

ベースプレートの有無が免震基礎の 構造性能に及ぼす影響に関する研究

竹崎 真一*¹・渡辺 英義*¹・三澤 大輝*²・田部井 直哉*³・六本木 元太*²・木村 雄一*²

Keywords : seismic isolation foundation, base plate, fixing bolt, high damping rubber bearing
免震基礎, ベースプレート, 取付ボルト, 高減衰ゴム支承

1. はじめに

免震構造において、免震支承と免震基礎との接合にはベースプレート（以下、BPL）を用いるのが一般的である。このBPLには基礎部との一体化のためのスタッドとアンカーボルトが設けられており、両者により、支承と躯体間での円滑な応力伝達を可能にしている。一方、近年ではコスト競争力に優れたBPLを用いないBPLレス工法も採用されており、この場合、BPL下面に配置されたスタッドによるせん断伝達は期待できないため、地震時に生じる軸力とせん断力は主にアンカーボルトと免震支承フランジと基礎端面間での摩擦で伝達することとなる。また、引張軸力下においては摩擦によるせん断伝達も期待できないため、アンカーボルトのみで抵抗することとなる。さらに、積層ゴム支承は圧縮剛性に比べ引張剛性が小さいため、中立軸が圧縮域に偏り、圧縮域のアンカーボルトに応力が集中する懸念もあり、ボルトのクリアランスも含め、すべ

てのアンカーボルトが等しく抵抗しないことが危惧される。

そこで、引張軸力下を対象に、BPLの有無が基礎部の構造性能に与える影響を明らかにするため、免震支承の限界性能とされるせん断ひずみ $\gamma=400\%$ までの静的載荷実験を実施した。

2. 試験計画

2.1 試験体

試験体一覧を表-1に、実験概要を図-1に、基礎部の形状と配筋を図-2に示す。試験体は免震支承に上下の

表-1 試験体一覧

Table 1 List of specimens

試験体	ベースプレート (BPL)	免震支承	ゴム外径	ゴム一層厚	ゴム層厚	基礎寸法
No. 1	有	高減衰ゴム系 積層ゴム*1	Φ800mm	5.4mm	162mm	1450mm × 1450mm
No. 2	無					

注) *1 : せん断弾性率 : 0.392N/mm², 1次形状係数 : 36.1, 2次形状係数 : 4.94

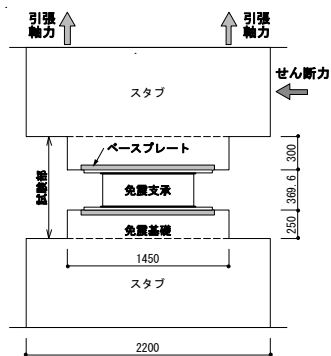


図-1 実験概要
Fig.1 Outline of test

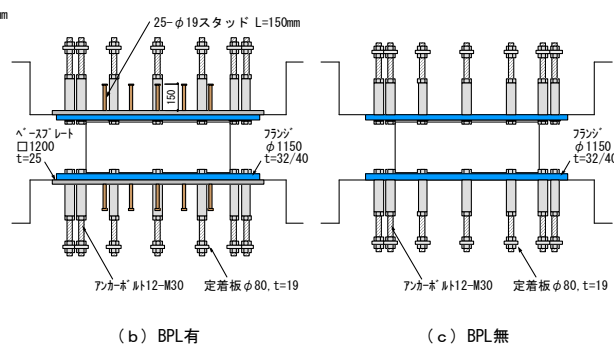
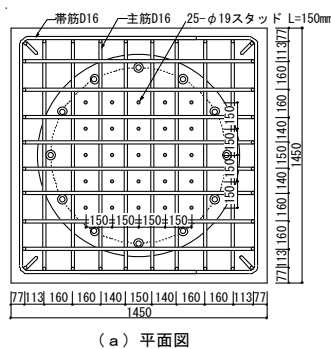


図-2 基礎部の形状と配筋
Fig.2 Dimensions of foundation

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
*2 設計本部 構造計画部
*3 設計本部 構造設計第一部

基礎部を組合わせた実大の2体であり、その違いはスタッド付きBPLの有無である。BPL無のNo.2はBPL有のNo.1からスタッド付きBPLを無くした試験体である。基礎部の上下部には基礎梁等に相当する剛なスタブを設けている。

加力は、軸力(面圧)は引張のみ、せん断力は一方方向のみの荷重とし、その詳細については「2.3 加力方法」にて後述する。

試験に用いた免震支承はゴム外径Φ800mm、ゴム1層厚5.4mm、ゴム総厚162mm、ゴム種X0.4Sの高減衰ゴム系積層ゴムであり、製品高さは369.5mm、フランジ外径は1150mmである。フランジ厚は引張軸力対応の端部32mm/中央部40mmを用いている。

基礎部の断面寸法は1450mm×1450mm、高さは下部で250mm、上部で300mmであり、主筋、帯筋にはD16をピッチ@150mm程度で配筋している。BPLの形状寸法は1200mm×1200mm、厚さは25mmである。BPLに取付くスタッドはΦ19mm、長さL=150mmとし、縦・横方向ともにピッチ@150mmで各5列、計25本配置している。アンカーボルトは12-M30であり、取付ボルト(強度区分10.9)、長ナット、全ネジボルト、定着板(Φ80mm、t=19mm)により構成している。

試験体の製作は支承が取付く基礎部の端面が下面となる状態で、配筋、型枠設置、コンクリート打設を行った。BPL無のNo.2では鋼製のテンプレートを型枠の底板下面に配置し、アンカーボルトの位置出しを行った後、No.1と同様に試験体を製作し、型枠脱型と同時にこのテンプレートを撤去した。免震支承の設置はJSSI免震構造施工標準りに従い、推奨トルク値(M30:400N・m)と締付け手順により行った。

2.2 使用材料

加力時でのコンクリートの材料試験結果を表-2に示す。

表-2 コンクリートの材料試験結果
Table 2 Material property of concrete

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm ²)
No. 1	45.8	2.92	0.20	3.22
No. 2	45.6	3.01	0.21	3.59

表-3 鋼材の材料試験結果
Table 3 Mechanical property of steel

鋼材種類	材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
主筋、帯筋 D16	SD295A	357	494	18.7
フランジ*1	SM490A	409	528	33.0
ベースプレート*1	SM490A	381	535	27.0
長ナット*1	SNR490B	403	567	26.0
全ネジボルト*1	SNR490B	392	539	30.0
定着板*1	SM490A	370	514	30.0

注) *1: 鋼材メーカーによる試験結果(ミルシート記載値)

す。表中の値は現場封緘養生した3本の供試体による平均値である。コンクリートの加力時での目標圧縮強度は基礎部に要求される最低強度の45N/mm²とし、呼び強度36N/mm²のものを用いた。加力時での圧縮強度はNo.1で45.8N/mm²、No.2で45.6N/mm²であり、目標強度とほぼ一致した。

鋼材の材料試験結果を表-3に示す。主筋、帯筋にはSD295AのD16を、フランジ、BPL、定着板にはSM490を、長ナット、全ネジボルトにはSNR490Bを用いた。

2.3 加力方法

加力装置を図-3に示す。加力は鉛直荷重用の2台の10MNジャッキが常に等しい変位となるように制御す

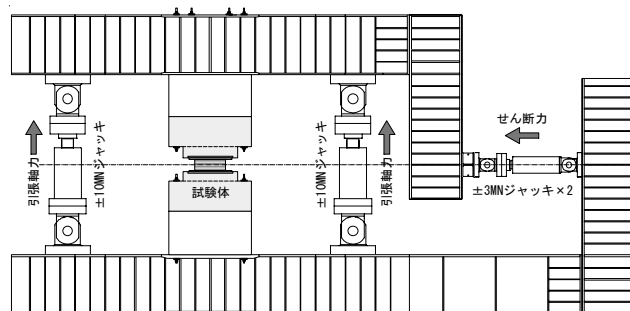


図-3 加力装置
Fig.3 Test set-up

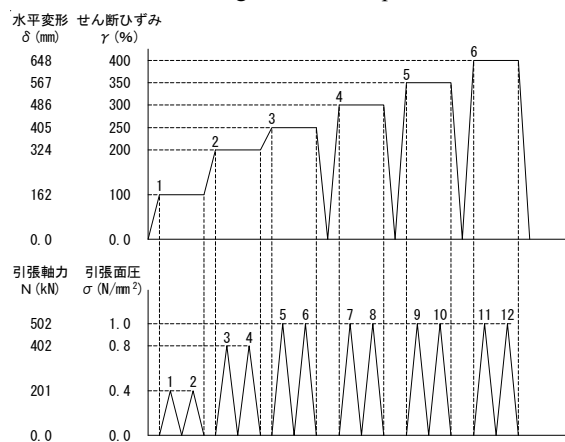


図-4 荷重履歴
Fig.4 Loading histories

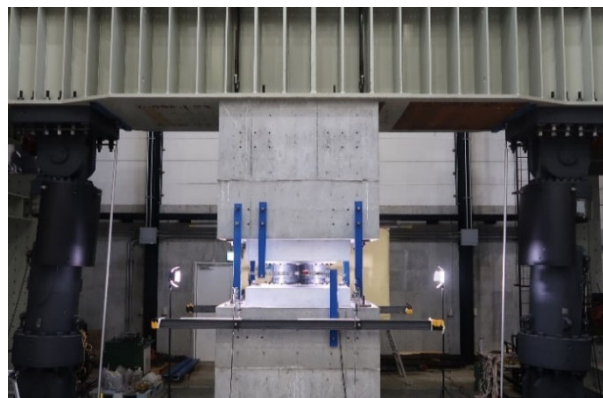


写真-1 試験状況
Photo.1 Test set-up

るとともに、このジャッキにより所定の引張軸力を与えた。せん断力は2台の3MN ジャッキを用いて変位制御で行った。加力はせん断ひずみ $\gamma=400\%$ 、引張面圧 $\sigma=1.0\text{N/mm}^2$ までの一方向繰返し载荷とし、所定の γ を与えた後、その γ を保持した状態で引張軸力を与える载荷手順とした。载荷履歴を図-4に示す。载荷履歴は、設計レベルの $\gamma=250\%$ までは各変位段階で除荷することなく、 $\gamma=100\%$ 、 200% 、 250% と順次 γ を増大させた後、各々 $\sigma=0.4$ 、 0.8 、 1.0N/mm^2 を2回繰返し载荷する計画とした。 $\gamma=250\%$ 以降では、各変位段階で载荷、除荷を繰返ししながら限界レベルの $\gamma=400\%$ まで漸増载荷を行い、各 γ 時の面圧は一定の $\sigma=1.0\text{N/mm}^2$ を目標に载荷した。試験状況を写真-1に示す。

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

設計レベル $\gamma=250\%$ 、限界レベル $\gamma=400\%$ の2回目の引張面圧载荷終了時での免震支承および基礎部の状況を写真-2に示す。両 γ とも载荷予定の引張面圧は $\sigma=1.0\text{N/mm}^2$ であったが、安全確保のために予め設定した限界軸ひずみ $\epsilon=12\%$ (軸変位 $\delta=20\text{mm}$)に先に達したため、その時点で面圧を除荷している。この結果、各 γ での引張面圧は $\gamma=250\%$ で $\sigma=0.8\text{N/mm}^2$ 程度、 $\gamma=400\%$ で $\sigma=0.6\text{N/mm}^2$ 程度となっている。

両試験体とも $\gamma=400\%$ の最終加力においてもRC基

礎部にひび割れは一切生じず、BPLの有無による損傷の差はみれなかった。今回試験した条件下に限られるものの、限界ひずみまで変形させた過酷な状況下においても基礎部および取付部の健全性が確認された。

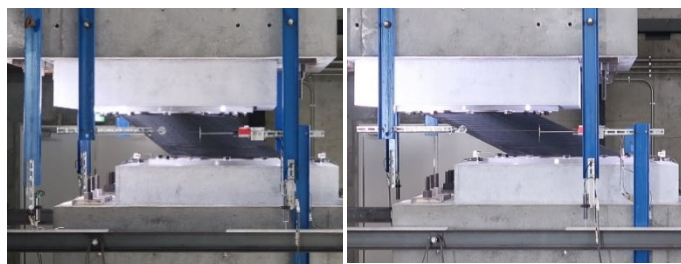
3.2 荷重-変位関係

3.2.1 せん断力-水平変位関係

No.1 (BPL有)とNo.2 (BPL無)のせん断力-水平変位関係を図-5に示す。同図の横軸には水平変位に対応するせん断ひずみ γ も併記している。また、各サイクルの履歴は $\gamma=250\%$ までを黒、以降の $\gamma=300$ 、 350 、 400% を緑、紫、赤の順に示している。両試験体のせん断力-水平変位関係はほぼ同様の履歴形状となり、BPLの有無による差は確認されなかった。また、両試験体とも加力の進展による変位の増大とともに徐々に剛性が低下していく様子が確認できる。さらに、設計レベルの $\gamma=250\%$ を超えるとハードニング現象が顕著となっている。

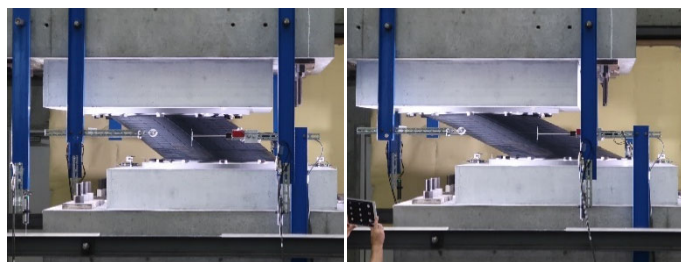
3.2.2 引張軸力-鉛直変位関係

引張軸力-鉛直変位関係を図-6に示す。同図においても図-5と同様の色分けを行って示し、図中の右側縦軸には引張軸力に対応する面圧 σ を示している。3.1節でも述べた通り、 $\gamma=250\%$ 以降での面圧は γ によらず一定の $\sigma=1.0\text{N/mm}^2$ を計画していたが、予め設定した限界軸ひずみ $\epsilon=12\%$ ($\delta=20\text{mm}$)に先に達したため、所定の面圧を载荷するには至っていない。また、限界



$\gamma=250\%$, $\sigma=0.8\text{N/mm}^2$ $\gamma=400\%$, $\sigma=0.6\text{N/mm}^2$

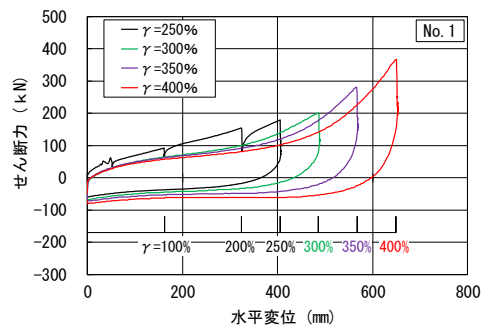
(a) No.1 : BPL 有



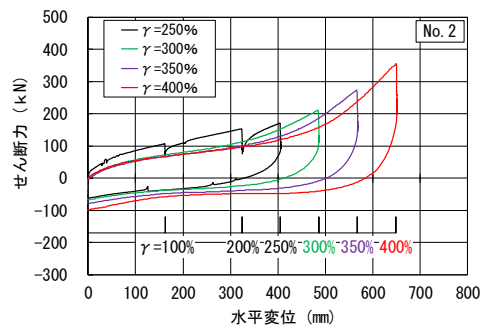
$\gamma=250\%$, $\sigma=0.8\text{N/mm}^2$ $\gamma=400\%$, $\sigma=0.6\text{N/mm}^2$

(b) No.2 : BPL 無

写真-2 免震支承および基礎部の状況
Photo.2 Seismic isolation and foundation



(a) No.1 : BPL 有



(b) No.2 : BPL 無

図-5 せん断力-水平変位関係

Fig.5 Shear force - displacement relationships

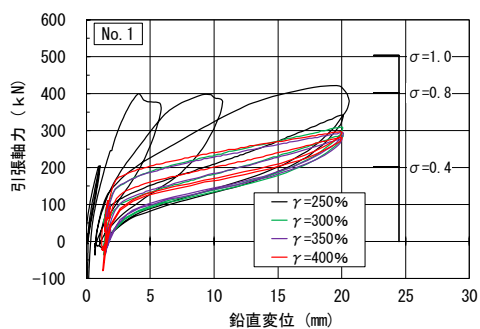
ひずみ到達時の面圧は γ の増大とともに徐々に低下する傾向を示し、 $\gamma = 250\%$ で $\sigma = 0.8\text{N/mm}^2$ 、 $\gamma = 300\%$ 以降で $\sigma = 0.55 \sim 0.69\text{N/mm}^2$ 程度となっている。これは、引張方向加力を非線形ひずみレベルで繰返し行ったため、軸剛性が徐々に低下したことが一因として考えられる。BPL有無の比較では、 $\gamma = 250\%$ まではBPL有に比べBPL無の鉛直変位が大きい、 $\gamma = 250\%$ 以降ではほぼ同様の履歴性状を示した。

3.2.3 フランジのずれと開き変位

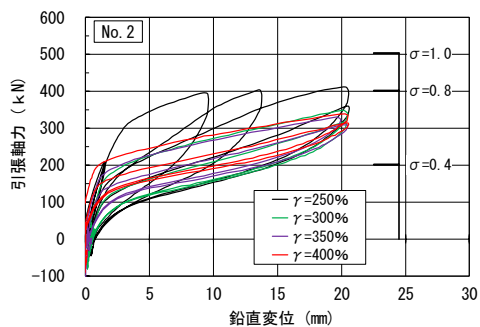
免震支承の下フランジにおいて、東西（加力方向）および北（加力直交方向）の3箇所ですれと開き変位を測定した。その結果をせん断力との関係で図-7に示す。ずれ、開き変位とも基礎コンクリートからの相対変位である。両試験体ともずれ変位は、西側では負（縮む）、東側では正（伸びる）となり、フランジが東から西へずれたことを示し、加力方向と一致している。また、No.1では2mm付近から、No.2では加力の初期からせん断力-ずれ変位関係の剛性が急激に増大している。取付ボルトと、フランジおよびBPLのボルト孔径のクリアランスは+3mmであり、各ボルト間での設置誤差もあり、上記のずれ変位時からボルトが孔側面に接触し始めたことが考えられる。No.1, No.2ともにずれ変位の増大に伴う剛性の増大はほぼ同様な傾向を示し、せん断ひずみレベルが大きくなるに従い、徐々にボルトがせん断抵抗する機構が確認できる。試験終

了後にボルトを取外し、フランジとBPLの孔側面を確認した状況を写真-3に示す。No.1では12本のうちの5本の孔側面にボルトがめり込んだ圧痕がフランジとBPLに、No.2では8本がフランジに確認された。両試験体の違いはBPLの有無であることから、No.1ではスタッドがせん断伝達に寄与したことでボルトの圧痕本数がNo.2よりも少ない結果になったことが一因として考えられる。また、圧痕状況よりボルト全12本が等しくせん断伝達をする訳ではなく、作用する応力はボルト径とボルト孔径とのクリアランスによる接触のタイミングの影響が大きいと考えられるが、BPLの無いNo.2の場合では7割程度のボルトの負担本数であった。

開き変位については、両試験体とも、いずれの測定においても0.25mmに満たない小さな値であり、フラン



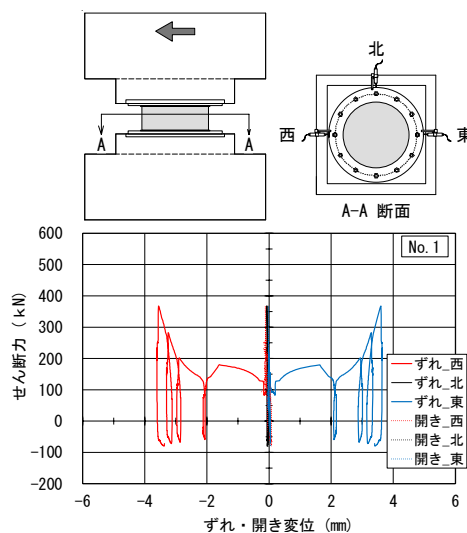
(a) No.1 : BPL 有



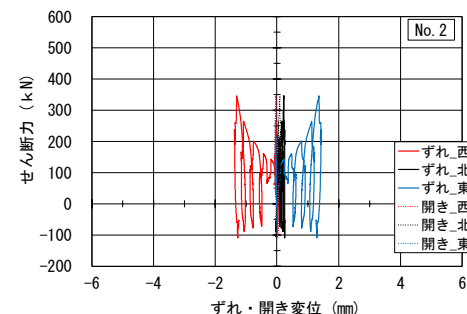
(b) No.2 : BPL 無

図-6 引張軸力-鉛直変位関係

Fig.6 Tensile axial force - displacement relationships



(a) No.1 : BPL 有



(b) No.2 : BPL 無

図-7 せん断力-ずれ・開き変位関係

Fig.7 Shear force - slip and opening displacement relationships



No.1 フランジ

No.1 BPL

No.2 フランジ

写真-3 ボルト孔圧痕状況

Photo.3 Compressive scarring in bolt holes

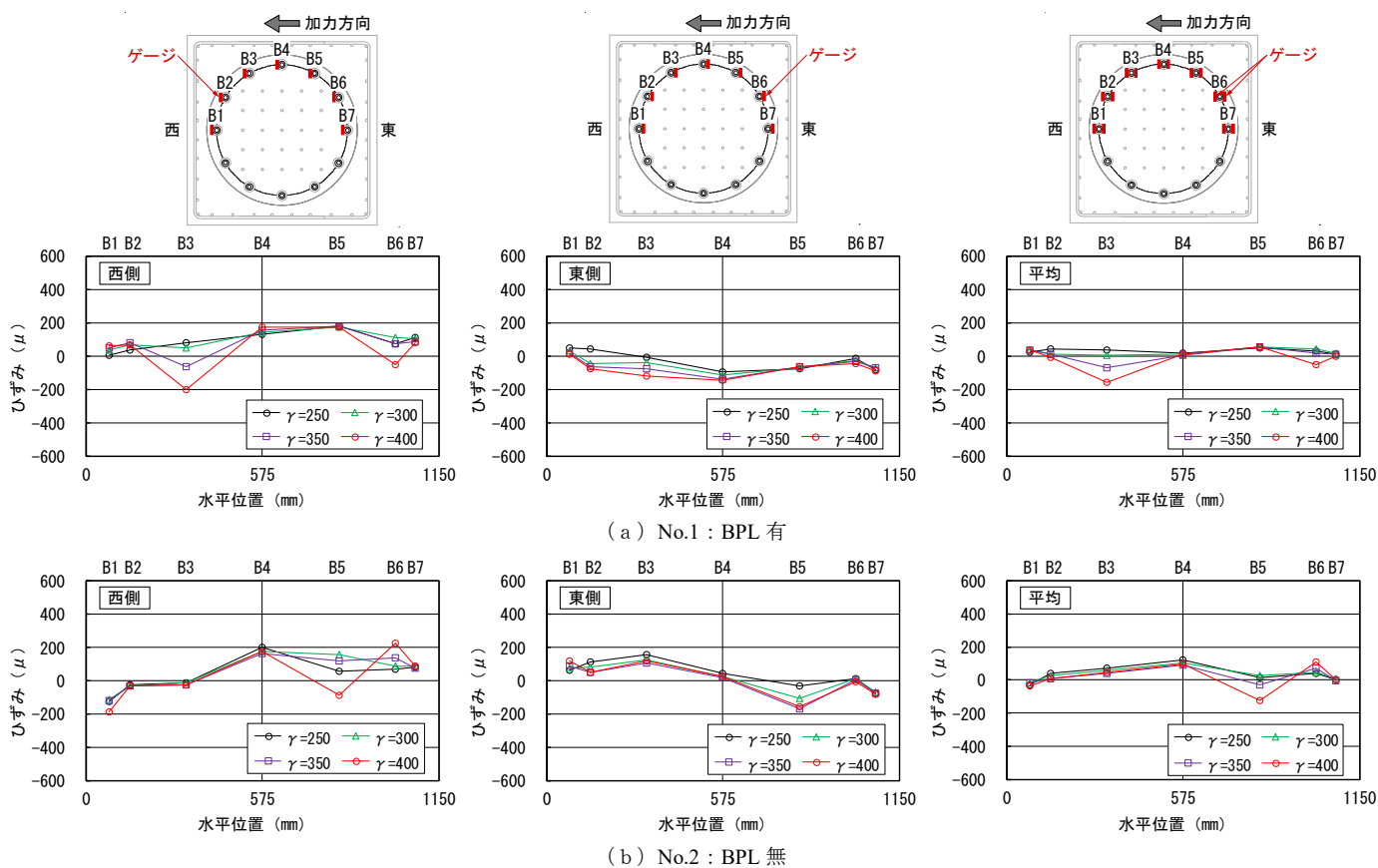


図-8 アンカーボルトのひずみ分布
Fig.8 Strain distribution of anchor bolts

ジの浮きや沈み込みはなかったことがわかる。

3.3 アンカーボルトのひずみ

各変位段階ピーク時の2回目の引張面圧載荷終了時におけるアンカーボルトのひずみ分布を図-8に示す。ひずみの測定は各アンカーボルト付根の西側と東側で実施し、同図には各々の測定結果と両者の平均を示している。いずれの測定位置においてもアンカーボルトのひずみは終始小さな値となっており、最大でも200 μ 程度であった。また、測定結果からは当初危惧していたような一部のアンカーボルトに応力が集中するような傾向はみられない。西側と東側の測定結果をみると、両者は異なったひずみ性状を示しており、アンカーボルトには軸力とせん断力が作用していたと考えられる。また、平均値をみると、分布形状の変化は小さく、No.1では明確な傾向はみられない。一方、No.2ではB1とB2間でひずみが圧縮から引張に転化している。上述したように、支承の剛性は圧縮に比べ引張がかなり小さいことを踏まえると圧縮域が端部に集中していることが測定結果からも推察できる。また、一部のアンカーボルトに応力が集中するような傾向はみられていないことから、剛性の高いフランジを介して徐々に多くのアンカーボルトが機能した様子が見えてくる。

4. まとめ

ベースプレート (BPL) の有無がRC基礎部の構造的な性能に与える影響を確認するため、引張軸力下を対象に、せん断ひずみ $\gamma=400\%$ までの静的載荷実験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) BPLの有無によるRC基礎部の損傷の違いはみられず、加力終了時までひび割れは一切生じなかった。
- 2) 両試験体のせん断力-水平変位関係、引張軸力-鉛直変位関係はほぼ同様の履歴性状を示した。
- 3) BPL無でも一部のアンカーボルトに応力集中することなく、フランジを介してアンカーボルトに応力を伝達すること、また、そのひずみは終始小さいことを確認した。

以上の結果から、今回実施した実験条件の範囲内では、BPLレス工法が適用可能と考えられる。今後の実施適用にあたっては適用範囲、施工方法等をさらに明確化する必要がある。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：JSSI免震構造施工標準2021，pp.75-76，2021.6