

論文

[1117] ポリマーコンクリート埋設型枠を用いたRC部材の温泉地暴露試験

正会員○山崎竹博 (九州工業大学設計生産工学科)

正会員 出光 隆 (九州工業大学設計生産工学科)

正会員 丸山 巖 (大分高専土木工学科)

正会員 渡辺 明 (九州工業大学設計生産工学科)

1. まえがき

日本には多くの火山帯があり、温泉地は全国に分布している。温泉とは25°C以上の湧水1 m³中に1 g以上の無機化学物質を含むもので、陰イオンの種類によって重碳酸塩、塩化物泉、硫酸塩泉に大別される。そのうち、硫酸塩泉はセメントコンクリートの腐食に強く関与し、エトリンガイトの生成を伴う腐食劣化を生じることが知られている。このようなセメントコンクリートの腐食を防止するには硫酸イオンの浸透を阻止することが有効と考えられるが、温泉の湧水地では地中温度の高いことが多く、適切な防食材料の選定が難しい。本研究では硫酸塩の遮断にポリマーコンクリートパネルを使用することの有効性を実験的に検討した。

ポリマーコンクリートはセメントコンクリートに比較して材料費が高いが、パネル状の埋設型枠として使用すれば、現場での型枠の製作が不要であることから、省力化、工期の短縮などによる総経費の節減が期待でき、防食材料としての適用が可能と考えられる。ポリマーコンクリートパネルによって保護されたセメントコンクリートはパネルが劣化又は剥離しない限り健全であると考えられるが、実際にはパネルとの一体性の喪失や目地からの浸水などによって腐食を生じる。本実験では、このような状況下での劣化過程を調査検討するため、別府明礬温泉で4年間の暴露試験を行った。以下にその結果を報告する。

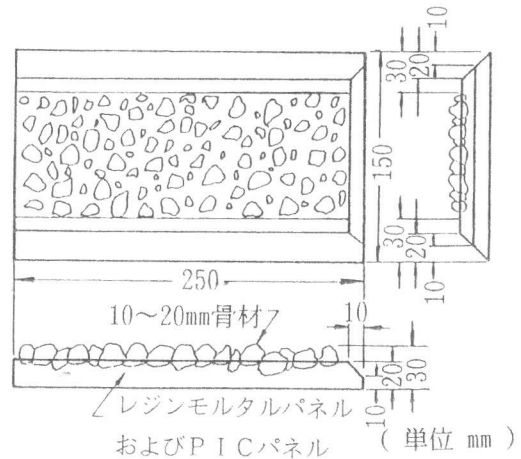


図-1 ポリマーコンクリートパネル

2. 供試体の作成および暴露状況

2.1 供試体の種類

ポリマーコンクリートパネルには、ポリエステルレジンコンクリート (REC)、メチルメタクリレート含浸鋼繊維コンクリート (PIC) を使用した。パネルにはコンクリートとの接合面に図-1に示すような骨材による突起を設け、付着力の増大を図った。供試体の埋設型枠はこれらのパネルを図-2のようにエポキシ樹脂で接着して組み立て、中央部にはコンクリートの膨張や収縮を吸収できるようにシリコンゴム目地を設けた。型枠内にコンクリートを充

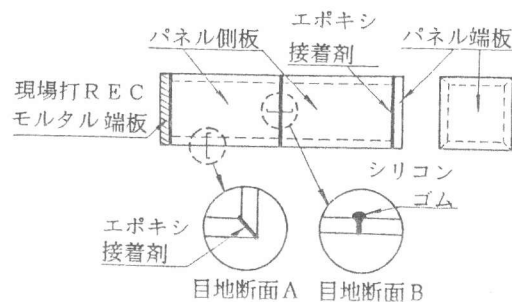


図-2 埋設型枠組立図

填後1日でRECモルタルを打設し、コンクリートを密閉した。
 以下、各々の供試体をRECパネル供試体、PICパネル供試体と呼ぶ。暴露するパネル供試体の本数は1回の試験に3本を要するとして、各々21本を作製した。このほか、材料単体の劣化状況を調べる目的で、セメント、REC、PICの4×4×16cmモルタル角柱供試体およびセメント、REC、PICの10×10×40cmコンクリート角柱供試体、RECのφ7.5×15cm円柱供試体、セメント、PICのφ10×20cm円柱供試体をそれぞれ21本ずつ作製し、予備9本を含めて合計240本を暴露した。それらの供試体を表-1にまとめて示す。

表-1 供試体の種類

M	4×4×16cm
REC-M	(角柱モルタル供試体)
PIC-M	(角柱モルタル供試体)
C	10×10×40cm
PIC	(角柱コンクリート供試体)
REC	(角柱コンクリート供試体)
PIC-P	15×15×50cm
REC-P	(パネル供試体)
C-C	φ10×20cm円柱
PIC-C	φ10×20cm円柱
REC-C	φ7.5×20cm円柱

2.2 使用材料および配合

セメントモルタルには普通ポルトランドセ

メントおよび0.3mmふるいを通過して0.15mmに留まる海砂(比重2.56)を用い、JIS R 5201(セメントの物理試験)に規定される配合で練り混ぜた。

セメントコンクリートには最大骨材寸法15mm、比重3.10の碎石と筑後川産川砂、比重2.51を使用し、目標スランプ10cmで打設した。その配合を表-2に示す。

表-2 セメントコンクリートの示方配合

最大寸法 mm	スランプ cm	水セメント 比 %	細骨材 率 %	単 位 量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
20	10	57	40	187	323	688	1275

表-3 RECの配合 (kg/m³)

樹脂	充填材	細骨材	促進剤	硬化剤
327	436	1414	3.27	3.27

表-4 PICモルタル、コンクリートの配合

	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	含浸率
モルタル	330	794	1000			13.8~14.2
コンクリート	172	380	764	1141	0.75W%	5.9~7.9%

REC供試体はモルタル、角柱、円柱、パネル共に同一配合とし、樹脂には不飽和ポリエステル60%、架橋用スチレンモノマー40%を混合したものをを用いた。充填材は炭酸カルシウム#200、比重2.70であり、細骨材は宮崎県川南産川砂、比重2.57、粗粒率2.34である。その配合を表-3に示す。

PICモルタルおよびコンクリートの配合は表-4に示すとおりで、乾燥ひびわれによって崩壊しないように0.5%程度の鋼繊維を混入している。メチルメタクリレートの含浸率はモルタルで約14%、コンクリートで7%であり、その含浸状況を放置前の曲げ試験による破壊面にフェノールフタレン1%溶液を噴霧して変色の程度から調べたところ、中心部まで十分に含浸されていることが確認された。

パネルの接着剤にはエポキシ樹脂と



写真-1 別府明礬温泉暴露場

硬化剤ポリアミド(T社TD-500P)を2:1に混合して使用した。目地材にはシリコン樹脂(S社KE-45)を図-2のように供試体中央に設けたパネルのVカット部に充填した。

2.3 暴露状況

供試体の放置場所は写真-1に示す別府明礬温泉「湯の花」製造小屋の一角であり、その横を流れる溝の水温は表-5に示すように29°C~70°C、水素イオン濃度は3.4~2.4であ

った。表中のF、G点は下流、H点は上流の噴気近く、I点は下水の流入地点であり、水温が高いほどPHは低くなっていた。

供試体は写真-2のように土壤中に横方向に半分まで埋め、1カ月、6カ月、1年、2年、4年の各暴露期間で劣化状況を調べた。

暴露場所の温度は、1年までは地表で50°C以上、地中1mでは100°Cであったが、2年目に噴気経路が変わったため地中でも20°C程度に低下した。そこで、2年目の試料採取後に噴気管を引き、再び1年目と同様の温度条件に戻した。暴露場の表土の分析結果を表-6に示す。

3. SO₃によるコンクリートの腐食機構

暴露後のコンクリートの腐食進行状況を図-3に示した。腐食の進行はその特徴から以下(a)~(d)に示す4段階に分けられる。

(a)暴露初期には、地表面付近の供試体表面が温泉水の蒸発濃縮により褐色に変色する。

(b)変色部分の表面が白色化して行き、白色層と健全部との境界に褐色層が形成される。同様の現象は下水管の腐食でも報告されており、褐色層は鉄分の酸化層と考えられる。[2][3]

(c)褐色層から深部では外気との接触条件によって別のタイプの腐食が進行する。すなわち、地中にある場合や接着面が剥離したパネルで覆われた場合など、温泉水は供給されるが外気とは直接接しない部分では褐色層の内側に黒色層の増大が見られる。

(d)外気に接する部分では白色層が膨張し、粉末化して行く。黒色層は緻密で膨張せず、表面から褐色化を経て白色化し徐々に侵食される。これらの腐食機構を推定するため、供試体断面の元素をEPMA(電子プローブマイクロアナライザー)によって分析した結果、図-4のように黒色部分には硫黄が濃縮されていることが分かった。



写真-2 4年後の暴露状況

表-5 水温とPH

測定点	水温	PH
F	37°C	2.7
G	37	2.7
H	70	2.4
I	29	3.4

表-6 表土の成分

成分	含有率
SiO ₂	71.8 %
Fe ₂ O ₃	0.46
Al ₂ O ₃	4.51
CaO	1.26
MgO	0.09
SO ₃	3.67

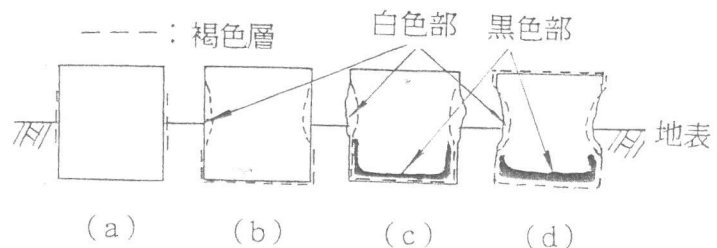


図-3 コンクリートの腐食進行図

表-7 SO₃含有率とPH

試料	SO ₃ 量	PH
放置土	0.59%	2.72
付着土	1.11	2.50
石膏部	8.23	4.00
黒色部	1.46	8.65
健全部	0.54	12.37

また、鉄元素の分布を調べたところ、骨材に当初から含まれていた鉄元素は黒色部ではほとんど見られず、鉄元素が浸出し褐色の酸化層を形成したものと考えることができる。このほか、供試体表面付近に炭素の濃縮や、腐食部にカルシウム、シリカ分布量の低下が見られたが、ナトリウムや酸素分布には顕著な変化は見られなかった。

白色部はX線回折の結果石膏が大部分であった。そこで、石膏化した白色部と黒色部、供試体付着土、暴露土壌の水素イオン濃度および含有 SO_3 量を JIS-A-5011 付属書に従って求めた。その結果を表-7に示す。暴露前の供試体の SO_3 量はモルタルで0.68%、コンクリートでは0.39%であったので、同表の値は黒色部では3.8倍、石膏化部分では21倍もの濃縮量に達する。健全部にもわずかに SO_3 の増加が見られる。

4. 腐食による重量減少率

防食用埋設型枠に使用したPIC、RECおよびセメントの $4 \times 4 \times 16$ cm角柱モルタルおよび円柱コンクリートの腐食による重量減少率を測定した。その結果を図-5に示す。角柱モルタル供試体は寸法が小さいため、写真-3、4に示すようにセメントおよびPICモルタルは4年後には原型をとどめないほどに腐食した。

このとき、供試体の重量減少率はセメントモルタルで68%、PICモルタルで37%となったが、コンクリートおよびPICコンクリートでは、セメント量が少ないことや骨材による止水効果があることなどから、それぞれ30%および6.5%となった。コンクリートの重量減少率をモルタルのそれと比較すれば、セメントで2分の1、PICでは5分の1程度となり、モルタル量の少ない密実なコンクリートほど高い防食効果をもつと言える。また、RECには重量減少は見られなかった。

5. PHおよび SO_3 の経年変化

暴露試験でのコンクリート劣化が SO_3 の濃縮によって生じることが確認できたので、コンクリート内部の

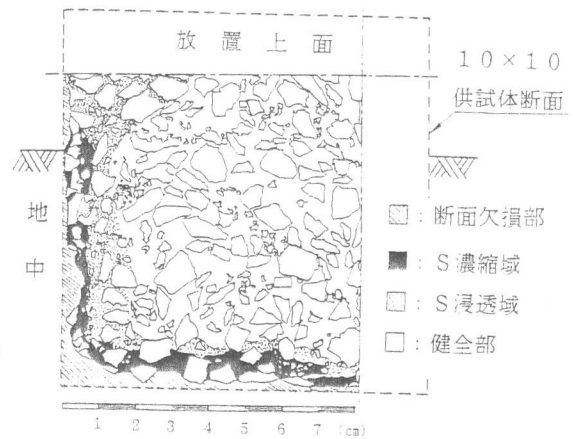


図-4 EPMAによるS分布図

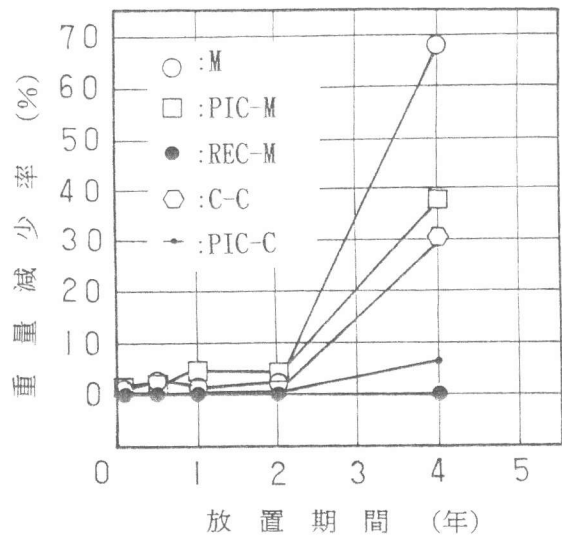


図-5 重量減少率の経年変化



写真-3 セメントモルタルの腐食状況

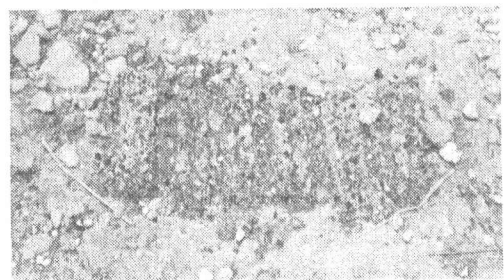


写真-4 PICモルタルの腐食状況

SO₃ 量および水素イオン濃度の経年変化と劣化との関係
を調べた。その一例として10×10×40cm供試体の石膏化
部分と表面から2 cm毎の位置におけるSO₃ 量およびPH
の経年変化を図-6および図-7に示した。これらの結
果からPHが7を下回るのは石膏化した部分だけであっ
たが、表面から2 cm程度の深さではPHが12以下となっ
ており、図-4に示す元素分布図とも併せて硫酸イオン
の浸透が確認された。

石膏化した腐食部分のSO₃ 含有量とPH値との関係に
ついては、必ずしも定性的因果関係が見られなかった。
すなわち、PH値は放置後徐々に酸性度を増す方向に変
化するが、SO₃含有量は若材令である程その値が大きく、
放置後6カ月での含有量20%は徐々に低下し、4年後に
は5%程度まで減少することが分かった。その原因は硬
化後の水和反応速度の影響と考えられる。図-6、7か
らコンクリート中のSO₃ 量が1%程度になるとPHは12
以下に低下し、劣化の危険性を生じることが分かる。こ
のことから、フェノールフタレンによる中性化試験で赤
色反応を呈しても硫酸イオンによる劣化に対して安全で
あるとは言い切れず、PH12程度以上を確認することな
どが必要である。また、表-7からSO₃ 含有量が1.5%
程度になると、外気に触れない部分に黒色変色部を生じ
PHは8程度となることが分かる。

6. 強度の経年変化

腐食に伴うモルタルおよびコンクリート供試体の曲げ
強度の経年変化を図-8および9に示す。セメントモル
タルおよびコンクリートの供試体では暴露後半年で最大
強度に達するが、その後急速に低下し、4年後には強度
試験を実施できない状態であった。一方、ポリマーモル
タルおよびコンクリートの強度は暴露期間と共に徐々に
低下するが、4年後の曲げ強度の低下率は40~50%であ
った。

7. パネルによる防食効果について

埋設型枠を使用した供試体は、パネル接合部の一体性
が良い場合、内部腐食は見られなかった。しかし、本実
験で使用したエポキシ樹脂接着剤が1年程度で灰白色か
ら褐色に変色し脆性化した。このため、接着表面の滑ら

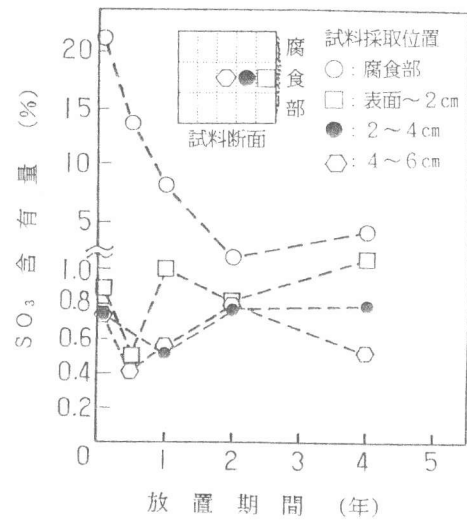


図-6 SO₃の経年変化

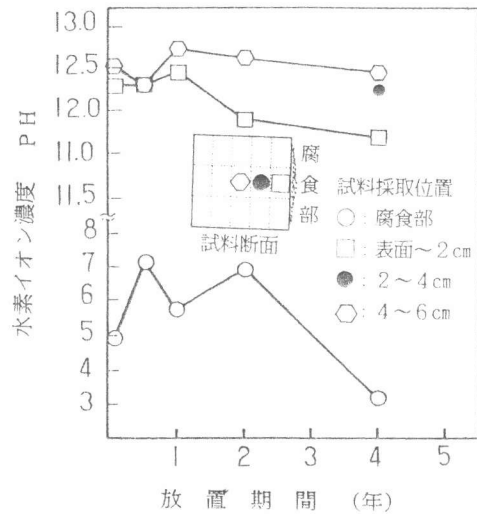


図-7 PHの経年変化

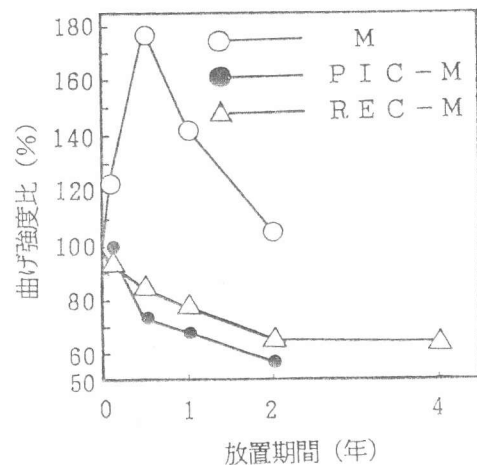


図-8 モルタルの曲げ強度比

かなRECパネルでは一部が剥離し、パネルとコンクリートとの界面に沿って温泉水が浸透し、内部に黒変部を生じた。PICパネル供試体ではパネル表面の腐食は認められたが、パネルとコンクリートとの一体性が良好であったため、コンクリートの腐食は接着剤の剥離した局部に止まった。このほか、接着面の剥離後した供試体にはパネル内部の空間に黒色化と共に硫黄の針状結晶の生じた例も見られたが、内部の鉄筋には全く発錆は認められなかった。

シリコンゴムによる弾性目地には水分の浸透は見られたが、付着が切れていない限り内部のコンクリートは健全であった。しかし、埋設型枠のシール材として用いた現場打ちRECモルタルでは使用材料の乾燥不十分あるいはセメントコンクリート表面の水分による影響と考えられる材料の白色化や反りによる剥離も一部に生じた。

8. まとめ

温泉地での硫酸イオンによるコンクリート腐食は、温泉水を遮断することによって防止できることが分かった。このとき、パネルとコンクリートとの一体性が特に重要であり、一体性が完全であれば、パネルからの浸水による腐食は局部に限られる。以下、4年間の暴露試験に関連して得られた知見について述べる。

硫酸イオンは温泉水と共に浸透するがコンクリート中のカルシウムと反応し、コンクリートは表面より石膏化して腐食する。このとき、石膏層の先端には褐色層を形成する。硫酸イオンによる腐食は白色の石膏化以外に、空気を遮断された部分で黒色化を生じる。また、硫酸根の定着はコンクリートの材令が若いほど多く、腐食速度も早い。以上、ポリマーコンクリートパネルの埋設型枠への応用は省力施工を兼ねた有効な防食法と考えられるが、その使用樹脂の種類について更に検討が必要である。また、ポリエステルを用いたRECパネルは十分に樹脂の重合反応が生じるよう養生することが耐久性の面からも望ましい。

謝 辞 研究遂行に当たり九州コンクリート技術研究会ならびに、九州ヒューム、ヤマウ総合開発、小沢コンクリート、麻生セメントの各社からご協力を頂いた。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山崎竹博・出光隆・丸山巖：ポリマーコンクリートパネルを用いた温泉地区コンクリートの防食に関する研究、土木学会第43回年次学術講演会第5部、pp. 262.
- 2) 田崎和江・森忠洋・野中資博・野田修司：微生物腐食を受けたコンクリートの鉱物学的研究(1) ジャロサイトの存在とその生成機構、粘土科学、第30巻、第2号、pp. 91.
- 3) 田崎和江・野中資博・森忠洋・野田修司：微生物腐食を受けたコンクリートの鉱物学的研究(2) モルタルの微生物腐食実験、粘土科学、第30巻、第3号、pp. 178.

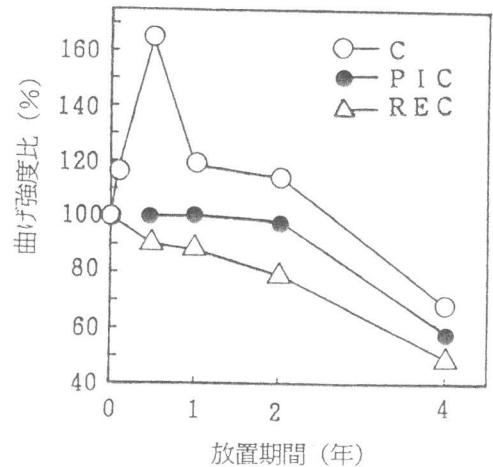


図-9 コンクリートの曲げ強度比