側溝のふた掛かり部の耐力評価に関する実験的、解析的研究

玉山豊* 福富光一** 伊東孝***

Experimental and Analytical Study on the Strength of the Gutter's Abutment

by

Yutaka TAMAYAMA*, Koichi FUKUTOMI** and Takashi ITO***

Generally, JIS type gutter is used in road construction. However, in the case of backfill, there's a possibility that compaction is insufficient when it is using. Therefore a rectangular section gutter was developed by the authors to improve constrains of construction caused by JIS type gutter. However, the range of strength of its abutment varies in relation to the load position as the shape of abutment is corbel and the shape changes depending upon the size of each product. In this study, first, the strength and deformation behavior up to peak load of a test specimen was measured during experiments. Furthermore, 2-dimensional RBSM (Rigid Bodies Spring Model) analysis was carried out to simulate experiments and very similar results are obtained. After that, the strength of abutment (Size 250) of an actual size product was estimated by using 2-dimensional RBSM analysis.

Key words:

Gutter, Abutment, Corbel, Strength, Loading test, 2-D RBSM

1 緒 言

道路工事などにおいては、一般的に品質保証の明確性、価格の安定性、入手の容易性などの利点から JIS A 5372 に定められた道路用鉄筋コンクリート側溝（以下、JIS 型側溝という）が広く用いられている。しかし、JIS 型側溝は、外形側面上部が張出しているため、張出し直下の埋め戻し材の転圧が不十分となる、また民地境界に隣接して敷設する場合には埋め戻し材を用いること自体が困難となる可能性が高い。

そこで、これらの欠点を解消できる形状として、Fig. 1 に示すとおり、外形鉛直部を直線とした側溝（以下、矩形断面側溝という）を考案した。構造的形状としては、箱型ラーメン構造とすれば、部材の薄肉化や軽量化を図ることができると思われるが、側溝には点検、維持管理や円滑な路面排水性能を付与する必要があるため、頂版の中央に開口部を有する有蓋式とした。当該構造物の断面は一樣ではないので、構造物全体については、3次元骨組構造解析を用いて部材剛性の変化を考慮した設計断面力を求めて適正部材厚と鉄筋量を算出し、また、実際に試作品を作製して想定される使用環境での設計荷重（ただし、鉛直載荷後輪荷重）による載荷試験も実施して直接的な評価も行った。したがって、これらの結果によって、構造物全体としての供用の安全性は概ね担保されたと推察される。ただし、JIS 型側溝は明確な設計根拠と多くの施工実績により、その品質（特に耐久性）が確認・保証されているが、

矩形断面側溝は、実際の現場における「経年による耐久性に関するデータ」があるわけではない。そのため、必要に応じて設計荷重以外の荷重や JIS 型側溝とは異なる断面形状によって作用する局所的な荷重などを想定し、懸念される部位があれば事前に検証を行わなければならない。

今回、当該側溝については、このような観点からふた掛かり部に着目した。ふた掛かり部は、Fig. 1 右に示すように片持ち梁（以下、コーベルという）であるが、頂版ハンチの延長として四角形断面の形状（製品のサイズによっては三角形に近い）としている。この形状は経済性や通水断面を確保するために、製品のサイズによって少し変更する必要があり、これに伴い載荷位置も移動する。したがって、部材に作用する曲げとせん断の影響度が変化する

Fig. 1 Image of setting the gutter and its cross section.

† 原稿受理 平成 28 年 12 月 12 日 Received Dec. 12, 2016 ©2017 The Society of Materials Science, Japan

* 新環境技術サービス 〒507-0813 岐阜県多治見市滝呂町

* New Env. Eng. Dev. Service, Tajimi-shi, Gifu, 507-0813.

** ㈱赤羽コンクリート 〒489-0003 愛知県瀬戸市穴田町

** Akabane Concrete Co. Ltd., Seto-shi, Aichi, 489-0003.

*** 正 会 員 豊田高専環境都市工学科 〒471-8525 愛知県豊田市栄生町

*** Dept. Civil Eng., Toyota Tech. College, Toyota-shi, Aichi, 471-8525.

ことにより、コーベルの耐力は大きく異なり、また複雑な変形・破壊形態を示すことが予想される。

本研究では、まず、ソリッドおよび梁要素による3次元有限要素法（以下、3-D FEM という）を用いた弾性構造解析によって、コーベルの載荷状態における応力・変形状態について予測・考察を行い、2次元の剛体ばねモデルによる離散化極限解析（以下、2-D RBMS という）を用いて、当該コーベルの破壊挙動を表現できる試験体寸法を決定した。そして、実際にその試験体を作製して載荷試験を行い、荷重および変位を測定することにより、当該部の主に形状と載荷位置の違いによる耐力と変形および破壊挙動を直接的に調査し、また、試験値と解析値を比較して2-D RBMS の妥当性を確認した。

この後、再び2-D RBMS を用いて実構造物形状に近い解析モデルによる破壊予測を行い、補強鉄筋の可否について検討した。

2 矩形断面側溝のコーベル

2・1 コーベルの形状について

前述のJIS型側溝は、JIS A 5372 推奨仕様 E-3 落ちふた式U形側溝3種であり、JIS A 5372:2016によれば、その用途は車両（後輪一輪50kN以下）が隣接して走行することはまれで、走行することがあっても一時待避などで低速で走行するような場所に、車道に並行して設置するものと区分している。また、JPCS（コンクリート製品JIS協議会規格）のRC72E3では、変動荷重をダンプトラック（T-25）の後輪荷重、その接地面を長方形と仮定し、構造物寸法と後輪の接地幅や長さ、また片側後輪の隣接軸距などを考慮して同側溝とこれに敷設するふたの構造性能照査手法を示している²⁾。したがって、本研究対象の矩形断面側溝は基本的にこれらに準拠する。一般的なダンプトラックの輪配置³⁾で同状態を示すと、概ねFig. 2のとおりとなる。

矩形断面側溝のふた掛かり部は、前述のとおり、内側へ張出すコーベルとしているので、この設計荷重に対する安全性という点に関して、JIS型側溝と矩形断面側溝とは異なると考えられる。その理由としては、Fig. 3に示すとおり、矩形断面側溝とJIS型側溝のふた掛かり形状による作用断面力の相違が挙げられる。矩形断面側溝では、後輪荷重がふたを介してコーベルに作用し、同部に曲げとせん断力が作用する。一方、JIS型側溝では、同様に荷重は伝達するが、ふた掛かりは側壁の上端面となる。荷重は側壁上面のすべてに作用していないので僅かに偏心するが、同部に作用する曲げモーメントはかなり小さく、ほとんどが軸方向圧縮力として側壁に作用すると推察される。両者を比較すると、前者は断面力の大小により、コーベルに対して補強鉄筋の配置の可否を検討する必要があるが、後者は断面力に対し、コンクリートの圧縮強度だけで十分耐えると考えられる。したがって、ふた掛かりとしては、後者のほうがより安全であると推察される。また、矩形断面側溝のコーベルは、前述のとおり、製品のサイズによ

Fig. 2 Service and load condition of the gutter.

Fig. 3 Sectional force of the abutment of the rectangular section gutter and JIS type gutter.

Fig. 4 Shape of the corbel and the load position.

て形状が異なり、また、載荷位置も移動する。製品が小サイズの場合、断面形状は張出し先端部がきわめて短辺の四角形としているが、サイズが大きくなると明確な四角形で寸法もやや大きくしている。また、載荷位置も小サイズでは張出し部のみが載荷域となるが、サイズが大きくなると側壁部材厚も大きくなるので、載荷域は側壁部材内への占有も可能となる（Fig. 4）。

2・2 コーベルの変位および応力について

矩形断面側溝について、構造解析プログラム LISA ver.7.7を用いて3-D FEMによる弾性構造解析を行い、コーベルに鉛直後輪荷重が作用したときの応力・変形状態について考察した。

解析に用いるコンクリート、鉄筋の材料定数をTable 1に示す。材料定数は、両者とも一般的な構造性能設計などで用いられる値を仮定した。載荷条件は、片側後輪の一軸荷重として $Q=49.1\text{kN/輪}$ （旧JIS A 5345:2000の値を使用）とし、これに衝撃係数 $i=0.1$ を考慮した荷重 $P=(1+i) \times Q=54.1\text{kN}$ が開口部に敷設されるふたに作用し、同荷重 P がふたを介してコーベルには等分布荷重 q が作用すると仮定した。

Table 1 Material constant.

Material		E (N/mm ²)	v	ρ (kN/m ³)
Concrete		24000	0.20	24.0
Steel	SWM-P6	200000	0.30	78.5
	D10	200000	0.30	78.5

Fig. 5 Analytical model of the gutter by 3-D FEM.

Fig. 6 Result of the gutter by 3-D FEM.

ここで、矩形断面側溝のコーベルには点検や維持管理などのため、通常、開口部に寸法 $L=500\text{mm}$ のふたが二枚設置される。T-25 のダンプトラックが側溝の直上を通過する際には、Fig. 2 を見ても明らかのとおり、後輪の隣接軸距がおおよそ 1.3m であるので、ふた一枚のみに後輪が上載されるが、本解析では、ふた二枚にそれぞれ荷重 P が作用するとした。

構造解析モデルは矩形断面側溝のサイズ 250 (製品呼称) とし、コンクリートは八節点のソリッド要素で表現してその要素節点が鉄筋位置となるように調整し、鉄筋を同節点で連結した梁要素で表現してリンクさせた。また、境界条件は、側溝の底版下面の x , y , z 方向の変位を拘束した (Fig. 5)。コーベルは実形を忠実に模し、張出し長 $l=45\text{mm}$ 、先端厚さ $t_1=14.5\text{mm}$ 、付け根厚さ $t_2=65\text{mm}$ の四角形断面でモデル化した。

コーベルの変形や応力は頂版拘束による影響を受けられると思われる。ただし、解析モデルは前後、左右で対称性を有するので、Fig. 6 に示すとおり、頂版に最も近い節点 A と遠い節点 (開口部中央) B の二節点を選定してそれぞれの水平方向変位 δ_x 、鉛直方向変位 δ_y 、主応力 σ_1

Fig. 7 Shape of the test specimen and method of loading test.

を抽出した。

解析結果より、 δ_x , δ_y は頂版部から離れるに従って大きくなる。これは、当然ながら頂版の剛性による拘束によって、これに隣接する Node A の変位は小さくなる。一方、中央部の Node B は頂版による拘束が緩和されるので、両変位とも最大となる。したがって、換言すれば、変形量が大きい中央部では Fig. 6 の主応力 σ_1 分布を見ても明らかのとおり、側壁が大きく変形することによって、コーベルに生じる応力は緩和されることになり、むしろ側壁部材の方が先に破壊するが、側壁に配置する鉄筋の補強効果により、結果としてぜい性的な破壊は生じない可能性があると推察される。これに対し、頂版に隣接するコーベルでは、拘束によって側壁はほとんど変形しないので、作用荷重によってコーベルのみがぜい性的に破壊する可能性があると推察される。ちなみに、当該側溝に使用するコンクリートの設計基準強度は $f_{ck}=29.4\text{N/mm}^2$ であるので、本荷重条件による解析で得られた Node A に生じる主応力 $\sigma_1=2.35\text{N/mm}^2$ は、使用コンクリートの引張強度 $f_{tk}=2.19\text{N/mm}^2$ を卓越することになる。

なお、 f_{tk} は、下式によって求めた推定引張強度である。

$$f_{tk}=0.23f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

f_{tk} : コンクリートの推定引張強度 (N/mm^2)

f_{ck} : 設計基準強度 (N/mm^2)

したがって、コーベルの耐力を適正に評価するために、頂版部に隣接するコーベルを模した試験体による载荷試験と解析を行ってその耐力と破壊形態を調査した。

3 試験体による载荷試験および解析

3・1 試験体の寸法形状と試験方法

本研究では、前述のとおり、コーベルの载荷位置によって変形・破壊挙動および耐力が異なるので、コーベルの形状を模した試験体を複数作製し、同部にとって最も厳しい条件で試験を行うこととした。なお、コーベルにとって厳しい条件とは、なるべく他の部位の変形が拘束された状態でコーベルのみが破壊することである。

まず、Fig. 7 に示す形状の試験体と载荷方法を考案した。試験体は、当該製品の中で最も小さいサイズの 250 のコーベル形状を概ね模し、張出し長さ $l=50\text{mm}$ 、高さ $h=$

65mm の三角形で、これを左右対称に有する形状とした。なお、柱部の高さは $h_0=50\text{mm}$ で、厚さは $t=100\text{mm}$ とした。

載荷試験の方法としては、載荷長が 50mm となるように、コーベル上面に鋼板 (50mm×100mm×9mm) を載せ、更にその上に H 形鋼 (100mm×100mm) の載荷板を載せてアムスラー式耐圧機の中心と載荷領域の中心を合わせる。そして、ロードセル、コーベル先端の一箇所に変位計を設置し、データロガーとパソコンを用いて、一定間隔 (三秒間) で自動計測した。これを測定値 1 (No.1)、もう一方についても同様の測定を行い、測定値 2 (No.2) とした。コーベルは、載荷領域が張出し部の場合と一部柱部材に架かる場合とでは耐力は大きく異なることが予想される。したがって、載荷パターン i は張出し部のみ、パターン ii は i から 10mm、パターン iii は ii から 10mm それぞれ載荷領域を柱部材へ移動させて試験を行った。

3・2 試験体の適正寸法の抽出

試験体の適正寸法を抽出するために、Table 2 に示す計九種の部材寸法について 2-D RBSM を行った。

ここで、適正寸法とは、前述の三つの載荷パターンに対して必ずコーベルだけが破壊する部材寸法である。したがって、Case 1, 6, 9 では載荷パターン i, ii, iii について、これら以外のケースでは載荷パターン iii による載荷条件で解析を行い、試験体の破壊形態の変化やコーベルと柱部の両方に破壊を生じ、コーベルの耐力評価が困難な状態となるときの部材寸法を調査してコーベルだけが確実に破壊する試験体の部材寸法を決定することとした。2-D RBSM は、竹内ら⁴⁾が開発したプログラムを用いて解析を行った。

3・3 解析に必要な諸条件

1) 材料定数および強度特性

2D RBSM で用いる材料定数および強度特性は、Table 3 の値を仮定した。コーベルは、現状では無筋としているので、コンクリート要素のみとした。

2) 材料の構成則

コンクリート要素境界面の材料構成則として、法線方向応力については、Fig. 8 に示すとおり、圧縮特性は多直線モデル、引張特性は簡便的に弾性限界ひずみ ϵ_{cr} の 20 倍の値で応力が 0 となる一次減少直線モデルでそれぞれ仮定した。また、接線方向応力については、Fig. 9 に示す修正モール・クーロンの破壊基準に従うと仮定し、コンクリートのせん断強度定数 c 、 ϕ は以下の値を用いた。

$$c=4.41\text{N/mm}^2, \phi=37.0^\circ$$

c :せん断強さ, ϕ :内部摩擦角

3) 構造モデル、境界および載荷条件

試験体は左右対称であるので、Fig. 10 に示すとおり、解析には 1/2 モデルを採用した。境界条件は、試験体底部に鋼版と等価の剛性を有する高さ 10mm の要素を結合して同要素の x , y 方向および回転 θ を拘束し、また、1/2 モデルとした切断部分についても切断隣接要素を同様に拘

Table 2 Dimension of columns and beams.

Dimension of members (mm)		
Case	Column	Beam
1	60	60
2	70	70
3	80	80
4	90	90
5	95	95
6	100	100
7	105	105
8	125	125
9	150	150

Table 3 Material constant and strength properties.

Material	Material constant			Strength properties	
	E_c (N/mm ²)	ν_c	ρ_c (kN/m ³)	F_c (N/mm ²)	F_t (N/mm ²)
Concrete	26950	0.167	23.5	29.4	3.31

Fig. 8 Material constitutive law (Normal direction).

Fig. 9 Mohr-coulomb yield criterion modified (Tangential direction).

Fig. 10 Analytical model of 2-D RBSM.

束した。載荷領域については、試験と同様に鋼板と等価の剛性を有する高さ 5mm の要素を上端に結合して同要素に荷重を与えた。解析における要素の厚さは、試験と同じ $t=100\text{mm}$ である。何れのケースのモデルも要素形状は簡便な三角形とし、分割数は一定としたが、解析結果は要素

分割に依存し, また, 要素境界がひび割れの発生位置や進展に対して大きな影響を及ぼすと推察されるので, 荷重領域内 (Fig. 10 中 a, b) とひび割れが発生すると思われる領域 (Fig. 10 中 c) の垂線の分割幅は 10mm とした.

4) 試験体の形状寸法の決定

Case 1, 6, 9 における荷重パターン i, ii, iii の 2-D RBSM による解析結果を Table 4, 各ケースの終局時における破壊形状を Fig. 11 に示す. また, ケース別および荷重パターン別の結果と傾向を以下に挙げる.

a) ケース別の結果

部材寸法の厚さが大きくなると, 破壊する部材は柱からコーベルに移行する. 解析結果によれば, 部材寸法が 60mm である Case 1 は, すべての荷重パターンにおいて柱が破壊している. しかし, 部材寸法が 100mm である Case 6 になると, すべての荷重パターンにおいてコーベルが破壊している. このことより, 柱とコーベルの両部材が破壊する部材厚さは 60mm~100mm の間に存在する.

b) 荷重パターンの結果

Fig. 11 に示す破壊形状において, コーベルが破壊する Case 6 および 9 について見ると, 荷重パターン i では両ケースともコーベルは引張破壊を起こすようである. しかし, 作用荷重の占有域が柱部材に入る荷重パターン ii, iii では両ケースとも引張破壊のほか, コーベルの付け根近傍にせん断破壊や圧縮降伏などを生じ, 複合的な破壊形態を示すようになる (ただし, Case 6-ii は, 引張破壊が主となっている). 最大荷重は, 荷重パターン $i < ii < iii$ で, 荷重領域の一部が柱部材を占有し, 複合的な破壊形態となるほど大きくなる傾向である.

本解析結果によって, 部材寸法が 100mm の Case 6 であれば, すべての荷重パターンでコーベルが破壊することが分かった. しかし, 実際の試験体には材料や寸法のばらつきが存在し, また試験誤差も発生する. したがって, 前述の柱とコーベルの両部材が破壊する部材厚さを調査し, 確実にコーベルが破壊する試験体の適正寸法を決定した. 調査方法は, Table 2 に示した各ケースの荷重パターン iii について解析を行い, 終局時の破壊形状およびその変化を確認した. 荷重パターン iii における各部材寸法の最大荷重の変化を Fig. 12 に示す. 荷重パターン iii において, 荷重が最も大きいときの部材寸法が 95mm の Case 5 である. 同ケースでの終局時の破壊形状を Fig. 13 に示す.

これによれば, 当該部材寸法るとき, 作用荷重はコーベルと柱に伝達し, 両部材とも破壊を生じるようである. したがって, 部材寸法が 100mm の Case 6 では, 前述のとおり, 材料や寸法のばらつきによって, 確実にコーベルだけの破壊を生じない可能性がある. 安全を見て Case 9 の部材寸法を採用し, 先に示した Fig. 7 の形状で, 柱, 梁の寸法はともに 150mm, 厚さは 100mm とし, 各荷重パターン用として試験体を三体作製し, 荷重試験は試験体の材料や寸法のばらつきなどを考慮してコーベル No.1, 2 についてそれぞれ測定を行った.

Table 4 Result of 2-D RBSM (Case of 1,6,9-i,ii,iii).

Case	Load pattern	Maximum load (kN)	Member plastic fractured
1	i	5.640	Column
	ii	7.510	Column
	iii	11.354	Column
6	i	9.805	Corbel
	ii	14.455	Corbel
	iii	24.990	Corbel
9	i	9.560	Corbel
	ii	15.593	Corbel
	iii	21.128	Corbel

Fig. 11 Fracture mode of each model.

Fig. 12 Relationship between P_{max} and dimension of member.

Fig. 13 Fracture mode of Case 5.

4 載荷試験の結果

載荷試験の結果を載荷パターン別に荷重-変位図としてまとめ、また、載荷パターンに対応する前述の 2-D RBSM による解析結果をそれぞれ重ねて Fig. 14, 15, 16 に示し、得られた諸事実に基づき、以下のとおりに考察する。

- 1) すべての載荷パターンにおいて、弾性域での荷重-変位関係(傾き)は、解析値と概ね一致している。また、試験によっても載荷位置が変わると、その耐力(弾性限界荷重)は同様に異なり、載荷領域が柱部材に占有するに従って耐力は向上することが証明された。
- 2) 弾性限界において、載荷パターンiiで若干のばらつきが認められるものの、試験値は解析値よりもやや大きいようである。この要因として、実際の試験体の材料特性と解析で用いた材料定数との誤差が考えられる。試験体は、製品の製造工場で作製したので、作製期間中の製造工場における使用コンクリートの工程圧縮強度は Table 5 のとおりであり、良好な管理状態にあると判断される。なお、圧縮強度試験は、材齢 14 日の標準水中養生による円柱供試体で測定している。一方、解析では、材料や寸法にはばらつきを生じること、試験体は製品と同様に気中養生を行うので、管理強度値よりも小さくなることなどを考慮して、材料定数は製品保証圧縮強度の $f_{ck} = 29.4 \text{ N/mm}^2$ を用いているので両者には大きな隔たりがあり、この差が結果に現れた可能性が考えられる。
- 3) 塑性域においては、試験値と解析値ではその推移に相違を生じる。ここで、載荷パターンiiiについては、先に実施した載荷パターンiiiによって、せん断破壊挙動を把握することができたので、塑性化後の載荷を省略した。したがって、載荷パターンiとiiiについて考察すると、載荷パターンiでは、試験値の推移はやや変動が大きいものの、ひび割れの発生位置と進展状況から、破壊の主因が曲げ破壊であると思われるので、解析値と概ね一致すると判断しても良さそうである。一方、載荷パターンiiiは、塑性化後、一旦、荷重が減衰しながら変位は増加するが、その後、再び荷重は増加して解析値のおよそ二倍の荷重で破壊を迎える。この要因としては、特にせん断断面に内在する粗骨材自身および粗骨材の噛み合いによるせん断抵抗が予想よりも大きく、材料構成則の設定値と整合していなかったことが考えられる。しかし、実用上、無筋構造物の耐力は、ひび割れ荷重(弾性限界荷重)であると考ええる。したがって、結果として、すべての載荷パターンのひび割れ荷重において、試験値と Case 9 における解析値は概ね等しいと推察される。また、各載荷パターンの破壊状況として、ひび割れをトレースした写真と破壊断面の写真を Fig. 17 に示す。同写真と先に示した解析における Fig. 11 中の Case 9 の破壊形状はかなり類似

Fig. 14 Relationship between P and Δv (Pattern i).

Fig. 15 Relationship between P and Δv (Pattern ii).

Fig. 16 Relationship between P and Δv (Pattern iii).

Table 5 Compressive strength of the specimen.

Compressive strength (14days, S.W.C)				
N	Average (N/mm ²)	Maximum (N/mm ²)	Minimum (N/mm ²)	Standard deviation (N/mm ²)
16	37.3	39.5	33.3	1.79

しており、このことから本解析精度の高さが窺える。したがって、2-D RBSM は当該部位の耐力を予測するうえで有用な解析手法であると判断される。

5 耐力の予測

5・1 解析モデルと条件

試験体の載荷試験によって 2-D RBSM の有用性が示されたので、再び同解析手法を用いて実際の製品寸法によるモデルで二つのケースについて解析を行い、コーベルの耐力を予測した。解析対象は 3-D FEM と同様に、製品サイズが 250 で、解析モデルは Fig. 18 に示すとおり、内

Fig. 17 Crack and fracture surface of each specimen.

Fig. 18 Analytical model of the product (size 250).

Table 6 Material constant and strength property of the steel.

Material	Material constant			Strength property
	E_s (N/mm ²)	ν_s	ρ_s (kN/m ³)	F_y (N/mm ²)
SWM-P6	200000	0.3	78.5	295

Fig. 19 Material constitutive law of the steel.

Fig. 20 Fracture mode of Case A and B.

空断面の高さの 1/2 で側壁部を切断した。製品には、側壁部に前述の 3-D FEM で示したとおり、SWM-P6 (φ6mm) の鉄線を配している。したがって、これをコンクリートとはすべりを生じない異方性の板要素としてモデル化した。なお、鉄線には明確な降伏点強度が認められず、JIS 規格では規定されていないので、本解析ではその機械的品質は異形棒鋼と同等であると仮定して、Table 6 に再記する。一般的に用いられる異形棒鋼の材料定数と強度特性値を用いた。また、鋼材の材料構成則は、Fig. 19 に示すとおり、軸方向応力は弾・完全塑性のバイリニア、せん断応力についてもダウエル効果 β_s を考慮したバイリニア型モデルで仮定した。

Case A は頂版隣接部として、頂部の水平方向変位を拘束し、Case B は頂版拘束が緩和される中央部として、頂部を拘束しない境界条件で解析を行い、それぞれのひび割れ発生、進展および破壊時の荷重を抽出し、また、合わせて破壊形態を考察した。コンクリートの材料定数および構成則は前述と同様であり、底部の境界条件は切断部の要素の x , y 方向および回転 θ を拘束した。

5・2 解析結果

解析によって得られたそれぞれのケースの最大荷重 P_{max} を以下に示し、また、終局時における破壊形状を Fig. 20 に示す。

最大荷重 P_{max} : Case A=9.53kN, Case B=12.06kN

2-D RBMSM によれば、Case A では、荷重 $P=6.52$ kN でコーベルの付け根に引張ひび割れを生じ、同ひび割れが下方に進展しながら荷重 $P=9.31$ kN で始点のひび割れが引張破壊となり、最大荷重 $P_{Amax}=9.53$ kN でコーベル下部にせん断すべりを伴いながら破壊に至る (Fig. 20 左)。

一方、Case B では、頂部が拘束されていないので、荷重 $P=8.38$ kN で側壁の外側に引張ひび割れを生じる。そして、ひび割れが分散しながら鉄筋近傍まで進展し、荷重 $P=10.24$ kN で始点のひび割れ (ただし、一箇所) が引張破壊を起こし、また側壁内側には一次圧縮降伏を生じる。この破壊形状で概ね推移しながら荷重 $P=10.94$ kN でコーベルの付け根に引張ひび割れを生じる。しかしながら、荷重が増加しても内在補強鉄筋の効果によって引張破壊は制御され、概ね Fig. 20 右に示す破壊形状のまま最大荷重 $P_{Bmax}=12.06$ kN で終局の破壊を迎える。

ここで、矩形断面側溝に寸法 $L=500$ mm のふたが二枚設置され、T-25 の大型車輛が側溝の直上を通過する際、前述のとおり、ふた一枚には後輪荷重 $Q=49.1$ kN が作用することになる。また、構造設計では一般的に前述の JPCS-RC72E3 に示された手法に準拠して Fig. 21 に示すとおり、後輪荷重の載荷面積は 500 mm× 200 mm の長方形を適用する。したがって、製品サイズが小寸法の場合は、載荷領域の一部が製品を外れるので、その分だけ作用荷重は小さくなる。しかし、本研究では、安全を考慮して製品のサイズに関わり無く、ふたには後輪荷重のすべてが作用すると仮定する。解析で求めた Case A, B のそれぞれ

Fig. 21 Load condition of the gutter.

Fig. 22 Setting position of a reinforcement bar for the corbel.

の最大荷重 P_{max} は、厚さ 100mm の値である。Case A は頂版隣接部、Case B は開口部の中央における変形および破壊を表現するためにそれぞれモデル化しているが、実際では中央部であっても左右からの変位拘束の影響を少なからず受けるので、同部は頂部拘束を全く受けない Case B とは若干異なり、Case A と B との中間的な変形およびひび割れ進展挙動を示すと推察される。また、最大荷重において、 $P_{Bmax} > P_{Amax}$ である。したがって、仮にふた一枚分に作用するコーベルの耐力が Case A の最大荷重であると仮定すると、 $V_a = 9.53 \times 10 = 95.3\text{kN}$ で、当該部の安全率は $\gamma_{safe} = 95.3 / 49.1 = 1.941$ となる。

5・3 コーベルに対する補強鉄筋の要否

矩形断面側溝において、全体を見れば鉄筋コンクリート構造物であるが、コーベルだけを見れば無筋構造物であるので、その安全率の考え方は双方で異なる。仮に、無筋コンクリート構造物であるとしてコーベルの応力照査を行う場合、無筋コンクリートの許容曲げ引張強度は $\sigma_{ca} = f_{ck} / 80$ (f_{ck} : 設計基準強度) であるので、前述の 3-D FEM で得られた Node A の応力 σ_1 や 2-D RBSM の安全率 γ_{safe} では構造物の安全基準を満足することは到底できないと推察される。ただし、本研究の試験や解析では、コーベルを奥行きのない梁構造物としてその耐力や破壊形態を検証したが、実際の当該部材は奥行きがあり、むしろ片持ちスラブのような荷重伝達機構を示すと考えられるので、その耐力は本結果よりもやや大きくなると推察される。

したがって、本考察と研究の成果を考慮して、以下のとおり、当該部の補強を行うことが望ましいと考える。

- 1) コーベルについては Fig. 22 に示すように、作用荷重によって最初に発生するコーベル付け根の引張りひび割れの進展を制御するために鉄筋を配置する (∵ Case A の破壊形状および耐力)。
- 2) 鉄筋は、頂版隣接部に適当な間隔で配置するが、中央部について、配置の必要性は低い (∵ Case A と B

の破壊形状の違い、コーベルは奥行きのある片持ちスラブと捉えることもできる)。

6 結 言

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1. コーベルの耐力および変形挙動は、頂版隣接部と中央部では異なり、特に隣接部は頂版の変位拘束により、例えば衝撃や局所的な荷重が作用すると、ぜい性的な破壊を起こす可能性が高い。
2. コーベルは、荷重領域の位置によって、その耐力および破壊形態は異なる。荷重領域が張出し部のときは、破壊の主因は曲げ引張破壊となる。一方、荷重領域が側壁部材に架かると、破壊要因には曲げ引張にせん断成分が加わる。また、側壁部材への荷重占有域の増加に伴い、せん断の影響も大きくなる。当然、耐力はせん断の影響度に比例し、張出し部のみの耐力に対して、荷重領域が側壁部材へ 20mm 移動した場合、およそ 2.5 倍の耐力を有する。ただし、この関係は弾性限界荷重における評価である。
3. 2-D RBSM と載荷試験の結果は概ね一致しており、特に弾性限界荷重や破壊形態に対する再現性は高い。したがって、同解析手法はコーベルの形状や荷重位置の異なる他サイズの製品の耐力予測にも有用であることが分かった。ただし、荷重パターン iii の解析値と試験値において、塑性化後の相違がかなり大きいので、特に接線方向応力の材料構成則に関する検討が必要である。
4. 製品サイズ 250 について、解析によれば、後輪荷重に対するコーベルの安全率は $\gamma_{safe} = 1.941$ であるので、鉄筋による補強を行うことが望ましい。ただし、その補強は頂版隣接部を重点的に行えばよいと考える。

今後も継続して形状の異なる試験体による載荷試験を行い、同様に解析との整合性を確認してより確度の高い解析手法を構築し、解析と試験の両方を効率的かつ効果的に実施することによって、安全かつ耐久性を有する製品を提供する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Japanese Industrial Standards, "Precast Reinforced-Concrete Product, JIS A 5372:2016 (JPCC/JSA)", pp.111 (2016) Japanese Standards Association.
- 2) JPCS Japan Precast Concrete Standard, "Precast Concrete Product JPCS-RC72E3", pp.14-24 (2010) NPO Japan Precast Concrete Standard Committee.
- 3) N. Yoshida, Y. Takeuchi, Y. Hachiya and E. Sekine "Geotechnical Engineering in Pavement and the Traffic Load", The Japanese Geotechnical Society, Vol.56, No.10, Ser. No.609, pp.73 (2008).
- 4) N. Takeuchi, S. Ueda, A. Uebayashi, H. Kito, N. Saito, M. Tomita and H. Higuchi "Discretization Numerical Analysis Method for Reinforced Concrete Structure" (2005) Maruzen Co., Ltd.