

コンクリート中詰め鋼製セグメントの開発試験結果 LOADING TEST RESULT OF STEEL SEGMENT WITH PRE-FILLED CONCRETE

村上 博智*, 染谷 洋樹**, 佐野 陽一***, 佐野 彰****
Hiroto MURAKAMI, Hiroki SOMEYA, Youichi SANO, Akira SANO

In recent We construct shield tunnels at deep diaphragm more and more. At deep diaphragm, the axial force is exceeded in the bending moment. Concrete segment is more effective than steel segment against the axial force. But it is difficult to construct concrete segment at deep diaphragm.

We have developed STEEL SEGMENT WITH PRE-FILLED CONCRETE. This segment is Steel Segment which is pre-filled with concrete at the factory.

In this paper, we present the result of several loading tests and consider its strength character. And we suggest the rational design for it.

Keywords: shield tunnel, deep diaphragm, axial force, pre-filled concrete, rational design

1. まえがき

近年ライフラインの地下化が進み、特に都市部においては、これらの施設が主として道路下に過密化・多層化して来たので、大深度地下開発の要望が高くなって来ている。さらに、熟練労働者不足の問題から、これら地中構造物を、シールド工法によって掘削し、工場製品であるセグメントを用いて構築する工法が一般化して来ている。

大深度に構築される地中構造物は、トンネル周辺の地盤の条件によって、その構造と耐荷機構が異なるものの、一般的には、軸力が卓越する傾向にある。従って、セグメントを構成する材料と構造は曲げモーメントは勿論のこと、大きな軸力に対して適切なものであることが要求されている。

これらの観点から筆者らは鋼板をビルトアップした骨組構造とその面外変形を拘束するコンクリートとからなる「コンクリート中詰め鋼製セグメント」を開発した。

本報告は、このようなセグメントの単体試験結果とその適正な設計方法について述べたものである。

-
- * 正会員 早稲田大学名誉教授 理工学部
 - ** 正会員 石川島建材工業(株) セグメント事業部
 - *** 正会員 新日本製鐵(株) 建材開発技術部
 - **** 正会員 日本鋼管ライトスチール(株) セグメント技術チーム

2. コンクリート中詰め鋼製セグメント

2・1 セグメントの構造と特長

本セグメントの概要は図-1に示す通りである。この図からわかるように、本セグメントは既存の鋼製セグメントの鋼殻を基本としており、この中に縦リブで仕切りを設けてコンクリートを中詰めした簡易合成構造である。このセグメントは既存のセグメントと比較して次のような特長を持っている。

- (1) 合成セグメントに比して製造が容易であり、かつ経済性に優れている。
- (2) セグメント本体は鋼殻で外面を覆われているため完全止水構造であり、かつ運搬時などの損傷が発生しないため、取り扱いが容易である。
- (3) 施工時の推力は、中詰めコンクリートにとらせる合理的な構造である。
- (4) 内面にコンクリートを充填しているため二次覆工を省略した用途に使用でき工期の短縮が図られる。
- (5) 割れ・欠けのない覆工が得られることにより、桁高の小さいセグメントでも大深度の高水圧下において、安全な施工が可能となる。

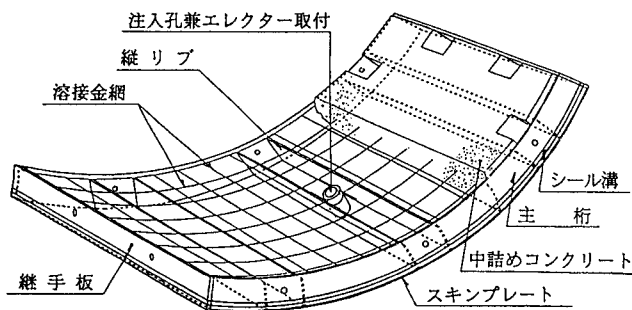


図-1 コンクリート中詰め鋼製セグメント概要図

2・2 強度の確認

本セグメントのコンクリートを中詰めしたことによる基本的な強度特性を確認するため、正・負の単体曲げ試験とジャッキ推力試験を実施した。この試験により、従来の合成セグメントで設けられているようなジベル筋等を全く配さない本セグメントの耐力と剛性について確認した。

今回の試験は、あくまでもセグメント本体の強度確認を行ったものであり、継手については、今後に検討を行う課題としている。

3. 試験内容

3・1 試験方法

単体曲げ試験は、正曲げ・負曲げについて、図-2、図-3に示すように、両端可動の単純支承とし、支点中央に載荷点。支間を300mmとした2点集中荷重を載荷した。計測は荷重の各段階での鋼殻の主桁のひずみ、鉛直変位、およびコンクリートのひび割れを確認しつつ、破壊に至るまで載荷した。

ジャッキ推力試験は、図-4のように、ジャッキ・スプレッダーに相当する載荷治具にジャッキ偏心量を設定して、荷重を段階的に載荷し、荷重の各段階での縦リブとコンクリートの表面ひずみを計測すると共に内面のコンクリートのひび割れを確認した。

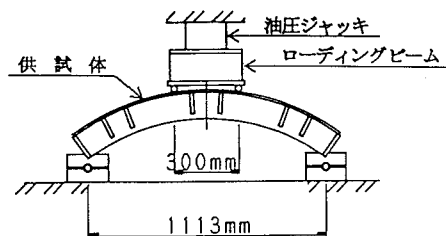


図-2 正曲げ試験状態図

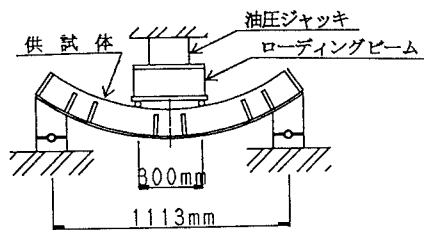


図-3 負曲げ試験状態図

3・2 供試体と試験ケース

供試体の基本形状と仕様を表-1、表-2に、曲げ試験の試験ケースは、主桁厚、載荷方向、中詰めの有無をパラメーターに表-3に示す6ケースとした。

ジャッキ推力試験の試験ケースは、偏心量をパラメーターに10mmと30mmの2ケースとした。

表-1 セグメントの基本形状

ベースセグメント	標準鋼製セグメント M8-1
使用セグメント	A型セグメント
外 径	$\phi 2150\text{ mm}$
幅	1000 mm
桁 高	125 mm

表-2 供試体の仕様

材 質	スクリュー	主 桁 (mm)	継手板 (mm)	縦リブ (mm)	中詰め コンクリート
SM490A	3.0	8.0	8.0	7.0	無
		8.0	8.0		有
		12.0	12.0		無
		12.0	12.0		有

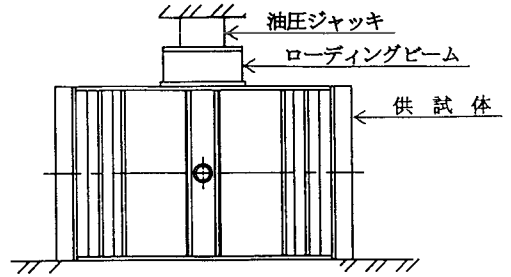


図-4 ジャッキ推力試験状態図

表-3 曲げ試験の試験ケース

CASE	主桁厚 (mm)	載荷方向	中詰め コンクリート	備 考
1	8.0	正	無	
2	8.0	負	無	
3	8.0	正	有	CASE1 との比較
4	8.0	負	有	CASE2 との比較
5	12.0	正	無	
6	12.0	正	無	CASE 5との比較

3・3 単体曲げ試験の結果と考察

(a) 中立軸の位置

今回の試験結果からは、鋼殻にコンクリートを中詰めしたセグメントが大きい耐力を有することが確認された。そこで、このセグメントの耐力を評価するため図-5に耐力計算断面の関係図を示す。ここでは、曲げを受けたコンクリート中詰め鋼製セグメントにおいて平面保持の仮定は成立するものとする。

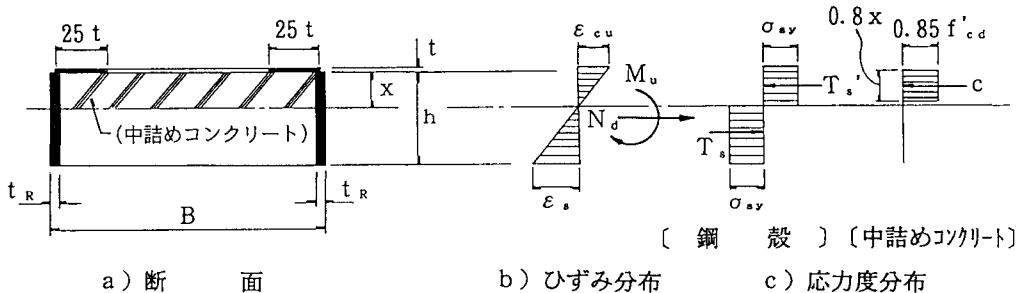


図-5 耐力計算断面の関係図

ここに、B : セグメント幅

h : 主桁高さ

t : スクリュー厚

t_R : 主桁厚

x : 主桁外面から中立軸
までの距離

ε_{cu} : コンクリートの終局
ひずみ

(= 0.0035)

ε_s : 鋼殻内面のひずみ

M_u : 破壊抵抗曲げモーメント

N_d : 設計軸力

f'cd : コンクリートの設計基準強度

σ_{sy} : 鋼材の降伏点応力度

この図から中立軸 x を求める。試験では純曲げ状態を与えていることから $N_d = 0$ であり、従って、水平方向の釣合いは

$$C + T_s' = T_s \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

・コンクリートの圧縮応力度の合力 $C = 0.85 f'_{cd} \times 0.8 x \times B \dots\dots\dots (2)$

・鋼殻圧縮側の圧縮応力度の合力 $T_s' = (2 \times 25 t^2 + 2 \times t_R \cdot x) \times \sigma_{sy} \dots\dots\dots (3)$

・鋼殻引張側の引張応力度の合力 $T_s = 2 \times t_R (h - x) \times \sigma_{sy} \dots\dots\dots (4)$

以上より、式 (1) を x について求めると、下の式 (5) を得る。

中立軸はスキンプレート内面より、

$$x = (t_R \cdot h - 25 t^2) / (2 t_R + 0.34 \times f'_{cd} / \sigma_{sy} \times B) \dots\dots\dots (5)$$

以上は、正曲げに対する場合であるが、負曲げに対しても同様な計算を行い、この場合の中立軸の位置は、式 (6) の通りである。

$$x = \{ t_R \cdot h + (B - t_R) \times t / 2 \} / (2 t_R + 0.34 \times f'_{cd} / \sigma_{sy} \times B) \dots\dots (6)$$

また、鋼殻主桁の降伏点ひずみ以下の範囲のひずみ測定値より、正、負曲げの CASE 3, 4 の中立軸の位置を、図-6、図-7 に示す。

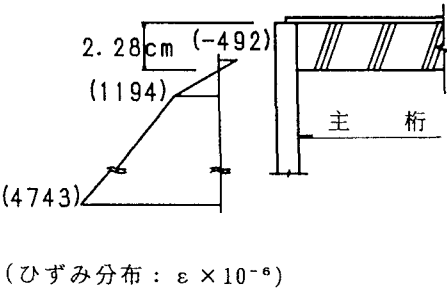


図-6 CASE 3 (正曲げ) の中立軸位置

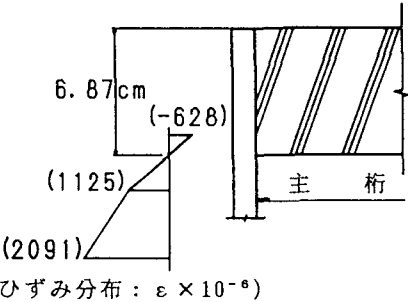


図-7 CASE 4 (負曲げ) の中立軸位置

以上の計算結果と実測結果の比較を表-4 に示す。

表-4 の通り、中立軸の位置は計算値と実測値は概ね近いものであり、耐力計算に図-5 を設定することは問題のないものと考えられる。

表-4 中立軸の計算値と実測値の比較表

	計 算 値 ① (c m)	実 測 値 ② (c m)	比 (= ① / ②)
C A S E 3 (正 曲 げ)	1. 9 4	2. 2 8	0. 8 5
C A S E 6 (正 曲 げ)	2. 6 6	2. 4 5	1. 0 9
C A S E 4 (負 曲 げ)	6. 2 4	6. 8 7	0. 9 1

(b) 耐力

試験結果と理論計算結果の比較を表-5 に示す。

耐力の理論計算値は、前述の中立軸の位置で設定した断面耐力の関係から求めている。CASE 1 ~ 4 の鋼殻は、既存の鋼製セグメントでは最軽量なものであり、この鋼殻に対しコンクリートを中詰めしたものの最大荷重は、鋼殻のみのものに対し、正曲げで 1.5 倍程度、負曲げで 3.7 倍程度であり、また、この鋼殻より剛性の 30 % 程度高い CASE 5, 6 では、正曲げに対して 1.3 倍程度大きな耐力を示した。

試験結果に対応した耐力の理論計算断面を図-8 に示す。この断面をスキンプレートの有効幅で見ると、正曲げでは現状の鋼製セグメントの設計で有効としているスキンプレート厚 (t) の 25 倍で、コンクリートの中詰め有り、無しの結果にはば対応し、負曲げではスキンプレートの全幅を有効としたもので、ほぼ対応が得られた。ただし、中詰め無しの負曲げでは、引張側のスキンプレートの全幅は降伏していない。

表-5 試験と理論計算結果の比較

CASE	最大荷重 (tf)	実験破壊 M_u (tf・m) ①	計算破壊 M_u (tf・m) ②	① ②	備 考
1	14.7	2.99	2.99	1.00	中詰め・正曲げ
2	21.5	4.37	3.95	1.11	〃・負曲げ
3	22.7	4.62	3.86	1.20	中詰め・正曲げ
4	79.4	16.14	12.22	1.32	〃・負曲げ
5	24.9	5.05	4.94	1.02	中詰め・正曲げ
6	32.8	6.66	5.41	1.23	中詰め・正曲げ

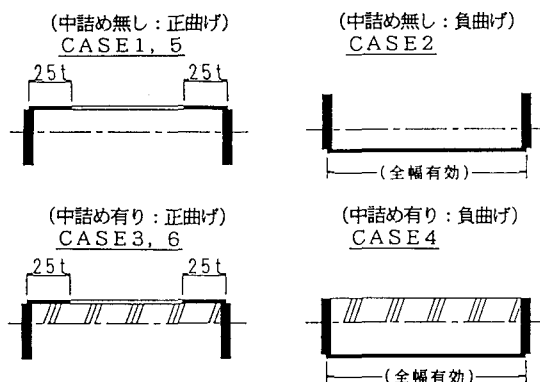


図-8 耐力の計算断面

(C) 剛性

中詰めコンクリートの有無による荷重と鉛直変位の関係図を図-9、図-10に示す。これらの図から、剛性の違いをスキンプレートの有効幅で見ると、コンクリートの中詰め無しでは、スキンプレート厚さ(75t)の2.5倍(25t)の有効幅で求めた変位の理論値に正・負曲げ共に符合している。また、コンクリートの中詰め有りでは、正曲げでのその有効幅は中詰め無しと同様25tで符合するが、負曲げでは、75tとしたものに符合している。正曲げに関するスキンプレートの有効幅は、鋼殻の主桁板厚を変えた場合でも同様な結果となっている。

上記の荷重-変位図のコンクリート中詰めセグメントに対する理論値は、図-5に示すひずみと応力分布から求めたもので、中立軸より引張側のコンクリートを無視し、圧縮側のコンクリートを有効とし、鋼とコンクリートのヤング係数比を9.1として求めたものである。

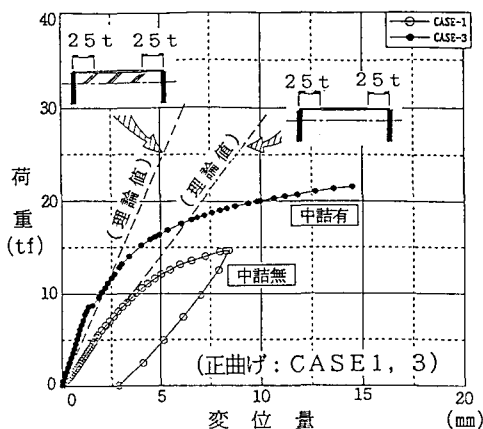


図-9 中詰めコンクリートの有無による荷重と鉛直変位の関係

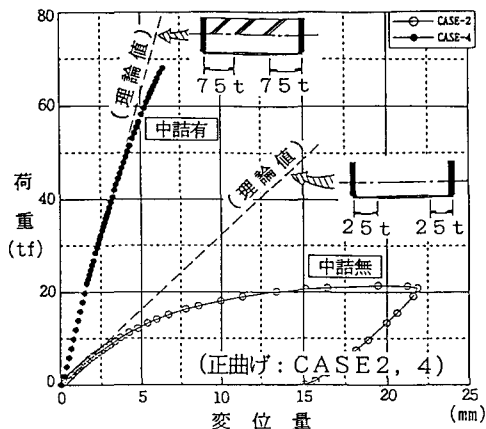


図-10 中詰めコンクリートの有無による荷重と鉛直変位の関係

(d) 耐力と剛性の計算断面の比較

(a), (b), (c)に試験結果に対応した理論計算断面のスキンプレートの有効幅についてその違いを述べたが、耐力と剛性の計算断面を比較すると、正曲げではこれは同一であるが、負曲げでは異なり、特にコンクリート中詰め有りの場合では、耐力でスキンプレートを全幅有効と考えた方が試験値を良く説明しているのに対し、剛性ではスキンプレートの有効幅を75tとした計算断面が良く試験値を説明している。この点では耐力はあるが剛性は低いという、既往の密閉型合成セグメント等の研究結果と同様な結果を得たものと考えている。

3・4 ジャッキ推力試験の結果と考察

この試験では主に、中詰めコンクリートの安定性について観察し、参考としてローディングビーム直下の縦リブ2本が負担するジャッキ推力の圧縮応力の分担率について確認した。

試験結果は、偏心量 10 mm 設定の載荷においては、78.7 tf でクラックが縦リブに沿って発生し、偏心量 30 mm 設定の載荷においては、290 tf で載荷面下部の中詰めコンクリートの一部に圧壊が見られ 340 tf 載荷時に縦リブが降伏ひずみに達したことを確認して試験を終了した。今回の外径 2.15 m の供試体に対応する標準的な設計推力は 60 tf であり、試験結果はこれに対して十分大きい耐力が得られ、ジャッキ推力に対しても安定な構造であることが確認された。縦リブの負担するジャッキ推力の圧縮応力の分担率は、ひずみの測定結果から 14 % 程度であり、ジャッキ推力の圧縮応力のほとんどは中詰めコンクリートが負担していることが確認された。

4. セグメント本体の設計

本件のセグメント本体の設計法としては、単体曲げ試験の試験結果の中立軸の位置で述べた、終局限界状態による曲げ耐力により設計することが合理的かつ有効な設計法であると考えられる。この設計法の現時点で考慮すべき点について以下に述べる。

(a) 設計用断面力

設計用断面力は、解析によって得られた断面力に安全率と部材係数を乗じたものとする。

設計用断面力は、現状では終局限界状態に対応した構造系のモデル等が特定できないことから、当面は慣用計算法等で求めた解析断面力をベースに考えるものとした。

$$\text{設計用断面力} \left\{ \begin{array}{l} \text{曲げモーメント: } M_d = M \times \mu \times \gamma_m \cdots \cdots (7) \quad M, N: \text{解析によって得られた} \\ \text{軸} \quad \quad \quad \text{力: } N_d = N \times \mu \times \gamma_m \cdots \cdots (8) \quad \mu: \text{安全率}, \quad \gamma_m: \text{部材係数} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{モーメントと軸力} \end{array}$$

(b) 耐力の検討

耐力には、正曲げと負曲げに対するものがあるが、試験結果から負曲げのものが正曲げより十分大きい耐力を持つことが明らかなことから、一般的には、正曲げによる検討で設計を行えば良い。

(c) 設計計算の手順

設計計算の手順は、仮定断面において設計断面力の軸力 (N_d) 作用状態における破壊抵抗曲げモーメント (M_u) を求め、これが設計断面力の曲げモーメント (M_d) を満たすように断面を決定するものである。

5. まとめ

今回の開発検討および強度試験で得られた内容を、以下に列挙する。

- ① 本セグメントは通常のジベル筋等を配さないセグメントではあるが、鋼殻とコンクリートが一体として作用する、安定な構造であることが確認された。
- ② 本セグメントは曲げ作用による降伏破壊時でも、中詰めコンクリートが脱落することがない。その理由としては、縦リブを法線方向に向けて配置しており、コンクリートが扇状に中詰めされるため、抜け出せない取り合いをもっているためと考えられる。
- ③ 以上から、本セグメントは簡易合成構造と定義づけられるような合成構造と考えてよいことがわかった。
- ④ セグメント本体の設計法として、終局耐力による設計法を採用することには問題なく、合理的な設計法の適用であると考えられる。

6. おわりに

今回の試験結果とその評価から、コンクリート中詰め鋼製セグメント本体の挙動を把握し、設計法を提案した。今後は大深度地盤における設計を継手も含めて、具体的な検討を行うこととしている。