

論文 ポーラスコンクリートの振動締固め方法に関する研究

岡田正美^{*1}・米澤敏男^{*2}・柳橋邦生^{*3}・安藤慎一郎^{*4}

要旨：ポーラスコンクリートの現場打設方法の合理化を図る目的で、締固め力を制御した振動締固めとランマーによる締固めについて実験を行った。同一空隙率において、振動締固めを行った場合とランマーによる締固めを行った場合とを比較すると、振動締固めを行った方が圧縮強度は大きくなった。また、所要の空隙率と圧縮強度を得るために必要な振動締固めエネルギーを把握する事ができた。

キーワード：ポーラスコンクリート、振動締固め、現場打設、空隙率、圧縮強度

1. はじめに

近年、河川護岸を中心として、自然とコンクリートとの共生を目的に植栽が可能なポーラスコンクリートを適用する機会が増加しつつある。筆者らの研究¹⁾では、ポーラスコンクリートの現場打設方法としてバックホウによる加圧を提案し、0.6m³級のバックホウにて5~10秒間加圧すれば必要な空隙率と強度が得られることが判明している。本報は、さらに締固め時間を短くし、施工効率を向上させることをねらいとして行った振動締固めエネルギーを制御した室内実験と油圧式振動コンパクターを用いた現場施工実験の結果をまとめたものである。

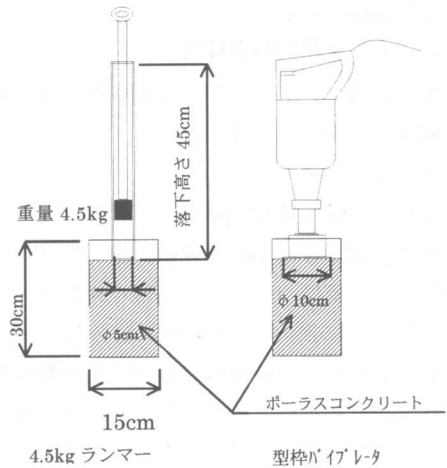


図-1 室内実験概要図

2. 室内実験

2.1 実験概要

通常、河川護岸にポーラスコンクリートを適用する場合、厚みは20~35cmで施工される事が多い。本実験では、図-1のように4.5kgランマーと型枠パイプレータを使用し、層厚15cmの2層、又は20cmの1層で締固め実験を行い、締固め条件が、空隙率と圧縮強度に及ぼす影響を調べた。

2.2 実験の因子と水準

実験の因子と水準を表-1にその組み合わせを、表-2に示す。ランマーは、地盤工学会基準 JSF T 711「突固めによる土の締固め試験方法」の4.5kgランマーを使用し、落下高さを45cmとし落下回数を変化させた。落下回数は、予備実験により定めた。型枠パイプレータは、内蔵する振動用ローターの仕様から1秒間当たりの締固め力を算出し、これを一定として、振動時

*1 (株)竹中土木 技術本部 技術研究所 生産研究開発部 材料グループ (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 材料グループ 主任研究員 Ph.D. (正会員)

*3 (株)竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 材料グループ (正会員)

*4 (株)竹中土木 技術本部 技術開発部 課長 (正会員)

間を変化させ実験を行った。表中の締固めエネルギーは、以下の式①、式②により定義した。

(1) 振動締固め

$$E_v = (F + G) / M \times N_L \times t \quad \text{式①}$$

ここで、Fは起振力(kgf)、Gは押付力+機械重量(kgf)、Mは振動面の面積(m²)、N_Lは締固め層数、tは振動時間(s)を示す。

(2) ランマー締固め

$$E_c = (W \times H \times N_B \times N_L) / V \quad \text{式②}$$

(地盤工学会基準式)

ここで、Wはランマー重量(kgf)、Hは落下高さ(m)、N_Bは1層あたりの落下回数、Vは供試体の体積(m³)を示す。

2.3 使用材料と配合

ポーラスコンクリートの使用材料を表-3に、その配合を表-4に示す。

2.4 実験方法

(1) 練り混ぜ方法

練り混ぜは容量 50ℓの強制2軸ミキサーを使用し、練り量は 40ℓとした。粗骨材とセメントをミキサーに投入し、15 秒間混合した後、引き続き水と混和剤を投入し2分間練り混ぜた。練り上がったポーラスコンクリートを5mmふるい上でパイプレータにてウェットスクリーニングを行い、セメントペーストを JIS R 5201 に準拠してフロー値を測定したところ、192 となった。空隙率は JIS A 1128 に準拠し、1層につき 25 回、3層にて詰めて注水し、注水前後の重量から求めた結果 25.7%であった。

(2) 試験体の締固め方法

図-1の要領で、φ15×30cmの型枠のポーラスコンクリートを締固めた。なお、ランマーは落下位置を適宜移動させながら使用した。同時に、突き棒による締固め(JIS A 1132)も行った。

表-1 因子と水準

因子	水準
締固め方法	パイプレータ (2~16秒) ランマー (9~30回) 従来 (3層25回突き)
層数	1, 2層
締固め厚	15, 20cm

表-2 因子と水準の組み合わせ

No.	締固め器具	締固め層数	1層厚	締固め時間	締固め回数	締固めエネルギー E _v (kgf/m ² s) E _c (kgf/m ²)
1	突き棒	3	10	-	25	-
2	ランマー	2	15	-	23	16917
3		2	15	-	16	11835
4		2	15	-	9	6753
5		1	20	-	30	16917
6		1	20	-	21	11835
7		1	20	-	12	6753
8	型枠パイプレータ	2	15	2	-	4355
9		2	15	5	-	10888
10		2	15	8	-	17420
11		2	15	16	-	34840
12		1	20	2	-	2178
13		1	20	5	-	5444
14		1	20	8	-	8710
15		1	20	16	-	17420

(3) 硬化コンクリートの試験

締固めたφ15×30cmの試験体を、材令1日で脱型し、20℃標準水中で養生を行い、以下の項目を試験した。

① ポーラスコンクリートの分離の有無

粗骨材とセメントペーストの分離の有無を調べるため、側面部の上下各10点のセメントペーストの膜厚をノギスにより測定した。

表-3 使用材料

種類	仕様
セメント	高炉B種セメント 粉末度 4120 比重 3.04
粗骨材	青梅産碎石 表乾比重 2.67 実積率 58.5%
混和剤	ポリカルボニ酸系高性能AE減水剤 比重 1.07

表-4 配合

骨材最大寸法 (mm)	骨材最小寸法 (mm)	P/G* (vol.%)	W/C (wt.%)	目標空隙率 (%)	目標フロー値	単位量(kg/m ³)			混和剤
						水	セメント	粗骨材	
20	13	31	25	26	175	77.2	309	1539	C×0.8%

*セメントペースト粗骨材容積比

② 空隙率

試験体の外寸及び水中重量と気中重量の差から空隙率を求めた。

③ 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠して試験を行った。試験体下面は予めセメントペーストを敷き、上面は、硫黄にてキャッピングを行った。

2.5 実験結果

(1) ポーラスコンクリート分離の有無

セメントペーストの膜厚測定結果を図-2に示す。ポーラスコンクリートの分離の有無は、上、下層のセメントペースト厚の差により判断できる。ペースト膜厚は 1~1.6mm 程度、標準偏差は 0.24~0.63 程度であった。また、各組み合わせにおいて、平均値の違いについて危険率 5%で検定したところ有意な差はなく、いずれの条件でも分離していないと考えられる。

(2) 締固め条件と空隙率及び圧縮強度の関係

① 型枠バイブレータによる締固めの場合

振動時間と空隙率、圧縮強度の関係を図-3に示す。振動時間が長くなる程、空隙率は低下し、圧縮強度は増加した。2層よりも1層締固めの方が、同じ振動時間でも空隙率、圧縮強度ともに大きかった。

② ランマーによる締固めの場合

ランマーの落下回数と空隙率、圧縮強度の関係を図-4に示す。落下回数が多くなるほど空隙率が低下し、圧縮強度は増加した。型枠バイブレータ使用時と同様に、2層よりも1層締固めの方が、同じ落下回数でも空隙率、圧縮強度とも大きくなった。

(3) 空隙率と圧縮強度の関係

各締固め方法での空隙率と圧縮強度の関係を、図-5に示す。同一空隙率でも締固め方法及び締固め層数により圧縮強度に大きな差が認められた。空隙率に対する圧縮強度の変化率は、どれも、ほぼ一定であった。同一の層数、層厚において、ランマーよりもバイブレータを使用したほうが圧縮強度は大きくなった。また、同じ

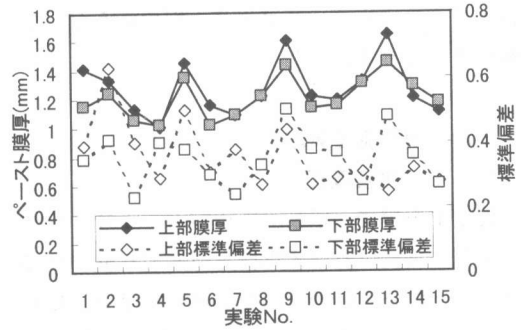


図-2 膜厚測定結果

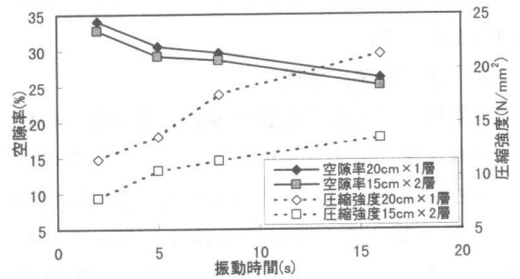


図-3 振動時間と空隙率、圧縮強度

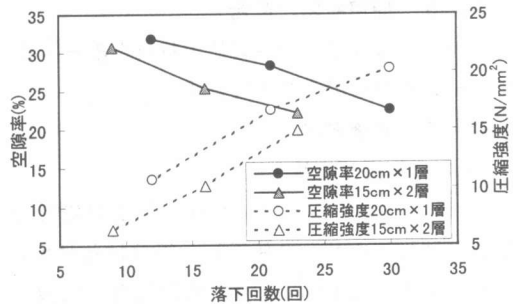


図-4 落下回数と空隙率、圧縮強度

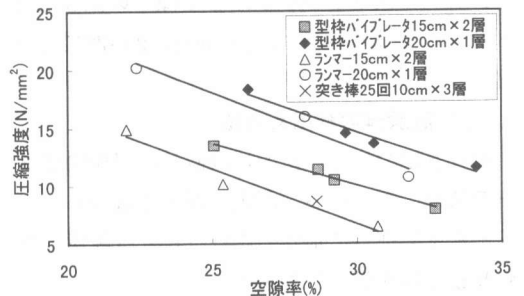


図-5 空隙率と圧縮強度の関係

締固め方法の場合、2層より1層のほうが、圧縮強度が大きくなった。

3. 現場施工実験

3.1 実験概要

実施工規模で、振動締固めがポーラスコンクリートの品質に及ぼす影響を把握する事を目的として、油圧式振動コンパクターを使用した実験を行った。実験は、45°の勾配の法面に、層厚 20,30cm のポーラスコンクリートを振動時間を変化させて打設し、空隙率と圧縮強度の関係性を調べた。

3.2 因子と水準

実験の因子と水準を表-8に、その組み合わせを表-9に示す。締固め方法は、バックホウによる加圧と、振動締固めとした。振動締固めは、図-6に示す油圧式振動コンパクターを0.25m³級のバックホウのアーム部分に取り付けて行った。表-7に油圧式振動コンパクターの仕様を示す。

3.3 使用材料と配合

ポーラスコンクリートの使用材料を表-10に、その配合を表-11に示す。

3.4 実験方法

(1) 練混ぜ方法

レディーミクストコンクリート工場にて2軸強制練りミキサーを使用し、粗骨材とセメントをミキサーに投入し、15秒間混合した後、水と混和剤を投入し90秒間練り混ぜた。コンクリート現場到着時に、2.と同じ方法で、セメントペーストフロー試験と空隙率の試験を行ったところ、それぞれ、145mm、23.6%であった。

(2) 試験体の締固め方法

バックホウにて、法面に設置した型枠内にポーラスコンクリートを所定の厚さで敷均し、因子と水準に従って締固めを行った。試験体の形状及び寸法を図-7に示す。

(3) 硬化コンクリートの試験

現場にて2週間散水養生を行った後、各試験

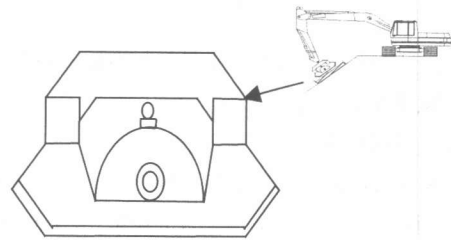


図-6 油圧式振動コンパクター

表-7 油圧式振動コンパクターの仕様及び締固め方法

起振力	F	1150kgf
加圧重量 (バックホウ+コンパクター) /3	G	2254kgf
ハースプレート寸法(cm)	M	100×91.5
面積(m ²)		0.915
締固め力	P	2976kgf/m ²

表-8 因子と水準

因子	水準
締固め方法	バックホウ加圧 (10秒) 振動 (2, 5秒)
締固め厚	20, 30cm

表-9 因子と水準の組み合わせ

No.	締固め方法	層厚	締固め時間	締固め強度 (kgf/m ² s)
1	バックホウ加圧 0.6m ³ 級バックホウ	20	10	—
2	振動 2976kg/m ²	20	2	5952
3			5	14880
4		30	2	5952
5			5	14880

表-10 使用材料

種類	仕様
セメント	高炉B種セメント 粉末度 4120 比重 3.06
粗骨材	青梅産碎石 表乾比重 2.66 実積率 58%
混和剤	ポリカルボ酸系高性能 AE 減水剤 比重 1.07

体の中央部から3本づつコアを採取した。採取したコアは4週材令まで20℃標準水中養生を行った。評価項目は、ポーラスコンクリートの分離の有無、空隙率、圧縮強度とし、それぞれ、2.に示した方法で行った。

3.5 実験結果

表-11 配合

骨材最大寸法 (mm)	骨材最小寸法 (mm)	P/G (vol.%)	W/C (wt.%)	目標空隙率 (%)	目標フロー値	単位量(kg/m ³)			混和剤
						水	セメント	粗骨材	
20	13	30	25	26	175	76.7	307	1570	C×0.8%

(1) ポーラスコンクリート分離の有無

セメントペーストの膜厚測定結果を図-8に示す。ペースト膜厚は0.5~0.9mm程度、標準偏差は0.13~0.21であった。また、各組み合わせにおいて、平均値の違いについて危険率5%で検定したところ有意な差はなく、分離していないと考えられる。膜厚の室内実験との差は、締固め方法の違いにより、粗骨材同士がより近づいたことによるものと考えられる。

(2) 振動締固め時間と空隙率、圧縮強度の関係

振動時間と空隙率、圧縮強度の関係を図-9に示す。振動時間が多くなる程、空隙率は低下し、圧縮強度は増加した。

(3) 空隙率と圧縮強度の関係

空隙率と圧縮強度の関係を、室内実験の型枠パイプレータ(1層20cm厚)の結果を加えて、図-10に示す。2.の実験結果と同様に、同一空隙率における圧縮強度は、締固め方法により差が認められた。バックホウによる締固めよりも振動締固めの方が、圧縮強度は大きくなった。空隙率に対する圧縮強度の変化率は、締固め方法によらず、ほぼ一定となった。同一空隙率では、油圧式振動コンパクターにより締固めた場合は、型枠パイプレータの場合より、圧縮強度は低くなっているが、これは、前者がコア供試体、後者がテストピースによる評価を行った事が原因と考えられる。打設したポーラスコンクリートの構造体強度は、コア採取時にマイクロクラック等の影響を受けたと考えられるコア強度と、振動を行ったテストピースの間の値と考えられる。油圧式振動コンパクターにおける振動締固めでは、層厚(20cm~30cm程度)が違う場合でも、空隙率と圧縮強度の関係は、ほぼ同一の相関があった。

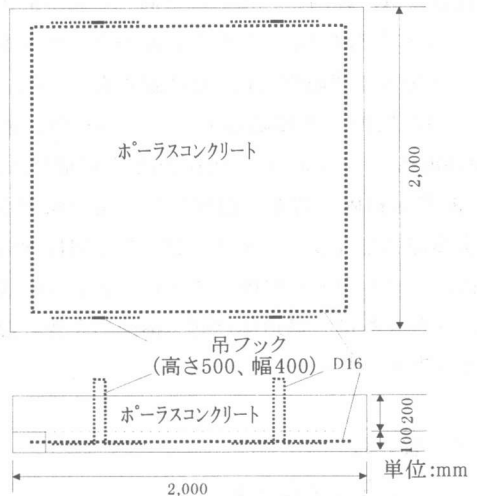


図-7 試験体概要図

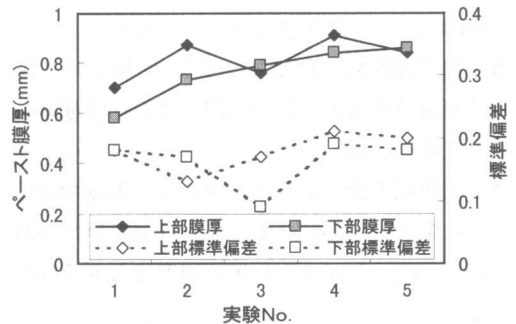


図-8 膜厚測定結果

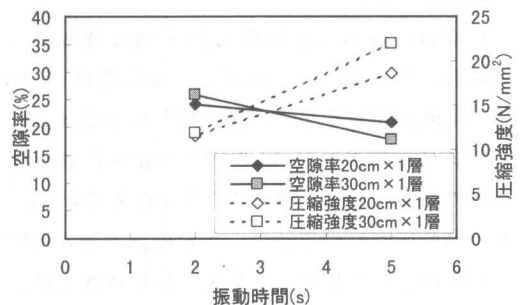


図-9 振動時間と空隙率、圧縮強度

(4) 締固めエネルギーと空隙率、圧縮強度の関係

締固めエネルギーと空隙率の関係を図-11に、1層締固めにおける圧縮強度との関係を図-12に示す。締固めエネルギーと空隙率及び圧縮強度は、締固め方法ごとに同一の相関曲線上にある。実験で用いた配合のポーラスコンクリートを目標空隙率 26%で締固めを行う場合に必要な振動による締固めエネルギーは、約 $10000 \text{ kgf/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、今回使用した機械では、2, 3 秒の締固め時間に相当する。振動締固めによる施工を行う際、テストピースに同程度の締固めエネルギー（型枠バイブレータで 10 秒間）を与えれば、構造体と同一締固め条件となる事が考えられる。

4. まとめ

以上の結果をまとめる。

- 1) ポーラスコンクリートを振動により締固めた場合は、ランマーで締固めた場合より同一空隙率での圧縮強度は大きくなった。
- 2) 同じ締固め方法であっても、2層より1層で締固めた方が、同一空隙率での圧縮強度は大きくなった。
- 3) 油圧式振動コンパクターによる振動で締固めた場合は、バックホウにより加圧した場合より、同一空隙率での圧縮強度は大きくなった。
- 4) ポーラスコンクリートの締固めエネルギーと空隙率及び圧縮強度は、締固め方法毎に相関性がある。
- 5) 植栽に適した空隙率 26%程度に締固める場合、バックホウ加圧では、加圧時間が 10 秒程度を要するが、今回使用した油圧式コンパクターでは、2~3 秒程度の振動締固めで十分であり、施工効率において有利である。
- 6) 振動締固めの場合は、実際の施工と同程度の締固めエネルギーを与えた供試体強度は、構造体強度とほぼ同等に扱う事が可能であると考えられる。

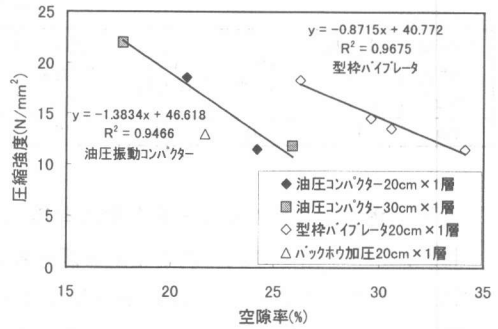


図-10 空隙率と圧縮強度の関係

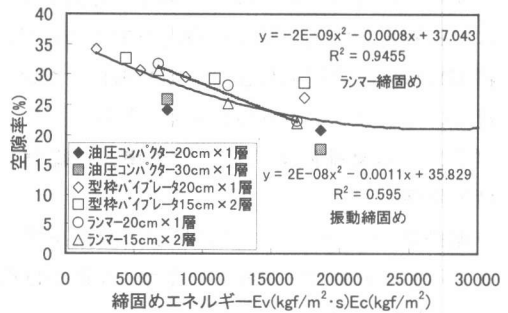


図-11 締固めエネルギーと空隙率

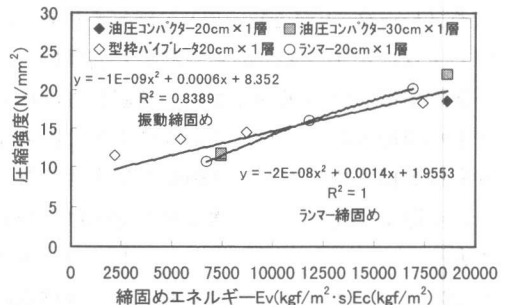


図-12 締固めエネルギーと圧縮強度

配合により、締固めエネルギーに対する空隙率と圧縮強度の関係は変化すると考えられるので今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 柳橋邦生ほか、ポーラスコンクリートの締固め方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.589-594,1998