

遠心力締固めによるセグメント製造方法の開発

林 光俊¹・山田 悟²・斉藤 正幸³・小泉 淳⁴

¹正会員 東京ガス株式会社 導管技術開発センター(〒230 横浜市鶴見区末広町1-7-7)

²正会員 日本高圧コンクリート株式会社 東京支社(〒105 港区西新橋1-4-9)

³正会員 工修 日本シールドエンジニアリング株式会社 第二事業部(〒116 荒川区西日暮里2-26-2)

⁴正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169 新宿区大久保3-4-1)

本論文は、従来振動締固めによって製造されてきた鉄筋コンクリートセグメントの製造方法に替わる製法として、ヒューム管などの製造で実績のある遠心締固めを導入するために行ってきた開発の経緯と内容について述べるものである。筆者らはこの研究を通じて、継手面の仕上がり状態が良好で高強度な安定した品質の製品を得るための製造条件(型枠構造、コンクリート打設方法、コンクリート配合条件、遠心力の付加条件等)を確立した。さらに、生産工程と工場設備の検討もあわせて行い、この製造法を実際の製造ラインとして実現させ、鉄筋コンクリートセグメントの製造方法の合理化をはかることができた。

Key Words : shield tunnel, segmental lining, concrete lining, centrifugal compaction, segment with tenon, vibrating compaction, cost reduction, gas pipeline

1. まえがき

現在、上下水道、ガス、電力および通信などの都市部におけるライフラインの管路構築は、路線沿線の環境や深度、規模などに応じて開削工法、推進工法およびシールド工法の中から最適な工法を選定して行われるのが一般的である。近年、都市部の過密化に伴い、浅部地下にライフラインを構築する空間を確保することが困難となりつつあることから、大深度地下空間への適用が可能で周辺環境へ与える影響の少ないシールド工法の需要が増大している。

シールド工法によって構築されるトンネルの覆工部材であるセグメントは、シールドトンネルの建設費の30～40%を占めている。シールド工法の建設費を低減するためには、このセグメントのコストダウンが望まれている。著者らは、ヨーロッパにおいて1970年代から現在に至るまで多くのシールドトンネルに実績のあるほぞセグメントの採用を考えた。これによって継手金具を省略^{1), 2)}し、コンクリートセグメントの締固め方法にわが国で初めて遠心力締固めを採用して製造効率を向上させ、さらに経済的で品質の良いセグメントの開発を目的に研究を進めてきた。

2. 研究の目的と概要

本研究の対象としたほぞセグメントの研究開発の全体概要は、図-1に示すとおりで、セグメント構造の改良(ほぞ形状の導入による継手構造の簡略化、セグメント幅の拡大)と新しいセグメント製造方法の開発に大別できる。このうち、本論文は図-1の破線で示した範囲のセグメント製造方法の研究開発について述べるものである。

ほぞセグメントは、英仏海峡トンネル(仏側)で採用され一躍脚光をあげたが、ヨーロッパにおいては1970年代から現在に至るまで多くのシールドトンネルに使用実績を持つセグメントである。ほぞセグメントの基本構造ならびに各部の名称を図-2に示し、その特徴を以下に示す。

- ①リング継手に凹凸のほぞを設け、継手ボルトを極力減じている。また、この継手ボルトはリング継手、セグメント継手ともに組立用であり、トンネル完成時には撤去される。
- ②セグメント継手はコンクリートの突合わせ構造となっており、ボルト等による引張抵抗は期待していない。
- ③リング継手に作用するジャッキ推力、継手のせん

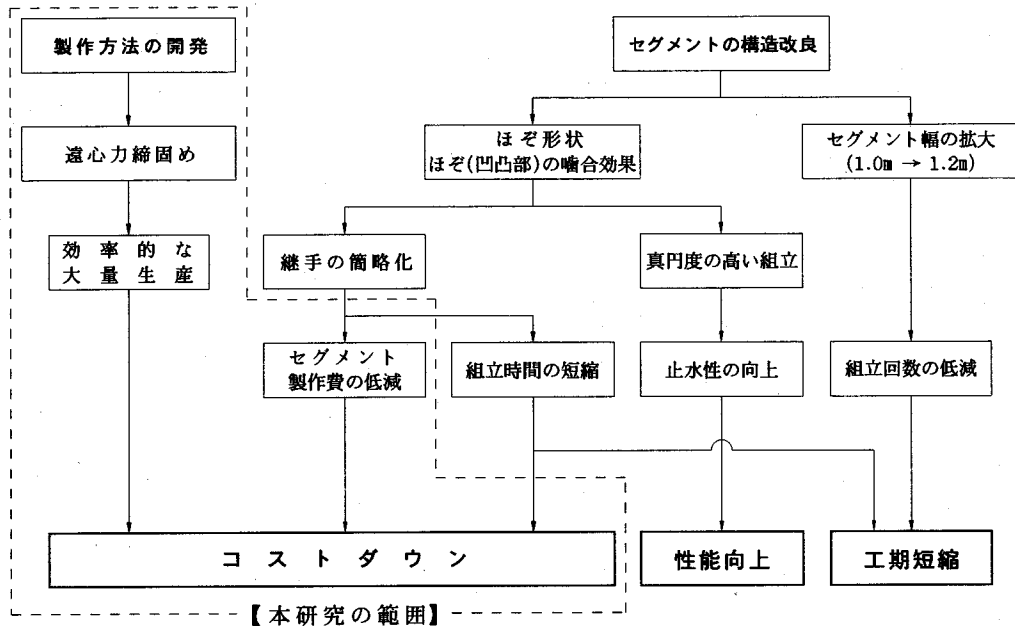


図-1 ほぞセグメントの研究・開発の全体概要

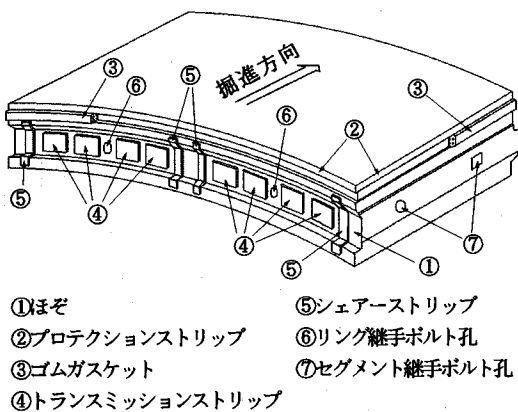


図-2 ほぞセグメントの基本構造および各部の名称

断力に対して、緩衝材（インターレアー：トランсмисシヨンストリップとシェアーストリップの総称）を配置し、応力集中によるコンクリートの損傷を防止している。

このように、ほぞの噛合い効果により継手金具を省略して構造を簡素化できることから、製作費の低減が可能であり、組立時間の短縮も期待できる。

一方、従来のセグメント製造方法は型枠内に打設したコンクリートを振動締固めによって1ピースずつ製作している。セグメント外面は締固め終了後に

荒仕上げ、最終仕上げを行っている。これに対して、ヒューム管は回転する型枠内にコンクリートを投入し、遠心力を作用させることによって締固める方法を採用している。遠心力締固めは、ヒューム管（遠心力鉄筋コンクリート管 JIS A5303）において呼び径 3,000mm まで規格化されており、主要下水道幹線に多くの実績を有し、高密度で水密性に優れたコンクリートが得られることが知られている。そこで著者は、以下の理由から遠心力締固めをセグメント製造に適用することを検討した。

- ①遠心力締固めでは、約1リングを同時に締固めることが可能であるとともに、セグメント外縁部が型枠面となり仕上げ作業が不要なことからセグメントの生産効率が向上する。その結果、セグメント製作費の低減が期待できる。
- ②遠心力締固めによって水密性に優れた高品質なコンクリートセグメントを製作できる。
- ③遠心力によって余剰水を脱水し、水セメント比を減少させることによってコンクリートの強度を増加させることができる。

本論文は、遠心力締固めを用いたセグメント製作方法の開発経緯と内容、遠心力締固めによって製造されたセグメントの品質に関する検討ならびに本製作方法を実際の製造ラインとして実現させるために検討した製造工程と工場設備の開発結果について述べるものである。

3. 遠心力締固めによるセグメント製造の可能性の確認

(1) 従来の遠心力締固めについて

a) 製造方法の概要

遠心力締固めはヒューム管、マンホール、パイプ等のコンクリート二次製品の製造方法として広く普及している方法である。締固めは写真-1に示すように回転する型枠内にスクリー式投入機でコンクリートを投入し、遠心力を作用させることによって行われる。遠心力は以下の3段階に分けて作用させる。また、コンクリート投入は骨材分布を均一にするために、通常2～3層に分けて行い、1層ごとに初速、中速、高速のステップを踏み十分に締固める。

- ①初速：自重によってコンクリートが落下しない程度の遠心力を作用させ、コンクリートを型枠内に均等に行き渡らせる工程である。
- ②中速：コンクリートをある程度締固める遠心力の大きさで、骨材の分離に与える影響が大きい工程である。
- ③高速：コンクリートを締固めるとともに、余剰水を脱水する工程である。

コンクリートに作用する遠心力(f)は型枠の回転半径(r)、回転速度(n)から次式によって求める。

$$f = \frac{4\pi^2 n^2}{g} r \quad (1)$$

f : 遠心力(G)

r : 回転半径(cm)

n : 回転速度(rps)

g : 重力の加速度(980cm/sec²)

遠心力締固め法の特徴として一般に以下の点が挙げられる。

- ①遠心力によって余剰水を脱水し、水セメント比(W/C)を減少させることによって強度が増す。
- ②コンクリートが密実となり水密性が向上する。
- ③半製品を設置して締固める等、各種の形状を成形可能である。

その反面、遠心力締固めの問題点として、材料分離、余剰水の脱水に伴って発生する端面の水みち(写真-2)やセメントペーストの流出によるモルタルの砂目(写真-3)が挙げられる。

b) ヒューム管とセグメントの相違点

ヒューム管とセグメントの相違点をまとめると以下のとおりである。

- ①ヒューム管は1リング分を1回で製作する。したがって、図-3に示すように製品の表面は外側面、内側面、側面の4面しかない。それに対してセグ

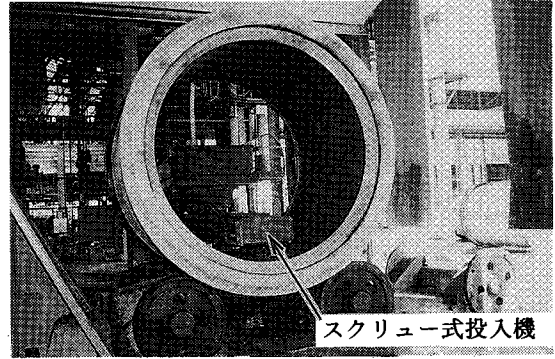


写真-1 遠心力締固めによるヒューム管の製造状況

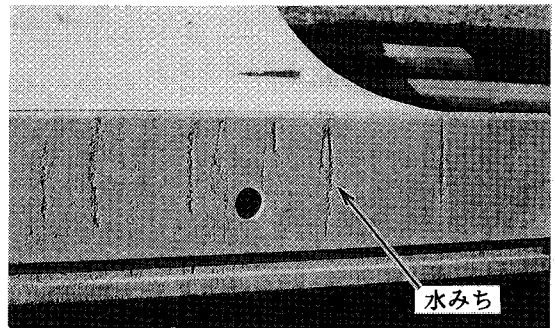


写真-2 水みちの発生状況



写真-3 砂目の発生状況

メントは5～6枚のピースで1リング分が構成されており、製品の表面は6面(外側面、内側面、4側面)存在する。

- ②ヒューム管は主に推進工法などに用いられ、要求される耐水性もセグメントに比べて高くない。また、ヒューム管のジョイントは図-4のようにカラーを用いて外側面で止水する構造となっており、側面の表面精度の要求品質が高くないことから、側面に発生する砂目、水みちは問題とならず、外側面の仕上がりが要求される。これに対して、セグメントはシールド工法に用いられ、大深度でのニーズも多いことから、高い耐圧性能を要求され

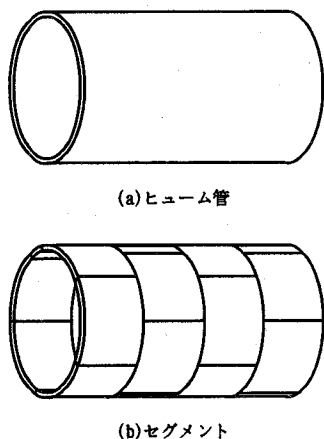


図-3 ヒューム管とセグメントの外観上の違い

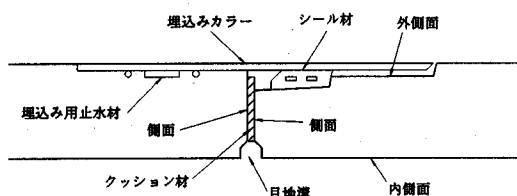


図-4 ヒューム管の止水構造

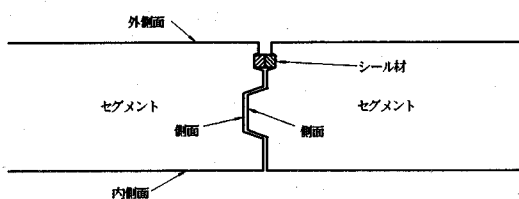


図-5 ほぞセグメントの止水構造

る。特に、継手部の止水性は図-5に示すようにセグメント側面に貼り付けたシール材によって確保するため、継手面の良好な仕上がりが要求される。さらに、セグメントリングの真円度を確保するために高い寸法精度を要求される。

(2) ヒューム管製造方法に準じたセグメントの試作(実験1)

a) 実験の目的

本実験は、写真-4に示すようにヒューム管用型枠に仕切り板を設けて、ヒューム管製造方法と同様な方法で遠心力締固めによるコンクリートセグメント製造の可能性を確認することを目的として実施した。

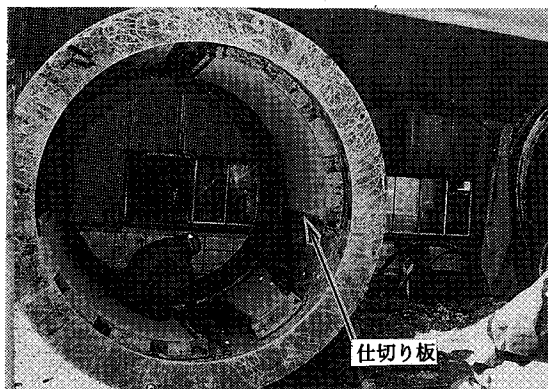


写真-4 ヒューム管用型枠によるセグメントの試作状況

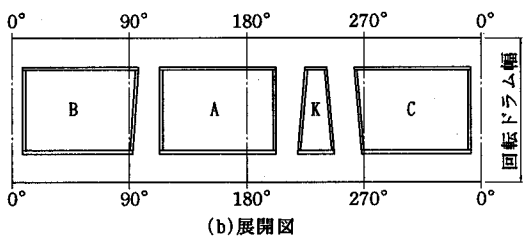
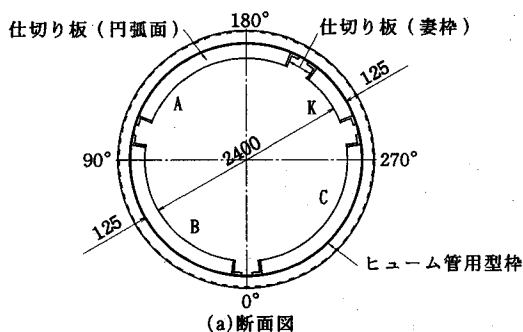


図-6 仕切り板の配置状況

b) 試作の概要

試作するセグメントの寸法は外径2,650mm、内径2,400mm、厚さ125mm、幅1,100mmで、分割数は5分割(4+K)とした。型枠は、写真-4に示すように、ヒューム管(呼び径2400mm、日本下水道協会規格JSWAS A-2)の型枠内面にほぞセグメントの形状寸法に合わせて直接仕切板を取付け、ヒューム管用型枠1基で図-6に示すようにセグメント4ピースを製造できるようにしたものである。

コンクリートの投入は、各ケースとも所定の遠心力が得られる速度で回転させた型枠に、スクリー式投入機で2層に分けて行った。遠心力締固め終了後、通常のセグメントおよびヒューム管と同様な蒸気養生(最高温度65℃×4時間)を行い、その後

表-1 ヒューム管製造方法に準じたセグメントの試作結果

試験 ケース	打設層	コンクリート配合条件*1						遠心力締固め条件			観 察 結 果
		Gmax (mm)	スラフ* (cm)	W/P (%)	S/a (%)	P=C+SG (kg/m ³)	Ad (kg/m ³)	低速 G-分 ^{*3}	中速 G-分 ^{*3}	高速 G-分 ^{*3}	
1	第1層	20	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	35-20	・コンクリートの流動が図-7に示すように仕切板で阻害され、継手面の仕上りに差が生じた。
	第2層	20	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	35-20	
2	第1層	15	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	30-30	・仕上りの改善は見られなかった。 ・内面にセメントペースト層が35mm程度形成された。
	第2層	15	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	30-30	
3	第1層	15	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	35-20 ^{*2}	・正、逆回転を試みたところ仕上りに若干の改善が見られた。 ・内面にセメントペースト層が35mm程度形成された。
	第2層	15	15	35.8	45	420	0.00	6-2	20-2	35-20 ^{*2}	
4	第1層	15	7	25.2	53	550	8.80	6-2	20-2	35-20	・仕上りの改善は見られなかった。 ・内面にセメントペースト層が40mm程度形成された。
	第2層	15	7	25.2	53	550	8.80	6-2	20-2	35-20	
5	第1層	15	7	25.2	53	550	8.80	6-2	20-2	35-20	・セメントペースト層の厚さが25mm程度に改善された。 ・セグメント継手面の仕上りは比較的良好であった。
	第2層	15	6	23.7	48	550	7.70	6-2	20-2	35-20	
6	第1層	15	7	25.2	53	550	8.80	6-2	20-2	35-20	・セメントペースト層の厚さが10mm程度に改善された。 ・ペースト漏れの生じた部分にジャンカが発生した。
	第2層	15	6	36.0	48	550	0.00	6-2	20-2	35-20	
7	第1層	15	7	25.2	53	550	8.80	6-2	15-2 20-3	35-15	・セメントペースト層の厚さが3~5mmに改善された。
	第2層	15	6	36.0	48	550	0.00	6-2	15-2 20-3	30-10	

*1 Gmax: 最大粗骨材寸法, W/P: 水粉体比(P=C+SG=セメント+スラグ), S/a: 細骨材率, P: 粉体量, Ad: 混和剤
*2 ケース3において反転に要する時間(3分)は除いてある
*3 遠心力締固めにおける遠心力(G)とそれを作用させた時間(分)

脱型し、外観、形状、寸法などを測定した。

遠心力締固め条件、コンクリート配合条件はケース1の一般的なヒューム管の製造条件（遠心条件、コンクリート配合条件）を基本とし、表-1に示すケース1~7のように条件を変え実験を行った。ケース2以降は最大粗骨材寸法(Gmax)をセグメント仕様に合わせ Gmax=15mm とした。

c) 実験結果

ヒューム管製造方法に準じた試作実験結果を表-1に示す。ケース1は、大口徑ヒューム管用のコンクリート配合と遠心力締固め条件によって、遠心力締固めによるセグメント製造の可能性を確認することを目的として行ったものであるが、図-7に示すようにコンクリートの流動が仕切板で阻害され、継手面の不良側に砂目、水みちが発生するなど仕上がりに差が生じた。さらに、材料分離によるセメントペースト層が 35mm 程度形成された。

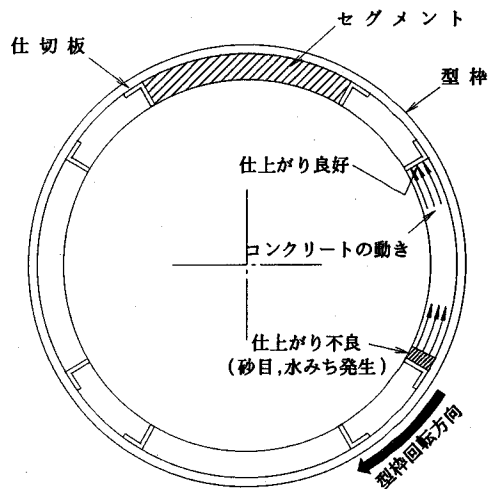


図-7 仕切板と仕上がり状況の関係

ケース2は、ケース1の結果を踏まえ、継手面の仕上がりや材料分離を改善することを目的として、高速回転時の遠心力を35Gから30Gに低減し、ケース1と同様の締固め効果を得るために、締固め時間を20分から30分に延ばして試作を行った。その結果、継手面の仕上がりならびに材料分離によるセメントペースト層の形成は改善されなかった。

ケース3は、継手面の仕上がりや型枠の回転方向が影響していると考え、高速回転時に型枠の正、逆回転を試みた。このときの締固め時間は、回転方向の切換えに要する時間を除いたものである。試作の結果、継手面の仕上がりや改善の傾向が見られたものの十分な品質ではなく、材料分離によるセメントペースト層の形成も改善されなかった。

ケース4では、ケース1～3の結果から、継手面の仕上がりや材料分離にコンクリート配合が影響していると考え、減水剤を用いることによって水粉体比(W/P)を低減し、粉体量ならびに細骨材率(S/a)を増加させた配合で試作を行った。その結果、継手面の仕上がりや改善は見られず、セメントペースト層は40mmと厚くなる傾向が見られた。

ケース5では、ケース4のコンクリート配合を第2層について減水剤ならびにW/Pをさらに低減して試作を行った。その結果、セグメント継手面の仕上がりは比較的良好となり、セメントペースト層も25mm程度に改善された。

ケース6では、ケース5の結果から、さらに材料分離を改善するために第2層のコンクリート配合をケース5の2層目と同一の目標スランプとなるように減水剤を用いずにW/Pを増して試作を行った。その結果、材料分離によるセメントペースト層は10mmと改善され、継手面の仕上がりも良好であったが、写真-5に示すように型枠継手面からのペースト漏れによってジャンカが発生した。

ケース7では、ケース4～6の結果から、コンクリート配合のみでは完全な材料分離の改善が難しいと判断し、高速回転時の遠心力の大きさならびに締固め時間を低減して材料分離の改善をはかった。その結果、セメントペースト層の厚さが3～5mmに改善された。

以上の結果から、遠心力締固めによってセグメントを製造するためにはフィニッシュビリティ（仕上げ性）の良いコンクリートを用い、過大な遠心力を作用させないことが必要であると判断した。

また、試作時の観察結果から以下の改善点を抽出した。

①型枠目地部からのセメントペーストの漏れが生じた場合にコンクリートがポーラスになることから、

型枠目地部の止水性の向上が必要である。

②十分な剛性のない仕切り板を設けた型枠構造であったため、従来からセグメントに要求される寸法精度^{3)・4)}を満足していない。このため専用型枠を用いて寸法精度を向上させる必要がある。

③現状では外型枠（回転型枠）から直接脱型するため脱型作業が煩雑である。このため、量産化を実現するために型枠組立および脱型の作業手順の確立が必要である。

④ペースト層の厚いセグメントは硬化後収縮ひび割れが生じていた。したがって、遠心力締固めによって生じるセメントペースト層は、収縮ひびわれの発生原因となることから薄くする必要がある。

以上の結果から遠心力締固めによるセグメントの製造は改善点への対処を前提として可能であると判断した。

(3) 専用型枠を用いたセグメントの試作（実験2）

a) 実験目的

実験1の試作結果からセグメントの寸法精度が確保されていない、型枠の目地部からのセメントペースト漏れによるジャンカの発生、脱型作業が煩雑などの型枠の基本的性能に問題点があることから、専用型枠を製作してセグメントを試作することとした。

b) 実験概要

専用型枠は、写真-6に示すように、外型枠と内型枠からなっており、内型枠は取外し可能な構造となっている。したがって、脱型作業は内型枠を外型枠から取り出した後に行うことができ作業性が向上する。試作したセグメントの形状・寸法は実験1と同一である。セグメントの試作は、表-2に示すようにコンクリートの配合、投入層数および遠心力締固め条件をパラメータとして3ケース行った。

コンクリート投入はヒューム管用型枠を用いた試作と同様に回転中の型枠に投入する方法で行った。

c) 実験結果

専用型枠を用いた試作実験結果を表-2に示す。

ケース1は、実験1のケース7と同一のコンクリート配合と遠心力締固め条件で試作を行ったが、水みちおよび砂目が継手面の面積の20～30%に発生した。この結果から、水みちおよび砂目の発生原因は1回のコンクリート投入量が多いためと考え、ケース2以降ではケース1の2層打ちを3層に分けて打設することとした。

ケース2では、2層目、3層目にケース1の2層目と同一のコンクリート配合および遠心力締固め条件を用いて4回試作した。その結果、表-2の観察結果に記したように、水みち、砂目の発生は継手面の

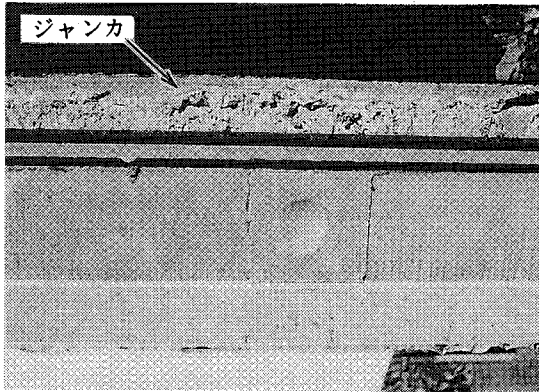


写真-5 ジャンカの発生

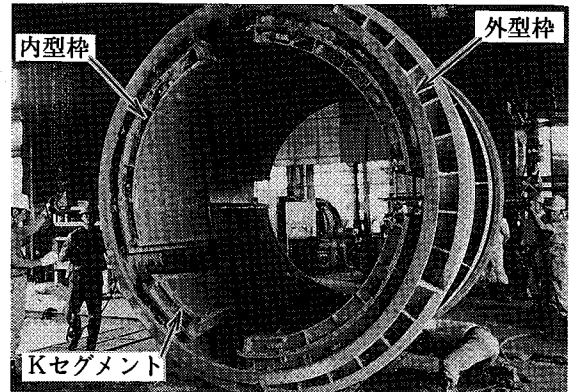


写真-6 専用型枠によるセグメントの試作状況

表-2 専用型枠を用いたセグメントの試作結果

試験 ケース	打設層	コンクリート配合条件*1						遠心力締固め条件			観 察 結 果
		Gmax (mm)	スランプ* (cm)	W/P (%)	S/a (%)	P (kg/m ³)	Ad (kg/m ³)	低速 G-分	中速 G-分	高速 G-分	
1	第1層	15	7.0	25.2	53	550	8.80	6-2	15-2 20-3	35-15	<ul style="list-style-type: none"> 水みち、砂目は継手面の面積の20～30%に発生した。 セメントペースト層の厚さは5mm程度形成された。 ペースト漏れによって継手面底部にジャンカが発生。
	第2層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	30-10	
								締固め所要時間39分			
2	第1層	15	7.0	25.2	53	550	8.80	6-2	15-2 20-3	35-15	<ul style="list-style-type: none"> 水みち、砂目の発生は3層打ちによって改善され、継手面の面積の10～20%に減少した。 3層打ちによってペースト層は3mm程度に減少した。 ケース1で生じた型枠目地部のペースト漏れは改善されず。
	第2層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	35-10	
	第3層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	35-10	
								締固め所要時間56分			
3	第1層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	35-15	<ul style="list-style-type: none"> 水みち、砂目は継手面の面積の10～20%に発生している。 ワーカビリティは良好であり充填性に問題はない。 ケース1で生じた型枠目地部のペースト漏れは改善されず。
	第2層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	35-10	
	第3層	15	6.0	36.0	48	550	0.0	6-2	15-2 20-3	35-10	
								締固め所要時間56分			

*1 Gmax: 最大粗骨材寸法, W/P: 水粉体比(P=C+SG=セメント+スラグ), S/a: 細骨材率, P: 粉体量, Ad: 混和剤
*2 遠心力締固めにおける遠心力(G)とそれを作用させた時間(分)

面積の10～20%に減少し、セメントペースト層も約3mm程度と薄くなった。ただし、スランプ値が目標スランプを大きく下回った場合(1～3層共スランプ3.5cm)には、コンクリートの充填性が悪く、1つのセグメントピースの継手面に1～2ヶ所の充填不足箇所が発生した。

ケース3は、1層目から3層目までをケース1,2の2層目以降と同一のコンクリート配合で試作した。その結果、コンクリートのワーカビリティは良好であり充填性に問題はなかったが、ケース2と同様に継手面の面積の10～20%に水みち、砂目が発生し品質のよい仕上がり面と言えなかった。

以上の結果から、コンクリートを3層に分けて打

設することによって、2層打ちに比べて、材料分離によるセメントペースト層の形成は薄くなったものの継手部表面の水みち、砂目はなくなり、十分なセグメント品質は得られなかった。また、3層打ちによって締固め時間が延び製造効率が低下するため、締固め時間の短縮をはかる必要があると判断した。この他に、専用型枠の型枠継手部の止水パッキンが遠心力(35G)に対して十分な耐圧性を確保できていないため、セメントペーストが漏れ1つのセグメントピースの継手面底部の1～2ヶ所に写真-5に示すようなジャンカが実験1と同様に発生した。このことから、止水パッキンの改良による止水性能の改善が必要であることがわかった。

さらに、試作時の観察から、全般に以下のことが明らかとなった。

① Kセグメント（写真-6参照）が他のセグメントピースに比べて早く所定のコンクリート投入量に達するため、Kセグメントの厚さが設計厚（125mm）より10～20%厚くなり仕上げ時に余剰コンクリートの除去を必要とし作業効率が低下した。これは、ほぞセグメントの各ピース（A,B,C,K）の大きさが異なるため、型枠回転中のコンクリート投入では、投入量にばらつきが生じることに起因する。

② 内型枠相互が密着していないために、この間隙にコンクリートが投入され、設計投入量の約1.2倍のコンクリートを必要とした。

これらの結果から、遠心力締固めによって従来製法によるセグメントと同等の品質を確保するためには、適切な遠心力締固め条件の設定、コンクリートの投入方法の変更、適切なコンクリート配合の設定が必要であると判断した。

4. セグメント品質を満足させるための 遠心力締固め法の確立

(1) マンホール用型枠を用いた遠心力締固め条件に関する実験（実験3）

a) 実験目的

実験1および実験2におけるセグメントの試作結果から、ほぞセグメントの製造に際しては、一般的な遠心力締固めによる成形品であるヒューム管やPHCパイプと異なり、締固め効果を失わない程度に遠心力を極力小さく抑えることで材料分離や水みち、砂目の発生を防止する必要があると判断された。また、ヒューム管製作は多層打ちであるが遠心力を小さくすれば材料分離が少なくなり、水みちおよび砂目の発生が抑制できるため1層打ちでも良質なセグメントを製造できると考えた。そこで、1層打ちの可能性の確認と遠心力締固め条件およびコンクリートの配合条件を設定するために継手部にほぞ形状を有するマンホール用型枠を使用した実験を実施した。

b) 実験概要

実験は、ほぞセグメントの締固め効果および継手面の仕上がり状況に注目し、ほぞセグメントのリング継手と形状が比較的類似している継手を有する組立マンホールの3号（内径1,500mm）および4号（内径1,800mm）を用いて行った。

実験においては、これまでの試作結果からセグメントの継手面の仕上がりには大きな影響を与えると考

えられる高速時の遠心力の大きさと、セメントペースト層の厚さに影響すると考えられる粉体量に注目した。高速時の遠心力の大きさは、これまでの試作において採用した35Gで材料分離や継手面の水みち、砂目が生じたことから、これを最大値として25,30,35Gの3段階とした。このとき、高速時の遠心力との適合性を考慮して中速時の遠心力も併せて変化させた。コンクリートの投入については全ケースを1層打ちとした。コンクリートの粉体量は、これまでの試作において採用した 550kg/m^3 ではペースト層が厚くなることおよび経済性を高めるために粉体量を低減し、これを下回る $470,500,530\text{kg/m}^3$ の3段階とし、粉体量との適合性を考慮して細骨材率(S/a)も変化させた。

観察項目は、ほぞ部のコンクリートの充填性、凹部、凸部での砂目の発生の有無、水みちの発生状況、締固めの程度、ジャンカの発生の有無などとした。

c) 実験結果

表-3に遠心力締固めにおいて、中速時、高速時の遠心力とコンクリート配合の粉体量を変化させた場合の実験結果を示す。

ケース1～3は粉体量を 530kg/m^3 として高速時の遠心力を35,30,25Gと変化させた。その結果、3ケースともセメントペースト層が約25～35mm程度形成された。これは1層打ちであることと粉体量が多いことが原因と考えられる。また、表-3の観察結果に記したように、高速時の遠心力が高いほど砂目や水みちが多く発生する傾向が見られた。遠心力が30G以上では型枠目地部からのセメントペースト漏れが原因と思われるジャンカが約2～3箇所に発生した。

ケース4～6は粉体量を 500kg/m^3 として高速時の遠心力を35,30,25Gと変化させた。その結果、セメントペースト層が約10～20mm程度に薄くなった。また、ケース1～3と同様に、高速時の遠心力が高いほど砂目や水みちが多く発生する傾向が見られた。

ケース7～9は粉体量を 470kg/m^3 として高速時の遠心力を35,30,25Gと変化させた。その結果、セメントペースト層は約5mm程度に改善された。特に高速時の遠心力が25Gではセメントペースト層も全く形成されず、継手面の表面状況も砂目や水みちがなく良好な結果となった。

ケース10はケース9と全く同一条件で口径の異なる4号マンホールを試作しケース9と同様に良好な結果を得た。

以上の結果から、ほぞセグメントの品質を確保するためには、表-3の締固め時間では、高速時の遠心

表-3 マンホール用型枠を用いた実験結果

試験 ケース	使用型枠	S/a (%)	C	SG	P	Ad	スラブ (cm)	遠心力(G)				観 察 結 果
								低速	中速1	中速2	高速	
1	3号マンホール	50	371 + 159 = 530			6.00	5.0	6G	13G	25G	35G	・セメント-ス層が35mm程度形成された。 ・凹凸部の約30%に砂目、水みち発生。 ・3ヶ所にジャンカ発生。
2	3号マンホール	50	371 + 159 = 530			6.00	5.0	6G	11G	20G	30G	・セメント-ス層が30mm程度形成された。 ・凹凸部の20~30%に砂目、水みち発生。 ・2ヶ所にジャンカ発生。
3	3号マンホール	50	371 + 159 = 530			6.00	5.0	6G	11G	20G	25G	・セメント-ス層が25mm程度形成された。 ・凹凸部の10~20%に砂目、水みち発生。
4	3号マンホール	45	350 + 150 = 500			6.11	5.5	6G	13G	25G	35G	・セメント-ス層が20mm程度形成された。 ・凸部の20~30%に水みち発生。 ・凹部の20~30%に砂目、水みち発生。 ・2ヶ所にジャンカ発生。
5	3号マンホール	45	350 + 150 = 500			6.11	5.5	6G	11G	20G	30G	・セメント-ス層が10mm程度形成された。 ・凸部の10~20%に水みち発生。 ・凹部の10~20%に砂目、水みち発生。
6	3号マンホール	45	350 + 150 = 500			6.11	5.5	6G	11G	20G	25G	・セメント-ス層が10mm程度形成された。 ・凸部仕上がりが良好。 ・凹部の5~10%に砂目、水みち発生。
7	3号マンホール	40	329 + 141 = 470			6.30	6.0	6G	13G	25G	35G	・セメント-ス層が7mm程度形成された。 ・凸部の10~15%に水みち発生。 ・凹部の10~15%に砂目、水みち発生。 ・2ヶ所にジャンカ発生。
8	3号マンホール	40	329 + 141 = 470			6.30	6.0	6G	11G	20G	30G	・セメント-ス層が5mm程度形成された。 ・凸部良好。 ・凹部の5~10%に砂目発生。
9	3号マンホール	40	329 + 141 = 470			6.30	6.0	6G	11G	20G	25G	・セメント-ス層なし。 ・凸部、凹部ともに良好。
10	4号マンホール	40	329 + 141 = 470			6.30	6.0	6G	11G	20G	25G	・セメント-ス層なし。 ・凸部、凹部ともに良好。

*1 締固め時間：低速=4分，中速1=3分，中速2=3分，高速=20分(合計30分)

*2 S/a：細骨材率，C：セメント量，SG：スラグ，P：粉体量(P=C+SG)，Ad：混和剤

力は25G程度，粉体量は470kg/m³程度が望ましいものと判断した。

(2) コンクリート事前投入方式によるセグメント (2,650mm) の試作 (実験4)

a) 実験目的

実験1および実験2で確認されたコンクリート投入時の骨材の片寄りや投入量のばらつきに対して検討を行った結果，コンクリートを事前に打込む方法が効果的であると判断した。コンクリートを事前に打込む場合には単層打込みとなるが，マンホール用型枠を用いた実験によって表-3のケース9,10に示す条件とすれば1層打ちでも良好な仕上がりが状況を確保できることを確認したことから，セグメント専用型枠に上蓋を取り付け事前打込みを行った場合の外観および品質を確認することを目的として実験を行った。

b) 実験概要

実験は表-3のケース9,10と同様の条件を基本とし，遠心力締固め条件およびコンクリート配合を調整して行った。

セグメントの製作は，写真-7に示すようにほぞセグメントの専用型枠に所定量のコンクリートを投入した後に上蓋を取付け，写真-8に示すように外型枠に取付けて遠心力締固めを行った。なお，型枠継手部の止水パッキンは高い遠心力に対してもペースト漏れが生じないように改良を加えた。

実験に使用したコンクリートは，配合とスランプ，締固め条件を変化させ，コンクリートの充填性，水みち，砂目，ジャンカの発生状況，締固めの程度，セメントペースト層の厚さを調査した。

c) 実験結果

実験結果に基づいてセグメントの出来形を評価したものを表-4に示す。

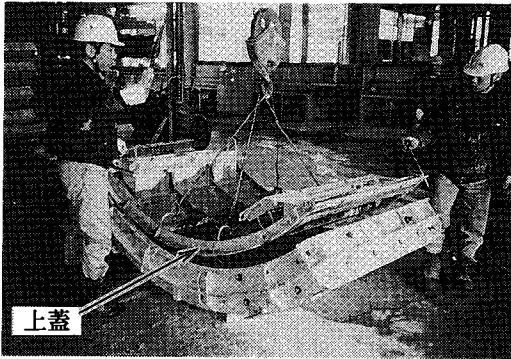


写真-7 上蓋の取付状況

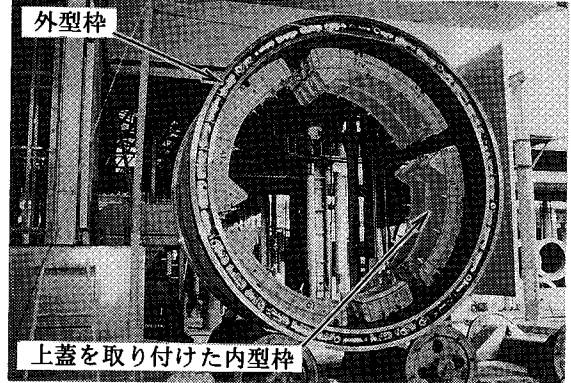


写真-8 上蓋をした後のほぞセグメント型枠設置状況

表-4 コンクリート事前投入方式による遠心締固め実験結果

試験 ケース	配 合				スラブ (cm)	時 間 (分)					観 察 結 果	評 価 *
	W/P	S/a	P	AD		6	11	20	25(G)	合計		
1	35.1	40	470	6.30	6.0	4	3	3	20	= 30	継手面の約5%に水みち発生。 溝部のコンクリート充填良好。締固め良好。	○
2	35.1	40	470	6.30	6.0	4	3	3	15	= 25	水みち、砂目の発生なく、全体に良好。 セメントペースト層の形成なし。	◎
3	44.1	45	420	0.00	12.0	4	3	3	15	= 25	継手面の約30%に水みち、砂目発生。 溝部のコンクリート充填性良好。締固め良好。	△
4	42.5	45	420	0.00	9.0	4	3	3	15	= 25	継手面の約30%に水みち、砂目発生。 セメントペースト層が5mm程度形成された。	△
5	35.1	50	580	5.80	8.0	4	3	3	15	= 25	コンクリートの充填性は良好だが、セメントペースト層が 20mm程度形成された。継手面の約15%に水みち、砂目発生。	△
6	31.4	50	580	5.80	3.0	4	3	3	15	= 25	セメントペースト層が10mm程度形成された。 水みち、砂目の発生なし。	△
7	34.5	45	470	6.30	4.0	4	3	3	15	= 25	セメントペースト層の形成なし。 水みち、砂目の発生なく、全体に良好。	◎
8	36.0	45	420	6.30	6.0	4	3	3	15	= 25	継手面の約10%に砂目発生。 セメントペースト層は薄い。	△
9	35.3	45	450	6.30	4.0	4	3	3	15	= 25	全体的に概ね良好だが継手面の約5%に砂目発生。	○

* ◎：従来の振動締固めと同等以上，○：品質は概ね良好だが改善を要する，△：品質が悪い

ケース1は、実験3のケース9,10と同一のコンクリート配合および遠心力締固め条件で試作を行い、継手面の面積の約5%に水みちが発生した。

ケース2では、遠心力締固めの低減が継手面の仕上がり向上に効果的であることを実験1で確認していることから、ケース1と同一のコンクリート配合で締固め時間を短縮した。その結果、水みちおよび砂目の発生、材料分離によるセメントペーストの形成もなく、従来の振動締固めと同等の仕上がりを得られた。

ケース3では、コンクリート配合の影響を確認するために、ケース2と同一の遠心力締固め条件でヒューム管と同等のコンクリート配合を用いて試作を行った。その結果、コンクリートの充填性、締固めは良好であったが、継手面の面積の約30%に水み

表-5 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
混和材料	高炉スラグ
細骨材	皆野産砕砂 比重2.61 粗粒率2.85
粗骨材	両神産砕石 比重2.70 粗粒率6.70
減水剤	マイティー200

ちや砂目が発生し仕上がり問題があった。

ケース4では、ケース3で用いたコンクリート配合に増粘剤(NS2K)を使用することで、水みちの発生を抑えることを考えたが、増粘剤の効果はなく水みちがケース3と同程度発生し、セメントペースト層が5mm程度形成された。

ケース5では、粉体量を増加して、フィニッシャ

表-6 コンクリートの配合

配合 番号	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水粉体比 W/(C+SG) (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	スラグ* SG	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
1	15	5.0±1.0	1.5±1.0	33.0	43	165	350	150	733	1005	6.5
2						160	329	141	750	1028	6.1
3						157	315	135	760	1042	5.9

表-7 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 番号	コンクリート温度 (°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)	塩分量 (kg/m ³)
1	16.0	4.7	1.2	0.015
2	16.0	5.2	1.6	0.013
3	16.0	4.5	1.3	0.012

表-8 水粉体比によるコンクリートの圧縮強度

配合 番号	水粉体比 (%)	圧縮強度(kgf/cm ²)						
		円柱供試体					遠心供試体	
		脱型	14日		28日		28日	
1	33.0	375	561	690	705	715		
		350	576	654	676			
		359	577	683	719			
2	34.0	330	551	651	713	697		
		333	560	656	646			
		350	539	631	688			
3	35.0	318	525	608	660	671		
		306	513	614	614			
		308	541	620	688			

ピリティーの向上をはかったが、セメントペースト層が20mm程度形成され、継手面の面積の約15%に水みちや砂目が発生した。

ケース6では、水粉体比の仕上がり性への影響を確認するために、ケース5のコンクリート配合から単位水量を低減して試作した。その結果、継手面に水みちや砂目はなくなったが、セメントペースト層が10mm程度形成された。

ケース7では、良好な結果が得られたケース2の細骨材率を増加し、フィニッシュピリティーの向上をはかった。その結果、ケース2と同様に、従来の振動締固めと同等の仕上がり性が確保できた。

ケース8では、経済性を追求するためにケース7の粉体量を低減し試作を行ったが、砂目が継手面の面積の約10%に発生した。

ケース9では、最適粉体量を得ることを目的として、ケース7,8の中間の粉体量(450kg/m³)を用いて試作を行ったが、ケース7以上の仕上がりは得られなかった。

以上の結果から、コンクリートの事前投入によるほぞセグメントの製造は表-4の評価欄に二重丸で示

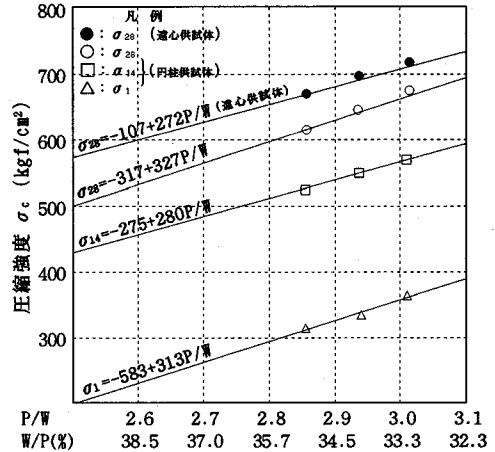


図-8 水粉体比と圧縮強度との関係

したようにケース2,7のコンクリート配合および遠心力締固め条件で十分な品質が得られるものと判断した。

(3) 遠心力締固めにおけるコンクリート配合と設計基準強度との相関性に関する実験(実験5)

a) 実験目的

実験4の結果から、継手面の仕上がり状況についてS/a=40~45%、スランブ4~6cmの配合が良好な結果が得られると判断された。このことから、本実験はセグメントの製作に使用するコンクリートの設計基準強度に対応した配合設計のσ_c-C/W曲線を作成するとともに、製作時に使用する配合のコンクリートの基本性状を明らかにする目的で行ったものである。

b) 実験概要

コンクリートの強度試験法に円柱供試体を用いた方法が通常用いられている。これに対して、遠心締固めされたヒューム管のコンクリート強度試験法はJIS A1136(遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法)に基づいて円環状の遠心供試体を用いて行う。ここでは、円柱供試体と遠心供試体の2種類

表-9 ほぞセグメント用コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水粉体比 W/(C+SG) (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	スラグ* SG	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
15	5.0±1.0	1.5±1.0	34.0	43.0	160	329	141	750	1028	6.10

の供試体を用いて実験を行った。

実験に使用した材料は表-5に示すとおりであり、コンクリート配合は粉体(セメント+高炉スラグ)の使用量を表-6のように3段階に変化させた。細骨材率(S/a)は40,45%のほぼ中間値である43%とした。

供試体は、容量50ℓの強制練りミキサーを用いて30ℓの試料を製造し、コンクリート温度、スランブ、空気量、塩分量を測定した後に円柱供試体(φ10×20cm)を9体、遠心供試体(外径φ20×肉厚4×高さ30cm)を3体製作した。供試体はセグメント製作時と同様に蒸気養生(65℃×4時間)の後に脱型して7日間の水中養生を行い、以後所定材令まで屋外で気中養生した。

圧縮試験は円柱供試体では脱型時、材令14日、材令28日においてそれぞれ3体実施し、遠心供試体では材令28日で3体実施した。

c) 実験結果

表-7にフレッシュコンクリート(練混ぜ後まだ固まらないコンクリート)に関する試験結果を示す。

コンクリートの圧縮強度試験結果を表-8に示し、水粉体比と圧縮強度の関係を図-8に示す。この結果から、水粉体比と圧縮強度の間に明らかな相関性が認められた。このことから、図-8に示す回帰式に基づいて配合設計を行うことが可能であると判断した。

5. 外径3,950mmのセグメントの事前投入方式による試作(実験6)

a) 実験目的

ほぞセグメントの適用を検討している東京ガスの横浜幹線シールド工区には外径2,650mm(t=125mm)と外径3,950mm(t=150mm)の2種類の口径がある。そこで、前述した外径2,650mmのセグメントの試作実験によって得られた遠心力締固め条件、コンクリート配合を異口径で異なる覆工厚のセグメントに適用した場合の品質確認を目的として試作を行った。

b) 実験概要

実験4で粉体量(P)は470kg/m³が最適と判断されたことから実験5の配合試験結果のうち表-6の配

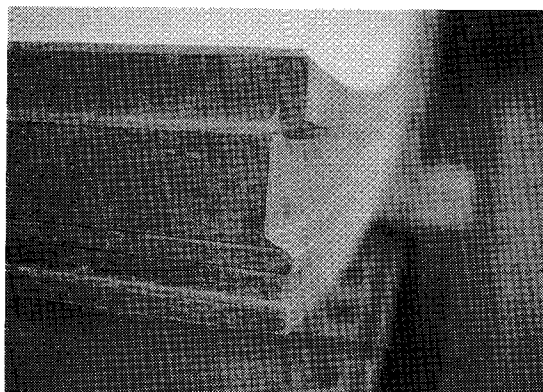


写真-9 脱型後のほぞセグメント

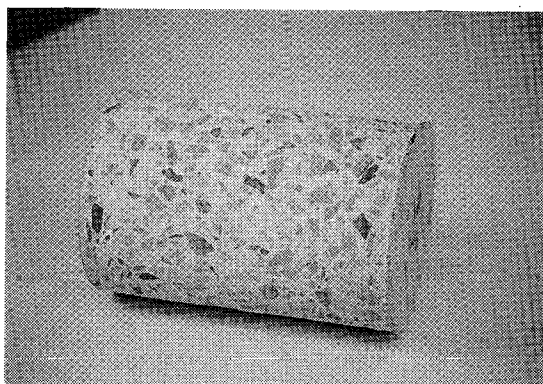


写真-10 ほぞセグメントのコアサンプル

合番号2を採用し、表-9に示すコンクリート配合で試作を行った。セグメント試作方法は実験4と同一である。遠心締固め条件については口径の違いを考慮し遠心力(G)が同一となるように3頁(1)式の換算式に基づいて遠心機の回転数を調整した。試作したセグメントの寸法は外径3,950mm、内径3,650mm、厚さ150mm、幅1,200mm、分割数は6分割(5+K)とした。さらに、試作後「シールド工用標準セグメント」⁴⁾に示されている水平仮組試験を行った。

c) 実験結果

ほぞセグメントは、遠心力締固め後上蓋を取り外し余剰水を除去した後、蒸気養生を行って脱型した。その後、今回規定したセグメントの製作仕様に基

づいて1週間の水中養生を行い、以後気中養生とした。養生後のほぞセグメントを写真-9に、セグメントから採取したコアサンプルを写真-10に示す。

写真-9に示すように、セグメント端面は水みち、砂目がなくきれいに仕上げることができた。また、このコアサンプルによって、遠心力締固めによって製作したコンクリート中の骨材の分布が概ね均一であり、セメントペースト層が形成されていないことを確認した。

さらに、試作したほぞセグメントを用いて写真-11に示すように仮組みを行い、表-10に示すように、その製作精度が「シールド工用標準セグメント」⁴⁾に示されている基準を満足していることを確認した。

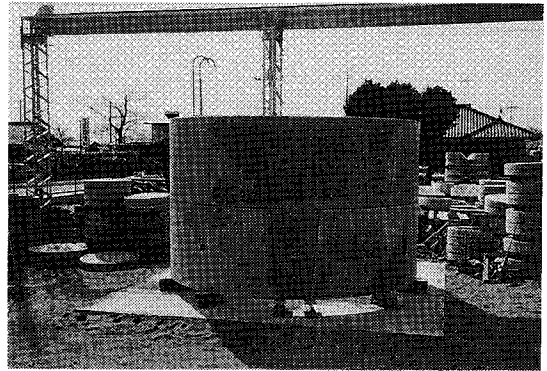


写真-11 ほぞセグメント仮組状況

表-10ほぞセグメントの寸法検査結果

(単位: mm)

項目	寸法の許容差	寸法差 *
セグメント厚さ	+5.0, -1.0	+0.8
セグメント幅	±1.0	+0.4
弧長	±1.0	+0.5
ボルト孔ピッチ	±1.0	-0.2
ボルトピッチサークル径	±7	+4.2
外径	±7	+4.5

* 実測の最大値を示す

6. 遠心締固めセグメントの強度について

(1) コンクリートの圧縮強度について (実験7)

ほぞセグメントの試作時に用いた表-9に示す配合のコンクリートの材令28日圧縮強度を測定した。圧縮供試体は、円柱供試体(φ10×20cm)および遠心供試体(外径φ20×肉厚4×高さ30cm)を各3体ずつ計8回採取し、ほぞセグメントと同一養生を行った。表-11に圧縮強度の測定結果を示す。

ほぞセグメントの設計基準強度 $\sigma_a=480 \text{ kgf/cm}^2$ に対して3 σ 法による下限値が 523 kgf/cm^2 となり、十分に設計基準強度を満足できる配合であると考えられる。

また、円柱供試体と遠心供試体の強度は、図-9に示すように全国ヒューム管協会技術委員会が実施した結果⁵⁾との比較を行った。この図から、今回の圧縮強度の測定結果は与えられている回帰式をやや上回るものの傾向的には良く一致していると考えられる。今回の測定結果は、表-11に示すように遠心供試体が円柱供試体の圧縮強度に比べ、平均で約17%上回っていた。

さらに、ほぞセグメント本体から採取したコア(φ5.5×11cm)について圧縮強度を測定した結果を表-12に示す。この結果から、コアサンプルの方向性による圧縮強度の差はほとんどなく、遠心力締固めに伴う回転方向がコンクリート強度に影響していないことがわかる。また、平均圧縮強度は約 760 kgf/cm^2 であり、管理用円柱供試体に対して約1.45倍、遠心供試体に対して約1.25倍であった。図-10はこの測定結果を全国ヒューム管協会技術委員会がまとめたデータ⁵⁾と比較したものである。全国ヒューム管協会のまとめたデータによれば、遠心供試体とコアによる圧縮強度は概ね同一となってい

表-11 コンクリートの圧縮強度

No.	円柱供試体 (kgf/cm ²)				遠心供試体 (kgf/cm ²)			
	圧縮強度	\bar{x}	σ	$\bar{x}-3\sigma$	圧縮強度	\bar{x}	σ	$\bar{x}-3\sigma$
1	602				767			
2	594				766			
3	608				752			
4	650	623	33.3	523>480	665	729	41.1	606>480
5	628				746			
6	598				677			
7	692				754			
8	613				701			

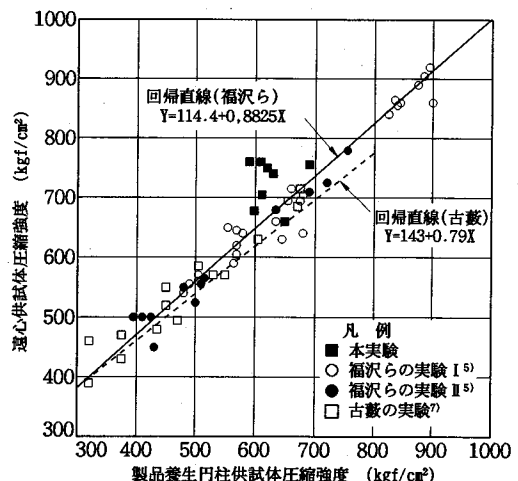


図-9 円柱供試体と遠心供試体との圧縮強度の関係^{5), 6)}

表-12 セグメントから採取したコアの圧縮強度

(単位: kgf/cm²)

製品番号	半径方向		接線方向	1/3軸方向	平均
	継手付近	製品中央			
No.1	739	737	777	725	744
No.2	776	802	762	738	769
No.3	768	789	785	732	768

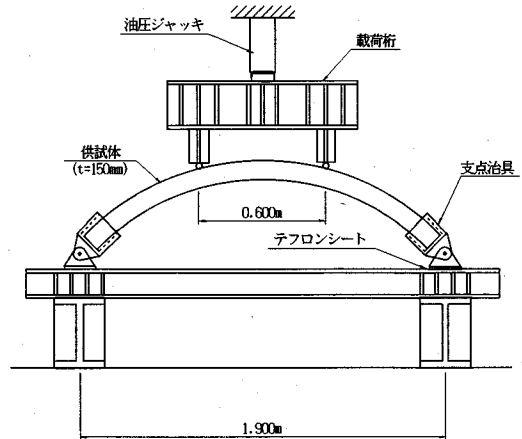


図-11 単体載荷試験状況図

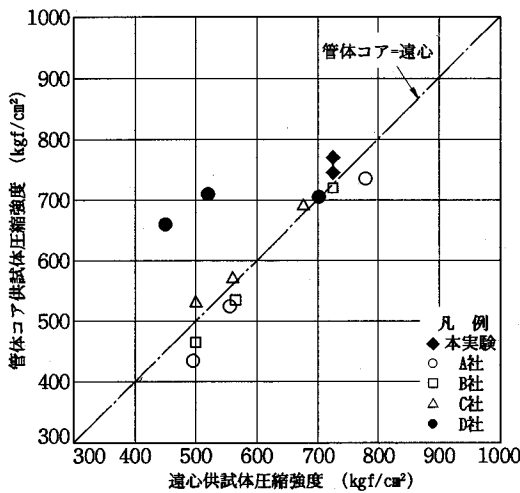


図-10 遠心供試体と管体コア供試体との圧縮強度の比較⁵⁾

るが、今回の測定結果では約4~7%コアによる圧縮強度の方が高くなっている。これは、遠心供試体は不静定構造であるため乾燥収縮などによって内部応力が発生するがほぞセグメントは各ピースに分割されているためこの影響が小さいことが原因の一つと考えられる。

(2) セグメント単体曲げ試験について (実験8)

a) 試験の概要

セグメント単体曲げ試験は、表-9に示した配合のコンクリートで遠心締固めによって製作したセグメント本体の耐荷性能および変形性能の確認を目的として、図-11に示す荷重方法で行った。試験に用いたセグメントは外径2,650mmのAセグメントとした。供試体の主鉄筋は、D13×8本、有効高さ115mmであり、同一供試体を3体製作した。荷重

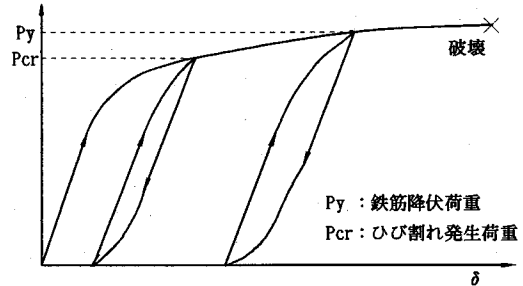


図-12 荷重サイクル概念図

表-13 セグメント本体の曲げ耐力

(単位: tf·m)

	実験値			設計定数から
	供試体1	供試体2	供試体3	求めた計算値
ひび割れ発生曲げモーメント	1.44	0.83	1.20	0.97
許容曲げモーメント	- *	1.17	1.43	0.84
降伏曲げモーメント	1.64	1.82	1.95	1.54
破壊曲げモーメント	2.11	2.17	2.15	1.59
設計計算曲げモーメントと破壊曲げモーメントの比	2.50	2.58	2.56	1.89

* ひび割れ発生モーメントが許容曲げモーメントを上回ったため測定不能

は変形性能の再現性を確認するために、図-12に示すようにひび割れ発生荷重および鉄筋降伏荷重で除荷し、繰り返し荷重を行った。

b) セグメント本体の曲げ耐力について

単体曲げ試験によってセグメント本体の曲げ耐力は、表-13に示す結果が得られた。この結果から、遠心力締固めによって製作したセグメント本体の耐力は、ひび割れ抵抗モーメント、許容曲げモーメント、降伏曲げモーメントおよび破壊曲げモーメント

とも設計定数を用いて算定した計算値を上回っていることが確認できた。さらに、セグメントの単体曲げ強度に対する判定基準として、「シールド工用標準セグメント」⁴⁾では、単体曲げ試験による破壊曲げモーメントが設計上の許容曲げモーメントの2.5倍以上であることとしている。今回の設計上の許容曲げモーメントは表-13より0.84tf・mである。この判定基準によれば、単体曲げ試験結果は設計上の許容曲げモーメントと比較して2.5倍以上の耐力を有していることから、遠心力締固めによって製作したほぞセグメントは十分な安全性を有していると判断できる。

c) セグメントの変形について

単体曲げ試験における荷重と支間中央のセグメントの鉛直変位の関係を図-13に示す。この図から、セグメントの変形がひび割れ発生以前の状態とひび割れ発生以後の状況に大きく分類できることが判る。そこで、それぞれの領域について以下の仮定をした。

①ひび割れ発生前：引張側コンクリートにひび割れが発生する前は、コンクリートが全断面有効であると仮定する。また、引張側コンクリートの弾性係数は圧縮側コンクリートと同一であると仮定する。従って、ひび割れ発生前の曲げ剛性は、鉄筋を無視した矩形断面のコンクリート部材として算定する。

②ひび割れ発生後：引張側コンクリートにひび割れが発生した後は、引張側コンクリートを無視し引張力は鉄筋で全て負担するものと仮定した。また、引張側鉄筋は弾性体であるとした。

それぞれの仮定に基づいて、セグメントの変形を解析した結果を図-13に破線で示す。この結果から、遠心力締固めによって製作したセグメント本体の変形特性は弾性範囲において従来のセグメントと同様に取り扱うことが可能であると判断できる。

d) セグメントに作用する曲げモーメントについて

荷重とセグメント中央部における主鉄筋ひずみより算定した曲げモーメントの関係を図-14に示す。

曲げモーメントの実験値は以下の仮定に基づいて算定した。

①セグメントは図心半径 $R_c=1,262.5\text{mm}$ 、厚さ $h=125\text{mm}$ の曲がり梁であるが、 h/R_c が 1/10 以下であることから直線梁として評価した場合の誤差は5%以下である⁷⁾。そこで、曲げモーメントの実験値の算定はセグメントを直線梁とした。

②ひび割れ発生前における曲げモーメントの算定は、引張側のコンクリートを有効とした。

③ひび割れ発生後の曲げモーメントの算定は、引張側コンクリートを無視して算定した。

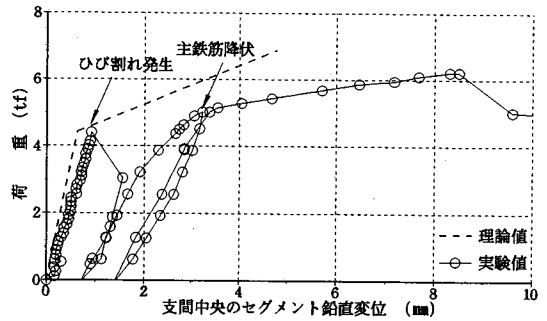


図-13 荷重と鉛直変位の関係

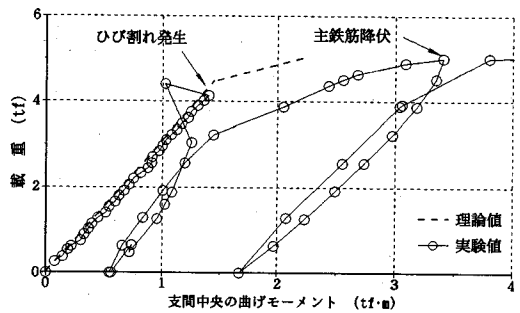


図-14 荷重と曲げモーメントの関係

表-14 最大ひび割れ幅の観測結果

	供試体1	供試体2	供試体3
許容曲げモーメント	- *	0.1mm	0.1mm
降伏曲げモーメント	0.2mm	0.5mm	0.3mm

* ひび割れ発生モーメントが許容曲げモーメントを上回ったため判定不能

④セグメントには軸力が作用していないものとした。

この図から、ひび割れ発生荷重までは、荷重と曲げモーメントの実験値は概ね線形関係にあり、図中に破線で示した理論値と良く一致していることが確認できる。

このことから、遠心力締固めによって製作したセグメントに発生する断面力と応力度の関係は一般的なRC構造物と同様に扱えると判断できる。

e) ひび割れ幅について

単体曲げ試験の結果、表-14に示すように鉄筋が降伏応力度に達した時点で最大0.5mmのひび割れ幅が観測されたものの鉄筋が許容応力度に達した時点ではひび割れ幅は0.1mm以下であった。本セグメントの設計断面力はひび割れが発生しない範囲に収まっていることから、万一のひび割れが発生しても過大なひび割れとならないことが確認できた。ま

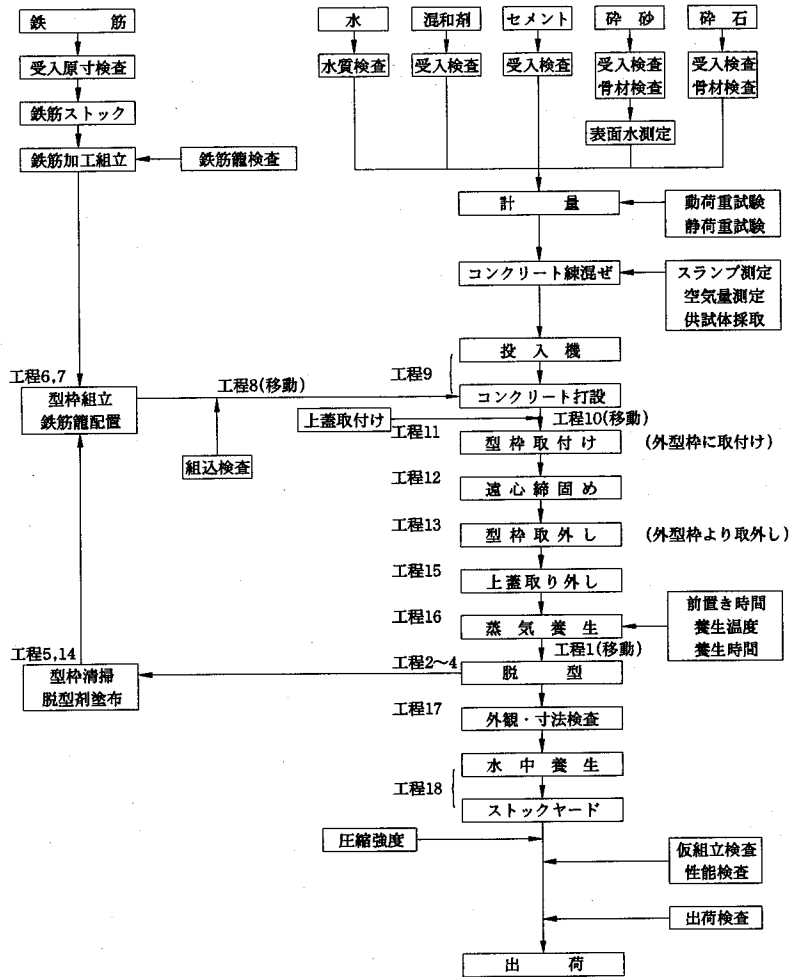


図-15 遠心力締固めによるほぞセグメントの製造フローチャート

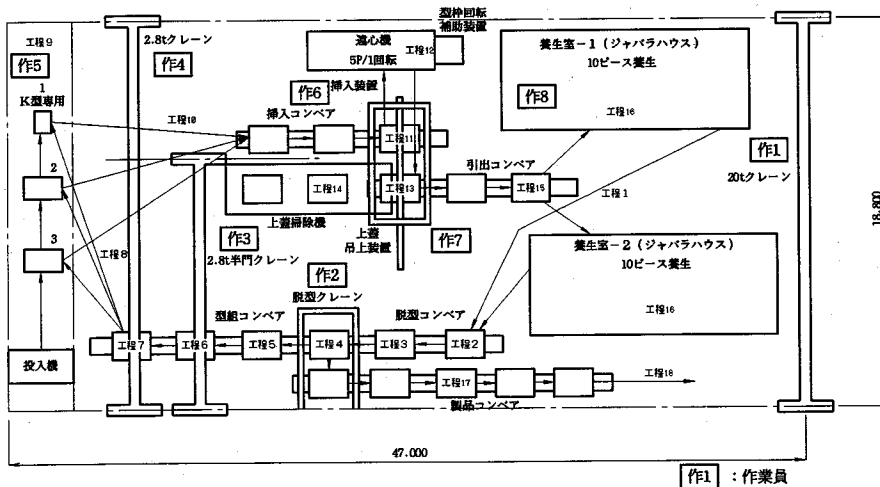


図-16 生産設備配置図

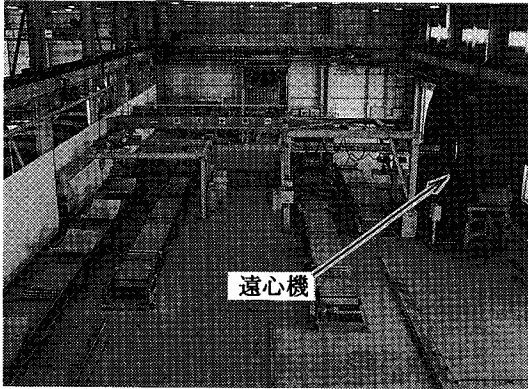


写真-12 生産設備の全景

た、実験時の観測結果から、ひび割れ発生状況も特定箇所に集中することはなく広範囲に分散していた。このことから、遠心締固めによって製造したセグメントは遠心力締固めに伴う回転方向の影響を受けることなく従来の振動締固めで製造したセグメントと同様に均一な材料分布となっていると判断できる。

7. 製造方法および生産設備について

これまでに述べた遠心力締固めによるセグメントの製造方法に関する開発実験および遠心力締固めによって製造されたセグメントの品質に関する検討結果から、事前投入方法を適用し、表-9に示す配合条件と表-3のケース9に示す遠心力締固め条件を適用することによって、遠心力締固めで振動締固めと同等以上の品質を有するセグメントが製造可能であり、表-12に示すようにその強度も遠心力締固め効果によって、通常の振動締固めによるものに比べ高強度の製品が得られることを確認した。

そこで、セグメント製造方法にわが国で初めて遠心締固めを採用し、実際の生産ベースとして実現させるために生産工程と工場設備の検討を行った。その結果、セグメントの製造工程を図-15に示すものとし、図-16および写真-12に示す生産設備を新規に工場内に建設した。

図-15に示す製造工程の中で従来の振動締固めによるセグメント製造方法と異なる点は、工程11,12,13,15である。従来の方法ではコンクリートをセグメント外面を上にして型枠に打設し、その後1ピースずつ振動締固めを行い、締固め終了後セグメント外面を手ごてで、荒仕上げ、最終仕上げの2工程を経ていないにしている。これに対して、本製造方法は工程11,12,13,15に示すようにコンクリートを内型枠に打設した後に外型枠に取り付けて

約1リング分の製品を一度に遠心締固めする。また、セグメント外面は型枠面に接するため手ごてによる仕上げ作業が不要となりセグメント内面も遠心力によって均一に仕上がるため、主に上蓋を取外し余剰水を処理するだけでよい。したがって、従来の方法に比べて生産効率が向上すると考えている。この製作工程は、図-16に示す、建設した工場設備によって実現できる。図-15に示す工程の番号は図-16に示した工程番号と一致している。なお、本工程に要する作業員は図-16に示すように8名である。なお、図-16に示す遠心機を、写真-12に示す。

8. まとめ

ほぞセグメントを遠心力締固めによって製作する場合の製造方法および品質に関する各種実験結果から以下の知見および成果が得られた。

- (1) 遠心力締固めにおいて水みちや砂目の発生に影響を与えるのはコンクリート配合と遠心締固め条件である。最適なコンクリート配合と遠心締固め条件はそれぞれ表-9と表-4ケース7に示すとおりである。
- (2) コンクリート配合のうち、水みちや砂目の発生に特に影響を与えるのは粉体量とスランプであり、粉体量を 450kg/m^3 以下とすると砂目が多くなり、スランプを大きくすると水みちが多くなる。粉体量を多くすると材料分離が生じやすくなりセメントペースト層が厚くなる。
- (3) 遠心力締固め時の遠心力は 30G 以下が望ましく、遠心力を大きくしたり、締固め時間を長くすると水みち、砂目が多く発生するとともに材料分離が生じ、セメントペースト層が厚くなる。
- (4) コンクリート配合によって遠心力締固めの効果は異なる。粉体量、細骨材率、スランプが大きな要因となっており、粉体量は 470kg/m^3 、細骨材率 $40\sim 45\%$ でスランプは $4\sim 6\text{cm}$ 程度が最適である。
- (5) コンクリートを遠心力締固めすることでコンクリート中の水分が脱水される。その際、型枠端面に水みちや砂目が発生する。これらは、型枠回転方向に対して後方のセグメント継手面に多く発生する傾向が強いが過大な遠心力を作用させずフィニッシャビリティーの良いコンクリートを使用することで対応が可能である。
- (6) ヒューム管などの遠心力締固めでは製品内面の型枠を用いていないのが一般的であるが、製品内面に上蓋を設備することでコンクリートの事前投入が可能となり、投入コンクリートのロス

を防ぐとともに安定した品質の製品を得ることが可能となった。

- (7) ヒューム管などでは締固め効果を向上させるために数層に分けて遠心力締固めを行うが、本製造法では外観および生産性の向上を目的として単層の打込みを採用した。
- (8) ほぞセグメントからコアをサンプリングし圧縮強度試験を実施した結果、コア供試体の方向性による差はほとんどなく、平均で約 760kgf/cm^2 の圧縮強度が得られた。この強度は管理用円柱供試体および遠心供試体の1.2~1.4倍であった。

9. あとがき

セグメントのコストダウンを実現するための方法として、設計方法の見直しによるセグメント断面の低減、継手金具の省略などの構造変更も挙げられるが、本論文で述べた製造効率の向上による効果も大きいと考えられる。

従来、振動締固めによって製造されてきたコンクリートセグメントの製造方法として、ヒューム管やパイルの製造で実績のある遠心力締固めを採用し、コンクリートセグメントの製造作業の省力化と連続生産を可能とした。その結果、コンクリートセグメントの製造の合理化をはかることができた。さらに、遠心力締固めを採用することによってコンクリートの締固め効果が向上し、高強度なセグメントを容易に製造することが可能となった。

現在までの開発は、外径4m程度のほぞセグメントがその対象であるが、今後、遠心力締固めによるコンクリートセグメントの製造を発展させていくために、継手金具方式を用いた標準セグメントや大口

径セグメントへの適用も検討して行く予定である。

また、この技術はシールド工用セグメントの製造のみならず、他のプレキャスト部材への適用にも十分な道をひらくものであり、今後の研究開発の方向性は極めて広いと考えている。

参考文献

- 1) 林光俊, 滝本孝哉, 斉藤正幸: シールドトンネル用ライニングの力学実験(その1); 実物大リング載荷実験について, 第49回土木学会年次学術講演会概要集, III-670, 1994.9.
- 2) 林光俊, 斉藤正幸: シールドトンネル用ライニングの力学実験(その2); ジャッキ推力載荷実験について, 第49回土木学会年次学術講演会概要集, III-671, 1994.9.
- 3) 土木学会, トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 1986.
- 4) 土木学会, 日本下水道協会: シールド工用標準セグメント, 1990.
- 5) 福沢公夫, 沼尾達弥, 石井義章, 山田悟: ヒューム管における管体コンクリートの圧縮強度管理用供試体の選定実験, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻第1号, pp.527-530, 1987.
- 6) 古藪徳二: 遠心力締固めコンクリートの圧縮強度試験方法について, セメントコンクリート, No.262, pp.12-21, 1987.
- 7) 入江健二, 新治均, 大塚孝義: シールドトンネルの覆工技術(5)設計(2), トンネルと地下, 第24巻1号, pp.59-64, 1993.

(1995.4.24 受付)

DEVELOPMENT OF MANUFACTURING RC SEGMENT BY CENTRIFUGAL COMPACTION

Mitsutoshi HAYASHI, Satoru YAMADA, Masayuki SAITOH and Atsushi KOIZUMI

This paper explains the process and details of development work carried out in order to introduce the centrifugal compaction applied for manufacturing hume pipes as a new manufacturing method of RC segments that were manufactured using the vibrating compaction in the past. Through this study, the authors were able to establish manufacturing conditions (mold structure, concrete depositing method, concrete mixing condition, conditions for application of centrifugal force) to obtain high strength concrete of stable quality with excellent joint surface finish. Studies were also conducted on production processes and factory equipment, thus enabling realization of this manufacturing method as an actual production line and increasing efficiency in manufacturing RC segments.