

ガス導管シールドトンネル用セグメントの開発

DEVELOPMENT OF SEGMENTAL LINING FOR GAS PIPELINE SHIELD TUNNEL

林 光俊*・齊藤 正幸**・山田 悟***・小泉 淳****

Mitsutoshi HAYASHI, Masayuki SAITOH, Satoru YAMADA, Atsusi KOIZUMI

Shield tunnelling methods in Japan have been developed so as to cope with very soft grounds such as of alluvial clay or sand. That is to say, segmental joints as well as reinforcing bars are liable to be thickened, and thus shield tunnelling are compelled to use high-price segments. In consequence, proportion of the cost of segmental linings to that of entire tunnelling works attains 30 to 40%.

Tokyo Gas was therefore engaged in developing new type segments from 1992 to reduce the construction cost of this shield construction method. An outline of this development, which may be divided roughly into rationalization of segment structure and rationalization (introduction of tenon segment) of manufacturing method using centrifugal compaction.

Keywords : Shield Tunnel, Segmental Lining, Concrete Lining, Tenon Segment, Centrifugal Compaction

1. はじめに

近年、大都市圏における都市地下空間の輻輳化に伴い、都市浅部地下空間に新たなライフラインの建設空間を確保することが難しくなりつつある。現在の市民生活にとって不可欠であるガスを供給するガス導管の建設も例外ではなく、従来から多用されていた開削工法や推進工法などに代わって比較的深い地下に構築が可能なシールド工法によって建設される例が増加している。東京ガスの高圧幹線のひとつである横浜幹線も市街地を通過することから、全線の60%程度にあたる約8.2kmにシールド工法を採用する計画である。このトンネルは図-1に示すように、東京ガス単独区間（延長約2.2km）とNTTとの共同区間（延長約6.0km）からなっている。このうち、東京ガスが施工する区間については、シールド工事費の低減をはかる目的で、ヨーロッパで用いられている継手を簡略化したセグメントの導入に取り組んできた。

このセグメントは、リング継手に凹凸のほぞを設けることで継手金具を省略しているのが特徴であり、ほぞセグメントと呼ばれ1970年代からヨーロッパを中心として多くの使用実績を有している。わが国では東京都地下鉄

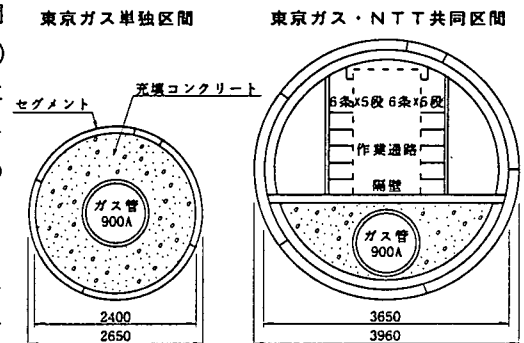


図-1 横浜幹線トンネル標準断面

- * 正会員 東京ガスガス導管技術開発センター
- ** 正会員 日本シールドエンジニアリング株式会社第二事業部企画調査室
- *** 正会員 日本高圧コンクリート株式会社
- **** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

12号線において力学実験による性能確認が行われ¹⁾、採用が予定されている。構造が簡単のため製作費の低減が可能であり、継手ボルト数が少ないことから組立時間の短縮も期待できる。一方、ヨーロッパではこのセグメントの厚さは25cm以上であり、東京都地下鉄12号線でもセグメント厚さは25cmが予定されている。東京ガスが施工する区間のシールドは、セグメント外径が小さく、セグメント厚さも実績がない薄さのため、その適用にはより詳細な力学的検討が必要となった。また、コンクリートセグメントの締固め方法としてわが国で初めて遠心力締固めを採用することで製造効率を向上してセグメントのコストダウンを図った。

本論文は、図-2に示す一連のほぞセグメントの研究の中から、ほぞセグメントの力学特性ならびにその安全性を検証する力学実験の結果²⁾と、製造効率を向上させるために実施した遠心力締固めを用いたコンクリートセグメントの製造方法の開発結果³⁾について述べるものである。

2. 力学実験

ヨーロッパにおけるほぞセグメントの実績は最小覆工厚250mmであり、東京都地下鉄12号線の計画も250mmである。これに対して、ガス導管用のセグメントは、小口径(3,950mm、2,950mm)で覆工厚も150mm、125mmと薄いため、以下の点で特別の配慮が必要であった。

- ① リング継手のほぞが要求する機能(せん断耐力、せん断ばね定数)を発揮する形状寸法の設定。
- ② リング継手ほぞの凸部のジャッキ推力に対する安全検証。
- ③ 多ヒンジに近い構造であるため、地盤反力の影響を

表-1 リング継手せん断実験ケース

	補強方法	供試体幅	継手ボルト	供試体厚さ	拘束力
1	鉄筋	1000mm	有	125mm	2.5tf/m
2	"	"	無	"	"
3	"	"	"	"	10.0tf/m
4	"	"	"	"	25.0tf/m
5	"	200mm	"	"	10.0tf/m
6	補強鋼材	"	"	"	2.5tf/m
7	鉄筋	"	"	150mm	10.0tf/m
8	"	"	"	"	25.0tf/m
9	補強鋼材	"	"	"	2.5tf/m

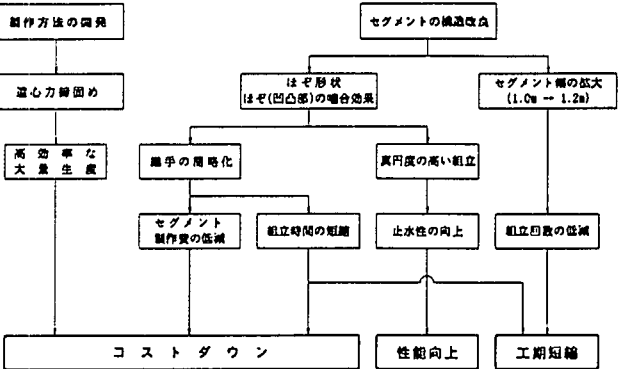


図-2 研究開発の流れ

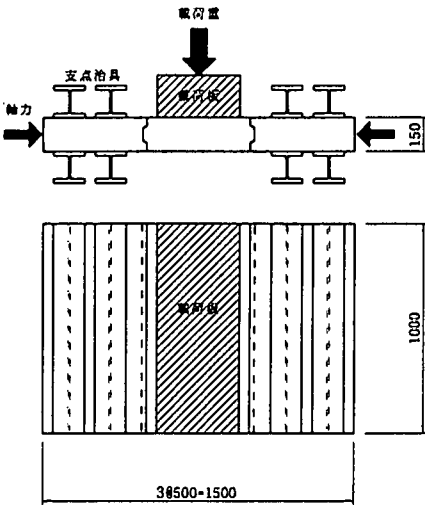


図-3 リング継手せん断実験載荷概要

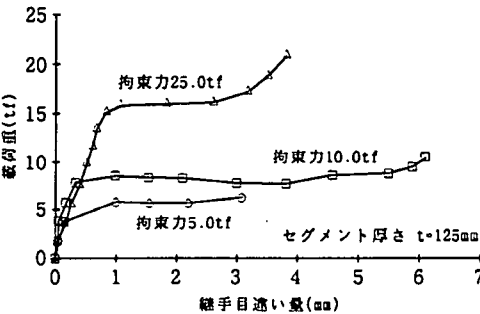


図-4 荷重と継手目違い量の関係

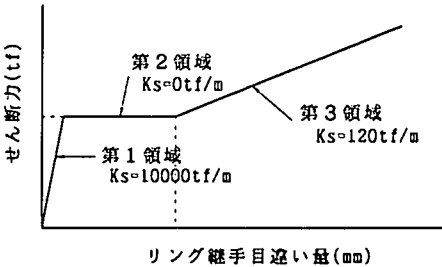


図-5 リング継手のせん断ばねモデル

実状に近い条件で実験を行うことによる設計モデル性の確認。

④ 薄い覆工厚におけるセグメント継手の挙動特性の評価。

そこで、継手の構造特性や安全性の確認を目的とした要素実験と設計手法ならびに安全性の確認を目的とした実物大セグメントを組立てたリング載荷実験などの実証実験を実施した。

2. 1 要素実験

ほぞセグメントは、これまでに提案されている継手剛性の算定方法^{(4)~(7)}によってセグメント継手の回転ばね定数を算定できないことや、リング継手のせん断剛性を数値解析的に評価する方法が確立していないことから、各継手の力学特性を評価するとともに、その安全性を確認することを目的として、セグメント継手とリング継手を部分的に取り出した実物大供試体による要素実験を行った。

(1) リング継手のせん断実験

リング継手のせん断実験はリング継手のせん断剛性ならびにせん断耐力を評価するために行った。実験パラメータとして、セグメント厚さによるほぞ形状の違い、継手ボルトの有無、リング継手に作用する軸圧縮力を考え、表-1に示す9ケースを実施した。載荷は図-3に示すようにリング継手の凹部を有する供試体を両側に、凸部を有する供試体を中央に配置し、油圧ジャッキで継手面に圧縮力を作用させた後に両側の供試体に変位を生じないように治具に固定して中央の供試体にせん断力を作用させた。

実験の結果から、リング継手のせん断耐力は設計せん断力0.2tfに対して1.5～2.6tfと十分な耐力を有していることが確認できた。

また、図-4に示す荷重と継手目違い量の関係からリング継手に作用するせん断力とせん断変位は、継手面に作用する軸力によって滑りが生じるせん断力が異なるものの、その他の挙動は概ね一致している。このことから、リング継手のせん断剛性は図-5に示すようにモデル化した。図中の第1領域は継手面に配置したトランスミッションストリップのせん断変形によって定まるものであり、実験結果からばね定数を定めた。第2領域は継手面の摩擦抵抗をせん断力が上回ることによって発生する滑りの領域であり、ばね定数は $K_s=0\text{tf/m}$ とした。第3領域は継手面に配置したシェアーストリップの圧縮剛性によってばね定数を設定した。

(2) セグメント継手の曲げ実験

セグメント継手の曲げ実験はセグメント継手の曲げ剛性を評価するために行った。実験パラメータとして、セグメント厚さによる継手形状の違い、継手ボルトの有無、セグメント継手に作用する軸力を考え、表-2に示す12ケースを実施した。載荷は図-6に示すように供試体を2ピース突き合わせて、セグメント継手に曲げモーメントと軸力を作用させた。

図-7に示す曲げモーメントと継手回転角の関係から、

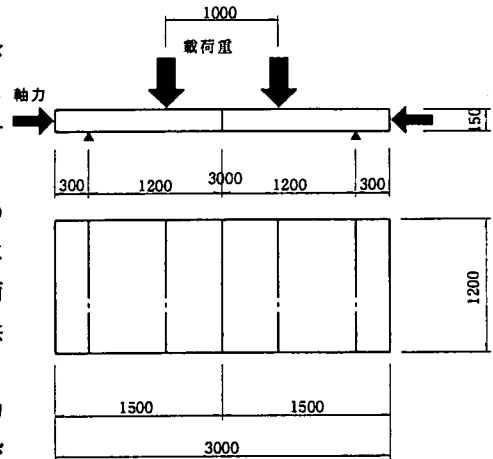


図-6 セグメント継手曲げ実験載荷概要

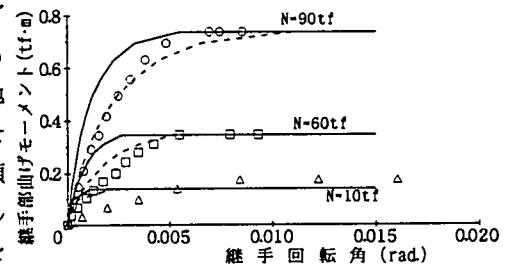


図-7 曲げモーメントと継手回転角の関係
($h=150\text{mm}$)

表-2 セグメント継手曲げ実験ケース

	導入軸力	継手ボルト	供試体厚さ	備考
1	90tf	有	125mm	非破壊
2	60tf	"	"	"
3	10tf	"	"	破壊
4	90tf	無	"	非破壊
5	60tf	"	"	"
6	10tf	"	"	破壊
7	90tf	有	150mm	非破壊
8	60tf	"	"	"
9	10tf	"	"	破壊
10	90tf	無	"	非破壊
11	60tf	"	"	"
12	10tf	"	"	破壊

継手の曲げ剛性（回転ばね定数）は継手部に作用する軸力によって異なり、継手部に作用する曲げモーメントと軸力の比 (M/N) によって定められると判断した。このことから、セグメント継手の回転剛性は、図-8に示すように F. Leonhardt の Betongelenke⁹⁾ に基づいて評価することとした。ただし、Leonhardt による回転ばね定数の算定式では、図-7に示すように実験値に比べて大きな回転ばね定数が得られた。そこで、圧縮ひずみの影響範囲を Leonhardt の提案式の2倍として回転ばね定数を算定すると図-7の破線となり概ね実験値と一致する結果となった。この理由として、セグメント継手面の不陸などによってセグメント継手面の接触面積が解析で考慮した面積より小さいことが挙げられる。この結果に基づいてセグメント継手の回転ばね定数は次式によって算定するものとした。

$$K_2 = M/\alpha = \frac{9a^2bE_0}{16} m(1-2m)^2 \quad \text{----- 式(1)}$$

ここに、 K_2 ：回転ばね定数 (tf·m/rad)

α ：回転角 (rad)

m ：荷重偏心 $m=e/a=e/(M/(Na))$

N ：軸力 (tf)

M ：曲げモーメント (tf·m)

a ：ほぞの幅 (m)

$a=0.049 \text{ m} (h=125\text{mm}), a=0.058 \text{ m} (h=150\text{mm})$

b ：ほぞの長さ (m) $b=1.2 \text{ m}$

E_0 ：コンクリートの弾性係数 (tf/m²)

$E_0=3,300,000 \text{ tf/m}^2$

である。

2.2 リング載荷実験

(1) リング載荷実験の概要

ほぞセグメントのリング全体を評価する解析モデルの妥当性を検証するために、実物セグメントを用いたリング載荷実験を行った。従来のリング載荷実験^{9), 10)}はセグメント継手の影響と千鳥組みによる添接効果を確認するために、2ないし3リングを水平に組立て、自重の影響が生じない条件下で、一直径方向から載荷する方法が用いられてきた。しかしながら、この方法では周辺地盤の影響を確認できない問題があることから、本実験では図-9に示すようにセグメントリングを3リング（上下のリングは1/2幅）水平に千鳥組みし、トンネルの一直径方向載荷することとし、トンネル周辺地盤として硬質発泡ウレタンを用いることでセグメントリングの変形と地盤反力の関係を評価した。反力体に用いた硬質発泡ウレタンの圧縮特性は、設計において考慮した地盤反力係数 (5kgf/cm³) と等価となるように事前解析によって設定した。なお、

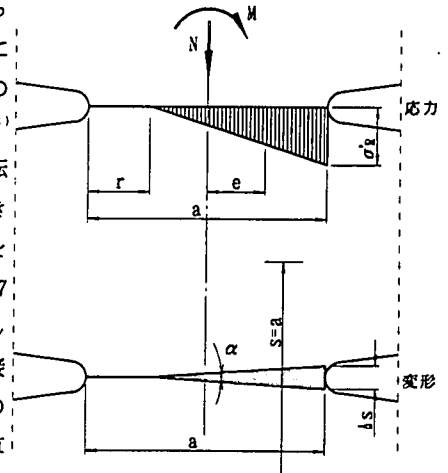


図-8 継手部の応力-ひずみ関係

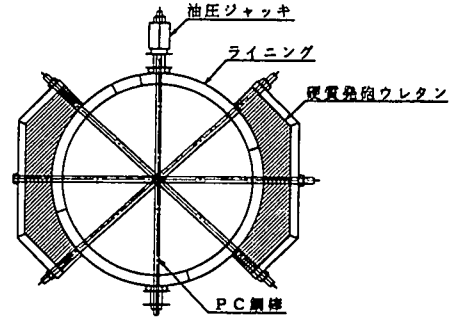


図-9 リング載荷実験載荷概要

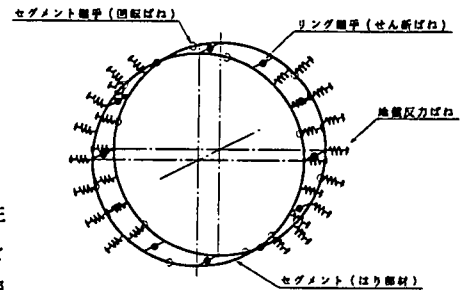


図-10 構造解析モデル

表-3 数値解析条件

セグメント外径	2,650 mm	弾性係数	4,500,000 tf/m ²
セグメント厚さ	125 mm	回転ばね定数	式(1)による
セグメント幅	1,200 mm	せん断ばね定数	図-5による
セグメント分割	4+K	反力体ばね定数	2.1 kgf/cm ²

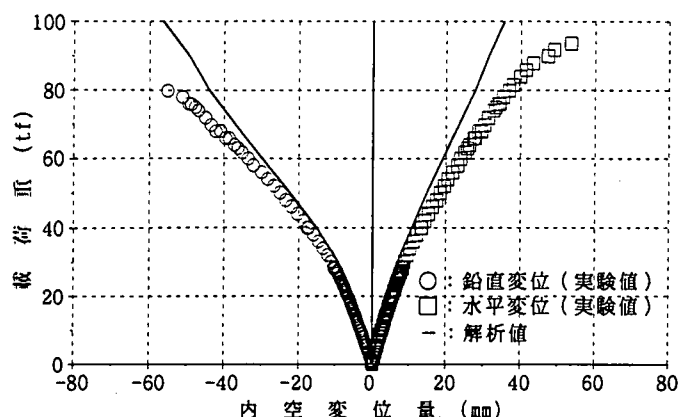


図-11 荷重と内空変位量の関係

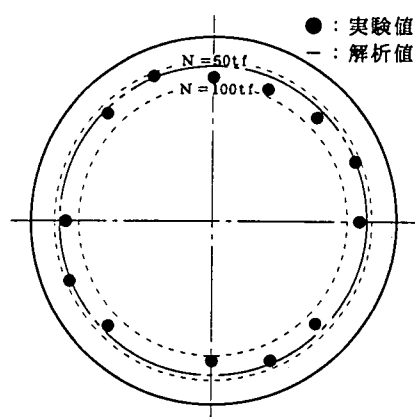


図-12 軸力分布 ($P=5tf, N=60tf$)

載荷は一直径方向にのみ行う従来の方法による。

(2) リング載荷実験結果および数値解析結果

リング載荷実験の結果、セグメントリングの耐力（最大荷重 93.6tf）は限界状態設計法による終局耐力（荷重 31.4tf）を大きく上回り十分な安全性を有していることが確認できた。さらに、許容応力度レベルでのセグメント継手の目開きは最大で 1.1mm 程度、リング継手の目違い量は最大で 1.6mm 程度と十分小さいことを確認した。

a) 構造解析モデル

ほぞセグメントの数値解析は図-10 に示す「はりばねモデル」によって行う。数値解析に用いるセグメント継手の回転ばね定数ならびにリング継手のせん断ばね定数は、継手の要素実験結果から求めたものを用いることとした。表-3 に解析に用いた条件を示す。ひび割れ発生後の解析は、最大曲げモーメントが発生する載荷点に Betongelenke に基づいて算定した回転ばねを設けることでセグメント本体のひび割れをモデル化した。このとき、ひび割れ発生位置における回転ばね定数の算出は鉄筋を無視して行った。

b) セグメントリングの直径変化

図-11 に荷重と直径変化量の関係を示す。この図から、荷重と直径変化量との関係は荷重 30tf 程度まで概ね直線関係にあり、その後、徐々に直径変化量の増分が大きくなる傾向を示していることがわかる。ひび割れ発生前のほぞセグメントの変形性能は要素実験によって求めた継手の剛性を用いてはりばねモデルで解析することで十分に評価できることが確認できた。また、図-11 においてひび割れ発生後の荷重と直径変化量の関係をみると、実験値の方が解析値に比べて大きくなる傾向がある。これは、セグメントに発生するひび割れが荷重の増加に伴って拡がり、リング全体の曲げ剛性が徐々に低下するのに対し、解析ではひび割れ発生を最大曲げモーメントの発生位置に限定しているためと考えられ、ひび割れの発生過程を忠実に追跡することで実験値と解析値は一致してくると推定される。しかしながら、計算上のセグメン

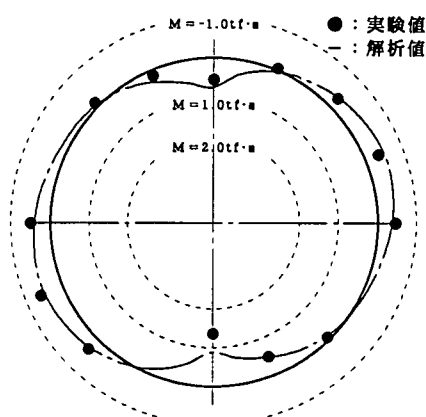


図-13 曲げモーメント分布
($P=5tf, N=60tf$)

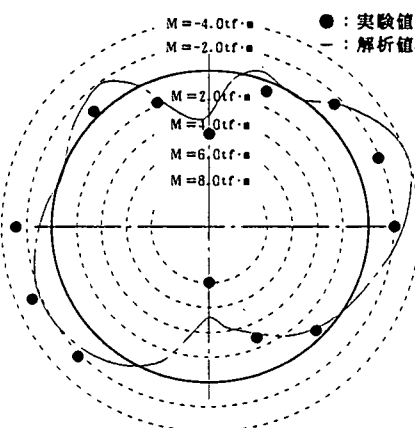


図-14 曲げモーメント分布位置
($P=30tf, N=60tf$)

トの許容荷重がひび割れ発生荷重以下であることや、設計上セグメントの曲げ剛性を大きく評価することは周辺地盤の地盤反力を期待できる地盤では安全側の結果が得られることから、一般に設計における構造計算ではひび割れの影響を無視しており、実用上はこれで問題ないと考えられる。

c)発生断面力

図 -12 に主鉄筋のひずみから算出した荷重 5tf，導入軸力 60tf における軸力分布を，図 -13 にひび割れ発生前（荷重 5tf）の曲げモーメント分布，図 -14 にひび割れ発生後（荷重 30tf）の曲げモーメント分布を示す。これらの図から，本実験において計画した軸力が概ね均一に導入できたこと（図 -12），ならびに曲げモーメントの分布が一般的な設計計算によって得られる分布とその傾向が一致していること（図 -13，14）が確認でき，軸力導入方法および硬質発泡ウレタンによる反力体の採用が妥当であったことがわかる。

また，曲げモーメントの実験値と解析値はひび割れ発生前，発生後ともに良い一致を示しており，構造解析手法が妥当であることが確認できる。

3. 遠心締固めによるセグメント製造方法

3. 1 遠心締固めによるセグメント製造方法開発の目的

従来，セグメントはパイブレータ（テーブルパイブレータ，棒パイブレータ）によってコンクリートを振動締固めし，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，および最終仕上げの段階を踏んで行う必要がある。これに対して，ヒューム管の製造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で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 A 5303）において呼径 3,000mm まで規格化され，主要下水道幹線に多くの実績を有しており，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，著者らは，以下の理由からこの遠心力締固めをセグメントの製造に適用することを検討した。

- ① 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する。
- ② 遠心力によって余剰水を脱水し，W/C を減少させることによってコンクリート強度を増加させる。
- ③ 遠心力締固めでは，約 1 リングを同時に締め固めることが可能であり，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。

一方，遠心力締固めをセグメントの製造に適用するにあたって，以下の課題が挙げられた。

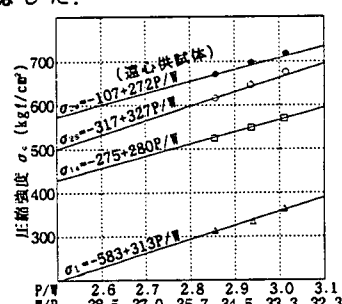
- ① セグメントは複数に分割されていることから，型枠の構造を検討する必要がある。
- ② セグメントの表面（内外面，継手面）に必要な精度，品質を確保する。
- ③ コンクリートの投入時期によるセグメントの品質への影響。
- ④ セグメントの品質を確保するために必要なコンクリートの配合および遠心締固め条件の検討。

3. 2 遠心力締固めによるセグメント製造方法の開発経緯

表 -4 は，上記の課題を解決するために行った開発の経緯を示したものである。

表 -4 遠心力締固めによるセグメント製造方法の開発経緯

	実 験 内 容	実 験 の 目 的	確 認 で き た 主 な 事 項
1	ヒューム管用型枠に間仕切り板を設けたセグメント試作	遠心力締固めによるセグメント製造の可能性の確認	① 型枠目地からのセグメントベースト漏れが一部に生じ，その部分のコンクリートがボラスとなった。 ② 鉄筋籠，継手中子等の固定方法を改善する必要がある。 ③ セグメントの寸法精度を確保するために，セグメント専用型枠

			が必要である。 ④継手面全体に水みち、砂目が発生した。 ⑤基本的に遠心力締固めによるセグメント製造が可能であると判断した。															
2	セグメント専用型枠によるセグメントの試作	①型枠構造の確認 ②コンクリート投入方法の確認	①型枠目地からのセメントペースト漏れは改善された。 ②型枠回転中のコンクリート投入方法に以下の課題があることを確認した。 - セグメントの各ピース (A,B,C,K) の大きさが異なり、コンクリート投入量がばらつきが生じたため製品の厚さが不均一となる。 - 内型枠を外型枠から取り外す時に余剰コンクリートの除去が必要となるため、作業効率が低下する。															
3	マンホール型枠を利用した遠心力締固め条件に関する実験	最適遠心締固め条件の決定 <table><tr><td></td><td>遠 心 力 (G)</td><td>締 固 め 時 間 (分)</td></tr><tr><td>低速</td><td>6.0</td><td>2~4</td></tr><tr><td>中速1</td><td>11.0</td><td>2~3</td></tr><tr><td>中速2</td><td>20.0</td><td>2~3</td></tr><tr><td>高速</td><td>25.0</td><td>15~20</td></tr></table>		遠 心 力 (G)	締 固 め 時 間 (分)	低速	6.0	2~4	中速1	11.0	2~3	中速2	20.0	2~3	高速	25.0	15~20	①高速回転時の遠心力が大きくなる程、継手面の水みち、砂目が発生しやすくなる。 ②低速回転時の遠心力が4G以下となるとコンクリートが型枠内に均等に行き渡らなくなる。 ③コンクリートの粉体量が多いと継手面の仕上がり状況は良くなり傾向にあり、少ないと水みちや砂目が発生しやすくなる。 実験結果に基づいて、セグメントの品質を確保した上で締固め時間を極力短縮し、製造効率を向上するために、左表に示す最適遠心力締固め条件を選定した。
	遠 心 力 (G)	締 固 め 時 間 (分)																
低速	6.0	2~4																
中速1	11.0	2~3																
中速2	20.0	2~3																
高速	25.0	15~20																
4	コンクリート事前投入方式によるセグメントの試作実験 （専用型枠に上蓋を取り付け、投入後に遠心力締固めを行った。）	コンクリート投入を事前に行うことによる作業効率の向上	型枠回転時のコンクリート投入は通常多層打ちであるが、事前投入方式は単層打ちであるが、水みちや砂目の発生状況、コンクリートの充填状況など良好な結果が得られ、事前投入方式によるセグメント製造が可能であることを確認した。 なお、この試験からコンクリート配合は、スランプ3~6cm、粉体量 470kg/m^3、細骨材率45%が最適であることを確認した。															
5	コンクリート配合に関する実験	セグメント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。	下図に示す回帰式によって配合設計を行うことが可能であることを確認した。 															

6	ほぞセグメントの試 および組立	これまでの一連の実験は、外径 2,650mm のセグメントで行った。本プロジェクトには外径 3,950mm もあることから、口径による製作性の差異を確認し、セグメントの品質を検証するために、下表に示すコンクリート配合で外径 3,950mm のセグメントを事前投入方式で試作した。また、製作精度を確認するために水平仮組試験を実施した	①セグメントからコンクリートコアを採取し、圧縮強度がほぼ均一に発現していることを確認した。また、骨材の分布状況も良好であった。 ②セグメント表面の仕上がりは良好であった。 ③水平仮組試験の結果、セグメントの寸法精度が良好であることを確認した。
---	--------------------	---	---

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/m³)					
					水 W	セメント C	スラグ SG	細骨材 s	粗骨材 a	混和剤 AD
15	4.5±1.0	1.5±1.0	34.0	45.0	160	329	141	743	1019	6.10

4. おわりに

わが国におけるシールド工法は、沖積粘性土地盤に代表される軟弱地盤に対応して技術開発が進んできた。このため、シールドトンネルの覆工構造であるセグメントリングは自立性を強く求められ、セグメント継手が重厚化するとともに、セグメント本体の鉄筋量を多くするなど安全性を高くする傾向があり、セグメントのコストアップの一因となっている。

筆者らは本研究を通して、欧州型新形式セグメントのガス導管用中小口径トンネルへの適用に当たっての力学性能と設計法を確認するとともに、セグメント製造方法として我国で初めて遠心締固め法を確立し、セグメント構造とセグメント製造方法の合理化を図ることができた。

現在までの開発では、外径 4m 程度までのほぞセグメントが遠心力締固めによる製造の対象として適用できるが、今後、さらに継手金具を用いた通常のセグメントや 10m を超える大口径セグメントへの適用性を検討する予定である。また、ほぞセグメントの軟弱地盤への適用性など施工対象地盤の拡大も検討している。横浜幹線シールドトンネル工事においては各種の現場計測を実施し、ほぞセグメントの挙動特性をさらに明確化していく予定でいる。

【参考文献】

- 1) 平出亨, 福島昭男: ホゾ付きセグメントの性能確認実験, トンネルと地下, 1993.10.
- 2) 林光俊, 斉藤正幸, 小泉淳: ガス導管シールドトンネル用セグメントの力学実験と解析について, 土木学会論文集Ⅲ部門に投稿中
- 3) 林光俊, 山田悟, 斉藤正幸, 小泉淳: 遠心力締固めによるセグメント製造方法の開発, 土木学会論文集Ⅳ部門に投稿中
- 4) 村上博智, 小泉淳: シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, No.296, 1980.4.
- 5) 村上博智, 小泉淳: シールドセグメントリングの耐荷機構について, 土木学会論文報告集, No.272, 1978.4.
- 6) 結城皓曠: 継手の剛性と組み方を考慮したシールドセグメントの解析, 土木学会論文報告集, No.176, 1970.4.
- 7) 半谷哲夫, 河田博之, 小山幸則: 新しいセグメント設計手法の開発, トンネルと地下, 第 18 巻 6 号, 1987.6.
- 8) Fritz Leonhardt, Horsk Reimann: Betongelenke, Der Bauingenieur, 1966.2.