

外ケーブル方式 PC 箱桁橋の突起定着部の破壊耐力

日本大学 正会員 工博 柳沼 善明

1. はじめに

外ケーブル方式PC箱桁橋において、外ケーブルの定着には突起定着部が用いられている。このような外ケーブル方式PC箱桁橋の場合では、桁の破壊に対する安全性ばかりでなく、突起定着部の破壊に対する安全性の検討も重要である。突起定着部の安全性は、実物大あるいは寸法を縮小したモデルによる実験^{1) 2)}で確認されているが、試験体が破壊に至る実験は数少なく、突起定着部周辺の破壊に関する研究も数少ない。

このような背景から、プレストレストコンクリート技術協会では、「PC 箱桁定着部の破壊解析委員会 (委員長: 田辺忠顕名古屋大学名誉教授)」を設置し、突起定着部の安全性が検討された。突起定着部周辺の有限要素法 (以下 FEM と略) の数値解析においても、弾性解析が主であり、突起定着部周辺の破壊形態が不明であることから、非線形 FEM を用いて、突起定着部の破壊形態や破壊耐力を評価している。さらに、現時点での非線形 FEM の解析精度が未確認のため、非線形 FEM の解析結果をマクロ的な観点から判断できるマクロモデルを提案している。

そこで本研究は、突起定着部をモデル化した供試体の破壊実験を実施し、破壊耐力についてマクロモデルによる計算結果と実験結果とを比較検討することを主な目的とした。本研究では、突起定着部周辺の桁部分での破壊を対象としている。

2. マクロモデルによる破壊耐力^{3) 4)}

突起定着部の破壊は3つの破壊パターンに分類され、破壊パターン I は定着突起内部の抵抗機構の破壊、破壊パターン II は突起と床版あるいはウェブとの境界におけるスリップ破壊、破壊パターン III は桁本体の構造破壊である。本研究では、突起定着部周辺の桁本体の破壊を対象としているため、文献 [3, 4] から破壊パターン III のマクロモデルによる破壊耐力の算定についてのみ述べる。

破壊パターン III の桁断面の構造破壊による破壊耐力は、ウェブから離れた位置に定着した場合と、ウェブと下床版の隅角部に配置した場合の2種類に大別されるが、ここでは、突起定着部をウェブから離れた位置に設置した場合のみについて述べる。

箱桁から突起定着部の周囲を切り出した free body (図-1 参照) を破壊耐力算定のための設計断面とする。この free body の各側面に作用している力成分を図-2 に、モーメント成分を図-3 に示す。 N , S , Q はそれぞれ軸力, 面内せん断力, 面外せん断力であり, M , T はそれぞれ曲げモーメント, ねじりモーメントで, 添え字はそれぞれ free body の各断面を表している。free body の突起定着部には定着力 P が外力として作用している。

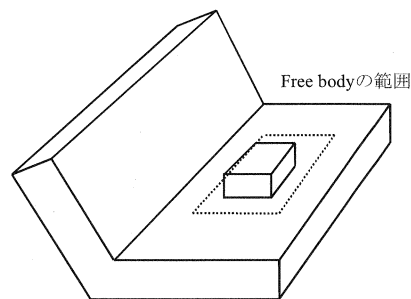


図-1 箱桁の突起定着部を切り出した free body の範囲

図-2, 3から、力とモーメントの釣り合いは、

$$X \text{ 方向へ } -S_{S1} + N_{S2} + S_{S3} - N_{S4} = 0 \quad (1)$$

$$Y \text{ 方向へ } -N_{S1} + S_{S2} + N_{S3} - S_{S4} - P = 0 \quad (2)$$

$$Z \text{ 方向へ } -Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S3} - Q_{S4} = 0 \quad (3)$$

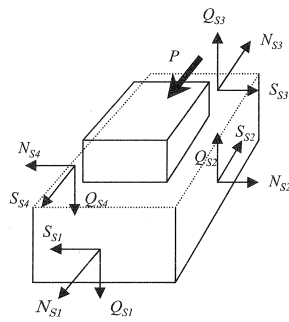


図-2 free body の各断面に作用している力

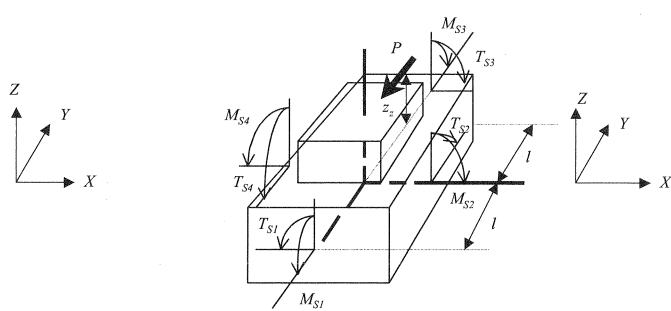


図-3 free body の各断面に作用しているモーメント

マクロに対称条件を考慮するととして $S_{S1} = S_{S3} = 0$, $S_{S2} = -S_{S4}$ を強制すると,

$$P = N_{S3} - N_{S1} + 2S_{S2} \quad (4)$$

free bodyの各側面の断面力はその辺の中央, 中心に作用すると考えて, X軸まわりのモーメントの釣り合いは, 突起定着部が終局状態で各断面力 M_{S1} , M_{S3} , T_{S2} , T_{S4} , Q_{S1} , Q_{S3} がそれぞれ塑性限界に達して, 極限解析が可能な状態であるとする。突起定着部が剛体としてスラブ中心で θ だけ回転したとして (図-4 参照), 仮想仕事の原理から

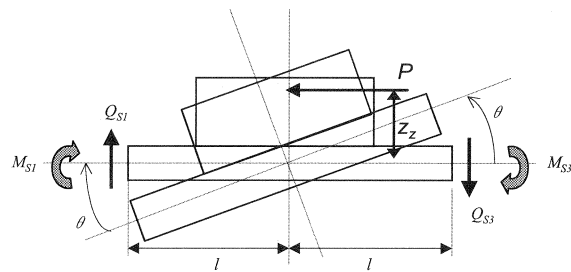


図-4 仮想変位 θ を与えた時の剛体変形

$$P_{ult} \cdot z_z \cdot \theta = (-M_{S1}'' \cdot \theta + M_{S3}'' \cdot \theta + 2 \cdot T_{S2}'' \cdot \theta) - l \cdot \theta \cdot (Q_{S1}'' + Q_{S3}'') \quad (5)$$

ゆえに,

$$P_{ult} = \frac{1.0}{z_z} \cdot (-M_{S1}'' + M_{S3}'' + 2 \cdot T_{S2}'') - \frac{l}{z_z} \cdot (Q_{S1}'' + Q_{S3}'') \quad (6)$$

となる。上式(6)で示される P_{ult} は突起定着部の破壊耐力であり, 上界定理により示される一つの上界値を示している。式(5), (6)中の各断面に作用している終局耐力 M_{S1}'' , M_{S3}'' , T_{S2}'' , Q_{S1}'' , Q_{S3}'' はコンクリート標準示方書に示されている終局耐力⁵⁾ から求めることができる。

3. 実験概要

実験に用いた供試体は, 箱桁橋の突起定着部の周辺をモデル化し, 床版に鋼製の突起を取り付けたもので (図-5 参照), 実橋箱桁床版の約 1/10 にした縮小模型である。鋼製突起は, 接着剤を用いて鋼制定着板と床版とを接着し, さらに床版の両面からボルト締めして固定した。供試体は表-1 に示すように, 突起の定着板の長さを 3 種類に変化させ, タイプ N については載荷荷重の偏心距離を 2 種類に変化させた。ここに, 偏心距離は図-5 の載荷荷重 P と床版厚の中心までの距離である。鋼製突起を取り付けた床版は, 幅 54cm, 高さ 60cm, 厚さ 3cm である。床版には, $\phi 3\text{mm}$ の鉄筋を 2cm 間隔とした金網を 2 層配筋し, それぞれのかぶ

りは3mmとした。載荷実験は、変位制御で行い、実験状況を写真-1に示す。

縮小模型の供試体にはマイクロコンクリートを使用し、W/C=65%, S/C=400vo1%で、骨材は5mmふるいを通した細骨材を使用した。マイクロコンクリートとは、コンクリート構造物の縮小模型に合わせて骨材を縮小したコンクリートを言い、一般にはモルタルの骨材粒径を調整したもの⁶⁾であり、マイクロコンクリートを用いた実験が実施されている⁷⁾。細骨材Sの密度は2.60g/cm³、セメントCの密度は3.14g/cm³であった。使用したマイクロコンクリートの強度特性を表-2に、使用した鉄筋の強度特性を表-3に示す。

表-1 供試体一覧

タイプ	供試体名	定着板長 cm	偏心距離 cm
S	S-1	10	7
N	N-1	14	7
	N-2		9
L	L-1	18	7

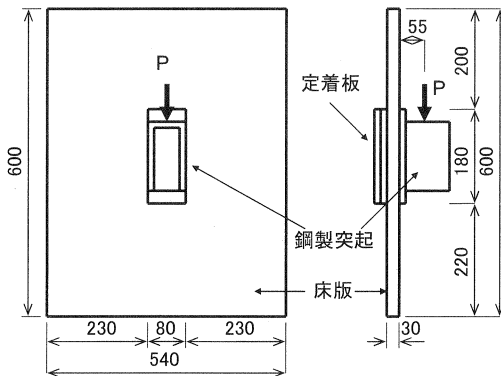


図-5 L-1の供試体形状 (単位: mm)

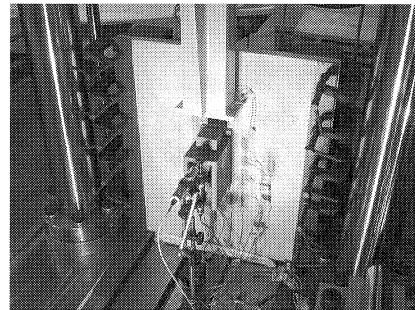


写真-1 載荷実験状況

表-2 マイクロコンクリートの強度特性

圧縮強度	割裂強度	ヤング係数
N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
35.8	3.53	22.8

表-3 鉄筋の強度特性

直径	断面積	降伏強度	引張強度	ヤング係数
mm	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
2.77	6.026	611	625	236

4. 実験結果

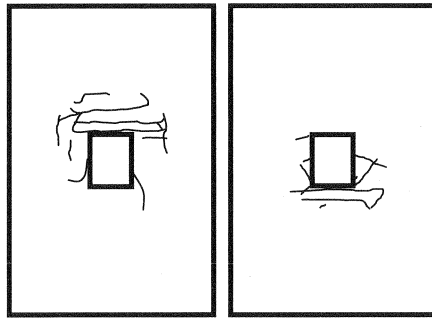
4.1 破壊後のひび割れ状況

破壊後の供試体のひび割れ状況を図-6, 7に示す。

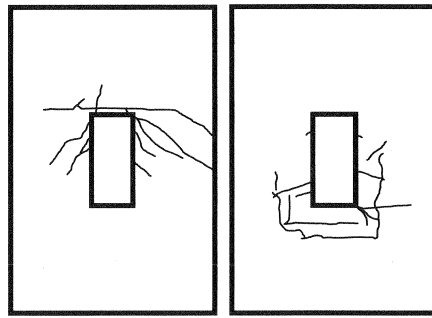
S-1のひび割れ状況は(図-6参照), 載荷面では最初に突起下部から下方向に斜めひび割れが発生した。ここに、斜めひび割れとは、突起側面に発生する突起の上下方向からある角度で斜めに発生するひび割れである。さらに荷重を増加させると、突起上部に横方向のひび割れが発生し伸展して、破壊した。載荷裏面では、まず突起上部の右側に横方向のひび割れが発生した。さらに荷重を増加させると、突起上部から下に向かって斜めひび割れが発生して、突起下部から上に向かって斜めひび割れが発生した。

L-1のひび割れ状況は(図-7参照), 載荷面では最初に突起上部から下方向に斜めひび割れが発生した。さらに荷重を増加させると、斜めひび割れが伸展して、突起上部に横ひび割れが発生して、破壊した。載荷裏面では、最初に突起下部から下に向かって斜めひび割れが発生した。さらに荷重を増加させると、突起下部周辺に縦ひび割れ、横ひび割れが発生した。L-1のひび割れ状況は、おおむねS-1と同様であった。

他の供試体のひび割れ状況も、上述したS-1, L-1とほぼ同じ傾向であった。



載荷面 載荷裏面
図-6 S-1のひび割れ状況



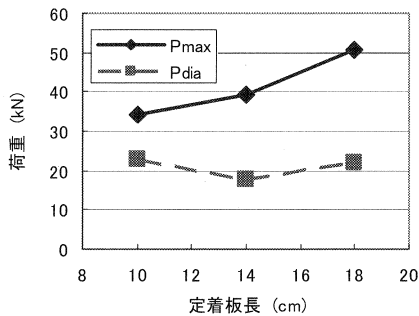
載荷面 載荷裏面
図-7 L-1のひび割れ状況

4. 2 斜めひび割れ発生荷重と最大荷重

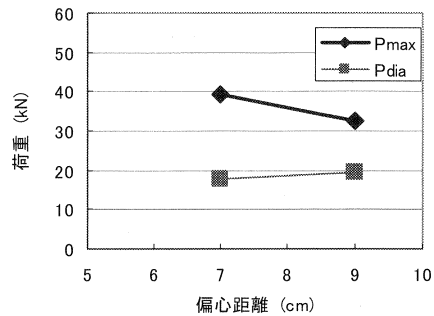
供試体の斜めひび割れ発生荷重 P_{dia} と最大荷重 P_{max} の実験値を表-4に示す。 P_{max} と P_{dia} に及ぼす突起の定着板長の影響と偏心距離の影響を図-8に示す。図-8(a)によれば、定着板長が長くなるにしたがい、 P_{dia} はほぼ一定であるが、 P_{max} は増加している。タイプSと比較して、タイプL(突起定着板長が18cm)の P_{max} は約1.47倍増加している。次に、図-8(b)によれば、荷重の偏心距離が大きくなると、 P_{dia} はほぼ等しい値であるが、 P_{max} は小さくなっている。これは、偏心距離が大きくなり、偏心曲げの影響が大きくなったためであると考えられる。

表-4 斜めひび割れ発生荷重 P_{dia} と最大荷重 P_{max} の実験値

タイプ	供試体名	P_{dia} kN	P_{max} kN
S	S-1	23	34.42
N	N-1	17.7	39.16
	N-2	19.62	32.72
L	L-1	22.16	50.56



(a) 定着板長の影響



(b) 偏心距離の影響

図-8 斜めひび割れ発生荷重 P_{dia} と最大荷重 P_{max}

4. 3 突起の変位性状

図-9に荷重と突起の変位との関係を示す。突起の変位とは、載荷荷重方向の突起の変位である。図-9 (a) 定着板長の影響によれば、タイプS, Nの変位は、最大荷重が異なるものの、ほぼ同じ挙動を示している。また、図-9 (b) 偏心距離の影響によれば、最大荷重が異なるものの、ほぼ同じ挙動を示している。

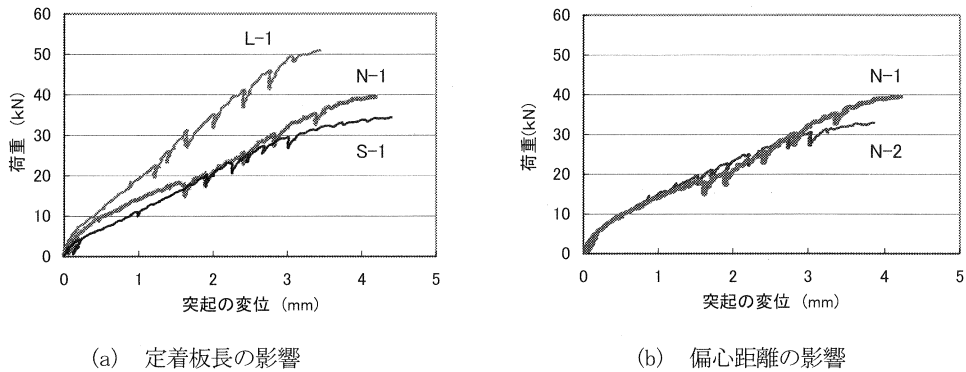


図-9 荷重と突起の変位の関係

4. 4 マクロモデルによる最大荷重の計算

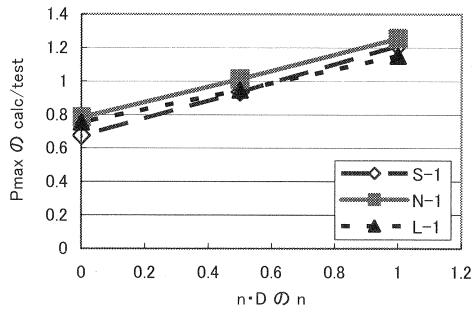
PC箱桁定着の破壊解析委員会では、突起の周囲を1D (Dは床版厚) だけ広げた範囲をfree bodyとして最大荷重を算出している^{3, 4)}。したがって、ここでもfree bodyを1Dだけ広げた範囲として最大荷重を計算し、その結果を表-5に示す。Pmaxのcalc/testの平均値は、定着板長を変化させた場合では1.207 (表-5 (a) 参照)、偏心距離を変化させた場合では1.226 (表-5 (b) 参照) となり、いずれの場合でも計算値が実験値よりも大きく計算されている。

表-5 最大荷重 Pmax の実験値と計算値との比較

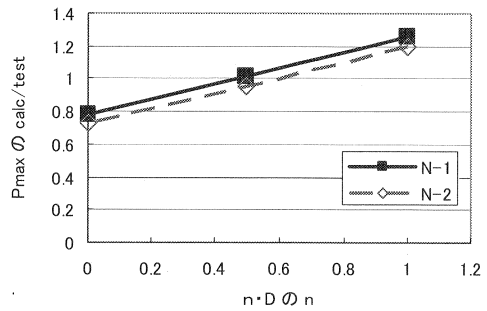
(a) 定着板長を変化させた場合					(b) 偏心距離を変化させた場合				
供試体名	定着板長 cm	偏心距離 cm	test kN	calc/test	供試体名	定着板長 cm	偏心距離 cm	test kN	calc/test
S-1	10	7	34.42	1.213	N-1	14	7	39.16	1.256
N-1	14	7	39.16	1.256	N-2	14	9	32.72	1.196
L-1	18	7	50.56	1.152				平均値	1.226
			平均値	1.207				標準偏差 (%)	2.47
			標準偏差 (%)	3.53					

次に、free body の範囲を変化させて Pmax を計算した結果を図-10に示す。図-10によれば、(a)、(b)ともに、nD の n が大きくなれば、すなわち free body の範囲が大きくなれば、Pmax が大きく計算されている。計算値が実験値とほぼ一定する free body の範囲は約 0.5D である。

マクロモデルによる破壊耐力の計算には、free body が回転する軸の位置の仮定が重要である。ここでは、回転軸の位置を free body の長さ方向の中央に仮定している (図-4 参照)。回転軸の位置は、最大荷重の計算値に影響を与えるため、free body の範囲ばかりでなく、回転軸の位置について詳細に検討する必要があるものと思われる。



(a) 定着板長を変化させた場合



(b) 偏心距離を変化させた場合

図-10 free body の範囲を変化させた場合における Pmax の実験値と計算値との比較

5. まとめ

本実験の範囲内で以下のことがいえる。

- 1) 斜めひび割れ発生荷重 P_{dia} の実験値は、定着板長や偏心距離の変化にかかわらず、ほぼ一定値を示す。しかし、最大荷重 P_{max} の実験値は、定着板長が長くなるにしたがい、増加する。偏心距離が大きくなると、 P_{max} は低下する。
- 2) 突起の周囲を 1D だけ広げた範囲を free body としたマクロモデルによる最大荷重の計算値は、実験値よりも大きく計算される。
- 3) free body を 0.5D だけ広げた範囲とした場合には、マクロモデルによる最大荷重の計算値は、実験値とほぼ等しく計算される。

マクロモデルによる最大荷重の計算には、free body が回転する軸の位置の仮定が重要である。したがって、free body の範囲ばかりでなく、回転軸については詳細に検討する必要がある。

最後に、本実験を実施するに当たり、井口淳、長谷川晃久両君ならびに日本大学理工学部社会交通工学科構造工学第2研究室の関係者の協力に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 西川和廣, 廣松新, 伊藤公彦: 外ケーブル定着突起の形状および配筋に関する研究, 11 回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム論文集, pp. 781-786, 2001
- 2) 大中英揮, 岡隆延, 加藤敏明, 小川整: 中国横断自動車道見延橋の大容量外ケーブル定着部実物大試験報告, 10 回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム論文集, pp. 237-242, 2000
- 3) PC 箱桁定着の破壊解析委員会: PC 定着部の破壊解析に基づく性能設計, プレストレスト技術協会, 2004
- 4) 内田裕市, 柳沼善明, 田辺忠顕: PC 箱桁定着部破壊解析委員会報告 (その1) —外ケーブル定着部の非線形解析とマクロモデルの検討—, プレストレストコンクリート, Vol. 47, No. 1, pp. 71-80, 2005
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリート便覧, pp. 1019-1021, 1987
- 7) 川口昌宏, 柳沼善明, 薦田敏郎: マイクロコンクリートの疲労強度, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp. 81-88, 1987