

論文 ポーラスコンクリートの植物生育能力向上に関する研究

横関 康祐^{*1}・取違 剛^{*2}・高山 晴夫^{*3}・樋口 隆行^{*4}

要旨: コンクリートは非常に高アルカリであるため、周辺環境における植物の生育に影響を及ぼす場合がある。本稿では、セメント種類や養生方法がポーラスコンクリートの pH および植物生育に及ぼす影響を評価した。その結果、高炉セメントは植物生育能力が高いこと、コンクリートを炭酸化することで植物生育能力が向上すること、さらに、植物生育能力はコンクリートの pH と高い相関があることを確認した。また、窒素の含有量と pH には高い相関が得られ、ポーラスコンクリートの植物生育能力を向上させるためには、炭酸化によって pH を低下させ、植物の生育に必要な窒素の含有量を確保することが有効であることを示した。

キーワード: 炭酸化, γ -C₂S, CO₂, pH, 植物生育, 硝酸態窒素

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災では、東北地方や関東地方で多くの河川堤防や防潮堤が被災したことにより、これら構造物の耐震性確保の必要性が認識され、効果的な耐震の工法や設計法の開発が必要と考えられている¹⁾。一方、河川堤防やため池のような水辺の環境では、強度だけでなく周辺環境との調和も求められることから、補強材料としてポーラスコンクリートの適用が期待されている²⁾。ポーラスコンクリートは数 mm～数 cm の大きな空隙を有することから、この空隙への土壌の充填や、植物の根の定着が可能となるため、植栽基盤として利用できる。

ポーラスコンクリートは大きく 2 種類に分けられる。ひとつは「植生重視護岸タイプ」であり、もうひとつは「強度重視護岸タイプ」である³⁾。前者は植物の生育が良好となるように、骨材間の空隙率の範囲が 21～30% と設定されており、圧縮強度は 10N/mm² 程度である。後者は一般的なコンクリート構造物としての強度を満足できるように、設計基準強度が 18N/mm² 以上と設定されており、骨材間の空隙率の適用範囲は 18～21% と設定されている。すなわち、「強度重視護岸タイプ」のポーラスコンクリートは、強度を確保するために「植生重視護岸タイプ」に比べて空隙が少なく、植物の生育が困難となる。このように、一般にポーラスコンクリートの「強度」と「植物の生育」は両立が困難と考えられている。

著者らは、製造時に強制的に炭酸化養生を行ったコンクリートは硬化体組織が緻密化し、さらに pH が中性付近まで低下することを確認している⁴⁾。pH が中性に近づくことでコンクリートの植物生育能力は大幅に改善される可能性がある。そこで著者らは、「強度重視護岸タイプ

のポーラスコンクリートを炭酸化養生することで、一般的なコンクリート構造物としての強度を満足しつつ、「植生重視護岸タイプ」と同等以上に植物の生育が良好となる、新しいポーラスコンクリートが製造可能と考えた。本研究では、セメント種類や炭酸化養生がポーラスコンクリートの植物生育能力に及ぼす影響を評価することを目的として、各種セメントペーストを用いた植物の発芽に関する試験(植害試験)、ならびにポーラスコンクリートを用いた植物の生育試験を行った。

2. セメントペーストを用いた植害試験: 実験(1)

2.1 実験概要

炭酸化養生がセメント系材料の植物生育能力に与える影響を明らかにすることを目的として、セメントペーストを用いた植害試験を行った。植害試験は、「植物に対する害に関する栽培試験の方法(昭和59年4月18日付け59農蚕第1943号農林水産省農蚕園芸局長通知)」に準拠して行った。試験手順は以下に示すとおりである。

土壌(黒土もしくは砂)と硬化したセメントペーストの粉砕物を重量比で 70:30 となるように混合し、この混合土壌を内径 11.3cm、高さ 6.5cm の試験容器(ノイバウエルポット)に約 500ml 程度充填した。土壌およびセメントペーストはいずれも乾燥状態のものを使用し、混合土壌充填後に、最大容水量(土壌が重力に反して保持できる水の最大量)の 50～60% 程度の水を加えた。以上の手順を踏まえて作った混合土壌に、コマツナの種子を 20 粒、等間隔となるようにマス目状にピンセットで播種し、20～25℃の室内で一定期間保持した。なお、実験期間中は土壌の水分が一定となるように、定期的に散水を行った。実験期間中および実験終了後にコマツナの発芽状況

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修 (正会員)

*3 鹿島建設(株)技術研究所 地球環境・バイオグループ 上席研究員 博士(理学)

*4 電気化学工業(株) セメント特混研究部 無機基礎グループリーダー (正会員)

観察や土壌の化学分析を行った。サンプル数は n=2 とした。

2.2 使用材料と検討ケース

実験(1)における使用材料を表-1に示す。また、検討ケースを表-2に示す。対象とする土壌は黒土および砂とし、砂にはコンクリート用の細骨材を選定した。

セメントペーストは水結合材比を25%で一定とし、高性能減水剤を結合材×0.5%添加した。セメント種類が植物の生育に及ぼす影響を評価するために、普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉セメント B 種 (BB) に加えて、CO₂ 排出量削減の観点から⁵⁾ それぞれのセメントの半量を、炭酸ガスと反応して硬化する性質を有する γ -C₂S で置換したもの (OPC γ , BB γ) の4種類のセメントペーストを使用した。また、炭酸化が植物の生育に及ぼす影響を評価するために、セメントペーストは封緘養生と炭酸化養生の2種類の方法で養生した。

2.3 セメントペースト作製方法

セメントペーストは練混ぜ後 ϕ 5×10cm の円柱型枠に打ち込み、1日間、20℃環境下で封緘養生を行った後、そのまま封緘養生を継続するものと、炭酸化養生を行うものの2種類に分けた。封緘養生を行うセメントペーストについては、材齢28日まで20℃環境下で封緘養生後に脱型し、空気中のCO₂による炭酸化を防ぐために窒素ガスで満たしたグローブボックス内にて粒径が2mm以下になるまで粉砕した。炭酸化養生を行うセメントペーストについては、打ち込みから1日後に脱型して、炭酸化養生を行う前に粒径が2mm以下になるまで大気中で粉砕した。その後、材齢28日まで50℃、50%RH、CO₂濃度20%に調整された恒温恒湿室内にて養生を行った。

養生を終了したセメントペーストは0.3~1.2mmになるように粒度調整し、試験に供した。

2.4 試験項目および試験方法

(1) 植物生育量

コマツナの播種から3日、7日、14日後に発芽している本数を測定し、播種量である20粒に対する発芽率を評価した。また、播種から28日後に生育したコマツナの全量を刈り取り、90℃で48時間炉乾燥させ、乾燥重量を測定することで植物の生育量を得た。

(2) 混合土壌の化学分析

試験終了後の混合土壌を重量比で5倍の水に浸漬し、1日静置後に浸漬液のpHをガラス電極法で、電気伝導度(EC)を白金電極法で測定した。また、植物の生育にとって重要な元素である窒素に着目して、混合土壌中の窒素含有率を評価した。土壌中の窒素形態は、主にアンモニア態窒素と硝酸態窒素に分けられる。大半の植物は土壌中の硝酸態窒素を吸収して生育することから、硝酸態窒素含有量が植物の生育に大きく影響すると考えられる。

表-1 実験(1)における使用材料

種別	材料	記号	概要
土壌	黒土	—	市販の購入土
	砂	—	コンクリート用細骨材 密度 2.56 g/cm ³ 粗粒率 2.47
ペースト	セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm ³
		BB	高炉セメント B 種 密度 3.04g/cm ³
	混和材	γ	γ -C ₂ S 密度 2.85g/cm ³
	混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤

表-2 検討ケース

ケース名	土壌	セメント種類	養生方法
土-OPC-封	黒土	OPC	封緘
土-OPC-炭		OPC	炭酸化
土-OPC γ -炭		OPC γ ^{*1}	炭酸化
土-BB-封		BB	封緘
土-BB-炭		BB	炭酸化
土-BB γ -炭		BB γ ^{*2}	炭酸化
土のみ		—	—
砂-OPC-封	砂	OPC	封緘
砂-OPC-炭		OPC	炭酸化
砂-OPC γ -炭		OPC γ ^{*1}	炭酸化
砂-BB-封		BB	封緘
砂-BB-炭		BB	炭酸化
砂-BB γ -炭		BB γ ^{*2}	炭酸化
砂のみ		—	—

*1OPC: γ -C₂S=50:50 で混合

*2BB: γ -C₂S=50:50 で混合

そこで、土壌中のアンモニア態窒素と硝酸態窒素の含有量を測定した。

試験前の混合土壌(乾燥状態)を重量比で5倍の水に浸漬し、7日後に浸漬液を濾過し、濾過後の浸漬液におけるアンモニア態窒素含有量ならびに硝酸態窒素含有量を、反射式光度計(RQフレックス、(株)藤原製作所製)にて測定した。

2.5 実験結果

(1) 植物の発芽率

各検討ケースにおける播種から3日、7日、14日後のコマツナの発芽率を図-1に示す。土壌を黒土としたケースに着目すると、黒土のみのものは3日の時点で発芽率が100%となっているのに対し、封緘養生を行ったOPCを混合した土壌では、14日後においても発芽率が30%と低い結果となった。一方、同じ封緘養生でも、BBを混合した土壌では3日で90%以上の発芽率となった。セメントペーストから土壌へ溶出するイオンの成分や量が発芽率に大きく影響していると考えられる。炭酸化養生を行ったOPCを混合した土壌では、3日後における発芽率がほぼ100%となっており、炭酸化養生によってOPCの発芽率が大きく向上する結果となった。また、炭酸化養生を行ったセメントペーストにおいては、セメント種類によらず7日後には発芽率が約100%となり、炭

酸化養生を行った場合には、セメント種類によらず良好な発芽率が得られる可能性が示された。

土壌を砂としたケースに着目すると、封緘養生を行った OPC を混合した土壌についても比較的高い発芽率が得られた。セメントペーストを混合した土壌における植物の生育には、セメントペーストの性質だけでなく混合する土壌の性質も大きく影響することが明らかとなった。

(2) 植物の生育量

各検討ケースにおける、播種から 28 日後のコマツナの刈取り後の乾燥重量を図-2 に示す。コマツナの乾燥重量は黒土のみの場合がもっとも多く、セメントペーストの混合によってコマツナの生育が劣る結果となった。次に、セメントペーストを混合した土壌に着目すると、コマツナの刈取り後の乾燥重量はセメント種類、養生条件によって大きな差が見られ、写真-1 に示すとおり、封緘養生を行ったセメントペーストを混合した土壌に比べて、炭酸化養生を行ったセメントペーストを混合した土壌においてはコマツナが良好に生育する結果となった。炭酸化養生を行ったセメントペーストについてセメントの種類に着目すると、黒土および砂いずれの土壌の場合も、BB を炭酸化させたものがもっともコマツナの生育に対して良好であり、良好な順に BB>OPC γ >OPC>BB γ となった。特に土壌に砂を用いた場合においては、BB を混合したほうが砂のみの場合よりもコマツナの生育が良好となる結果であった。植物が比較的多量に必要とする元素は「多量必須元素」と言われ、肥料の 3 大要素である窒素(N)、りん(P)、カリウム(K)に加えて、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)、イオウ(S)がそれにあたる。Ca や Mg は植物の生育に必要である一方で、K に対する拮抗作用があり⁷⁾、Ca や Mg が過剰に土壌に含まれる場合には、植物への K の吸収が抑制され、植物の生育が阻害されることがある。BB は OPC に比べて Mg 量が多く、Ca 量が少ないため、このことが BB における植物の生育能力向上につながっている可能性がある。

(3) 混合土壌の化学分析

各検討ケースにおける、試験後の土壌の電気伝導度(EC)と 28 日後におけるコマツナ刈取り量(乾燥重量)の関係を図-3 に示す。土壌の EC は、すべての検討ケースにおいて 0.1~1.0dS/m の範囲であった。(社)日本造園学会では、植栽基盤条件としての品質を判定する際に表-3 が用いられる⁶⁾。これによると、EC が 0.1~1.0dS/m の範囲においては、EC が小さいほど植栽基盤としての品質は優れていると判断される。しかしながら、図-3

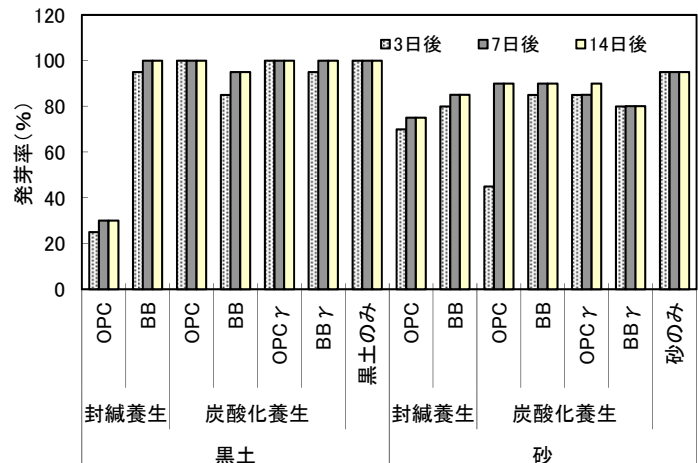


図-1 各検討ケースにおける発芽率の推移

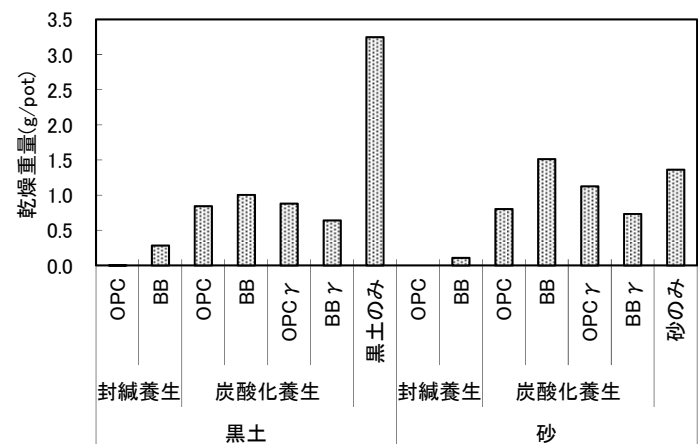


図-2 試験開始から 28 日後のコマツナ刈取り後の乾燥重量

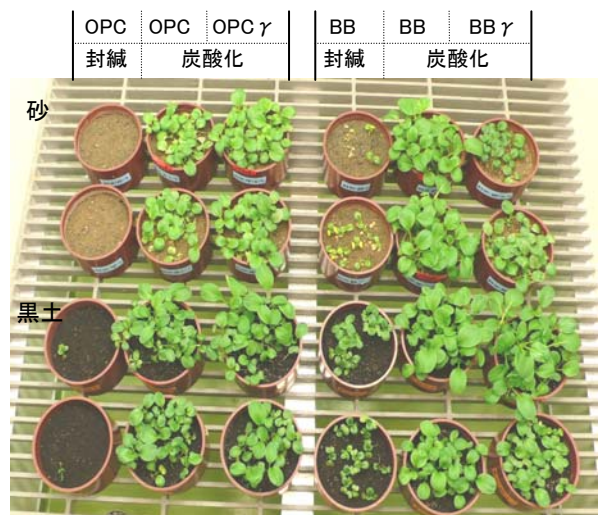


写真-1 28 日後のコマツナ生育状況

によると、両者に高い相関は見られない結果となった。

次に、各検討ケースにおける、試験後の土壌の pH と 28 日後におけるコマツナ刈取り量の関係を図-4 に示す。セメント種類によって元素含有量が異なり、これら元素の存在が植物の生育に影響している可能性が考えられたが、本検討 (pH が 5.5~11) の範囲では、対象土壌やセ

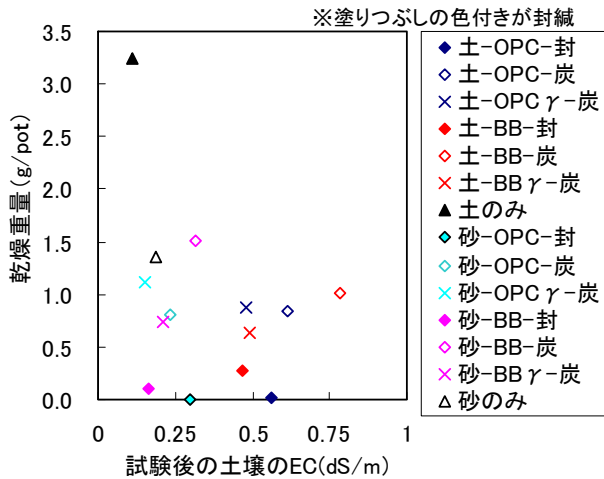


図-3 試験後土壌の EC とコマツナ刈取り後の乾燥重量

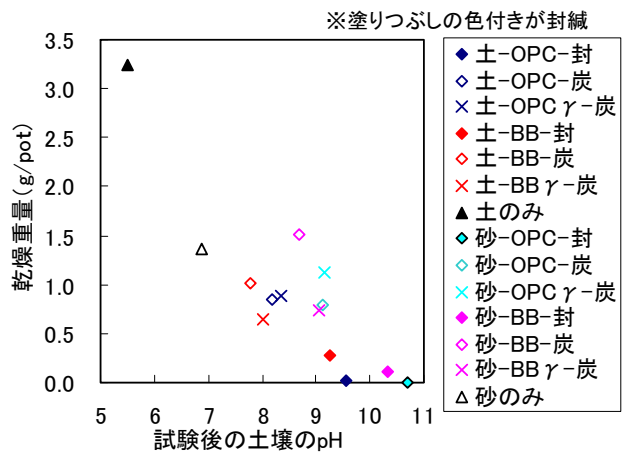


図-4 試験後の土壌の pH とコマツナ刈取り後の乾燥重量

表-3 植栽基盤条件としての判定基準⁶⁾

	優	良	不良	極不良
pH	5.6~6.8	4.5~5.6 6.8~8.0	3.5~4.5 8.0~9.5	3.5> 9.5>
EC (dS/m)	0.1~0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	1.0< 0.1>

メント種類、養生方法によらず、土壌の pH と植物の生育量には比較的高い相関が得られ、pH が低いほど植物の生育に有利であることが確認された。また、封緘養生と炭酸化養生で比較すると、セメント種類や土壌によらず、炭酸化することで pH が 1~2 程度低下する結果となった。

ここで、pH の低下による植物の生育能力向上のメカニズムについて考察を行った。黒土を用いた混合土壌を対象として、試験後の土壌の pH とアンモニア態窒素含有量との関係を図-5 に、硝酸態窒素含有量との関係を図-6 に示す。図-5 によると、封緘養生を行ったセメントペーストを混合した土壌は pH が高く、アンモニア態窒素含有量が小さい。一方、炭酸化養生を行ったセメントペーストを混合した土壌におけるアンモニア態窒素含有量は、黒土のみのものと同等となった。一般に、pH が 9~10.5 の領域ではアンモニア態窒素がアンモニアとして揮発しやすくなることが知られており^{7, 8)}、封緘養生のセメントペーストを混合した土壌ではアンモニア態窒素の一部がアンモニアとして揮発したと考えられる。一方、図-6 によると、試験後の土壌の pH と硝酸態窒素含有量には高い相関が得られており、pH が低いほど硝酸態窒素含有量が多くなる結果となった。アンモニア態窒素は微生物による「硝化作用」によって硝酸態窒素となることが知られており^{7, 8)}、また微生物の多くは高アルカリ環境下で生息することができない。すなわち、セメントペーストを炭酸化させて pH が低下することによって、①アンモニア態窒素のアンモニアガスとしての揮発防止と、

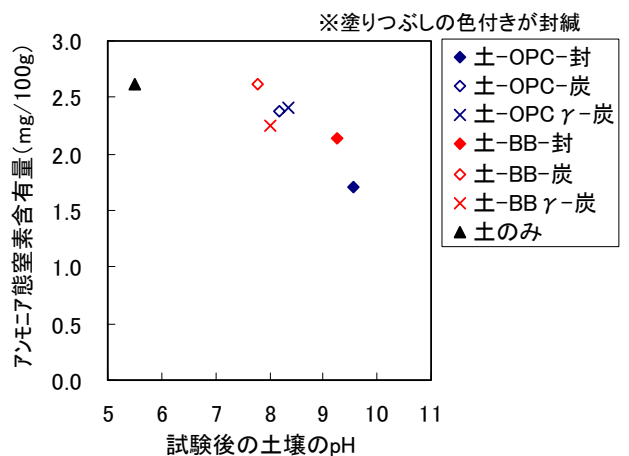


図-5 試験後の土壌の pH とアンモニア態窒素含有量

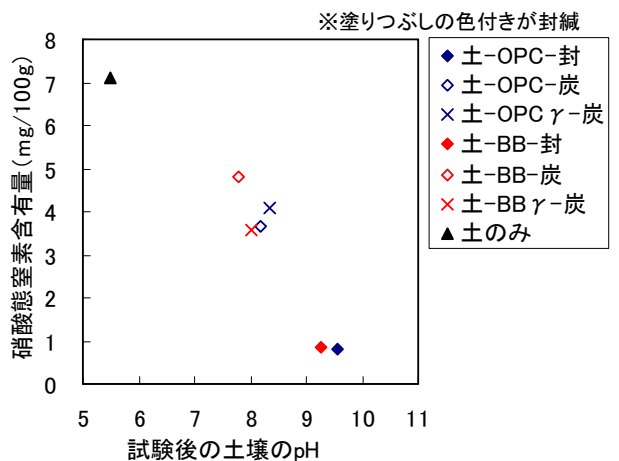


図-6 試験後の土壌の pH と硝酸態窒素含有量

②アンモニア態窒素から硝酸態窒素への硝化を阻害しないという 2 つの効果を得られる。これによって土壌中の硝酸態窒素量が確保されるために、植物の生育が良好になったと考えられる。なお、セメントには重金属等の微量元素が含まれており、これらが植物の生育に影響を及ぼす可能性も考えられるが、図-4 および図-6 より、植物の生育能力には pH および硝酸態窒素含有量が支配的

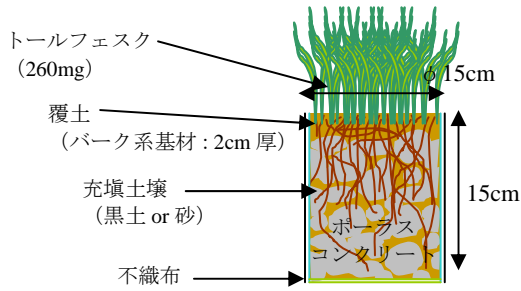


図-7 試験体概要

表-4 ポーラスコンクリートの使用材料

材料	記号	概要
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm ³
	BB	高炉セメントB種 密度 3.04g/cm ³
混和材	γ	γ-C ₂ S 密度 2.85g/cm ³
粗骨材	G	3号碎石 密度 2.64g/cm ³
		G _{max} =40mm, 実積率 60.4%
混和剤	SP	ポリカルボキシル酸系高性能減水剤
	V	無機系増粘剤

表-5 ポーラスコンクリートの配合

ケース	G _{max} (mm)	全空隙率 (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)							14日強度 N/mm ²
				W	OPC	BB	γ	G	SP	V	
OPC (θ 25 [*])-封緘	40	25	25	68	272	—	—	1,573	1.36	2.04	9.92
OPC γ (θ 18)-炭酸化	40	18	25	96	192	—	192	1,573	1.92	2.88	29.2
BB γ (θ 18)-炭酸化	40	18	25	97	—	193	193	1,573	0.97	2.91	18.4
BB (θ 18)-炭酸化	40	18	25	97	—	387	—	1,573	0.97	2.91	25.3

※たとえば、θ 25：全空隙率=25%

であると考えられ、本試験の範疇では微量元素が植物の生育に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3. ポーラスコンクリートを用いた植物生育試験：実験(2)

3.1 実験概要

炭酸化養生を行ったポーラスコンクリートでの植物の生育状況を確認することを目的に、以下の試験を行った。図-7に示すように、φ15cm×高さ15cmの円柱状に作製したポーラスコンクリートに、黒土もしくは砂を同量の水でスラリー化した土壌を充填し、化成肥料8-8-8（窒素、りん、カリウムの成分量がそれぞれ8%の肥料）を100g/m²添加したバーク系基材で2cm覆土し、トールフェスクの種子を260mg（発芽期待本数4600本/m²）撒き、6カ月間トールフェスクの生育状況を観察した。なお、乾燥防止のため週に2回、覆土の上から200mlのイオン交換水を灌水した。

3.2 使用材料およびコンクリート配合

ポーラスコンクリートの使用材料を表-4に、コンクリート配合を表-5に示す。本検討では、空隙率を大きくし、かつ粗骨材最大寸法40mmの骨材を用いて空隙自体の大きさを確保することによって、一般的なポーラスコンクリートに比べて植物の生育に非常に優れた、環境配慮型ポーラスコンクリート⁹⁾をリファレンスとして選定した。この環境配慮型ポーラスコンクリートは、前掲した「植生重視護岸タイプ」のポーラスコンクリートに該当し、材齢14日における圧縮強度は9.92N/mm²、最終強度も10N/mm²程度である。本検討では、粗骨材最大寸法は40mmで同一とし、全空隙率を18%まで低減するこ

と、さらにセメントやγ-C₂Sの炭酸化によってペースト部分の強度を高める^{10, 11)}ことによって、強度18N/mm²以上を達成できる3種類の「強度重視護岸タイプ」ポーラスコンクリートを検討対象とした。なお、いずれのポーラスコンクリートについても、セメントペーストのモルタルフロー（15打）が220±20mmとなるようにフレッシュ性状の調整を行った。

ポーラスコンクリートを練混ぜ後、型枠に打ち込み、炭酸化養生を行うものは翌日脱型して、50℃、50%RH、CO₂濃度20%の恒温恒湿室内にて材齢14日まで養生を行った。封緘養生のものは脱型せず、材齢14日まで20℃環境下で養生を行った。

3.3 試験項目および試験方法

4週に1回、覆土表面から4cmより上に生育したトールフェスクを刈り取り、90℃で48時間炉乾燥させ、乾燥重量を測定することで植物の生育量を得た。また、月1回程度灌水時に下面から浸出した水のpHをガラス電極法で測定した。生育量の測定は6カ月、pH測定は420日まで行った。

3.4 試験結果

(1) トールフェスクの生育評価

各検討ケースにおけるトールフェスクの累積刈取り量を図-8に示す。また、試験開始から6カ月経過時点におけるトールフェスクの生育状況を写真-2に示す。炭酸化養生を行った空隙率18%のポーラスコンクリートにおけるトールフェスクの生育は、使用したセメントの種類によらず、「植生重視護岸タイプ」に該当する封緘養生を行った空隙率25%のポーラスコンクリートと同

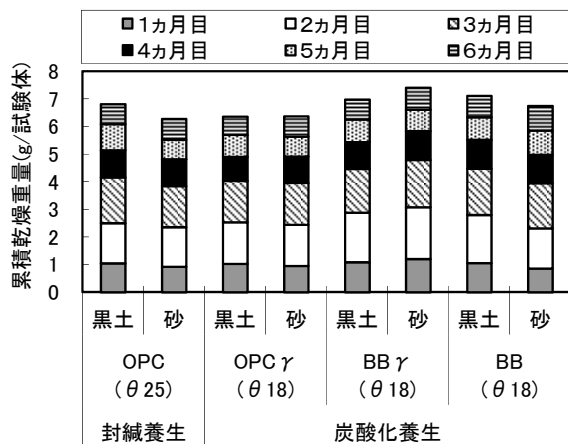


図-8 トールフェスクの累積刈取り量

等かそれ以上となる結果が得られた。空隙が小さくなることで植物の根の成長を阻害することが懸念されたが、本検討で用いたポーラスコンクリートは粗骨材最大寸法を40mmに設定していることから、空隙率が18%になっても空隙の大きさがある程度確保され、植物の根の成長を阻害しなかったものと考えられる。以上のことから、炭酸化養生を行ったポーラスコンクリートは、「強度重視護岸タイプ」に適用可能な強度を満足しつつ、「植生重視護岸タイプ」のポーラスコンクリートと同等以上の植物生育能力を有することを確認した。

(2) 浸出水の pH

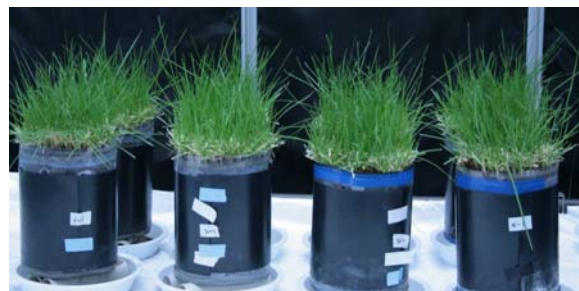
充填土壌に砂を用いたポーラスコンクリートから浸出した水の pH の経時変化を図-9 に示す。封緘養生を行ったポーラスコンクリートは、定期的に1年以上通水しても pH は9.1 と高い値であった。一方、炭酸化養生を行ったポーラスコンクリートの pH は通水初期から8.5 を下回っている。セメントペーストの植害試験結果を踏まえると、炭酸化による pH の低下がポーラスコンクリートの植物生育能力向上に大きく寄与したと考えられる。

4. まとめ

本検討では、セメント種類や養生方法がポーラスコンクリートの pH および植物の生育に及ぼす影響を評価した。その結果、ポーラスコンクリートを強制的に炭酸化させることで pH が低下し、これによって土壌中における硝酸態窒素量が確保され、ポーラスコンクリートの植物生育能力が著しく向上することを明らかにした。また、炭酸化養生を行うことで、一般的なコンクリート構造体に適用可能な強度 18N/mm^2 を確保しながら、植物の生育に優れたポーラスコンクリートが製造できることを明らかにした。

参考文献

- 1) (財) 国土技術研究センター河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤



OPC(θ 25) 封緘養生 OPC γ(θ 18) 炭酸化養生 BB(θ 18) 炭酸化養生 BB γ(θ 18) 炭酸化養生

写真-2 トールフェスクの生育状況：6 カ月目（黒土充填）

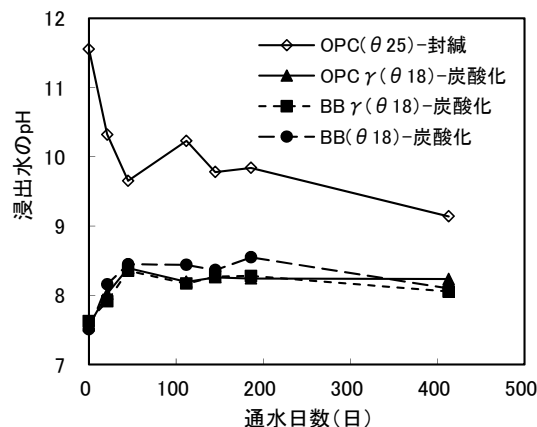


図-9 ポーラスコンクリート通水後の水の pH

防の耐震対策の進め方について（報告書），2011

- 2) (社) 日本コンクリート工学会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会 報告書，2003
- 3) 先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，2001
- 4) 取達剛，横関康祐，吉岡一郎，盛岡実：炭酸化養生を行ったコンクリートの CO_2 収支ならびに品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.3.4，No.1，pp.1450-1455，2012
- 5) 取達剛，横関康祐，盛岡実，山本賢司：コンクリート構造体への強制炭酸化技術の適用による CO_2 排出削減，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.39-42，2010
- 6) (社) 日本造園学会 緑化環境工学委員会：緑化事業における植栽基盤整備マニュアル，日本造園学会誌，Vol.63，pp.224-241，2000
- 7) 久場一剛：最新土壌学，朝倉書店，1997
- 8) 高橋英一：作物栄養学，朝倉書店，1980
- 9) 佐藤健治，若林貴子，高山晴夫：環境配慮型ポーラスコンクリートの開発，鹿島技術研究所年報，No.49，pp.169-174，2001
- 10) 島弘，原田直樹，河野清：ポーラスコンクリートの二酸化炭素ガス吸収による強度増加，第46回セメント技術大会講演集，pp.966-971，1992
- 11) 渡邊賢三，横関康祐，坂井悦郎，大門正機： $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ を用いたセメント系材料の炭酸化養生による高耐久化，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.735-741，2004