

# ボルトを用いた鋼・コンクリートサンドイッチ床版の実験および解析

構造工学分野

初鹿 将司

## 1. はじめに

鋼コンクリートサンドイッチ床版とは鋼板とコンクリートを積層状に配置し、両者の一体性を保持するためにずれ止めやリブ等を設けた構造であり、鋼構造、鉄筋コンクリート(RC)構造に継ぐ第三の構造として位置付けられる合成構造の一形式である。この床版の利点としては、1) 鋼板によるコンクリートの拘束効果に伴う強度および靱性の増加、2) コンクリートの補剛による鋼板の座屈強度の増加、3) コンクリート厚を小さくすることにより軽量化が図れる点、4) 鋼板を型枠として利用できるために施工の省力化を図れる点などが挙げられ、その合理性かつ経済性の観点から、近年、土木構造物への研究・適用が行なわれている。

鋼コンクリートサンドイッチ床版におけるずれ止めとしてはダイヤフラムやリブ等を溶接したものが一般的であるが、近年、溶接作業を伴わないボルトをずれ止めを用いた構造が研究・適用されている。しかし、その研究は実構造物への適用のみを指向した性能評価に即するものがほとんどであり、その基本的性状に着目した研究はほとんど行なわれていないのが現状である。そこで、本研究ではこのボルトを用いた鋼コンクリートサンドイッチ床版を対象に載荷実験ならびに汎用有限要素解析プログラム(MARC)を用いた有限要素法による3次元弾塑性解析を行なうことにより、ずれ止めであるボルトの合成効果に対する影響等を検討することを目的とする。

## 2. 実験概要

使用した供試体の諸元を図1に示す。その平面形状は1辺1200mmの正方形とし、断面構成はコンクリートの上下に鋼板を設置したサンドイッチ状で上下鋼板厚ともに3.2mm、コンクリート厚93.6mmである。支持条件は4辺単純支持とし、スパン長は1000mmである。さらに、ずれ止めとして用いたのはM16ボルトである。一方、載荷荷重は150mmの円形等分布荷重を供試体上面中心に静的載荷した。

実験変数はボルト配置間隔のみであり、板厚と同じ100mm間隔を基準として、より広い125mm、150mmおよび200mm間隔の計4体の供試体を用いることでボルト間隔による影響について検証した。使用した材料の

特性については表1に示す。

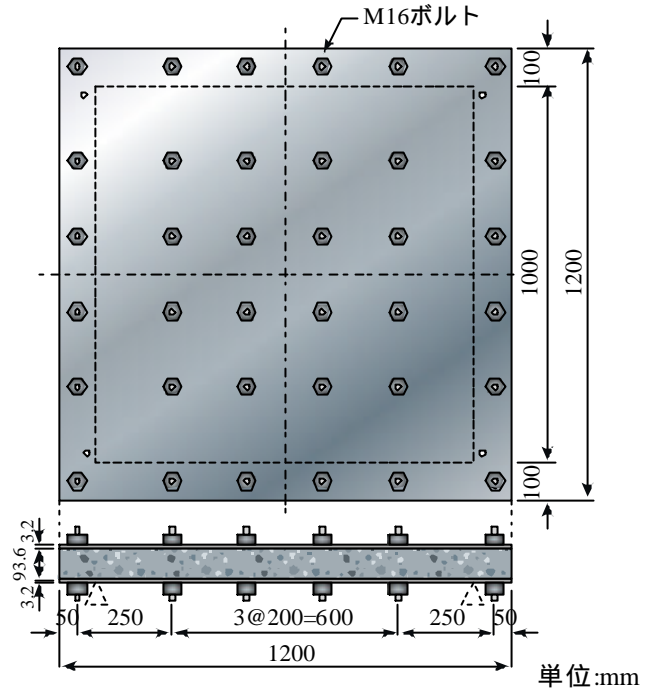


図1 供試体概略図(ボルト間隔200mm)

表1 材料特性

| 鋼板部               |                |       | ボルト部              |                |       |
|-------------------|----------------|-------|-------------------|----------------|-------|
| 降伏強度              | 弾性係数           | ポアソン比 | 降伏強度              | 弾性係数           | ポアソン比 |
| $f_{sy}$<br>(MPa) | $E_s$<br>(GPa) | $s$   | $f_{by}$<br>(MPa) | $E_b$<br>(GPa) | $s$   |
| 244               | 207            | 0.29  | 443               | 201            | 0.29  |
| コンクリート部           |                |       |                   |                |       |
| 圧縮強度              | 弾性係数           | ポアソン比 | 引張強度              |                |       |
| $f_c$<br>(MPa)    | $E_c$<br>(GPa) | $c$   | $f_t$<br>(MPa)    |                |       |
| 28.7              | 27.4           | 0.21  | 2.45              |                |       |

## 3. 実験結果

### (1) 破壊状況

まず全ての供試体の鋼板部に写真1に示すような載荷部付近が抜け落ちるような押し抜きせん断が生じており、この傾向はボルト間隔が狭い供試体ほど顕著であった。このことはボルト間隔が広くなるにつれて曲げによる全体的な変形が大きくなったことが原因と考えられる。特にボルト間隔200mmの供試体では上鋼板に局部座屈が生じていた。一方、コンクリート部では、載荷部付近の押し抜きせん断による円形のひび割れとそこから放射状に広がる曲げひび割れが生じていた。コンクリート部についても鋼板部と同様にボルト間隔が

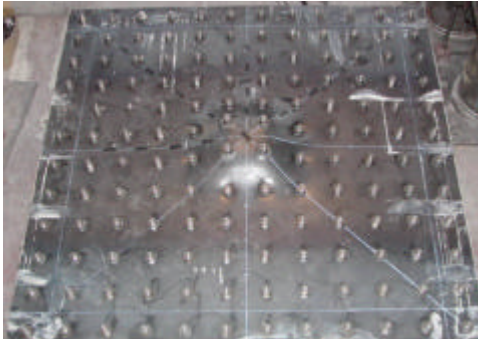


写真 1 ボルト間隔 100 mm 実験後供試体下面

広くなるにつれて曲げによる影響が顕著に見られた。

## (2) 荷重 変位関係

図 2 に各供試体の荷重と中央での鉛直方向変位の関係の包絡線を示す。これより、まず供試体の降伏荷重はボルト間隔が狭くなるにつれて大きくなり、ボルトによる合成効果の影響が顕著に現れている。ただし、初期剛性に関してはボルト間隔による明確な違いが見られず、ほぼ類似した挙動を呈した。一方、初期降伏後はボルト間隔の狭い 100 mm と 125 mm 間隔の両供試体ではコンクリートの押し抜きせん断破壊の影響と見られる荷重の低下が見られるが、変位 20 mm 以降ではどの供試体もほぼ同じ勾配を示し、ボルト間隔による影響は明確には現れていない。以上より、弾性域においてはボルト間隔による影響は見られず、塑性域に達した後にその影響が現れてくることが分かる。

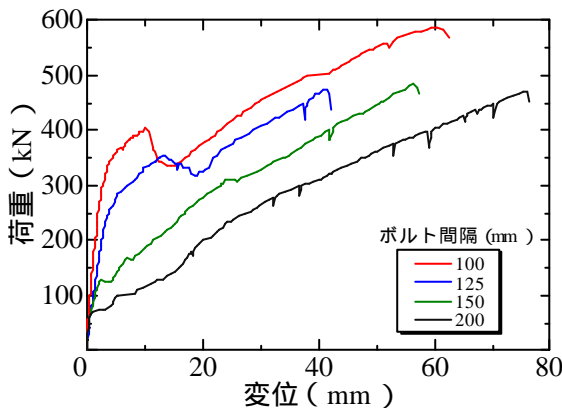


図 2 荷重 中央鉛直変位関係

## 4. 解析手法

### (1) 構成則

本解析における構成則としては以下に示す条件に従うこととする：( ) 弾性域における応力 ひずみ関係はフックの法則に従う；( ) 鋼は von Mises，コンクリートは Drucker-Prager の外接の降伏基準を用いる；( ) コンクリートはひび割れおよび圧壊を定義する；( ) 塑性域における応力増分 ひずみ増分の関係は関連流動則によって表現する。

### (2) 接触条件

鋼コンクリートサンドイッチ構造は各部材間の接触

条件がその挙動に大きく影響する。そこで、本解析では各部材間の接触条件として以下に示す 2 通りの方法を用いることとする。

### (a) CONTACT

各材料を構成している要素を 1 つの集合体 (ボディ) とし、その外表面上の節点を境界節点として接触判定を行なう方法。この境界節点が他のボディの境界を貫通しないように変位が拘束され、境界節点が他のボディの境界を滑る際には摩擦が生じる。

### (b) 剛結

各材料が一体となって挙動する完全合成体として考える方法。材料間の境界節点が滑らず、剥離もしない。

## 5. 解析の妥当性の検討

まず、文献 1) による 3 次元弾性論の厳密解との比較を行なうことで本解析の妥当性の検証を行なった。対象となるモデルは計 2 体で、第一の対象モデルは図 3 に示す一辺が 1000 mm の 4 辺単純支持の正方形板の中央部に載荷幅 100 mm、強度  $q=2000$  MPa の矩形分布荷重を載荷させたものである。なお、断面形状はコンクリート厚 100 mm、上下鋼板厚は 8 mm で、コンクリートと上下鋼板は完全合成となつてずれ止めは設けていない。

次に第二の対象モデルは図 4 に示す一辺 1200 mm、スパン長 1000 mm の正方形板に 19.6 kN の輪荷重を偏心

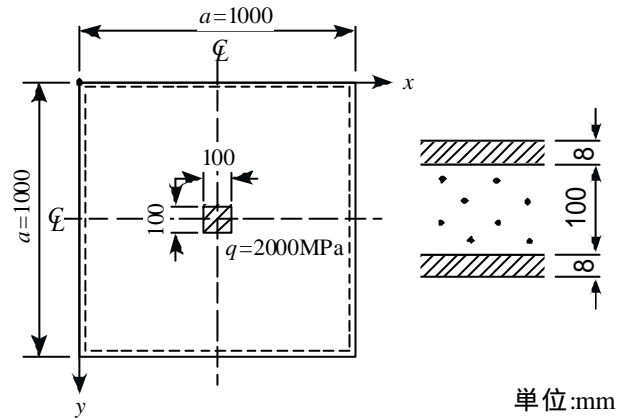


図 3 対象モデル 1

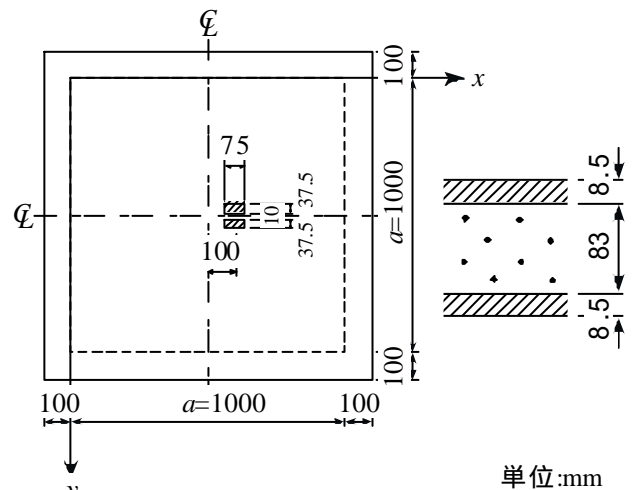


図 4 対象モデル 2

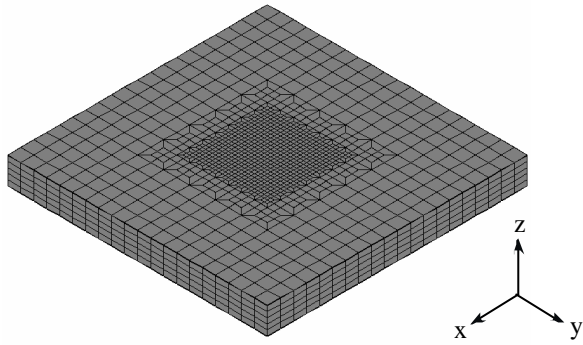


図 5 要素分割モデル(全領域,対象モデル 1)

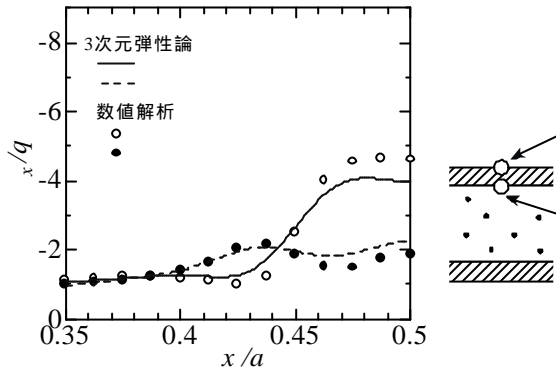


図 6 対象モデル 1 での上鋼板 x 方向直応力分布

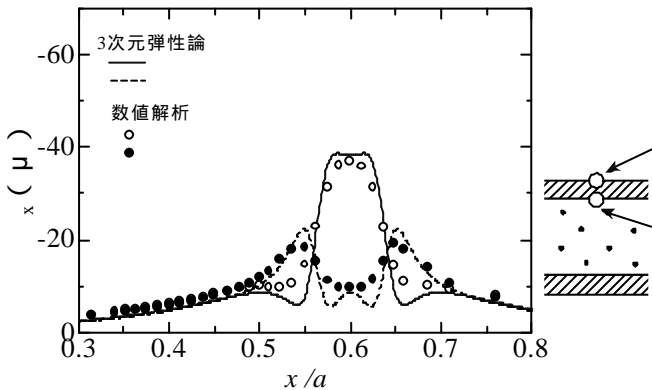


図 7 対象モデル 2 での上鋼板 x 方向直ひずみ分布

載荷させたものである。断面形状はコンクリート厚 83 mm, 上下鋼板厚 8.5 mm となっており, 先ほどと同様にコンクリートと上下鋼板は完全合成となっている。両対象モデルに対し, 材料間の接触条件を剛結とした要素分割モデル(図 5 参照)を用いて弾性解析を行ない, 得られた応力分布あるいはひずみ分布を比較・検討した。支持条件は端部の z 方向変位と一部水平方向(x, y 方向)変位を拘束することで満たしている。

対象モデル 1 に対して両手法により得られた床版の中央断面の荷重点近傍での上鋼板の上下面における直応力  $\sigma_x$  を図 6 に, また, 対象モデル 2 に対して両手法により得られた床版の中央断面の荷重点近傍での上鋼板の上下面における直ひずみ  $\epsilon_x$  を図 7 に示す。これより, 両手法による分布の傾向および値が非常に一致しており, 本解析は十分な妥当性を有していると言える。

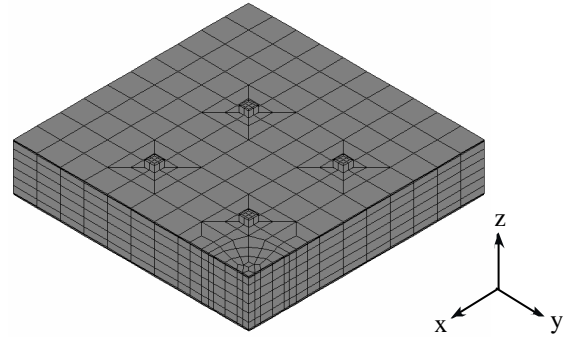


図 8 要素分割モデル(1/4 領域, ボルト間隔 200 mm)

## 6. 解析概要

### (1) 解析モデル

本解析では先に述べた実験に用いたボルト間隔 200 mm および 125 mm の 2 つの供試体に対象を絞って解析を行ない, 材料間の接触条件の検討およびボルト間隔の違いによる比較を行なうこととした。用いた要素分割モデルの一例を図 8 に示す。実験に用いた供試体は 2 軸対称系の構造であるので解析モデルでは yz 平面および zx 平面に関して対称な 1/4 モデルを採用した。また, ボルト部については実際の形状と断面積が等しい正方形にモデル化して解析を行なった。導入軸力に関してはボルト部中心の要素に初期応力を与えることで解析に反映させている。

### (2) 解析ケース

解析では表 2 に示すように接触条件および摩擦係数を変えることにより計 5 ケースの解析を行なった。

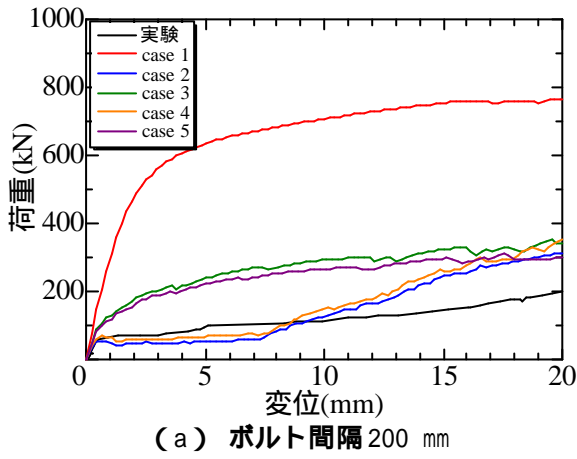
表 2 解析ケース

|        | 接触条件          |            |                | 摩擦係数          |            |
|--------|---------------|------------|----------------|---------------|------------|
|        | 鋼板<br>コンクリート間 | 鋼板<br>ボルト間 | コンクリート<br>ボルト間 | 鋼板<br>コンクリート間 | 鋼板<br>ボルト間 |
| case 1 | 剛結            |            |                | -             |            |
| case 2 | CONTACT       | CONTACT    | 剛結             | 0             |            |
| case 3 |               |            |                | 0.5           |            |
| case 4 |               |            |                | 0.5           | 0          |
| case 5 |               |            |                | 0             | 0.5        |

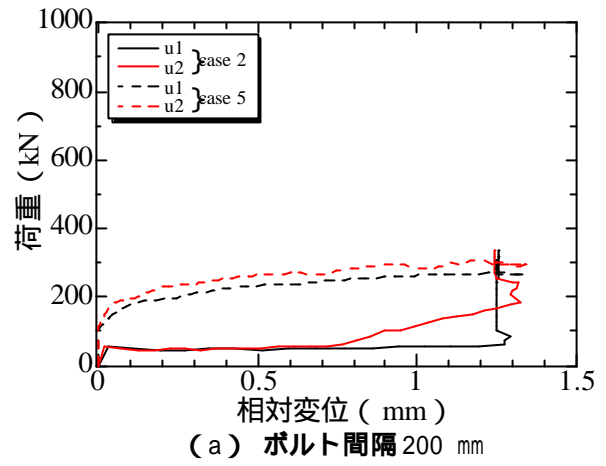
## 7. 解析結果

### (1) 荷重 変位関係

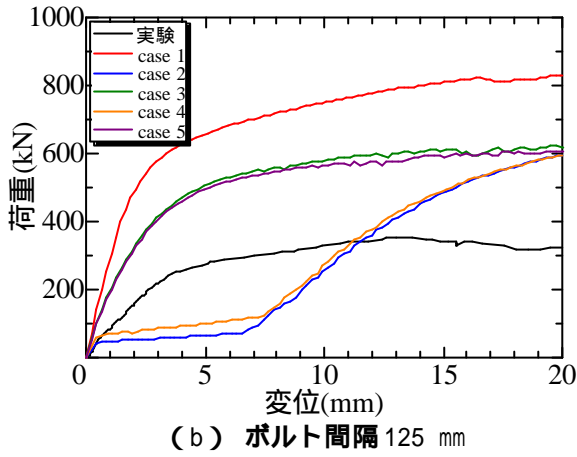
図 9 に荷重と中央での鉛直方向変位の関係を示す。これより, case 1 は完全合成状態にあるので他のケースと比較して大きな耐力を示しており, 一方, 残りの case 2~5 については 2 種に大別できる。すなわち, 初期降伏後の変位 7 mm 付近において急激な荷重の増加が生じている case 2 と case 4, 初期降伏後も一定の割合で荷重が増加している case 3 と case 5 の 2 通りである。この両挙動の違いは鋼板部とボルト部の摩擦係数の違いに起因している。そこで, 鋼板部とボルト部の摩擦係数を 0.5 とした場合にはボルト部に導入した初期応力の影響もあり, 鋼板部の滑りが幾分拘束される非完全合成状態になるために荷重が増加するのではないかと推測される。特にボルト間隔が狭い 125 mm 間隔では鋼板部とボルト部の摩擦係数を 0.5 とした case 3 と case 5 の挙動が



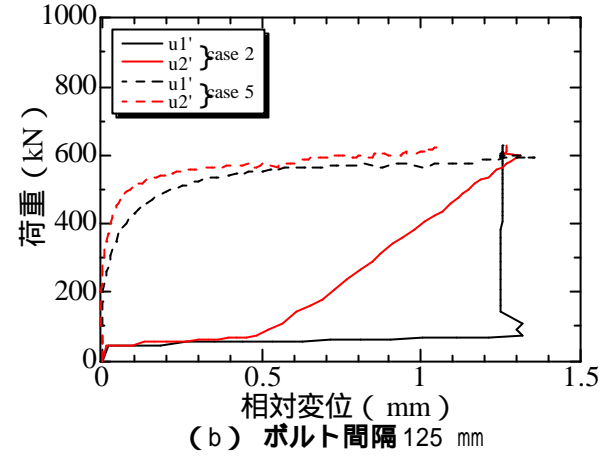
(a) ボルト間隔 200 mm



(a) ボルト間隔 200 mm



(b) ボルト間隔 125 mm



(b) ボルト間隔 125 mm

図 9 荷重 中央鉛直変位関係

図 10 荷重 相対変位関係

完全合成とした case 1 の挙動に近づいていることより、鋼板部の滑りがより拘束されていることが分かる。

(2) 荷重 相対変位関係

図 10 に鋼板部とボルト部間の摩擦係数が異なる case 2 と case 5 の 2 者に対して、図 11 に示す下鋼板の端部付近 (u1 と u1' 点) および中央部付近 (u2 と u2' 点) のボルトと鋼板の荷重 相対変位関係を示す。これより両者間の摩擦係数を 0 にした case 2 では初めに荷重が一定となった点において相対変位が急激に増加しており、また、荷重が再び増加する点では端部付近の u1 および u1' 点において相対変位が一定となっており、ボルト部が鋼板に接触していることを表している。一方、摩擦係数を 0.5 とした case 5 では case 2 と比較して相対変位が増加し始めるのが遅く、また、u1 および u1' 点にて相対変位が一定となるのは解析終了直前でありボルト部と鋼板の接触が起こるのも case 2 と比較して遅くなっている。

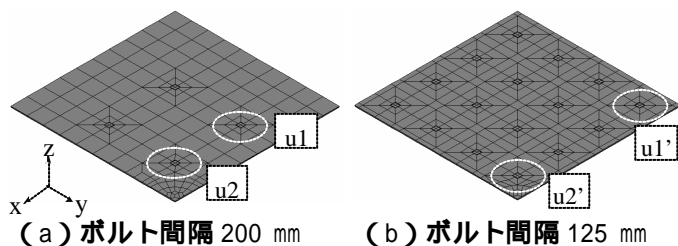


図 11 相対変位の計測点

以上より、鋼板部とボルト部での摩擦係数を 0 とした場合では初期応力によるボルトの締め付けの効果を得ることができず、早い段階で鋼板が滑り始める。そのためボルトによる合成効果がほとんど得られず、その後、鋼板とボルトの接触が起こると鋼板の滑りが抑制され、再び荷重が増加するという傾向を示す。

8. まとめ

- ( ) 実験ではすべての供試体で押し抜きせん断破壊が生じた。ただし、ボルト間隔が広くなるにつれて曲げ変形の影響が大きくなり、一部の供試体では上鋼板に局部座屈が生じた。
- ( ) 各供試体の変形挙動は弾性域ではボルト間隔による影響はほとんど見られず、塑性域に達した後にその影響が顕著であった。
- ( ) 鋼板部とボルト部の摩擦は全体の挙動に大きく影響を与えた。すなわち、摩擦を考慮しない場合は、両者間の滑りで全体に変形が進み、一方、摩擦を考慮するとその滑りを抑制することができた。

参考文献 1) 堀川都志雄：直交異方性厚板の弾性理論とその応用に関する研究，大阪市立大学学位請求論文，1984。