

ケーソン基礎頂版の耐荷機構に基づく せん断設計法の合理化

田所 敏弥* 谷村 幸裕* 服部 尚道**
西岡 英俊*** 神田 政幸*** 丸山 修****

Rationalization of Shear Design Method for Upper Slabs of Caisson Foundation Based on Load Carrying Mechanism

Toshiya TADOKORO Yukihiro TANIMURA Hisamichi HATTORI
Hidetoshi NISHIOKA Masayuki KODA Osamu MARUYAMA

In upper slabs of caisson foundation, the height and the amount of reinforcement tend to increase with an increase in earthquake load for seismic design. So we carried out loading tests and FEM analysis for upper slabs of caisson foundation. As a result, we proposed a new design method which takes into consideration the effective width on the pull out side based on crack pattern of test specimens, which is not considered in the existing design method. Moreover, we proposed a rational design method based on load carrying mechanism for upper slabs of caisson foundation and made clear that the proposed design method could improve its accuracy and economy.

キーワード：ケーソン基礎，頂版，せん断耐力，FEM解析，ひび割れ性状，有効幅

1. はじめに

長大橋の河川内橋脚に多く用いられる図1に示すケーソン基礎頂版は、耐震設計において想定すべき地震力の増大にともない、頂版厚や鉄筋量が、近年、増大する傾向にある。

頂版は、橋脚く体の断面力をケーソン基礎の側壁に伝達する役割をもつ部材であり、外縁下部を全周にわたって側壁に支持されていること、部材厚に比べ平面寸法が小さいことなどの特徴を有している。そのため、一般に、頂版の諸元は地震時のせん断力に関する照査により決定するが、頂版特有の軸力と曲げを同時に受ける場合のせん断力に対する耐荷機構は、十分に検討されていない。また、頂版の設計法に関する既往の研究¹⁾では、頂版の形状、支持条件、および偏心軸力に関する影響について検討されているが、橋脚から頂版に作用する軸力と曲げを直接的に考慮した研究は、これまで行われていない。

そこで、本研究では、載荷実験およびFEM解析により、軸力と曲げが同時に橋脚から作用する頂版の耐荷機構に関する検討を行い、せん断力に関する頂版の合理的な設計法を提案した。

2. 頂版のせん断耐力に関する載荷実験の概要

2.1 実験方法

本研究では、橋脚、頂版、および側壁からなる供試体を製作し、軸力と曲げの同時載荷を受ける頂版のせん断耐力、および破壊形態に関する検討を行った。また、頂版は、側壁により周面が拘束されるが、現行の設計法²⁾では、拘束の影響は考慮されていない。そこで、頂版の単位幅を模擬した梁を製作し、側壁の拘束が頂版のせん断耐力におよぼす影響について検討した。

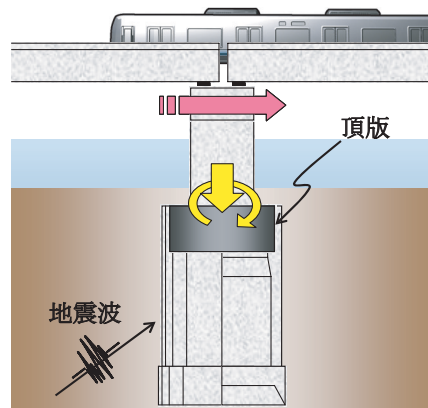


図1 ケーソン基礎頂版

* 構造物技術研究部（コンクリート構造）
** 元 構造物技術研究部（コンクリート構造）
*** 構造物技術研究部（基礎・土構造）
**** 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

特集：構造物技術

表1 軸力と曲げを同時に受ける頂版の載荷実験に関する供試体諸元

| 供試体 | 橋脚 | | 頂版 | | 側壁 | 軸力 |
|------|----|-----------|--------|-----|-------|-----------------------------------|
| | 形状 | 平面寸法 | 平面寸法 | 高さ | 内径 | |
| No.1 | 円形 | φ 600 | φ 1200 | 400 | φ 900 | 1N _d , 2N _d |
| No.2 | 矩形 | 400 × 700 | φ 1200 | 400 | φ 900 | |

単位 (mm), 1N_d: 設計軸力相当 ($\sigma_n = 2.7N/mm^2$)

表2 材料試験結果一覧

| 供試体 | 橋脚 | | | 頂版 | | | 側壁 | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | f' _c | f _{yt} | f _{y2} | f' _c | f _{y3} | f _{y4} | f' _c | f _{ys} |
| No.1 | 62.9 | 675.0 | 776.0 | 39.6 | 747.0 | 360.0 | 72.9 | 711.0 |
| No.2 | 67.0 | | 738.0 | 40.1 | | | 73.1 | |

f'_c: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²), f_{yt}: 軸方向鉄筋の降伏強度 (N/mm²), f_{y2}: 帯鉄筋の降伏強度 (N/mm²), f_{y3}: 上側および下側鉄筋の降伏強度 (N/mm²), f_{y4}: スターラップの降伏強度 (N/mm²), f_{ys}: 連結鉄筋の降伏強度 (N/mm²)

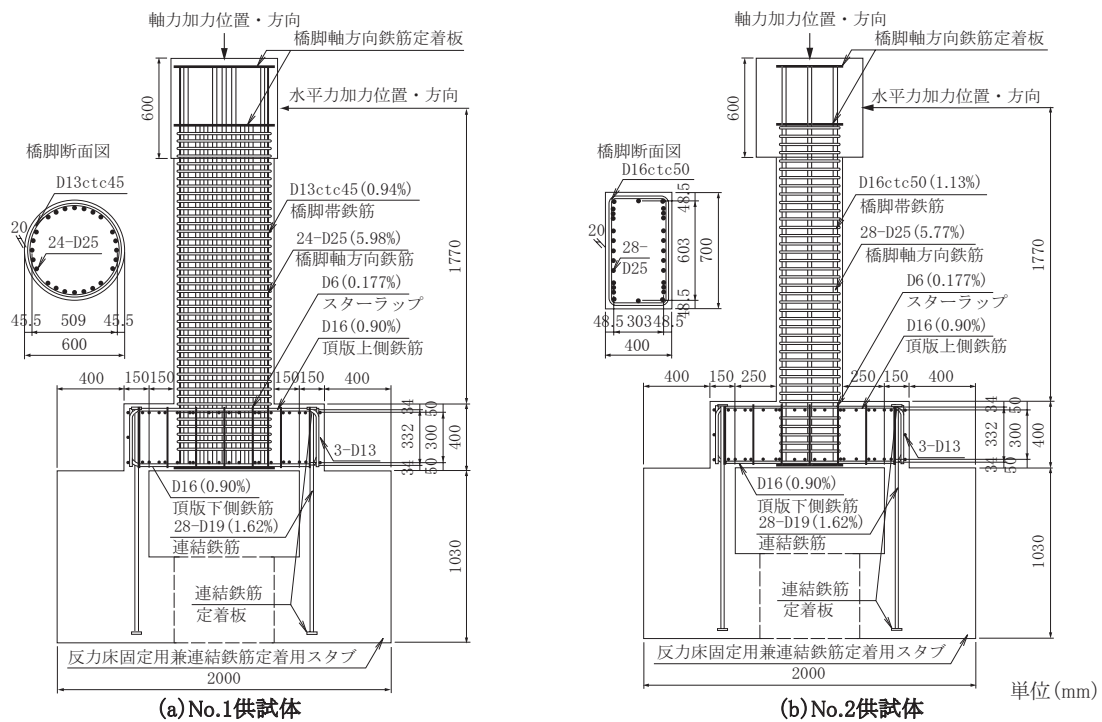


図2 供試体配筋図

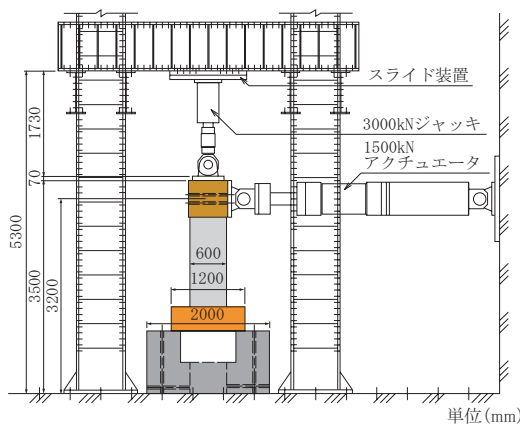


図3 供試体および載荷状況 (No.1)

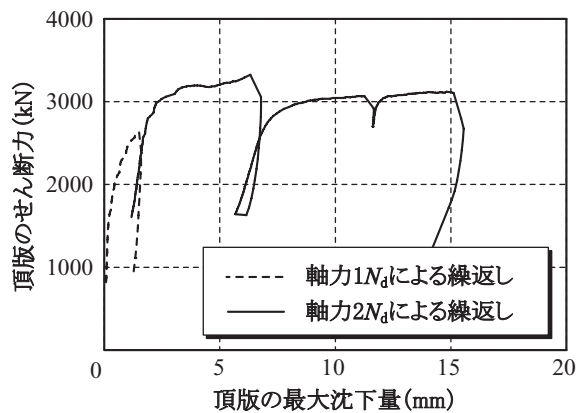


図4 せん断力-最大沈下量関係 (No.1)

2.2 軸力と曲げを同時に受ける頂版の載荷実験

供試体の諸元を表1, 材料試験結果を表2, 供試体の配筋図を図2, 載荷状況を図3に示す。本研究においては,

頂版のせん断破壊に着目したため, 橋脚および頂版の軸方向鉄筋, 橋脚のコンクリートには, 高強度材料を用い, 橋脚および頂版が曲げ破壊することを回避した。また,

表3 端部拘束梁の載荷実験に関する供試体諸元および実験結果

| 供試体 | a/d | p_t | p_l | 拘束支持 | | 単純支持 | | | せん断耐力比 |
|------|-------|-------|-------|----------|------------|----------|------------|-------------|----------------------|
| | | | | f_{c1} | V_{max1} | f_{c2} | V_{max2} | V_{max2}' | V_{max1}/V_{max2}' |
| No.3 | 0.25 | 1.25 | 1.13 | 27.8 | 640 | 22.7 | 491 | 543 | 1.18 |
| No.4 | 0.50 | 1.25 | 1.13 | 27.8 | 436 | 28.5 | 377 | 372 | 1.17 |
| No.5 | 0.75 | 1.25 | 1.13 | 27.8 | 349 | 24.1 | 302 | 302 | 1.08 |

a/d :せん断スパン比, p_t :引張鋼材比(%), p_l :連結鉄筋量を支持部面積で除した連結鉄筋比(%), f_{c1} , f_{c2} :コンクリートの圧縮強度(N/mm²), V_{max1} , V_{max2} :最大せん断力(kN), V_{max2}' :拘束支持の圧縮強度で補正した最大せん断力($\times\sqrt{f_{c1}/f_{c2}}$)

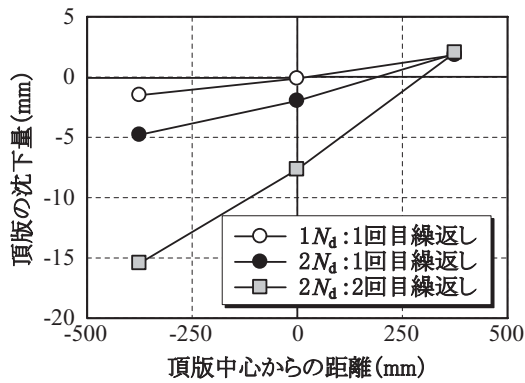


図5 頂版下面の沈下量分布 (No.1)

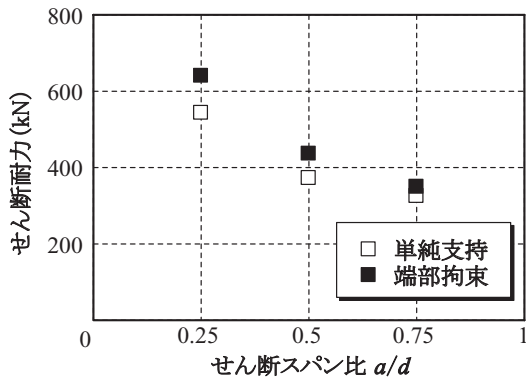


図7 せん断耐力におよぼす拘束の影響

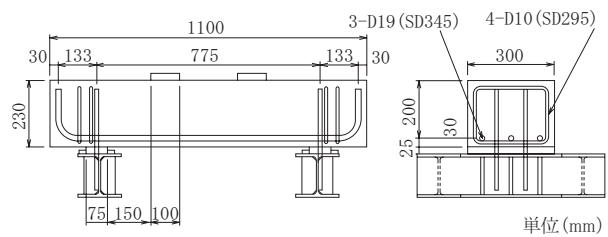


図6 端部拘束の載荷実験に関する供試体寸法 (No.5)

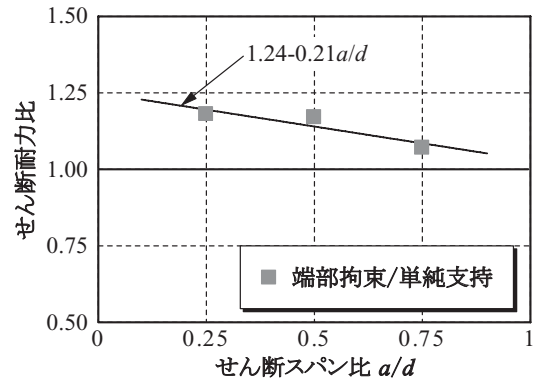


図8 端部拘束と単純支持のせん断耐力比

実験パラメータは橋脚形状とし、載荷は、設計軸力相当の $1N_d$ 、およびその2倍の $2N_d$ の鉛直荷重のもと、橋脚天端に水平加力を行った。

載荷実験により得られた円形橋脚タイプのNo.1の頂版に作用するせん断力と最大沈下量の関係を図4に、頂版の下面の沈下量分布を図5に示す。なお、せん断力については、現行の設計法²⁾に基づいて算定した数値であり、沈下量は、軸力を作用させる前からの数値である。軸力 $1N_d$ における水平加力では、頂版が破壊しなかったが、軸力 $2N_d$ における水平加力によって押し込み側の頂版の沈下量が急増した。このことから、軸力 $2N_d$ のとき、頂版がせん断破壊したと考えることができる。また、矩形橋脚タイプのNo.2においても同様に、軸力 $2N_d$ において、頂版の沈下量が急増したため、このとき頂版がせん断破壊したと考えることができる。

2.3 側壁拘束の影響に関する要素実験

頂版は、連結鉄筋によって外縁下部が側壁に結合されるため、側壁拘束による頂版のせん断耐力の増加が期待できる。そこで、側壁拘束が頂版のせん断耐力におよぼす影響について、頂版の単位幅を想定した梁による要素実験により検討した。なお、供試体の製作においては、実構造物における側壁と頂版の拘束状況を再現した。

供試体諸元を表3および図6に示す。実験パラメータは、せん断耐力におよぼす影響が大きいと考えられるせん断スパン比 a/d 、および梁の支持状態とした。 a/d は、実構造物を想定し、 $a/d=0.25\sim0.75$ とし、支持状態は、単純支持、および実構造物の拘束状況を模擬した端部拘束とした。そして、単純支持された梁と端部拘束された梁の実験結果を比較することによって、拘束が頂版のせん断耐力におよぼす影響について検討した。なお、単純梁のせん断耐力については、過去に行った支持条件以外

特集：構造物技術

載荷実験の結果を表3，せん断耐力におよぼす拘束の影響を図7，端部拘束と単純支持された梁のせん断耐力比を図8に示す。図7および図8より，拘束によってせん断耐力が増加し，実構造物において想定される $a/d=0.25\sim 0.75$ の範囲では，10～20%程度のせん断耐力の増加が期待できることがわかった。なお，供試体の破壊状況は，拘束状態に関わらず有意な差はみられず，すべての供試体において，載荷板と支持部の間に形成された圧縮ストラットが圧壊し，破壊に至るせん断圧縮破壊であった。

3. 頂版のせん断力に関する設計法の提案

3.1 設計法の概要

頂版のせん断力に関する設計は，頂版に作用するせん断力が，頂版のせん断耐力よりも小さいことを照査することにより行う。頂版に作用するせん断力は，上部構造の自重である鉛直力と地震作用による慣性力である水平力が，橋脚く体を介して頂版に作用するため，せん断耐力とともに，頂版に作用するせん断力を精度よく算定し，照査することが重要となる。そこで，本研究では，頂版のせん断耐力とともに，頂版に作用するせん断力の算定方法についてあわせて検討した。

3.2 頂版に作用するせん断力の算定方法

せん断力の算定方法については，鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）⁴⁾に示される考え方に基いて検討した。図9に示すように，本研究では，橋脚基部の支圧力を，頂版に作用するせん断力として算定する方法を提案した。現行の設計法では，全断面有効の仮定のもと，頂版下面の支圧応力を積分することによってせん断力を算定するが，破壊時においては，引抜き側の頂版下面と側壁の間にひび割れが発生するため，全断面有効の前提が成立しない。一方，提案の方法は，コンクリートの引張を無視した釣合い計算に基づく橋脚基部の支圧力より，せん断力を算定するため，実現象に即した算定法と考えられる。

3.3 頂版のせん断耐力の算定方法

頂版のせん断耐力の算定においては，載荷実験において観察された頂版内部のひび割れ性状に基づき新たな有効幅を提案した。矩形橋脚タイプのNo.2の頂版下面から100mm位置の水平断面のひび割れ性状，および提案の有効幅を現行の設計法における有効幅とともに図10に，部材軸位置における頂版鉛直断面のひび割れ性状を図11に示す。また，提案したせん断耐力の算定式を式(1)に示す。

$$V_y = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot u_p \cdot d \dots\dots\dots (1)$$

ここに，

- V_y ：頂版のせん断耐力
- β_d ：有効高に関する補正係数 ($=\sqrt[3]{1000/d} \cdot 1.5$)
- β_p ：引張鋼材に関する補正係数 ($=\sqrt{1+100p_c}/2 \cdot 1.5$)
- β_a ：せん断スパン比に関する補正係数
 $(=5\sqrt{1+(a/d)^2})$ $a/d \geq 0.3$ の場合)
 $(=(6-3.33a/d)/\sqrt{1+(a/d)^2})$ $a/d < 0.3$ の場合)
- f_{dd} ：せん断強度 ($=0.19\sqrt{f'_{cd}}$) (N/mm²)
- u_p ：有効幅
- d ：有効高さ

図10(a)より，頂版内部においては，橋脚基部の中立軸付近を中心に楕円形のひび割れ面が形成されることがわかる。このように，軸力と曲げを同時に受ける場合においても，軸力のみ受ける面部材の押抜きせん断破壊と同様，閉じた形状の破壊面が形成されることがわかった。つまり，せん断力に対しては，軸力と曲げを同時に

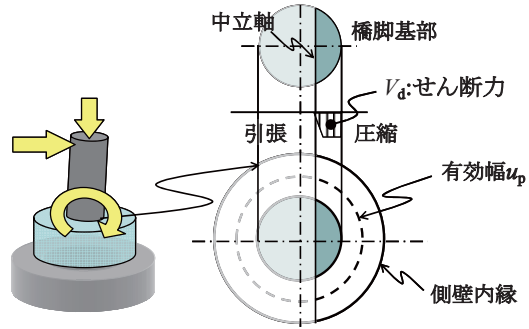
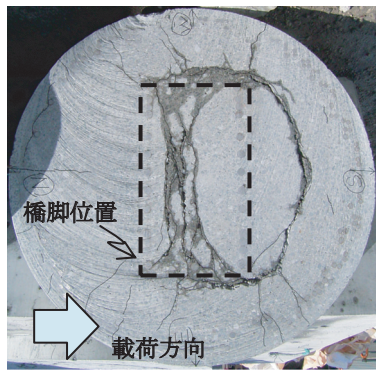


図9 頂版に作用するせん断力の算定



(a) 頂版水平断面のひび割れ性状

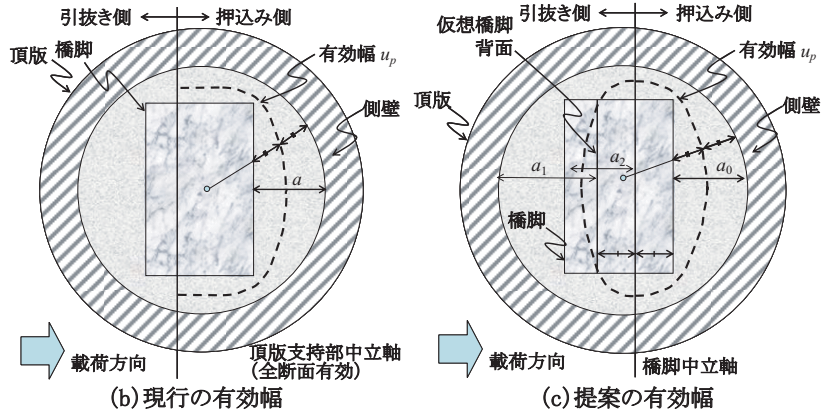


図10 頂版水平断面のひび割れ性状および有効幅 (No.2)

受ける場合においても、押し込み側だけでなく、現行の設計法において考慮していない引抜き側のコンクリートが抵抗すると考えられる。さらに、引抜き側における有効幅の妥当性は、図11に示す鉛直断面におけるひび割れ性状からも確認できる。また、せん断耐力の算定に用いるせん断スパンは、図10(c)に示すように押し込み側については、橋脚前面から側壁前面までの純スパン a_0 、引抜き側については、仮想の橋脚背面から側壁前面までのスパン a_1 とした。なお、円形橋脚タイプのNo.1においても、水平断面において、No.2と同様のひび割れ性状を確認したため、No.2に準じて、有効幅を設定し、せん断耐力を算定した。

4. FEM解析を用いた耐荷機構の検討

4.1 解析概要および目的

本解析では、載荷実験により観察された引抜き側の斜めひび割れ、および頂版内に形成される圧縮ストラットを再現することを目的とした。解析は3次元の挙動をする頂版の押抜きせん断破壊を対象とするため、3次元の汎用有限要素解析コード(MARC)を用いた。また、解析対象は、矩形橋脚タイプのNo.2とし、頂版がせん断破壊した軸力 $2N_d$ の1565kNを作用させた状態で、橋脚天端に水平方向の変位をあたえた。

4.2 解析モデルおよび材料構成則

本研究においては、コンクリートはソリッド要素、鉄筋はトラス要素でモデル化した。コンクリートの要素分割図を図12、コンクリートの材料構成則を図13に示す。コンクリートの降伏曲面はVon Misesを用い、降伏以降はコンクリート標準示方書⁵⁾(以下、示方書)に準じ、最大応力点までの硬化則と最大応力点を越えた軟化域で表される曲線からなる一軸モデルを用いた。引張モデルについても、示方書に準じ、引張強度までは弾性と仮定し、その後の引張軟化特性を考慮した。また、鉄筋については、バイリニア型のモデルを用い非線形性を考慮した。

さらに、コンクリートのひび割れのモデル化については、分散ひび割れモデルを用い、ひび割れ発生後のせん断伝達剛性については、固定ひび割れモデルを用い、ひび割れた要素のせん断伝達剛性については、ひび割れ前のせん断剛性に対し、十分に小さい剛性を用いた。なお、側壁については、コンクリート要素によるモデル化を行わず、側壁と頂版の連結鉄筋による抜出しを考慮したバネ要素を用いることによって側壁の拘束の影響を考慮した。なお、解析に用いた材料特性値については、表2に示す材料試験の結果を用いた。

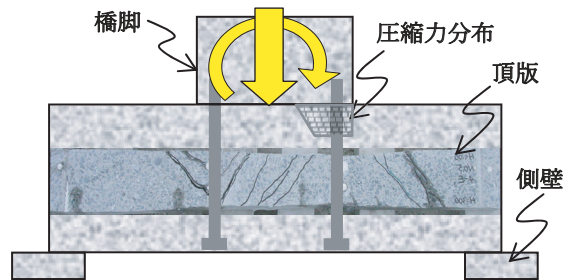


図11 頂版鉛直断面のひび割れ性状 (No.2)

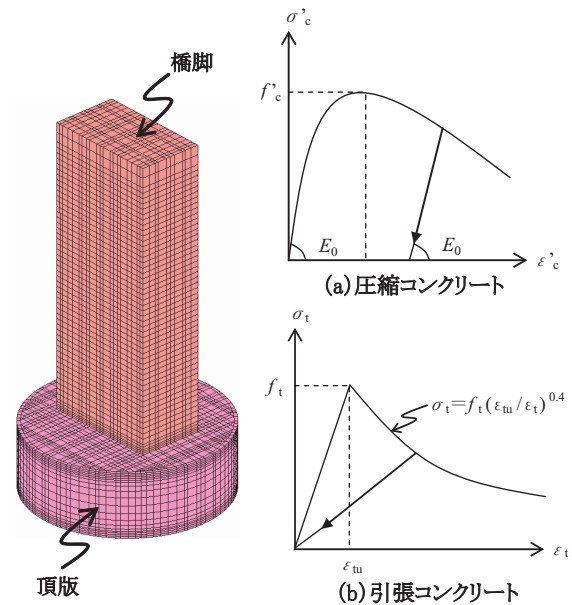


図12 要素分割図

図13 材料構成則

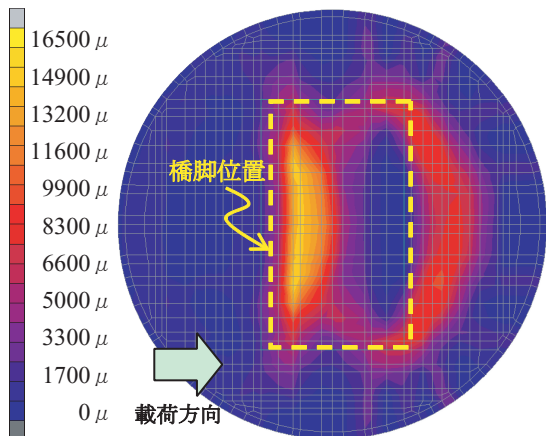


図14 水平断面の最大主ひずみ (下面から100mm)

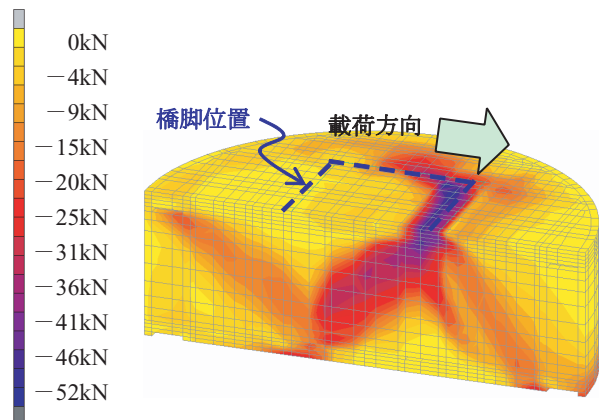


図15 鉛直断面の最小主応力 (部材軸)

表4 提案の設計法を用いた場合の照査結果

| 設計法 | 軸力 | No.1 (円形橋脚タイプ) | | | No.2 (矩形橋脚タイプ) | | |
|------|--------|----------------|-------|-----------|----------------|-------|-----------|
| | | V_d | V_y | V_d/V_y | V_d | V_y | V_d/V_y |
| 設計法1 | $2N_d$ | 5050 | 4365 | 1.16 | 5899 | 4946 | 1.19 |
| 設計法2 | $2N_d$ | 5050 | 4058 | 1.24 | 5899 | 4795 | 1.23 |

V_d :せん断力 (kN), V_y :せん断耐力 (kN), V_d/V_y :照査値

4.3 解析結果および頂版の耐荷機構

図14に最大荷重時における頂版下面から100mm位置の水平断面の最大主ひずみを示す。図10(a)に示した実験において観察された頂版下面から100mm位置の水平断面のひび割れ性状と同様に、解析においても、押込み側だけでなく、引抜き側にひずみが局所化する領域があることがわかる。また、ひずみの局所化する領域は、実験において観察されたひび割れ性状と非常によく一致した閉じた形状であることがわかる。このことから、頂版のせん断破壊に対しては、現行の設計法において考慮していない引抜き側のコンクリートにおいても抵抗すると考えることができる。

また、図15に最大荷重時における頂版鉛直面の最小主応力を示す。図11に示した実験において観察された鉛直断面のひび割れ性状と同様に、解析においても、橋脚基部の圧縮側から、圧縮応力が卓越する圧縮ストラットが、押込み側および引抜き側に形成されていることがわかる。このように、軸力と曲げを同時に受ける頂版のせん断破壊においては、面部材の押抜き破壊と同様の閉じた形状の有効幅を考慮し、載荷面と支持部が近い場合に用いられるせん断圧縮破壊を前提とした、押抜きせん断耐力の算定式を適用することが妥当であると考えられる。

ただし、引抜き側のせん断スパンの設定については、橋脚基部の圧縮領域から橋脚の引張鉄筋の定着位置にひび割れおよび圧縮ストラットが形成されていることが、実験および解析により確認される。このことから、厳密には、図10(c)に示す a_2 を引抜き側のせん断スパンとして用いるのがよいと考えられる。

5. 設計結果の妥当性および経済性の検証

提案の設計法に基づく照査結果の妥当性について本研究で行った実験を用いて検証した。せん断破壊した軸力 $2N_d$ において、提案の設計法にしたがって算定した頂版のせん断力、せん断耐力、および照査値を表4に示す。ここでは、せん断耐力を耐荷機構に基づく詳細な設計法1と簡易な設計法2により算定した。設計法1では、側壁拘束の影響を考慮し、橋脚基部の中立軸位置から橋脚の引張鉄筋位置までを引抜き側のせん断スパン a_2 (図10(c)参照)を用いた。なお、側壁拘束の影響は、図8に示した影響を式(1)より算定したせん断耐力に乗じて算定することとした。一方、設計法2は、側壁拘束の影響

は考慮せず、仮定の橋脚背面から支持部前面までを引抜き側のせん断スパン a_1 を用いた。

照査結果を表4に示す。表4より、設計法1および設計法2ともに、せん断破壊に対し安全側の照査結果をあたえることがわかる。また、設計法2は設計法1に比べ、若干、安全側の照査値をあたえるが、設計においては十分な精度であると考えられる。

さらに、実構造物を想定した試算を行い、提案の設計法(設計法2)により設計された頂版の経済性について検討した。試算の結果、提案の設計法は現行の設計法に対し、頂版厚において10%程度、または、引張鉄筋段数において5段のD51のうち2段程度、削減できることがわかった。

6. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 実現象に即した、橋脚基部の支圧応力よりもとめる頂版のせん断力の算定方法を提案した。
- (2) 載荷実験およびFEM解析によって耐荷機構を検証した、引抜き側の有効幅を考慮した頂版のせん断耐力の算定方法を提案した。
- (3) 頂版のせん断耐力におよぼす側壁拘束の影響を定量的に評価し、せん断耐力に考慮する方法を示した。
- (4) 実構造物を想定した試算を行い、提案の設計法により頂版が合理的に設計できることを示した。

なお、本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究の一部をまとめたものである。

文献

- 1) 谷村幸裕, 渡邊忠朋, 佐藤勉, 棚村史郎: ケーソン基礎頂版のせん断耐力に関する研究, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.153-163, 2003.8
- 2) (財)鉄道総合技術研究所: 設計計算例(ケーソン基礎), 2006.3
- 3) 谷村幸裕, 佐藤勉: せん断スパン比のごく小さいRC部材のせん断耐力の評価, 鉄道総研報告, Vol.14, No.1, pp.17-22, 2001.1
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善, 2004.4
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 丸善, 2008.4