

論文 プレキャスト部材接合部の曲げ剛性に関する実験的研究

多田克彦*1・鈴木英男*2・松井孝之*3・宮園森男*4

要旨: 分割型の多連式ボックスカルバートにおける側壁部材とそれに重ね合わせて接合する頂版部材を簡易に接合できる継手構造を考案した。継手に異形鉄筋（以下、接合筋と称す）を用いた本継手構造は簡易的な接合のため、部材同士の一体化が図れず、接合部付近で曲げ剛性が低下していることが予想される。そこで、部材厚、接合筋径等のパラメータを変化させた試験体を用いて載荷実験を実施し、曲げ剛性低下区間の設定、低下区間の曲げ剛性値の算出を行い、各種パラメータが曲げ剛性値に与える影響を検討した。その結果、接合筋径が曲げ剛性値に大きく影響を与えていることが明らかとなった。

キーワード: プレキャスト、ボックスカルバート、接合部、接合筋、曲げ剛性、剛性低下

1. はじめに

大型のプレキャスト製多連式ボックスカルバートは、製造、運搬、施工、経済性等を考慮して様々な方法で分割され、現場で接合して組み立てられる。今回、図-1に示すように上述のボックスカルバートを側壁部材、頂版部材及び底版部材の3種類に分割した場合における側壁部材と頂版部材の接合部の継手構造を考案した。その継手構造は異形鉄筋（以下、接合筋と称す）を用いたものであり、部材同士の一体化を図ったものではなく、施工性を考慮した簡易的なものである。従って、接合部付近では、他の部分よりも曲げ剛性が低下していることが予想される。

接合部の詳細を図-2に示す。側壁部材の跳ね出し部（以下、跳ね出しと称す）に頂版部材（以下、スラブと称す）を重ね、跳ね出しに埋設されたインサートに接合筋を差し込み、スラブの接合孔をコンクリートで充填して両者を接合する。接合孔は、コンクリートの抜け出し防止のため、テーパ付き構造となっている。ま

た、接合筋には押し抜きせん断力に抵抗するため、円形の耐圧板を取り付けている。

本研究では、分割型の多連式ボックスカルバートの設計資料を得る目的で、図-1に網掛けした部分を実物大にモデル化し、スラブ厚、跳ね出し厚、接合筋径等のパラメータを変化させた試験体を用いて曲げ載荷実験を実施し、曲げ剛性低下区間の設定、その区間の設計荷重時における曲げ剛性値の算出を行い、各種パラメータが曲げ剛性値に与える影響について検討した。

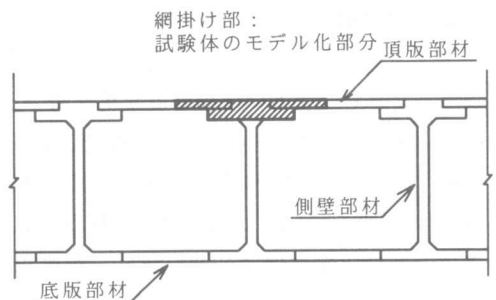


図-1 多連式ボックスカルバート断面図

*1 (株)日東 技術部 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 設備技術部土木建築課

*3 太平洋セメント(株) 設備技術部土木建築課

*4 (株)日東 取締役相談役

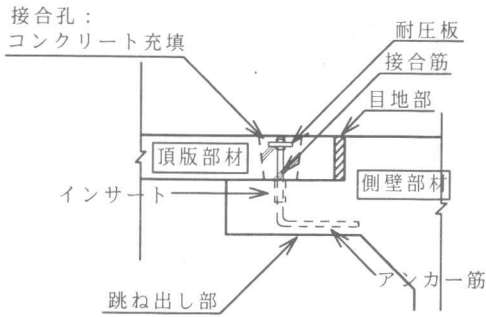


図-2 接合部詳細

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の種類を表-1に、試験体形状を図-3に示す。試験体の主要なパラメータは、スラブ厚、跳ね出し厚及び接合筋径とし、試験体の種類を9種類とした。No.0は、比較用として、スラブ及び跳ね出しを一体製作した試験体（以下、一体部材と称す）である。No.0以外は、跳ね出しの両端にスラブを500mm重ね合わせ、2本ずつの接合筋により接合した試験体（以下、接合部材と称す）である。スラブと跳ね出しの接合面は石膏を用い平滑とした。接合部材のうち、No.3'は、他の試験体と荷重方向を逆向きとした。スラブと跳ね出しの目地部は、無収縮モルタルを充填した。

2.2 使用材料

コンクリートの設計基準強度は 45.0N/mm^2 とした。コンクリートの圧縮強度結果を表-2に示す。接合部に使用するアンカー筋（定着長： $30d^{11}$ ）、接合筋はSD295Aの材質を、耐圧板はSS400の材質を用いた。接合孔に充填するコンクリートの圧縮強度は 43.8N/mm^2 、弾性係数は $2.52 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ であった。

2.3 荷重方法

荷重方向は、負方向荷重と正方向荷重の2通りのうち、接合部に対して不利な荷重方向と予想される正方向荷重を主体とした（負方向荷重はNo.3'のみを対象）。荷重方法を図-4に示す。荷重スパン650mm、支持スパン3300mmの2点荷重（No.3'は荷重スパンと支持スパンを逆

転）とし、荷重速度 10kN/min の単調荷重とした。試験体のたわみを高性能変位計（感度： $1/200\text{mm}$ ）により、接合筋のひずみ（位置：接合筋根元部鉛直方向）をワイヤストレインゲージ（ゲージ長： 3mm ）により測定した。

表-1 試験体の種類

試験体 No.	スラブ厚 $t_1(\text{mm})$	跳ね出し厚 $t_2(\text{mm})$	接合筋径
0	一体部材		
1	200	200	D19
2	200	200	D22
3	200	250	D22
3'	200	250	D22
4	250	300	D25
5	300	300	D25
6	300	300	D29
7	300	350	D29

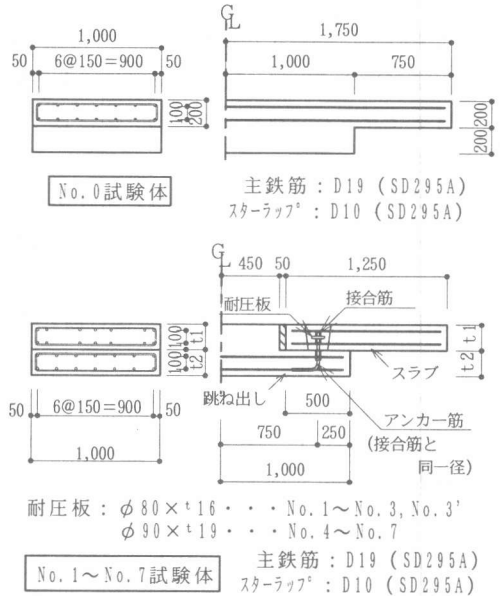
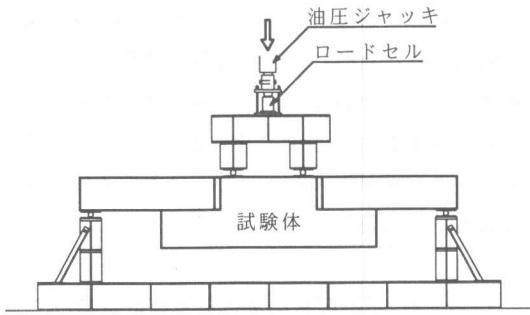


図-3 試験体形状

表-2 コンクリートの圧縮強度

試験体 No.	設計基準強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
0	45.0	58.8	3.24
1		62.0	3.07
2		56.5	3.18
3		57.9	3.36
3'		58.8	3.24
4		48.0	3.07
5		62.3	3.43
6		61.8	3.21
7		63.4	3.30



正方向載荷
図-4 載荷方法

3. 実験結果及び解析

3.1 ひび割れ及び破壊性状

ひび割れ荷重及び最大荷重を表-3に、ひび割れ図の一例を図-5に示す。ひび割れ荷重は、目視によりひび割れを確認したときの荷重とした。ただし、表中の荷重は自重分を含んでいない。

No.0は断面変化部にひび割れが発生した後、スパン中央部の引張縁から材軸に垂直方向にひび割れが進展して主鉄筋位置まで到達し、以降は主鉄筋方向に沿って進展した。

No.3' 以外は、スラブと跳ね出しの重ね合わせ部においてスラブの引張縁から材軸に垂直にひび割れが進展した。

No.3' は、スラブと跳ね出しの重ね合わせ部において跳ね出しの引張縁から材軸に垂直にひび割れが進展した。

最大荷重以降は、垂直接合面において目地部充填モルタルの圧縮作用によりスラブ端部が拘束されるため、ひび割れが分散しながら荷重の大きな増減はなく平衡状態となった。そのため、破壊まで至らずに載荷を終了した。ただし、No.1は1本、No.5は片側2本の接合筋が終局時に破断した。これは、ひび割れ発生以降、荷重が偏心し、4本全部の接合筋で応力が分担されず、1~2本の接合筋に応力が負担されたためと考えられる。

No.0と、スラブ厚及び跳ね出し厚がNo.0と同

一のNo.1及びNo.2を比較すると、No.0のひび割れ荷重は、No.1の約1.4倍、No.2の約1.1倍の値を示し、また、No.0の最大荷重は、No.1及びNo.2の約1.5倍の値を示し、一体部材はひび割れ荷重、最大荷重とも接合部材と比較して大きいことが分かった。

正方向載荷のNo.3と、試験体が同一で載荷方向が逆である負方向載荷のNo.3'を比較すると、No.3'のひび割れ荷重はNo.3の約1.3倍、No.3'の最大荷重はNo.3の約1.9倍と、特に最大荷重においてその差は顕著となった。

これは、負方向載荷の場合は正方向載荷の場合に比べ接合筋が効率良く働いたため、ひび割れ発生以降この影響が顕著となることに起因するものと思われる。

表-3 ひび割れ荷重及び最大荷重

試験体 No.	ひび割れ荷重(kN)	最大荷重(kN)
0	80	166
1	58	108
2	73	113
3	56	108
3'	71	202
4	87	147
5	71	190
6	153	226
7	138	231

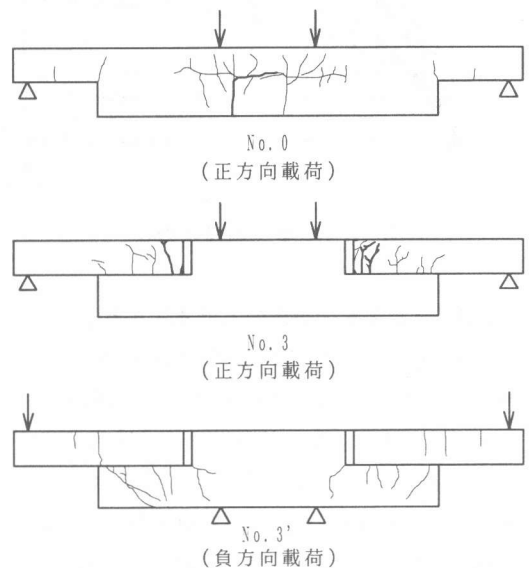


図-5 ひび割れ図 (No.0, No.3, No.3')

3.2 荷重－変位関係

荷重－載荷点変位曲線を図-6に示す。載荷終盤で変位計を取り外したため、図は載荷終了までの全挙動を示していない。

初期剛性が①No.1（接合筋径：D19），②No.2及びNo.3（接合筋径：D22），③No.4及びNo.5（接合筋径：D25），④No.6及びNo.7（接合筋径：D29）の接合筋径毎に4種類に分類され、径が大きくなるに従い、初期剛性が高くなることが確認された。径が同一であれば、スラブ厚、跳ね出し厚が異なっても初期剛性はほとんど変わらないことが分かった。

負方向載荷のNo.3'は、載荷方向が逆である正方向載荷のNo.3に比べて初期剛性が高いことが確認された。

一体部材であるNo.0と、No.0と同一のスラブ厚及び跳ね出し厚であるNo.1及びNo.2を比較すると、No.0はNo.1及びNo.2に比べて初期剛性が高いことが確認された。

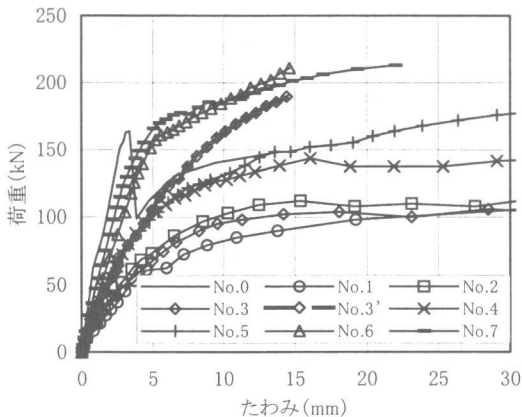


図-6 荷重－載荷点変位

3.3 設計荷重の実験値と計算値の比較

設計荷重を接合筋が長期許容応力度（ $\sigma = 180.0\text{N/mm}^2$ ）に達する荷重とし、実験値と計算値の比較を行った。設計荷重の実験値及び計算値を表-4に示す。計算値は、接合部を曲げモーメントを受けるRC部材（引張－接合筋、圧縮－重ね合わせ部における跳ね出しのコンクリート）として求めた。いずれの試験体も実験

値は計算値を上回っており、実験値／計算値は1.19～2.13の範囲であった。また、いずれの試験体も設計荷重時においては接合部がコーン状破壊をしていなかった。設計モーメントの最大モーメントに対する安全率を表-5に示す。設計モーメントの最大モーメントに対する安全率は2.40倍～3.78倍となった。

表-4 設計荷重の実験値及び計算値

試験体 No.	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値／計算値
1	36	24	1.50
2	49	33	1.48
3	37	31	1.19
3'	81	50	1.61
4	62	34	1.81
5	66	31	2.13
6	98	50	1.96
7	77	47	1.64

表-5 設計モーメントの最大モーメントに対する安全率

試験体 No.	最大耐力 (kN)	① 最大モーメント (kN・m)	② 設計モーメント (kN・m)	①／② 安全率
1	108	58.3	20.1	2.90
2	113	60.5	24.6	2.46
3	108	59.1	24.6	2.40
3'	202	93.1	24.6	3.78
4	147	79.0	28.5	2.77
5	190	99.7	28.5	3.50
6	226	116.1	36.7	3.16
7	231	119.5	36.7	3.26

3.4 曲げ剛性低下区間の設定及び曲げ剛性値の算定方法

(1) 剛性低下区間の設定

接合部付近では、接合部に作用する曲げモーメントの方向に応じて、図-7に示す2通りの応力状態が考えられる。引張応力としては、接合筋に発生する応力であり、圧縮応力としては跳ね出しの重ね合わせ部に発生する応力である。曲げモーメントの作用方向により、アーム長さ（L）は2タイプあるが、実際にはどちらの方向にも作用する。正方向載荷及び負方向載荷の両方向を見込めば接合筋を中心としたLの2倍の範囲が剛性低下区間と考えられる。接合筋毎に剛性低下区間長を算出した結果を表-6に示す。Asは有効鉄筋断面積で、ねじ部の断面積であ

る。区間長は各々が細かい数字でそれぞれ異なる値となり、実用上非常に煩雑となるため、区間長を重ね合わせ長さ500mmと設定した。その妥当性を確認するために、図-8に示す地中構造物の3連ボックスカルバートを想定して、一方は剛性低下区間を2L，他方は設定した500mmとし、剛性マトリックス法（変位法）により応力計算を行い、両者の発生曲げモーメントを比較した。地震時における発生モーメントの算出結果を表-7に示す。発生曲げモーメントの差は1%以内であり、剛性低下区間を500mmとしてもほとんど影響ないといえる。

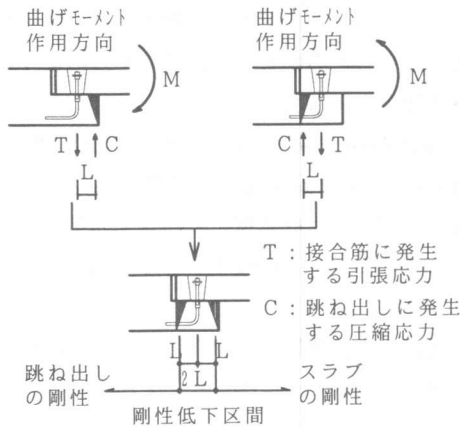


図-7 応力状態

表-6 剛性低下区間長の算出結果

接合筋径	As(cm ²)	L(cm)	剛性低下区間長(cm)
D19	2×2.45	23.21	2L=46.42
D22	2×3.03	23.04	2L=46.08
D25	2×3.53	22.90	2L=45.80
D29	2×4.59	22.66	2L=45.32

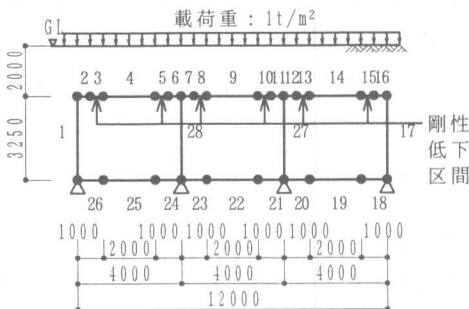


図-8 3連ボックスカルバートモデル

表-7 発生モーメントの算出結果

部位	部材番号	最大モーメント (kN・m)		両者の差 (%)	
		低下区間 453.2 mm	低下区間 500 mm		
側壁(内)	上部水平部材	5~8,10~13	-118	-117	0.8
	垂直部材	27,28	102	103	1.0
	下部水平部材	20,21,23,24	-170	-170	0.0
側壁(外)	上部水平部材	2,3,15,16	-112	-111	0.9
	垂直部材	1,17	-141	-142	0.7
	下部水平部材	18,26	-141	-142	0.7
	頂版	4,9,14	42	42	0.0
	底版	19,22,25	99	100	1.0

(2) 曲げ剛性値の算定方法

曲げ剛性値の算定モデルを図-9に示す。I₀、I₁、I₂は各断面における断面2次モーメントである。I₁はスラブの、I₂は跳ね出しの断面2次モーメントで既知数、I₀は剛性低下区間の断面2次モーメントで未知数である。剛性マトリックス法（変位法）を用い、設計荷重Pを作用させたときに、荷重載荷点下のたわみが実験測定値と一致するようなI₀（原点と接合筋が許容応力度に達した点を結ぶ剛性）を求めた。

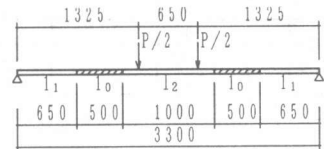


図-9 曲げ剛性値の算定モデル

3.5 曲げ剛性値とスラブ厚，跳ね出し厚，接合筋径との関係

3.4の算定方法より求めた曲げ剛性値を表-8に示す。ヤング係数は試験体全区間にわたって同一とした。正方向荷重であるNo.3と負方向荷重であるNo.3'を比較すると、No.3'の曲げ剛性値はNo.3の約1.3倍の値を示し、3.1で示した最大荷重の傾向と同様に、負方向荷重の方が剛性が高いことが分かった。

接合筋の有効断面積(As)と曲げ剛性値(EI₀)の関係を図-10に示す。接合筋の有効断面積

が大きくなるに従い、概ね比例して曲げ剛性値が増加するのが認められた。また、接合筋径が同一の場合においては、スラブ厚、跳ね出し厚が変化しても曲げ剛性値はあまり変わらず、曲げ剛性値に与える影響は、接合筋径の影響に比べて小さいことが分かった。

剛性低下区間の I_0 と隣接するスラブの I_1 の比較表を表-9に示す。 I_1 は、矩形断面における断面2次モーメントの算出式を用いて算出した。No.1からNo.7の順に、すなわちスラブ厚が大きくなるに従い I_0 が I_1 に占める割合が小さくなり、その値は I_1 の約9~30%の範囲であった。これは、板厚が大きくなるに従い、 I_1 は板厚の3乗で大きくなるが、 I_0 は接合筋で決まってくるため I_1 よりも値の上昇率が小さいことに起因するものと思われる。

表-8 曲げ剛性値

試験体 No.	鉄筋有効 断面積 A_s (cm^2)	断面2次 モーメント I_0 (cm^4)	ヤング係数 E ($\times 10^4$ N/mm 2)	曲げ剛性値 EI_0 ($\times 10^5$ kN \cdot mm 2)
1	2.45	12900	3.07	39603
2	3.03	13925	3.18	44282
3	3.03	14950	3.36	50232
3'	3.03	19700	3.24	63828
4	3.53	18200	3.07	55874
5	3.53	19150	3.43	65685
6	4.59	22800	3.21	73188
7	4.59	26600	3.30	87780

ヤング係数E: テストピースを用いて圧縮試験を行い、応力ひずみ曲線より求めた値
曲げ剛性値 EI_0 : 断面2次モーメント I_0 とヤング係数Eを乗じた値

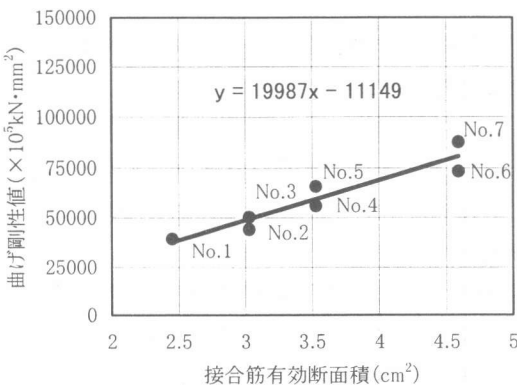


図-10 接合筋の有効断面積 (A_s) と曲げ剛性値 (EI_0) の関係

表-9 I_0 と I_1 の比較表

試験体 No.	剛性低下 区間の I_0 (cm^4)	スラブ の I_1 (cm^4)	I_0/I_1
1	12900	66667	19%
2	13925	66667	21%
3	14950	66667	22%
3'	19700	66667	30%
4	18200	130208	14%
5	19150	225000	9%
6	22800	225000	10%
7	26600	225000	12%

4. まとめ

プレキャスト製の分割型多連式ボックスカルバートにおける側壁部材と頂版部材の接合部をモデル化した実物大の曲げ載荷実験により、以下の知見が得られた。

①設計荷重を接合筋が長期許容応力度 ($\sigma = 180\text{N/mm}^2$) に達するときの荷重とした。設計荷重の実験値は計算値を上回っていること、設計荷重時にコーン状破壊をしていないことが確認された。

②剛性低下区間は、スラブと跳ね出しの重ね合わせ長さ500mmとして実用上ほとんど影響ないといえる。

③接合部材における剛性低下区間の曲げ剛性値は、隣接するスラブの曲げ剛性値と比べて低下しており、約9~30%の値であった。

④負方向載荷よりも正方向載荷の方が、曲げ剛性が小さいことが認められた。

⑤曲げ剛性値は、接合筋の有効断面積が大きくなるに従い、概ね比例して増加することが認められた。一方、同一の接合筋径においては、スラブ厚および跳ね出し厚が曲げ剛性値に与える影響は小さかった。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年制定）設計編，P118，1996.3