

報告 下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの製品への適用

新田 智博*¹・宮越 執*²・石田 泰之*³・多田 幸夫*⁴

要旨: 耐酸性コンクリートとは、下水処理場から発生する溶融スラグとアルカリ材料を主原料とした耐酸性を有する材料であり、これの耐酸性能およびその他特性は、前回報告した通りである。本報告は、この材料を用いて作製された梁及び管供試体の曲げ試験、軸方向圧縮試験の結果をまとめたものである。両試験の結果から耐酸性コンクリート製品は構造物として従来製品と同等の性能を有し、これまでの設計方法に対する適応性についても、強度と弾性係数の関係等を把握することでRC設計法を拡張して適用可能と判断した。

キーワード: 下水溶融スラグ, 耐酸性コンクリート, RC構造物, 推進管, 曲げ試験

1. はじめに

近年、資源の枯渇が地球的問題として提起され、我が国でも官民一体となった「ゼロエミッション」活動が盛んとなってきている。

一方、下水道施設内に発生する硫化水素が酸化還元菌のはたらきによって硫酸に変化し、コンクリート構造物を腐食させる事例があげられている。また、一部の工場排水や温泉排水、酸性土壌においても同様に、酸によってコンクリートが腐食する現象が報告されている。

これを踏まえ、下水溶融スラグを有効利用しつつ、コンクリート製品の耐久性を向上させた耐酸性コンクリートを開発した。この諸物性については前回報告をしたが、静弾性係数が小さい等一部物理的特性の違いが認められた。¹⁾²⁾

本報告は、耐酸性コンクリートをRC構造物に適用した場合、その物理特性の違いが部材挙動や耐力に及ぼす影響を把握し、従来のRC構造物設計方法適用の可否や対応方法を検討するために行った梁の曲げ試験、下水道推進工法用鉄筋コンクリート管(以下推進管という)の軸方向圧縮試験の結果についてまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

耐酸性コンクリートは、下水処理場から発生する下水溶融スラグの微粉末とアルカリ材料を主原料とする材料で、通常セメントを全く用いないものである。本報告ではアルカリ材料にアルカリ珪酸塩を用い、その成分は酸化ナトリウム 17.48%、無水珪酸 37.03%と水からなる。

また、比較用の普通コンクリートのセメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはナフタレン系高性能減水剤を用いた。骨材には両材料とも同一のものとし、石灰成分の少ないコンクリート用砕石および砕砂を用いた。溶融スラグの特性値を表-1に、使用骨材の物理的性質を表-2に示す。

配合は、各試験用供試体コンクリートとして与えられた表-3に示す条件を満足するよう表-4のごとく定めた。

2.2 供試体の製造方法

(1) 耐酸性コンクリート

パン型ミキサーに液体以外の材料を入れ 30

* 1 ティビュー (株) 技術研究所 (正会員)

* 2 ティビュー (株) 設計技術部

* 3 太平洋セメント (株) 中央研究所 第一研究部

* 4 鹿島建設 (株) 建設総事業部 土木設計本部

秒間空練りをする。その後、水とアルカリ材料を投入して 90 秒間本練りし排出する。

型枠へ振動を加えながらこの材料を流し込み、蒸気養生を施して硬化後脱型する。脱型後は 20℃、70% RH の恒温恒湿養生槽に所定の材齢まで放置した。ここに、蒸気養生方法は、前置き養生 3 時間を確保した後、毎時 20℃ の速度で昇温させ、最高温度 70℃ で 5 時間保持、その後蒸気を止め自然放冷とした。

(2) 普通コンクリート

パン型ミキサーにセメント及び骨材を入れ 30 秒間空練りし、その後、予め混ぜておいた水と減水剤を投入して 60 秒間本練りする。

その後、耐酸性コンクリートと同様の工程で型枠へ打設し養生を行う。蒸気養生方法は、前置き養生 3 時間を確保した後、毎時 20℃ の速度で昇温させ、最高温度 70℃ で 3 時間保持する。降温過程は耐酸性コンクリートと同一とする。

尚、推進管の軸方向圧縮試験用供試体については遠心力によって成形した。

表-1 下水溶融スラグ微粉末特性 (%)

発生先	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	表乾密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² / g)
A自治体	44.4	18.1	8.2	11.4	3.1	1.34	1.39	1.07	9.13	2.62	5000

表-2 骨材の物理試験結果

骨材の種類	各ふるいを通過する質量百分率 (%)								表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率 (F. M.)	吸水率 (%)
	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15			
細骨材	100	100	91.0	61.0	37.0	21.0	9.0	0	2.62	2.81	0.49
粗骨材	95.0	35.0	4.0	1.0	0	0	0	0	2.68	6.62	0.95

表-3 各試験用供試体コンクリートの条件

試験内容	配合種	成形方法	設計基準強度	スランプ	空気量
梁の曲げ試験	耐酸性コンクリート	振動成形	61.8N/mm ²	18cm	2%
	普通コンクリート				
推進管の軸方向 圧縮試験	耐酸性コンクリート	遠心力成形	50N/mm ²	22cm	
	普通コンクリート			4cm	

表-4 耐酸性コンクリートと普通コンクリートの配合

試験内容	配合種	W/P (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				W	P ^{注1}	A ^{注2}	S	G	AD
梁の曲げ試験	耐酸性コンクリート	40.6	48.0	142	350	119	798	881	—
	普通コンクリート	36.0	44.0	162	450	—	779	1014	3.2
推進管の軸方向 圧縮試験	耐酸性コンクリート	38.6	48.0	135	350	150	805	889	—
	普通コンクリート	36.0	44.0	162	450	—	779	1014	3.2

注1：普通コンクリート—普通ポルトランドセメント

注2：アルカリ材料

耐酸性コンクリート—下水溶融スラグ微粉末

2.3 試験方法

(1) 梁の曲げ試験方法

試験体のせん断耐力をRC示方書式等によって推定し、曲げ降伏荷重と比較して供試体が曲げ破壊先行になるよう表-5のごとく各条件を設定した。

表-5 各試験体条件

項目	曲げ試験
せん断スパン	50cm
圧縮・引張鉄筋	D13×3本
コンクリート静弾性係数	$3.43 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
鉄筋静弾性係数	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
せん断補強筋強度	289 N/mm^2
コンクリート強度	61.8 N/mm^2
鉄筋の降伏強度	345 N/mm^2

図-1に曲げ試験用供試体の形状寸法及び各種計測機器の設置位置を示す。

載荷装置は5000kNアムスラー型試験機を使

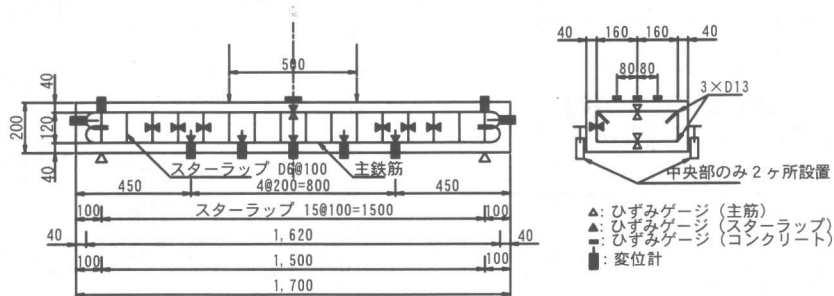


図-1 供試体形状寸法(曲げ試験)

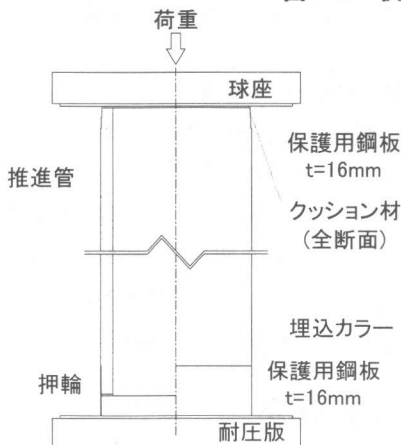


図-2 載荷方法(単純載荷)

用した2点載荷とし、載荷サイクルはファイバーモデルによる非線形RC断面計算により算出した鉄筋許容応力度相当荷重、鉄筋降伏荷重、曲げ終局荷重(破壊)の3ステップ漸増荷重とした。

(2) 推進管の軸方向圧縮試験

下水道協会認定品である下水道推進工法用鉄筋コンクリート管と同一形状寸法の供試体(呼び径600)を図-3のごとく最大荷重29420kNの大型構造物試験機に設置し軸方向圧縮試験を行った。

載荷方法は、中心軸載荷、繰り返し載荷、偏心載荷の3種類とした。ここに、繰り返し載荷は、直線推進の距離にして240m程度を想定したものである。また偏心載荷は曲線推進(R=30m)を想定したものであり、それぞれの管の挙動は図-4の通りひずみ計を設置し計測した。

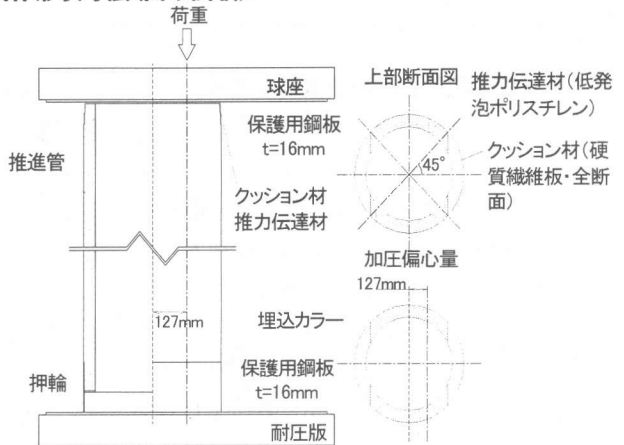


図-3 載荷方法(偏心載荷)

3. 実験結果

3.1 梁の曲げ試験

(1) 材料試験結果

各材料の試験結果を表-6に示す。尚、鉄筋の見かけ弾性係数(応力度の算定の際に鉄筋の公称断面積を使用)は $1.87 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

表-6 材料試験結果

コンクリート種類	耐酸性	普通
材 齢(日)	48	50
圧縮強度(N/mm ²)	62.9	60.4
コンクリート静弾性係数($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)	32.3	36.4
ポアソン比	0.16	0.19
鉄筋降伏強度(N/mm ²)	366.7	
鉄筋弾性係数($\times 10^5 \text{ N/mm}^2$)	1.88	
引張強度(N/mm ²)	544.1	

(2) 破壊までの挙動

各配合種供試体の破壊までの挙動は表-7に示す通りで、両試験体ともほぼ同様の結果であった。尚、表中の各計算値は材料試験の結果を用いてファイバーモデルによる断面計算により算出した値である。

表-7 各配合種供試体の挙動

項目	耐酸性コンクリート		普通コンクリート	
	計算値	実験値	計算値	実験値
曲げひび割れ荷重(kN)	40.7	45.4	40.7	41.9
鉄筋降伏荷重(kN)	81.4	95.0	82.9	98.0
曲げ破壊荷重(kN)	144.1	136.3	143.8	145.4

(3) 試験体変位および主鉄筋ひずみ

試験より得られた耐酸性コンクリート及び普通コンクリート供試体の荷重-変位、荷重-主鉄筋ひずみの関係を図-4、図-5に示す。縦軸には荷重を横軸には変位を示す。各供試体の実験結果を計算値と比較すると、普通コンクリート供試体では計算値と同等以上の値を示した。一方、耐酸性コンクリート供試体では、終局時の荷重が計算値より若干小さな値となったものの、それ以外は同等以上の値を示した。次に、荷重-変位の関係で

は、同一の荷重に対して、普通コンクリート供試体より耐酸性コンクリート供試体の方が、大きな変位を示した。これは、普通コンクリートと耐酸性コンクリートの静弾性係数の違いが影響したものと思われる。また、荷重-主鉄筋ひずみの関係を見ると、両試験体とも計算値より大きな荷重で降伏に至っている。

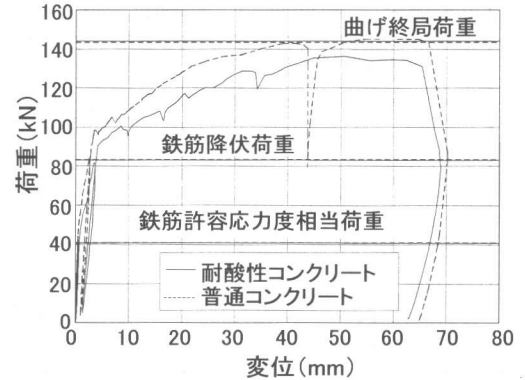


図-4 荷重-変位関係

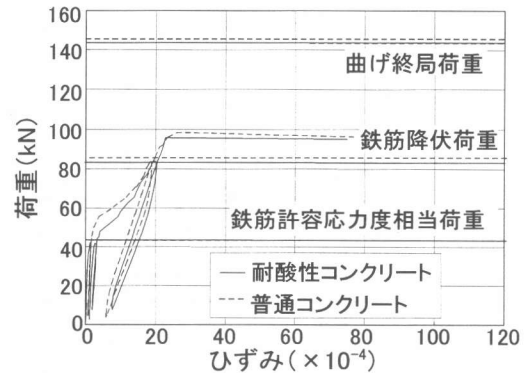


図-5 荷重-主鉄筋ひずみ関係

(4) コンクリートひずみ

図-6、図-7に耐酸性コンクリート及び普通コンクリート各供試体の荷重-コンクリートひずみの関係を示す。いずれの供試体も鉄筋降伏後にひずみが増大し、耐酸性コンクリートでは約 4500μ 時に、普通コンクリート供試体では約 4000μ 時に圧壊した。

(5) ひび割れ性状

ひび割れ発生荷重は、耐酸性コンクリート供試体で 45.4kN、普通コンクリート試験体で

41.9kN と大きな差はなく、荷重ステップ2終了時でも両試験体のひび割れ性状に大きな違いは見られなかった。

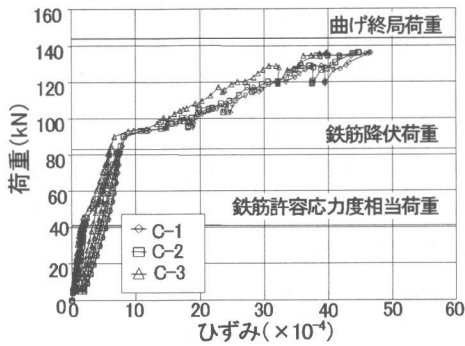


図-6 荷重-コンクリートひずみ関係(耐酸性コンクリート)

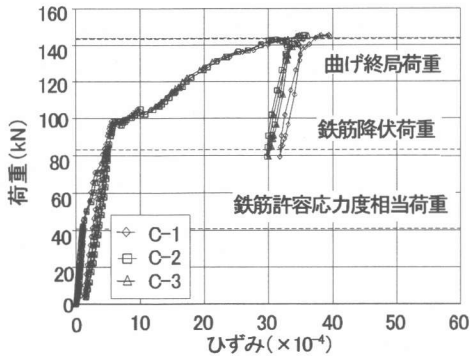


図-7 荷重-コンクリートひずみ関係(普通コンクリート)

3.2 推進管の軸方向圧縮試験

(1) 材料試験

各配合の材料試験結果を表-8に示す。耐酸性コンクリートの圧縮強度が普通コンクリートに比べ3割程度高くなっているが、静弾性係数はほぼ同等の結果であった。

表-8 材料試験結果

配合種	スランプ	圧縮強度	静弾性係数	ポアソン比
耐酸性コンクリート	23.0 cm	69.3 N/mm ²	3.17×10^{-4} N/mm ²	0.17
普通コンクリート	4.0 cm	52.6 N/mm ²	3.20×10^{-4} N/mm ²	0.20

注) 圧縮強度は材齢 14 日

(2) 中心軸載荷試験

圧縮応力度と管の軸方向ひずみの関係を図-8に示す。ここに縦軸の圧縮応力度とは、加圧力を管の有効断面積で除したものである。

材料試験でほぼ同一であった静弾性係数は普通コンクリートの方が耐酸性コンクリートのそれに比べて2割程度大きな値を示した。これは、普通コンクリートの供試体推進管は遠心力を用いて成形したため、硬化体がより緻密になったためと推察される。

計測した軸方向ひずみのうち、その最大ひずみと平均ひずみの関係を図-9に示す。ひずみの集中は応力の集中として考えることができ、プロットされた点から得られる近似式の傾きが1に近いほど均等に荷重されたことを示している。

実験から得られた近似式の傾きは、各材料とも1付近で同程度であるため上述の状態にあったと推察され、しかも力は各材料とも同様に伝播されているものと思われる。

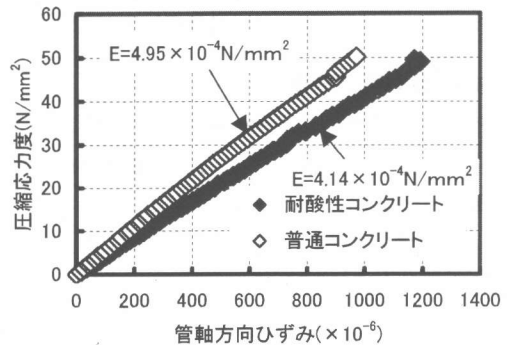


図-8 圧縮応力度-軸方向ひずみ関係

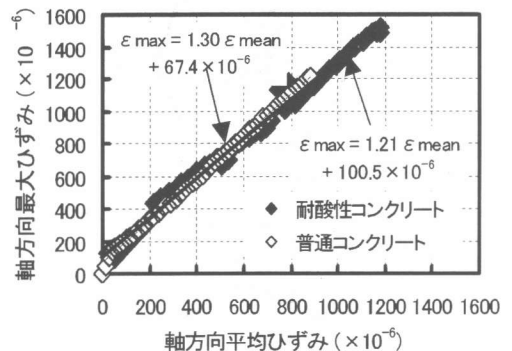


図-9 最大ひずみ-平均ひずみ関係(軸方向)

(3) 繰り返し載荷試験

中心軸載荷でしかも許容平均圧縮応力度(13N/mm²)と設計基準強度の1/10(5N/mm²)の間を等速で100回変化させる繰り返し載荷試

験中の圧縮応力度と軸方向ひずみの関係を図-10に示す。

得られた軸方向ひずみは、載荷回数を重ねるごとに若干ではあるもののひずみが増大していくことが確認された。しかし、その程度は小さく、また直線的な履歴であることから静弾性域内で加圧されたものといえる。

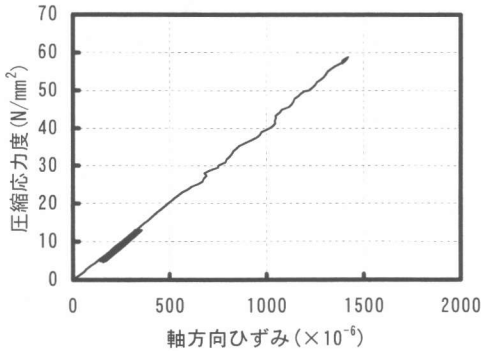


図-10 繰り返し載荷時の軸方向ひずみ履歴

(4) 偏心載荷試験

各ライン軸方向ひずみの各荷重段階における変化を図-11、図-12に示す。図-11は管端部-載荷面近くのひずみを示したものであり、図-12は管軸方向中心におけるひずみを示したものである。

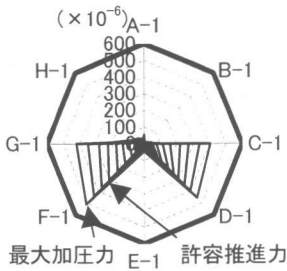


図-11 載荷面近くの軸方向ひずみ

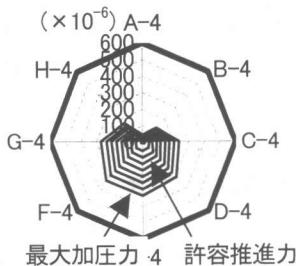


図-12 管軸方向中心の軸方向ひずみ

集中載荷は、管軸方向中心に向かって均等化されることがわかる。また、曲線推進時に耐酸性コンクリート供試体推進管の管外面に引張応力を発生させず、現行推進管と同様の使用が可能と推察される。

4. まとめ

耐酸性コンクリートの梁の曲げ試験及びせん断試験ならびに推進管の軸方向試験より得られた結果を以下に示す。

- ① 耐酸性コンクリートは普通コンクリートに比較して曲げ終局荷重が計算値よりやや小さな値となった。
- ② その他の主筋降伏までの挙動はコンクリートを用いた試験体の挙動や計算値とほぼ一致した。
- ③ 成形方法の違いによって管体の静弾性係数に違いが生じる。
- ④ 耐酸性コンクリート推進管の軸方向圧縮試験において、載荷方法に関わらず普通コンクリート推進管と同様の挙動を示すことが確認された。
- ⑤ 耐酸性コンクリートを用いたRC部材の設計は圧縮強度と静弾性係数関係など必要となる要素を見直し従来のRC設計法を拡張適用できると判断された。

参考文献

- 1) 岡元豊重、石田泰之、内田潤：各種化合物を添加混合した低CaO/SiO₂モル比の熔融スラグの水和硬化特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 51, pp. 108-113 (1997)
- 2) 新田智博、杉山武、石田泰之、石森正樹：下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの諸物性、コンクリート工学年次論文集、vol. 22, No.2, pp. 1249-1254 (2000)