

論文

[1219] RCCP の施工管理に対する締固め性試験の適用方法に関する検討

上野 敦^{*1}・大村隆一郎^{*2}・國府勝郎^{*3}

1. はじめに

これまで筆者らは、転圧コンクリート舗装（以下、RCCP）を対象とした締固め層内の振動応答挙動の検討を行ってきた[1]。また、表面振動機で締固めを行う際の締固め層内の実測応答加速度からコンクリートが受けている締固めエネルギーを計算すれば、別途行う締固め性試験によって得られる締固め曲線によって締固め層内の充填率が推定可能であることをすでに発表している[2]。一方、超硬練りコンクリートのコンシステンシー評価の方法として、締固めエネルギーと充填率の変化に着目した「締固め性試験」[3]を提案してきた。

本文は、超硬練りコンクリートのコンシステンシーの経時変化を考慮し、練混ぜ直後および60分経過後に締固め性試験を行い、締固め性の変化に応じて締固め層の表層部の充填率が所要の値となるように表面振動機の締固め時間を決定し、締固め性試験を転圧施工の品質管理に適用する方法について検討したものである。

表-1 骨材の物理試験結果

区分	産地・種類	比重		吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	粗粒率
		表乾	絶乾				
細骨材	上野原砕砂	2.58	2.52	2.25	1.767	70.0	3.06
粗骨材	八王子砕石	2.64	2.61	0.92	1.566	59.9	6.67

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントは比重3.16の市販の普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は粗粒率3.06の上野原産砕砂を使用し、粗骨材は八王子産砕石2005を使用した。骨材の物理試験結果を表-1に示す。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 G_{max} (mm)	Km	Kp	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	1.60	1.66	35	38.5	113	323	780	1274

2.2 配合および練混ぜ

実験に用いたコンクリートの配合は、モルタル粗骨材空隙比(Km)を1.6に、水セメント比を35%に一定とし、単位水量は113kg/m³とした。単位水量を比較的大きくしたのは、練混ぜ後60分間経過しても高い充填率が得られるよう配慮したためである。使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

練混ぜは、100 l強制練りミキサで1バッチの練り量を75 lとして、空練り1分の後注水し、その後2分間行った。

2.3 締固め性試験

締固め性試験[3]は、振動台上で試料を締固める際の締固めエネルギーEによる充填率の変化を式(1)に示す締固め関数で近似することによって、コンクリートの締固め性を評価するものである。具体的には、締固め関数から誘導される「初期充填率(Ci)」、「達成可能充填率(Cf)」、締固め

*1東京都立大学助手 工学部土木工学科 (正会員)
 *2東京都立大学 工学部土木工学科
 *3東京都立大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

の効率を示す「締固め係数(Ce)」および実用上完全な締固め状態に達するまでに必要なエネルギー「E98」の4指標によって締固め性を評価するものである。ゼロ空隙の示方配合の単位容積質量に基づいて、φ10×20cmの型枠に充填率100%に相当する量を投入し、振動開始からの充填率の変化をレーザ変位計で計測し、コンピュータによって自動処理するものである。なお、試験時の振動条件は、振動数75Hz、加速度5Gで3分間締固めを行った。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i) \{1 - \exp(-b E^d)\} \quad \text{---(1)}$$

ここに、 γ ：締固めエネルギーEにおける充填率(%)、E：締固めエネルギー(J/l)、 C_i ：試験開始時の初期充填率(%)、 C_f ：締固めエネルギー無限大における達成可能充填率(%)、b、d：実験係数

2.4 振動応答試験

(1) 型枠および加速度センサの埋設位置

振動応答試験の概要を図-1に示す。鋼製型枠は50×50×30cmであり、これをコンクリートスラブ上に石膏で固定し、練り上がったコンクリートを材料分離に注意しながら型枠に投入し、

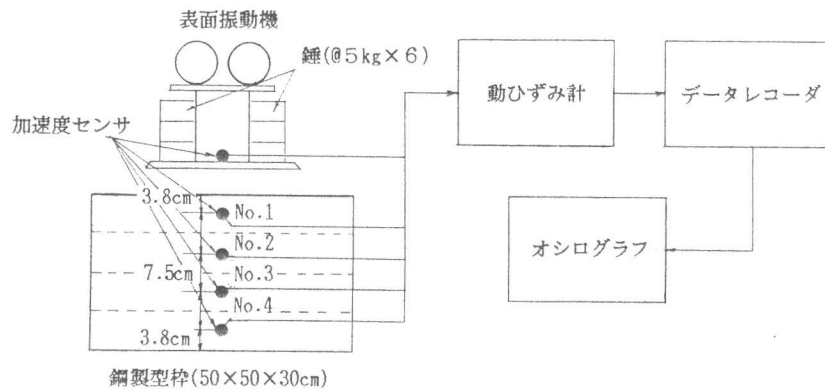


図-1 振動応答試験の概要

図示の4箇所位置に加速度センサを設置し、最終的には型枠上面まで試料を投入して層厚30cmに均した。加速度センサは型枠上面からゲージNo.1~No.4とした。なお、締固めの進行によって試料上面に浮き出たモルタルに振動機が埋まることを防ぐために試料表面に厚さ0.2mmのビニルを敷き、その上から締固めを行った。

(2) 表面振動機および振動条件

振動応答試験における締固めは、底板の直径30cmの試作の表面振動機を使用した。これは、質量を35~65kgの範囲で10kg毎に、また振動数を0~60Hzの範囲で0.1Hz毎に変化させることができる。振動機の試験条件は、表-3に示すとおり、振動機の質量を35および65kgの2種類として、

表-3 締固め性試験結果と締固め条件

練混ぜ後の時間	締固め性試験結果				表面振動機による締固め試験				
	C _i (%)	C _e	C _f (%)	E98(J/l)	質量(kg)	加速度(G)	振動数(Hz)	締固め時間(sec)	効率
直後	83.07	0.925	99.47	257.23	35	4.5	42.9	170	0.5
					65		58.5	180	0.75
60分	82.48	0.923	99.30	35	42.9		270	0.5	
				65	58.5		240	0.75	

それぞれの場合に表面振動機の加速度が宙吊りの状態で4.5Gになるように振動数を決定した。この結果、質量35kgのときは42.9Hzに、質量65kgのときは58.5Hzとなった。また、練混ぜ後の経過時間を0および60分として試験した。

単位体積のコンクリートが振動数 f で t 秒間の振動を受けるときの締固めエネルギーは、振動機が飛び跳ねる突固めの状態における効率 k を考慮すれば次のようになる[2]。

$$E = m \cdot \frac{(\alpha_{max})^2}{4\pi^2 f} \cdot k t \quad \text{--(2)}$$

ここに、 m : 試料の単位容積質量(kg/l)、 α_{max} : 最大加速度(m/s²)、 k : 振動伝達の効率、 f : 振動数(Hz)、 t : 振動時間(sec)

効率 k は予備実験の結果によって、質量 35 kg のとき約 0.5、質量 65 kg のとき約 0.75 と仮定した。そして表面振動機で締固めを行う直前に締固め性試験を行い、表層のコンクリートが受ける締固めエネルギーが E98 で示される値となるよう表面振動機の締固め時間を表-3 のように決定した。実験のフローを図-2 に示す。

2.5 コアの採取および充填率の測定

振動応答試験用供試体と同じ条件で別に締固めを行った充填率試験用供試体から、全厚にわたる直径 10 cm のコア 2 本を材齢 3 日で採取した。これを加速度センサの位置に対応した 4 層に切断し、供試体上面から層番号 1~4 として各層の質量を計測し、4 日間の水浸漬後の気中および水中重量の計測値から試料体積を求め、コンクリートの配合から計算されるゼロ空隙の単位容積質量に対する充填率を求めた。

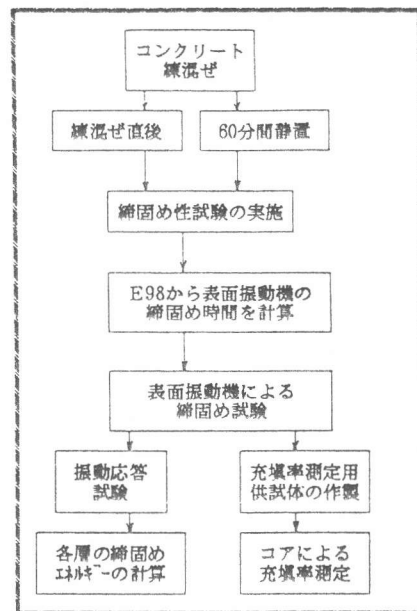


図-2 実験のフロー

3. 実験結果および考察

3.1 応答加速度の経時変化および締固め層内の減衰性状

振動機の質量を 35 kg として練混ぜ直後に試験した場合の締固め層内の応答加速度の経時変化の代表例を図-3 に示す。条件の異なる他の 3 ケースも図-3 と同様の結果が得られている。表面振動機は宙吊り状態で 4.5 G に設定したが、締固め中には約 2 倍の 8~10 G の加速度が測定された。また、締固め開始後約 40~70 秒間 (初期) の加速度は、振動機および

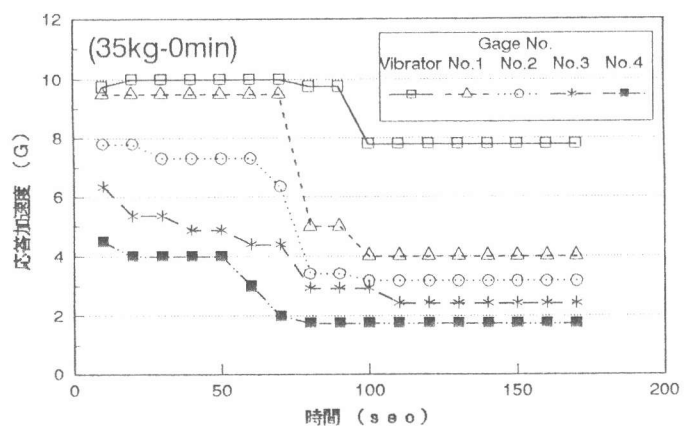


図-3 応答加速度の経時変化

および応答加速度ともに大きく、その後加速度が減少する傾向 (中期) を示し、最終的には安定した応答加速度を示す状態 (後期) が現れ、振動機の設定加速度に近似した応答加速度が No.1 ゲージに測定された。締固め開始直後の数秒間は締固め層の上面に顕著な沈下が観察され、試料の変

位が大きいので応答加速度が締固め進行後よりも大であると思われるが、表面振動機に設定した加速度よりも著しく大きくなることは説明できない。一般に応答加速度が安定状態に入る時間は、底部ほど早い傾向が認められる。応答加速度は、加速度センサの位置変化が大きいほど大に現れると考えられるので、空隙減少の割合が小さくなることによって応答加速度が安定するものと思われる。このように考えれば、底部に伝達される加速度は減衰しているため空隙減少の割合は小さく、空隙率が大きいにもかかわらず応答加速度が早く安定状態に入るものと思われる。そして、充填率は上層ほど大きい、下層の空隙の放出によって上層の位置変化が影響を受けるので、上層ほど安定状態になる時間は遅延するといえる。なお、文献[3]に示したように、この種の超硬練りコンクリートの締固めの限界加速度は約2.5Gであり、これ以下の加速度が伝達されても締固めは進行しないと考えられるのである。

締固め開始後30および170秒における応答加速度の深さ方向の分布を図-4および5に示す。応答加速度の大きな締固め初期および安定する後期のいずれにおいても、応答加速度は締固め層内でほぼ直線的に減衰しているものと思われる。締固め開始後30秒の分布に直線からの乱れが認められるが、これは局所的な空隙残存の影響と思われる。

図-5に示す締固め開始後170秒における応答加速度分布は、表面振動機の質量が大きいほど締固め層内の加速度が全体に大きいことを示している。この実験は表面振動機の質量が変化しても設定加速度は4.5Gの一定としたものであり、加速度の伝達に振動機の質量が影響することを示唆している。また、試料表面における加速度は振動機の加速度よりも著しく小さくなっている。このことは、締固め初期で両者が同等であることと異なる現象である。このような振動機から試料への加速度の伝達機構も明確にする必要がある。

3.2 硬化後の充填率

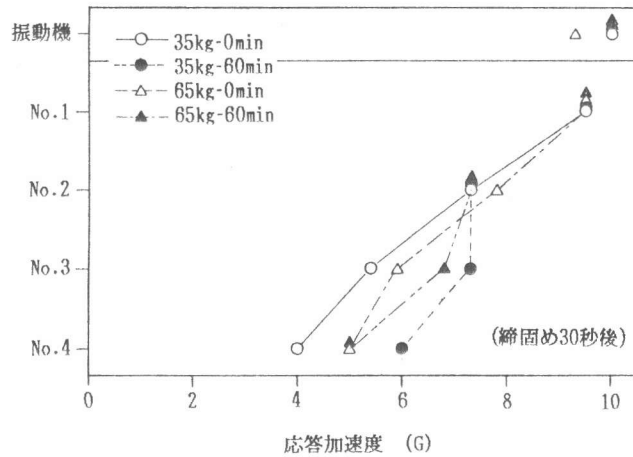


図-4 応答加速度の深さ分布

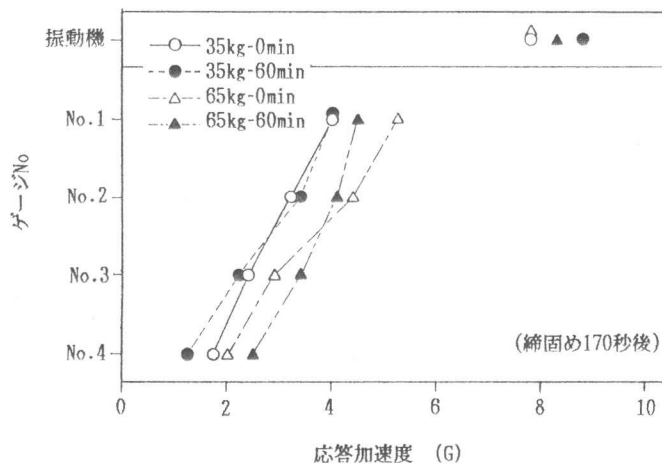


図-5 応答加速度の深さ分布

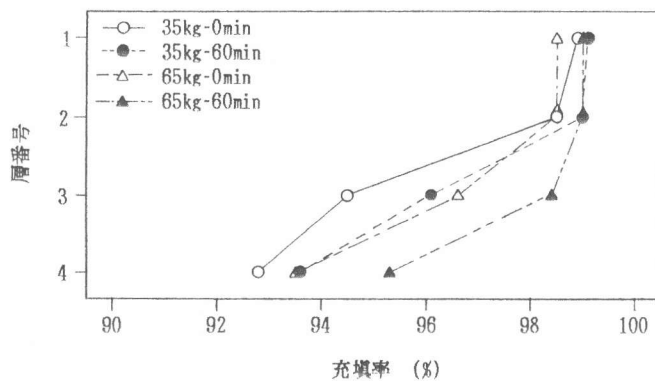


図-6 充填率の分布

コンクリート硬化後に測定した各試験体の充填率分布を図-6に示す。この結果は、いずれの条件でも意図したように1および2層目の充填率は98~99%で十分に締固められており、底部に近づくほど小さな充填率となっている。また、3および4層目の充填率は振動機の質量65kgの方が35kgの場合より大であり、このことは、締固め開始後170秒における応答加速度の分布性状に対応しているようである。

3.3 締固め曲線および締固めエネルギーと充填率の関係

練混ぜ直後および60分経過後の締固め曲線を図-7および8に、またコンシステンシーの指標を表-3に示す。試験を行ったときのコンクリート温度は約14℃で比較的低いこと、単位水量を大きめにしていることなどのために、60分後の締固め性の低下はそれほど大きくないが、E98と比較すると60分経過後には練混ぜ直後の約1.4倍となった。実際に行った締固め時間は、60分後が練混ぜ直後の1.4倍となっていないが、これは迅速に試験を実施するため最初に得られた締固め性試験結果だけを用いて締固め時間を決定した実験実施上の都合によるものである。

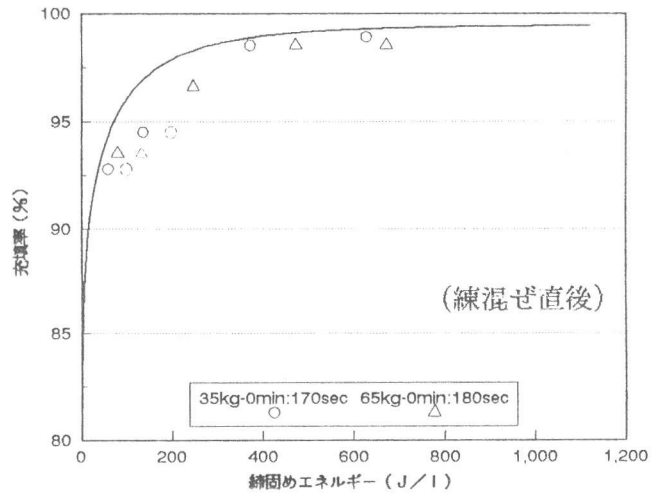


図-7 締固め曲線

応答加速度の減衰機構は未だわからないので、各層のコンクリートが受けた締固めエネルギーを実測応答加速度から計算した。すなわち、前述の締固め初期、中期、後期のそれぞれの応答加速度の経時変化を直線近似し、効率を応答加速度波形から定めて計算した。効率は締固め初期および中期で質量35kgのとき約0.5、質量65kgのとき約0.75、締固め後期ではいずれの質量でも1.0となり、締固め後期以外では仮定した値とほぼ一致した。なお、このような超硬練りコンクリートの締固めの限界加速度は2.5Gであるので[3]、これ以上の加速度を対象として締固めエネルギーを計算した。この結果得られた各層の締固めエネルギーと充填率とを締固め曲線上に打点して図-7および8に示す。

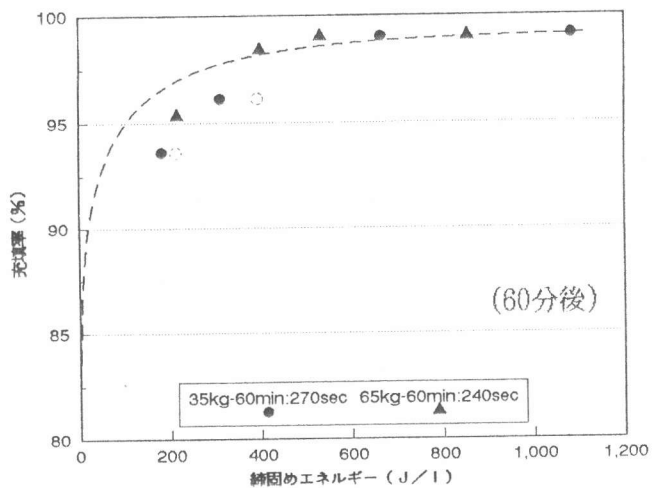


図-8 締固め曲線

表面振動機によって締固めた各位置のコンクリートの充填率は、締固めエネルギーの大きな範囲では締固め曲線に良好な近似を示している。締固めエネルギーの小さな部分で○および△で示したものは限界加速度を考慮しない値である。締固めの限界加速度を考慮することによって打点は曲線に近似する方向に動き、締固めの限界加速度を考慮するのが正しいことを示し

ている。なお文献[3]に示した限界加速度2.5Gは比較的球状の粒形をした陸砂を用いて得られた結果であり、本実験は砕砂を用いていることから限界加速度がもっと大きい可能性を考慮すれば、全ての層において良好に適合しているといえる。

これらの結果は、練混ぜ後の経過時間の影響によるコンクリートの締固め性の低下を締固め性試験によって把握すれば、締固め層の目標充填率を達成するための締固め時間を推定することができることを示しているのである。このためには、締固め層内の加速度伝達の減衰機構および表面振動機の設定加速度と締固め層上面の加速度との関係を解明する必要がある。

4. まとめ

締固め性試験を締固め層の品質管理に適用することを目的として、一定配合の超硬練りコンクリートを練混ぜ直後および60分経過後に締固め性試験を行い、締固め性の変化に応じて締固め層の表層部の充填率が所要の値となるように表面振動機の締固め時間を決定し締固め試験を行った。その際にコンクリートが受けている実測応答加速度から締固めエネルギーを計算し、それとコアによる充填率との関係について検討した。その結果次のようなことがわかった。

(1)締固め層内の応答加速度は、下層の空隙放出の割合が小さくなっていくと減少し、安定してくる。

(2)締固め層内の応答加速度の深さ方向の分布は、ほぼ直線分布とみなすことができる。そして、振動機の設定加速度を同じにしても、振動機の質量が大きい方が下層への加速度の伝達が良好である。

(3)締固め層内の充填率の分布は、応答加速度の分布の傾向と対応して下層ほど小さくなる。そして、締固め層内の実測応答加速度から計算した締固めエネルギーとコアの充填率との関係は、締固め性試験によって得られる締固め曲線に近似し、E98に基づいて締固め時間を決定すれば、充填率98%以上のほぼ完全な締固めが可能であることが示された。

(4)締固め層内の締固めエネルギーと充填率との関係の考察から、締固めに関する限界加速度の存在が推察された。今後、さらに締固めエネルギーの評価方法の検討を進めるとともに、応答加速度の締固め層内での減衰のメカニズムを明らかにすれば、締固め層内の充填率の推定が可能になると考えられる。

(5)配合条件や経時ともなうコンシステンシーの変化を締固め性試験のE98によって把握し、これに基づいて締固め作業の程度を定めれば、RCCPの施工を良好に管理できることが推察される。

謝辞

本研究は平成5年度文部省科学研究費補助金(一般研究(C)課題番号05650441)によって行ったものである。

参考文献

- 1)上野 敦・國府勝郎:表面振動機による超硬練りコンクリートの締固め性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集第14巻第1号、pp.433~438、1992.5
- 2)上野 敦・國府勝郎:表面振動機による締固めエネルギーとコンクリートの充填率に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集第15巻第1号、pp.1185~1188、1993.5
- 3)國府勝郎・近藤拓也・上野 敦:RCCP用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、No.46セメント・コンクリート論文集、pp.964~969、1992.12