

ジオポリマー法による環境負荷低減PCまくらぎの開発

材料技術研究部 コンクリート材料研究室

主任研究員 上原 元樹

1.はじめに

近年、地球規模で温暖化が急速に進行しており、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減は各産業における重要なテーマとなっている。特に、セメント生産時に排出されるCO₂量は、1トンのポルトランドセメントを生産する際に、およそ840kgのCO₂を大気中に放出することから膨大な量となる。このセメントの生産による日本でのCO₂の排出量は、全ての産業による排出量の約4%にも及んでいる(2008年度、セメント協会調べ)。そこで、近年、CO₂の発生を抑制する新材料としてジオポリマー法による硬化体が注目されるようになった。これはフランスの応用化学者ダビドビッツがメタカオリンをアルカリ性溶液と混合して重合させることにより、硬化体を製作できることを見だし、この無機珪酸ポリマーによる硬化体をジオポリマー、これによる硬化体の製作法をジオポリマー法と名づけたことから始まる²⁾。一方、産業廃棄物の有効利用の観点から、メタカオリンと同様に酸化ケイ素(SiO₂)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)成分を多く含み非晶質であることから、大きな反応性を有する石炭灰を使用したジオポリマー硬化体の研究も行われている。しかし、ジオポリマー硬化体の製作事例の多くが、セラミック材料の代替を対象にしており、土木材料に使用できるようなモルタル・コンクリートの製作例は少なかった。また、石炭灰の性質は、その産出国により大きく異なり、特に日本で一般的に入手できる石炭灰でのモルタル・コンクリート製作例が無く、有効な配合条件などが明確になっていなかった。そこで、筆者らは、普通ポルトランドセメントを用いずに石炭灰を原料としたジオポリマーコンクリートの製作を試み、その配合と圧縮強度の関係を明確にし³⁾、1m³あたり270kgものCO₂を削減できることを示した(図1)⁴⁾。

本研究では、参考文献³⁾で得られた配合条件を元に、ジオポリマーコンクリートの鉄道部材への適用を検討し、ポストテンションジオポリマーPCまくらぎを試作した。以下に、その性能確認試験を行った結果と課題を報告する。

2.ジオポリマーPCまくらぎの試作および試験

2.1まくらぎの試作

ジオポリマー法により、JIS E 1202(ポストテンション式PCまくらぎ)に規定されている3号まくらぎと同一形状のまくらぎを試作した。配合は表1に示す通りである。試作例1は、養生温度80℃で製作した事例である。試作例2は日本のまくらぎ工場における一般的なまくらぎ製作温度である60℃で製作した事例で、低温・短時間で所定の強度を得るために、80℃の事例と比較して添加する高炉スラグ量を増やし、かつ



図1 1m³あたりのCO₂排出量の比較
鉄道総研の研究者が描く2030年の鉄道、p162, 交通新聞社から抜粋

添加アルカリ量を多くしてある。

表1 まくらぎの製作配合 (kg/m³)

	FA	BS	KOH	SiO ₂	水	細骨材	粗骨材	養生温度	養生時間
試作例1	456	24	140	47	109	659	850	80℃	8h
			水ガラス 296						
試作例2	355	118	170	57	90	850	850	60℃	8h+14h*
			水ガラス 317						

FA:フライアッシュ, BS:高炉スラグ微粉末, SiO₂:シリカ微粉末

*:8時間養生後に所定の強度が得られなかったため再養生を行った

表1に示した材料を図2の製作手順に従い、ミキサーで混合攪拌した後、JIS3号まくらぎ用鋼製型枠に充填し、60～80℃、8時間（昇温：15℃/h、冷却：放冷、試作例2は追加養生14時間）養生した。プレストレスは、同時に製作した供試体の圧縮強度が、39.2MPa以上になっていることを確認した後、PC鋼棒1本当たり72.6±1.5kNで緊張して導入した。

2.2 試験

フレッシュコンクリートの性状は、JIS A 1150(コンクリートのスランプフロー試験方法)、およびJIS A 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法)に従って、スランプフロー試験および空気量試験を行った。また、圧縮強度、静弾性係数、および引張強度は、10φcm×20cmの円柱供試体を製作し、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)、JIS A 1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)、JIS A 1113(コンクリートの割裂引張強度試験方法)に準じて求めた。製作したジオポリマーPCまくらぎに関しては、JIS E 1202(ポストテンション式PCまくらぎ)に規定されている性能確認試験に準じて、ルール位置断面およびまくらぎ中央断面における曲げ試験、埋込栓の引抜き試験を行った。

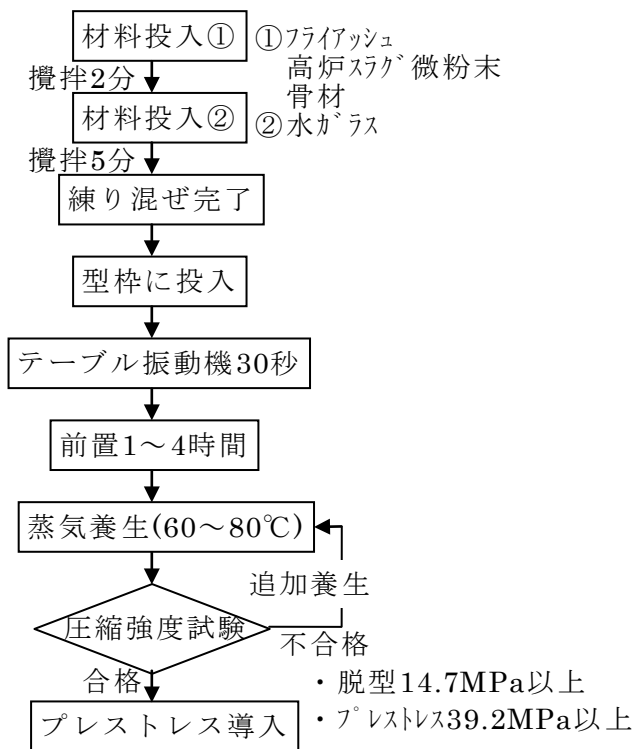


図2 ジオポリマーPCまくらぎの製作手順

表2 フレッシュコンクリートの特性値

	気温(℃)	練上り温度(℃)	スランプフロー(mm)	空気量(%)
試作例1	9.6	8.3	520×525	3.4
試作例2	12.0	14.0	465×460	1.4

3. 結果

表2 にフレッシュコンクリートの特性値、表3 に硬化後の特性値を示す。各試作例ともフレッシュコンクリート状態では、フロー値が460mm～525mmと大きく、型枠充填施工性も良好であった。一方、硬化コンクリートの特性値において、試作例1では材齢1日の圧縮強度

表3 硬化コンクリートの特性値

	材齢	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(MPa)	引張強度(MPa)
試作例1	1日	69.3	31000	---
	28日(水中養生)	86.3	34000	3.4
試作例2	1日	22.5	18000	---
	2日(追加養生後)	92.4	35000	4.3
	28日(水中養生)	101.1	41000	4.0

がプレストレス導入時の基準強度を満足したが、試作例2では22.5MPaとそれを満足しなかった。そのため、追加養生(60℃, 14時間)を行った結果、材齢2日における圧縮強度が92.4MPa、材齢28日における圧縮強度は101.1MPaと大きな強度増進が認められ、JIS E 1202に規定された28日時基準圧縮強度である49.1MPaを満たした。なお、まくらぎ製作前に同様の配合で行った実験では、試作例2でも1日強度が60MPaを超えていたことから、本試験で使用したフライアッシュの反応性がやや劣っていたものと推察される。現在、フライアッシュの管理項目に関して研究中であるが、その硬化反応速度はフライアッシュ中の非晶質量に大きく依存することわかってきており⁵⁾、60℃短時間養生の場合、特にそれら項目の管理を徹底する必要があることがわかっている。

一方、プレストレスの導入に関しては、両試作例とも緊張力、伸び量とも特に問題となる値はなく一般的なコンクリートと同様にプレストレスを導入できることを確認した。

図3は試作例1及び試作例2で製作したまくらぎの写真である。一般的なコンクリート用の型枠離型材を使用した試作例1では、型枠にジオポリマー硬化体が付着し、型枠から離型することが困難であった。そのため、自動型枠脱型装置が使えず、ハンマー等を使用して脱型したところ、図3-(1)のように、端部が割れる場合が散見され、中には型枠を廃棄処理する必要が生じたものもあった。また、その他、代表的な市販のコンクリート用の型枠離型材を用いて試験したところ、良好な離型性が得られるものがなかったことから、安定して工場製品としてジオポリマー硬化体を離型するためには、一般のコンクリート用の離型剤を利用できないことがわかった。そこで、試作例2では、新たにジオポリマー硬化体用の離型材として養生温度より融点の高いワックスを主成分とした材料を開発した結果、自動型枠脱型装置で特に問題なく脱型できることを確認した(図3-(2))。一方、試作例2では、図3-(3)のように、まくらぎ上面、

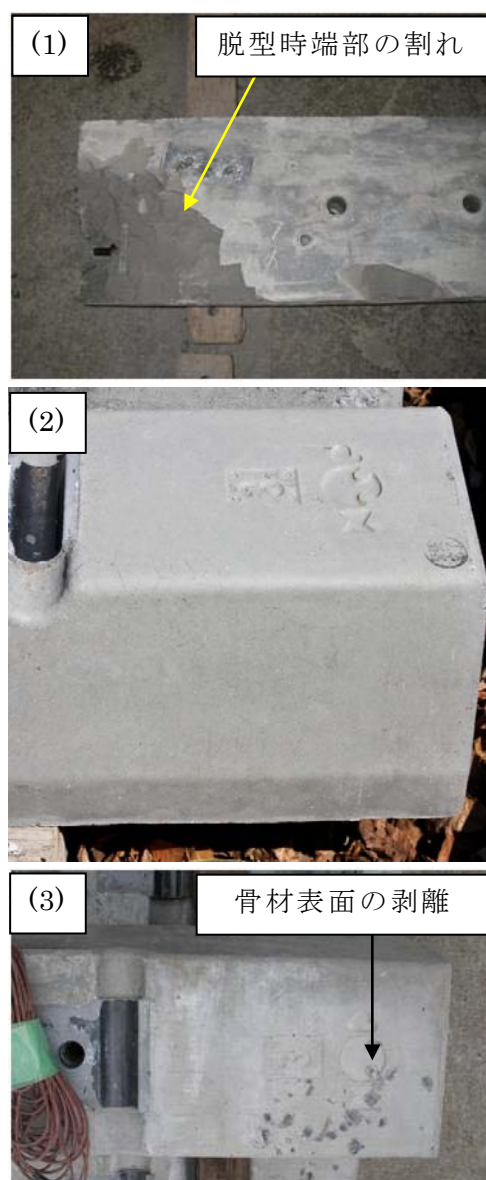


図3 試作したまくらぎの写真

(1)試作例1：脱型時に端部が割れた様子。(2)試作例2：自動型枠脱型装置により脱型した試作まくらぎ(2)試作例2：凍害によるポップアウト

表層部の骨材表面にはく離が認められた。これは本試験における保管環境での最低気温が-5℃と低く、上面に雪が積もるような環境であったことから、凍結融解によるものと考えられる。ジオポリマーコンクリートの場合、凍結融解に対する抵抗性は大きいと考えられているが³⁾、本試験では、高炉スラグ微粉末混入量を増やしたこと等により、空気量が1.4%と小さかったことが原因と考えられる。したがって、ジオポリマーコンクリートでも一般的なコンクリートと同様に、空気量の管理が必須であることがわかった。

表4 はJIS E 1202(ポストテンション式PC まくらぎ)に準じて行ったまくらぎ性能確認試験の結果である。各試験とも保証荷重でひび割れは認められず、破壊荷重も基準値より大きいことから、製作したジオポリマーPC まくらぎの耐荷力は、その要求性能を満たすことが確認された。

表4 ジオポリマーPC まくらぎ性能確認試験結果(kN)

	レール位置断面	曲げ試験	まくらぎ中央断面	曲げ試験	埋込線	引抜試験
	曲げ保証荷重	曲げ破壊荷重	曲げ保証荷重	曲げ破壊荷重	引抜保証荷重	引抜破壊荷重
基準値	77	159	45	92	30	50
試作例1	ひび割れなし* (127)	193	ひび割れなし* (66)	142	ひび割れなし*	108
試作例2	ひび割れなし*	213	ひび割れなし*	153	ひび割れなし*	110

* 保証荷重でひび割れが発生しなかった
括弧内の数値はひび割れが生じたときの荷重

4.まとめ

普通ポルトランドセメントを使用せず、産業副産物を原料としたジオポリマーPC まくらぎを試作した。その結果、試作したまくらぎの耐荷力がJIS E 1202 に規定された要求性能を満足することを確認した。

なお、本研究でアルカリ源として使用した水酸化カリウムは、水酸化ナトリウムと比較して数倍の価格となることから、今後、実用化を考慮して価格競争力を考慮すると水酸化ナトリウムの使用が望ましい。ただし、水酸化ナトリウムを使用した場合、凝結時間が早く生産性が極端に悪くなるなどの問題も残されている。現在、鉄道総研ではこの水酸化ナトリウムを使用したジオポリマー硬化体の凝結時間のコントロール方法の開発に着手している他、ジオポリマーコンクリート製品の実用化をめざし、適切な空気量を連行する技術、塩化物イオンの浸透を抑制する技術等の開発を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 国土交通省 社会資本整備審議会第6回環境部会資料「建設施工分野における地球温暖化対策について」(平成19年2月)
- (2) J.Davidovits, US Patent, No.4349386 (1982)
- (3) 上原, ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, 第22巻4号, (2008)
- (4) 鉄道総研の研究者が描く2030年の鉄道, p162, 交通新聞社。
- (5) 上原他, ジオポリマー硬化体の強度に影響するフライアッシュの反応性評価, 無機マテリアル学会第121回講演会, (2010)