

## 鋼コンクリートサンドイッチ床版の3次元弾塑性FEM解析

松田 浩<sup>\*1</sup>・崎山 毅<sup>\*1</sup>・小嶋 悟<sup>\*2</sup>・山下 幸生<sup>\*2</sup>・佐野 正<sup>\*2</sup>

## Three dimensional elasto-plastic finite element analysis of steel-concrete sandwich slab

by

Hiroshi MATSUDA<sup>\*1</sup>, Takeshi SAKIYAMA<sup>\*1</sup>, Satoru KOJIMA<sup>\*2</sup>, Kousei YAMASHITA<sup>\*2</sup>Masashi SANO<sup>\*2</sup>

Recently, the steel-concrete sandwich slab which has a high rigidity has been developed for the deck slab of the road bridge. The shearing force between steel plate and concrete of the sandwich slab are supported by the bolts. In order to investigate the influences of bolt spacing, fastening force, steel thickness and concrete strength of the sandwich slab, the loading tests were carried out and three dimensional nonlinear FE analyses were performed.

## 1 はじめに

道路橋のコンクリート床版のコスト縮減, 工期短縮, 高剛性, 汎用性を目的として鋼合成サンドイッチ床版が開発され実用に供されている。

鋼コンクリートサンドイッチ構造は, 鋼板とそれにはさまれたコンクリートが一体となって機能する合成構造である。本構造は, 鋼板がコンクリートを拘束することにより, 強度とじん性が向上するため, RC構造と比べ断面をコンパクト化し, 部材を軽量にできるという利点がある。破壊形態としては, 鋼板の局所座屈ならびに拘束されたコンクリートのせん断破壊などが考えられ, 対策方法としてせん断力を負担するための補強鋼材が配置されている。せん断補強鋼材にはタイプレートや鋼棒などが使用されている。

本研究では, 鋼板とコンクリートとのずれせん断力をボルトで支持するために, 上下鋼板をボルトで接合された鋼合成サンドイッチ床版の構造特性について実験および解析により検討したものである。鋼合成サンドイッチ床版を構成するボルトの間隔, 締付け力, 鋼板厚およびコンクリート強度が, 力学的挙動特性に及

ぼす影響を明らかにすることを目的とした載荷実験を行うとともに, その結果を3次元非線形FEM解析によりシミュレーションした結果について報告する。

## 2 実験概要

## 2.1 供試体の概要

本研究では, 表1に示すように鋼コンクリートサンドイッチ構造のボルト間隔, ボルトの締め付け力, 鋼板の板厚およびコンクリートの圧縮強度が力学的挙動

表1 実験供試体の種類

供試体 No.	ボルト				鋼板		コンクリート		
	間隔 (mm)		締付け力 (kN)		鋼板厚 (mm)		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
	200	300	137	222	6	9	23	53	65
1	○			○	○			○	
2		○		○	○			○	
3		○		○	○				○
4		○	○		○				○
5		○		○		○			○

平成14年4月19日受理

<sup>\*1</sup> 構造工学科 (Department of Structural Engineering)<sup>\*2</sup> ショーボンド建設(株) (研究当時:長崎大学大学院)<sup>\*3</sup> ショーボンド建設(株)

特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として静的載荷実験を実施した。

図1に各供試体の形状寸法を示す。供試体は、まずボルト間隔および鋼板厚の異なる長さ1800mm、幅600mm、高さ162mmおよび168mmのパネルを作り、上下鋼板を高力高ナットと高力ボルト(図2)で接合した後、コンクリートを側面から打設して製作した。鋼板とコンクリートの付着はないものとし、鋼板とコンクリートとのずれせん断力はボルトのみで支持する構造とした。そのため、鋼板と高力高ナットに離型剤を塗布した後、コンクリートを打設した。鋼板と高力ボルトと高力高ナットの物性値を表2に示す。コンクリートの圧縮強度は53N/mm<sup>2</sup>である。なお、ボルトの種類として、SWSボルトも用いて同様な実験を行なった。

載荷方法は、図1に示すように、支点間隔1400mmで単純支持とし、せん断スパン有効高さ比を2.47とする2点載荷とし、長さ600mm、幅100mm、および厚さ

表2 使用材料の物性値

使用材料	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
鋼板 (SS400)	344	398	2.03×10 <sup>5</sup>
高力ボルト *	900	—	2.0×10 <sup>5</sup>
高力高ナット *	900	—	2.0×10 <sup>5</sup>

\* F10T 相当品の規格値

12mmの載荷板を介して載荷した。測定項目は、荷重、変位およびひずみとし、変位計およびひずみゲージの取付け位置は図1に示すとおりである。また、ひび割れ進行状況を目視により観察した。

2.2 実験結果の概要

実験概要で述べたように、SWSボルトを用いた実験も行ったが、高力高ナットを用いた場合と比べて、耐力が小さく評価されたので、以後、高力高ナットの使用を前提とした実験を行った。ここでは、ボルト間隔、ボルト締付け力、ボルト取付け孔径、鋼板厚、コンクリート圧縮力をパラメータとした実験結果について述べる。

2.2.1 ボルト間隔の影響

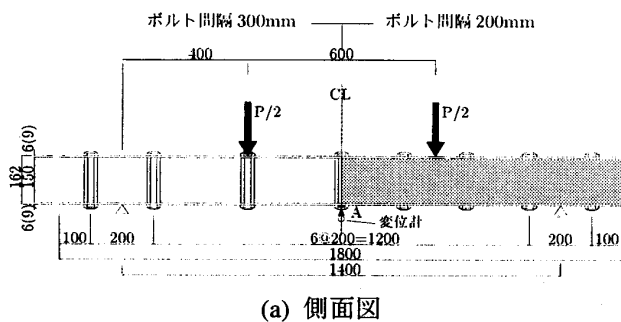
図3に示すように、ボルト間隔の狭い200mmの供試体(No.1)が、ボルト間隔の広い300mmの供試体(No.2)と比較して変形が小さくなった。また、最大荷重については、ほぼ等しく850kNとなった。

ひずみゲージ取り付け位置における、荷重とひずみの関係を図4に示す。コンクリートに初期ひび割れが発生すると、各供試体とも下面鋼板のひずみが増変化した。その後は各供試体とも同様の傾向を示し、ほぼ700kN付近で各供試体とも曲げ剛性が低下した。この時の下面鋼板のひずみは1500×10<sup>-6</sup>程度であり、各供試体とも下面鋼板がほぼ降伏したものと考えられる。

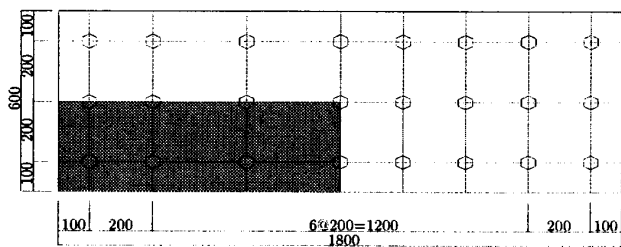
目視により確認した実験終了後のひび割れ状況を図5に、各供試体の初期ひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重、部材が降伏する荷重および最大荷重を比較し、表3に示す。

初期ひび割れの発生荷重は、ボルト間隔200mm(No.1)が55kN、300mm(No.2)が60kNであり、いずれもスパン中央の高力高ナット位置に発生した。その後、荷重が増加すると曲げ剛性に差異が生じ、ボルト間隔300mm(No.2)の曲げ剛性が200mm(No.1)の曲げ剛性より小さくなった。また、図5に示すようにせん断スパン内の高力高ナット位置にもひび割れが発生した。

載荷を続けると、ボルト間隔200mm(No.1)では400



(a) 側面図



(b) 立体図

図1 供試体形状寸法

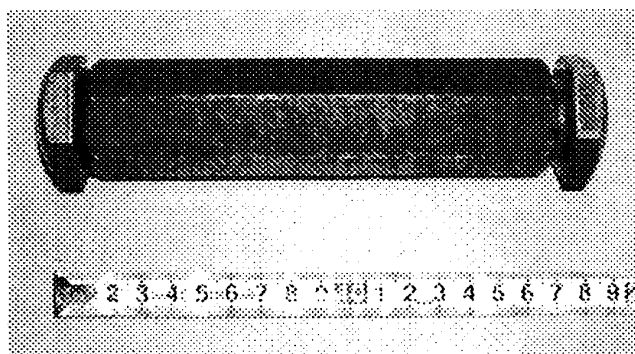


図2 高力高ナットおよび高力ボルト

kNの時点で、300mm(No.2)では150kNの時点で、載荷点付近の高力高ナット位置の上方から支点方向に向って斜めせん断ひび割れが発生した。その発生荷重は、高力高ナットの配置間隔が狭いボルト間隔200mm(No.1)が配置間隔の広い300mm(No.2)のおよそ2.7倍となった。また、荷重と変位の関係については、大きな変化は見られなかった。さらに載荷を続けると、各供試体の鋼板が降伏し始めた。鋼板降伏荷重は配置間隔の狭いボルト間隔200mm(No.1)で720kN、配置間隔の広い300mm(No.2)で620kNであった。その後も荷重は漸増

し、鋼板とコンクリートの間に隙間が発生し、さらにひび割れに段差が生じた。最大荷重は、ボルト間隔200mm(No.1)および300mm(No.2)ともに848kNであり、載荷点と支点とを結ぶ斜めひび割れが発生して荷重が低下した。

表3 載荷試験結果 (kN)

	200mm	300mm
初期ひび割れ発生荷重	55	60
斜めひび割れ発生荷重	400	150
鋼板降伏荷重	720	620
最大荷重	848	848

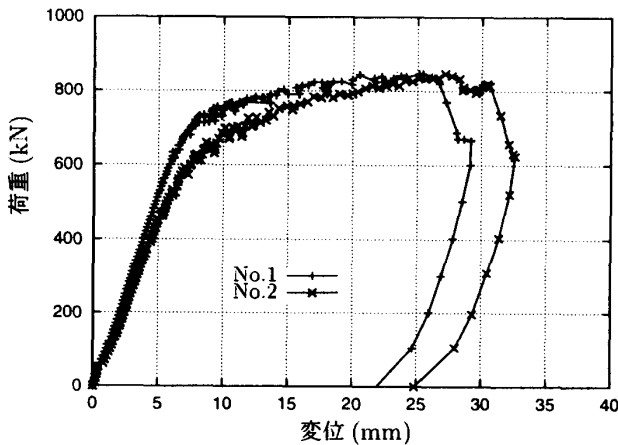


図3 荷重-中央点たわみ関係(ボルト間隔の影響)

### 2.2.2 ボルト締付け力の影響

荷重とスパン中央変位の関係を図6に示す。同図に示すように、載荷重が約270kNに到達するまでは、ボルトの締め付け力の影響は見られなかったが、270kN到達以降、ボルトの締め付け力の小さい137kN(No.4)の供試体が、ボルトの締め付け力の大きい222kN(No.3)に比べ、同一荷重に対する変形は大きくなった。また、最大荷重についてはほぼ等しい値(No.3は710kN、No.4は698kN)となった。

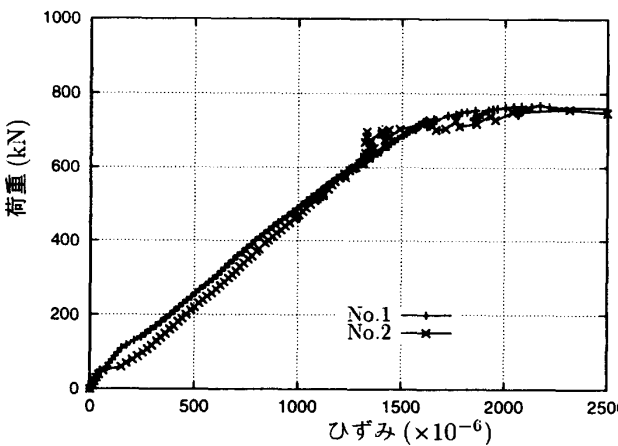


図4 荷重-中央点ひずみ関係(ボルト間隔の影響)

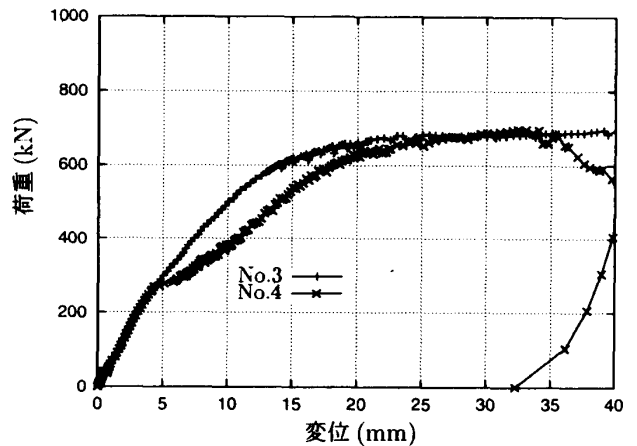


図6 荷重-中央点変位(ボルト締め付け力の影響)

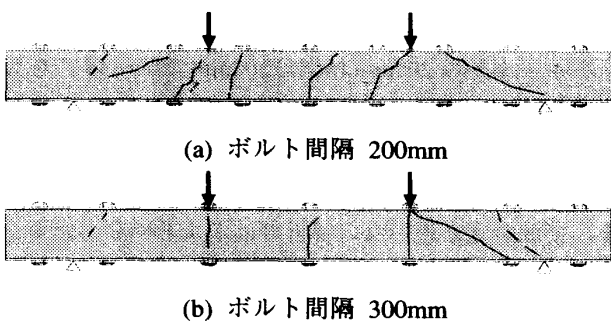


図5 ひび割れ進行状況

### 2.2.3 鋼板厚の影響

荷重とスパン中央変位の関係を図7に示す。同図に示すように、荷重が約200kNまでは鋼板厚による影響は見られなかったが、約200kN付近から鋼板厚の薄い6mmタイプ(No.3)の供試体が、鋼板厚の厚い9mmタイプ(No.5)に比べ、同一荷重に対する変形は大きくなった。また、最大荷重についても、鋼板厚の厚い9mmタイプ(No.5)の方が889kN、鋼板厚の薄い6mmタイプ(No.3)が710kNであった。

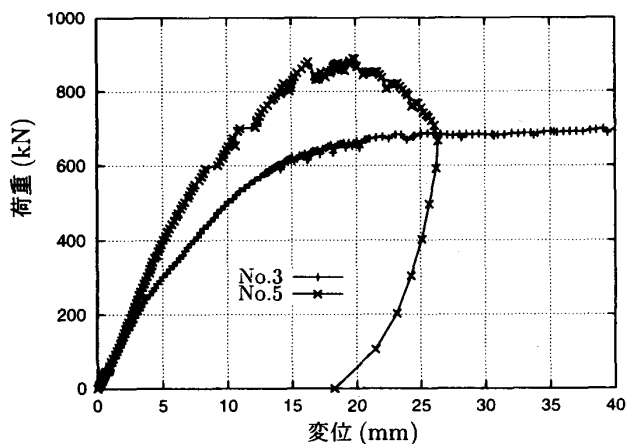


図7 荷重-中央点変位関係(鋼板厚の影響)

### 2.2.4 コンクリートの圧縮強度の影響

荷重とスパン中央変位の関係を図8に示す。同図に示すように、荷重が約200kN付近から、荷重と中央変位との関係に両供試体の明確な相違が現れた。また、最大荷重は、コンクリートの圧縮強度が65N/mm<sup>2</sup>(No.3)の供試体は850kNで、53N/mm<sup>2</sup>(No.2)の供試体は670kNであった。

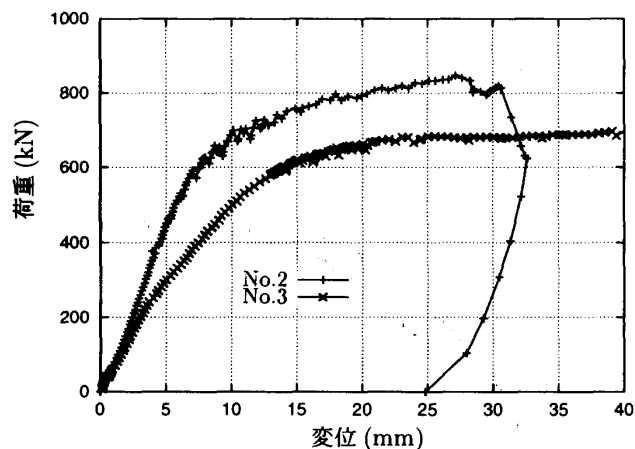


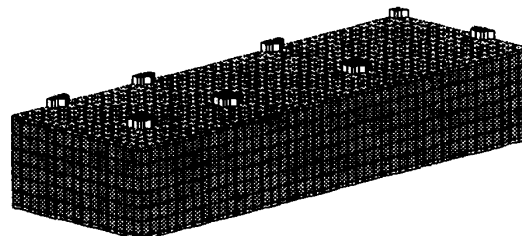
図8 荷重-中央点変位関係  
(コンクリート圧縮強度の影響)

### 3 解析概要

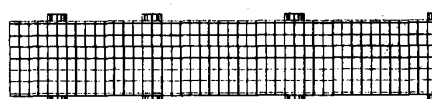
解析は汎用有限要素解析コード(MARC)を用いた。ボルト形状および配置間隔を考慮して作成した解析モデルの一例を図9に示す。解析モデルは、供試体の対称性を考慮して、スパン方向1/2、幅方向1/2の1/4モデルとした。また、鋼板とコンクリートおよびボルトとコンクリートの付着切れを考慮して、各要素間には接触機能(CONTACTオプション)を用いた。表4に各供試体の解析モデルの節点数および要素数、要素タイプを示す。

表4 解析モデル

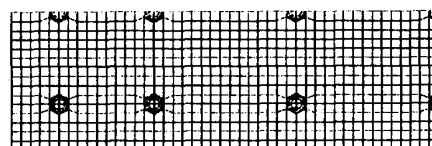
ボルト間隔	節点数	要素数	要素タイプ
200mm	10558	6312	Solid要素
300mm	10028	6111	Solid要素



(a) 全体図



(b) 側面図



(c) 立面図



(d) ボルト

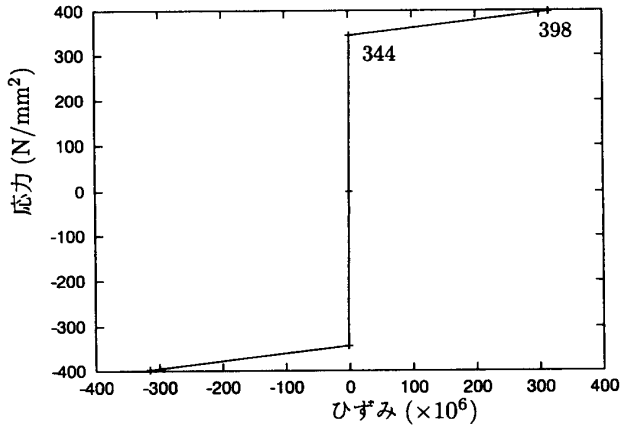
図9 解析モデル

鋼板の構成則を図10(a)に示す。これは、鋼板材料の引張試験結果に基づくものである。ボルトは表1に示す物性値を用い、弾性係数は線形で破壊しないものとした。また、コンクリートの構成則は図10(b)に示すように与えた。圧縮軟化域のモデル化が、終局耐力や変形に与える影響が大きいため、Hognestadによる圧縮軟化域モデルと道路橋示方書の圧縮軟化域モデルに基づく構成則を用いて予め解析した結果を踏まえて、今回の実験結果の解析に適した圧縮軟化の構成則を用いた。

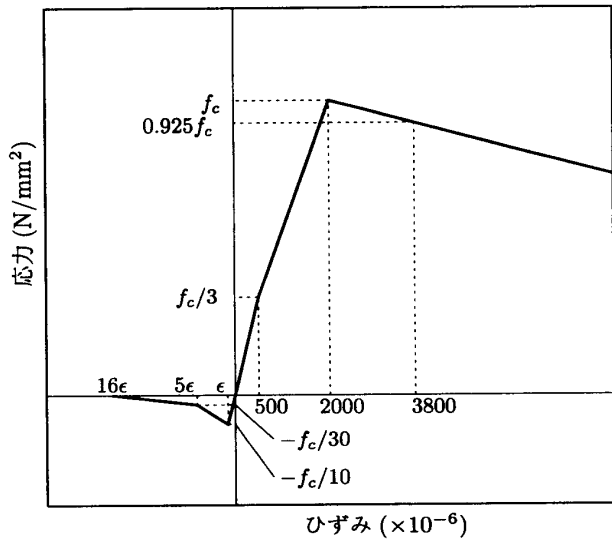
### 4 実験および解析結果の比較

#### 4.1 ボルト間隔の影響

ボルト間隔が200mmおよび300mmの試験体に対して非線形FE解析を行った。荷重と中央点たわみの関係を図11に、荷重とひずみの関係を図12に示す。実験では、ボルト間隔が小さければ剛性が大きくなっている。接触機能を用いない解析ではボルト間隔の影響が全く現れなかった。一方、接触機能を用いた解析ではボルト間隔の影響が顕著に現れ、300mm間隔の試験体の解析結果は実験結果とほぼ一致した結果が得られた。



(a) 鋼板



(b) コンクリート

図10 鋼板及びコンクリートの構成則

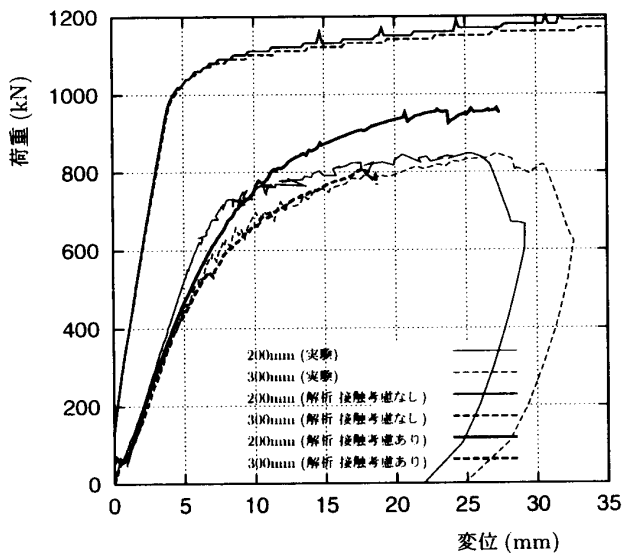


図11 荷重-中央点たわみ関係

ボルト間隔300mmでの実験および解析におけるひび割れ状況を図13に示す。実験ではせん断スパン内にひび割れが発生している。解析においては、接触機能

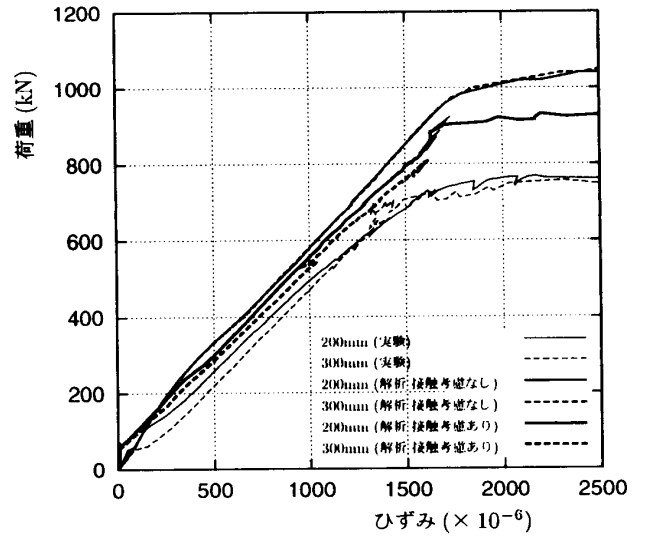
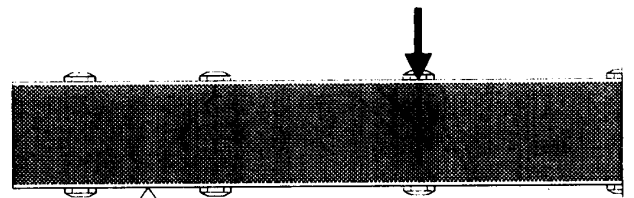
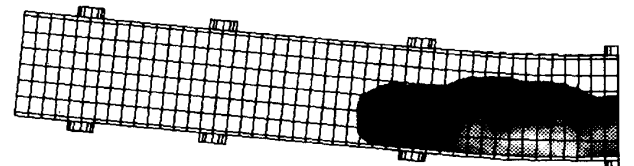


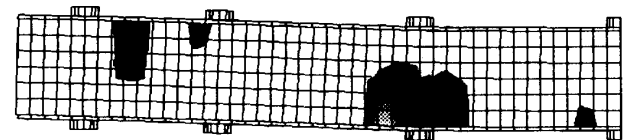
図12 荷重-中央点ひずみ関係



(a) 実験結果



(b) 解析結果 (接触考慮なし)



(c) 解析結果 (接触考慮あり)

図13 ひび割れ状況

を用いない場合、支点位置および高力高ナット位置にひび割れは発生せず、スパン中央部にのみひび割れが集中して発生する結果となった。一方、接触機能を用いた場合には、せん断スパン内の高力高ナット位置にひび割れが確認された。

#### 4.2 鋼板厚の影響

鋼板厚が6 mmおよび9 mmの試験体に対して非線形FE解析を行った荷重とスパン中央のたわみの関係を図14に示す。実験および解析ともに、鋼板厚が力学的挙動に大きく影響しており、鋼板厚が力学的特性に大きく影響を及ぼすことが確認された。図14に示すように、載荷荷重が200kNまでは鋼板厚による影響は小さいが、200kN付近から鋼板厚6 mm試験体が鋼板厚9 mm試験体に比べ、剛性が小さくなっている。また、最大耐力も鋼板厚9 mm試験体が鋼板厚6 mm試験体に比べ大きくなった。

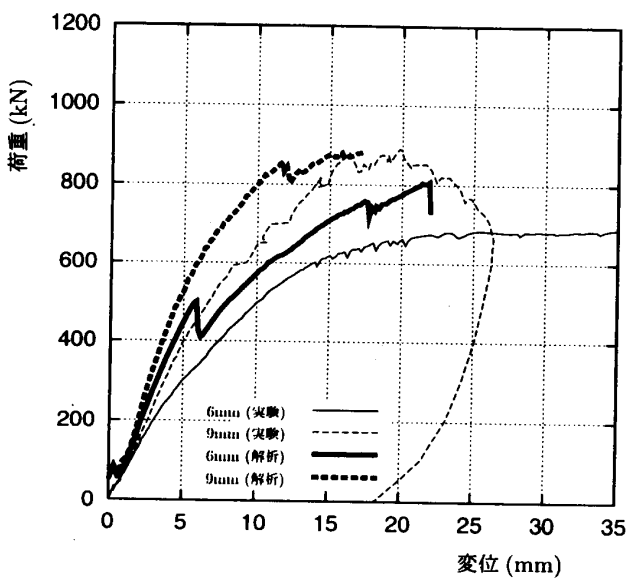


図14 荷重－変位関係

#### 5 まとめ

鋼合成サンドイッチ梁の載荷実験を行い、3次元非線形FEM解析により実験結果のシミュレーションを実施した。鋼板、ボルトおよびコンクリートの接触を考慮したモデル化により、実験結果をほぼシミュレートできることがわかった。今後、ボルトの種類、間隔、鋼板厚、コンクリート圧縮強度などの諸要因を変化させたパラメトリック解析を行うことにより、より合理的な鋼合成サンドイッチ構造の設計が可能になるものと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997.
- [2] 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，1993.