

(169) PPCセグメント工法の開発(その1)

—工法概要と基本性能確認試験について—

住友建設(株) 土木本部技術部 正会員 熊谷 紳一郎
 住友建設(株) 技術研究所 ○高橋 直樹
 東亜建設工業 土木本部技術開発部 相良 拓
 日本国土開発(株) 施工本部土木部 杉本 雅人

1. はじめに

PPC (Prestressed Precast Concrete) セグメントは、トンネルの円周方向や縦断方向にプレストレスを導入して、セグメントリングを一体化する点を特徴とした、シールドトンネル用セグメントである。プレストレスの導入により、継手金物の省略や鉄筋量の低減が可能となり、セグメント製作コストを縮減できる。また、品質の向上や、組立作業の省力化、内圧を受けるトンネルへの適用も可能となる。

本稿では、PPCセグメントの工法概要に関して説明し、さらにその品質性能を確認するために行った、基本性能確認試験(単体曲げ試験、継手曲げ試験、リング載荷試験)について報告する。

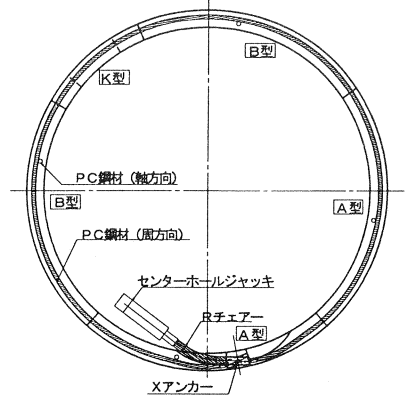
2. 工法概要

2.1 構造形式

PPCセグメントは、コンクリート製のセグメントを1リング組み立てた後、セグメントにあらかじめ埋め込まれたシースの中にPC鋼より線を挿入して緊張・定着することによってポストテンションPC構造の覆工リングを形成する。PC鋼より線には、摩擦ロスの少ないアンボンドPC鋼より線を使用するため、図-1に示すように1周あたり1カ所の緊張でも十分なプレストレスが導入できる。また、定着体として緊張側と固定側の定着体が一体となった、鋳鉄製一体型定着体(Xアンカー:写真-1)をセグメントに埋め込んで使用することにより、セグメントの配筋が簡素化できるうえ緊張作業性が向上する。写真-2に定着部セグメントを示す。

セグメントの組立は、シールドジャッキにより既設セグメントに押しつけて固定する方式とし、リング間、セグメント間ともボルト継手などは用いない。

セグメント横断面図



定着部A型セグメント平面図

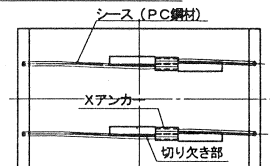


図-1 PPCのセグメント概要

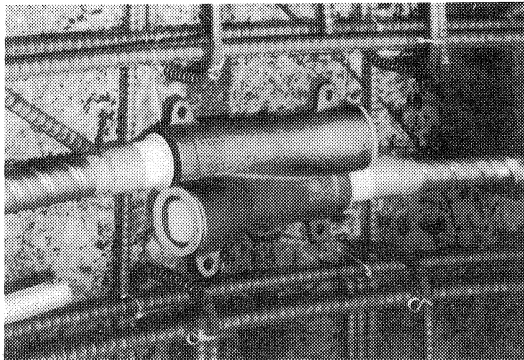


写真-1 Xアンカー

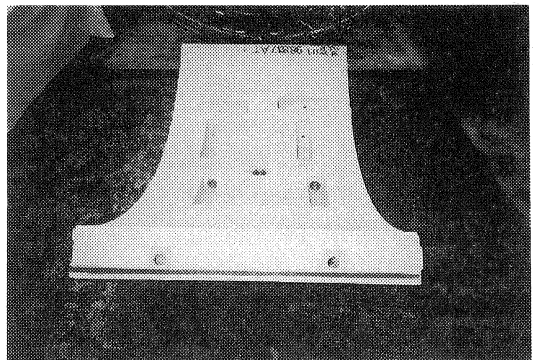


写真-2 定着部セグメント外観

2.2 PPCセグメントの特長

PPCセグメントの特長を表-1に示す。

表-1 PPCセグメントの特長

項目	
経 済 性	a. セグメントへのプレストレス導入による、継手金物の省略。 b. RC構造と比較し、同等の曲げ性能を得るための鉄筋量が低減される。 c. セグメント桁高の縮小。 d. 二次覆工の省略に適する。
品 質	a. セグメントへのプレストレス導入による、コンクリートのひび割れ制御が可能。 b. 組立時のリング変形が少なく、真円性、止水性に優れる。 c. アンボンド構造のため、粘り強く復元性の高い挙動を示す(耐震性に優れる)。
施 工 性	a. 完全なボルトレスのため、施工性に優れる。 b. 緊張作業は1周あたり1回のため、施工サイクルへの影響が少ない。
内面平滑型セグメント	a. セグメント内面の凹凸が少なく、金物類が表面に露出しない。
内水圧対抗型セグメント	a. 内水圧に対しても、プレストレス導入により対応可能。

2.3 PPCセグメントの適用範囲

PPCセグメントは、内径2.0m程度の小口径から10.0mを超える大口径のシールドトンネルまで対応できる。このため、上下水道、電力、通信、ガスをはじめとして、鉄道、共同溝、道路まで広範囲に適用できる。適用範囲の概要を表-2に示す。なお、二次覆工を省略する場合や、内圧がかかる場合に特に有利となる。

表-2 適用範囲の概要

項目	適用	
断面形状・寸法	形 状	円形を標準とする。
	最 小 径	内径2.0m程度。
	最 大 径	RCセグメントと同等。大口径の場合、セグメント自重による変形防止に有利。
	最小桁高さ	100mm程度。
地 質	プレストレスを調節することにより、軟弱地盤から硬質地盤まで適用が可能。	
最小曲線半径	一般的なコンクリートセグメントを使用した場合と同程度。	

2.4 PPCセグメントの施工手順

PPCセグメントを用いたシールド工事の施工手順を、図-2に示す。

まず、従来のセグメント方式と同様に、セグメントに反力をもってシールド掘進を行い、残土を搬出する。PPCセグメントの組立は、シールドジャッキで既設セグメントに固定しながら、下方のセグメントから順次組立てる。セグメントを組立てた後、円周方向、縦断方向の順に、アンボンドPC鋼より線を、切り欠き部からセグメントに埋め込まれているシース内に挿入する。

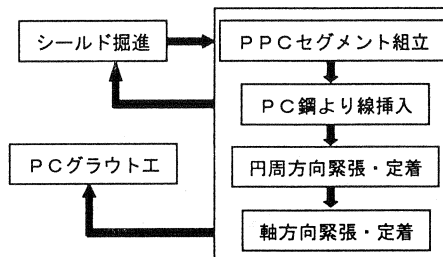


図-2 施工手順

円周方向の緊張は、緊張方向を内側に向けるためのRチェアとセンターホールジャッキを利用し、緊張後、ジャッキを解放することによりくさびを定着する。(この段階で、リングとして安定するため、シールド掘進を再開することもできる)。さらに、円周方向と同じ方法で、軸方向も数リング後方のセグメントとの間を緊張する。なお、グラウト工に関して、注入作業は掘進、緊張工とは別工程で行うため、シールド掘進速度に影響を与えない。また、二次覆工を省略する場合は、PPCセグメントの緊張部の切り欠きに無収縮モルタルを充填する。

3. 基本性能確認試験

3.1 単体曲げ試験

(1) 試験概要

セグメント単体の力学特性を確認することを目的として、単体曲げ試験を行った。試験体は、外径φ2,950mm、幅1,000mm、厚さ150mm、5分割のPPCセグメントを用いた。A型ピース単体を、両端稼動支点とするアーチ状のはりとし、予めプレストレス（アンボンドPC鋼より線2本配置：目標82.4kN/ケーブル）を与え、2点集中荷重載荷方式により行った。試験装置の概要を図-3に示す。

計測項目は、載荷荷重、緊張力、鉛直・水平変位およびコンクリート表面ひずみである。各項目の計測位置を図-4に示す。また、試験要領を表-1に示す。

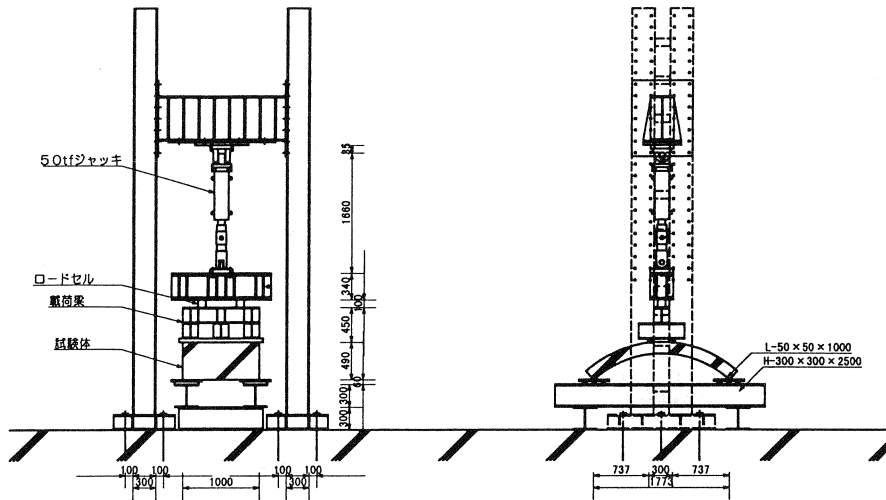


図-3 単体曲げ試験装置概要

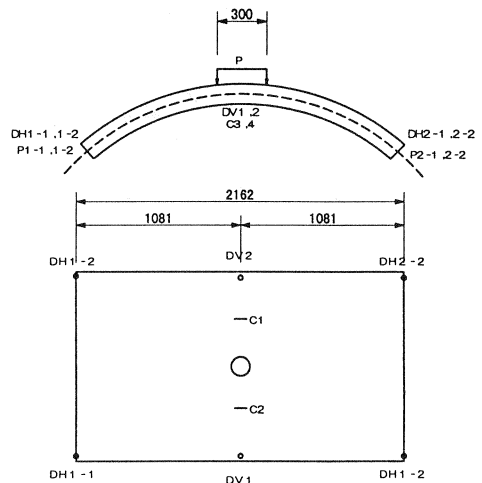
表-1 試験要領

導入緊張力	82.4kN/ケーブル
単体の抵抗モーメント	27.3kN・m
単体の破壊モーメント	57.9kN・m
載荷点の間隔	300mm
支間長	1773.2mm
単体の破壊荷重 P_{ji} (自重考慮)	153.0kN

(2) 試験結果

図-5に、載荷荷重と鉛直および水平変位の関係を示す。載荷荷重 $P_{max}=210.8kN$ で、天端付近でのコンクリートの圧壊を確認し除荷した。計画破壊荷重は、PC鋼材の付着を考慮した場合で $P_{ji}=153.0kN$ であるから、これに対し十分な耐力があることを確認した。

次に、図-6に載荷荷重と緊張力の関係を示す。試験開始時の緊張力は、158.9kN（緊張端と固定端の平均）であった。載荷荷重157kN付近から緊張力が増加し、圧壊直前の緊張力は221.6kN（緊張端と固定端の平均）まで増加した。



A型セグメント外面（切羽側下）

DH：水平変位
DV：鉛直変位
P：緊張荷重
C：コンクリートゲージ

図-4 計測位置

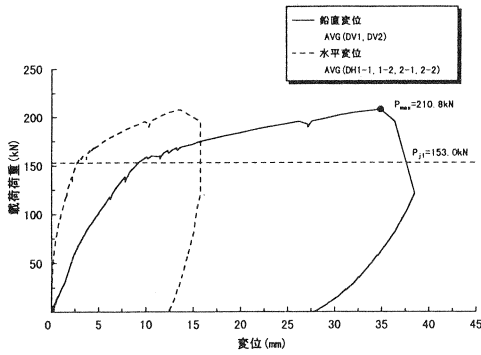


図-5 載荷荷重-変位の関係

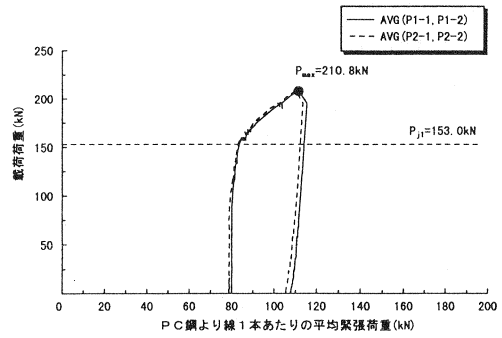


図-6 載荷荷重-緊張力の関係

3.2 継手曲げ試験

(1) 試験概要

継手部の力学特性を確認することを目的として、継手曲げ試験を行った。試験体は、A型セグメントを2ピース接合したアーチ状のはりに、予めプレストレス(アンボンドPC鋼より線2本配置:目標86.3kN/ケーブル)を与え、両端可動支点の2点集中荷重載荷方式により行った。試験装置の概要を図-7に示す。

計測項目は、載荷荷重、緊張力、水平・鉛直変位、目開き量およびコンクリート表面ひずみである。各項目の計測位置を図-8に示す。また、試験要領を表-2に示す。

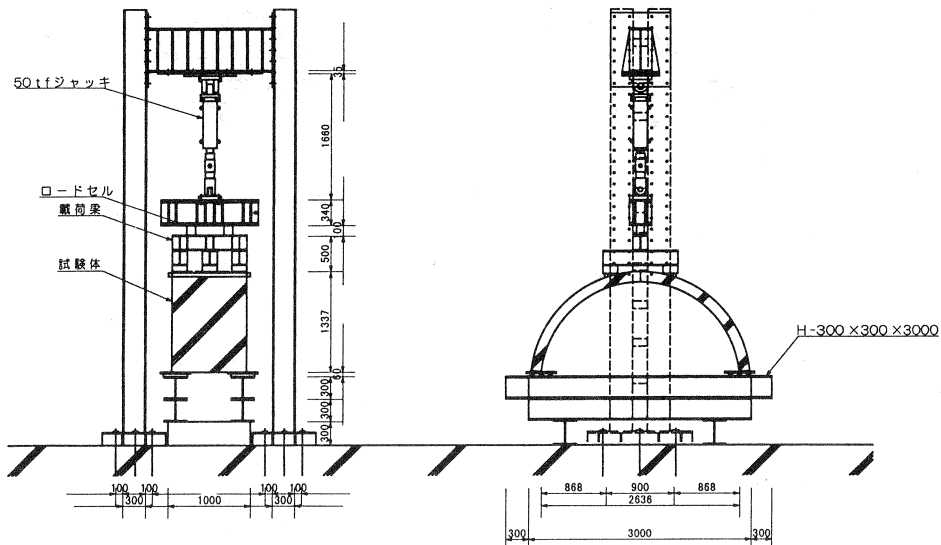


図-7 継手曲げ試験装置概要

(2) 試験結果

図-9, 10に載荷荷重と変位の関係および、継手曲げモーメントと継手回転角度の関係を示す。図-9に示す載荷荷重と変位の関係に関して、載荷荷重 $P_{max}=37.1kN$ で継手部分の圧壊を確認し除荷した。アンボンドPC鋼より線を用いた場合の設計耐力は $P_{j2}=29.4kN$ であるので、これに対し十分な耐力があることを確認した。また、プレストレスを導入しているために、載荷荷重を0kNまで除荷したときに、水平変位が載荷前の初期状態(0mm)に戻っており、アンボンド構造として復元性が高いという特徴が確認された。さらに図-10に関して、実験値

表-2 試験要領

導入緊張力	86.3kN/ケーブル
継手の抵抗モーメント	10.8kN・m
継手の破壊モーメント	17.0kN・m
載荷点の間隔	900mm
支間長	2635.5mm
継手の破壊荷重 P_{j2} (自重考慮)	29.4kN

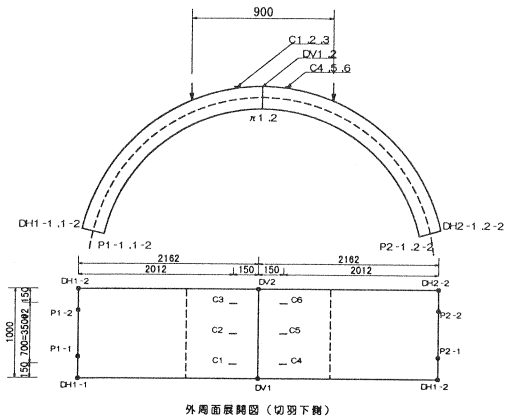


図-8 計測位置

C: コンクリートゲージ
 DH: 水平変位
 DV: 鉛直変位
 P: 緊張荷重
 ガ: ガイゲージ
 P: 緊張荷重

から求まるセグメント継手の回転バネ定数は、レオンハルトらの理論式⁹⁾による計算値に対し大き目の値になった。

次に、図-11, 12に載荷荷重とコンクリートひずみおよび緊張力の関係を示す。図-11に示すコンクリートひずみより、載荷荷重34.3kN付近までは弾性領域と判断できる。さらに載荷荷重を増加するとひずみは増大し、最終的に $P_{max}=37.1\text{kN}$ 時点で 350μ のひずみが発生した。

さらに、図-12に示す緊張力に関して、試験開始時の緊張力は93.2kN(緊張端と固定端の平均)であったが、載荷荷重27.5kN付近から緊張力が増加する。これはPC鋼材が引張り応力を負担し始めるためであり、この時の緊張力の計算値24.3kNとほぼ等しい。なお、緊張力は $P_{max}=37.1\text{kN}$ 時点で127.0kNとなった。

3.3 リング載荷試験

(1) 試験概要

リングとしての剛性を確認することを目的として、リング載荷試験を行った。載荷試験装置の概要を、図-13に示す。装置は、プレストレスを導入したセグメントリングを、反力壁と反力支柱間に設置し、1方向に載荷した。なお、セグメント底面の接地部は、摩擦低減のためにテフロン板を敷設した。

計測項目は、載荷荷重、緊張力、内空変位、目開き量およびコンクリート表面ひずみである。各項目の計測位置を図-14に示す。また、試験要領を表-3に示す。

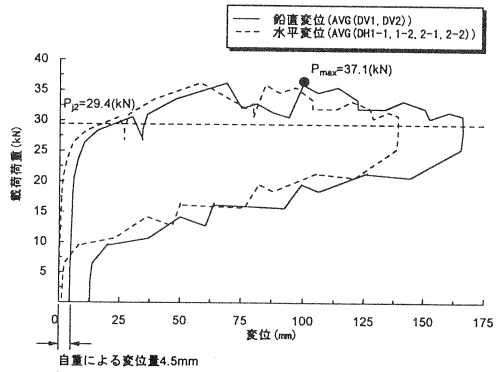


図-9 載荷荷重-変位の関係

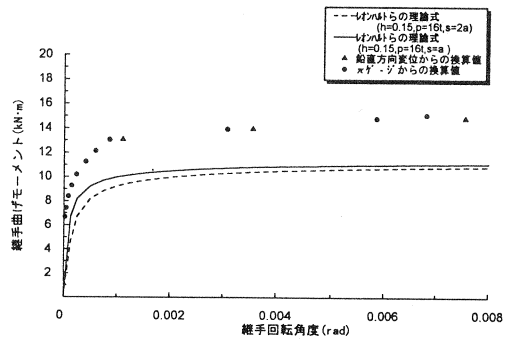


図-10 継手曲げモーメント-継手回転角度の関係

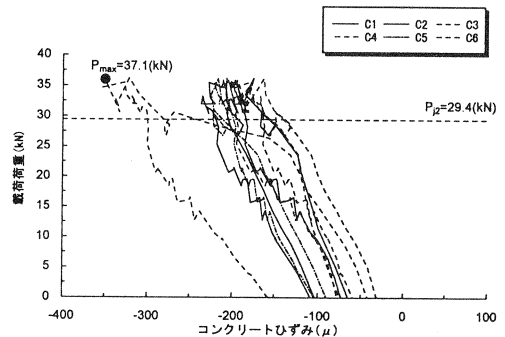


図-11 載荷荷重-コンクリートひずみの関係

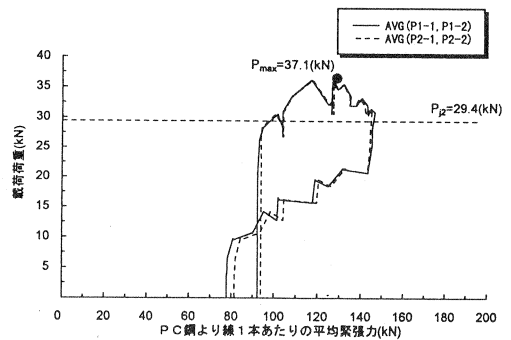


図-12 緊張力-載荷荷重の関係

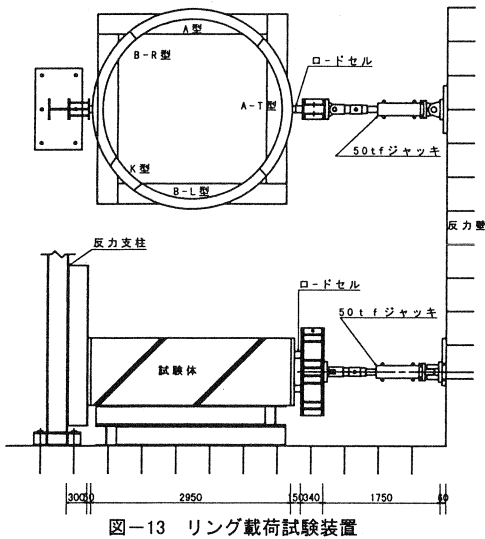


図-13 リング載荷試験装置

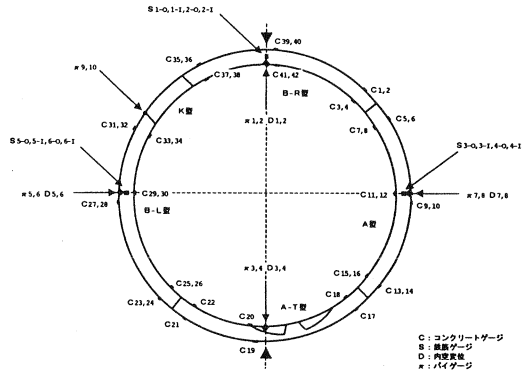


図-14 計測位置

表-3 試験要領

導入緊張力	108.9kN
破壊モーメント	57.9kN・m
破壊荷重	159.6kN

(2) 試験結果

図-15に載荷荷重と載荷軸方向および載荷軸直角方向の内空変位の関係を示す。載荷荷重 $P_{max}=159.6kN$ で載荷位置付近でのコンクリートの圧壊を確認した。アンボンド構造のため、設計耐力はPC鋼材の付着を考慮した場合の70%として $P_{jr}=129.4kN$ となるため、これに対して十分な耐力があることを確認した。次に、図-16に内空変位の実測値とはりバネモデルの解析値の比較を示す。実測値は、はりバネモデルの解析値と、ほぼ同様な値となっていることが分かる。

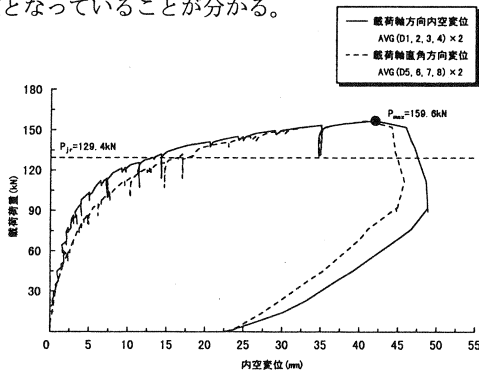


図-15 載荷荷重-内空変位の関係

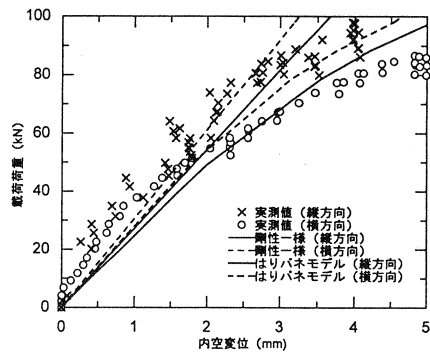


図-16 載荷荷重-内空変位の関係 (実測値と解析値との比較)

4. おわりに

PPCセグメントの基本性能を確認することを目的として、セグメント単体曲げ試験、継手曲げ試験およびリング載荷試験を行った。結論として、以下の知見が得られた。①単体曲げ試験において、計画破壊荷重 ($P_{j1}=153.0kN$) に対して十分な耐力 ($P_{max}=210.8kN$) を確認した。②継手曲げ試験において、継手部の計画破壊荷重 ($P_{j2}=29.4kN$) に対して、十分な耐力 ($P_{max}=37.1kN$) を確認した。③実験値から求まるセグメント継手の回転バネ定数は、レオンハルトらの理論式による計算値に対し大きな値になった。なお、本技術は、住友建設(株)、東亜建設工業(株)、日本国土開発(株)、住建コンクリート工業(株)が共同で開発したものである。

【参考文献】

1. F.Leonhardt und H.Reimann : Betongelenk, Der Bauingenieur, 41, 1966