

論文 植栽型ポーラスコンクリートの耐根性評価試験

源田 早也佳*1・塚越 雅幸*2・石原 沙織*3・上田 隆雄*4

要旨: ポーラスコンクリートを植生基盤材料として適用する場合、植物の根が外力として作用することで、ポーラスコンクリートへのひび割れの発生や破壊が懸念される。そのため、植物の根の肥大力に対するポーラスコンクリートの抵抗性の評価が必要であるが、これまであまり検討されておらず、評価方法も確立されていない。そこで、本研究ではポーラスコンクリートの耐根性評価方法を提案し、ポーラスコンクリート破壊時の根の肥大力を測定した。さらに、根のシミュレーションによりポーラスコンクリートの破壊過程を推定することが可能であることが分かった。

キーワード: ポーラスコンクリート, 植生基盤, 根, 肥大力, 耐根性, 模擬根

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、主に粗骨材を使用することで、コンクリート内部に連続した空隙を能動的に形成させることを大きな特徴としている材料である。そのため、透水性・保水性・温熱性能等に優れた機能を有しており、植生基盤などの生物共生分野への適用が可能となった¹⁾²⁾。そこで、近年では、エココンクリートの一つとしてポーラスコンクリートが注目されており、都市景観の向上、環境負荷の軽減といった点から、屋上緑化や護岸整備の植生基盤材料としてポーラスコンクリートが用いられている。実際に、ポーラスコンクリートを護岸整備に使用した時の、植物の繁茂例を写真-1に示す。ポーラスコンクリートを植生基盤材料として使用すると、植物が育成されるのが分かる。

しかし、コンクリート系材料は引張強度に弱い材料であり、さらにポーラスコンクリートは、粗骨材同士をセメントにて接点に近い状態で結びつけたものである³⁾。そのため、ポーラスコンクリートを植生基盤材料として適用する場合、植物の根が外力として作用することで、ポーラスコンクリートへのひび割れの発生や破壊が懸念される。

ポーラスコンクリートを植生基盤材料として長期間安全に使用するためには、植物の根の肥大力に対する抵抗性の評価が必要である。しかしこれまで、この抵抗性についてはあまり検討されておらず、評価する適切な評価方法が確立していないのが現状である。そこで、本研究では、模擬根を使用した簡易的なポーラスコンクリートの耐根性評価方法を提案し、さらに、解析によってポーラスコンクリートの耐根性を推定することを目的とする。



写真-1 ポーラスコンクリートを護岸整備に使用した時の植物の繁茂例

表-1 ポーラスコンクリートの調査表

試験体 No	粒径 (mm)	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)				
			W	C	G	V*	
①	20~13	25	84.3	337	1550	0.4	
②			109	363			
③			85	282			
④			30	60	201		1800
⑤				64	212		
⑥				39	131		
⑦				15	50		
⑧	5~2.5	30	103	342	1450		

V*: 増粘剤

2.2. ポーラスコンクリートの耐根性試験

2.1 試験体の作製

試験体の調査を表-1に示す。骨材は、鳴門市大麻町板東産の5号砕石(粒径: 13~25 mm, 密度: 2.56 g/cm³, 吸水率: 2.16%)・6号砕石(粒径: 5~13 mm, 密度: 2.55g/cm³, 吸水率: 2.3%)を使用し、養生中セメントペーストと骨材が分離しないよう増粘剤を混入した。混練はセメントペーストを先に練り、その後粗骨材と混ぜ合

*1 徳島大学大学院 知的力学システム工学専攻建設創造システムコース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門助教 工博 (正会員)

*3 千葉工業大学 建築都市環境学科 助教 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

わせた。練りあげたコンクリートは Φ100×200 mm の円柱型枠に打ち込み、ハンマーで型枠側面を叩いて締め固めを行った。全ての試験体は打設から2日後に脱型をし、気中養生(20°C, 60%R.H.)を行った。

2.2 ポーラスコンクリートの性質

2.2.1 力学的性質

ポーラスコンクリートの力学的性能として、圧縮強度試験、引張強度試験の2つを行った。圧縮強度は、試験体の両面にキャッピングを行った上で、コンクリートの圧縮強度試験方法(JIS A 1106)、引張強度は、コンクリートの引張強度試験方法(JIS A 1113)に準拠して行った。

2.2.2 空隙率

全空隙率は、ポーラスコンクリートの空隙率測定方法(案)⁴⁾に準拠して行った。

材齢3か月における空隙率と圧縮強度、引張強度の関係を図-1に示す。また、各調合による空隙率、圧縮強度、引張強度を表-2に示す。

2.3 耐根性評価試験方法の提案

2.3.1 実植物による暴露試験

ポーラスコンクリート中で根がどのように生長していくかを調べるために、実植物による暴露試験を行った。試験は、ポーラスコンクリート円柱供試体 Φ100×200 mm の上面を培養土で覆い、その中央に、ホタルガヤを2か月間生育させた。この時の根の状態を写真-2に示す。写真で示すように、ポーラスコンクリートの空隙内で根が生育していることが分かるが、ポーラスコンクリートには、ひび割れ等の発生は認められず健全な状態であった。

2.3.2 模擬根による耐根性試験

実植物による暴露試験でポーラスコンクリートの耐根性を検討するには、植物の育成に多大な労力と時間を要する。そこで、耐根性を評価する試験として、実植物の物性と挙動を再現した模擬根による試験を提案する。

植物の中で根張りが強いとされる竹類の根は、直径が10 mm程度である。そのため、作製する模擬根は、10 mm程度の太さのチューブに油圧ポンプにより油圧をかけていき、植物の根の肥大生長を再現させる方法を用いることとした。

(1) 模擬根の作製

作製した模擬根を図-2に示す。これは、チューブと油圧ポンプをチューブ用継手によって接続し、油圧ポンプから加圧することでチューブが膨らむ仕組みとなっている。チューブの端部は、チューブの中にゴム栓を挿入した上から針金を巻き、エポキシ樹脂で接着することで完全に封をした。

模擬根に用いるチューブは、材質や肉厚により、チューブの内圧によって膨張するときに発生する力の特性が異なる。そこで、表-3に示す8種類のチューブの中から

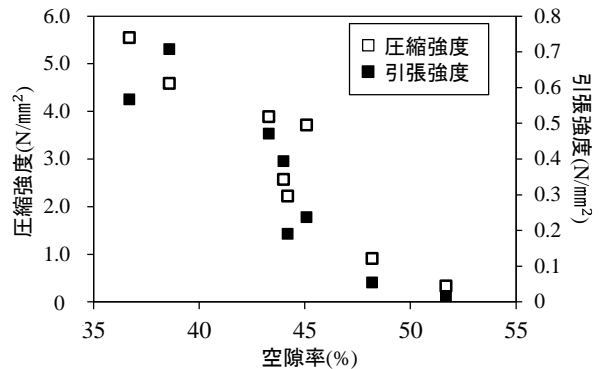


図-1 空隙率と圧縮強度、引張強度の関係

表-2 各調合の空隙率、圧縮強度、引張強度

番号	空隙率 (%)	圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
①	36.7	5.54	0.57
②	43.3	3.89	0.47
③	44.0	2.57	0.39
④	44.2	2.22	0.19
⑤	45.1	3.71	0.24
⑥	48.2	0.90	0.05
⑦	51.7	0.33	0.02
⑧	38.6	4.58	0.71



写真-2 ホタルガヤの根の育成状態

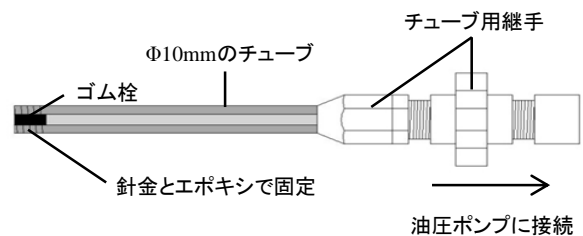


図-2 作製した模擬根

表-3 試験に用いたチューブ

材質	内径(mm)	外形(mm)
塩ビ系・高分子ポリマー	5	10
塩化ビニール	5	10
シリコン	5	10
軟質塩化ビニール	6	10.5
ウレタン	6.5	10
軟質ポリエチレン	7	10
ナイロン	8	10
テフロン	9	10

ら、模擬根に使用するチューブを選ぶために、チューブ内に圧力を作用させた時の模擬根の加圧力測定を行った。

(2) 模擬根の加圧力測定

模擬根に使用するチューブを選定するために、8種類のチューブで模擬根をそれぞれ作製し、また、真鍮製の角材の中央に、直径10mmの半円を削り出した治具を作製した。加圧力測定装置は、図-3に示すように、作製した模擬根を治具の間に挟み込み、ロードセルで治具の上下を挟んだ。この模擬根の加圧力測定装置を油圧ポンプに接続し、万能試験機に据え付けた。その後、油圧ポンプによってチューブ内に圧力を作用させ、その際の模擬根の内圧及び万能試験機で測定される荷重の測定を行った。尚、内圧は0.1 N/mm²ずつ上昇させ、模擬根が損傷するまで行った。

(3) 模擬根による耐根性試験に用いるチューブの選定

万能試験機で測定された荷重から8種類のチューブの肥大力を求め、図-4に各チューブにおける、チューブ内に作用させた圧力と模擬根の肥大力の関係を示す。軟質塩化ビニール、軟質ポリエチレン、ウレタン、テフロン、ナイロンのチューブは、チューブ内に圧力を作用させたが、チューブ自体はあまり膨らまなかったため、模擬根としては適していない。塩化ビニール、シリコン、塩ビ系・高分子ポリマーのチューブは、チューブ内に圧力を作用させるとチューブが膨張し、このとき発生する力は、この3種類のチューブでそれぞれ異なった。

ここで、既往の研究⁵⁾によるクマザサの根の肥大力測定結果を図-5に示す。模擬根による耐根性試験は、チューブを膨らませて植物の根が肥大生長する力を再現することが目的であることから、実際の植物の根の肥大力と同様の傾向が得られたもの、かつ、安全側での評価をする事を目的に、最大の肥大力を発生することができた、塩化ビニールのチューブを模擬根として使用することとした。

(4) 試験体の作製

模擬根試験用の試験体の形状と寸法を図-6に示す。模擬根による耐根性試験に用いる試験体は、模擬根をポーラスコンクリート内に設置するための空洞を作るために、打設時にあらかじめ鉄筋入りゴムチューブを埋設した。尚、試験体はΦ100×200mmの円柱とし、直径10mmのゴムチューブを用いた。この時、ゴムチューブの埋設位置はポーラスコンクリートの表面からの距離が10、25、45mmとし、埋設した鉄筋入りゴムチューブは脱型時に取り除いた。このポーラスコンクリートの表面から模擬根までの距離を、本論文において、それぞれかぶり10、25、45mmと示す。ポーラスコンクリートの調合と作製方法等については、2.1 試験体の作製と同様である。

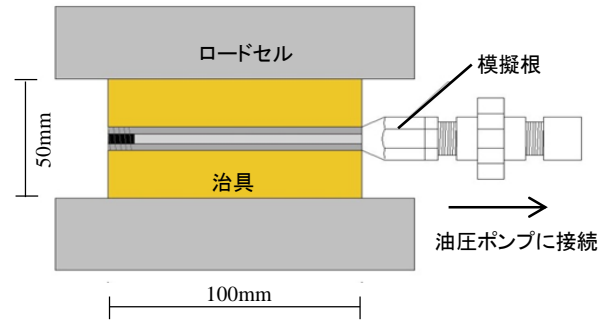


図3 模擬根の加圧力測定装置

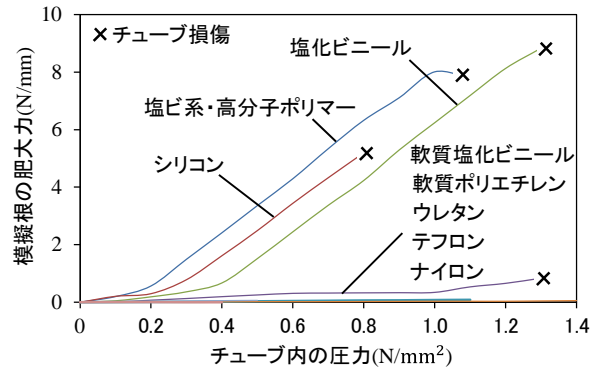


図-4 チューブ内の圧力と模擬根の肥大力の関係

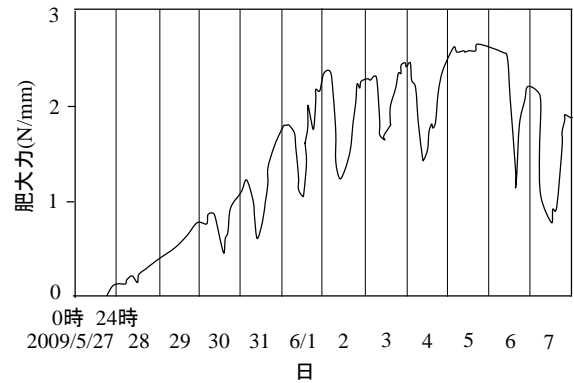


図-5 クマザサの根の肥大力測定結果

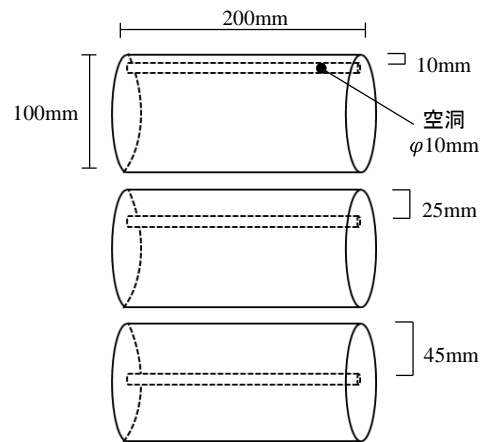


図-6 模擬根試験用の試験体形状・寸法

(5) 模擬根による耐根性試験の概要

試験の概要を図-7に示す。ポーラスコンクリートの空洞内に模擬根を挿入し、油圧ポンプと接続し、試験体

を固定した。その後、油圧ポンプによって 15 秒ごとに 0.05 N/mm² ずつ加圧した。この時、模擬根の膨張によって、ポーラスコンクリートの骨材が破壊するか、または、模擬根が破壊するまで試験を継続し、それまでの模擬根の肥大力と、レーザー変位計を用いて、模擬根直上部のポーラスコンクリートの表面の変位量も測定した。

(6) 模擬根による破壊試験結果

ポーラスコンクリートのかぶり 10 mm における試験後の状態の一例を写真-3 に示す。模擬根の肥大力によって模擬根直上部のポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊し、模擬根が露出しているのが確認できる。

図-8 に、ポーラスコンクリートの骨材間のペーストの破壊が生じるまでの模擬根直上部のポーラスコンクリート表面の変形量と模擬根の肥大力の関係を示す。かぶり 10 mm, 25 mm のものは、模擬根直上部のポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊したため、破壊する直前で、模擬根直上部のポーラスコンクリート表面に、大きな変形が見られた。しかし、かぶり 45 mm においては、模擬根直上部では破壊せず、ポーラスコンクリートの下側が破壊したため、模擬根直上部のポーラスコンクリートの表面部分はほとんど変形が生じなかった。

図-9 に、ポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊した時の模擬根の肥大力とポーラスコンクリートの引張強度の関係を示す。かぶり 10 mm の試験体に関しては、8 配合全てでポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊し、引張強度が低いほど小さい模擬根の肥大力でポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊する傾向を示した。しかし、かぶり 25 mm, 45 mm に関しては、本研究で用いた模擬根において生じさせる事の出来る最大の肥大力である 10 N/mm を超えてもポーラスコンクリートの骨材間のペーストが破壊しなかった配合もあった。かぶり 25 mm に関しては引張強度が 0.39 N/mm² 以上、かぶり 45 mm に関しては引張強度が 0.05 N/mm² 以上でポーラスコンクリートの骨材間のペーストは破壊しなかった。

既往の研究⁶⁾より、植物の中で根の肥大力が強いとされるクマザサの根の肥大力は約 2.7 N/mm であるとされている。図-9 より、今回の模擬根による試験では、クマザサの根の肥大力と比較すると、8 配合全てにおいて安全側にあった。

3. 根の肥大カシミュレーションによるポーラスコンクリートの耐根性評価

3.1 ポーラスコンクリートの引張軟化特性

ポーラスコンクリート中の根の肥大力によるポーラスコンクリートの破壊性状をシミュレーションするにあたり、ポーラスコンクリートの諸物性を求めるために、3 点曲げ試験を行った。

3 点曲げ試験用の試験体の寸法及び変位測定位置を図

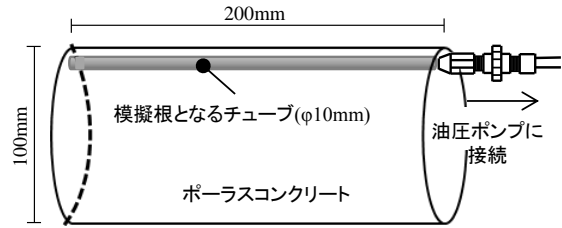


図-7 模擬根による耐根性試験



写真-3 ポーラスコンクリートの破壊状態

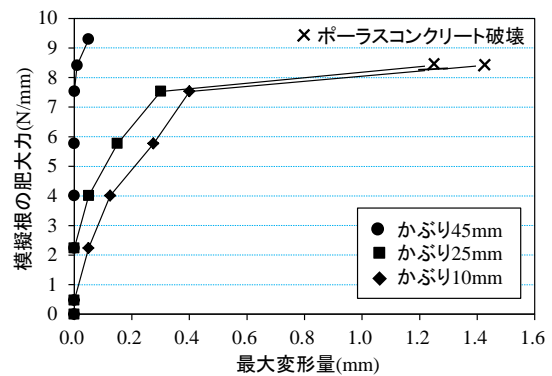


図-8 破壊するまでの模擬根の肥大力とポーラスコンクリート表面の変形量の関係

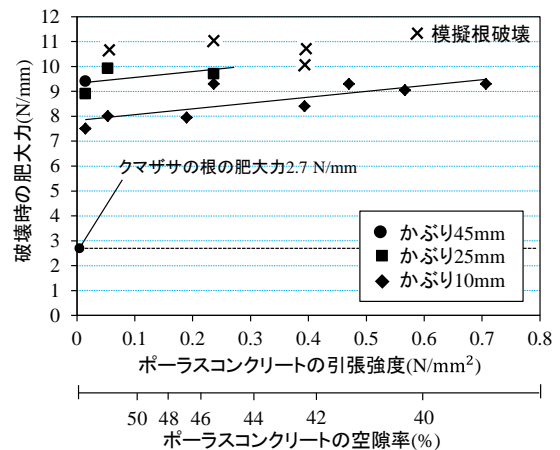
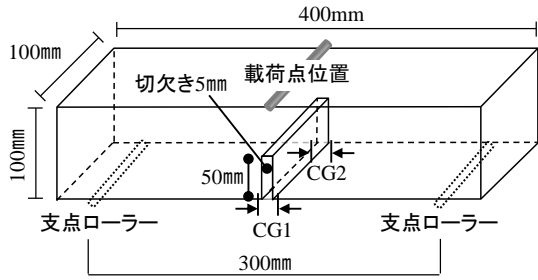


図-9 破壊時の模擬根の肥大力とポーラスコンクリートの引張強度、空隙率の関係

10 に示す⁷⁾。試験体は、100×100×400 mm の角柱試験体の中央に、高さ 50 mm、幅 5 mm の切欠きをいれたものを作製した。尚、試験体の作製方法等は 2.1 試験体作製と同様に行った。3 点曲げ試験において、支点間距離は 300 mm とし、試験体中央の位置で載荷した。また、



CG1, CG2: クラック開口変位を測定するクリップゲージの位置

図-10 3点曲げ試験体の寸法および変位測定位置

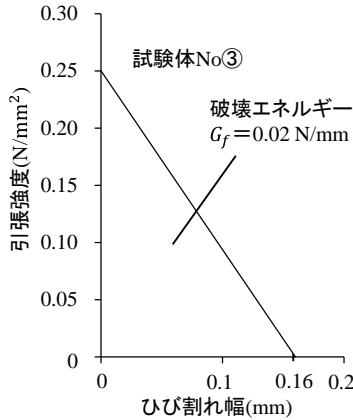


図-12 引張軟化特性

クラック開口変位は、クリップゲージを用いて図-10のCG1, CG2の2箇所を測定した。3点曲げ試験による試験体 No③における荷重-開口変位曲線を図-11に示し、この荷重-開口変位曲線から逆解析によって引張軟化特性を求めたリニア関数を図-12に示す⁷⁾。これらの結果から、シミュレーションに使用する数値データを表-4に示す。

3.2 モデル図

模擬根による耐根性試験と同様に、解析によってシミュレーションを行う根の太さをΦ10mmとし、かぶり10mmのモデル図を図-11に示す。これは、先の模擬根による耐根性試験における模擬根周りに垂直に切り出した断面となっている。ここでは、解析を簡便に行うために、根の周りをより詳細にメッシュ切りをし、模擬根の影響をあまり受けないと思われる、ポーラスコンクリート下部の部分を省略した半円形のモデルとしている。また、この下端を鉛直方向に支持し、水平方向は中央の接点のみ支持した。根を想定した空洞部分に一定間隔で変位を作用させ、根の肥大により発生した内部応力を再現した。本シミュレーションでは、模擬根による耐根性試験と同様に、ポーラスコンクリートが破壊するまで根となる部分に圧力をかけていった。

3.3 根の肥大力シミュレーションによる耐根性評価

図-14に、模擬根による耐根性試験結果と根の肥大力シミュレーション結果におけるポーラスコンクリート

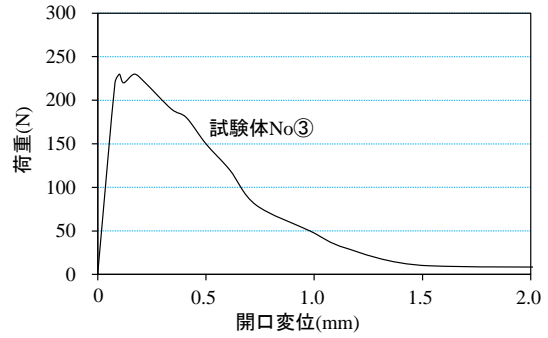


図-11 3点曲げ試験による荷重-開口変位

表-4 ポーラスコンクリートの諸物性

試験体 No	空隙率 (%)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	破壊エネルギー (N/mm)
①	36.7	0.57	1520	0.021
②	43.3	0.47	1500	0.02
③	44.0	0.39	1500	0.02
④	44.2	0.19	1400	0.019
⑤	45.1	0.24	1450	0.019
⑥	48.2	0.05	1300	0.016
⑦	51.7	0.02	1300	0.015
⑧	38.6	0.71	1500	0.023

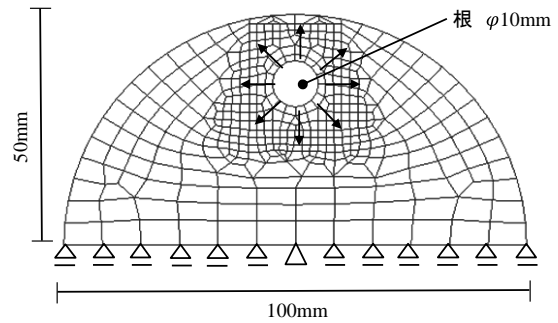


図-13 かぶり10mmにおける解析モデル図

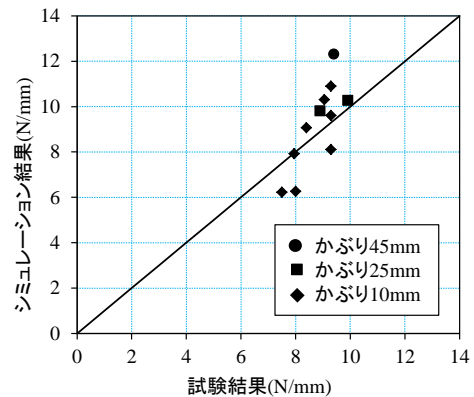


図-14 試験結果とシミュレーション結果におけるポーラスコンクリート破壊時の根の肥大力

破壊時の根の肥大力を示す。シミュレーション結果は、試験結果とほぼ同様の値となっており、模擬根による耐根性試験結果をよく再現していた。ここで、ポーラスコンクリートが破壊に至るまでの変形及びひび割れひずみ図を図-15に示す。ポーラスコンクリートが破壊するまでに、微細なひび割れが徐々に発生し、変形していくことが分かる。以上のことから、シミュレーションによ

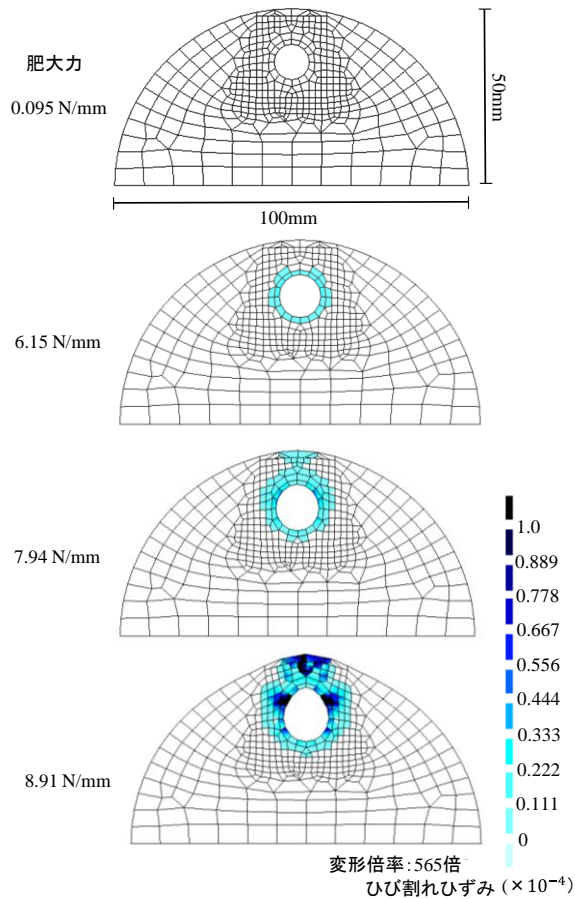


図-15 かぶり10mmにおける破壊するまでのポーラスコンクリートのひび割れひずみと変形図

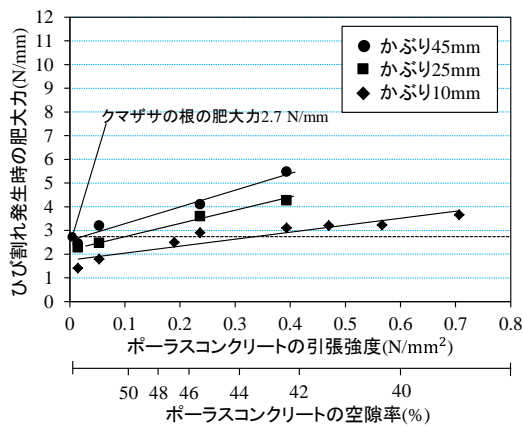


図-16 ひび割れ発生時の模擬根の肥大力とポーラスコンクリートの引張強度、空隙率の関係

ってポーラスコンクリート内部の破壊過程を詳しく見ることが可能であり、ひび割れが集中している部分でポーラスコンクリートの破壊が生じていることが確認出来た。

さらに、図-16に、シミュレーションにより、ポーラスコンクリート骨材間のペースト部分へのひび割れ発生が確認出来た時の根の肥大力と、ポーラスコンクリートの引張強度と空隙率との関係を示す。ひび割れ発生時の根の肥大力は、ポーラスコンクリート剥脱時の約 1/3 程度であり、かぶり 10 mm では、クマザサの根の肥大力 2.7 N/mm 前後であった。そのため、植物の根がより部材

の端部で生長すると、局所的なひび割れ発生が懸念される。また、植物の根は周期的な変化を繰り返しながら生長しているため、持続的に繰り返し応力が生じており、クマザサの根の肥大力より低い応力が繰り返し作用すると、本研究で使用した試験体が破壊する危険性があると考えられる。今後は、繰り返し応力等の検討も必要だと思われる。

4. 結論

- 1) 実際の根の観察をもとにして、植物の根の肥大生長を再現させた模擬根を開発した。
- 2) 作製した模擬根を用いてポーラスコンクリートの耐根性試験を行い、模擬根の耐根性評価試験への適用の有用性を示した。
- 3) ポーラスコンクリートの耐根性は、十分なかぶり厚さがあれば高く、実際の植物の根の肥大力と比較すると安全側にあることが分かった。
- 4) 根の肥大力シミュレーションにより、模擬根による試験結果は概ね再現可能であった。

謝辞

本研究の実験・解析において、東京工業大学准教授の篠原保二先生、千葉工業大学の篠塚浩之氏と中島功雄氏にご協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 No.594, pp17-23, 2005.8
- 2) 梶尾聡, 國府勝郎, 宇治公隆: 所要の空隙量を有するポーラスコンクリートの配合設計法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.64, No.1, pp16-28, 2008.1
- 3) 玉井元治: ポーラスコンクリートは環境を「保全」するだけでなく「創造」する, ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本, セメントジャーナル社, p5, 2001.9
- 4) 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: コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.1, 2003.5
- 5) 石原沙織, 田中享二: 地下茎の肥大生長を対象とした耐根性評価手法の検討, 日本建築学会関東支部研究報告書, 2010.3
- 6) 石原沙織, 田中享二: 草本類植物根としてのクマザサの根の肥大量及び肥大力の測定, 日本建築学会関東支部研究報告書, 2008.3
- 7) 篠原保二, 安部武雄, 古村福次郎: ノッチ深さ, 載荷速度, 骨材寸法, 水セメント比, 載荷法, 養生および材齢がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, 1992.1