

# コンクリート廃棄物の粒度特性と締固め特性

高津 忠<sup>1</sup>・今井 淳<sup>2</sup>・柳澤 栄司<sup>3</sup>・三田地 利之<sup>4</sup>・唯野 英輝<sup>5</sup>・安部 聡<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株) 錢高組 技術研究所 主任研究員 (〒160-10 東京都新宿区西新宿3-7-1)

<sup>2</sup>(財) 原子力環境整備センター 研究第1部 課長代理 (〒105 東京都港区虎ノ門2-8-10)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>5</sup>正会員 (株) 錢高組 原子力統轄部 部長 (〒160-10 東京都新宿区西新宿3-7-1)

<sup>6</sup>正会員 (株) 錢高組 原子力統轄部 副課長 (〒160-10 東京都新宿区西新宿3-7-1)

今後解体される原子力発電設備の極低レベル放射性コンクリートの地中埋設処分形態を想定して、実大のコンクリート構造物を解体し、発生するコンクリート廃棄物の粒度特性と締固め特性を把握した。解体後に発生するコンクリート廃棄物の粒度特性は鉄筋量と関係があり、鉄筋量が多い程比較的良好な粒度特性を示した。また、一般の粗粒材料と同様に、コンクリート廃棄物の粒度分布と、締固め後の表乾密度、間隙比、間隙率等の締固め特性には、密接な相関関係があった。

*Key Words* : concrete waste, grain size analysis, compaction test

## 1. はじめに

原子力発電設備においては、供用期間の延長に関する技術的・経済的検討が進められているが、将来はその役割を終え、解体されるものが徐々に出現する。原子力発電設備を解体する際に発生するコンクリート廃棄物は、放射化されたものと汚染されたものに大別され、その放射化・汚染の程度によって、処分形態が各々異なる。110万kw級の原子力発電設備を解体した際に発生するコンクリート廃棄物の総量は約45万トン、そのうち低レベル放射性廃棄物としてコンクリート製ピット等に浅地中処分されるものが約1千トン、極低レベル放射性廃棄物として簡易処分されるものが約1万トン、非放射性廃棄物として再利用されるものが約44万トンとされている。

解体の際に発生する廃棄物のうちの極低レベルの放射性コンクリート廃棄物については、「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則<sup>1)</sup>」によって、「廃棄物埋設地は、土砂等を充てんすることにより、当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空けが残りないように措置すること(第六条第四号)」とされている。したがって、極低レベルの放射性コンクリート廃棄物を地中に埋設処分するに当たっては、コンクリート廃棄物の空隙等に関する締固め特性を明らかにする必要がある。

一般のコンクリート構造物を解体した際に発生する

比較的大粒径のコンクリート廃棄物については、クラッシャー等で40mm以下にクラッシングし、道路路盤材料へ再利用するなどの実績がある。したがって、粒径が40mm程度以下の比較的小さなコンクリート廃棄物については、締固め特性がほぼ明らかになっているものと考えられる。

本研究で対象とする極低レベル放射性コンクリート廃棄物は、微量ではあるが放射性物質が含まれており、再利用されずに廃棄物として簡易処分される予定のものである。簡易処分されるコンクリート廃棄物は、放射性物質の飛散をできるだけ防ぐため、現時点では、比較的大粒径のものでも細粒化等の処理をせずに、発生したそのままの粒径で処分されることが考えられている。

そこで、柱状と壁状の実大コンクリート構造物を解体し、発生するコンクリート廃棄物の粒度特性を把握する<sup>2)</sup>とともに、この材料を締固め、転圧回数と密度の関係や間隙率等の基本的な締固め特性を把握した。本文は、これらの試験結果について考察するものである。

## 2. コンクリート廃棄物の粒度特性

### (1) 目的

一般の建設工事においては、コンクリート構造物を数多く解体しているが、解体後に発生するコンクリー

ト廃棄物の粒度特性について報告されている例はほとんど見当たらない。そこで、本試験では、一般的な構造部材である柱状と壁状の実大コンクリート構造物を解体して粒度分布を把握する。また、発生するコンクリート廃棄物の粒度分布は粗粒材料と比較的類似したものと想定されることから、この粒度分布を粗粒材料の代表的なものであるダムのロック材料の粒度分布と比較しその特性を把握する。

## (2) 解体用試験体と解体方法

解体後のコンクリート廃棄物の粒度特性は、解体されるコンクリート構造物の形状寸法と配筋量、解体方法等に影響されると考えられる。本試験では、以下に示す試験体と解体方法を採用した。

### a) 解体用試験体

解体用試験体の諸元を表-1および表-2に示す。試験体としては、厚さ0.8m×幅0.8m×高さ1.8mの柱状と厚さ0.5m×幅2.5m×長さ3.0mの壁状のコンクリート構造物を選定した。

柱状試験体は、コンクリートの圧縮強度が545kgf/cm<sup>2</sup> (53.4N/mm<sup>2</sup>)と比較的高強度のもので、鉄筋量については、143kg/m<sup>3</sup>とかなり密に配筋されているものと無筋のもの2種類とした。壁状試験体は、コンクリートの圧縮強度が453kgf/cm<sup>2</sup> (44.4N/mm<sup>2</sup>)で、鉄筋量については37kg/m<sup>3</sup>と比較的粗に配筋されている1種類のみとした。

### b) 解体方法

コンクリート構造物の解体方法には、機械的衝撃による破壊、油圧機構による破砕、機械切断、水ジェット切断、制御爆破等の方法<sup>3)</sup>がある。ここでは、これらの各種解体方法の中から、建設工事において最も一般的に用いられている油圧ブレイカ（衝撃）と破壊機（破砕）の2種類の方法を選定した<sup>4)</sup>。本試験で用いた油圧ブレイカと最大開口幅85cmの破壊機の模式図を図-1および図-2に、基本仕様を表-3および表-4に示す。

## (3) 試験ケース

試験ケースを表-5に示す。試験ケースはコンクリート構造物の形状寸法と鉄筋量、構造物の解体方法と解体目標最大粒径等を考慮して設定した。解体時の最大粒径は、一般にコンクリート廃棄物を再利用する際に用いられる破砕機等の仕様から50cm以下とされている。本試験では、最大粒径によって粒度特性が大きく異なることが想定されることから、解体目標最大粒径は50cm、30cm、10cmの3種類とした。解体作業中の目標最大粒径の判定は、原則として作業員の目視により行ったが、必要に応じて内法50cm、30cm、10cmの正方

表-1 解体用試験体の形状寸法とコンクリート圧縮強度

		形状寸法	圧縮強度
柱状	無筋	厚さ 幅 高さ 0.8m×0.8m×1.8m	545kgf/cm <sup>2</sup> (53.4N/mm <sup>2</sup> )
	有筋	厚さ 幅 長さ 0.5m×2.5m×3.0m	453kgf/cm <sup>2</sup> (44.4N/mm <sup>2</sup> )

表-2 解体用試験体の鉄筋量

		配筋	鉄筋量
柱状	有筋	主筋: D41, 150mm間隔 帯筋: D16, 70mm間隔	143kg/m <sup>3</sup>
		主筋: D16, 250mm間隔 帯筋: D16, 250mm間隔	37kg/m <sup>3</sup>

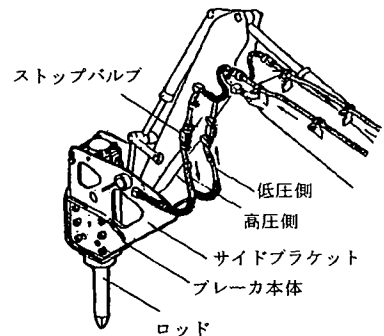


図-1 油圧ブレイカ模式図

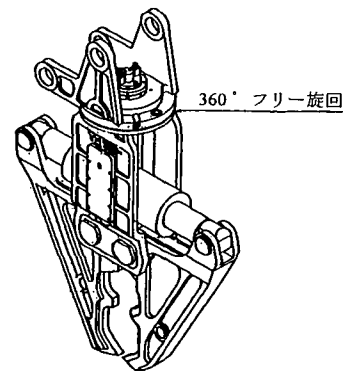


図-2 破壊機模式図

表-3 油圧ブレイカの基本仕様

	仕様
全長	1,986 mm
重量	1,250 kgf
打撃数	390~580 bpm
使用油圧	130~150 kgf/cm <sup>2</sup>

形枠を用いて発生したコンクリート廃棄物の粒径を確認した。

柱状の無筋試験体については、目標最大粒径毎に2試験体を油圧ブレーカと破壊機で解体した。また、有筋の柱状試験体および壁状試験体については、目標最大粒径を30cmとして2および15試験体を油圧ブレーカのみで解体した。

(4) 粒度試験結果

粒度試験に用いたコンクリート廃棄物の重量は、柱状試験体が2,700~3,000kgf、壁状試験体が950~1,200kgfである。粒径の分別は、内法50cm、30cm、10cmの正方形枠を用いて、粒径が50cm以上、30~50cm、10~30cm、10cm以下の3種類になるように人力で行った。10cm以下のものについては、幅75cm×長さ200cmの金網製ふるいが取付け可能な電動式ふるい機を用いて分別した。使用したふるいは、ふるい目10cm、4cm、0.5cmの3種類である。また、分別後の粒径毎の重量は、最大荷重2,000kgf用ロードセルと最大荷重100kgf用台ばかりを用いて測定した。

柱状と壁状試験体に対し、油圧ブレーカと破壊機を用いて解体したコンクリート廃棄物の粒度特性を表-6および図-3~図-6に示す。なお、有筋の試験体は、解体時のロード振動と大きな破碎圧等によって鉄筋からコンクリートが剥離し、鉄筋に付着した状態のコンクリート廃棄物はほとんど生じなかった。

a) 柱状無筋試験体

油圧ブレーカと破壊機を用いて、目標最大粒径50cmおよび30cmで解体した無筋試験体については、平均粒径、均等係数、曲率係数等に有意な差はなく、解体工法による粒度特性に大きな相違はなかった。また、両試験ケースとも、その粒度分布は解体目標最大粒径よりやや小さな粒径付近で急激に立ち上がり、かなり粒度分布の悪いコンクリート廃棄物となった。

目標最大粒径10cmで解体した無筋試験体については油圧ブレーカと破壊機の平均粒径、均等係数、曲率係数に差があり、解体工法の相違によって粒度特性が大きく異なる結果となった。粒度の分布形状は、油圧ブレーカによるものは比較的なだらかな良い粒度分布となったが、破壊機によるものは目標最大粒径50cmと30cmの無筋試験体と同様の傾向を示し、粒度分布が悪かった。一般の土質試験においては、均等係数が10以上、曲率係数が1~3の場合、「粒度分布が良い(締固めし易い)<sup>5)</sup>」と言われており、油圧ブレーカで目標最大粒径10cmの無筋試験体を解体したときの粒度分布は、これらの範囲内となった。破壊機により解体したときの平均粒径は19cmとなり、目標最大粒径10cmを大きく上回った。これは、試験体の形状寸法から開口幅85cm

表-4 破壊機の基本仕様

仕 様	
全 長	2,050 mm
重 量	1,200 kgf
最大開口幅	850 mm
最小開口幅	20 mm
先端爪破碎力	60 tf
中間爪破碎力	90 tf
使用油圧	280 kgf/cm <sup>2</sup>

表-5 試験ケースと解体試験体数

解体目標最大粒径		50cm	30cm	10cm	
柱状	破壊機	無筋	2体	2体	2体
	油圧	無筋	2体	2体	2体
壁状	ブレーカ	鉄筋量	143kg/m <sup>3</sup>	2体	—
		鉄筋量	37kg/m <sup>3</sup>	—	15体

表-6 コンクリート廃棄物の粒度特性

解体目標最大粒径		50cm	30cm	10cm		
柱	破壊機	無筋	D <sub>50</sub>	37cm	29cm	19cm
			U <sub>c</sub>	1.3	2.8	5.8
			U <sub>c'</sub>	0.9	1.4	2.5
			T	13分/m <sup>3</sup>	22分/m <sup>3</sup>	26分/m <sup>3</sup>
状	油圧	無筋	D <sub>50</sub>	44cm	15cm	2.9cm
			U <sub>c</sub>	1.8	2.8	23.4
			U <sub>c'</sub>	3.3	1.4	1.2
			T	13分/m <sup>3</sup>	17分/m <sup>3</sup>	52分/m <sup>3</sup>
	ブレーカ	鉄筋量 143 kg/m <sup>3</sup>	D <sub>50</sub>	—	8.5cm	—
			U <sub>c</sub>	—	28.3	—
			U <sub>c'</sub>	—	1.2	—
			T	—	26分/m <sup>3</sup>	—
壁	ブレーカ	鉄筋量 37 kg/m <sup>3</sup>	D <sub>50</sub>	—	10.2cm	—
			U <sub>c</sub>	—	17.6	—
			U <sub>c'</sub>	—	1.8	—
備 考	・本データは表-5に示した試験体数の平均値を示す。 ・D <sub>50</sub> は平均粒径、U <sub>c</sub> は均等係数、U <sub>c'</sub> は曲率係数を表す。 ・Tは1m <sup>3</sup> 当たりの解体に要した時間(分)を示す。					

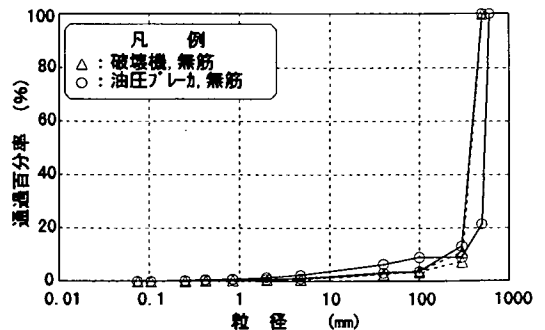


図-3 柱状試験体の粒度分布(目標最大粒径50cm)

の比較的大型機種種の破壊機を使用したことから、10cmと比較的小さい目標最大粒径に対して適用性が悪かったためと考えられる。また、表-6に示すように、油圧ブレーカで目標最大粒径10cmとするために要した1m<sup>3</sup>当たりの解体時間は52分となり、目標最大粒径30cmの場合の3倍の時間を要した。なお、破壊機を用いた場合の解体時間は26分となり、油圧ブレーカと比較して小さな値となっているが、これは本仕様の破壊機でこれ以上解体作業を続けても粒径が小さくならないことが判明し、解体作業を打ち切ったためである。

以上の結果から、コンクリートの圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup> (49N/mm<sup>2</sup>)程度の原子力発電設備のコンクリート部材無筋部を、油圧ブレーカと破壊機で最大粒径30cm以上で解体した場合には、かなり粒度分布の悪いコンクリート廃棄物が発生するが、油圧ブレーカで最大粒径10cm程度に解体した場合には、比較的なだらかで良い粒度分布のコンクリート廃棄物が発生すると想定される。

**b) 柱状有筋試験体と無筋試験体の比較**

目標最大粒径30cmとして油圧ブレーカで解体した無筋と有筋試験体を比較すると、平均粒径が15.0cmに対し8.5cm、均等係数が2.8に対し28.3、曲率係数が1.4に対し1.2となり、有筋試験体は無筋試験体と比べて小粒径のものが多く、目標最大粒径10cmの無筋試験体と同様に、比較的なだらかで良い粒度分布となった。これは、解体時の油圧ブレーカのロッドの振動によって比較的密に配筋された鉄筋周辺のコンクリートが鉄筋から剝離し、小粒径のコンクリート廃棄物が生じたためと考えられる。

したがって、本試験と同程度のコンクリート強度と配筋量を有する原子力発電設備のコンクリート構造物を、最大粒径30cm程度に油圧ブレーカで解体した場合には、比較的粒度分布の良いコンクリート廃棄物が発生すると想定される。

**c) 壁状試験体と柱状試験体の比較**

目標最大粒径30cmの壁状有筋試験体を油圧ブレーカで解体した場合の粒度分布と平均粒径の度数分布を図-6と図-7に示す。図-6には目標最大粒径30cmの柱状の無筋試験体と有筋試験体を油圧ブレーカで解体した場合の粒度分布も併記した。

表-6に示すように、壁状有筋試験体の平均粒径、均等係数、曲率係数は、柱状有筋試験体の粒度特性に近く、発生するコンクリート廃棄物の粒子形状にも相違がなかった。また、図-6に示すように、壁状試験体の粒度分布は、ほぼ柱状の有筋試験体と無筋試験体の粒度分布の範囲内に分布した。今回の壁状試験体の鉄筋量は37kg/m<sup>3</sup>であり、柱状の無筋試験体と鉄筋量が143kg/m<sup>3</sup>とかなり密に配筋されている有筋試験体の

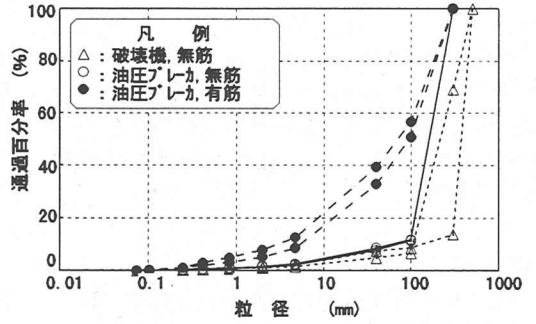


図-4 柱状試験体の粒度分布(目標最大粒径30cm)

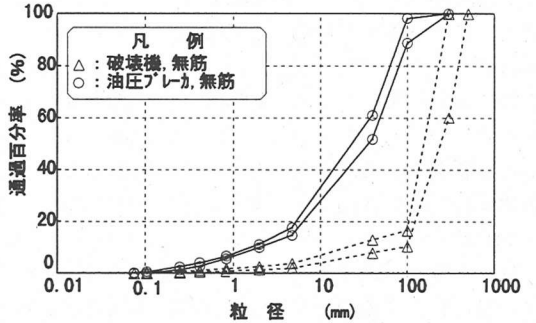


図-5 柱状試験体の粒度分布(目標最大粒径10cm)

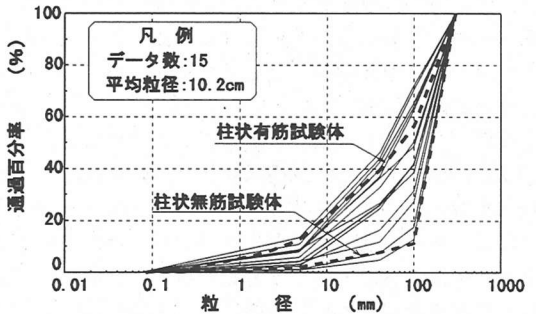


図-6 壁状試験体の粒度分布(目標最大粒径30cm)

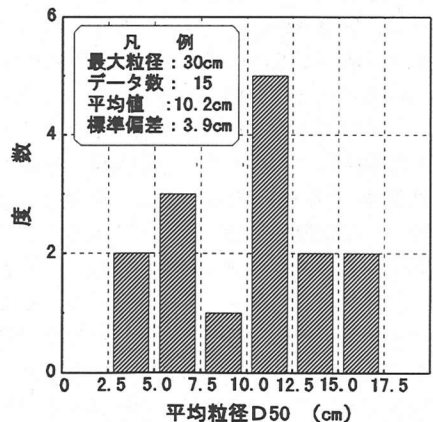


図-7 壁状試験体の平均粒径(目標最大粒径30cm)

間にあり、鉄筋量が多いと小粒径のものが多くなる傾向があると考えられる。

したがって、原子力発電設備の鉄筋量が $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度以下のコンクリート構造物を、最大粒径 $30\text{cm}$ 程度に油圧ブレーカで解体したときの粒度分布は、ほぼ図-6に示す柱状有筋試験体と無筋試験体の範囲内にあるものと想定される。

#### d) コンクリート廃棄物とロックフィル材料の比較

代表的なダムのロックフィル材料の粒度分布を図-8に示す。同図と図-3～図-6のコンクリート廃棄物の粒度分布を比較した場合、ロック材料は粒度分布が比較的良く、目標最大粒径 $30\text{cm}$ の柱状有筋試験体の粒度分布とほぼ一致する。

一般に、ロック材料は良質な原石山を発破で掘削し製造されるが、

- ①岩自体に目に見えない多数の節理が存在すること
  - ②発破の影響によって、これらの節理に沿って剥離し比較的小粒径の材料が生じやすいこと
- 等<sup>7)</sup>の理由から比較的粒度分布が良い材料になると考えられる。一方、コンクリート廃棄物の柱状有筋試験体の粒度分布が良い理由としては、コンクリートと鉄筋の付着面が見掛け上、岩の節理と同様の効果を与え、比較的小粒径の廃棄物が生じるためと考えられる。

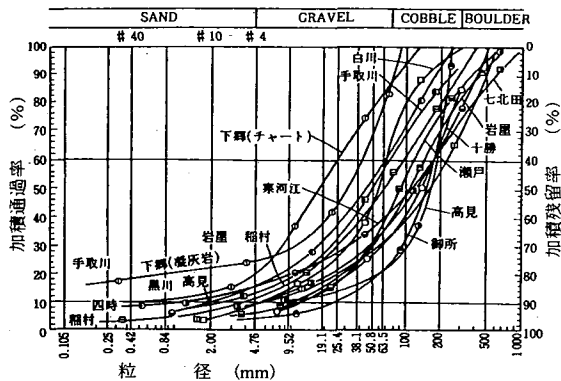


図-8 代表的なロックフィル材料の粒度分布<sup>6)</sup>

用いる発破の影響や岩自体に内在する節理等によって締固め時に破碎しやすいとされている。材料の破碎率が大きい場合には、締固め時の粒度分布は締固め前と異なることから、締固め特性も変化する。そこで、コンクリート廃棄物の締固め前後の粒度分布を測定し、破碎状況を把握する。

#### b) 試験土槽の適用性

試験土槽を用いて締固め試験を実施するに当たっては、コンクリート廃棄物の締固め特性に影響を与えない適切な大きさの土槽を選定する必要がある。そこで、コンクリート廃棄物の最大粒径と試験土槽径の関係を把握し、適切な試験条件を設定する。

#### c) タンパと振動ローラを用いた締固め特性

締固め機械と転圧回数・転圧時間、最大粒径と層厚を変化させ、コンクリート廃棄物の基本的な締固め特性を把握する。また、コンクリート廃棄物自体が十分締固まり沈下等が生じないような表乾密度と層厚、転圧回数等を把握する。

#### (3) 試験材料と締固め方法

締固めに用いたコンクリート廃棄物の試験材料は、柱状試験体を油圧ブレーカで解体したときの粒度分布のものとした(図-3～図-5参照)。また、一般の土質材料の締固め試験においては、含水比の相違が乾燥密度等の結果に大きく影響するが、今回の試験材料については、コンクリート廃棄物であることを考慮し、表乾状態で締固め試験を実施した。

締固め方法は、建設工事で最も一般的に使用されているタンパ(TV-80N:自重 $84\text{kgf}$ )とフラット型振動ローラ(SV510DV:総重量 $11.4\text{tf}$ )を用いることを基本とした<sup>4)</sup>が、締固め前後の破碎状況を把握するに当たっては、鉄輪の表面に幅 $10\text{cm}$ ×長さ $12\text{cm}$ ×高さ $10\text{cm}$ の突起を装着したタンピング型振動ローラ(SV510TV

### 3. 締固め特性

#### (1) 目的

極低レベルの放射性コンクリート廃棄物を埋設処分する際は、空隙が残らないように措置することとされている。そして空隙が残らないとは、

- ①コンクリート廃棄物自体が十分締め固まっており、安定性が確保されていること
  - ②コンクリート廃棄物上に敷設された覆土材が、埋設処分完了後、コンクリート廃棄物内の空隙に侵入し地表面に沈下や亀裂が生じないこと
- と解釈されている。

一方、コンクリート廃棄物については、粒度特性のみならず、締固め特性を把握した事例もほとんど見当たらない。そこで、本研究では、まず、上記2要件のうち①の要件に着目し、コンクリート廃棄物の基本的な締固め特性を明らかにすることを目的として、主に鋼製の試験土槽を用いた各種試験を実施した。

#### (2) 試験項目

締固め特性に関する試験項目は以下の3項目とする。

##### a) コンクリート廃棄物の破碎状況

一般に、ロック材料等の粗粒材料は、材料作成時に

: 総重量11.7tf)も使用し、フラット型振動ローラとの試験結果を比較した。タンパと振動ローラの基本仕様を表-7および表-8に示す。

タンパによる締固め試験は、コンクリート土間上に設置した試験土槽内に所定の重量の試験材料を投入後、その上からタンパで締固めた。振動ローラによる締固め試験は、地中に試験土槽を埋設し、この土槽内に所定の重量の試験材料を投入後、その上を振動ローラを走行させ締固めた。

また、締固め時の表乾密度は、コンクリート廃棄物の高さを測定して得た体積と試験材料の投入重量を用いて算定した。したがって、表乾密度の値は全体積の平均密度を表し、試験体の深さ方向の変化は考慮されていない。

#### (4) 試験ケース

試験ケースを表-9に示す。同表に示すように、破碎状況を把握する試験以外は、最大粒径が50cm, 30cm, 30cm(有筋), 10cmの4種類のコンクリート廃棄物をタンパとフラット型振動ローラで表面沈下量がほぼ収束するまで締固めた。また、試験土槽については、土槽直径がコンクリート廃棄物の最大粒径の4倍以上になるものを基本として、直径200cm, 120cm, 50cmのものを使用した。コンクリート廃棄物の層厚については、事前に実施した締固め試験結果を踏まえて、締固め後

表-7 タンパの基本仕様

	仕様
型式	TV-80N
重量	84 kgf
打撃数	550~575 vpm
打撃ストローク	40~60 mm
打撃板の寸法	L : 33.3 cm, W : 30 cm
前進速度	530~690 m/h

表-8 振動ローラの基本仕様

	フラット型	タンピング型
型式	SV510DV	SV510TV
総重量(kgf)	11,400	11,700
前輪荷重(kgf)	6,500	6,700
後輪荷重(kgf)	4,900	5,000
起振力(kgf)	17,000/23,000	17,000/23,000
起振数(vpm)	2,400/1,800	2,400/1,800
全長(mm)	5,680	5,680
全幅(mm)	2,350	2,350

の仕上がり厚が約50cmと100cmになるように、約65cmと120cmとした。

また、破碎状況を把握するに当たっては、締固め機械はフラット型とタンピング型の振動ローラを用いた。

表-9 締固め特性試験ケース一覧

試験番号	締固め方法	最大粒径 Dmax (cm)	寸法 (cm)		試験項目			備考				
			平面	層厚	破碎状況	$\phi/D_{max}$	締固め特性					
1	タンパ	50	$\phi$ 200	120	-	-	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験項目の内の <math>\phi/D_{max}</math> は、試験土槽直径とコンクリート廃棄物最大粒径の比を示す。</li> <li>寸法の層厚は、締固め前の層厚を示す。</li> <li>タンパによる破碎状況を把握するコンクリート廃棄物の粒度分布は、柱状試験体を解体した時のものとする。</li> <li>一方、振動ローラによる破碎状況を把握するコンクリート廃棄物の粒度分布は、10~30cmの単粒度のものとする。</li> </ul>				
2					-	-	○					
3		30			$\phi$ 200	120	-		-	○		
4							-		-	○		
5		30					$\phi$ 120		65	-	-	○
6										-	○	○
7		有筋	$\phi$ 50	65						-	○	○
8										-	○	○
9		10			$\phi$ 200	65				-	-	○
10										-	○	○
11							-		○	○		
12							-		○	○		
13	振動ローラ	50	$\phi$ 200	120	-	-	○					
14					-	-	○					
15		30			65	50	-	-	○			
16							-	-	○			
17		有筋	幅240 長さ300	50			○	-	-			
18		10					○	-	-			
19		タンピング	30	幅240 長さ300	50	○	-	-				

振動ローラによる破碎状態については、コンクリート土間上に10~30cmの粒度のみのコンクリート廃棄物を約50cmの層厚に敷均し、2往復転圧(4回転圧)した後、破碎されて生じた10cm以下の通過百分率を把握した。

### (5) コンクリート廃棄物の破碎状況測定結果

一般に、フィルダムのロック材料は内在する節理等によって比較的破碎率が高い<sup>9)</sup>とされており、その一例を図-9に示す。図-9は一軸圧縮強度が55.4~401.4kgf/cm<sup>2</sup>(5.4~39.3N/mm<sup>2</sup>)の新鮮な泥岩をタンピング型振動ローラ(自重19tf)で12回転圧したもので、均等係数10以下の転圧前の粒度分布が転圧によって破碎・細粒化し、均等係数20程度の粒度分布になったと報告されている<sup>9)</sup>。

振動ローラによる10~30cm粒度のみのコンクリート廃棄物の締固め前後の粒度分布を図-10に示す。この試験結果はコンクリート土間上に比較的単粒度の廃棄物をまき出し締固めたものであり、実際の締固め条件よりもかなり破碎しやすい状況となっている。しかし、この条件で破碎して生じる10cm以下のコンクリート廃棄物は1.7~2.5%となり、極めて小さい値となった。これは、コンクリート廃棄物に内在する亀裂等が無く、圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>(49N/mm<sup>2</sup>)程度と比較的大きかったためと考えられる。また、フラット型とタンピング型の振動ローラによる破碎率を比較すると、突起のあるタンピング型の方が若干大きくなっているがその差は小さいことがわかる。

以上の結果から、原子力発電設備を解体する際に発生する圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>(49N/mm<sup>2</sup>)程度と比較的大きなコンクリート廃棄物を振動ローラで締固めた場合には、コンクリート廃棄物はあまり破碎せず、締固め前後でほとんど粒度分布が変化しないものと想定される。

### (6) コンクリート廃棄物最大粒径と試験土槽径

最大粒径30cm(有筋)と10cmのコンクリート廃棄物について、締固め時の試験土槽径の影響を把握するため、タンパを用いて締固めた土槽直径/最大粒径と表乾密度の関係を整理し、図-11に示す。最大粒径10cmの無筋試験体の場合、土槽直径/最大粒径が5程度以上であれば、ややバラツキはあるもののほぼ一定の表乾密度となり、土槽の影響は少ないものと考えられる。最大粒径30cmの場合には、土槽直径/最大粒径の最大値が6.67と小さく明確とはなっていないが、ほぼ同様の傾向が見受けられる。土質試験法の突固めによる土の締固め試験<sup>9)</sup>によれば、モールド内径は試料の最大粒径の4倍以上必要とされている。したがって、コンクリート廃棄物の締固めにおいてもほぼ同様の傾向があ

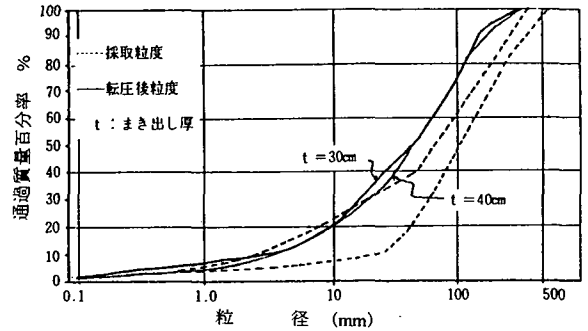


図-9 ロック材料の破碎前後の粒径加積曲線の例<sup>9)</sup>

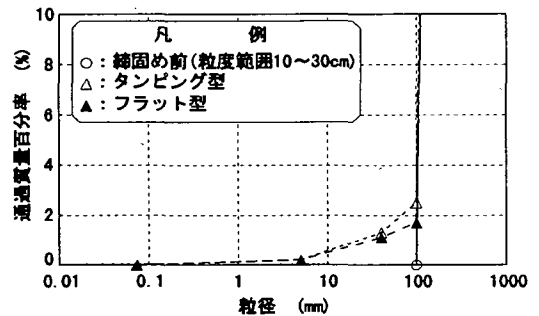


図-10 振動ローラによる締固め前後の粒度分布

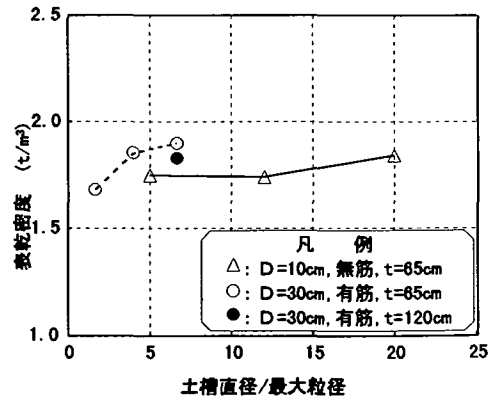


図-11 土槽直径/最大粒径と表乾密度の関係

り、同基準を適用しても良いものと考えられる。

### (7) 締固め試験結果

#### a) 転圧時間・転圧回数と表乾密度

最大粒径50cm, 30cm, 30cm(有筋), 10cmのコンクリ

ート廃棄物をタンパと振動ローラで締固めた時の転圧時間(単位面積当たり)・転圧回数と表乾密度の関係を図-12～図-15に示す。同図から、タンパを用いた場合には、土槽直径や層厚の相違にかかわらず、1m<sup>2</sup>当たり200秒以上締固めても顕著な密度増加はなく、この値が締固め時間の目安になると考えられる。また、本仕様の振動ローラを用いた場合には、10回(往復5回)程度締固めれば十分と考えられる。

一般に、粗粒材料の場合には、乾燥密度と転圧回数Nとの関係は式(1)の双曲線で精度良く近似できるとされている<sup>10)</sup>。式(1)の回帰係数aは転圧効率を示す係数であり、この値が大きいほど転圧初期の密度上昇が緩やかで、転圧効率が悪くなる。また、b値の逆数は転圧回数Nを無限大にした時の密度増分極限値を示し、この値によって極限密度が推定できる。

$$\rho_d(N) = \rho_{d0} + \frac{N}{a + bN} \quad \text{または} \quad \frac{1}{\Delta\rho} = \frac{a}{N} + b \quad (1)$$

ここに、 $\rho_{d0}$  : 初期密度(t/m<sup>3</sup>),

$\rho_d(N)$  : N回転圧後の密度(t/m<sup>3</sup>),

$\Delta\rho$  :  $\rho_d(N) - \rho_{d0}$ , N : 転圧回数,

a, b : 回帰係数

タンパと振動ローラの転圧時間・転圧回数と表乾密度の関係を整理し、表-10に示す。同表より、コンクリート廃棄物の転圧時間・転圧回数と表乾密度の関係も式(1)の双曲線式で近似できることがわかる。また、タンパと振動ローラの締固め方法の相違にかかわらず、粒度分布の良い最大粒径30cm(有筋)と10cmのコンクリート廃棄物と比較して、粒度分布が悪い最大粒径50cmと30cmのものはかなりa値が大きくなり、転圧効率が悪いことがわかる。

これらの締固め試験結果を表-11に示す。締固め後の表乾密度については、粒度分布の悪い最大粒径50cmと30cmのコンクリート廃棄物が1.335～1.474t/m<sup>3</sup>(タンパ)、1.455～1.466t/m<sup>3</sup>(振動ローラ)と小さい値を示すのに対し、粒度分布の良い30cm(有筋)と10cmのコンクリート廃棄物は1.681～1.898t/m<sup>3</sup>(タンパ)、1.847～1.892t/m<sup>3</sup>(振動ローラ)とかなり大きな値となった。また、締固め前後の表乾密度を比較すると、最大粒径50cmと30cmのコンクリート廃棄物がタンパで10%以下、振動ローラで15%以下の増加率であるのに対し、30cm(有筋)と10cmのコンクリート廃棄物はタンパで10～20%程度、振動ローラで20%程度増加しており、コンクリート廃棄物も一般の土質材料や粗粒材料と同様に、粒度分布の良い方が締固め効果が顕著に表れる。

締固め後の密度と近似式による極限密度を比較した場合、最大粒径50cmの1ケースを除けば締固め後の表乾密度は極限密度のほぼ95%以上に達しており、十分締固まった状態になっていることが分かる。

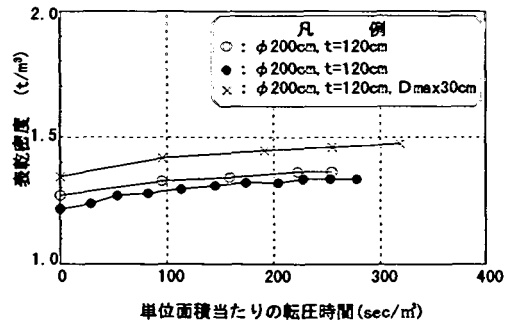


図-12 タンパによる転圧時間と表乾密度(Dmax50cm)

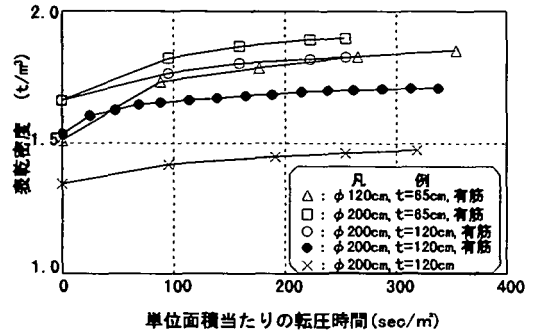


図-13 タンパによる転圧時間と表乾密度(Dmax30cm)

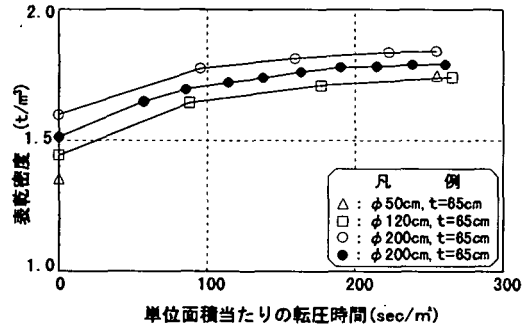


図-14 タンパによる転圧時間と表乾密度(Dmax10cm)

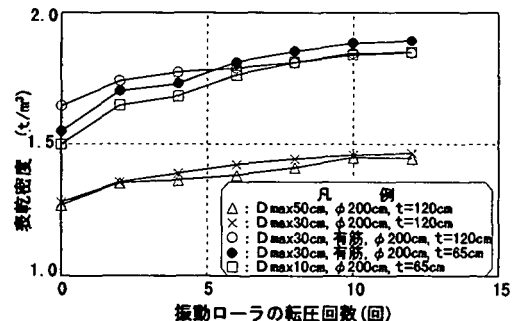


図-15 振動ローラによる転圧回数と表乾密度



表-10 近似式の回帰係数と締固め特性極限值

試験 番号	締固 方法	Dmax (cm)	寸法 (cm)		$\rho_o$ (t/m <sup>3</sup> )	回帰係数		$\frac{1}{b}$	相関係数 $\gamma$	N無限大の極限值		
			平面	層厚		a	b			$\rho_\infty$ (t/m <sup>3</sup> )	$e_\infty$	$n_\infty$ (%)
1	タ ン パ	50	φ 200	120	1.216	1200	2.60	0.384	0.959	1.600	0.438	30.4
2					1.270	1060	6.55	0.153	0.968	1.423	0.616	38.1
3		30			1.344	805	5.32	0.188	0.998	1.532	0.501	33.4
4		30			1.533	241	5.24	0.191	0.980	1.724	0.334	25.0
5					1.661	557	3.76	0.266	0.980	1.927	0.194	16.2
6		有筋			φ 120	1.661	310	2.93	0.341	0.996	2.002	0.149
7			1.509	180		2.46	0.406	0.983	1.915	0.201	16.7	
8			φ 50	1.395		-	-	-	-	-	-	-
9			10	φ 200	1.511	279	2.37	0.422	0.993	1.933	0.190	16.0
10				1.597	237	3.14	0.319	0.998	1.916	0.200	16.7	
11				φ 120	1.442	216	2.52	0.396	0.999	1.838	0.251	20.1
12		φ 50	1.352	-	-	-	-	-	-	-		
13	フ振	50	φ 200	120	1.268	15.2	5.12	0.195	0.817	1.463	0.572	36.4
14	ラ動	30			1.280	19.5	3.78	0.265	0.993	1.545	0.489	32.8
15	ツロ	30			1.645	13.2	4.21	0.237	0.958	1.882	0.222	18.2
16	ト   有筋	10		65	1.548	9.03	2.32	0.432	0.903	1.980	0.162	13.9
17	型ラ				1.499	9.67	2.19	0.457	0.925	1.956	0.176	15.0

備考  
 ・ Dmaxはコンクリート廃棄物の最大粒径を示す。  
 ・  $\rho_o$ ,  $e_o$ ,  $n_o$ は表乾密度, 間隙比, 間隙率を示す。また, 添字の0は締固め前,  $\infty$ は近似式を用いて  
 転圧時間・転圧回数Nを無限大としたときの極限值を示す。  
 ・  $e_o$ ,  $n_o$ を算定する際に用いるコンクリート廃棄物の比重G<sub>s</sub>は, 試験結果から2.30を用いた。

表-11 締固め特性試験結果一覧

試験 番号	締固 方法	Dmax (cm)	寸法 (cm)		締固め前			締固め後			表乾密度比	
			平面	層厚	$\rho_o$ (t/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$n_o$ (%)	$\rho_f$ (t/m <sup>3</sup> )	$e_f$	$n_f$ (%)	$\rho_f/\rho_o$	$\rho_f/\rho_\infty$
1	タ ン パ	50	φ 200	120	1.216	0.891	47.1	1.335	0.723	42.0	1.098	0.834
2					1.270	0.811	44.8	1.363	0.687	40.7	1.073	0.958
3		30			1.344	0.711	41.6	1.474	0.560	35.9	1.097	0.962
4		30			1.533	0.500	33.3	1.709	0.346	25.7	1.115	0.991
5					1.661	0.385	27.8	1.827	0.259	20.6	1.100	0.948
6		有筋			φ 120	1.661	0.385	27.8	1.898	0.212	17.5	1.143
7			1.509	0.524		34.4	1.853	0.241	19.4	1.228	0.968	
8			φ 50	1.395		0.649	39.3	1.681	0.368	26.9	1.205	-
9			10	φ 200	1.511	0.522	34.3	1.790	0.285	22.2	1.185	0.926
10				1.597	0.440	30.6	1.841	0.249	20.0	1.153	0.961	
11				φ 120	1.442	0.595	37.3	1.741	0.321	24.3	1.207	0.947
12		φ 50	1.352	0.701	41.2	1.749	0.315	24.0	1.294	-		
13	フ振	50	φ 200	120	1.268	0.814	44.9	1.455	0.581	36.7	1.147	0.995
14	ラ動	30			1.280	0.797	44.3	1.466	0.569	36.3	1.145	0.949
15	ツロ	30			1.645	0.398	28.5	1.847	0.245	19.7	1.123	0.981
16	ト   有筋	10		65	1.548	0.486	32.7	1.892	0.216	17.7	1.222	0.956
17	型ラ				1.499	0.534	34.8	1.848	0.245	19.7	1.233	0.945

備考  
 ・ Dmaxはコンクリート廃棄物の最大粒径を示す。  
 ・  $\rho_o$ ,  $e_o$ ,  $n_o$ は表乾密度, 間隙比, 間隙率を示す。また, 添字の0は締固め前, fは締固め後,  $\infty$ は近  
 似式を用いて転圧時間・転圧回数Nを無限大としたときの極限值を示す。  
 ・  $e_o$ ,  $n_o$ を算定する際に用いるコンクリート廃棄物の比重G<sub>s</sub>は, 試験結果から2.30を用いた。

表-12 締固め方法・層厚の相違による表乾密度比

	表乾密度 (t/m <sup>3</sup> )		層厚120cm と65cmの比
	層厚65cm	層厚120cm	
タンパ	1.898	1.709	0.900
		1.827	0.963
振動ローラ	1.892	1.847	0.976
振動ローラと タンパの比	0.997	1.081	—
		1.011	

注)最大粒径30cm(有筋), 土槽径φ200cmの場合

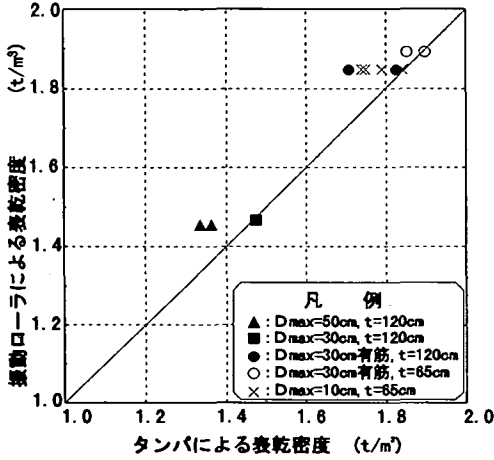


図-16 締固め方法の相違による表乾密度の比較

b) 締固め方法と層厚

タンパとフラット型振動ローラで締固めたコンクリート廃棄物の表乾密度を表-12および図-16に示す。

両方法の締固め原理はタンパが主として衝撃力、振動ローラが振動である。本試験ではタンパより振動ローラによる表乾密度がやや大きくなる傾向となり、その増加率は0~10%程度であった。したがって、コンクリート廃棄物の定性的な締固め特性を把握する場合には、締固め機械としてタンパも十分適用性があると考えられる。

直径200cmの試験土槽を用いた最大粒径30cm(有筋)のコンクリート廃棄物の層厚と、締固め後の表乾密度、間隙比、間隙率の関係を図-17~図-19に示す。同図中には、表-13に示す代表的なフィルダムのロック材材料の締固め設計値も併記した。

重要構造物であるダムは締固め設計値は、自沈はもとより、すべり破壊が生じない強度定数を確保するため、施工管理上設定されるものである。したがって、この設計値を満足すれば、放射性コンクリート廃棄物自体が「十分締め固まっており、安定性が確保されていること」の要件を十分満たすと考えられる。

表-13 主なフィルダムロック材の表乾密度設計値<sup>1)2)</sup>とコンクリート廃棄物の締固め後表乾密度

		Dmax(cm)	G <sub>s</sub>	ρ <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> )	e	n(%)
A	ダム	100*	2.63	1.83	0.434	30.3
B	ダム	100	2.63	2.00	0.315	24.0
C	ダム	100	2.64	2.00	0.320	24.2
D	ダム	30*	2.6以上	2.00	0.360	26.5
E	ダム	40	2.81	1.93	0.456	31.3
F	ダム	100	2.45	1.83	0.338	25.2
廃棄物	タンパ	30	2.30	1.709	0.346	25.7
				1.827	0.259	20.6
				1.898	0.212	17.5
				1.847	0.245	19.7
				1.892	0.216	17.7
備考				・Dmax, G <sub>s</sub> , ρ <sub>d</sub> , e, nは、ロック材の最大粒径, 比重, 乾燥密度, 間隙比, 間隙率を示す。 ・Dmaxの*は粒径加積曲線からの推定値。 ・また、全ダム材料とも粒度分布は良い。 ・廃棄物はコンクリート廃棄物を、ローラはフラット型振動ローラを示す。		

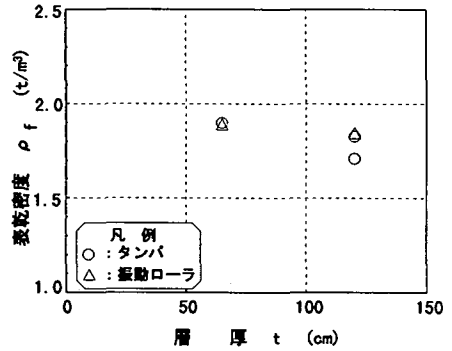


図-17 層厚と表乾密度(Dmax30cm, φ200cm)

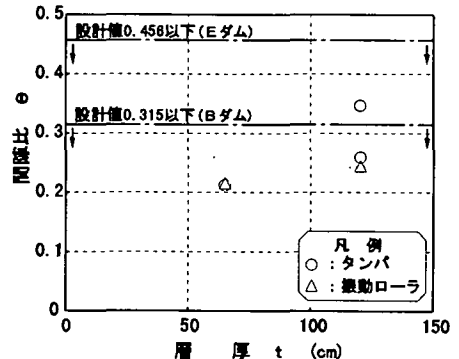


図-18 層厚と間隙比(Dmax30cm, φ200cm)

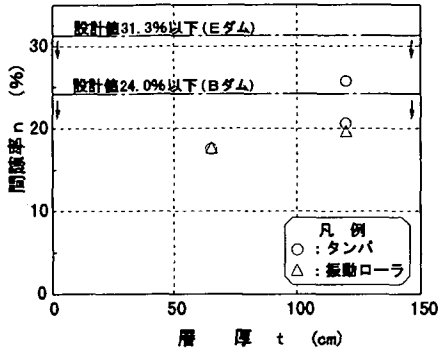


図-19 層厚と間隙率(Dmax30cm, φ200cm)

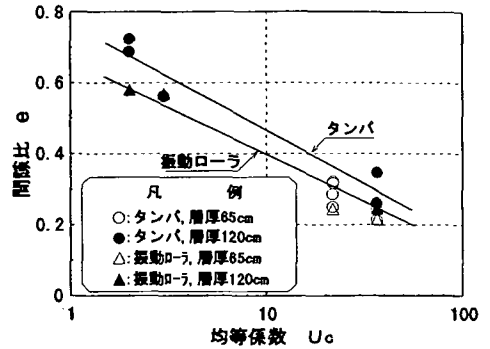


図-21 均等係数と間隙比の関係

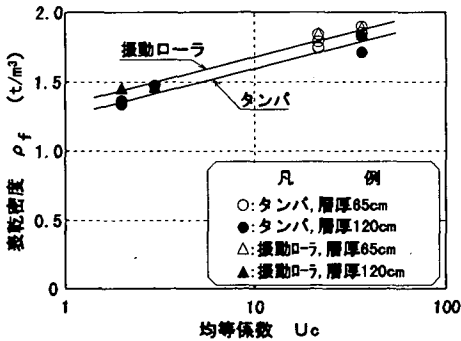


図-20 均等係数と表乾密度の関係

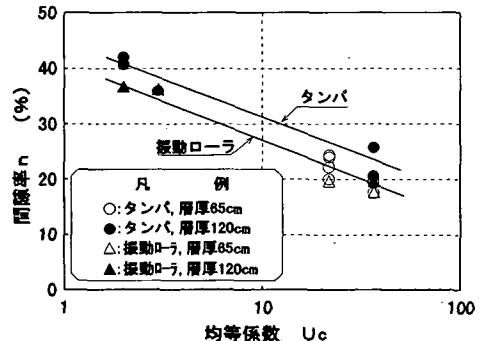


図-22 均等係数と間隙率の関係

層厚と締め後の表乾密度の関係は、層厚が大きいかほど表乾密度は小さくなる傾向がある。タンパの場合、層厚120cmの締め後の表乾密度は65cmの値の90%程度まで低下するが、振動ローラの場合には低下の傾向がやや小さい。また、締め後の表乾密度をロック材料の最大設計値と比較すると、全て下回った。これは、ロック材料の比重が2.6程度であるのに対し、コンクリート廃棄物の比重が2.3と小さいために生じた結果であり、材料間の空隙を示す指標である間隙比と間隙率で整理したものは、ほぼ設計値を満足した。

したがって、コンクリート廃棄物の締め管理値にロック材料の設計値を適用する場合には、比重の相違を考慮し、表乾密度ではなく間隙比や間隙率で評価する必要があると考えられる。また、本仕様の振動ローラで最大粒径30cm(有筋)のコンクリート廃棄物を締める場合には、層厚120cm程度まで上記設計値を満足することから、層厚の管理値としては120cmを目安にすれば良いと考えられる。

c) 均等係数と間隙率

均等係数と表乾密度、間隙比および間隙率の関係を

表-14 均等係数と表乾密度・間隙比・間隙率

		近似式	相関係数
タンパ	表乾密度	$\rho = 0.317 \cdot \log U_c + 1.27$	0.972
	間隙比	$e = -0.301 \cdot \log U_c + 0.768$	0.970
	間隙率	$n = -13.8 \cdot \log U_c + 44.6$	0.972
振動ローラ	表乾密度	$\rho = 0.324 \cdot \log U_c + 1.34$	0.995
	間隙比	$e = -0.277 \cdot \log U_c + 0.681$	0.995
	間隙率	$n = -14.1 \cdot \log U_c + 41.9$	0.995
備考		・ $\rho, e, n, U_c$ は、表乾密度、間隙比、間隙率、均等係数を示す。	

整理し、図-20～図-22に示す。本試験結果のうち、層厚120cmの条件について締め方法毎の関係を直線近似式で整理すると表-14に示すような結果となった。一般に、粗粒材料では均等係数と乾燥密度、間隙比、間隙率等に相関があるとされており<sup>12)</sup>、本試験結果からコンクリート廃棄物についても同様の傾向があることが確認された。

#### 4. まとめ

今後解体される原子力発電設備の極低レベル放射性コンクリートの地中埋設処分形態を想定して、実大のコンクリート構造物を解体し、発生するコンクリート廃棄物の粒度特性と締固め特性を把握した。その結果、以下のことがわかった。

- ①柱状と壁状有筋試験体を油圧ブレーカと破壊機を用いて解体した場合、解体時のロッド振動と大きな破碎圧等によって鉄筋からコンクリートが剥離し、鉄筋に付着した状態のコンクリート廃棄物はほとんど発生しない。
- ②圧縮強度が $500\text{kgf/cm}^2$  ( $49\text{N/mm}^2$ )程度の柱状無筋試験体を、油圧ブレーカと破壊機で最大粒径 $30\text{cm}$ 以上で解体した場合には、粒度分布のかなり悪いコンクリート廃棄物が発生するが、油圧ブレーカで最大粒径 $10\text{cm}$ 程度に解体した場合には、比較的良好な粒度分布のコンクリート廃棄物が発生する。
- ③同程度の圧縮強度と鉄筋量が $140\text{kg/m}^3$ 程度の柱状有筋試験体を、最大粒径 $30\text{cm}$ 程度に油圧ブレーカで解体した場合には、比較的良好な粒度分布のコンクリート廃棄物が発生する。
- ④鉄筋量が $40\text{kg/m}^3$ 程度の壁状試験体を油圧ブレーカで最大粒径 $30\text{cm}$ 程度に解体したときの粒度分布は、柱状無筋試験体の場合と鉄筋量が $140\text{kg/m}^3$ 程度とかなり密に配筋されている有筋試験体の場合の粒度分布曲線との間にあり、鉄筋量が多いと小粒径のものが多くなる傾向がある。
- ⑤圧縮強度が $500\text{kgf/cm}^2$  ( $49\text{N/mm}^2$ )と比較的大きなコンクリート廃棄物を振動ローラで締固めた場合には、コンクリート廃棄物はあまり破碎せず、締固め前後で粒度分布はほとんど変化しない。
- ⑥最大粒径 $30\text{cm}$ (有筋)と $10\text{cm}$ のコンクリート廃棄物をタンパで締固めたときの土槽直径/最大粒径と表乾密度の関係は、土槽直径/最大粒径が $4\sim 5$ 程度以上であれば、ややバラツキはあるもののほぼ一定の表乾密度となり、土槽の影響は少ない。
- ⑦コンクリート廃棄物をタンパと振動ローラで締固める時の転圧時間(単位面積当たり)・転圧回数は、最大粒径、土槽直径、層厚の相違にかかわらず、タンパの場合は $1\text{m}^2$ 当たり $200$ 秒以上、振動ローラの場合は $10$ 回(往復 $5$ 回)以上締固めれば、その後の顕著な密度増加はない。
- ⑧コンクリート廃棄物も一般の土質材料や粗粒材料と同様に、粒度分布の良い方が締固め効果が顕著に表れる。
- ⑨締固め後の密度と近似式による極限密度を比較した

場合、最大粒径 $50\text{cm}$ の $1$ ケースを除けば締固め後の表乾密度は極限密度のほぼ $95\%$ 以上に達しており、十分締固まった状態になる。

- ⑩コンクリート廃棄物の定性的な締固め特性を把握する場合には、締固め機械としてタンパも十分適用性がある。
- ⑪コンクリート廃棄物にロック材料の設計値を適用する場合には、間隙比や間隙率で評価する必要があり、表乾密度を用いるときには比重の相違を考慮して評価する必要がある。本実験に用いた振動ローラで最大粒径 $30\text{cm}$ (有筋)のコンクリート廃棄物を締固める場合には、層厚 $120\text{cm}$ 程度まで上記設計値を満足する。
- ⑫コンクリート廃棄物についてもロック材料等の粗粒材料と同様に均等係数と表乾密度、間隙比、間隙率等に相関がみられる。

**謝辞：**本試験は通産省資源エネルギー庁の委託により(財)原子力環境整備センターが受託し実施したものである。試験を実施するに当たっては、埼玉大学町田教授をはじめとする各検討委員の方々と、(財)原子力環境整備センター研究第一部長平田征弥氏、吉田弘明氏、藪内耕一氏から多くの御指導と御助言をいただいた。また、施工機械等に関しては、銭高組大仲祥二氏、土田広氏から適切なアドバイスをいただいた。ここに、関係各位の皆様深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 通商産業省資源エネルギー庁長官官房総務課編：核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄物埋設の事業に関する規則, pp. 783~821, ケイブン出版, 1995.
- 2) (財)原子力環境整備センター：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験平成5年度報告書, pp. 149~151, 1994.
- 3) (財)原子力環境整備センター：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験平成6年度報告書, pp. 69~90, pp. 150~195, 1995.
- 4) (社)日本建設機械化協会：日本建設機械要覧, 技報堂出版, pp. 618~619, pp. 629~630, pp. 941~947, 1986.
- 5) 土質試験法(第3回改訂版)編集委員会：土質試験の方法と解説, 土質工学会, p. 63, p. 205, 1990.
- 6) 粗粒材料の現場締固め編集委員会：粗粒材料の現場締固め, 土質工学会, p. 4, 1990.
- 7) ロックフィル材料の試験と設計強度編集委員会：ロックフィル材料の試験と設計強度, 土質工学会, pp. 78~83, 1982.

- 8) 大山英治, 谷茂, 豊田光雄, 延山政之: 盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土工事, 土と基礎, Vol. 44, No. 10, Ser. No. 465, pp. 49~54, 1996.
- 9) 堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関する研究委員会: 堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム, 土質工学会, pp. 166~173, 1995.
- 10) 豊田光雄, 山本裕之: フィルダム・ロック材料の現場盛立試験における締固め度の評価方法, 土木技術資料, 37-6, pp. 38~43, 1995.
- 11) 粗粒材料の変形と強度編集委員会: 粗粒材料の変形と強度, 土質工学会, pp. 263~372, 1986.
- 12) 黒島一郎, 中岡時春: 盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例, 土と基礎, Vol. 44, No. 3, Ser. No. 458, pp. 81~86, 1996.
- 13) 粗粒材料の現場締固めの評価に関する研究委員会: 粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム, pp. 51~56, 土質工学会, 1990.
- 14) 厚生省水道環境部: 廃棄物最終処分場指針解説, 全国都市清掃会議, pp. 1~33, 1989.
- 15) 満木泰郎: 放射性廃棄物の処理・処分, 土工学ハンドブック, pp. 1701~1707, 1989.

(1997. 1. 13 受付)

## GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND COMPACTION PROPERTIES OF CONCRETE WASTE

Tadashi TAKATSU, Jun IMAI, Eiji YANAGISAWA, Toshiyuki MITACHI,  
Hideki TADANO and Satoshi ABE

Low level radioactive concrete waste will be produced in future by breaking up the nuclear facilities, and the waste will be disposed in shallow depth of ground. In order to prepare for those situation, it is needed to clarify the gradation and compaction properties of concrete waste.

In this study, full-scale concrete structure specimens were broken up, and a series of grain size analysis and compaction tests on concrete waste were performed. From the test results, close correlations between dry density, void ratio or porosity of the compacted concrete waste and its grainsize distribution were found.