

# 下水汚泥焼却灰を混合したセラミック管 の検討

河合紘茲<sup>1</sup>・後藤幹雄<sup>2</sup>・大沢吉範<sup>3</sup>・大木宜章<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275-0006 習志野市泉町1-2-1)

<sup>2</sup>全国セラミックパイプ工業組合 主任研究員 (〒479-0863 常滑市栄町3-8)

<sup>3</sup>正会員 工修 道都大学短期大学部教授 建設科土木システム (〒061-1196 北広島市中ノ沢149)

<sup>4</sup>正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-0006 習志野市泉町1-2-1)

下水汚泥処分地の確保は年々困難となり、新たな処分方法を確立することが急がれている。本研究はこのような背景から、下水道で発生した汚泥を下水道工事で活用する処理方法として、発生する下水汚泥焼却灰を、セラミック下水道管の原料としての有効利用を試み、強度の面から実用化を検討した。これらから、焼却灰混合率30%セラミック下水道管は外圧圧縮強度、曲げ強度ともに規格値を満足し、セラミック管同様の取り扱いができる。しかも軽量化と天然資源の節約等にも効果があると結論した。

**Key Words :** ceramics sewer pipe, environment, recycle, sludge incineration, sewage treatment works, ash

## 1. はじめに

我が国の廃棄物処理問題は深刻化の一途を辿っている。例えば、市民の日常生活と密接に関係している下水処理場から発生する汚泥、一般家庭から排出される可燃性塵等の大部分は焼却減量後、埋め立て処理されているのが実状である。しかし、大都市圏を中心としたわが国の埋め立て用地確保は限界域に達している。また、埋め立て処理場より重金属の流出、悪臭発生等に因る二次公害が発生し、大きな社会問題となっている。

本報告はこのような背景から、下水道で発生した汚泥を下水道工事で活用するリサイクル方法として、下水処理場から発生する汚泥焼却灰を、セラミック下水道管の主原料である粘土の一部と混合しその率を種々に変化させたセラミック下水道管の強度性状を試験し、下水道管敷設計・施工指針に必要な基礎資料を提供すると共に、下水処理場から発生する汚泥焼却灰の有効利用の一助と

表-1 粘土および焼却灰の化学組成

単位：乾燥重量 % (平均値)

化学組成	粘土	焼却灰夏季	焼却灰冬季
SiO <sub>2</sub>	55~70	40.29	33.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15~30	17.11	15.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3~5	7.02	8.57
TiO <sub>2</sub>	0.5~2	0.88	1.01
CaO	0.2~3	10.86	15.27
MgO	0.2~2	2.88	3.28
K <sub>2</sub> O	1~4	1.54	2.23
Na <sub>2</sub> O	0.1~1	1.13	1.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	13.15	15.10
SO <sub>3</sub>	-	1.54	1.61
Ig.loss	3~6	2.96	3.63

注) 焼却灰変動係数 夏季:6.3% 同左 冬季:2.7%

なることを検討した。

表-2 調整杯土の配合によるコア供試体圧縮強度試験結果

焼却灰 混合率 (%)	夏季に採取焼却灰		冬季に採取焼却灰	
	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N×10 <sup>5</sup> /mm <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 N×10 <sup>5</sup> /mm <sup>2</sup>
0	94.24	0.0392	94.24	0.0392
10	87.48	0.0391	88.13	0.0381
20	87.18	0.0381	87.92	0.0384
30	83.60	0.0374	86.80	0.0375
40	77.28	0.0362	77.55	0.0365

注) 試験結果は、供試体数15体の平均値、変動係数は0.19-0.14であった。

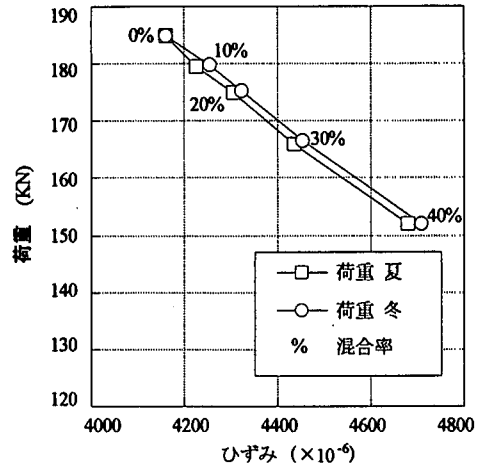


図-2 最大荷重とひずみの関係

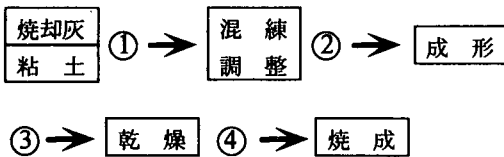


図-1 杯土の混練および調整のフロー

## 2. 使用材料

### (1) 粘土

粘土は、我が国有数のセラミック下水道管生産地である愛知県産を用いた。物理的性質は通常の品質を有するものであって、比重 2.1、吸水率 7.0%である。化学的性質は表-1に示す通りであって、二酸化珪素を主成分とする通常の品質を有する粘土である。

### (2) 汚泥焼却灰

汚泥焼却灰は『O』下水処理場から発生したものをを用いた。汚泥は生活環境、季節によって化学成分が異なることが指摘<sup>3)</sup>されている。このことから、本実験では冬季1~3月期、および夏期6~8月期に採取した汚泥を約800~900℃で焼却された高分子系焼却灰を用いた。化学成分は表-1に示すとおりであるが、焼却灰の化学成分はSiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の成分量が、冬季に比較して夏期に多く含有していることが特徴的である。また、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>などの含有に対しては、耐火度と熔融に影響が大である。また、杯土によっては焼成温度を約1200℃としている。本文では既往の研究報告<sup>2)</sup>、強度、収縮率、吸水率、エネルギー節減等を考慮し

て耐火度を約1150℃とした。なお、表-1に示した化学成分は、それぞれの季節に採取した汚泥焼却灰の化学成分平均値である。

### (3) シャモット

セラミックは粘土単味の配合で使用すると、成形後の乾燥収縮および焼成時の熱影響による収縮によって、亀裂、歪み等が発生すると報告<sup>3)</sup>されている。このことから、収縮防止効果を有するシャモットを一部添加した。

シャモットとは、焼成されたセラミックを粉砕機で1.7mm以下に粉砕したもので、粘土鉱物中の結晶水を放出した粘土鉱物を十分に焼結させ、収縮を無くして結晶を発達させたものである。

## 3. 坏土(素地)の調製方法

坏土の調整は、図-1に示すフローによって行った。

工程①混練りおよび調整：粘土および焼却灰をバケットに所定量投入し、ロールクラッシャーおよび土練機で均一に混練りした。

工程②成形：土練機の口型部より押し出し加水を行い、ブロック成形した。

工程③乾燥：温度70℃、湿度10%の乾燥室で、ブロックの水分が10%以下になるまで乾燥(16時間)させた。

工程④焼成：圧縮強度と熱処理温度の関係より、最も良い温度約1150℃<sup>4)</sup>で約24時間焼成した。

供試体はJIS A 1107<sup>5)</sup>およびJIS R 7222<sup>6)</sup>を参考にして、セラミックブロックより直径Φ50mm×高さh

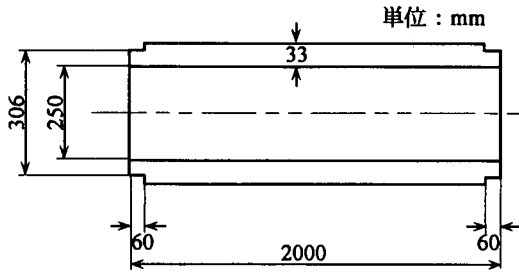


図-3 供試体詳細図

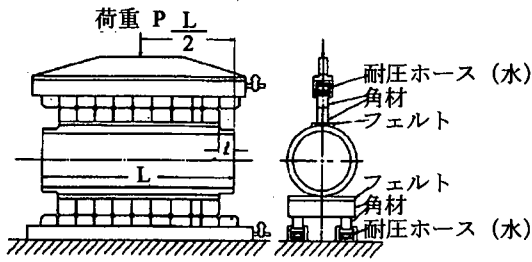


図-4 外圧圧縮強度試験方法

100mmの円柱供試体をコア採取した。

曲げ強度試験供試体はJIS R 1601<sup>7)</sup>に準拠して、セラミックブロックより断面15×15mm、長さ120mmに切削加工した。

調製坏土の圧縮強度および曲げ強度試験の結果を表-2に示す。表から、焼却灰が圧縮強度および曲げ強度に及ぼす影響は、冬季に採取した焼却灰にやや大きくなる傾向が認められた。

圧縮強度は焼却灰を混合しない供試体（以下標準供試体と略記）94.24N/mm<sup>2</sup>に対して、10～30%混合した供試体は83.60～88.13N/mm<sup>2</sup>であって、約2～7%の強度低下であった。混合率40%では77.28N/mm<sup>2</sup>と約18%の強度低下となって焼却灰混合率の限界値と推定される。

荷重とひずみの関係は、図-2に示すように焼却灰混合率の増大に伴って、右下がり直線的であった。これは焼却灰の溶融量に対する細孔径差異に因ると考えられる。しかし、前述のように圧縮強度への影響は僅かであること、荷重とひずみの関係は破壊時までほぼ直線的であること等から、セラミック管のヤング係数は破壊時として取り扱っても問題ないと考えられる。このことから破壊時のヤング係数を求めると、約0.0392～0.0362×10<sup>9</sup>N/mm<sup>2</sup>の範囲であった。これは一般的なセラ

表-3 調整坏土の配合

	混合率 (%)				
	80	90	80	70	60
粘土	80	90	80	70	60
焼却灰	0	10	20	30	40
シャモット	20	0	0	0	0

注)粘土の比重:2.1 焼却灰の比重:1.9

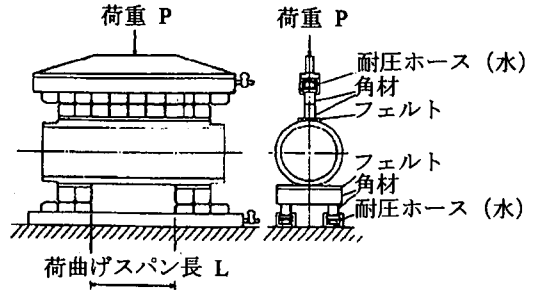


図-5 曲げ強度試験方法

ミック材料のヤング係数値<sup>8)</sup>と近似した結果であった。

次に曲げ強度は、圧縮強度とは対称的に焼却灰混合量の増加に伴って、最大で約7%程度の増大が認められた。焼却灰混合量の増大に伴って曲げ強度が増大したのは、二酸化珪素中に含まれるガラス質の含有量、および焼却温度によるガラス質の溶融に起因すると推察される。

破壊性状は、焼却灰を混合した圧縮供試体および曲げ供試体の両者共、焼却灰混合分布面からひび割れが発生して破壊に至る傾向が認められたが、

(社)日本下水道協会で定めている<sup>9)</sup>許容圧縮応力度および曲げ強度は、何れも満足した結果であった。このことから、焼却灰を約40%まで混合してもセラミック下水道管への強度性状には問題無いと思われる。また、焼却灰採取時期によるセラミック下水道管の性能に及ぼす強度性状の影響は、極僅かであることからセラミック下水道管供試体は、表-3に示す調製坏土の配合表に基づき成形した。なお、表-3においてセラミック管の軽量化は、焼却灰混合率30%で約10%程度可能である。

#### 4. 供試体

我が国の下水道整備計画は、従来の合流式から分流式へと移行していることから、呼び径Φ200mmおよびΦ250mmを中心とした小口径管の敷設が主流となっている。また、道路占用事情、施

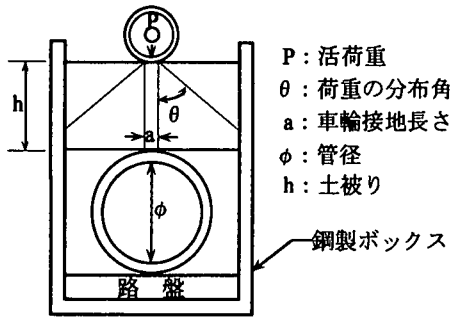


図-6 土被りによる外圧圧縮強度試験方法

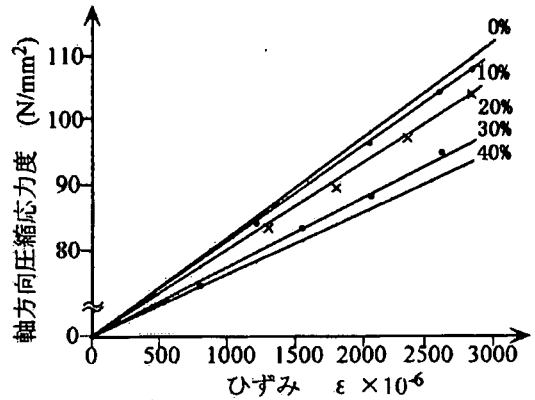


図-8 ひずみ応力曲線

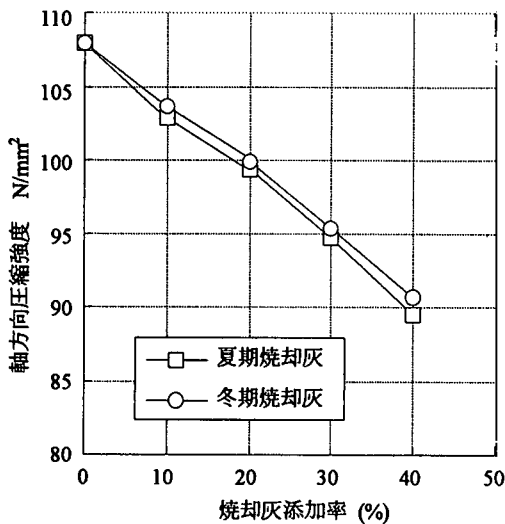


図-7 セラミック管の軸方向圧縮強度試験結果

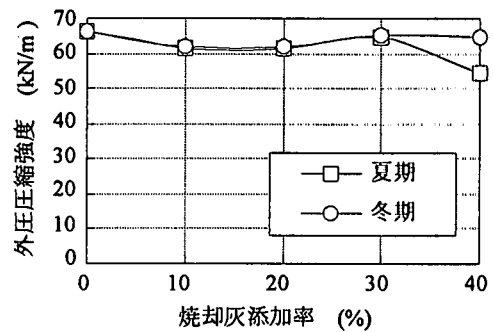


図-9 外圧圧縮強度試験結果

工騒音等の理由により、開削工法から推進工法へと移行している。したがって、本試験では(社)日本下水道協会、下水道推進工法用陶管<sup>9)</sup>、呼び径 $\Phi 250\text{mm} \times$ 長さ $L 2000\text{mm}$ の小口径推進管を試験の対象とした。供試体の詳細を図-3に示す。図-3において、セラミック推進管の継ぎ手部は一体成形が困難なことから、成形、焼成後に切削加工によって、所定の寸法に仕上げた。

## 5. 試験方法

### (1) 軸方向圧縮強度試験

軸方向圧縮強度試験方法は、特にJSWAS R-3に規定されていない。したがって本試験では、日本工業規格、遠心力締固めコンクリートの圧縮強度

試験方法<sup>10)</sup>を参考にした。

推進管上下面の平滑度は、推進施工時に緩衝材としてセラミック推進工法用管<sup>9)</sup>に規定されている9mm厚のパーティクルボードによって確保した。

### (2) 外圧圧縮強度試験

外圧圧縮強度試験は、図-4に示すJSWAS R-3に準拠した。セラミック下水道管は補強が施されていないことから、試験方法によって機械的性質が相当に相違することが推測される。この試験方法は、下水道管施工時に予測される圧縮、曲げ、引っ張り応力等を考慮した試験方法である。

### (3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、外圧圧縮強度試験と同様にJSWAS R-3に準拠した。しかし、推進施工距離によっては、必ずしも標準管長の端部が人孔に到達するとは限らないことから、短管の使用を余儀なくされている。したがって、曲げスパン長と曲げ強度の関係を明らかにすることは重要である。

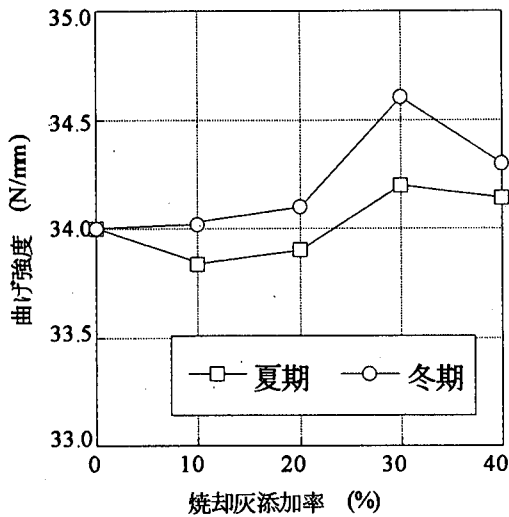


図-10 曲げ強度試験結果

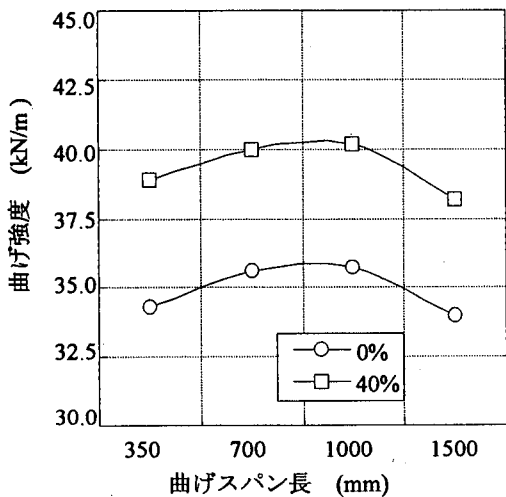
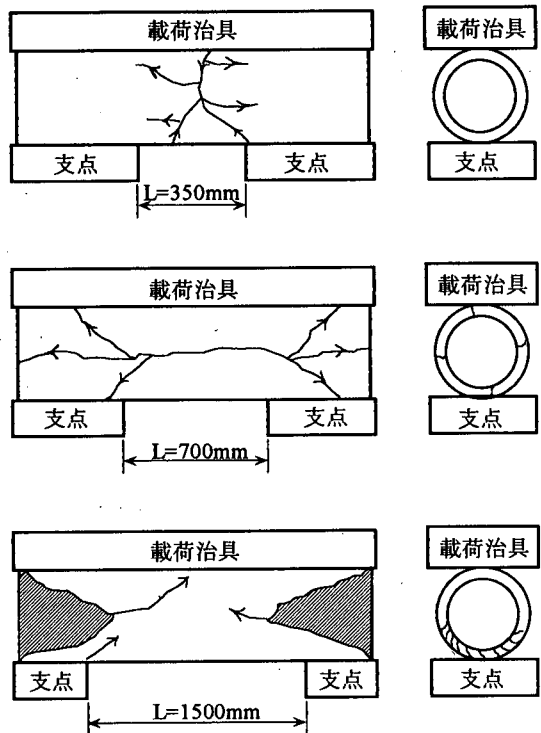


図-11 曲げスパン長と曲げ強度の関係

本報告では、曲げスパン長を 350, 700, 1000 および 1500mm の 4 条件でによる曲げ性状を試験した。曲げ強度試験方法を図-5 に示す。曲げ試験は点（支点）で支えるのが一般的であるが、JSWAS では、下水道管の敷設実状に併せて面で支えているのが特徴である。

#### (4) 管の許容土被り試験

管の許容土被り試験は、JSWAS に準拠して図-6 に示すように、鋼製ボックス中に（社）日本道路協会規格に準拠して路盤を築造した。路盤および



注：図中の矢印はひび割れ発生方向を示す

図-12 曲げ試験による破壊形状

土被りに使用した土および砕石は、関東ロームと石灰系砕石 0~40mm である。土被りは、現在建設省で取り組んでいる浅埋設施工方針を想定して 100cm とした。土被りは一層 20cm 毎に各層を道路規格に準拠して締め固め、100cm の土被り厚を築造した。

載荷荷重は道路示方書<sup>1)</sup>に準拠して T=25ton の後輪荷重とし、輪荷重の分布が 45° の角度になるように載荷した。

## 6. 試験結果

### (1) 軸方向圧縮強度試験結果

軸方向圧縮強度試験結果を図-7 に示す。図-7 において、軸方向圧縮強度は調整坏土の基礎試験結果と同様な傾向が認められた。焼却灰混合率 10~30% の圧縮強度は、標準供試体の圧縮強度 107.88N/mm<sup>2</sup> に対して約 90% 前後であったが、焼却灰混合率 40% においては約 83% に低下した。

しかし、本試験で検討した焼却灰混合量 40% までの軸方向圧縮強度は、JSWAS の参考資料に

表-4 管の許容土被り試験結果

焼却灰混合率 (%)	管体応力 N/mm <sup>2</sup>	
	ローム	砕石
0	28.24	29.06
10	27.69	28.48
20	28.70	28.91
30	28.78	29.57
40	28.84	29.18

注) 土被り厚100cm, 輪荷重 12.5tf

記載されている下水道管の許容圧縮強度 88.26N/mm<sup>2</sup>を何れも満足した結果であった。

図-8 にひずみ応力曲線を示す。図-8 において標準供試体および焼却灰混合率 10~30%の供試体のひずみ応力曲線は、ほぼ一曲線に収斂する傾向が認められた。焼却灰混合率 40%の供試体においては、軸方向圧縮強度低下と同様にヤング係数も約 82% (0.02×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>) 低下する傾向が認められたが、JSWAS の許容圧縮強度を換算する上では軸方向圧縮強度の低下率とほぼ同様であることから問題ないと思われる。

### (2)外圧圧縮強度試験結果

外圧圧縮強度試験結果を図-9 に示す。図-9 において焼却灰混合率差異による外圧圧縮強度試験結果は、標準供試体の外圧圧縮強度 66.12N/mm<sup>2</sup>に対して、夏季に採取した焼却灰混合率 40%の外圧圧縮強度低下率 82%を除いて、他の供試体は約 92~98%であった。夏季および冬季の焼却灰採取時期によって多少の強度差異が認められたのは、前述のように SiO<sub>2</sub> および Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の化学組成含有量に起因するものと推測される。すなわち、SiO<sub>2</sub> には砂質分が含まれていることから、その含有量に大きく左右される。しかし、日本下水道協会で規定<sup>12)</sup>している外圧圧縮強度 39.23KN/m を何れも満足した結果であった。

### (3)曲げ強度試験結果

曲げ強度試験結果を図-10 に示す。図-10 において焼却灰混合率が曲げ強度に及ぼす影響は、標準供試体の曲げ強度 34.0 N/mm<sup>2</sup>に対して、焼却灰を混合した曲げ強度は 99~102%であった。前述のように下水道管の曲げ試験においても、焼却灰を混合することによって、曲げ強度はやや増大する傾向が認められた。

本試験で得られた焼却灰混合量に対する曲げ強度を JSWAS の参考資料、外圧強さより求まる管の

抵抗曲げモーメント式を示す。

$$M_r = 0.318 P + 0.239 w \cdot r$$

M<sub>r</sub>: 外圧強さより求まる管の抵抗モーメント(KN・m)

P: 外圧強さ(KN/m)

w: 管の重量(KN/m)

r: 管厚中心半径(m)

この式より、焼却灰混合率 40%の最小外圧強度求めると 24.54KN・m となり、参考資料の 18.32KN・m を大きく上回っており、焼却灰混合率 40%までの曲げ強度は問題ない。

このことから曲げスパン長による曲げ強度試験は、標準管および焼却灰混合率 40%の供試体を用いた。試験の結果を図-11 に示す。図-11 において、曲げスパン長による曲げ強度は、標準管および焼却灰 40%混合の曲げスパン長 700~1000mm で、JSWAS の参考資料に記載されている曲げスパン長 1500mm の 18.32KN・m の約 100%であった。したがって短管とした場合でも、標準管と同等の取り扱いで問題無いと考えられる。

破壊形態は標準管、焼却灰混合管に係わらず、曲げ、圧縮およびせん断応力が複雑に交差した破壊であった。例えば図-12 に示すように、支点部分から円形断面に沿う曲げおよびせん断応力によってひび割れが曲げ区間部に向かって進展すると同時に、支点部下面では圧縮応力によって管が押しつぶされて破壊に至っている。このように曲げ破壊形態が大変複雑になったのは、試験方法の影響と推測される。

### (4)管の許容土被り試験結果

管の許容土被り試験結果を表-4 に示す。表-4 において、道路示方書に規定している締め固めに準拠した土被り厚 100cm, 輪荷重 T=25tf を載荷した標準管および焼却灰を混合した平均外圧圧縮応力は、ロームの場合 28.50N/mm<sup>2</sup>, 砕石の場合 29.04N/mm<sup>2</sup>であった。これらはセラミック下水道管体耐荷力の 33.56N/mm<sup>2</sup> に対して約 85~87% に相当することから、強度的には十分に安全であることが確認された。

土質が土被りに影響したのは、砕石の場合、砕石間の空隙が載荷荷重によって砕石が転移し、集中載荷傾向となった。これに対してロームは粒度が細かいことから、砕石のような影響を受けなかったものと推測される。

## 7.まとめ

焼却灰を混合した下水道管の強度性状は、本試験でつぎのことが明らかとなった。

- (1)焼却灰を 40%まで混合したセラミック下水道管の外圧圧縮強度、曲げ強度および下水道管の許容土被り強度は、(社)日本下水道協会で規定している規格値を何れも満足した結果が認められた。したがって、セラミック管の焼却灰混合率は、強度性状等を考慮して、焼却灰混合率 30%までのセラミック下水道管であれば、既製のセラミック下水道管と同様に取り扱っても問題無い。
- (2)焼却灰を 30%セラミック下水道管に混合することによって、下水道管重量が約 10%軽減でき、流通エネルギーの経済効果が期待される。
- (3)過去 5 年間の年間セラミック下水道管平均生産高から、天然原料の粘土は約 14,500 t 削減、焼却灰を 30%混合することによって調製坯土の耐火度を約 50℃低減でき、地球温暖化および自然環境に貢献効果が期待できる。
- (4)下水道管の許容土被り厚は、道路示方書に準拠した施工であれば、100cm あれば十分に安全であることが認められた。

- 2)河合紘茲, 曾我部博, 佐伯謹吾, 竹内暉豊: 焼却灰を混入したセラミック管の強度性状, 第 32 回下水道研究発表会, 日本下水道協会, 1995 年。
- 3)名古屋市下水道局: 下水汚泥焼却灰添加による陶管製造に関する調査報告書, 1994 年。
- 4)建設省土木研究所下水道部汚泥研究所: 下水汚泥の建設資材としての利用方法, 1987 年 2 月。
- 5)日本工業規格: JIS A 1107 コンクリートからのコア一および梁の切り取り方法および強度試験方法。
- 6)日本工業規格: JIS R 7222 高純度黒鉛素材の物理試験方法。
- 7)日本工業規格: JIS R 1601 ファインセラミックの曲げ強さ試験方法。
- 8)日本セラミックス協会: セラミックの機械的性質。
- 9)(社)日本下水道協会: JSWAS R-3, 下水道推進工法用陶管, 1990 年。
- 10)日本工業規格: JIS A1136, 遠心力締めコンクリートの圧縮強度試験方法, 1993 年。
- 11)日本道路協会: 道路示方書・同解説。
- 12)河合紘茲, 曾我部博, 鈴木宏, 栗原正孝: 輪荷重が敷設された下水道管に及ぼす影響, 第 31 回下水道研究発表会, 日本下水道協会, 1994 年。

(1998. 2. 19 受付)

## 参考文献

- 1)日本下水道事業団, 名古屋市下水道局: 下水汚泥焼却灰添加による陶管製造に関する調査報告書, 1984 年度。

## THE INVESTIGATION OF CERAMIC PIPE CONTAINING A MIXTURE OF INCINERATED SEWAGE SLUDGE ASH

Tadashi KAWAI, Mikio GOTOU, Yoshinori OHSAWA and Takaaki OHKI

Year by year, it has become difficult to secure place to dispose sludge; thus, a new disposable method must be established. Considering these facts, in this study an incinerated sludge ash was tried as a raw material constituent of ceramic pipe. The practical application of this method was examined from the point of strength. And from this, it was found that 30% incinerated ash mixture rated ceramic pipe fully satisfied the standard for external pressure compression strength, and for bending strength and can be handle similarly as a regular ceramic pipe. Moreover, it was concluded that the usage of incinerated sludge ash was effective for saving natural resources and for lightening weight.