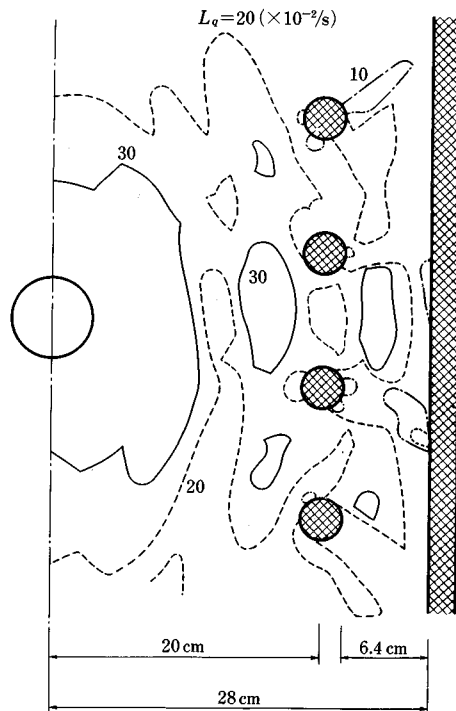


Fig. 26 Isometric lines of L_q value under the influence of reinforcing steel bars and a solid form plate.

Table 5 Assumed situations.

Fig.	Steel bars				Plate	Coeff. of reflection R_f	Vibrator			Propagation	
	Number	Diameter D_v (mm)	Position (cm)				ϕ (mm)	f (Hz)	a_0 (G)	c (m/s)	β (cm^{-1})
			x_s	y_s							
21	1	32	10	0	—	1	60	200	20	50	0.017
22			10		—						
23			20		—						
24	—	—	—	—	30						
25	4	32	20	$\pm 5, \pm 15$	—						
26					28						

反射の影響がない場合、 L_0 値の等値線は同心円になるが、反射がある場合には対称性がいくぶんくずれ、たとえば Fig. 21 と Fig. 22 では波速の違いにより等値線のずれ方が上下反対になっている。これは、振動機の偏心重錘が一方に回転していることに起因しているが、数値計算に際して反射点の位置、最大値の計算値などに誤差が入ることの影響もあると思われる。

Fig. 24 はせき板の影響を示すもので、振動機とせき板との間に L_0 値の大きい領域と小さい領域が交互に生じ、せき板表面で液状化作用は最も小さくなっている。

Fig. 25 および Fig. 26 は複数の鉛直方向鉄筋がある場合であって、振動機の作用は鉄筋の間隙を抜けて鉄筋位置より後方まで到達するが、鉄筋の影となる部分には液状化作用の小さい領域が残ることが示されている。

7. 結 論

内部振動機によるコンクリートの締固め問題を理論的に体系化することを目的として考察を行った。その結果を要約すれば以下のようなものである。

(1) 内部振動機によるコンクリートの締固めを、「振動の液状化作用を受けたコンクリートが液状化し、自重によって流動および沈下する現象」としてとらえることにより、締固め問題の定量的な取扱いが可能となった。すなわち、振動機によって生じた振動が波動となってコンクリートに伝播すると、コンクリート中には周期変化をするひずみが生じ、コンクリートに対して液状化作用を及ぼす。その際に、どの程度の液状化が起こるかは、振動の液状化作用の大きさと、それに対するコンクリートの応答特性によって定まる。そして、締固めの進行は、液状化の程度と液状化状態でのコンクリートの流動特性と層厚などによって定まる。これら3種類の特性は理論解析によって数式として求められ、それぞれ液状化作用値 L_q 、液状化抵抗値 L_0 、および基本振動時間 T_0 、と名づけた特性値で表わすことができる。

(2) 液状化作用値 L_q は波動の性質によって定まり、平面波の場合には振動の加速度に比例し、波動の伝播速度に反比例する。内部振動機から伝播する渦巻き状

の波面をもつ波動の場合にはせん断ひずみ成分の影響のため、振動機に近いほど平面波の場合に比較して液状化作用が大きいが、振動機から 20 cm 程度以上離れると平面波の場合に近くなる。

(3) 液状化作用を受けたときのコンクリートの液状化の程度は、セメントペーストの性質、特にセメント粒子の粒径分布によって定まり、全粒子のうちの液状化する粒子の比率をもって液状化率を定義することができる。一般に粒径の小さい粒子ほど液状化が起こりにくく、また、液状化作用値 L_q がある値以下では液状化は起こり得ない。これは、液状化作用値がひずみ速度の次元 (s^{-1}) をもつ量であることと、セメントペーストがある値以下のひずみ速度領域ではダイレイタンシー性状を示すことによる。この最小必要液状化作用値が液状化抵抗値 L_0 であって、液状化の起こりにくさを表わす。

一方、締固めの進行速度は液状化した状態でのコンクリートの流動あるいは沈下速度とコンクリートの層厚によって定まるものであり、この特性は、液状化率が 100% のときの締固め所要時間、すなわち基本振動時間 T_0 (s) で表わすことができる。したがって、基本振動時間は液状化したときのコンクリートの粘性が大きいほど大きく、締固めする1層の厚さが大きいほど大きい。また、水平鉄筋などの存在によっても大きくなる。

(4) 液状化抵抗値 L_0 と基本振動時間 T_0 をパラメータとして含んだ数式の形で、振動時間 t と締固めを完了するのに必要な液状化作用値 L_q との関係が得られた。したがって、 L_0 と T_0 が与えられた場合には、この式から振動時間 t で締固めるのに必要な L_q 値を計算し、振動特性と L_q 値との関係を表わす式にこの値を代入することによって締固めが完了する領域、すなわち、振動機の有効範囲を求めることができる。また、ある範囲を締め固めるのに必要な最小振動時間を計算することもできる。このようにして得られた振動時間と有効範囲との関係を表わす曲線は、実験で得られている曲線と同一の傾向を示した。

(5) 振動締固めに関するコンクリートの特性値として導入した液状化抵抗値 L_0 と基本振動時間 T_0 は、ス

ラブ試験体を用いた締固め実験を行うことによって測定することができる。測定方法は4.(4)において述べたとおりであるが、実測値を用いて前述の方法で求めた振動時間～有効範囲の関係は、実験結果をきわめてよく再現した。

(6) 鉄筋およびせき板が存在する場合の反射波の影響について解析し、複数の鉄筋とせき板からの反射を考慮した液状化作用値 L_q の計算方法を導いた。この方法によって L_q 値の分布状態を数例計算したが、その結果において、鉄筋の後方にはすい星の尾のような形状で液状化作用値の非常に小さい領域が生じること、鉄筋の側面に液状化作用値の大きい領域が生じる場合のあること、複数の鉛直方向鉄筋がある場合、振動機的作用は鉄筋の間隙を通して鉄筋の位置より後方まで到達するが、鉄筋の影となる部分には液状化作用の小さい領域が残ることなどが認められた。

(7) 本論文で導入した3種類の特性値はいずれもスラブ状試験体を用いた実験で得られる試験値から計算できるので、コンクリートの材料、配合、コンシステンシー、空気量、その他の条件と L_q および T_0 との関係について資料を集積すれば、振動締固め作業を最適化するための、いわゆる「施工設計」が可能になるものと考えられる。

8. あとがき

緒論でも述べたように、コンクリートの振動締固めについては数多くの実験結果が報告されているが、振動機の特長、コンクリートの材料、配合、性質、振動時間、試験体の状態、測定項目、などがそれぞれに異なっているため、個々の結果は貴重なものであっても、それらを相互に比較したり、総合したりすることによって、成果を有機的に生かすことが困難であった。これは、実験条件の多いこともその一因ではあるが、根本的には、実験を行ううえで準拠すべき理論的基盤が確立していないために、実験研究の多くが case study にならざるを得なかったことによるものである。本論文は、このような現状を考え、あえて理論解析を主体とした考察を行ったもので、今後は、この結果に基づいて、実験研究を続けていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Ledbetter, B. S. *et al.* : Mixing, Moving, and Mashing Concrete-75 Years of Progress, *Concrete International*, pp. 69~76, Nov. 1980.
- 2) Bergstrom, S. G. : Laboratory Tests on Vibration of Concrete, *Jour. of ACI*, Vol. 24, No. 10, pp. 893~908, June 1953.
- 3) Kolek, J. : The Internal Vibration of Concrete, *Civil*

- Engineering and Public Works Review*, Vol. 54, No. 640, pp. 1286~1289, Nov. 1959.
- 4) Forssblad, L. : Investigations of Internal Vibration of Concrete, *Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series*, No. 29, pp. 1~32, 1963.
- 5) 坂本・岩崎：かた練り人工軽量骨材コンクリートの振動締固めに関する研究, *コンクリートジャーナル*, Vol. 9, No. 4, pp. 1~11, Apr. 1971.
- 6) 山田・石井・落合・佐久田・坂本：コンクリート振動機の性能実験—棒状振動機による締固め有効範囲の検討—, *竹中技術研究報告*, No. 20, pp. 86~94, 1978. 10.
- 7) 川崎・越川・佐藤：内部振動機による締固め有効範囲の推定に関する研究, *フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集*, *日本コンクリート工学協会*, pp. 127~132, 1989. 4.
- 8) 国島正彦：密実なコンクリート構造物を実現する設計・施工方法に関する研究, *学位論文*, p. 27.
- 9) 岩崎・坂本：コンクリート中における内部振動機の振動の伝播特性, *土木学会論文集*, No. 402/V-10, pp. 87~96, 1989. 2.
- 10) Iwasaki, N. and Sakamoto, N. : Propagation Characteristics of Vibration in Fresh Concrete from Internal Vibrator, *JSCE Concrete Library International*, No. 14, pp. 163~175, March 1990.
- 11) 岩崎・坂本：内部振動機によるコンクリートの締固めに関する研究, *フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集*, *日本コンクリート工学協会*, pp. 121~126, 1989. 4.
- 12) 村田・川崎・関：振動締固めによるコンクリートの挙動, *フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集*, *土木学会*, pp. 107~112, 1986. 3.
- 13) 石川・青木：可変周波数バイブレータによるコンクリートの締固め, *建築の技術施工*, pp. 39~48, 1985. 3.
- 14) フレッシュコンクリートの挙動研究委員会, *振動締固めワーキンググループ：コンクリートの振動締固めに関する実験報告書*, *日本コンクリート工学協会*, 1990. 3.
- 15) 加賀谷・徳田・川上・佐々木・辻子：超硬練りコンクリートの締固め特性に及ぼすモルタル成分のコンシステンシーの影響, *フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集*, *日本コンクリート工学協会*, pp. 139~144, 1989. 4.
- 16) *土木学会コンクリート標準示方書(施工編)*, 昭和61年制定, p. 74.
- 17) 広田綱蔵：反応速度, *共立全書*, p. 149.
- 18) 西堀・山本・田野口：骨材の形成する空隙と流動性に関する研究, *セメント技術年報* 32, pp. 148~151, 1978.
- 19) Lea, F. M. : *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3rd Ed., *Chemical Publishing Co., Inc.*, p. 375, 1970.
- 20) Neville, A. M. : *Properties of Concrete*, *Pitman Publishing*, p. 19, 1973.
- 21) 玉井元治：セメントペーストおよびモルタルのレオロジー特性, 昭和61, 62, 63年度科学研究費(総合研究), *フレッシュコンクリートの挙動の解析と施工作業のシス*

- テム化への応用に関する研究，成果報告書，pp. 61~70，1988. 3.
- 22) 岩崎・坂本：コンクリート中における振動伝播に関する基礎研究，フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 113~118，1986. 3.
- 23) たとえば，ACI Committee 309 : Guide for Consolidation of Concrete, Jour. of ACI, Vol. 84, No. 5, pp. 410~449, Sept. ~Oct. 1987.

(1991. 1. 7・受付)
