

## 論文

## 外部拘束作用下におけるスタッドと合成床版コンクリートの 3次元応力を用いた損傷評価

松村寿男\*, 熊野拓志\*, 和田均\*\*, 星名浩人\*\*\*, 藤山知加子\*\*\*\*

\*博(工), (一社)日本橋梁建設協会 床版小委員会 床版技術部会 (〒105-0003 港区西新橋1丁目6-11)

\*\* (一社)日本橋梁建設協会 床版小委員会 床版技術部会 (〒105-0003 港区西新橋1丁目6-11)

\*\*\*修(工), 首都高速道路(株)東京東局 土木保全設計課 (〒103-0015 中央区日本橋箱崎町43-5)

\*\*\*\*博(工), 法政大学デザイン工学部教授 都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 新宿区市谷田町2-33)

鋼コンクリート合成床版の一部分を再現した部分モデルを構築し、圧縮および引張の一定荷重作用下において、頭付きスタッドにせん断変形を与えた場合のスタッド付近のコンクリートとスタッドの損傷過程についてソリッド要素を用いた3次元非線形解析により、塑性論的な応力評価を試みる。解析結果では合成床版コンクリートの3次元応力状態の一次( $I_1$ )、二次の応力不変量( $J_2$ )を用いた等価拘束圧の増減とずれ量の関係ならびに鋼材の von Mises 降伏曲面上での応力点の挙動により損傷過程を評価した。

キーワード：鋼コンクリート合成床版, 3次元非線形解析, 応力不変量, 損傷評価

### 1. はじめに

近年、PC床版と同等以上の耐久性を有する鋼コンクリート合成床版(以下合成床版と記す)は、適用事例が多くなっている。合成床版の損傷評価は輪荷重載荷試験を主体とした既往の研究<sup>1),2)</sup>で十分な耐久性が得られることが分かっており、実績を踏まえた設計施工指針<sup>3)</sup>が整備されている一方で、使用限界状態を大きく超える終局限界状態の精細な損傷メカニズムは検証の余地がある。実験では大きなたわみが生じる載荷状態を再現することは安全管理上限りがあるため、筆者らは輪荷重走行試験を再現するにあたり、解析的なアプローチでの損傷評価の試み<sup>4)</sup>を行っている。

本研究では、ロビンソン型合成床版について、ずれ止めである頭付きスタッド周辺の一部を再現した部分モデルを構築することで、3次元応力状態における塑性論を用いた解析的なアプローチでスタッド鋼材およびその周辺のコンクリートの損傷評価を試みる。なお、本論文は、これまでの成果<sup>5),6)</sup>に新たな分析を加えたものである。

### 2. 解析モデル

#### 2.1 材料構成モデル

解析コードは、東京大学コンクリート研究室で開発された「COM3D」を使用する。本コンクリート構成モデルは有限要素の平均応力-平均ひずみ関係を規定した分散ひび割れモデル(多方向および任意の荷重履歴に3次

表-1 鋼材の諸元

	初期剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張破断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張破断 ひずみ	ポアソン 比	単位体積重量 (N/mm <sup>3</sup> )
SS400	200000	245	400	0.12	0.3	0.078
SD345	200000	345	490	0.12	0.3	0.078

表-2 コンクリートの諸元

初期剛性 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	単位体積重量 (N/mm <sup>3</sup> )
28000	30	2.22	0.2	0.025

元的に対応) および拘束圧縮下での拘束効果を表現できる。既往の研究においては、前川ら<sup>7),8)</sup>によりRC床版や本研究の対象である鋼コンクリート合成床版の輪荷重走行試験を対象とした数値解析において実験結果を精度良く再現できたことが報告されている。鋼材には、降伏点強度を折れ点としたバイリニア型の構成モデルを用いた。コンクリートの設計圧縮強度は $f_c=30\text{ N/mm}^2$ 、主鉄筋および配力鉄筋はSD345、鉄筋径はD22およびD19、スタッドおよび底鋼板はSS400と規定した。それぞれの材料の諸元を表-1および表-2に示す。

鋼材とコンクリート(スタッド、底鋼板と合成床版コンクリート)の接触面には、図-1に示す非線形開閉モードを考慮したクーロン摩擦接触平面でモデル化した境界面要素(BOND要素)を導入した。本要素は部材間で非接触時には、せん断剛性は0値となるが、接触時には応力が増加する事象を再現<sup>7)</sup>できる。本解析で用いた境界面要素特性値は、表-3に示す付着に関する既往の実験的研究<sup>9)</sup>により得られた結果を参考にした。

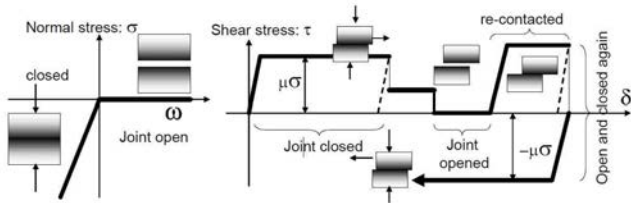


図-1 境界要素モデル概要図

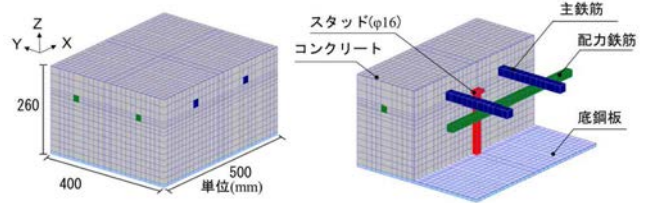


図-2 解析モデル概要図

表-3 境界 (Bond) 要素の諸元

諸元	特性値
接触時せん断剛性	76,923N/mm <sup>2</sup> /mm
接触時開閉剛性	200,000N/mm <sup>2</sup> /mm
非接触時せん断剛性	15N/mm <sup>2</sup> /mm
非接触時開閉剛性	15N/mm <sup>2</sup> /mm
初期付着 (せん断)	3N/mm <sup>2</sup>
初期付着 (垂直)	3N/mm <sup>2</sup>
摩擦係数	0.5

## 2.2 解析モデルの規模

解析モデルとして、実橋のロビンソン型の鋼コンクリート合成床版の一部を再現した床版部分モデルを構築した。床版部分モデルはモデル中央に1本のスタッドを配置したモデルである。寸法は500mm(橋軸直角長)×400mm(橋軸長)×260mm(床版厚)とした。モデル中央に軸径が16mm、高さが180mmのスタッドを1本配置した。解析モデルは複雑なメッシュ分割を避けるためスタッド形状は円形ではなく四角形とした。底鋼板、鉄筋、スタッド、コンクリートの全てをソリッド要素で構築した。なお、スタッドと周辺コンクリートおよび底鋼板とコンクリート接触面は境界要素を採用している。X方向が橋軸直角方向、Y方向が橋軸方向、Z方向がスタッド軸方向に設定した。

要素数は13,175、境界面要素(BOND要素)数は847、総要素数は14,022、総節点数15,880である。以上を踏まえ、合成床版を想定した部分モデルを図-2に示す。スタッドおよび周辺の床版コンクリートを主に考察するため、図-3に示す基部から11層目までの要素を対象に考察を進めることとした。

## 2.3 支持条件と荷重ケース

解析モデルの支持条件を図-4に示す。水平せん断状態を表現するため、鉛直方向(Z方向)は底鋼板を全面支持した。水平方向(Y方向)は、コンクリートと底鋼板の接合面にせん断力が作用することにより生じるずれ挙動を再現するため、底鋼板端部の節点のみ支持した。

荷重の荷重イメージを図-5に示す。実橋で想定される底鋼板とコンクリート床版の接触面にせん断力が作用を再現するため、合成床版コンクリートと底鋼板にずれが生じるようにコンクリート側面に一様なせん断力

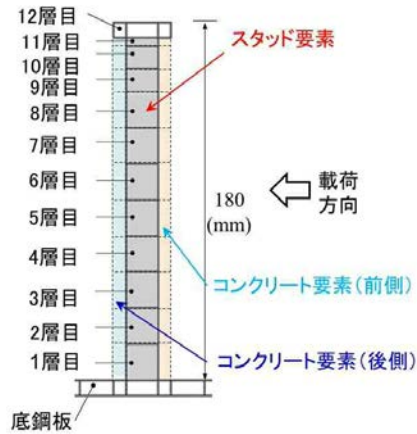


図-3 スタッドおよび周辺コンクリートの要素分割

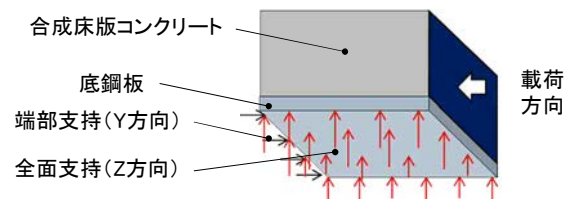


図-4 支持条件

を荷重した。ずれ変位量は図-5に示す、せん断力の作用により生じたスタッド頭部の水平変位量を用いた。荷重荷重手順については、荷重ステップ1では、圧縮および引張の外部拘束力のプレローディング(図-6)を行う。圧縮の拘束力は図-6(a)に示すようにコンクリート要素の上面に対し鉛直下向きに一樣に荷重した。引張の拘束力は図-6(b)に示すように、コンクリート要素の最下要素を鉛直上向きに持ち上げるように荷重した。荷重ステップ2では、せん断力を与えるため図-7に示すように、コンクリート要素に水平力を荷重した。なお、解析は荷重制御にて、全ての節点荷重を荷重している。本研究で行った解析ケースを表-4に示す。外部拘束力の「無し」、「有り」および大きさに着目した5ケースを取り扱った。

表-4の表示においては、「外部拘束力無し」の解析ケースを「Case-0」と呼ぶこととし、「外部拘束力有り」については、例えば解析ケース「C-3」は、コンクリートの圧縮破壊荷重の3%に相当する荷重をコンクリート上面にプレローディング(荷重ステップ1)した後、水平方向せん断力を荷重したことを意味する。圧縮破壊荷重の3%、6%に相当する圧縮の外部拘束力をプレローディングした解析ケースを「C-3」、「C-6」と呼ぶこととする。

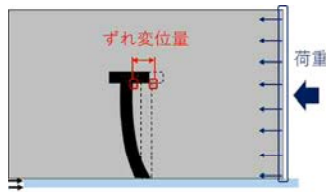
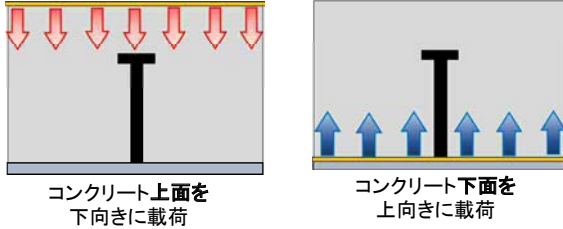


図-5 スタッドのずれ変位量の定義



(a)圧縮外部拘束力 (C-3,C-6) (b)引張外部拘束力 (T-3,T-6)  
図-6 外部拘束力のプレローディング (荷重ステップ 1)

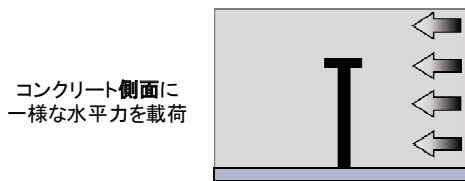


図-7 せん断力の荷重 (荷重ステップ 2)

表-4 解析ケース

外部拘束力	解析ケース
無し	Case-0
有り (圧縮力)	C-3
	C-6
有り (引張力)	T-3
	T-6

圧縮破壊荷重 3%で概ね設計荷重で T 荷重相当分を想定している。同様に、引張破壊荷重の 3%, 6%に相当する引張の外部拘束力をプレローディングした解析ケースを「T-3」, 「T-6」と呼ぶこととする。

### 3. 解析結果

#### 3.1 せん断力-ずれ変位関係

図-8 および図-9 に圧縮外部拘束力および引張外部拘束力下におけるスタッド頭部のせん断力-ずれ変位関係を示す。既往の研究にて横方向非拘束状態で行われた実験<sup>10,11)</sup>を参考に、スタッド頭部もしくは基部のコンクリート要素のひずみ量が 200 $\mu$ に達する状態を設計上の終局状態と定義し、その時の「ずれ変位 D(mm)」と「せん断耐力(kN)」を図中に解析ケースとともに示す。図-8 から分かるように、外部拘束力無しの解析ケース「Case-0」において、せん断耐力は 119.5kN(D=1.4mm)であった。圧縮外部拘束力下の解析ケース「C-3」のせん断耐力は 169.4kN(D=0.2mm)、解析ケース「C-6」のせ

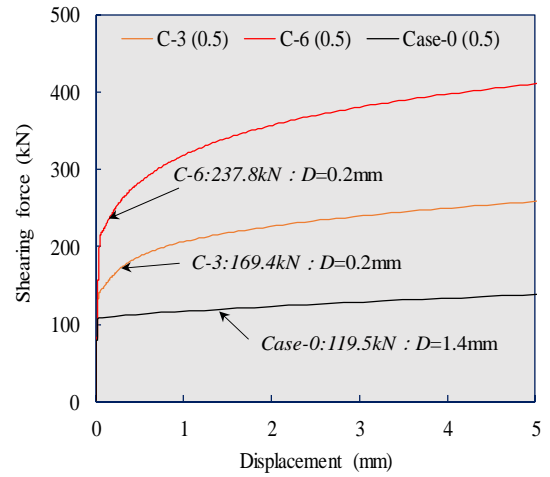


図-8 圧縮外部拘束力下せん断力-ずれ変位解析結果

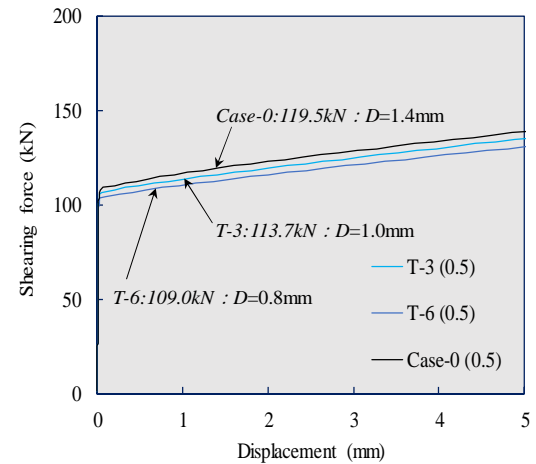


図-9 引張外部拘束力下せん断力-ずれ変位解析結果

ん断耐力は 237.8kN(D=0.2mm)であり、圧縮外部拘束力が作用することでいずれもせん断耐力が曲線的に上昇する結果となった。また、図-9 から分かるように、外部拘束力無しの解析ケース「Case-0」と比べて、引張外部拘束力を与えた、解析ケース「T-3」のせん断耐力が 113.7kN (D=1.0mm)、「T-6」のせん断耐力が 109.0kN(D=0.8mm)であり、何れも減少する結果となった。

#### 3.2 解析結果における応力空間での評価指標

##### (1) 応力空間でのコンクリートの「等価拘束圧」の定義

等価拘束圧<sup>12)</sup>の概念を説明する。図-10に示すように、等価拘束圧( $\sigma_D$ )とは、一般応力状態を側方応力一定の三軸圧縮経路上の応力量に換算した場合の側方応力のことを意味する。二次応力不変量( $\sqrt{J_2}$  軸)一次応力の一次不変量(静水圧:  $I_1$  軸)関係において、荷重により応力状態が点 A の時、 $1/\sqrt{3}$ の傾きで下した直線と静水圧軸( $I_1$  軸)との交点の値を 1/3 にしたものを「等価拘束圧」と呼ぶ。この指標より、3次元非線形解析におけるソリッド要素の応力 6 成分を扱うにあたり、コンクリートの直応力とせん断応力が同時に生じる複雑な応力状態の拘束圧について、1次元の指標で損傷評価が可能となる。

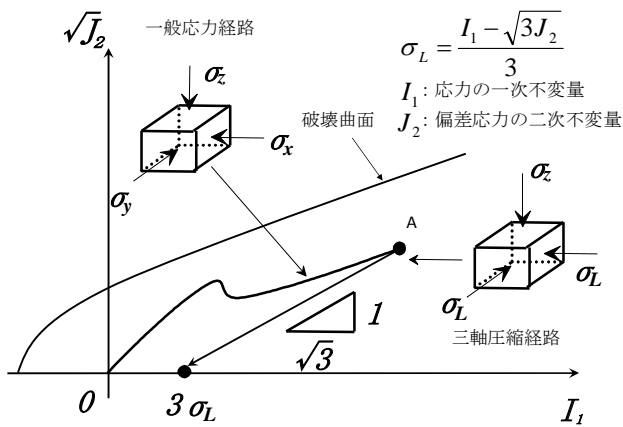


図-10 等価拘束圧の概念

## (2) スタッド鋼材における von Mises 応力空間の応力点

鋼材にはバイリニア型の構成モデルを用いているが、簡易的に降伏曲面内の応力点を表現するため、von Mises 降伏曲面<sup>13)</sup>で生じている3次元応力状態を2次元に投影した主応力平面にて損傷評価する。具体的には、スタッドの水平荷重方向に生じる最大主応力 $\sigma_{pl}$ と軸方向に生じる最小主応力 $\sigma_{ps}$ の2軸主応力空間で評価する。

## 3.3 コンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動

図-11~13(a), (b)に圧縮外部拘束力下におけるスタッド付近のコンクリート（前側および後側）の等価拘束圧とスタッド変位の関係を示す。等価拘束圧 $\sigma_L$ をコンクリートの一軸圧縮強度 $f_c'$ にて無次元化(圧縮を負符号で表現)して評価する。等価拘束圧の無次元量（以下、等価拘束圧と称す）は、外部拘束無し解析ケース「Case-0」においては、図-11(a), (b)は、値が概ね0.8を下回っている。図-12~13(b)では値が0.5に満たないが、図-12~13(a)はその5倍の2.0を超える値を示している。これは、輪荷重が載荷されるような圧縮外部拘束力下では、床版内の載荷側のスタッド付近のコンクリートが強い拘束を受けるが、スタッド後ろのコンクリートの拘束はそれに比べて小さいことを解析的に示している。

図-12~13(a)に示すスタッド付近コンクリート（前側）の要素の等価拘束圧から分かるように、図-12~13の圧縮外部拘束力下の解析ケース「C-3」および「C-6」は、第1層目がピーク値となり、等価拘束圧の無次元量として約2.3の値を示している。次にスタッド基部1層目からスタッド頭部の第11層目までの傾向を考察する。圧縮外部拘束力下「C-3」および「C-6」では、基部1層目（◆青色）に着目すると、ずれ変位 $D=0.5\text{mm}$ でピーク値となり、その後は等価拘束圧の低下（以降はこれを「軟化」と称する）を示している。ずれ変位 $D=0.8\text{mm}$ で2層目（■赤色）がピーク値となるのに対し、3層目（▲緑色）はずれ変位 $D=2.0\text{mm}$ 以降にピーク値となり、その後軟化挙動を示す。4層目以降については、等価拘束圧が0.7以下のピーク値となり、5層目から10層目までずれ変位

が遅れて等価拘束圧が順にピーク値が大きくなる「遅れ現象」を表現しているといえる。圧縮外部拘束力下では解析ケース「C-6」において、8層目（-赤色）が4層目~7層目よりも2倍程度大きい値（約1.0）となっているのは、スタッド頭付近の要素がスタッド中層付近の値（約0.5）よりも大きな拘束を受けていることを解析的に再現していると推察できる。また、特に3層目に着目すると、圧縮外部拘束力下の解析ケース「C-3」ではずれ変位 $D=2.1\text{mm}$ で等価拘束圧のピーク値(2.3)を示した直後、ずれ変位 $D=2.3\text{mm}$ で急激に軟化して等価拘束圧が無くなるのに対し、圧縮外部拘束力下「C-6」ではずれ変位 $D=2.3\text{mm}$ でピーク値(2.0)を示した後、ずれ変位 $D=4.5\text{mm}$ まで緩やかな軟化挙動を示しており、外部拘束力が大きいとずれ変位が進展してもコンクリートの等価拘束圧の低下は緩やかに生じることを示唆している。

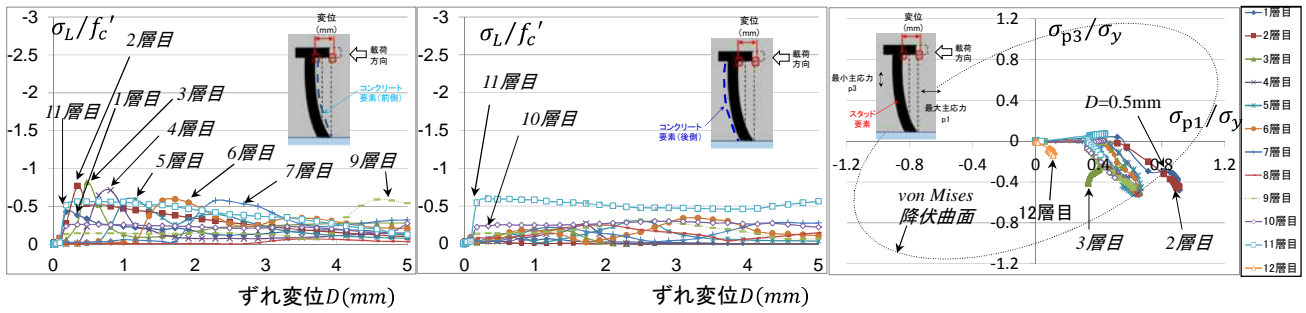
図-11~13(c)にスタッド鋼材の3次元応力について、最大主応力 $\sigma_{pl}$ と最小主応力 $\sigma_{ps}$ を鋼材の降伏強度 $\sigma_y$ にて無次元化して評価した von Mises 空間での応力点の挙動を示す。図-11(c)に示す外部拘束無し「Case-0」の応力点は、概ね第四象限で挙動している。

外部拘束無し（解析ケース「Case-0」）図-11(c)では、横軸の水平(+)方向に進んだ後に右下45°方向に応力点が進む挙動を示すのに対し、圧縮外部拘束力下の解析ケース「C-3」および「C-6」の図-12(c)および図-13(c)では、全ての層において原点から右下45°方向に応力点が進む挙動を示している。3層目（▲緑色）から12層目（△オレンジ）の応力点は von Mises 降伏曲面内にあり、3次元応力としては弾性域の挙動であるといえる。基部1層目（◆青色）に着目すると、ずれ変位 $D=0.2\sim 0.5\text{mm}$ で降伏曲面上にありスタッドが降伏応力を受け、変位が進むと曲面外に応力点が飛び出す状態を示しているといえる。図-12(c)および図-13(c)の基部1層目は、それぞれのずれ変位が $D=3.0\text{mm}$ (C-3)および $D=2.0\text{mm}$ (C-6)で降伏曲面から飛び出し原点から離れた最大位置に応力点があり、その後、降伏曲面方向に戻る挙動を示すことから、より高い圧縮拘束力下ではスタッド基部の降伏が早く生じていることが推察できる。

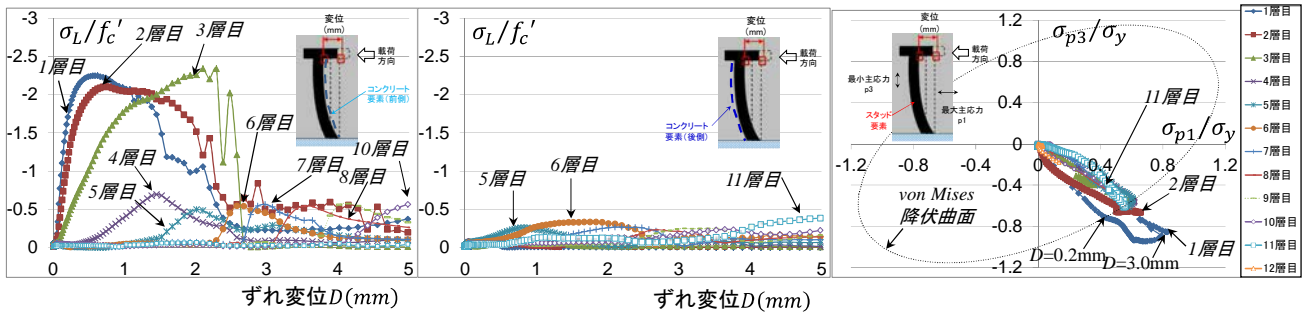
この挙動は、先に記述した圧縮外部拘束力下における図-12(a)および図-13(a)スタッド付近のコンクリート（前側）1層目の等価拘束圧がずれ変位 $D=0.2\sim 0.3\text{mm}$ 付近にて最大となっていることを鑑みると、スタッドがコンクリートの圧縮拘束力下で荷重方向と軸方向の2軸応力の影響がより強くなり降伏曲面を超えるのとほぼ同時に、等価拘束圧がピーク値を迎え、その後に軟化挙動を示していると推察できる。

同様に、引張外部拘束力下における図-14~15(a), (b)にスタッド付近のコンクリート（前側および後側）の等価拘束圧とスタッド変位の関係を示す。コンクリート（前側）の等価拘束圧の最大値がいずれも0.7程度となる、外部拘束力無し「Case-0」に近い挙動を示している。

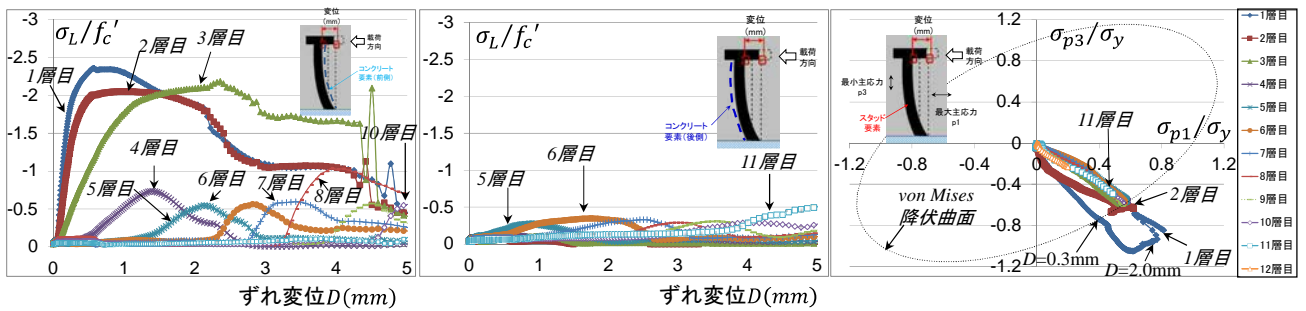




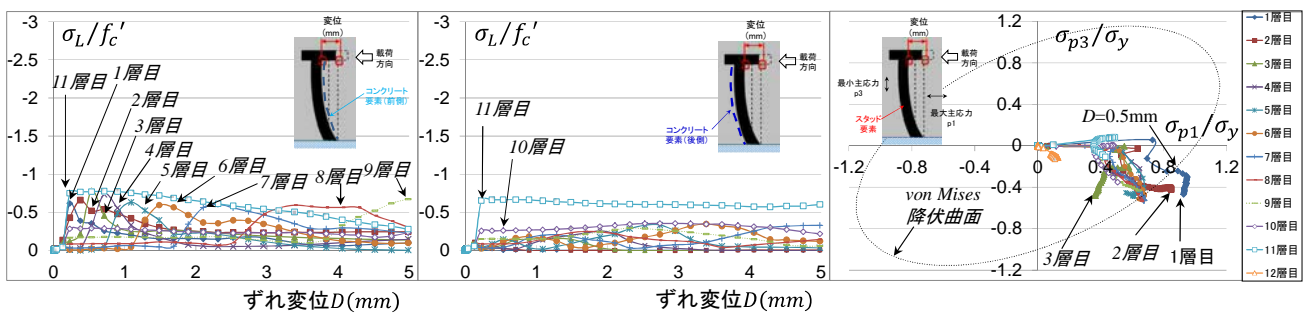
(a)コンクリート（前側）の等価拘束圧進展(b)コンクリート（後側）の等価拘束圧進展(c)スタッド von Mises 空間の応力点の挙動  
 図-11 外部拘束無し「Case-0」のコンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動



(a)コンクリート（前側）の等価拘束圧進展(b)コンクリート（後側）の等価拘束圧進展(c)スタッド von Mises 空間の応力点の挙動  
 図-12 圧縮外部拘束有り「C-3」のコンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動



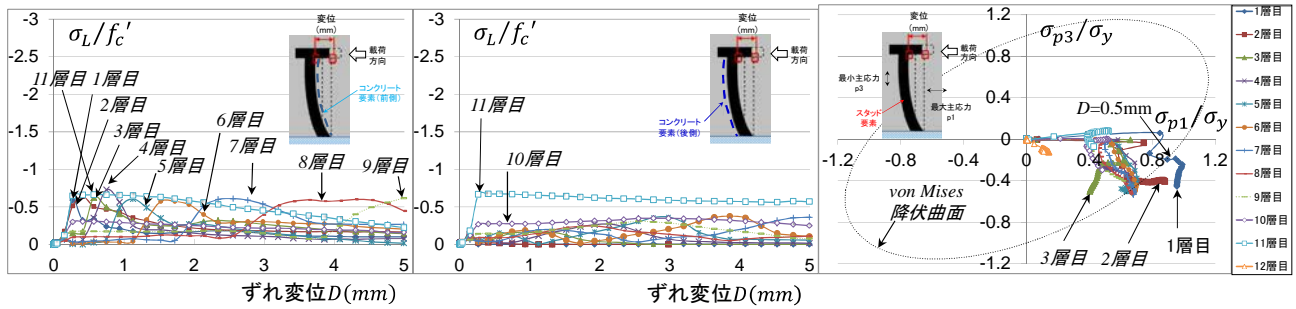
(a)コンクリート（前側）の等価拘束圧進展(b)コンクリート（後側）の等価拘束圧進展(c)スタッド von Mises 空間の応力点の挙動  
 図-13 圧縮外部拘束有り「C-6」のコンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動



(a)コンクリート（前側）の等価拘束圧進展(b)コンクリート（後側）の等価拘束圧進展(c)スタッド von Mises 空間の応力点の挙動  
 図-14 引張外部拘束有り「T-3」のコンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動

ただし、スタッド頭高さの上層の11層目（□水色）がピーク値となっていることからスタッド頭付近のコンクリートの等価拘束圧が高いことが分かる。これは、引張外部拘束力下では、スタッド頭部のコンクリートに拘束圧が生じ、圧壊しやすい状態であることを示唆している。

次に図-14~15(c)に引張外部拘束力下におけるスタッドの von Mises 空間での応力点の挙動を示す。3層目~12層目は概ね降伏曲面内の弾性挙動を示しているといえる。スタッド基部1層目の応力点は、図-11(c)同様にずれ変位  $D=0.5\text{mm}$  付近で降伏曲面を飛び出す挙動を示す。



(a)コンクリート（前側）の等価拘束圧進展(b)コンクリート（後側）の等価拘束圧進展(c)スタッド von Mises 空間の応力点の挙動  
 図-15 引張外部拘束有り「T-6」のコンクリートの等価拘束圧とスタッド応力点の挙動

#### 4. まとめ

本研究では、鋼コンクリート合成床版の部分モデルにおいて、一定外部拘束力下で水平せん断力を作用させ、スタッド近傍のコンクリートならびにスタッド鋼材の損傷について応力不変量を用いた損傷評価を試みた。解析結果から得られた知見を以下にまとめる。

- (1)スタッド頭部に生じるずれ変位とせん断力の関係から、圧縮破壊荷重 6%に相当する圧縮外部拘束力下で最もせん断耐力が高い結果が得られた。
- (2)等価拘束圧を用いたスタッド近傍の損傷評価から、輪荷重載荷のような圧縮外部拘束力下では、水平せん断力載荷側の床版内のスタッド付近のコンクリートが強い等価拘束圧を受け、その後軟化していることが解析的に得られた。
- (3)圧縮外部拘束力下における水平せん断力載荷側のスタッド付近のコンクリートは、基部1層目から3層目に大きな拘束を受け、荷重変位が進行すると、より上層部の要素が拘束を受け軟化する「遅れ現象」を解析的に再現した。また、圧縮外部拘束力が高いほど、等価拘束圧の軟化現象は緩やかになる。
- (4)圧縮外部拘束力下におけるスタッド付近のコンクリートの等価拘束圧の最大となるずれ変位時に、スタッド鋼材が圧縮拘束力下で荷重方向と軸方向の2軸応力の影響がより強くなり、これらがピーク値を迎えた後に軟化挙動を示すことが解析的に得られた。

#### 参考文献

- 1) 街道浩, 渡辺滉, 橘吉宏, 松井繁之, 堀川都志: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.50A(2004.3), pp.1119-1130
- 2) 国土技術政策総合研究所, 他: 道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究, 国総研資料第 472 号, pp.5-269, 2008.8
- 3) 土木学会: 鋼コンクリート合成床版設計・施工指針(案) 2016.
- 4) 藤山知加子, 松村寿男, 高須賀丈広: 3次元非線形FEM解析に基づく移動荷重下の鋼・コンクリート合成床版

破壊過程の考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 2, pp.227-237, 2014.5

- 5) 星名浩人, 藤山知加子, 松村寿男, 和田均, 熊野 拓志: 数値解析による外部拘束力作用下での頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位関係の検討, 第71回土木学会年次学術講演会講演概要集, C S 3-031, 仙台, 2016.9
- 6) Hiroto Hoshina and Chikako Fujiyama: Performance of Headed Stud on Steel-concrete Composite Bridge Deck as Shear Connector Subjected to Normal force, Procedia Engineering, Volume 171, 2017, Pages 1294-1300
- 7) Maekawa, K., Fukuura, N., Soltani, M.: Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.227-242, 2008
- 8) Fujiyama, C., Maekawa, K.: A Computational Simulation of the Damage Mechanism of Steel-Concrete Composite Slabs under High Cycle Fatigue Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.2, pp.193-204, 2001.
- 9) 例えば, 荒木秀夫, 吉田俊太郎, 洪成, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 10) 高橋良輔, 斉藤成彦, 中島章典, 島弘: 単純支持と開き止めを併用した押抜き試験における頭付きスタッドの耐荷挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.1, 113-127, 2015
- 11) 平陽兵, 渡辺忠朋, 斉藤成彦, 溝江慶久, 島弘, 中島章典: 制御されたせん断力と軸方向圧縮力を受ける頭付きスタッドのせん断耐力とせん断力-ずれ変位関係, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.5, II\_69-II\_80, 2014
- 12) 水野英二, 畑中重光: 塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化, コンクリート工学論文集, Vol.3(2), pp.1-13, 1992.
- 13) 例えば, 山田嘉昭: 塑性・粘弾性, 有限要素法の基礎と応用シリーズ 6, 培風館, 1991.10  
 (2018年7月20日受付)