

3. 締結ボルト構造の検討

本章では構造的対策として、図-18 に示すように PC 版の端部と緩衝版をそれぞれ枕版とボルトにて固定することにより、PC 版端部と緩衝版を一体化する構造についての検討結果を述べる。今回対象としている PC 版は場所打ちコンクリートによる舗装版であり、1 ユニットの寸法が 100m 程度に及ぶため、PC 版の温度変化に伴う伸縮は最大で 40mm 程度生じる可能性が考えられる。そのため本試験では、①温度変化による PC 版の伸縮が、版端部にボルトを配置しても問題なく作用するかの検討、②ボルト締結力、ボルトの配置間隔が、緩衝版と PC 版の一体化構造に及ぼす影響についての検討、③締結金具の構造・取り付け方法ならびにボルト締結力の管理方法、について実験的な検討を行った。

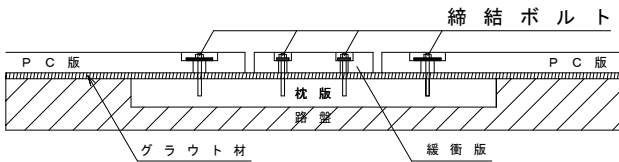


図-18 PC版端部・緩衝版の一体化構造

3.1 FEM 解析に基づく一体化構造の効果に関する検討

(1) 解析モデル及び解析条件

解析モデルは、図-19 に示すように PC 版をソリッド要素、ボルトをビーム要素とした。各版の境界面は NO TENSION 結合とし、境界面の引張力はボルトのみ荷重を伝達するものとした。物性値、拘束条件、荷重条件は、以下に示す通りとした。

a) 解析諸条件

コンクリート：3次元ソリッド要素（版厚方向3分割）

$$E=30000\text{N/mm}^2, \mu=0.1667$$

PC 鋼棒：ビーム要素

$$E=200000\text{N/mm}^2, \mu=0.3, \phi=24\text{mm}$$

X 方向：各版 2 本×3=6 本（図-2 解析モデル参照）

Y 方向（版幅方向）：解析の変動パラメータ

鋼材間隔=1000,2000,2500mm

（締結力 30kN 時のみ 500,1500,3000mm も解析）

締結力：0, 10, 20, 30, 40, 50kN

b) 拘束条件

版底面で、バネ定数 0.07N/mm^3

PC 版と枕版、緩衝版と枕版は NO TENSION 結合

c) 荷重条件

航空機荷重

B747-200B 満載時一脚：818kN（複々車輪）

荷重位置：

荷重位置は、図-20 に示す荷重位置で検討するものとした。図は鋼材間隔 1000mm のときであるが、間隔が変化した場合も脚の中心が鋼材と鋼材の間になるように荷重する。これは、付録-1 に示す荷重ケースの中から、PC 版の版端部で枕版との隙間が最大となる荷重位置から決定した。

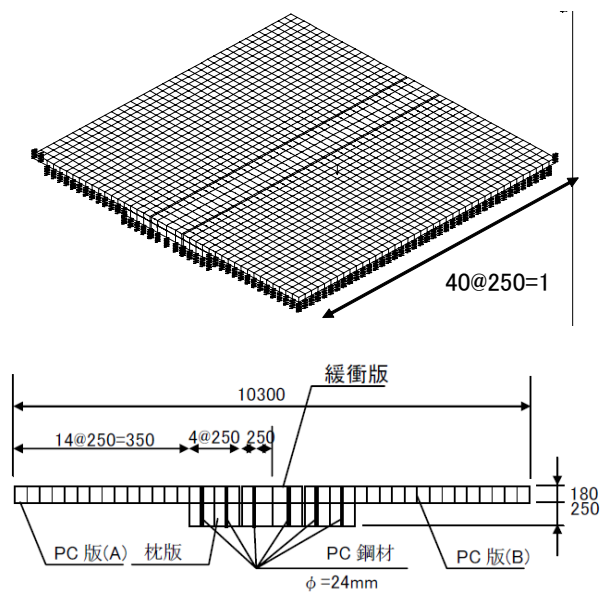


図-19 解析モデル図

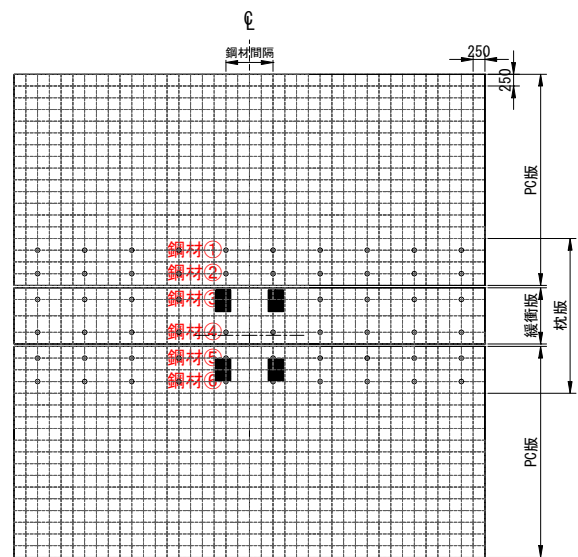


図-20 荷重位置

(2) 解析結果と考察

PC 鋼材の締結力と版の隙間の関係を図-21、表-23 にそれぞれ示す。(a)~(d)は図-22 に示す位置に生じた隙間の位置であり、(a)、(b)は、鋼材と鋼材の中間部、(c)、(d)は鋼材位置での隙間を示す。

FEM 解析の結果では、鋼材間隔 1m の場合(b)位置において若干の隙間が生じているが、それ以外の位置(a)、(c)、(d)では締結力が 20kN で PC 版と枕版に生じる隙間がゼロになる結果となった。鋼材間隔が 2m、2.5m についても、(b)位置では PC 版と枕版に若干の隙間が生じること、(a)位置においても締結力の違いにより 0.1~0.3mm の隙間が生じる結果となった。また鋼材間隔 2m、2.5m ともに、締結力が 30kN 以下の場合、締結力の減少に伴い PC 版と枕版の間に生じる隙間は大きくなる傾向にあり、締結力が 30kN 以上の場合、PC 版と枕版との間に生じる隙間の差が小さくなる傾向を示した。

図-23 は締結力 30kN と一定として、鋼材が無い場合、および鋼材間隔を 500mm~3000mm に変化させた際の、鋼材間隔と枕版と PC 版との間に生じた隙間の計算結果を示す。

(b)位置の隙間は締結力、鋼材間隔による影響が比較的小さい結果となった。これは、(b)位置での隙間が、締結ボルトによる一体化が不十分なのではなく、版のたわみによる PC 版と枕版の曲率の違いで発生することが原因だと考えられる。

これに対し、(a)位置では鋼材間隔が 1m であれば PC 版と枕版に生じる隙間は著しく小さいが、1.5m あたりからボルト間隔が大きくなるにつれて PC 版と枕版に生じる隙間も大きくなる傾向を示した。

今回の解析によりボルト締結力とボルト間隔が PC 版と緩衝版の一体化に及ぼす影響を検討した結果、ボルトの締結力は 30kN、鋼材間隔 1m 程度であれば、枕版と PC 版との間に生じる隙間を抑制できる可能性が高い結果となった。一方、鋼材間隔が大きくなるに従い、PC 版と枕版の間に生じる隙間は大きい傾向を示したが、鋼材間隔が 3m 程度であれば、何も対策を行わない構造に比べて、隙間は半分以下に抑制できる傾向を示した。PC 版と枕版に生じる隙間がどの程度で、グラウトの粉砕化、ポンピング現象が生じるかは不明であるものの、PC 版と枕版、緩衝版と枕版をボルトにより締結することにより、グラウトの粉砕化、ポンピング現象の抑制効果が期待できるものと考えられる。

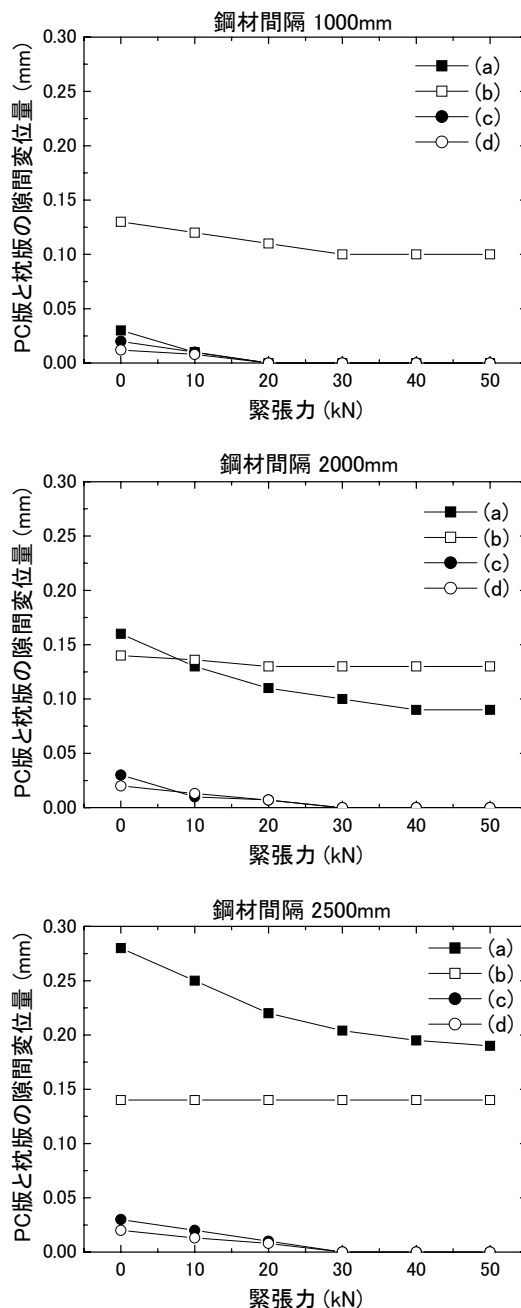


図-21 ボルト締結力と PC 版と枕版の隙間量の関係

表-23 PC版と枕版に生じた隙間の計算結果

| 鋼材間隔 | 位置 | 緊張力 | | | | | |
|--------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | 0kN | 10kN | 20kN | 30kN | 40kN | 50kN |
| 1000mm | (a) | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | (b) | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| | (c) | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | (d) | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2000mm | (a) | 0.16 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.09 | 0.09 |
| | (b) | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| | (c) | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | (d) | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2500mm | (a) | 0.28 | 0.25 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.19 |
| | (b) | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| | (c) | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | (d) | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

(単位 : mm)

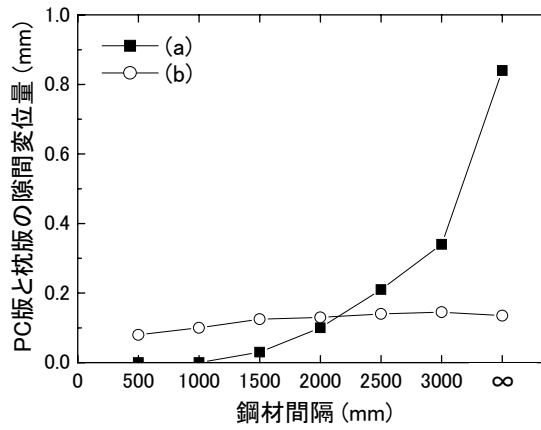
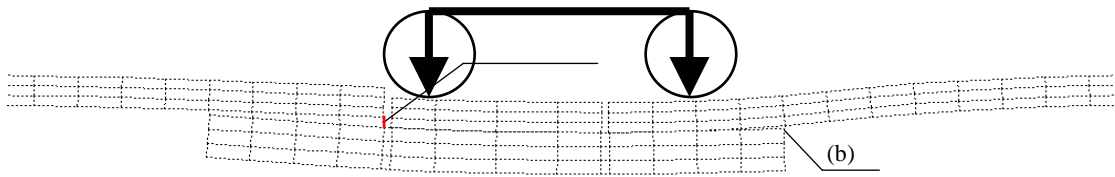


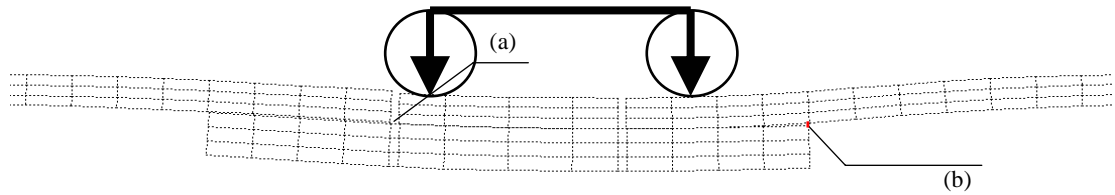
図-23 鋼材間隔と版の隙間の関係 (締結力 30kN)

A 断面：鋼材中間断面

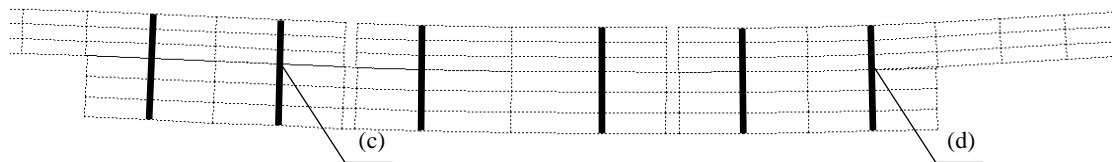
・鋼材間隔 2500mm, 緊張力 0kN 時



・鋼材間隔 1000mm, 緊張力 30kN 時



B 断面：鋼材断面



平面図

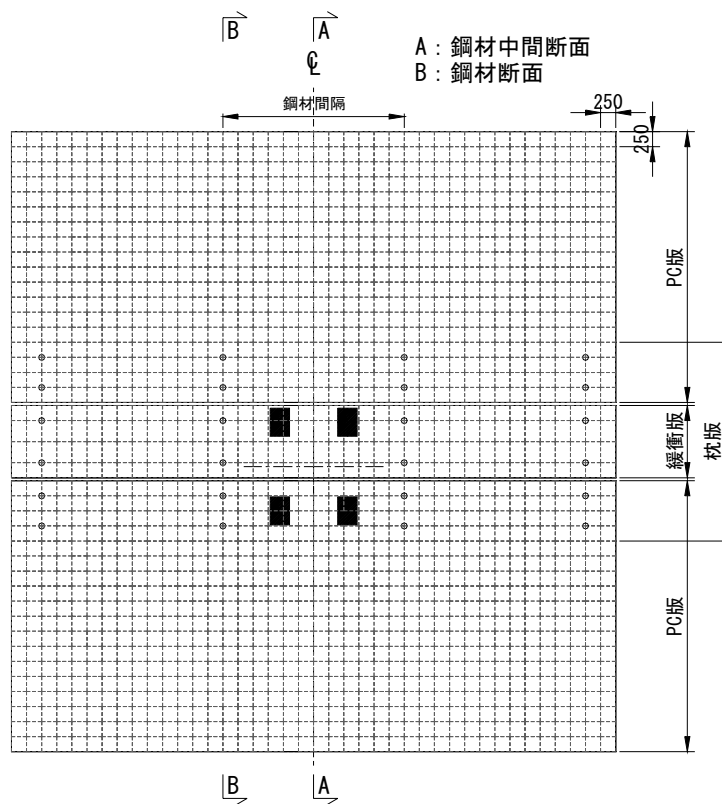


図-22 荷重位置と着目した隙間の位置

3.2 PC版の温度伸縮を模擬したスライド試験(1)

(1) スライド試験(1)の概要

前節の FEM 解析の結果より、締結力が 30kN~40kN 程度で PC 版と枕版に生じる隙間が抑制されることが確認された。一方で、本構造の適用対象となっている箇所は、場所打ち PC 版舗装であり、1 ユニットは最大で 100m 程度の寸法を有している。

その場合、温度伸縮に伴う移動量を下式により算出すると、場合によっては 40mm 程度の移動が生じてしまう可能性が考えられる。その場合、ボルトによる締結が PC 版の温度伸縮を拘束してしまう可能性や PC 版の温度伸縮による移動により、ボルトに変形が生じてしまう可能性が考えられる。

そこで本試験では、①使用する締結ボルトの構造が、版を拘束せずに伸縮するか、②版の伸縮に対して、ボルトの締結力は保持されているか、③伸縮時に締結ボルトの変形がどの程度で収まるか(最適ボルト径の決定)、について確認することを目的とし、PC 版の温度伸縮を模擬したスライド試験を実施した。

(2) PC版の温度伸縮による移動量の算出

理論上の PC 版伸縮時の不動点は版中央部になるものと考えられるが、PC 舗装版は路盤に設置された構造物であり、路盤と PC 版の設置状況により不動点が変わることが予想されるため、ここでは PC 版の端部に不動点が生じることを想定して、PC 版の温度伸縮による移動量を算出した。

$$\Delta L = K \cdot \Delta T \cdot B = \pm 40\text{mm}$$

ここに、

ΔL : PC 版の温度伸縮による移動量

K : コンクリートの線膨張係数 $10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$

ΔT : 温度変化 $\pm 40^\circ\text{C}$

B : PC 版の長さ 100m

(3) パラメータ

3.1 の FEM 解析に基づく PC 版・緩衝版一体化構造の検討結果では、枕版を定着アンカーとして、枕版と PC 版を 40kN 程度でボルトにより締結すれば、PC 版と枕版との間に隙間が生じない傾向にあることが推察された。そこで本実験では、図-24 ならびに写真-5 に示すような、 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.18\text{m}$ のコンクリート版の中心部 2 ヶ所に 40kN のボルト締結力を与えた状態で、コンクリート版を (+) 側、(-) 側にスライドさせる実験を行った。

スライド試験は 2 回に分けて実施し、第 1 回試験では締結ボルトの滑り面(図-25 に示す⑤ 座金 B タイプと⑥ 滑り板 の接触面)をパラメータとして、滑り面の最適材料を検討した。滑り面の構造は写真-6 に示すように、(1) テフロン加工、(2) クロムメッキ加工、(3) SS400 材、(4) SUS304 材、(5) ゴムのせん断変形に期待した構造、の計 5 種類とした。

また第 1 回の試験結果から、滑り面の加工としてテフロン加工が優れていること、ボルトの径が 20mm の場合は、引張力、せん断力に対しては十分な強度を有しているが、ボルトの曲げ変形によりボルトが変形してしまう可能性が高いことから、第 2 回の試験ではボルトの径と緩衝ゴムの有無をパラメータとして実験を行った。

(4) 試験方法

スライド試験の方法を図-26 に示す。試験は、枕版を想定した 50mm の鋼板の上に $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.18\text{m}$ のコンクリート版を設置した後、50mm の鋼板をボルトのアンカーとして所定締結力を導入し、両端部に設置したセンターホールジャッキを押すことにより、H 鋼を介してプレキャスト版をスライドさせた。実際の構造では、プレキャスト版に切り欠き部を設け、その中に滑り板、座金等のパーツを配置して版の表面部に上蓋を設置するが、今回は滑り板の取り替え、計測のしやすさを考慮してプレキャスト版の上面に滑り板を設置した。

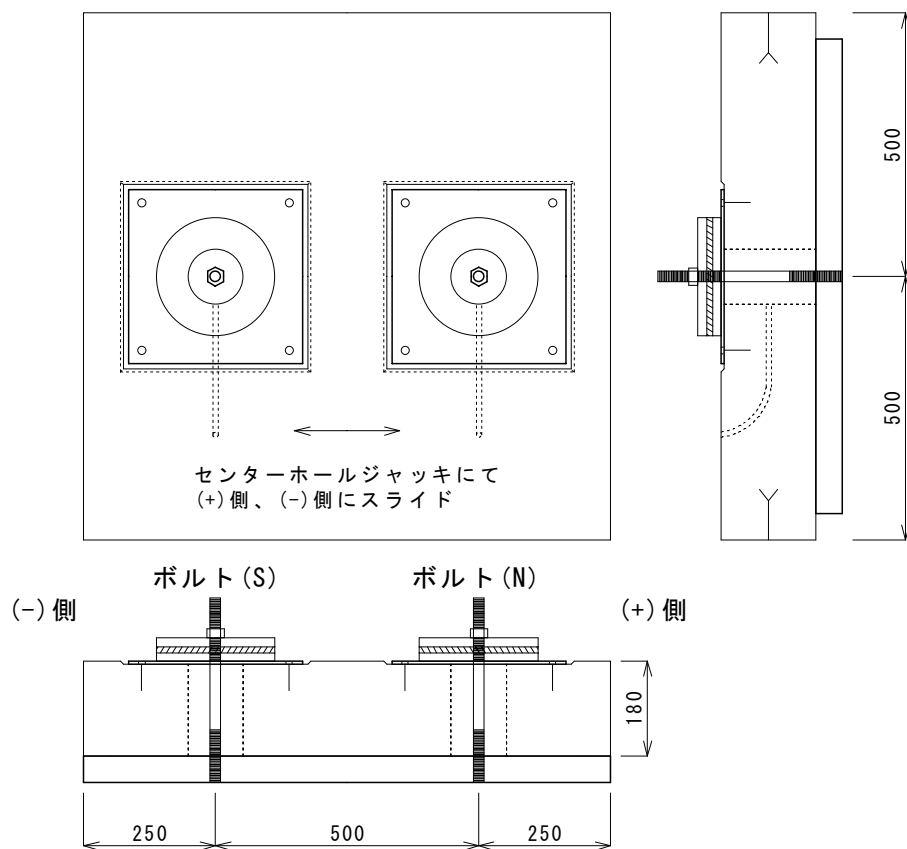
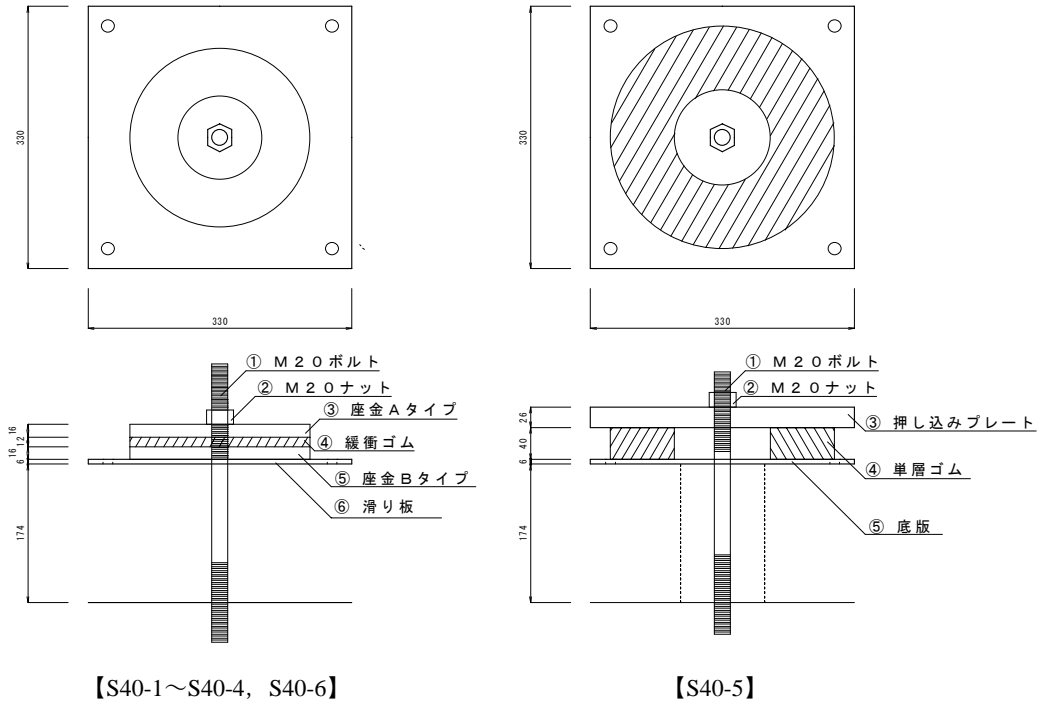


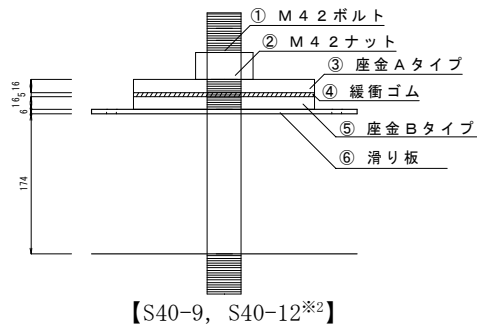
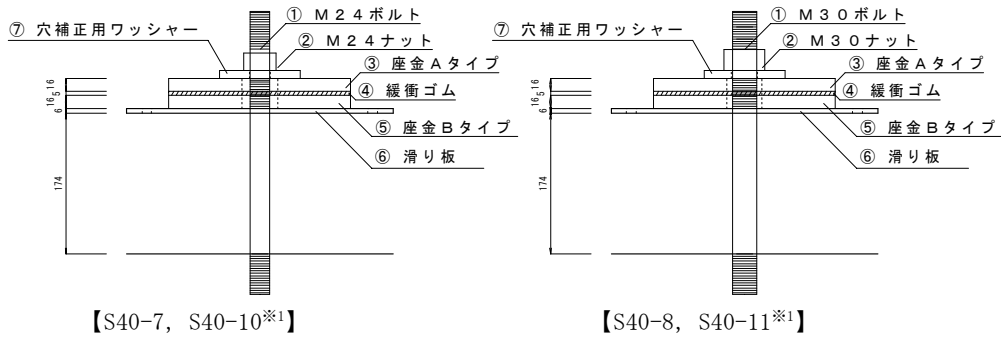
図-24 スライド試験(1)



写真-5 スライド試験(1)



(a) 第 1 回試験

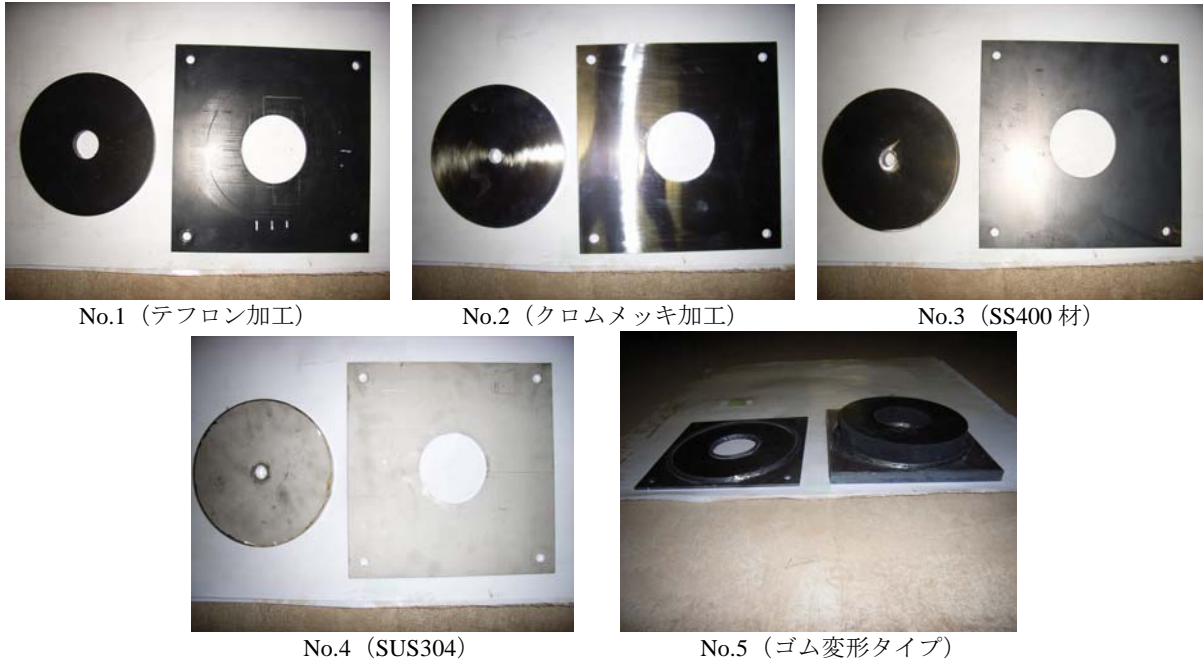


※1 ④緩衝ゴムを取り除いたタイプ

※2 ⑤座金 B タイプの材質を SS400 としたタイプ

(b) 第 2 回試験

図-25 締結ボルト構造図



No.1 (テフロン加工)

No.2 (クロムメッキ加工)

No.3 (SS400材)

No.4 (SUS304)

No.5 (ゴム変形タイプ)

写真-6 締結ボルトの滑り面の形状

表-2 測定項目

| 項目 | 計測機器 | 数 | 備考 |
|---------|---------------------|---|--------------------------------------------------------------|
| 版の移動量 | 変位計 | 4 | プレキャスト版の移動量測定. |
| ボルトの変形量 | 変位計 | 2 | ボルト先端部の変形量 |
| ボルトの締結力 | ひずみゲージ (基部 15mm) | 4 | 締結時, 版のスライド時の締結力測定. ボルト 1 本につき 2ヶ所測定. |
| ボルトの締結力 | ひずみゲージ (基部 15mm) | 4 | 締結時, 版のスライド時の締結力測定 ボルトの曲げにより生じる応力測定. ボルト 1 本につき 2ヶ所測定. |
| 荷重 | ロードセル | 2 | 版の移動時, ボルト変形の解放時の荷重測定用. |

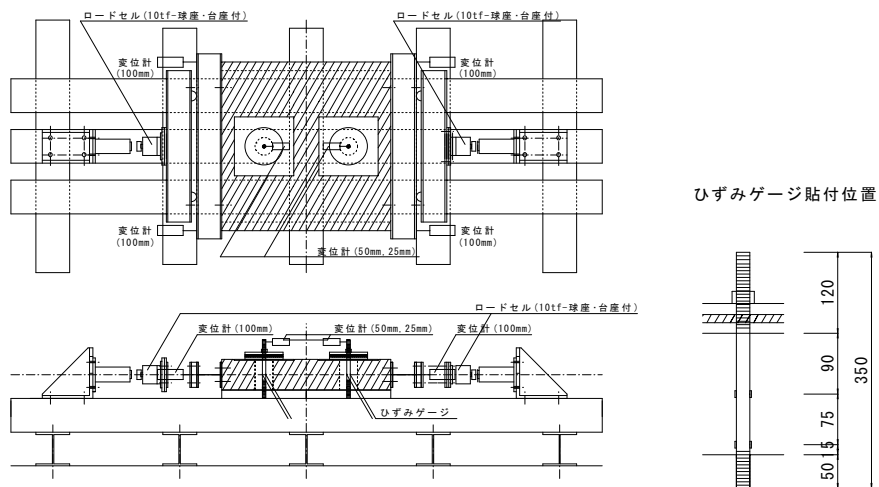


図-26 測定位置

3.3 スライド試験(1)試験結果

(1) PC版のスライドに関する検討

第1回試験では、滑り面の材質を「テフロン」、「クロムメッキ」、「SS400」、「SUS304」、「ゴム」を用いて、M20のボルトで約40kNの締結力を導入した。第1回試験時において、基準位置からコンクリート版を移動させた際のボルト先端部の変形量と版の移動量の関係を図-27に、また各試験の水平荷重から算出した滑り面の静摩擦係数の結果を表-24に、試験終了後のボルトの状況を写真-9にそれぞれ示す。なお全供試体のボルト先端部の変形量と版の移動量の結果は付録-2に、水平荷重とボルト先端部の変形量の結果は付録-3に示す。試験結果をまとめると以下のとおりである。

a) 滑り面の摩擦係数

滑り面をテフロン加工したものは、滑り面で滑りが生じるまではボルトの変形が生じるが、それ以降はコンクリート版の移動が生じてボルトの変形は小さい範囲で収まった。それ以外のタイプは、滑り面で座金の滑りは生じず、コンクリート版の移動と共に、写真-9に示すようにボルトが変形する結果となった。

b) 各材料の静摩擦係数

滑り面をテフロン加工した試験体の静摩擦係数は0.08～0.17の範囲にあった。

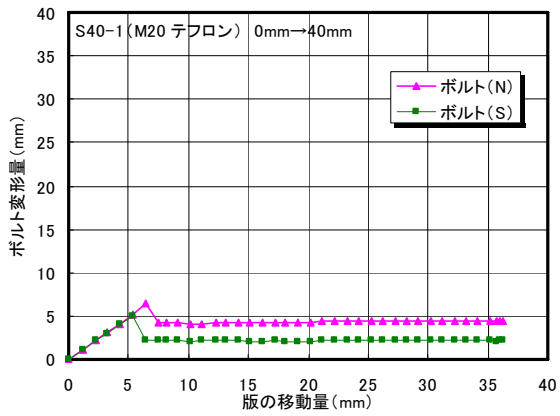
c) 滑り面の最適材料

締結金具に使用する材料のうち、版の伸縮により移動する滑り面（図-25の⑤座金Bタイプと⑥滑り面の接触面）には、テフロン加工を施した材料を使用するものとした。

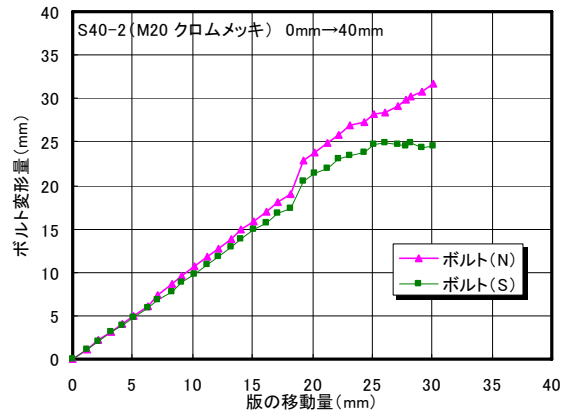
表-24 各試験体の静摩擦係数の測定結果

| | 試験体種類 | 滑り面 | 版の滑り面 | P (kN) | Pmax (kN) | 水平力 (kN) Pmax-P | 締結力+ 版自重 (kN) | 静摩擦係数 |
|-------|--------|--------|---------|--------|-----------|--------------------|---------------------|---------|
| 第1回試験 | S40-1 | テフロン | テフロンシート | — | 14.1 | 14.1 | 85.2 | 0.17 |
| | S40-2 | クロムメッキ | | — | 30.1 | 30.1 | 85.2 | 0.35 以上 |
| | S40-3 | SS400 | | — | 33.3 | 33.3 | 85.2 | 0.39 以上 |
| | S40-4 | SUS304 | | — | 47.4 | 47.4 | 85.2 | 0.56 以上 |
| | S40-5 | ゴム | | — | 31.0 | 31.0 | 85.2 | 0.36 以上 |
| | S40-6 | テフロン | ベニヤ板 | 21.5 | 30.9 | 9.4 | 85.2 | 0.11 |
| 第2回試験 | S40-7 | テフロン | 鋼板 | 23.3 | 30.5 | 7.2 | 85.2 | 0.08 |
| | S40-8 | | | 23.0 | 34.0 | 11.0 | 85.2 | 0.13 |
| | S40-9 | | | 24.0 | 30.4 | 6.4 | 85.2 | 0.08 |
| | S40-10 | | | 23.6 | 31.4 | 7.8 | 85.2 | 0.09 |
| | S40-11 | | | 24.5 | 35.0 | 10.5 | 85.2 | 0.12 |
| | S40-12 | | | テフロン-鋼 | 26.3 | 42.1 | 15.8 | 85.2 |

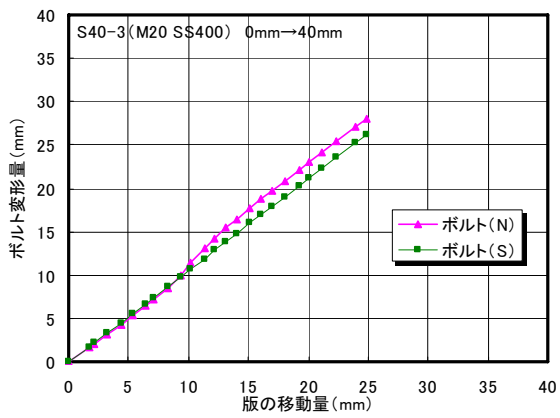
S40-1～S40-5については、版の滑り面の摩擦係数の方が小さいため、Pmaxを使用して算出した。



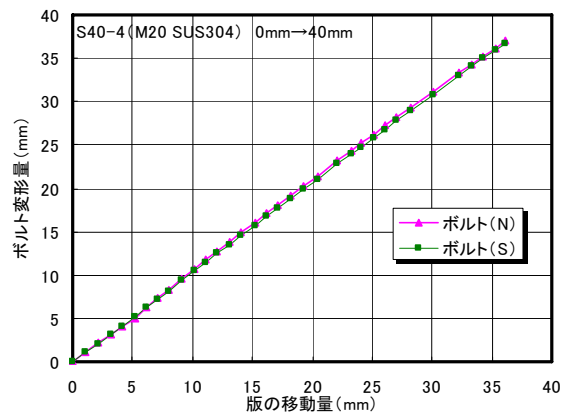
S40-1 (テフロン)



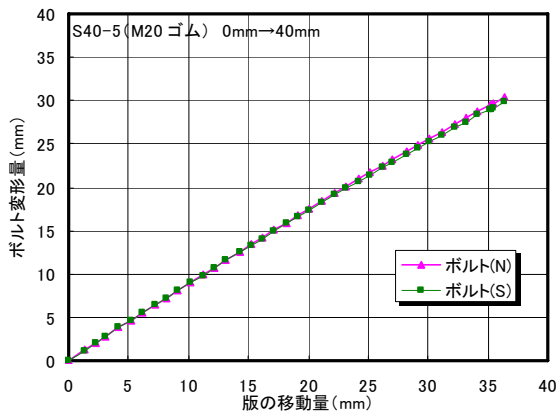
S40-2 (クロムメッキ)



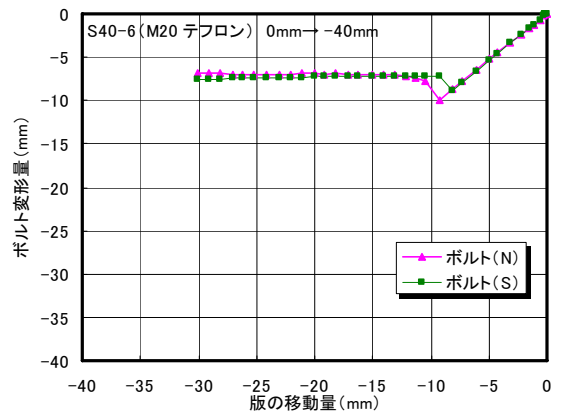
S40-3 (SS400)



S40-4 (SUS304)



S40-5 (ゴム)



S40-6 (テフロン)

図-27 各供試体のボルト変形量と版の移動量の関係



S40-1 (テフロン)



S40-2 (クロムメッキ)



S40-3 (SS400)



S40-4 (SUS304)



S40-5 (ゴム)



S40-6 (テフロン)

写真-9 スライド試験後のボルトの状況

(2) 版の移動に伴うボルト締結力の変動量

第1回試験の結果に基づき、第2回試験では滑り面の材質をテフロン加工としてボルト径、座金間に設けた緩衝ゴムの有無をパラメータとしてスライド試験を実施した。滑り面の材質をテフロン加工としたケースのボルト締結力と版の移動量の関係を図-28に示す。またボルト締結力と版の移動量のデータを付録-4に示す。

なお本データの締結力は、鋼材に貼付したひずみゲージから換算するものとした。また初期締結力は、各供試体で若干のばらつきが生じたため、初期締結力を1.0とした場合に、版の移動によりどの程度の締結力が変化するか比率で評価した。試験結果をまとめると以下のとおりである。

a) 締結力の変動について

今回の実験では、版の寸法誤差、あるいは枕版を想定した鋼板の凹凸等の影響により、(+)側に版をスライドさせた場合は締結力が低下する傾向に、(-)側に版をスライドさせた場合は締結力が増加する傾向にあった。また版をスライドさせる方向に対して外側のボルトの締結力の低下割合が内側に比べて大きい結果となった。

b) 緩衝ゴムの影響について

S40-7とS40-10, S40-8とS40-11の結果より、下図に示すように締結力が増加しようとする際にも、緩衝ゴムにより張力が緩和されるため、締結力の増加の割合が小さい。以上の結果より、実際のPC版に本構造を適用する場合は、座金と座金の間に緩衝ゴムを設置するものとする。

(3) ボルト径の選定に関する検討(ボルトの変形の検討)

(1)の結果より、テフロン加工したスライド版を用いた場合は、滑り面にすべりが生じるまではボルトの変形が生じるが、一度すべりが生じるとボルトの変形が小さいことが確認できた。

ここでは、第2回試験時にボルト基部にひずみゲージを貼付することにより、ボルト基部に発生する応力を測定するとともに、両端固定のはりを仮定したモデルによる計算値との妥当性について検討を行った。コンクリート版を基準位置(ゼロ)から25mm移動させる際の水平荷重とボルト基部に生じたひずみの結果を付録-5に、両端固定のはりを仮定したモデルにより最適ボルト径を算出するための計算フローを付録-6に、その考え方をを用いて計算した結果と付録-5に示す実験値との比較を表-25ならびに図-29にそれぞれ示す。また、本計算法により算出した滑り面の摩擦係数に応じて生じるボルトの曲げ変形によるひずみの関係を図-30に示す。なお計算は、

版の上面に切り欠きを設けたことを想定して、ボルト長さを110mmとして計算した。試験結果をまとめると以下のとおりである。

- ① ボルト径は、締結力、せん断力に対する検討に加えて、滑り面で滑りが生じるまでの曲げ変形量を考慮することにより決定可能である。
- ② ボルトに生じる曲げ変形に対しての最適ボルト径は、両端固定のはりを仮定したモデルにより算出できるものと考えられる。
- ③ 実際にボルトを設置する構造では、ボルト長さが110mm程度であること、今回実験したテフロン加工を用いた場合の摩擦係数が最大でも0.17程度であることから、図-30により算出した結果をもとに、実際にはM30のボルトを用い、滑り面にはテフロン加工を施した材料を使用するものとする。

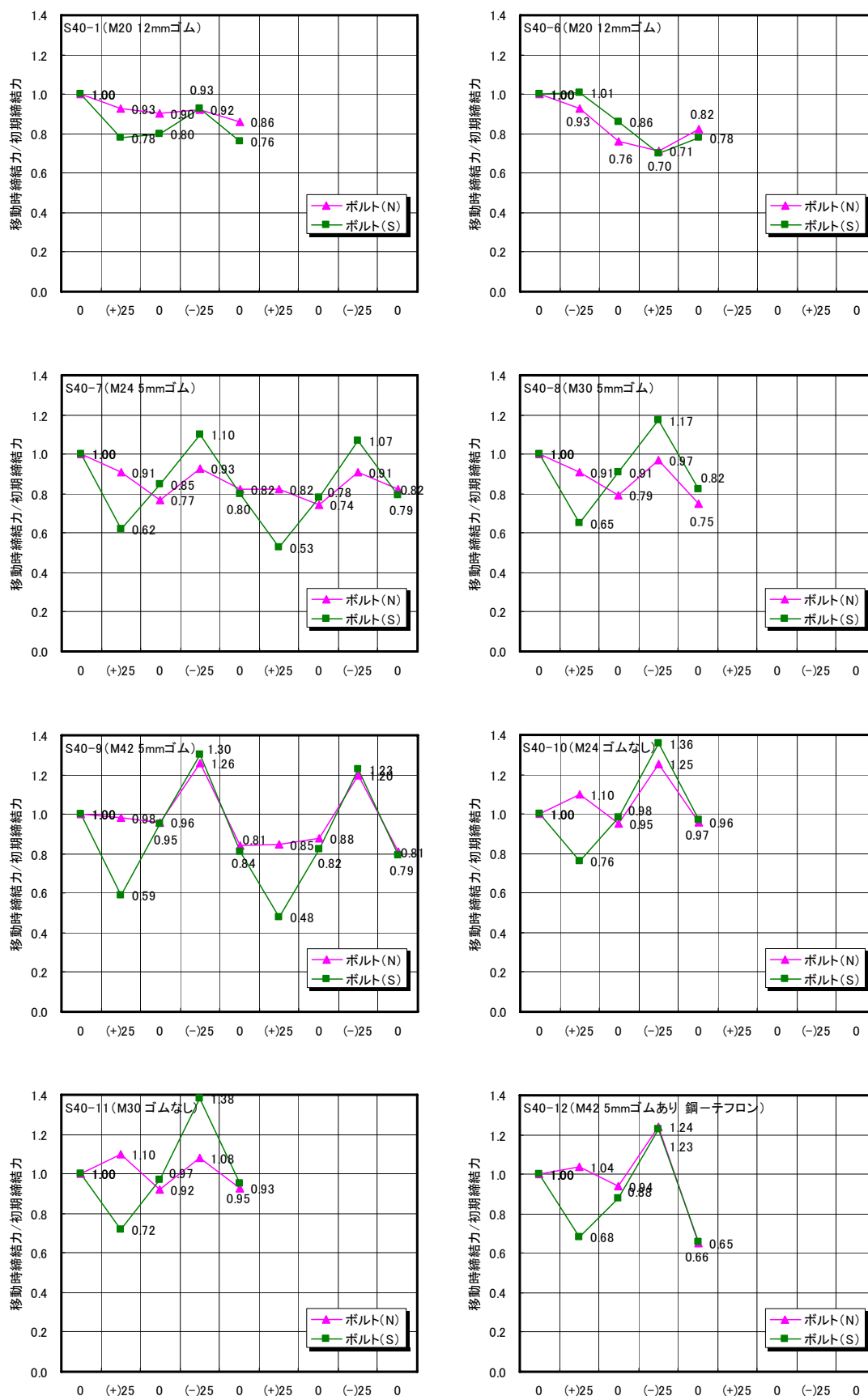


図-28 版の移動に伴うボルト締結力の変動の割合

表-25 ボルト基部に生じるひずみの実験値と計算値の比較

| | | S40-7 | | S40-8 | | S40-9 | | S40-10 | | S40-11 | | S40-12 | |
|-------|--------------------------------------|--------|-------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|------|--------|------|
| | | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S |
| ボルト諸元 | ボルト径(mm) | 24 | | 30 | | 42 | | 24 | | 30 | | 42 | |
| | ボルト断面積(mm ²) | 452 | | 707 | | 1385 | | 452 | | 707 | | 1385 | |
| | 断面2次モーメントI(mm ⁴) | 16286 | | 39761 | | 152745 | | 16286 | | 39761 | | 152745 | |
| 計算値 | 支点沈下量 δ (mm) | 0.5370 | | 0.3360 | | 0.0509 | | 0.5820 | | 0.3210 | | 0.1257 | |
| | 支点反力 R_A (kN) | 3.60 | | 5.50 | | 3.20 | | 3.90 | | 5.25 | | 7.90 | |
| | M (ゲージ位置)(kN·m) | 0.270 | | 0.412 | | 0.240 | | 0.293 | | 0.394 | | 0.593 | |
| | σ (ゲージ位置)(N/mm ²) | 199 | | 156 | | 33 | | 216 | | 149 | | 81 | |
| | ひずみ(ゲージ位置)(μ) | 994 | | 778 | | 165 | | 1078 | | 743 | | 407 | |
| 実験値 | 版移動時の荷重 P (kN) | 23.3 | | 23.0 | | 24.0 | | 23.6 | | 24.5 | | 26.3 | |
| | ボルトの滑り発生荷重 P_{max} (kN) | 30.5 | | 34.0 | | 30.4 | | 31.4 | | 35.0 | | 42.1 | |
| | $\{(P-P_{max})/2\}$ (kN) | 3.60 | | 5.50 | | 3.20 | | 3.90 | | 5.25 | | 7.90 | |
| | ボルト最大ひずみ(μ) | 1130 | 1007 | 922 | 535 | 167 | 165 | 594 | 1017 | 801 | 355 | 310 | 432 |
| | ボルト最小ひずみ(μ) | -1017 | -1084 | -880 | -506 | -159 | -162 | -458 | -1083 | -751 | -289 | -256 | -351 |
| | ボルトひずみ平均値(μ) | 1074 | 1046 | 901 | 521 | 163 | 164 | 526 | 1050 | 776 | 322 | 283 | 392 |
| | ボルトひずみ2本の平均値(μ) | 1060 | | 711 | | 163 | | 788 | | 549 | | 337 | |

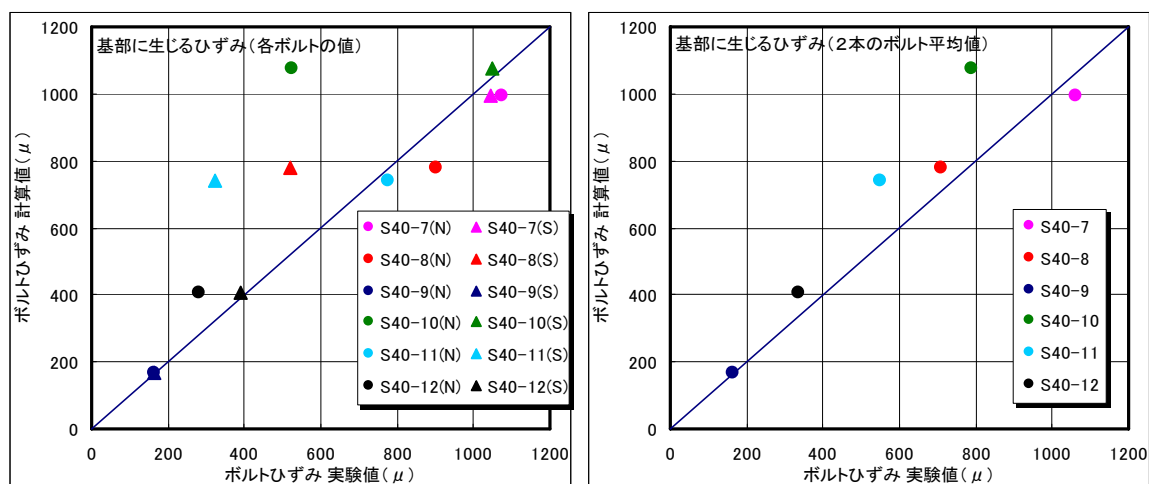


図-29 変形により生じるボルトのひずみの実験値と計算値の比較

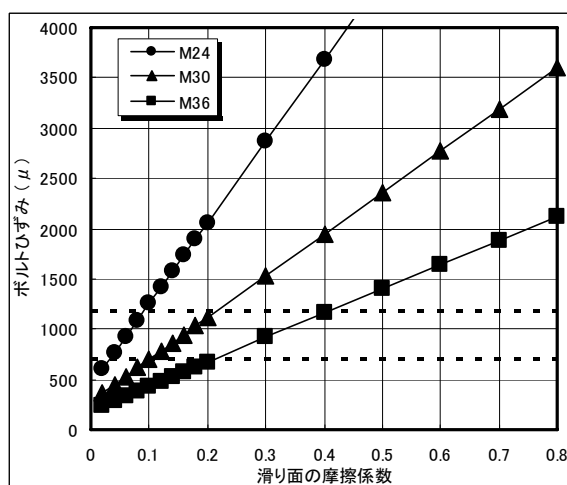


図-30 滑り面の摩擦係数に応じて生じるボルトの曲げ変形によるひずみの関係

3.4 PC版の温度伸縮を模擬したスライド試験(2)

(1) スライド試験(2)の概要

スライド試験(1)では、ボルトの締結力を保ちつつコンクリート版を拘束することなく伸縮するための構造として滑り面にテフロン加工を施した材料を使用すること、ボルトの曲げ変形に対して鋼材の降伏強度内に収まるボルト径としてM30を選定した。しかし実際には、締結ボルトが目地に平行して複数設置されるため、ここでは、より実際の構造に近い形でPC版を模擬したコンクリート版のスライド試験を実施することにより、①使用するボルトの構造が版を拘束せずに伸縮し、ボルトの変形も計算で想定された応力で収まっているか、②版の伸縮に対して、ボルトの締結力は保持されているか、について確認することを目的とする。

なお3.1のFEM解析に基づくPC版・緩衝版一体化構造、3.2のPC版の温度伸縮を模擬したスライド試験(1)では、図-31のa)変更前の図に示すように、PC版端部にはそれぞれ2本ずつの鋼材を配置することにより、PC版と緩衝版を一体化する構造を検討していた。しかし、これまで検討していたボルトの配置方法ではPC版に配置されているPC鋼材と接触してしまうこと、実工事ではPC版にコア削孔を行わなければならないため、設置箇所も極力少ないことが望ましいため、今後は図-31のb)変更後の図に示すボルト配置により検討を行った。またボルト配置間隔については、既設PC版のPC鋼材の配置間隔が375mmを基本に配置されていることから、スライド試験(2)ならびに後述するPC版と緩衝版との連続性を確保するための静的載荷試験では、ボルトの最小間隔は1.1mを基本に検討した。

(2) パラメータ

供試体の形状・寸法を図-32に、試験のパラメータを表-26にそれぞれ示す。試験は、全てのケースにおいてボルト間隔1.1mとし、ボルト締結力を5kN、10kN、20kN、40kNに変化させて実施した。試験に使用したPC版の寸法は、4.4m×2.1m×0.18mとした。詳細は3.6の(2)供試体の概要に示す。

(3) 試験方法

スライド試験の装置図を図-33に、PC版に設置するボルトの形状・寸法を図-34にそれぞれ示す。試験は、反力壁に固定した両動油圧ジャッキを用いて、H鋼を介してPC版を±15mm程度押し引きするものとした。試験では、PC版の押し引きに伴う版のずれを防止するため、両サイドにはローラーを設けた。またテフロン加工した滑り板のセットは、あらかじめ抜き型枠の上面に石膏をならし、その上に滑り板を水平器でレベルになる程度の精度でセットした。

(4) 測定項目

測定項目を表-27に、計測位置を図-35にそれぞれ示す。測定項目は、PC版の移動量を確認するための変位計、ボルトの曲げ変形により生じる基部のひずみ、ボルトの締結力の変動、PC版を押し引きするための水平荷重とする。ボルトの締結力は、静的載荷試験と同様に、鋼材に貼付したひずみゲージにより管理した。

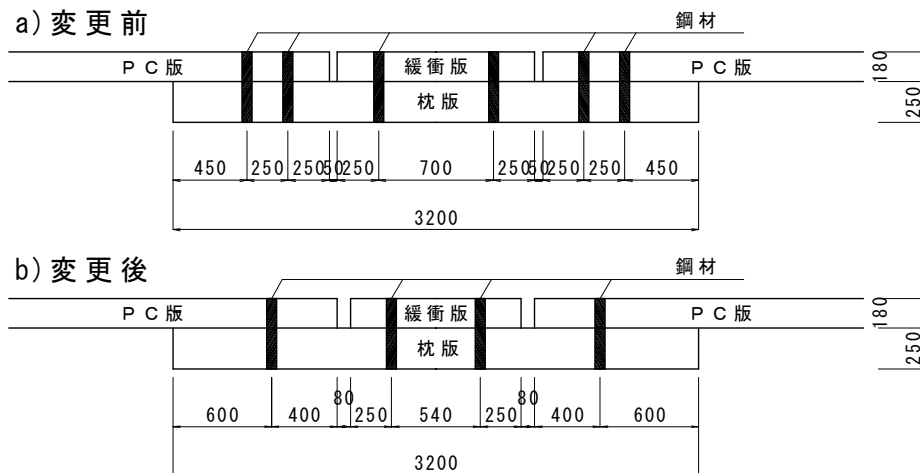


図-31 ボルトの配置方法

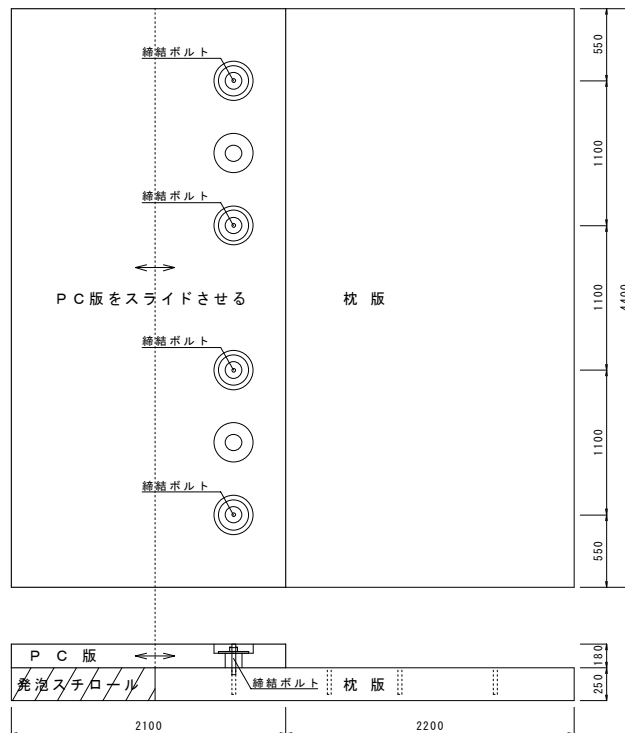


図-32 供試体の形状・寸法



写真-10 スライド試験(2)

表-26 試験のパラメータ

| No. | ボルト間隔 | ボルト1本あたりの 締結力 |
|-----|-------|------------------|
| 1 | なし | — |
| 2 | 1.1m | 5kN |
| 3 | | 10kN |
| 4 | | 20kN |
| 5 | | 40kN |

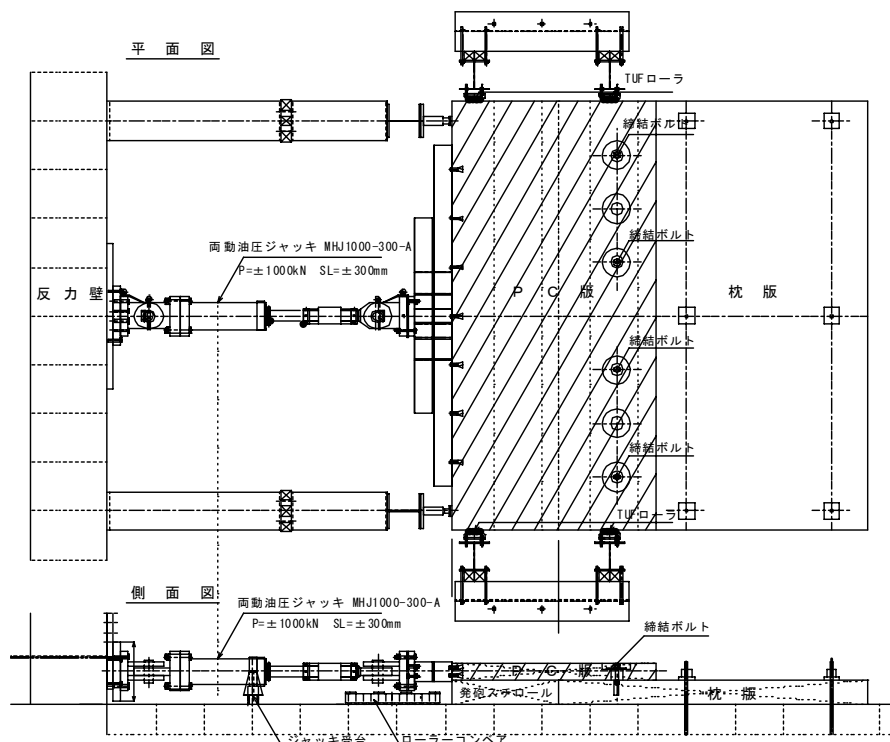


図-33 スライド試験の装置図

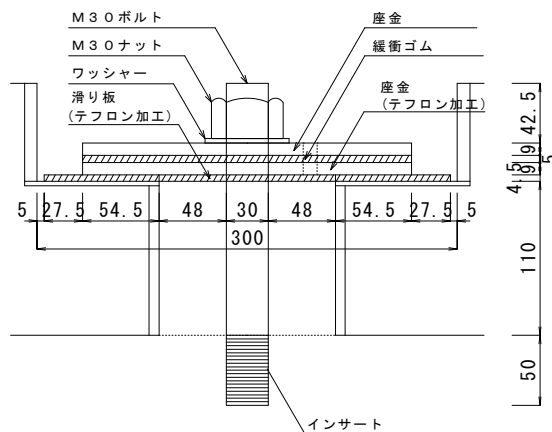


図-34 PC版に設置するボルトの形状・寸法

表-27 スライド試験における測定項目

| 項目 | 計測機器 | 数 | 備考 |
|-----------|--------|----|----------------|
| 版の変形量 | ひずみゲージ | 4 | PC版の移動量測定 |
| ボルトの締結力 | ひずみゲージ | 8 | ボルト 4本×2枚/本=8枚 |
| ボルト基部のひずみ | ロードセル | 8 | ボルト 4本×2枚/本=8枚 |
| 水平荷重 | | 1 | |
| 計 | | 21 | |

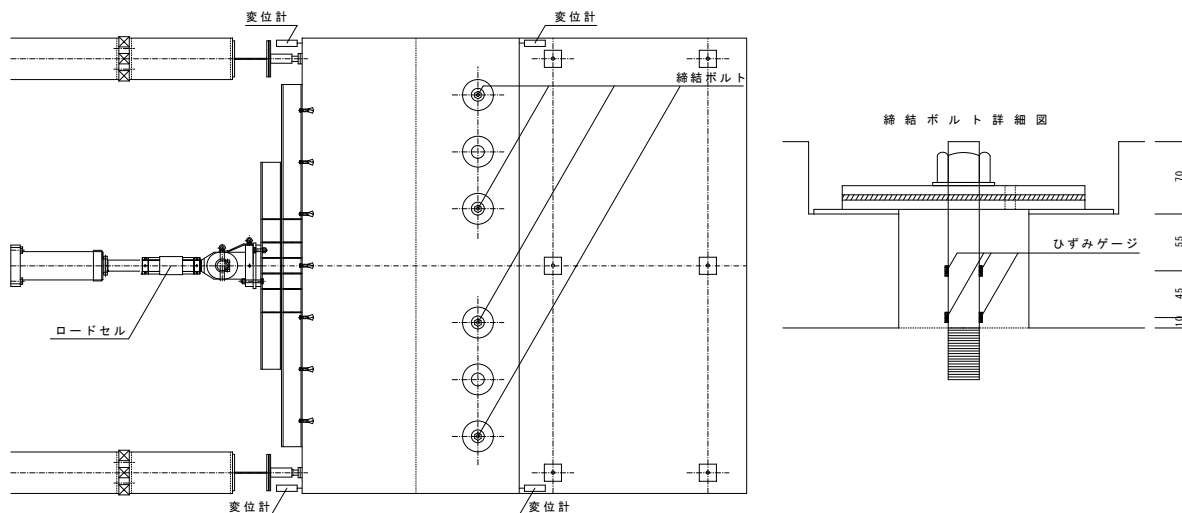


図-35 計測位置図

3.5 スライド試験(2)試験結果

(1) PC版の伸縮およびボルトの変形に関する検討

各試験ケースにおける水平荷重とPC版移動量の関係を図-36に、水平荷重の結果から算出した静摩擦係数の結果を表-28にそれぞれ示す。またNo.2～No.5のボルト基部に生じたひずみとPC版の移動量の結果を図-37に示す。試験結果をまとめると、以下のとおりである。

a) PC版の伸縮

今回実施したスライド試験のうち、最も厳しい条件であるNo.5(ボルト締結力40kN)においても、PC版は伸縮挙動を示した。また水平荷重の結果から算出した滑り板と座金部の静摩擦係数は、締結力が10kN, 20kN, 40kN時で0.13～0.17程度であり、スライド試験(1)とほぼ同等な静摩擦係数の値を示した。

b) PC版が伸縮した際のボルトの曲げ変形

締結力が大きくなるに従い、ボルト基部に発生するひずみにばらつきが生じたが、今回使用したM30のボルトについて、曲げ変形により生じたひずみは、全てのケースで鋼材の降伏強度以内に収まった。

(2) 伸縮に伴うボルト締結力の変動に関する検討

No.2～No.5のボルト締結力の変動とPC版の移動量の結果を図-38に、この結果をもとにボルト締結力の変動量の最大値と最小値を抽出した結果を表-29にそれぞれ示す。ここで、表-29中の変動割合は、初期締結力に対して締結力が低下した割合を示している。

PC版の伸縮に伴うボルト締結力の変動は、締結力を

40kN導入した場合において、-24%～+17%の変動の範囲にあった。また初期締結力が小さいケースほど、初期締結力に対しての締結力の変動が大きくなる傾向にあった。

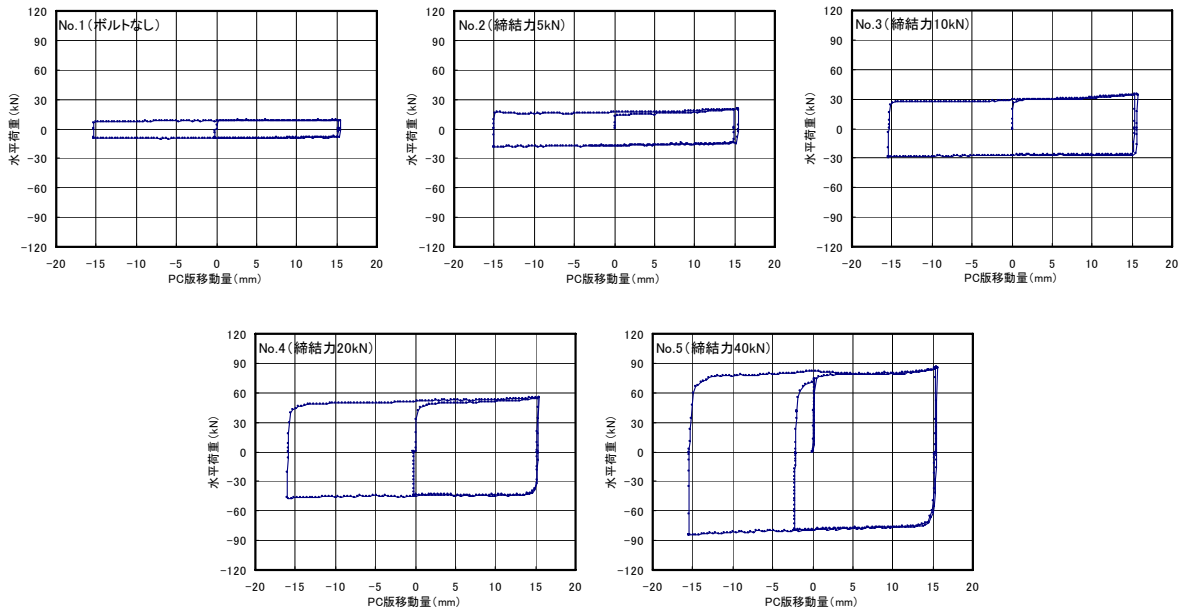
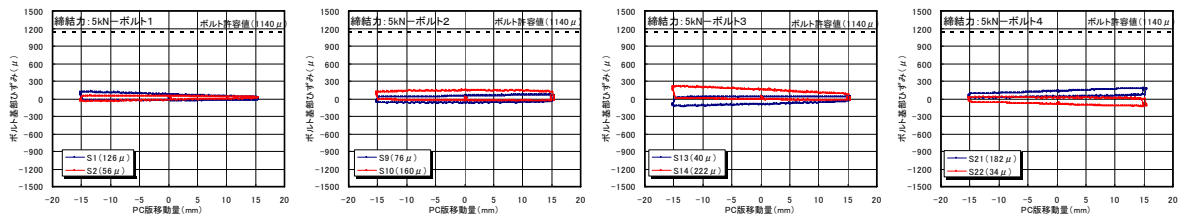


図-36 各試験ケースの水平荷重-PC版移動量の関係

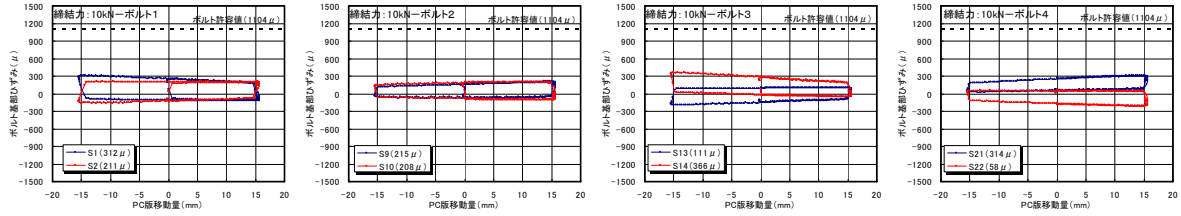
表-28 各試験ケースの静摩擦係数の測定結果

| 試験ケース | ボルト間隔 | ボルト締結力 | PC版自重 | P _{max} (kN) | | コンクリート面水平荷重 | テフロン面水平荷重 | 静摩擦係数 |
|-------|-------|--------|---------|-----------------------|------|-------------|-----------|--------|
| | | | | (+) | (-) | | | |
| No.1 | — | — | 40.8 kN | (+) | 9.2 | 9.7 | — | 0.237 |
| | | | | (-) | 10.1 | | | |
| No.2 | 1.1m | 5 kN | 40.8 kN | (+) | 14.0 | 14.0 | 14.4 | -0.023 |
| | | | | (-) | 13.9 | | | |
| No.3 | 1.1m | 10 kN | 40.8 kN | (+) | 25.9 | 25.9 | 19.2 | 0.167 |
| | | | | (-) | 25.8 | | | |
| No.4 | 1.1m | 20 kN | 40.8 kN | (+) | 42.1 | 40.6 | 28.6 | 0.150 |
| | | | | (-) | 39.1 | | | |
| No.5 | 1.1m | 40 kN | 40.8 kN | (+) | 74.0 | 68.0 | 47.6 | 0.128 |
| | | | | (-) | 62.0 | | | |

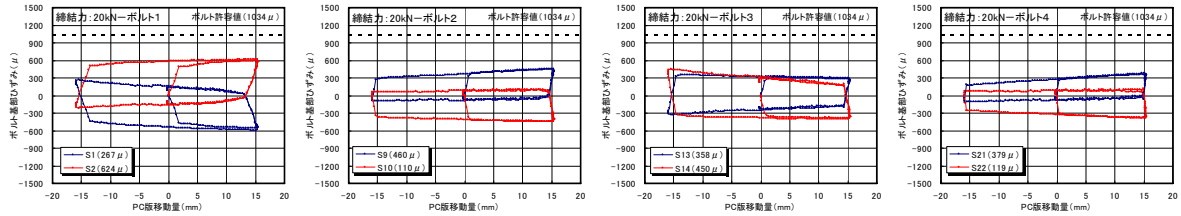
※滑り板と座金の静摩擦係数は、水平荷重の実験値からコンクリート底面の水平荷重を差し引いたものを、ボルト締結力で除して算出した。



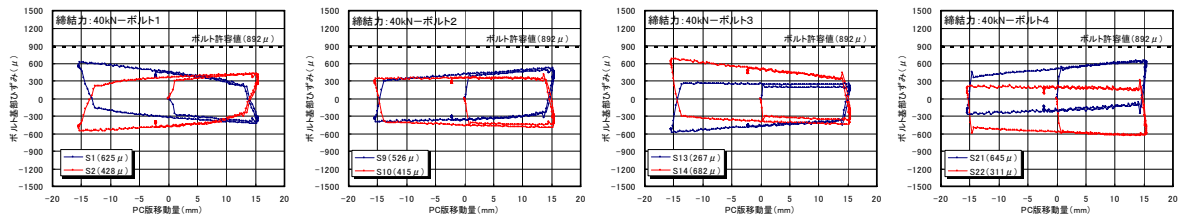
(No.2 (締結力 5kN))



(No.3 (締結力 10kN))



(No.4 (締結力 20kN))



(No.5 (締結力 40kN))

図-37 ボルト基部に生じたひずみと PC 版の移動量の結果

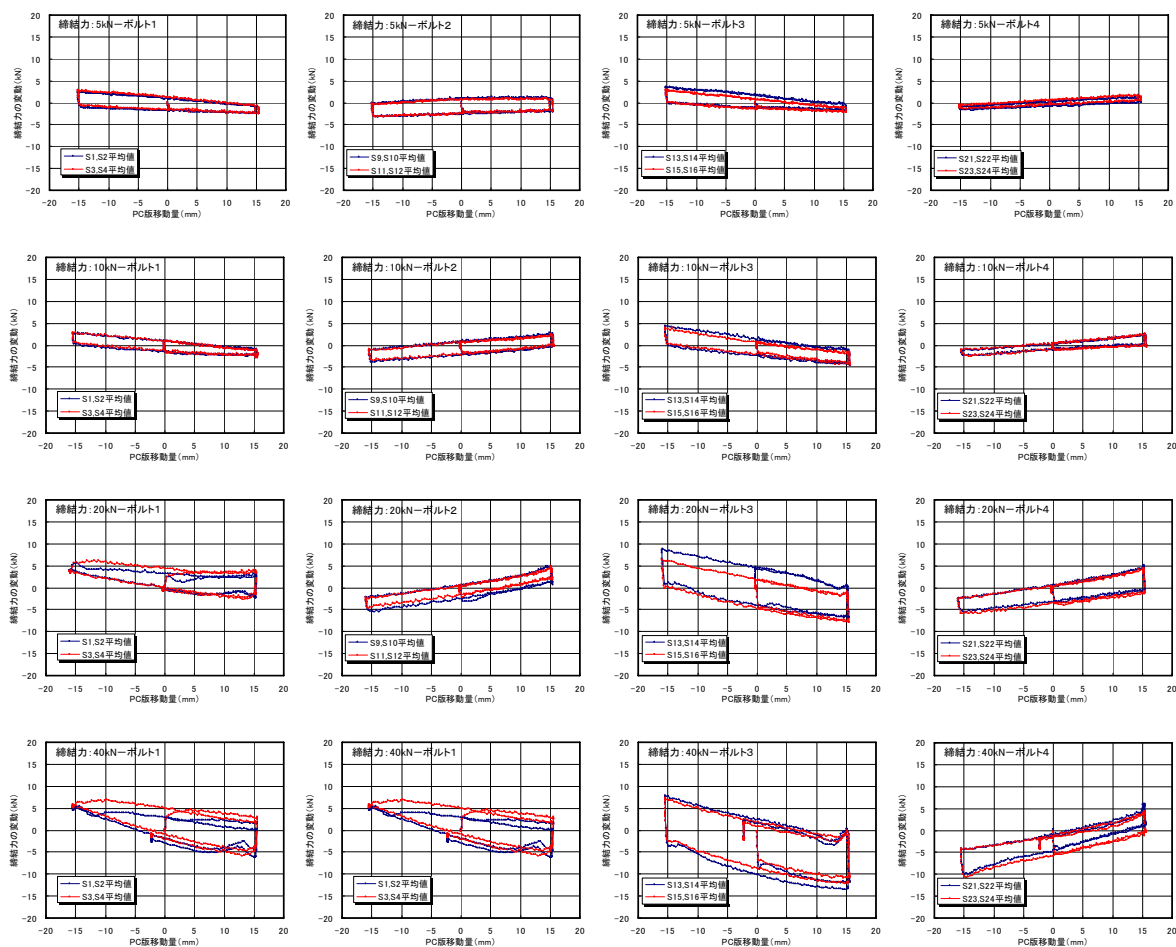


図-38 No.2～No.5 のボルト締結力の変動と PC 版の移動量の結果

表-29 各試験ケースのボルト締結力の変動量の結果

| | No.2 (ボルト締結力 5kN) | No.3 (ボルト締結力 10kN) | No.4 (ボルト締結力 20kN) | No.5 (ボルト締結力 40kN) |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ボルト 1 | -2.5kN～2.9kN | -3.0kN～2.9kN | -2.7kN～6.2kN | -6.3kN～7.0kN |
| ボルト 2 | -3.3kN～1.4kN | -3.9kN～2.9kN | -5.6kN～5.0kN | -7.0kN～6.8kN |
| ボルト 3 | -2.2kN～3.6kN | -4.5kN～4.4kN | -7.9kN～8.8kN | -13.5kN～7.8kN |
| ボルト 4 | -1.7kN～1.8kN | -2.5kN～2.7kN | -5.9kN～5.0kN | -10.7kN～6.0kN |
| 平均値 | -2.4kN～2.4kN | -3.5kN～3.2kN | -5.5kN～6.3kN | -9.4kN～6.9kN |
| 変動割合 | (-48%～+48%) | (-35%～+32%) | (-28%～+32%) | (-24%～+17%) |

3.6 静的載荷試験

3.1で検討したPC版と緩衝版の一体化構造の効果についての解析的な検討結果を踏まえ、本節では、PC版端部を模擬した供試体を製作し、静的載荷試験を行うことにより、PC版端部と緩衝版の連続性が確保されているかについて、実験的に確認することを目的とする。

(1) パラメータ

供試体の形状・寸法を図-39に、静的載荷試験の状況を写真-10に、載荷ケースを表-30に、ボルトの配置方法を図-40に、ボルトの形状・寸法を図-41にそれぞれ示す。

試験は、模擬路盤（発泡スチロール）上に3.2m×4.4m×0.25mの枕版を設置し、枕版上面の中心部に1.04m×4.4m×0.18mの緩衝版を、枕版上面の両端部に2.1m×4.4m×0.18mのPC版を設置し、前述したFEM解析の結果より、PC版と枕版の間に最も隙間が生じると考えられる緩衝版端部に載荷した。その際にPC版と枕版に生じる隙間、PC版と緩衝版のたわみ差、PC版と緩衝版のひずみ差を測定することにより、PC版と緩衝版の一体化を評価した。

試験のパラメータは、PC版と枕版の支持条件、締結ボルトの有無、締結ボルトの配置間隔、締結力とし、計32種類の載荷試験を実施した。

PC版と枕版の支持条件については、以下の4種類をパラメータとして実施した。

シリーズ1、シリーズ2は、設計上想定されたようにPC版が枕版に支持された状況を模擬したものであり、載荷試験前に実施した発泡スチロールの平板載荷試験の結果（付録-7）、シリーズ1の路盤支持力係数は0.14N/mm³、シリーズ2の路盤支持力係数は0.08N/mm³であった。

シリーズ3は、枕版下の路盤の支持力が低下し、枕版のみが局所的に沈下した状態を模擬するため、PC版両端部にゲビンデPC鋼棒を1本あたり100kNで8ヶ所固定した状態で試験を実施した。

シリーズ4は、載荷点近傍のPC版に空隙が生じ、PC版は目地平行方向の両端部でのみ枕版にて支持された状態を模擬したものであり、PC版の目地直角方向の両端部に高さ調整用プレートを設置した状態で試験を実施した。今回提案している一体化構造を用いる場合は、PC版と路盤の間にはグラウト材を充てんし、隙間を設けないことを前提としているが、今回は様々な環境下において締結ボルトの効果を確認することを目的としたため、本条件下においても試験を実施した。

締結ボルトの配置間隔については、前述のFEM解析

により枕版とPC版の間に隙間が生じると推定されたボルトの間隔が2m～3mであったこと、今回ポンピング現象が生じた羽田西側エプロン部のPC舗装版のPC鋼材の配置間隔が約375mmピッチであり、PC鋼材の配置位置を交わした際の区切りの良い配置が1.1mであったことから、今回の実験では、図-39に示すように、ボルト間隔は1.1mを基準に、2.2m、3.3mの3種類を設定した。

締結力は、解析結果から40kN程度でPC版と枕版の間に生じる隙間が低減される傾向にあったとの結果を踏まえ、5kNと40kNを締結力の基本として試験を実施した。またPC版、緩衝版には、それぞれ図-41に示すような締結ボルトを使用し、ボルト締結力の管理は、付録-8に示す締結ボルトの応力-ひずみの関係をもとに、鋼材に貼付したひずみゲージにより行った。

(2) 供試体の概要

a) 枕版

枕版の形状・寸法を図-42に示す。供試体の寸法は3200×4400×250mmとした。コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とし、鉄筋は多層弾性理論により算出した断面力に対して100N/mm²以内の応力になるような鉄筋を配置するものとした。なお載荷試験時におけるコンクリートの圧縮強度は付録-9に示す値であった。

b) 緩衝版

緩衝版の形状・寸法を図-43に示す。供試体の寸法は1040×4400×180mmとした。コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とし、目地平行方向はφ23mmのアンボンドPC鋼棒を4本配置したPC構造、目地直角方向はD19を配置したRC構造とした。

c) PC版

PC版の形状・寸法を図-44に示す。供試体の寸法は2100×4400×180mmとし、コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とした。また今回の実験では、PC版に直接載荷は行わないため、目地平行方向、目地直角方向ともにRC構造とし、D16の鉄筋を配置した。

d) 模擬路盤（発泡スチロール）

今回の実験では、模擬路盤として硬質発泡スチロール（カネパールソイルブロック DX-29）を用いて路盤を構成した。シリーズ1では枕版下の発泡スチロール厚さを100mm、シリーズ2～シリーズ4では枕版下の発泡スチロール厚さを200mmとして、静的載荷試験を実施した。先述したように、発泡スチロール厚さを100mmとした場合の路盤支持力係数は0.14N/mm³、発泡スチロール厚さを200mmとした場合の路盤支持力係数は0.08N/mm³であった。

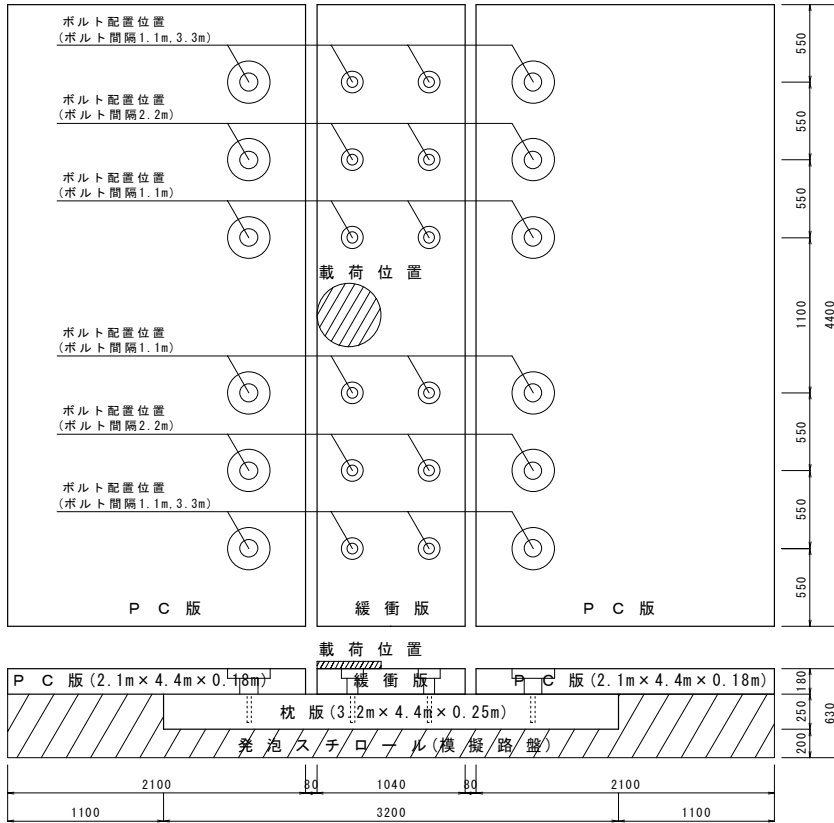


図-39 供試体の形状・寸法



写真-10 静的載荷試験の状況

表-30 載荷ケース

| 載荷ケース | シリーズ1 | | | | シリーズ2 | | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|--------|
| 模擬路盤厚 | 発泡スチロール厚さ：100mm | | | | 発泡スチロール厚さ：200mm | | | |
| PC版の支持条件 | ゲビンデPC鋼棒：緊張なし | | | | ゲビンデPC鋼棒：緊張なし | | | |
| | PC版は枕版に全面支持されたケース | | | | PC版は枕版に全面支持されたケース | | | |
| |  | | | |  | | | |
| 載荷ケース | | 供試体名 | ボルト間隔 | ボルト締結力 | | 供試体名 | ボルト間隔 | ボルト締結力 |
| | 1 | シリーズ1-1.1m-5kN | 1.1m | 5kN | 8 | シリーズ2-1.1m-5kN | 1.1m | 5kN |
| | 2 | シリーズ1-1.1m-40kN | | 40kN | 9 | シリーズ2-1.1m-40kN | | 40kN |
| | 3 | シリーズ1-2.2m-5kN | 2.2m | 5kN | 10 | シリーズ2-2.2m-5kN | 2.2m | 5kN |
| | 4 | シリーズ1-2.2m-40kN | | 40kN | 11 | シリーズ2-2.2m-40kN | | 40kN |
| | 5 | シリーズ1-3.3m-5kN | 3.3m | 5kN | 12 | シリーズ2-3.3m-5kN | 3.3m | 5kN |
| | 6 | シリーズ1-3.3m-40kN | | 40kN | 13 | シリーズ2-3.3m-40kN | | 40kN |
| | 7 | シリーズ1-無 | - | - | 14 | シリーズ2-無 | - | - |
| 載荷ステップ | 0kN→350kN→0kN→350kN→0kN→350kN の3回繰り返し載荷 | | | | 0kN→205kN→0kN→205kN→0kN→205kN の3回繰り返し載荷 | | | |
| 載荷ケース | シリーズ3 | | | | シリーズ4 | | | |
| 模擬路盤厚 | 発泡スチロール厚さ：200mm | | | | 発泡スチロール厚さ：200mm（版端部のみ支持） | | | |
| PC版の支持条件 | ゲビンデPC鋼棒：緊張あり | | | | ゲビンデPC鋼棒：緊張なし | | | |
| | 枕版のみが不同沈下した状態を模擬したケース | | | | 載荷面近傍のPC版に空隙が生じ、PC版は枕版両端部で支持された状態を模擬したケース | | | |
| |  | | | |  | | | |
| 載荷ケース | | 供試体名 | ボルト間隔 | ボルト締結力 | | 供試体名 | ボルト間隔 | ボルト締結力 |
| | 15 | シリーズ3-1.1m-5kN | 1.1m | 5kN | 24 | シリーズ4-1.1m-5kN | 1.1m | 5kN |
| | 16 | シリーズ3-1.1m-40kN | | 40kN | 25 | シリーズ4-1.1m-40kN | | 40kN |
| | 17 | シリーズ3-2.2m-5kN | 2.2m | 5kN | 26 | シリーズ4-2.2m-5kN | 2.2m | 5kN |
| | 18 | シリーズ3-2.2m-40kN | | 40kN | 27 | シリーズ4-2.2m-20kN | | 20kN |
| | 19 | シリーズ3-3.3m-5kN | 3.3m | 5kN | 28 | シリーズ4-2.2m-40kN | 3.3m | 40kN |
| | 20 | シリーズ3-3.3m-10kN [※] | | 10kN | 29 | シリーズ4-3.3m-5kN | | 5kN |
| | 21 | シリーズ3-3.3m-20kN [※] | | 20kN | 30 | シリーズ4-3.3m-20kN | | 20kN |
| | 22 | シリーズ3-3.3m-40kN | | 40kN | 31 | シリーズ4-3.3m-40kN | | 40kN |
| | 23 | シリーズ3-無 | - | - | 32 | シリーズ4-無 | - | - |
| 載荷ステップ | 0kN→205kN→0kN→205kN→0kN→350kN の3回繰り返し載荷 | | | | 0kN→350kN→0kNの1回繰り返し載荷 | | | |

※印の供試体については、0kN→350kN→0kNの1回繰り返し載荷

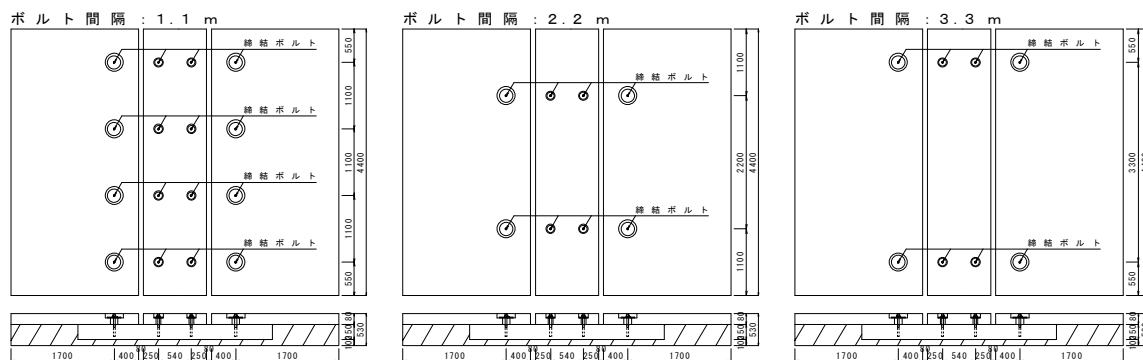


図-40 締結ボルトの配置方法

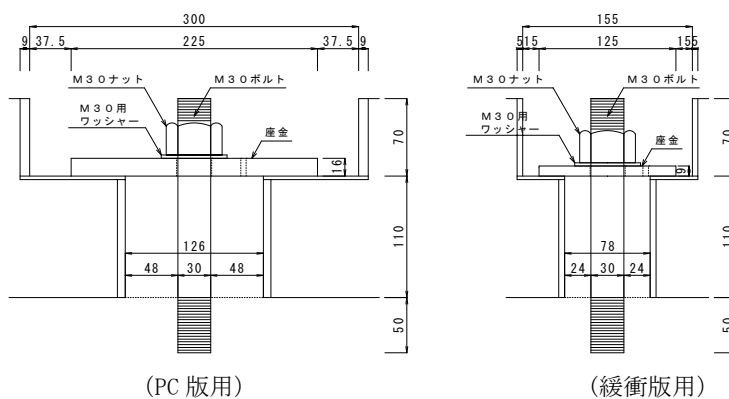


図-41 締結ボルトの形状・寸法

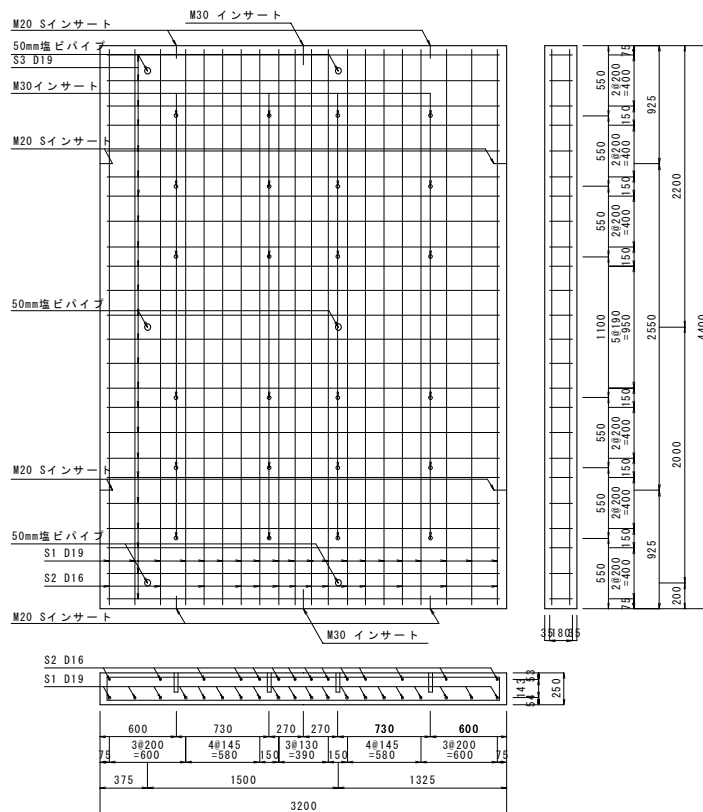


図-42 枕版の形状・寸法

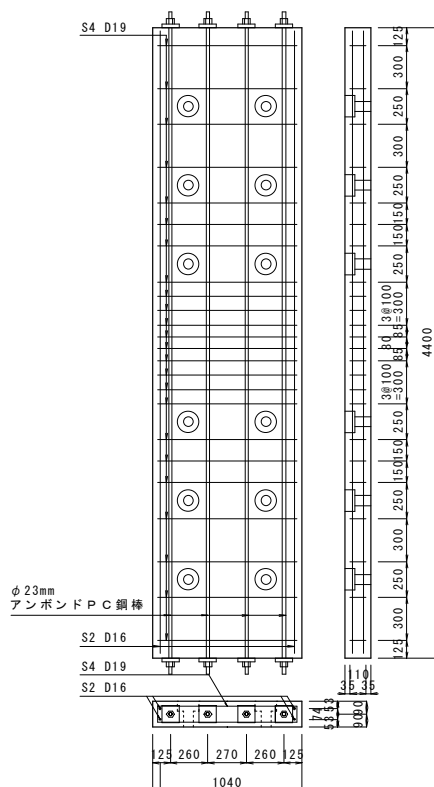


図-43 緩衝版の形状・寸法

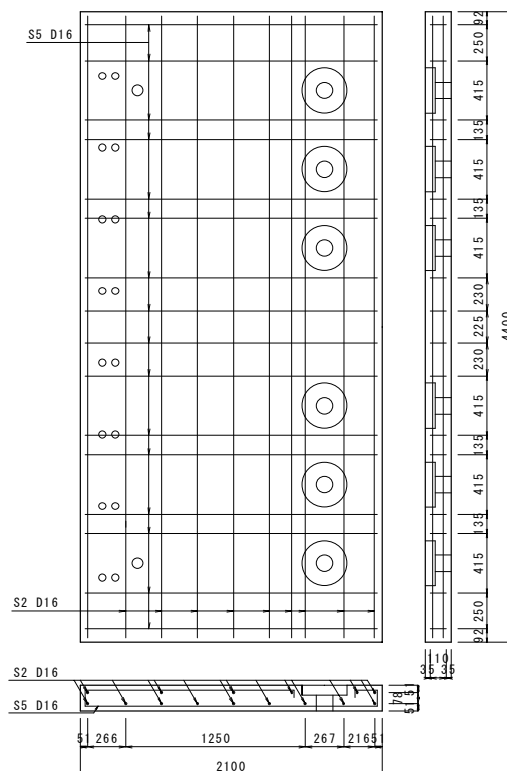


図-44 PC版の形状・寸法

(3) 試験方法

静的荷重試験の方法を図-45 に示す。試験は鉛直荷重システムを使用し、FEM 解析の結果より、PC 版と枕版の隙間が最も生じると推定された緩衝版端部に荷重した。荷重点には、直径 450mm の鋼製荷重板（下面に硬質ゴム付き）を用いた。

(4) 測定項目

静的荷重試験における測定項目を表-31 に、PC 版と枕版との間に生じる隙間、コンクリート版のたわみ、ひずみの測定状況を写真-11 に、変位計の設置位置を図-46 に、ひずみの測定位置を図-47 にそれぞれ示す。

また試験シリーズ2~4について実施したPC版と枕版との間に生じる隙間は図-48 に示す方法により、PC版と緩衝版のたわみ差・たわみ伝達率の測定は図-49 に示す方法により測定した。

a) PC版と枕版との間に生じた隙間

PC版と枕版との間に生じた隙間は、図-48 に示すようにPC版に固定した変位計を枕版上面にセットすることにより算出した。

b) PC版と緩衝版のたわみ差・たわみ伝達率

PC版と緩衝版のたわみ差は、図-49 に示すように荷重

点近傍に設置した変位計によりPC版のたわみと緩衝版のたわみの差を求めた。またたわみ伝達率は、荷重点近傍の設置したPC版と緩衝版の変位計の値を用いて、次式により算出した。

$$\text{たわみ伝達率 (\%)} \quad E_{ff} = \frac{2d_1}{d_0 + d_1} \times 100$$

ここに、

d_1 : PC版（非荷重側）のたわみ(mm)

d_0 : 緩衝版（荷重側）のたわみ(mm)

c) PC版と緩衝版のひずみ伝達率

ひずみ伝達率は、荷重点中心から275mm位置の版上面のひずみゲージの値を用いて、次式により算出した。

$$\text{ひずみ伝達率 (\%)} \quad E_{ff} = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_0 + \varepsilon_1} \times 100$$

ここに、

ε_1 : PC版（非荷重側）のひずみ (μ),

ε_0 : 緩衝版（荷重側）のひずみ (μ)

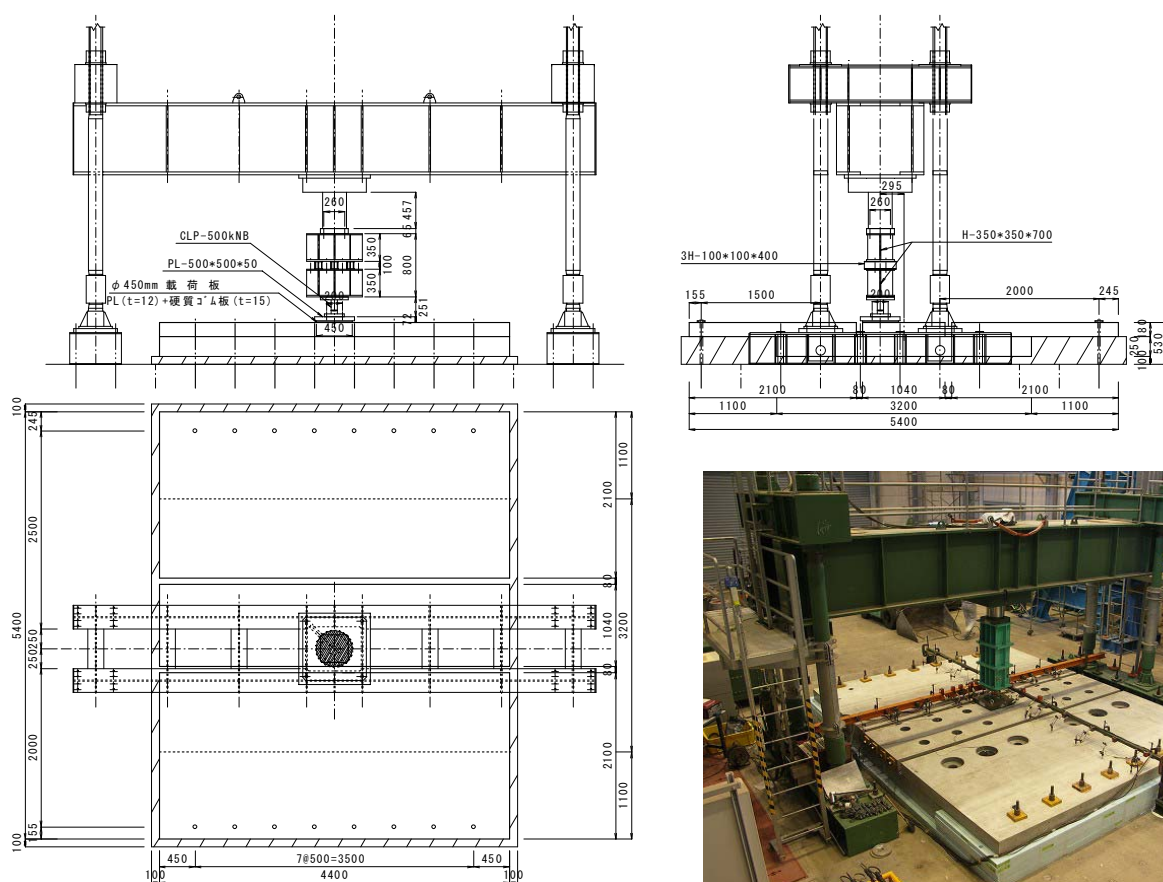
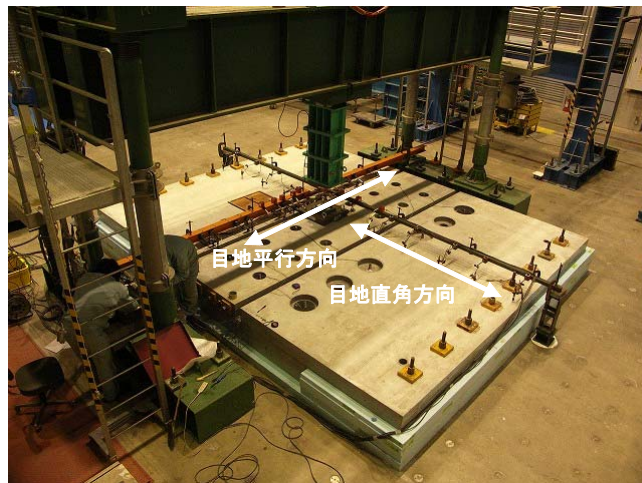


図-45 静的載荷試験の方法

表-31 静的載荷試験における測定項目

| 項目 | 計測機器 | 数 | 備考 |
|-----------------|--------|----|-------------------------|
| 版のたわみ | 変位計 | 9 | 目地平行方向 (PC 版載荷側) |
| | 変位計 | 9 | 目地平行方向 (緩衝版) |
| | 変位計 | 4 | 目地直角方向 (PC 版載荷側) |
| | 変位計 | 2 | 目地直角方向 (緩衝版) |
| | 変位計 | 5 | 目地直角方向 (PC 版非載荷側) |
| PC 版・枕版の隙間 | 変位計 | 2 | シリーズ 2~4 にて測定を実施 |
| 枕版の変形量 | 変位計 | 2 | 目地平行方向の端部 |
| コンクリート 表面ひずみ | ひずみゲージ | 8 | 目地平行方向 (PC 版載荷側) |
| | ひずみゲージ | 8 | 目地平行方向 (緩衝版) |
| コンクリート 側面ひずみ | ひずみゲージ | 2 | 緩衝版載荷位置側面 |
| | ひずみゲージ | 2 | PC 版載荷側 |
| ボルトの締結力 | ひずみゲージ | 32 | 最大 32 枚 (2 枚×16 本=32 枚) |
| 載荷荷重 | ロードセル | 1 | 載荷荷重の確認用 |
| 計 | | 86 | |



(PC版・枕版間に生じた隙間)



(目地平行方向のたわみ・ひずみ)



(目地直角方向のたわみ)

写真-11 コンクリート版のたわみ・ひずみの測定状況

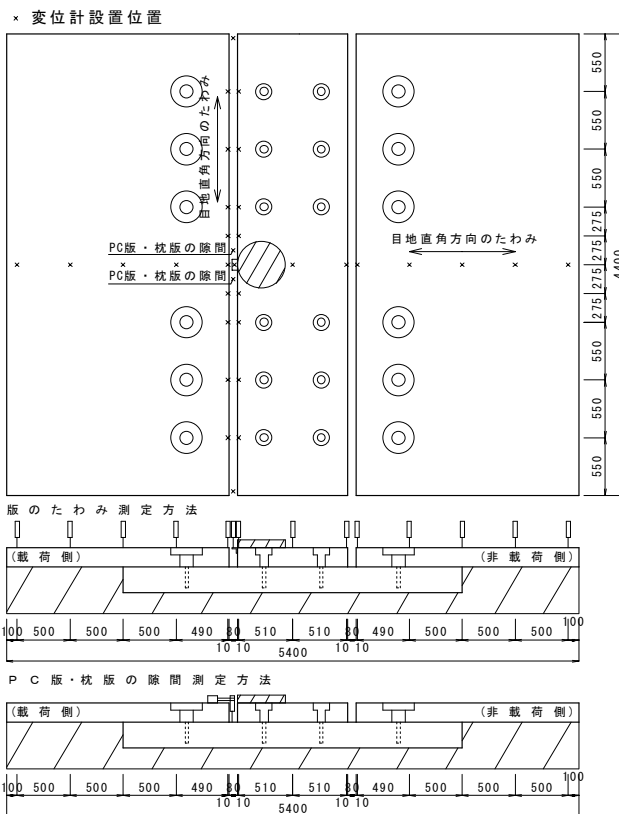


図-46 変位計の設置位置

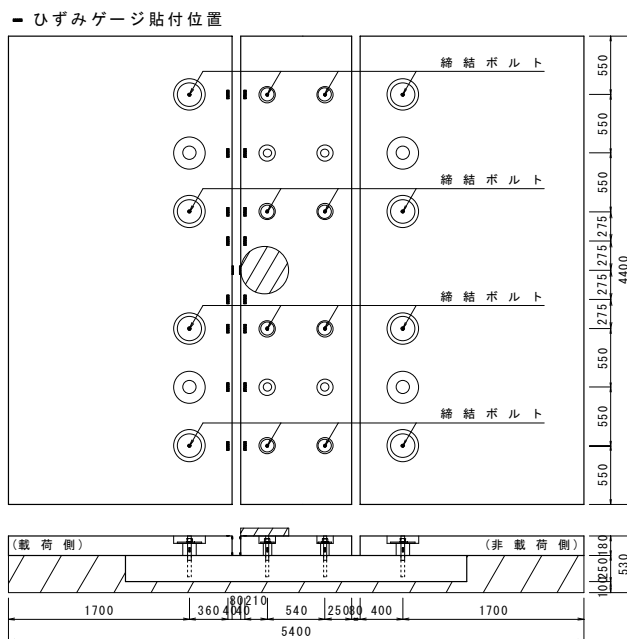


図-47 コンクリート表面のひずみ測定位置

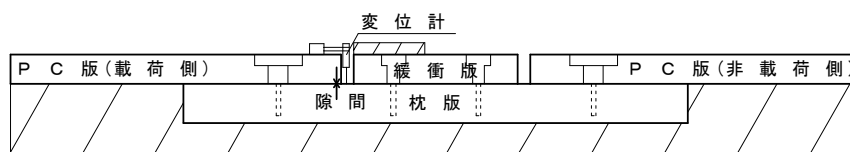


図-48 PC版と枕版との間に生じる隙間の測定方法

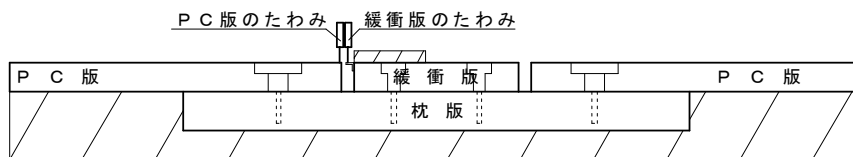


図-49 PC版と緩衝版のたわみ差・たわみ伝達率の測定方法

3.7 静的載荷試験結果

(1) PC版と枕版との間に生じた隙間の結果

試験シリーズ2～4のPC版と枕版との間に生じた隙間の結果を図-50に示す。

シリーズ2については、設計荷重205kNまでの載荷で試験を終了しているため、図は100kNと250kN載荷時のボルト間隔とPC版と枕版との間に生じた隙間の結果を、シリーズ3,4については350kNまで載荷しているため、100kN, 205kN, 350kN載荷時のボルト間隔とPC版と枕版との間に生じた隙間の結果を示す。

図-50の結果から、PC版が枕版にて全面で支持された状態(シリーズ2)では、ボルト間隔が1.1mではほとんど隙間が生じておらず、ボルトを配置していない場合についても約0.15mmに収まる結果となった。一方、枕版が局所的に沈下する状況を想定したケース(シリーズ3)、載荷面付近のPC版に空隙が存在する状況(シリーズ4)では、それぞれ設計荷重時に約0.3mmと約0.7mm、350kN載荷時に約0.7mmと約1.1mmの隙間が生じたのに対して、ボルトを配置した場合には隙間が抑制された。この傾向はボルト間隔が小さく、かつボルト締結力が多いほど顕著であった。

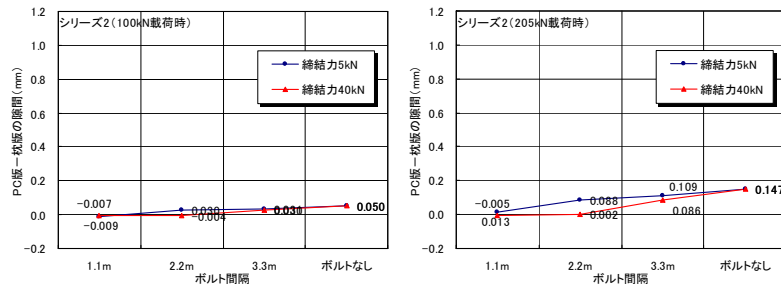
すなわち、PC版が枕版に全面的に支持された構造であれば、ボルトの有無によらずPC版と枕版との間に生じる隙間が小さいこと、シリーズ3,4のようにPC版と枕版との支持条件が悪くなった場合において、ボルト締結による効果が認められる傾向を示した。またボルト間隔が1.1mの場合は、ボルト締結力が5kNであっても40kNであっても、PC版と枕版との間に生じる隙間の変動は小さいが、ボルト間隔が大きくなるにつれてボルト締結力

の影響が大きくなる傾向を示した。

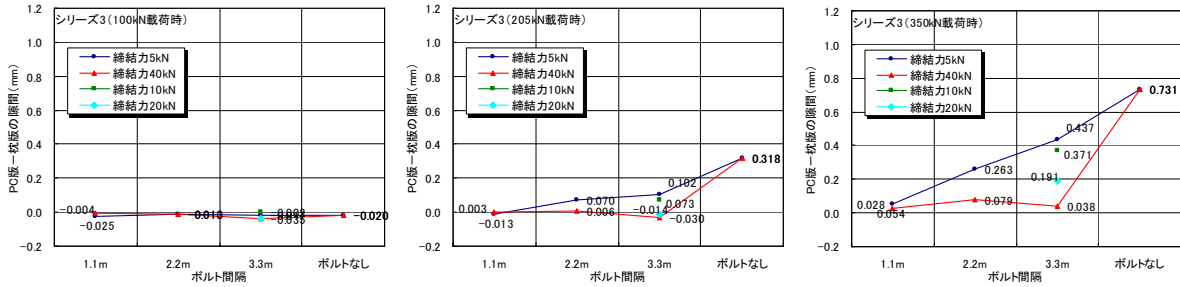
(2) PC版と緩衝版とのたわみ差・たわみ伝達率

試験シリーズ1～4のPC版と緩衝版のたわみ差を測定した結果を図-51に、PC版と緩衝版のたわみ伝達率の測定結果を図-52にそれぞれ示す。また各試験ケースの目地平行方向の載荷側(緩衝版)と非載荷側(PC版)のたわみ分布を付録-10に、目地直角方向のたわみ分布を付録-11にそれぞれ示す。

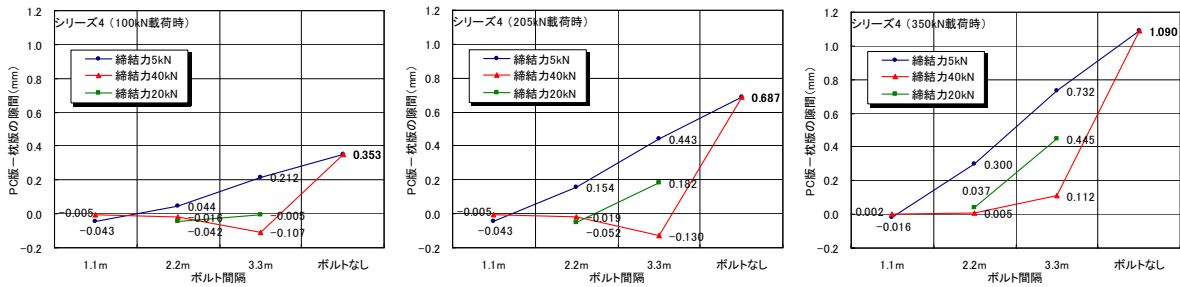
PC版と緩衝版との間に生じた隙間の結果と同様に、PC版が枕版にて全面で支持された状態(シリーズ1,シリーズ2)のボルト無しで設計荷重を載荷させた場合には、シリーズ1が約0.6mm、シリーズ2が約0.4mmのたわみ差を有していた。シリーズ1とシリーズ2を比較した場合には、シリーズ2の路盤支持力係数が小さいため、たわみ差が大きいものと想定されたが、シリーズ1ではPC版と枕版の支持において若干の不陸が生じたため、結果としてシリーズ1がシリーズ2に比べて若干たわみ差が生じる結果となった。またボルトを配置したケースは、路盤の支持状態によらずPC版と緩衝版のたわみ伝達率がボルトを配置しないものに比べて向上する傾向を示した。ボルト間隔が1.1mの場合には、締結力の影響が小さく、ボルト間隔が広がるにつれて、ボルト締結力の影響が大きくなる傾向を示した。



(シリーズ 2)

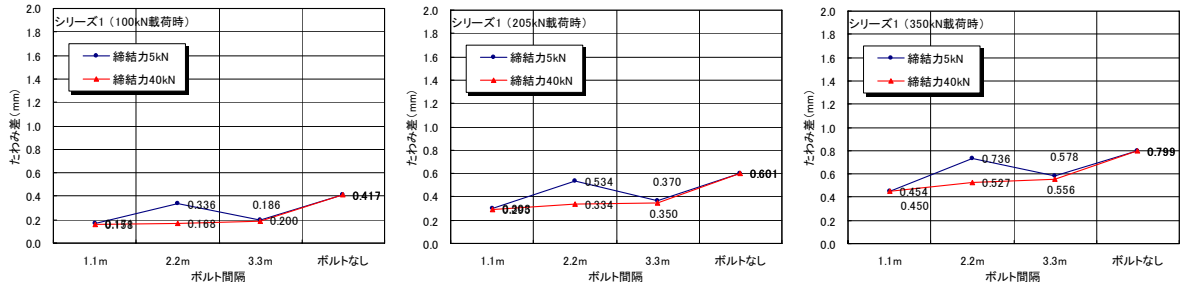


(シリーズ 3)

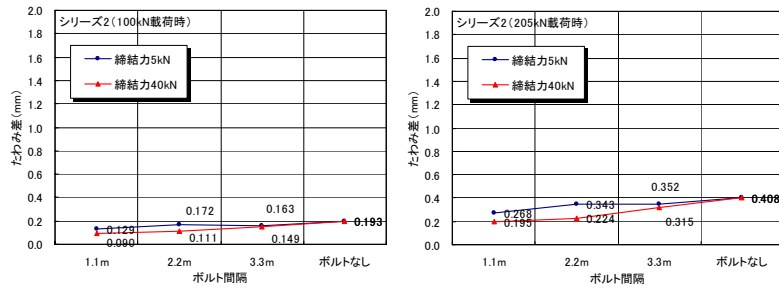


(シリーズ 4)

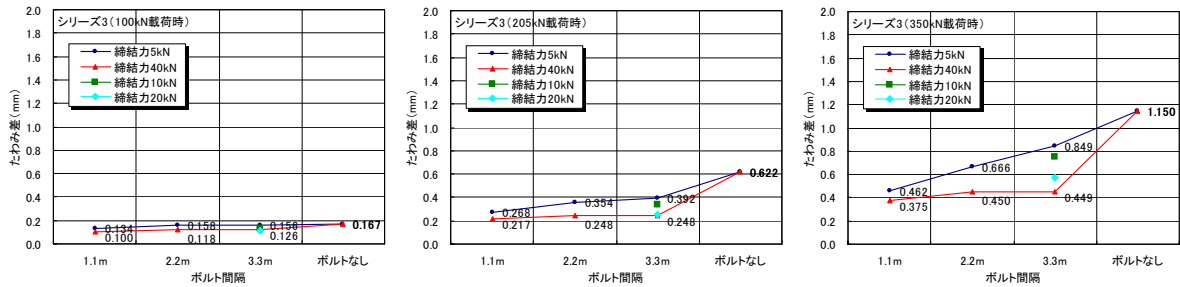
図-50 各試験シリーズのPC版と枕版との間に生じた隙間の結果



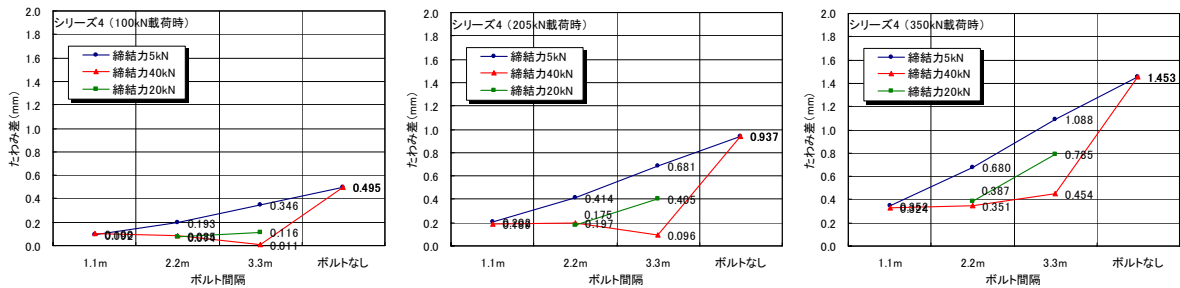
(シリーズ 1)



(シリーズ 2)

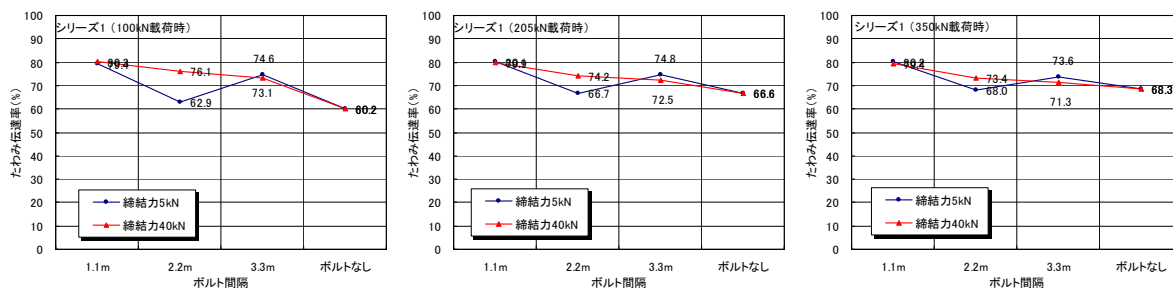


(シリーズ 3)

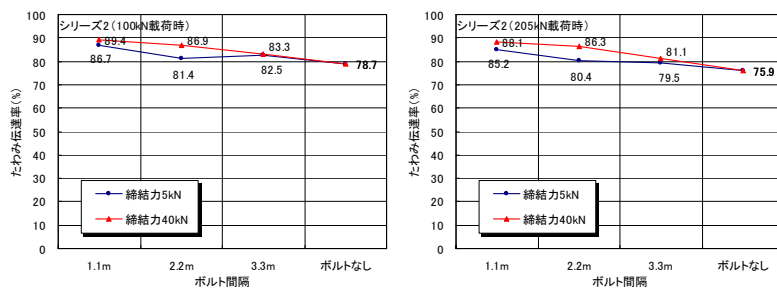


(シリーズ 4)

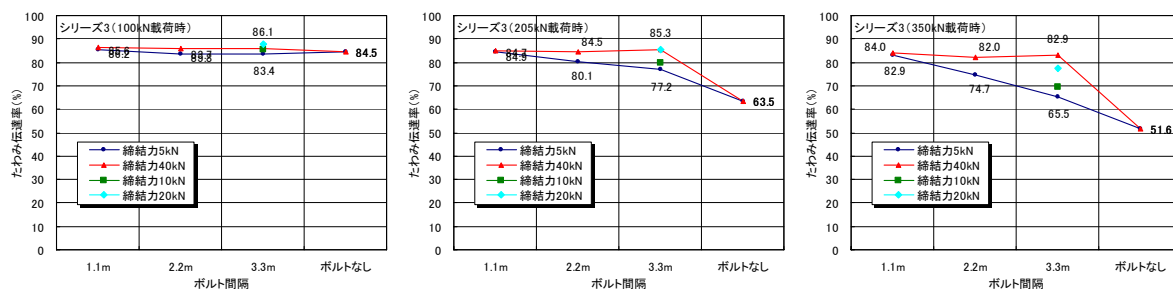
図-51 各試験シリーズのPC版と緩衝版のたわみ差の結果



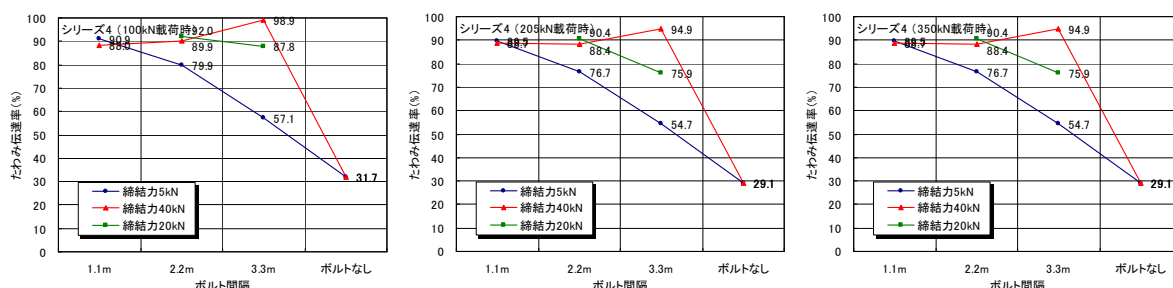
(シリーズ1)



(シリーズ2)



(シリーズ3)



(シリーズ4)

図-52 各試験シリーズのPC版と緩衝版のたわみ伝達率の結果

(3) PC版と緩衝版とのひずみ伝達率の測定結果

試験シリーズ1～4のPC版と緩衝版のひずみ伝達率の結果を図-53にそれぞれ示す。また目地平行方向の載荷側（緩衝版）と非載荷側（PC版）コンクリート表面のひずみ分布を資料-12にそれぞれ示す。

シリーズ1, シリーズ3の一部では, ボルト間隔が2.2mより3.3mの方がひずみ伝達率が向上しているデータも存在したが, 全体的にはボルトが配置されてかつボルトの配置間隔が小さい, かつボルト締結力が大きいほど, PC版と緩衝版との応力の伝達も向上する傾向を示した。

っていることが確認できた。また載荷箇所については, 載荷により路盤が変形し, 締結力が低下する箇所も生じたが, 除荷に伴いボルト締結力も復元する傾向を示した。

(4) 載荷に伴うボルト張力の変動

試験シリーズ1～4それぞれの載荷側のPC版, 緩衝版, 非載荷側のPC版に設置した締結ボルトの張力変動量の結果を図-54に示す。

今回の実験より, PC版, 緩衝版のボルト張力の増加量は, 最大でも10kN程度で収まっている結果となった。また緩衝版に設置したボルトの軸力変動に着目した場合には, 載荷を行うことにより緩衝版が縮まる結果としてボルト締結力が減少する傾向を示したが, 荷重を除荷した場合にはボルト締結力はもとに戻る傾向を示した。

(5) 静的載荷試験のまとめ

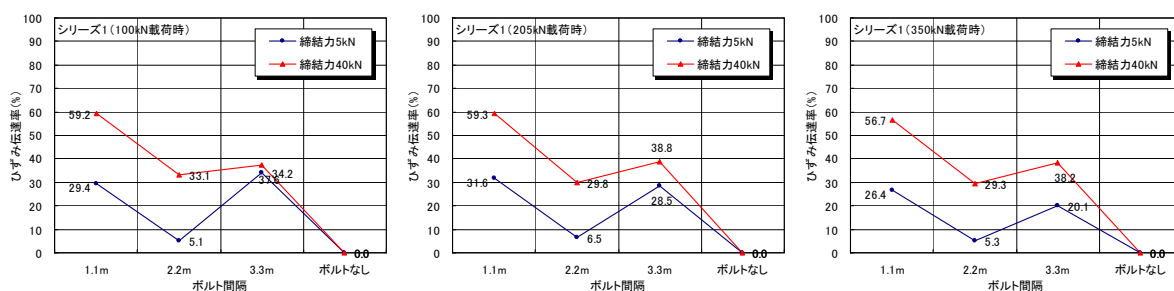
路盤の支持条件, ボルトの配置間隔, ボルト締結力をパラメータとして, PC版端部を模擬した供試体の静的載荷試験を実施することにより, PC版と緩衝版の一体化の効果について実験的な検討を行った。今回の実験により得られた結果を以下に示す。

a) PC版と枕版との間に生じた隙間, たわみの連続性

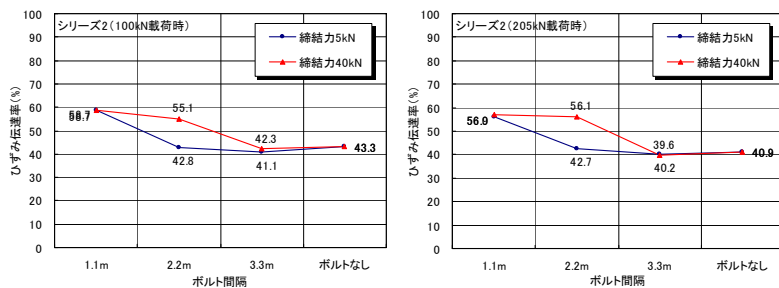
PC版が枕版にて全面で支持された状態（シリーズ2）では, ボルトを配置しなくてもPC版と枕版との間に生じた隙間は, 205kNの載荷（設計荷重相当）で約0.15mmに収まった。一方, 枕版が局所的に沈下する状況を想定したケース（シリーズ3）, 載荷面付近のPC版に空隙が存在する状況（シリーズ4）では, 205kN載荷時でシリーズ3では約0.3mm, シリーズ4では約0.7mmの隙間が生じたが, 締結ボルトを配置することにより, PC版と枕版の間に生じる隙間が抑制されることが確認できた。またボルトの配置間隔が1.1mの場合は, ボルト締結力によらず抑制されること, ボルト間隔が2.2m, 3.3mと広がるにつれてボルト締結力の影響が大きくなる傾向を示した。

b) ボルト張力の変動

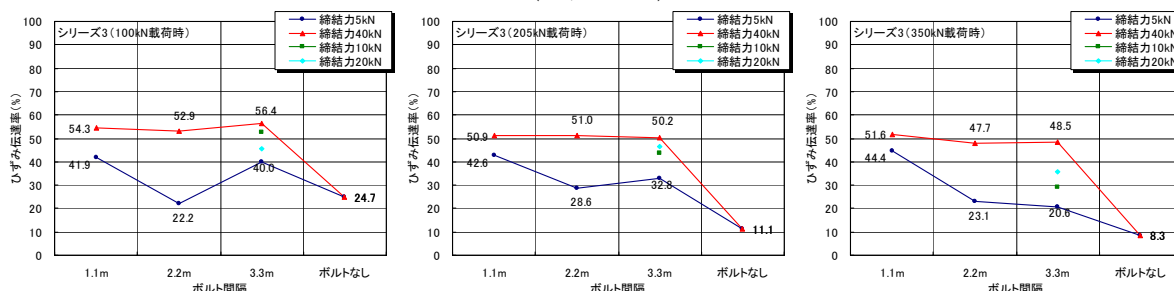
静的載荷試験時に測定したボルトの張力の結果から, 今回の実験の範囲では最大でも10kN程度の増加に収ま



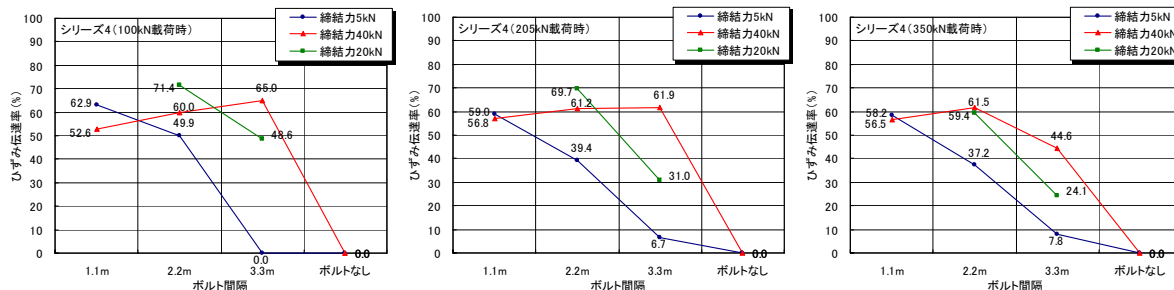
(シリーズ 1)



(シリーズ 2)



(シリーズ 3)



(シリーズ 4)

図-53 各試験シリーズのPC版と緩衝版のひずみ伝達率の結果

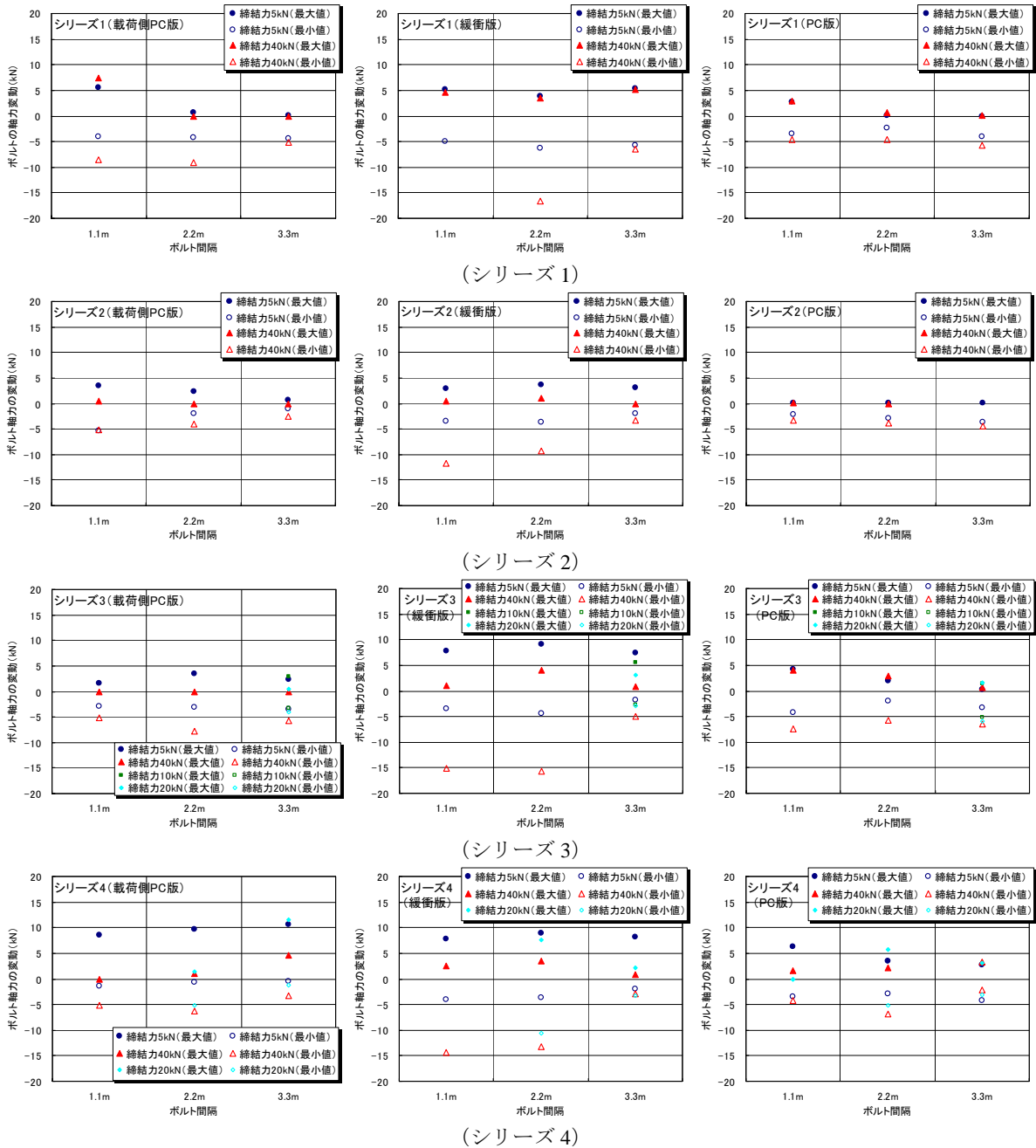


図-54 各試験シリーズのボルト張力の変動の結果

3.8 締結金具の構造・取り付け方法およびボルト締結力管理方法

既設空港エプロン PC 舗装版に一体化構造を用いる場合は、夜間の限られた時間内に既設の PC 版をコア削孔し、締結金具を設置する必要がある。本節では、4 章で述べる走行載荷試験を行う際に実施した締結金具の取り付け方法とその際に生じた課題点ならびにその改良試験、ボルト締結力の管理基準の概要を述べる。

(1) 締結金具の構造

締結ボルト構造の概要を図-55 に、PC 版用締結ボルト構造の詳細図を図-56 に、PC 版用締結金具の材料を図-57 に、緩衝版用締結金具の材料を図-58 にそれぞれ示す。

締結金具は、PC 版用、緩衝版用ともに、全ねじボルト、ロングナット、エポキシ樹脂、グラウト止めパッキン、

カセット、カセットと既設舗装版を一体化させるためのグラウト材、座金①、②、緩衝ゴム、ボルト、蓋から構成した。

PC 版に設置する締結金具は、PC 版の温度伸縮に伴う移動を確保するスペースが必要となるが、緩衝版の短手方向の版長は 1m 弱であること、長手方向は枕版と一体となって伸縮するものと想定するため、温度伸縮に伴う移動がほとんどないものと考えられるため、コア削孔径、カセットの直径は PC 版と緩衝版で異なるものを使用した。

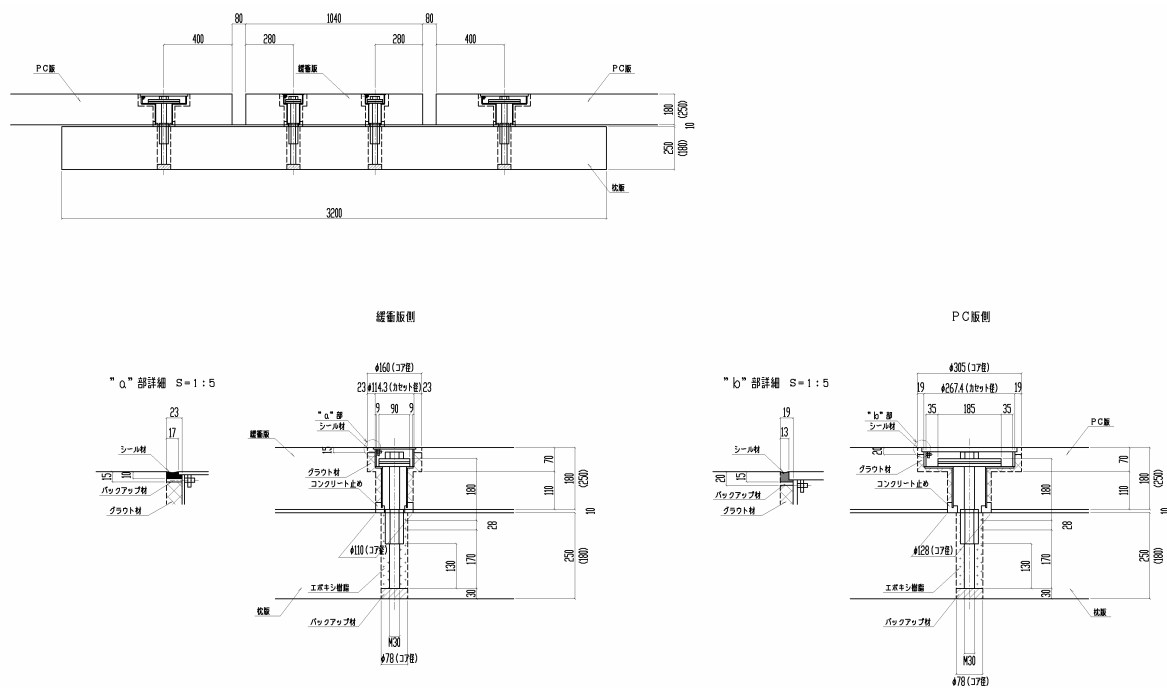


図-55 PC 版用、緩衝版用の締結ボルト構造の概要

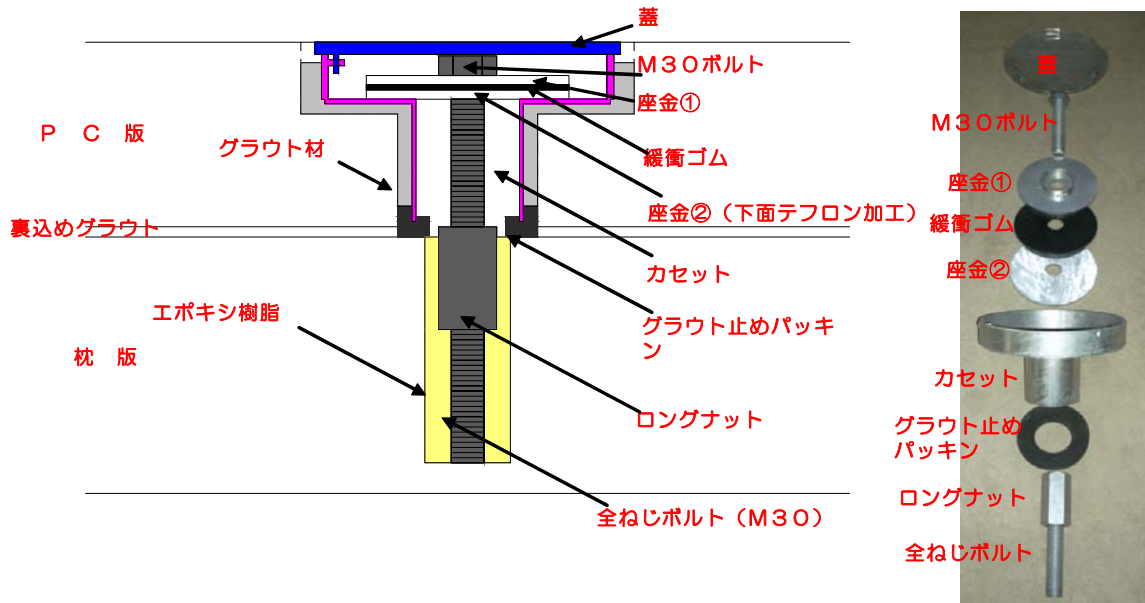


図-56 PC版用締結金具の詳細図

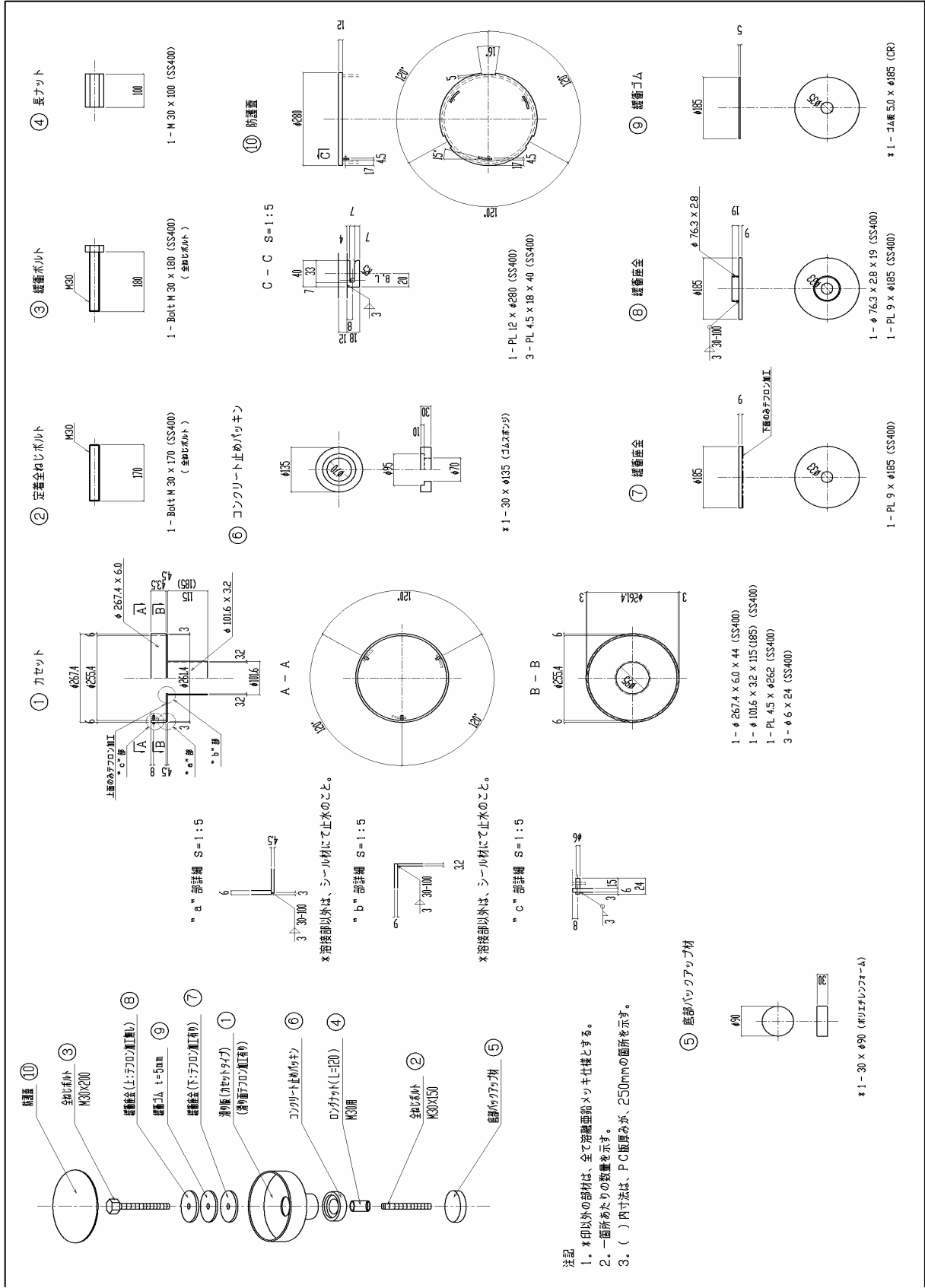


図-57 PC版用締結金具

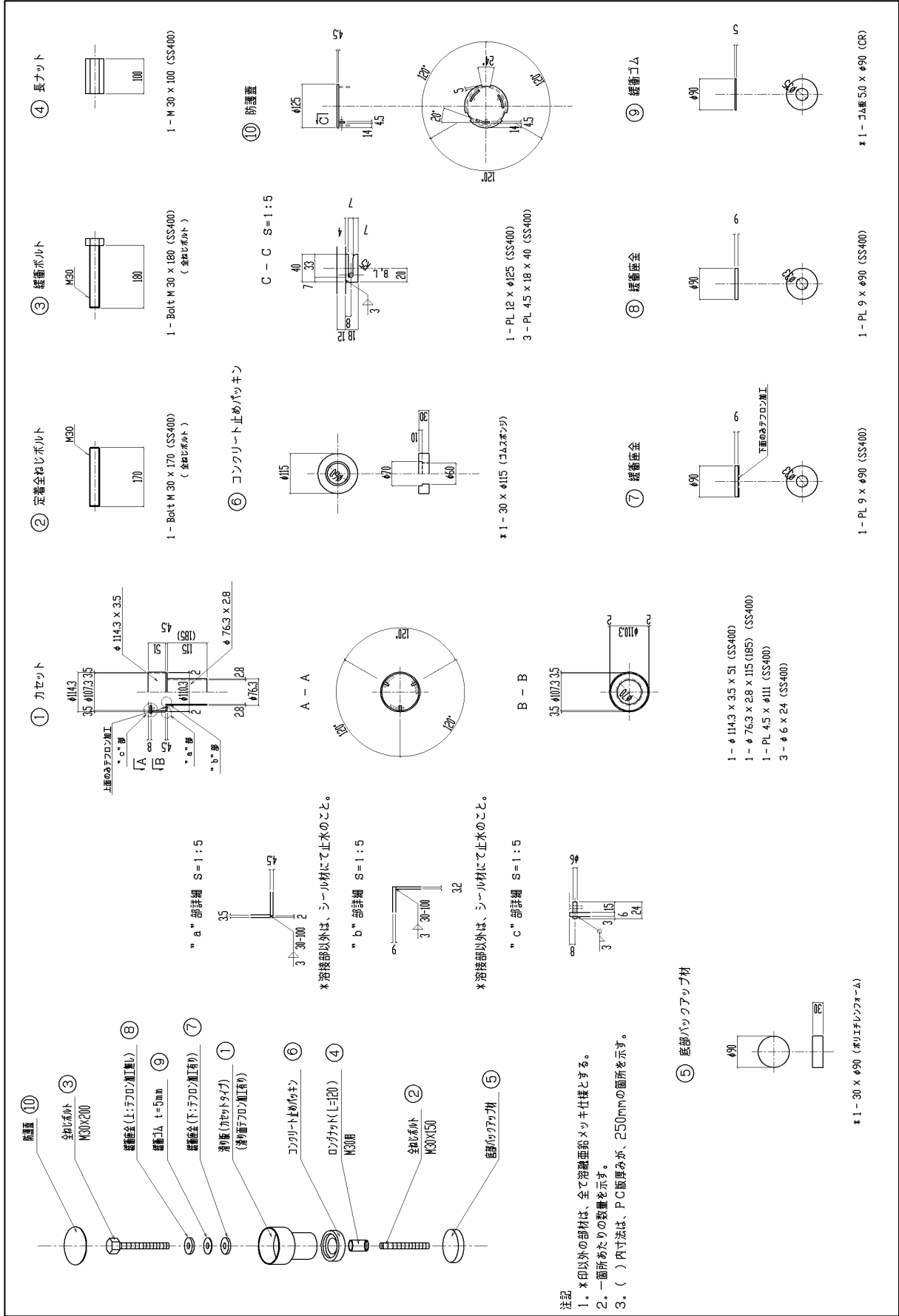


図-58 緩衝版用締結金具

(2) 締結金具の取り付け方法と課題点

締結金具の取り付けフローを図-59 に、a)コア削孔、b)カセット設置、c)無収縮グラウトの注入・養生、d)ボルト定着用エポキシ樹脂注入、e)ボルト・座金セット、f)ボルト・座金のばらし、g)ボルト締結力導入 に関する作業の概要と課題点を図-60～図-65 ならびに写真-12 にそれぞれ示す。

a) コア削孔

走行載荷試験時は、締結ボルトを設置することによる構造的な検討を行うことを主目的として行ったため、コア削孔は行わずあらかじめ孔を設けた PC 版、緩衝版を製作した。PC 版用のコア削孔径は、PC 版上面側からφ305mm、φ128mm、φ78mm とした。また緩衝版用のコア削孔径は、緩衝版上面側からφ160mm、φ110mm、φ78mm とした。

b) カセット設置

締結ボルトを配置した際にも、PC 版が温度伸縮に対してスムーズに移動するよう、カセットは設置治具を用いて PC 版に対して平行に作用するようにセットした。その際、カセットのまわりに充てんする無収縮グラウト材が PC 版下に漏れるのを防止するためのコンクリート止めのパッキンをカセット下にセットしたが、パッキンの反発力が強く設置治具が浮き上がる傾向にあった。今回は、コンクリート供試体を治具の上にセットすることにより、設置治具、カセットの浮き上がりを防止する処置を施したが、実施工では、パッキンの変更あるいはカセットが浮き上がらない重量の設置治具を使用する必要がある。

c) 無収縮グラウト注入、養生

無収縮グラウトの材料は、コア削孔部とカセット設置部の隙間が1cm程度と小さいため流動性に優れていること、材齢2時間で硬化していること、材齢28日ではPC版と同等以上の強度を有している材料を選定した。今回はプレキャスト PC 舗装版の目地部のジョイント（水平ジョイント）の充てんに用いられる材料 MG-5（三菱マテリアル（株））を使用した。

d) ボルト定着用エポキシ樹脂注入

エポキシ樹脂は、土木建築用低粘度型エポキシ樹脂ボンド E2300J（コニシ（株）製）を使用した。樹脂注入量をあらかじめ計算し、その分のエポキシ樹脂を注入する作業を行ったが、一部エポキシ樹脂の量が多く、ロングナットのネジ部にエポキシ樹脂が入ってしまった。

実施工では、エポキシ樹脂の注入量を少なめにしておき、エポキシ樹脂硬化後に、不足分を再注入する等の手順が良いものと考えられる。

e) ボルト、座金セット

樹脂注入後、全ねじボルト、ロングナット、M30 ボルト、座金①、緩衝ゴム、座金②を一体化させた状態でボルトをセットする。

f) ボルト、座金のばらし

ボルト、座金を取り外した際に、エポキシ樹脂の量が著しく減少している場合は再度エポキシ樹脂を追加注入する。

g) 締結力導入

エポキシ樹脂を注入後、材齢1日で40kNの締結力を導入した場合、締結力が半分以下に低下する結果となった。また材齢7日で同様な作業を行った場合、締結力は若干減少したが、材齢1日に比べて著しく抑制された。

以上、実施工を想定したケースにて締結金具の取り付けを実施したが、基本的には問題なく作業を行うことができた。しかし、g)ボルト締結力の導入 に関して、エポキシ樹脂を注入して材齢7日で締結力を導入した場合には、ボルト締結力の減少量は小さかったが、材齢1日でボルトに締結力を導入した場合には、ボルトの締結力が導入時に比べて半分以下に低下した。また PC 版と緩衝版のボルト締結力の減少量を比較した場合には、座金の面積が小さい緩衝版の方が、ボルト締結力が減少する傾向にあった。

そこで、これら締結力の減少量の要因を確認すること、アンカー部の耐力を確認することを目的に、アンカー部の材料の材齢を変化させた場合のボルト締結力の経時変化の測定試験、樹脂アンカー部の引抜き試験（アンカー部強度確認試験）と、図-56 に示す座金①と座金②の間に挟み込んだ緩衝ゴムの状態が締結力の減少に及ぼす影響を確認するための試験（緩衝ゴム改良試験）、ならびに締結力をトルクにて管理する場合のトルク値のばらつきを確認するための試験を実施した。

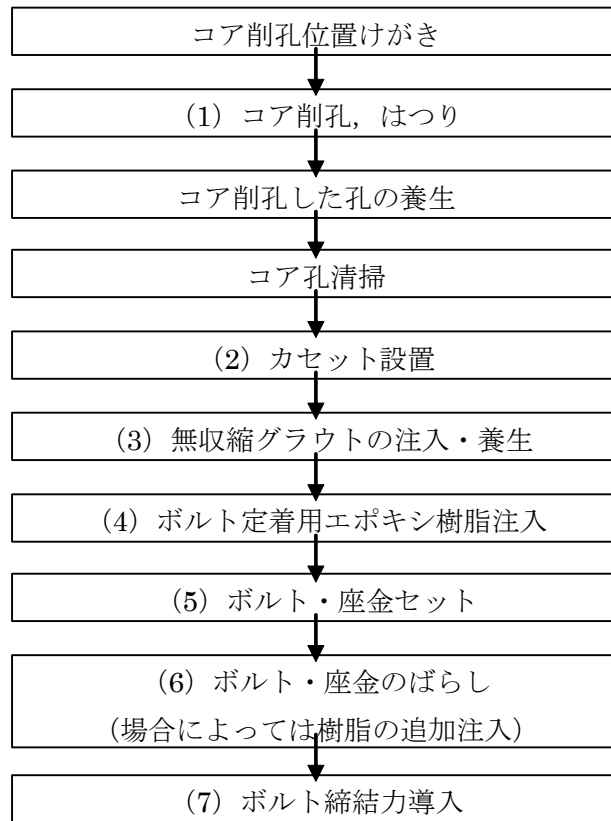


図-59 締結金具の取り付けフロー

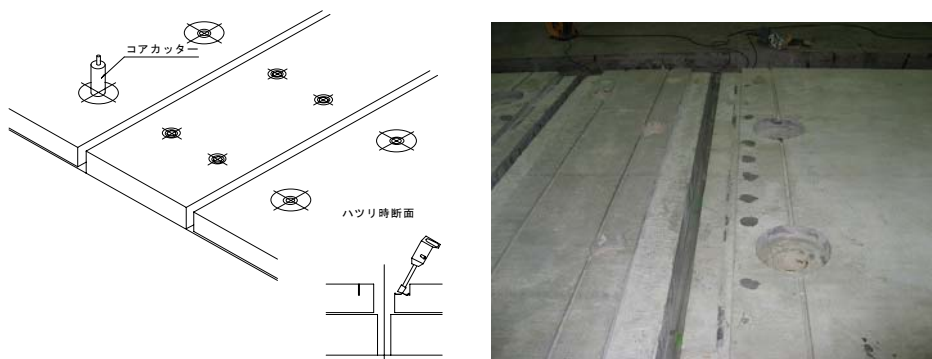


図-60 コア削孔

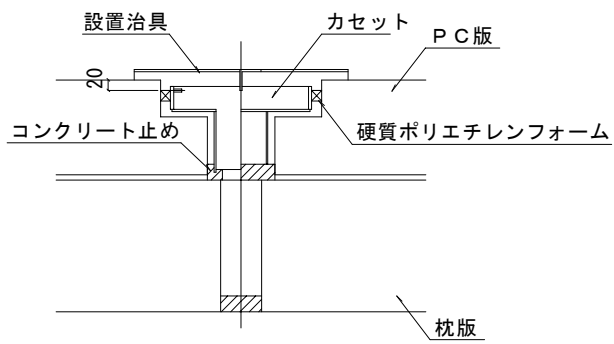


図-61 カセット設置

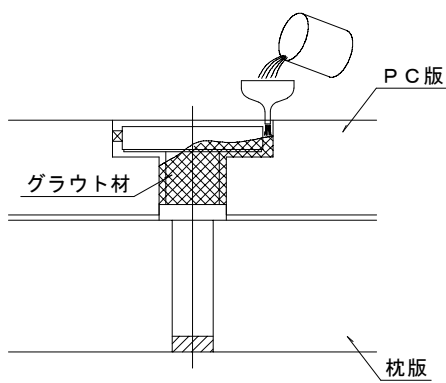


図-62 無収縮グラウト注入，養生

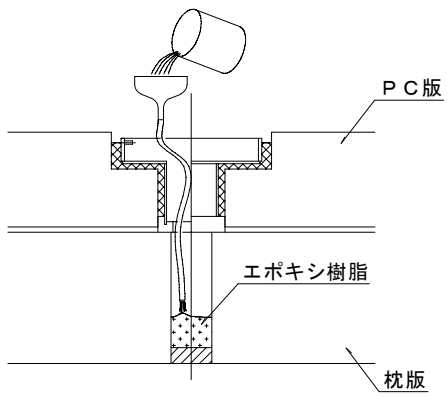


図-63 ボルト定着用エポキシ樹脂注入

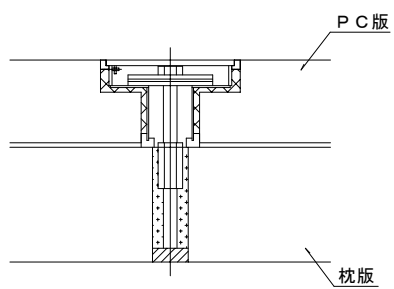


図-64 ボルト，座金セット

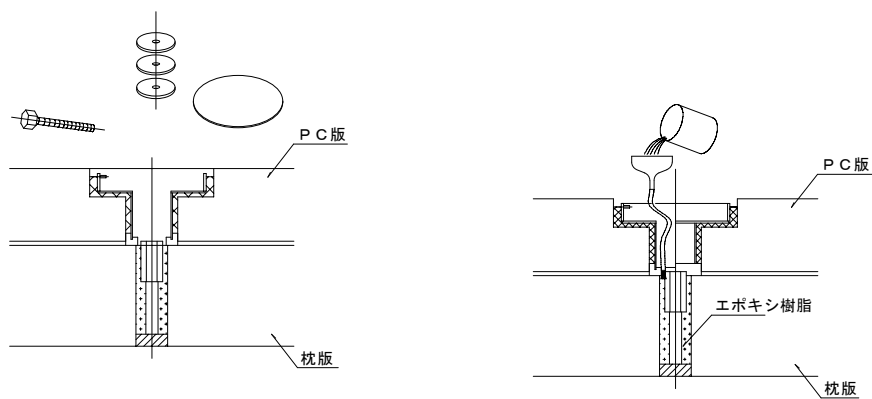


図-65 ボルト，座金のばらし



写真-12 締結力の導入状況

3.9 アンカー部の材料変形によるボルト締結力減少量確認試験

(1) 試験概要

ボルト締結を行う際のアンカー部について、材料の変形に伴うボルト締結力の減少量と引抜き耐力を実験的に確認することを目的に、定着ボルトをセットした後に、「ボルト締結力の経時変化測定試験」、「アンカー部の引抜き試験」を実施した。

試験ケースを表-32 に、試験に使用したコンクリート版の形状・寸法を図-66 にそれぞれ示す。試験は、アンカー定着用材料としてエポキシ樹脂とモルタル材料の2種類につき、材齢1日、7日でボルト締結力の経時変化測定試験をそれぞれ3ヶ所で行うとともに、材齢7日でアンカー部の引抜き試験を実施した。

また実構造物の枕版の厚さは250mmであるが、今回の実験では厚さ200mmのコンクリート版にφ78の孔を削孔し、定着アンカーをセットした後に試験を実施した。

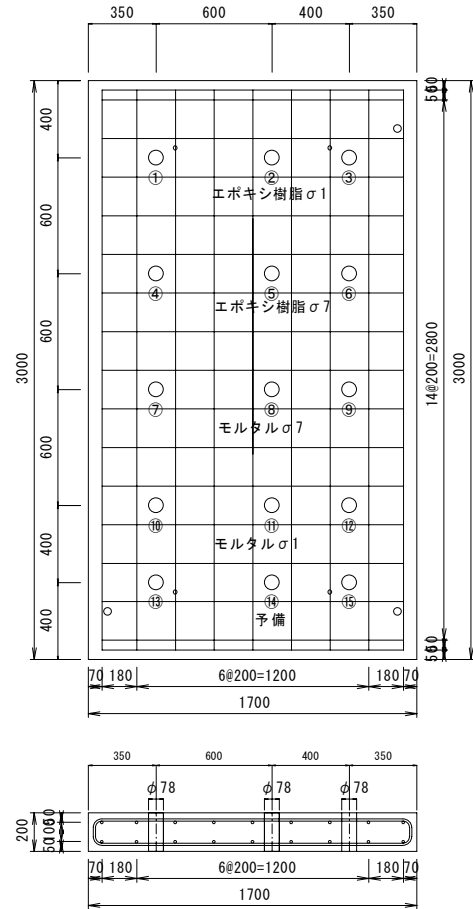


図-66 コンクリート版孔位置図

表-32 試験ケース

| | ボルト締結力の経時変化測定試験 | | 引抜き試験 |
|--------|------------------|------------------|------------------|
| | 材齢1日 | 材齢7日 | 材齢7日 |
| エポキシ樹脂 | 3ヶ所 (図-66①～③) | 3ヶ所 (図-66④～⑥) | 3ヶ所 (図-66④～⑥) |
| モルタル | 3ヶ所 (図-66⑩～⑫) | 3ヶ所 (図-66⑦～⑨) | 3ヶ所 (図-66⑦～⑨) |

(2) 試験手順と方法

a) 定着アンカーのセット

試験は、枕版を想定したコンクリート版(図-66)に、実際に施工する際と同一寸法のφ78の孔を削孔した後、エポキシ樹脂材料は写真-13、モルタルは写真-14に示す方法により材料を練混ぜた後に、写真-15、写真-16に示す方法により材料を注入した。アンカー部定着用材料は、表-33に示すものを使用した。



写真-13 エポキシ樹脂練混ぜ状況



写真-16 エポキシ樹脂注入状況



写真-14 モルタル練混ぜ状況



写真-17 アンカー固定状況



写真-15 エポキシ樹脂注入状況



写真-18 アンカー設置完了

表-33 アンカー部注入材料

| 材料名 | 主成分 | 用途 | メーカー | 比重 |
|----------------|---------------|---------------------|-----------|----------|
| ボンド E2300J | エポキシ樹脂 | 土木建築用低粘度型 エポキシ樹脂 | コニシ(株) | 1.2±0.10 |
| キューテックス Type-A | 特殊セメント 無機系 | セメント系 アンカーボルト定着材 | 電気化学工業(株) | 2.85 |

b) ボルト締結力の経時変化測定試験

ボルト締結力の経時変化測定試験の概要を写真-19 ならび図-67 に示す。

試験は、アンカー部に埋め込んだロングナットを介して、M30 ボルトをひずみ管理により所定の締結力(40kN)までスパナにより手動で導入し、その後一定の時間間隔でひずみを計測し、ボルト締結力の経時変化を測定した。今回の試験では、走行載荷試験を行った際に使用したボルトを使用した。試験前には、ボルトの荷重-ひずみの関係を再確認するために、センターホールジャッキを用いて、写真-20 に示すような方法でボルトのキャリブレーションを行い、ボルトの締結力と発生ひずみの関係(図-68)を確認した。

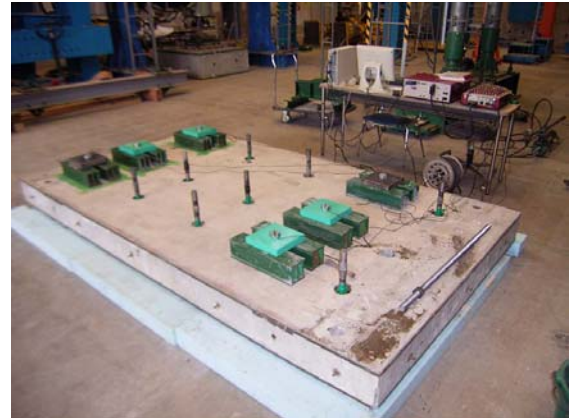


写真-19 ボルト設置状況

c) アンカー部の引抜き試験

アンカー部の引抜き試験の概要を図-69 に、引き抜き試験の状況を写真-21 にそれぞれ示す。本試験は、材齢7日経過したアンカーに対して、センターホールジャッキを用いて載荷した。前述の PC 版と緩衝版との連続性を確認するための静的載荷試験では、ボルトに 5kN~40kN の締結力を導入した供試体に対して、載荷に伴うボルト張力の変動が 10kN 程度に収まっていること、走行載荷試験時のボルト張力の振幅も 20kN 程度で収まっていることから、本試験は、ボルト締結力の3倍である 120kN まで3回の繰り返し加力を実施するとともに、そのうちの1ヶ所はボルト降伏荷重相当(170kN)まで載荷した。



写真-20 ボルトキャリブレーション状況

なお載荷荷重はロードセルにより、基部に発生する変位は写真-22 に示すような方法により測定した。

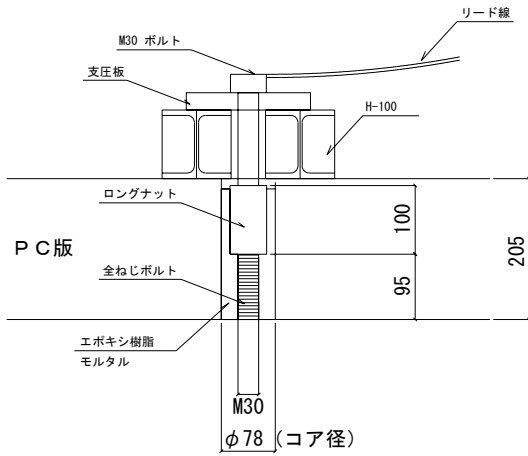


図-67 ボルト設置図



写真-21 引抜き試験状況

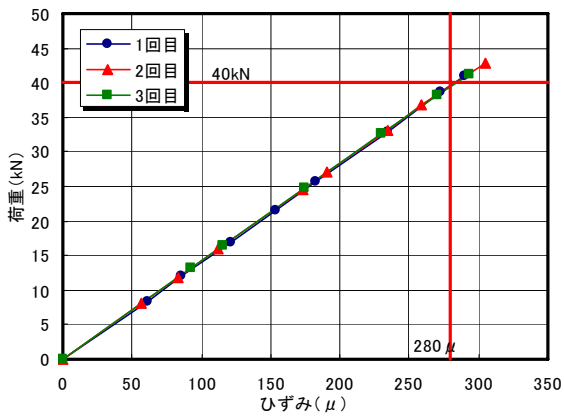


図-68 キャリブレーション結果



写真-22 変位測定状況

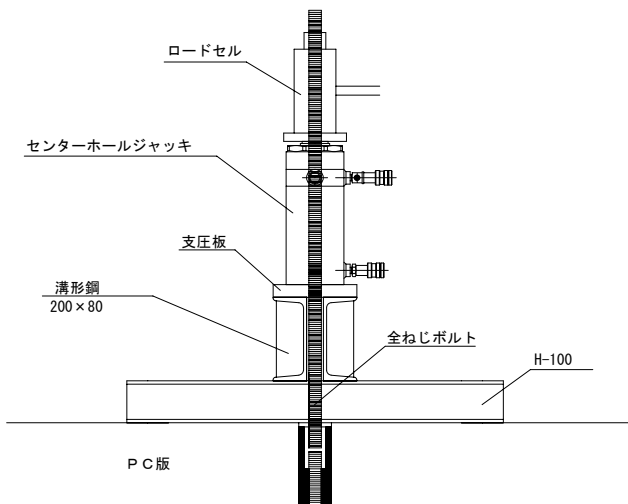


図-69 引抜き試験の概要

(3) 試験結果と考察

a) ボルト締結力の経時変化測定試験の結果

材齢 1 日において締結力を導入してからの経過時間とボルトひずみの変化量を測定した結果を表-34 ならびに図-70 に、材齢 7 日において締結力を導入してからの経過時間とボルトひずみの変化量を測定した結果を表-35 ならびに図-71 にそれぞれ示す。表-34、表-35 に示す結果は、それぞれ締結力を導入してから 2 時間～2 時間半程度の測定後の値を示す。

アンカー定着用材料にエポキシ樹脂を用いた場合は、材齢 1 日でボルトに 40kN の締結力を導入しても締結力の減少が著しく、90%以上の締結力の減少が認められた。一方、アンカー定着用材料にモルタルを用いた場合は、ボルト締結力の減少が 10%程度に収まった。

材齢 7 日で 40kN の締結力を導入した場合は、エポキシ樹脂を用いた場合でもボルト締結力の減少が最大で 11%程度、モルタルの部分は 6%程度に収まった。

今回の実験結果より、走行載荷試験を実施する際にアンカー定着用材料を注入した初期段階でボルト締結力が著しく低下した要因は、定着用材料の影響であることを確認した。また両材料とも、材齢 7 日でボルトに締結力を導入した場合は、40kN のボルト締結力に対して減少量は 10%程度であることを確認した。

b) アンカー部の引抜き試験の結果

アンカー定着用材料としてエポキシ樹脂ならびにモルタルを使用し、120kN まで加力したときの荷重と基部の変位の結果を図-72 に、ボルト降伏荷重の 170kN まで載荷したときの荷重と基部の変位の結果を図-73 にそれぞれ示す。

図-72 に示す 120kN までの繰返し試験の結果より、エポキシ樹脂、モルタルともに荷重-変位の挙動は比例関係にあり、特に大きな変化は認められなかった。またアンカー部分及び周辺のコンクリートにも変化も認められなかった。なお 120kN 加力時の基部の変位は、エポキシ樹脂は平均 0.5mm 程度、モルタルの変位は平均 0.3mm 程度であった。

図-73 に示すボルト降伏荷重(170kN)までの加力も 120kN までの加力と同様に、荷重-変位の挙動は比例関係にあり、アンカー部分および周辺のコンクリートにも変化は認められなかった。

今回の実験結果より、エポキシ樹脂、モルタルともに、アンカー部に必要な耐力は、十分に有しているものと考えられる。現場において樹脂を注入する箇所が湿潤あるいは水中環境であることを考えると、水中環境下においても施工が可能なエポキシ樹脂が有利と考えられること

から、後述する走行載荷試験においてエポキシ樹脂材料を採用し、繰返し荷重に対しても問題ないことを実証したが、モルタル材料についても、繰返し荷重に対しての挙動を確認する必要があるものと考えられる。

表-34 材齢1日後のボルト締結力試験の結果

| ボルトNo. | 導入時ひずみ (μ) | 経過時間 | ひずみ (μ) | ひずみ減少量 (μ) | 減少率 (%) |
|----------|---------------------|------|------------------|---------------------|------------|
| 樹脂No.1 | 273 | 2:27 | 7 | 266 | 97% |
| 樹脂No.2 | 281 | 2:26 | 10 | 271 | 96% |
| 樹脂No.3 | 283 | 2:25 | 24 | 259 | 92% |
| モルタルNo.1 | 270 | 2:23 | 233 | 37 | 14% |
| モルタルNo.2 | 281 | 2:16 | 250 | 31 | 11% |
| モルタルNo.3 | 286 | 2:15 | 262 | 259 | 8% |

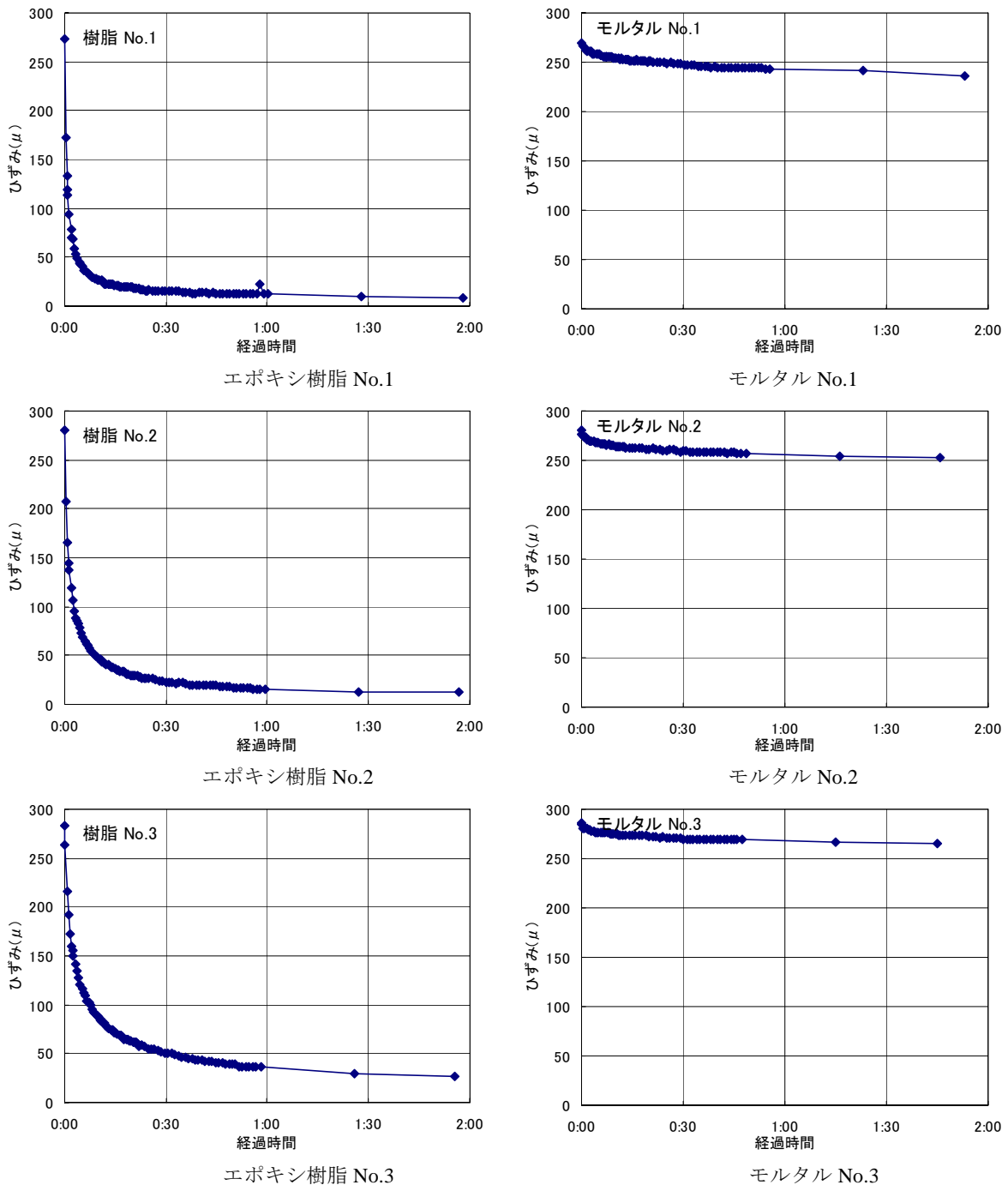
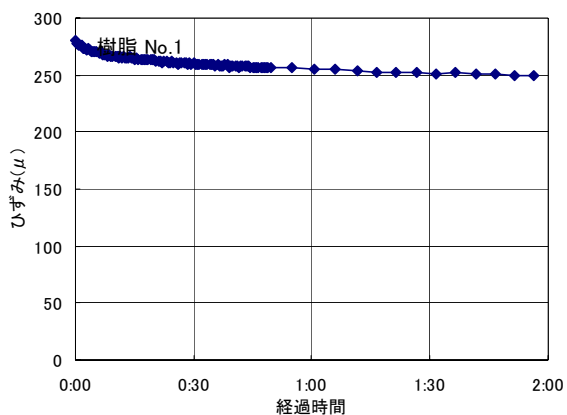


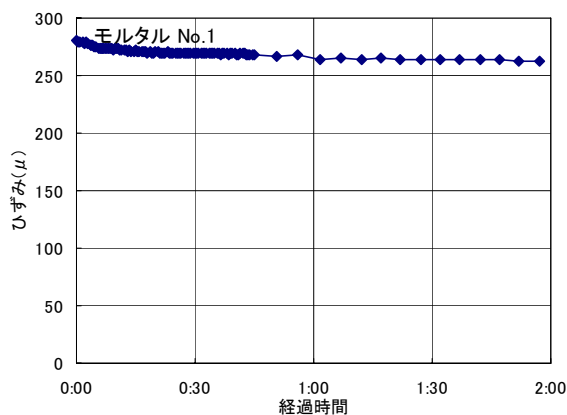
図-70 材齢1日後のボルト締結力試験の結果

表-35 材齢 7 日後の締結力試験の結果

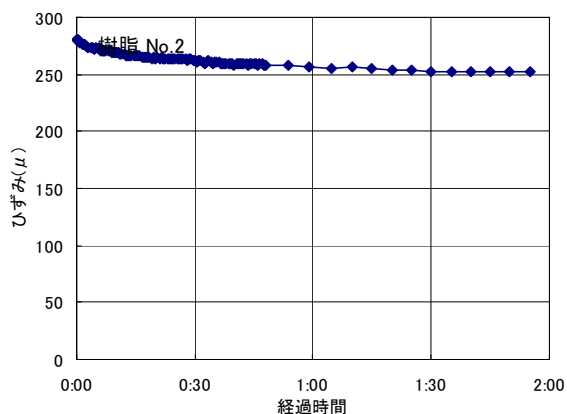
| ボルトNo. | 導入時ひずみ (μ) | 経過時間 | ひずみ (μ) | ひずみ減少量 (μ) | 減少率 (%) |
|-----------|---------------------|------|------------------|---------------------|------------|
| 樹脂No. 1 | 280 | 2:16 | 248 | 32 | 11% |
| 樹脂No. 2 | 281 | 2:15 | 250 | 31 | 11% |
| 樹脂No. 3 | 288 | 2:02 | 266 | 22 | 8% |
| モルタルNo. 1 | 281 | 2:11 | 263 | 18 | 6% |
| モルタルNo. 2 | 274 | 2:05 | 258 | 16 | 6% |
| モルタルNo. 3 | 277 | 2:04 | 265 | 12 | 4% |



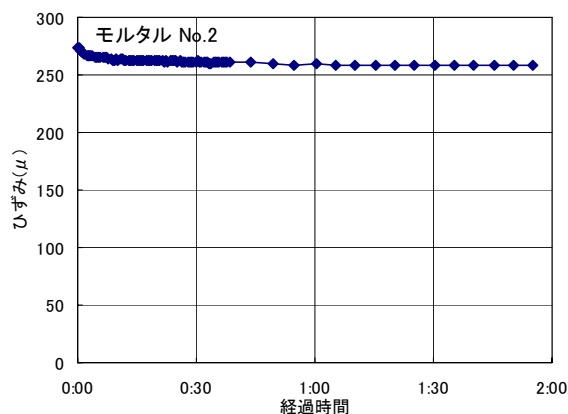
エポキシ樹脂 No.1



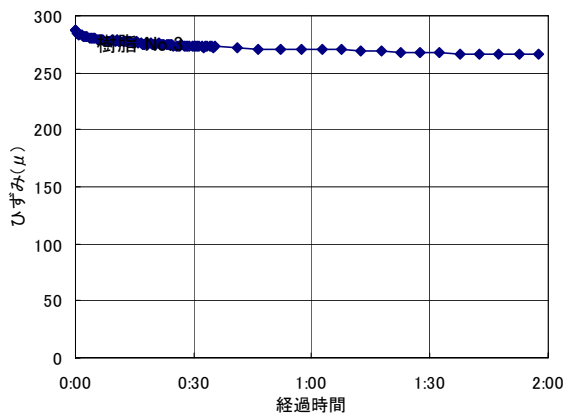
モルタル No.1



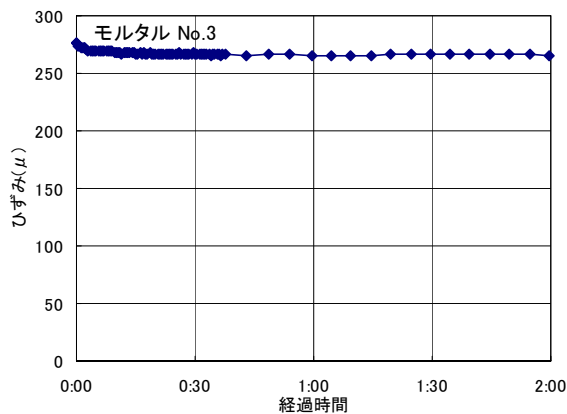
エポキシ樹脂 No.2



モルタル No.2

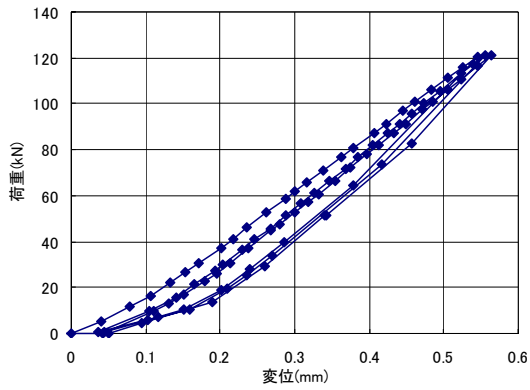


エポキシ樹脂 No.3

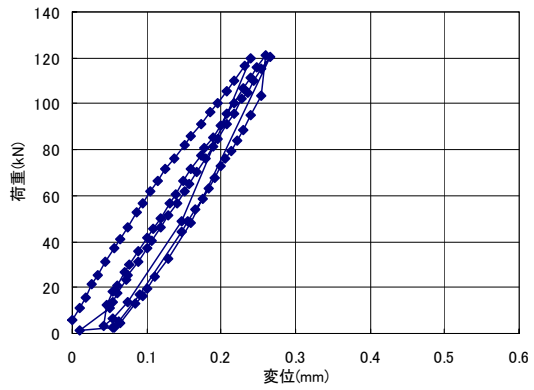


モルタル No.3

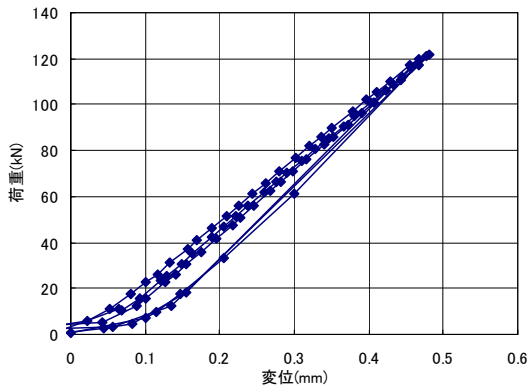
図-71 材齢 7 日後のボルト締結力試験の結果



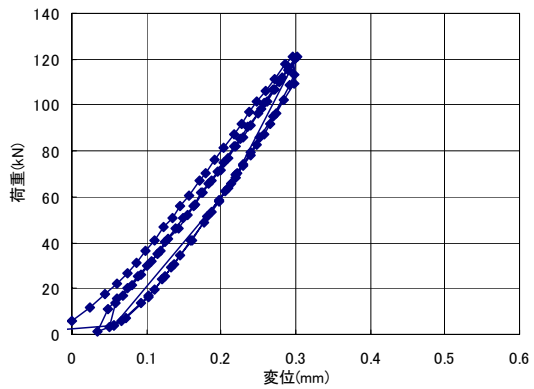
エポキシ樹脂 No.1



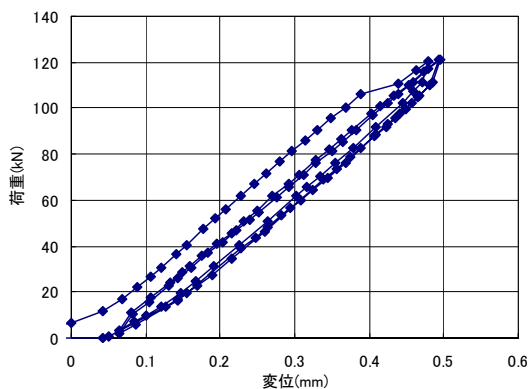
モルタル No.1



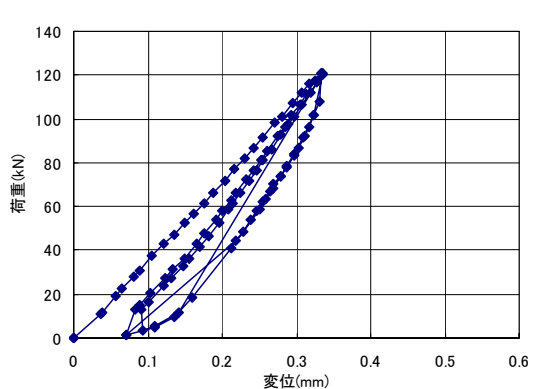
エポキシ樹脂 No.2



モルタル No.2

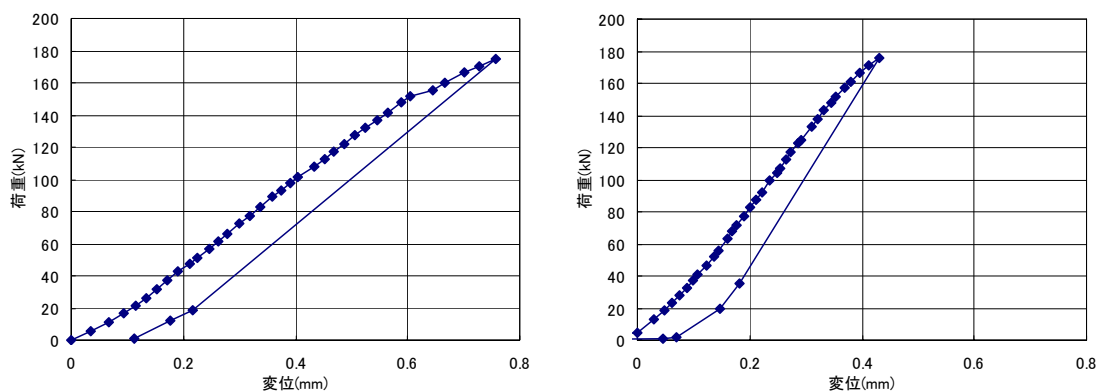


エポキシ樹脂 No.3



モルタル No.3

図-72 アンカー部の引抜き試験の結果



エポキシ樹脂

モルタル

図-73 引抜き試験結果 (ボルト降伏荷重)

表-36 供試体諸元

| No. | ゴムの硬度 | ゴムの厚さ (mm) | ゴムの大きさ (mm) | ゴムと座金の 接着 |
|--------|-------|---------------|----------------|--------------|
| 1 | 80 | 5 | φ 90 | なし |
| 2 | 60 | 3 | φ 90 | なし |
| 3 | 60 | 5 | φ 80 | なし |
| 4 | 80 | 5 | φ 80 | なし |
| 5 | 60 | 5 | φ 90 | あり |
| 6 | 80 | 5 | φ 90 | あり |
| 走行載荷試験 | 60 | 5 | φ 90 | なし |

表-37 締結力導入試験 (緩衝ゴム改良)

| ボルト No. | 導入時ひずみ (μ) | 経過時間 | ひずみ (μ) | ひずみ減少量 (μ) | 減少率 (%) |
|---------|---------------|-------|------------|---------------|------------|
| No.1-1 | 269 | 15:30 | 191 | 78 | 29.0 |
| No.1-2 | 226 | 15:30 | 167 | 59 | 26.1 |
| No.2-1 | 303 | 0:24 | 130 | 173 | 57.1 |
| No.2-2 | 286 | 0:24 | 128 | 158 | 55.2 |
| No.3 | 276 | 0:24 | 126 | 150 | 54.3 |
| No.4 | 295 | 0:24 | 156 | 139 | 47.1 |
| No.5 | 308 | 15:30 | 253 | 55 | 17.9 |
| No.6 | 315 | 15:30 | 268 | 47 | 14.9 |

3.10 緩衝ゴム変形によるボルト締結力減少量確認試験

(1) 試験概要

本試験では、走行載荷試験時のボルト締結力の導入において、締結力の低下の割合が高い緩衝版部の締結金具を対象に、**図-74**に示す座金①と座金②の間に挟み込んだ緩衝ゴムのゴム硬度・厚さ・大きさ・座金との接着という改良を加えた場合に、時間の経過に伴うボルト締結力の減少量の測定を行った。試験パラメータを表-36に示す。

締結力の経時変化の測定は、ボルトに貼付したひずみゲージにより行った。なおボルト締結力は、軸力 40kN に相当する 280 μ を目標に導入した。ゴムと座金の接着は、市販されている瞬間接着剤を使用した。

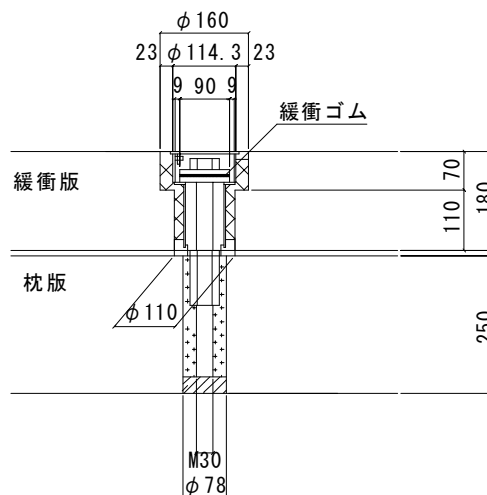


図-74 緩衝版用締結金具の概要

(2) 試験結果と考察

締結力導入後の経過時間とボルトひずみの関係を**図-75**に、各試験シリーズのひずみ減少量をまとめた結果を表-37にそれぞれ示す。なおここに示すボルト締結力の減少率は、緩衝ゴムの影響に加え、アンカー部の影響による締結力の減少も含んだ値を示す。

走行載荷試験時に実施した構造に対して、ゴムの硬度を80と硬くしたNo.1は、硬度60の場合と同じくひずみは約26~29%減少した。ゴムの厚さを3mmに薄くしたNo.2は、締結力導入時に比べて55~57%ひずみが減少した。横方向への変形を抑える効果を期待し、ゴムの直径を座金より10mm小さくしたNo.3, No.4は、それぞれ締結力導入時に比べて54%と47%のひずみが減少した。横方向への変形を抑える効果を期待し、ゴムと上下の座金を接着剤により一体化したNo.5, No.6は、それぞれ締結力導入時に比べて18%と15%とひずみの減少量が小さく、締結力の減少の抑制に大きな効果があると考えられた。

今回の実験結果より、緩衝ゴムの影響による締結力の減少を抑制するための対策としては、緩衝ゴムの上下面を接着剤にて接着し、一体化する構造が最も効果があり、その場合ゴム変形とアンカー樹脂の変形を含む締結力の減少量がゴムの硬度が60で18%、ゴムの硬度が80で15%であり、ゴム硬度が締結力の減少に及ぼす影響は小さかった。よって実施の際に使用する緩衝ゴムは硬度60とし、ゴムと座金の界面は接着剤を使用し、座金と緩衝ゴムを一体化した構造を用いるものとする。

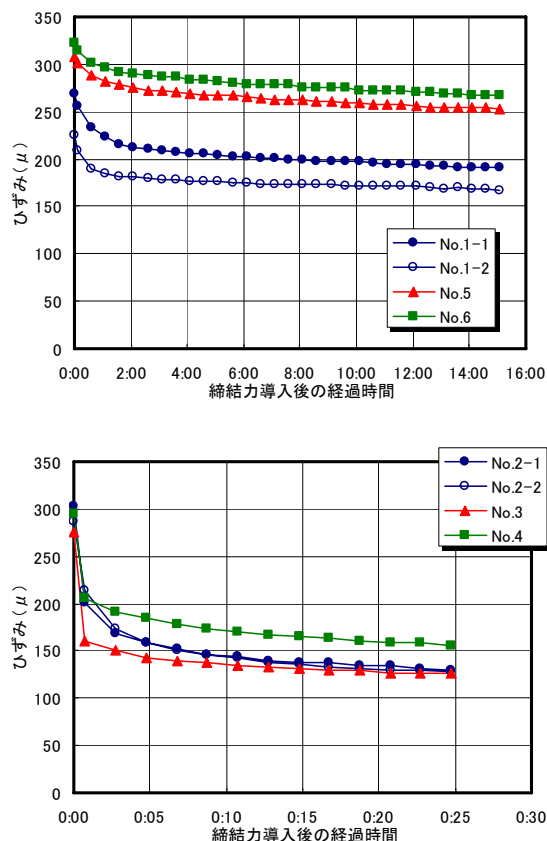


図-75 締結力導入後の経過時間とボルトひずみの関係

3.11 トルク値のばらつき確認試験

(1) 試験概要

4章に示す走行載荷試験におけるボルト締結力の管理は、ボルトに貼付したひずみゲージにより行った。しかし実施工でひずみゲージにより締結力を管理することは現実的ではないことから、ここではボルト締結力の管理方法として、トルクにより管理する手法について検討した。

締付トルクと軸力に関しては、以下の関係が成り立っている。

$$T=K \cdot d \cdot N$$

ここに、

T：締付トルク(N・m)、

K：トルク係数、

d：ボルトの呼び径(m)、

N：軸力(N)

ここでトルク係数 K は、一般に 0.2 程度の値が示されているが、潤滑剤、被締付体の機械的要因、環境、締付速度、ねじの繰返し使用等の影響により変動する傾向にある。

本試験では、走行載荷試験を行った図-76 に示す PC 版 4ヶ所(図-76 の No.1, No.2, No.7, No.8)、緩衝版 4ヶ所(図-76 の No.3, No.4, No.5, No.6)の計 8ヶ所のボルト孔を使用し、トルクレンチを用いて締め付けトルクの試験を行った。

試験手順は、トルクレンチを用いてトルク値を 60N・m(軸力 10kN) ごとに増加させながらひずみを計測し、360N・m(軸力 60kN) までの締結力を導入した。この作業をボルト孔 No.1~No.8 に対して 5 回ずつ行い、トルク値とひずみ(軸力)の関係を測定した。なおトルク値 60N・m は、トルク係数 K=0.2、ボルトの径 d を 0.03(m)、軸力 N=10000(N)として算出した値である。

(2) 試験結果と考察

No.1~No.8 のボルト孔につき、それぞれ 1 回目から 5 回目までの試験に対してトルク値とボルトひずみの関係を示したグラフを図-77 に示す。

本試験に示すトルクとひずみの関係より、全ての試験においてトルク値と鋼材ひずみは比例の関係にあることを確認した。

この結果をもとに、トルク値と鋼材ひずみの近似曲線を算出し、40kN(ボルトひずみ 280μ)の締結力に相当

するトルク値を試験毎に算出した結果を図-78 に示す。図中に示す太線は、同一ボルト孔に対して 5 回試験をした際の平均値を、点線は平均値に対して +10%、-10% に相当する値を示す。

図に示す結果より、同一ボルト孔に対しては、40kN の締結力を導入した際のトルク値のばらつきは、平均値に対してほぼ 10%以内(4kN)に収まる傾向にあった。しかしボルト孔 No.4, No.8 は、他の箇所比べてばらつきが大きく、40kN に相当するトルク値も大きい傾向にあった。この理由は、今回の実験ではアンカー部に充てんするエポキシ樹脂の量が多く、ボルトをセットした段階でエポキシ樹脂がロングナットのねじ部分に浸入し、ボルトが回りにくくなったためトルク値が上昇し、同一締結力に対するトルク値のばらつきも大きくなったものと考えられる。

図-79 は、各ボルト孔の 40kN(ボルトひずみ 280μ)の締結力に相当するトルクの平均値をまとめたものである。左図はボルト孔 No.1~No.8 全てのデータに対するトルク値-ひずみ関係図を示し、右図はエポキシ樹脂がねじ山に浸入し、ねじ山の状態が変化した No.4, No.8 のデータを削除した値を示す。また図中に示す太線は、データの平均値を、点線は平均値に対して +20%、-20% に相当する値を示す。

図に示す結果より、ボルト孔が異なる場合は、40kN の締結力を導入するためのトルク値のばらつきも大きくなる傾向を示した。但し、エポキシ樹脂の影響によりねじ山がおかしくなった No.4 と No.8 を除けば、そのばらつきはほぼ 20%程度(8kN)以内に収まる傾向にあった。

今回の実験結果より、同一ボルト孔に対して 5 回の締結力の導入試験を実施した結果、40kN の締結力に対するトルク値のばらつきは 10%程度以内であること、ねじ山にエポキシ樹脂が浸入した No.4, No.8 を除いたボルト孔の全ての値に対するトルク値のばらつきは、20%程度以内であった。

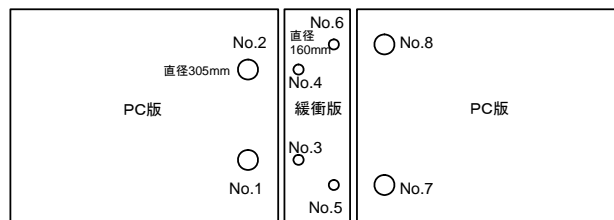
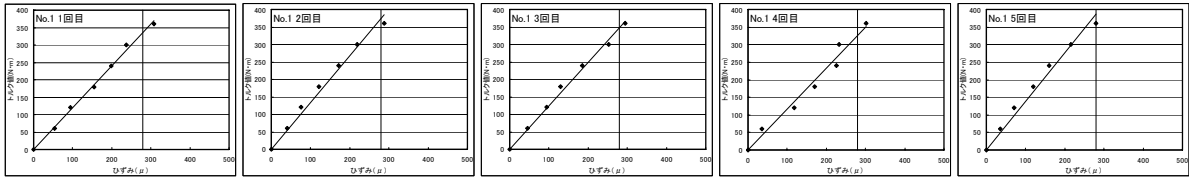
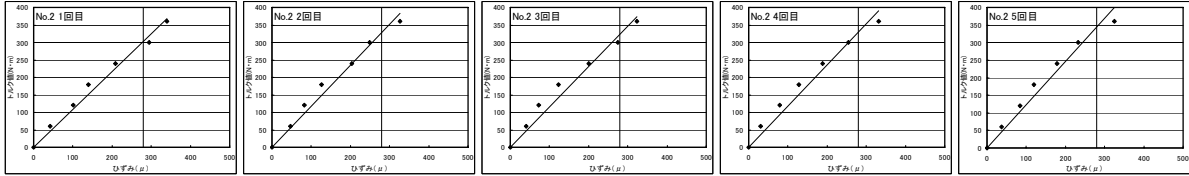


図-76 締結ボルト位置図

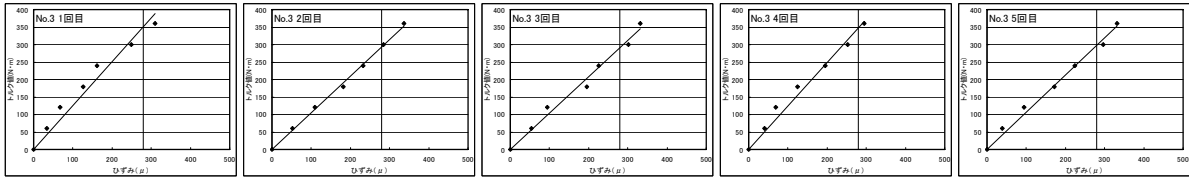
[No.1]



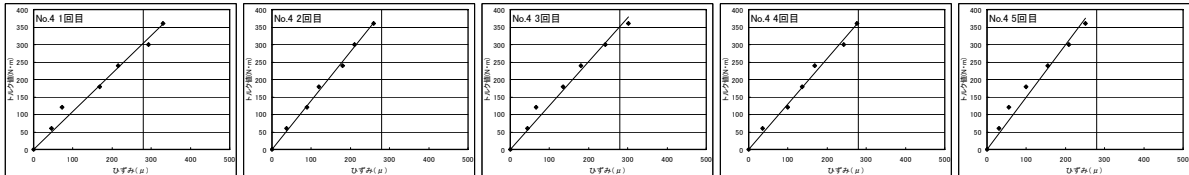
[No.2]



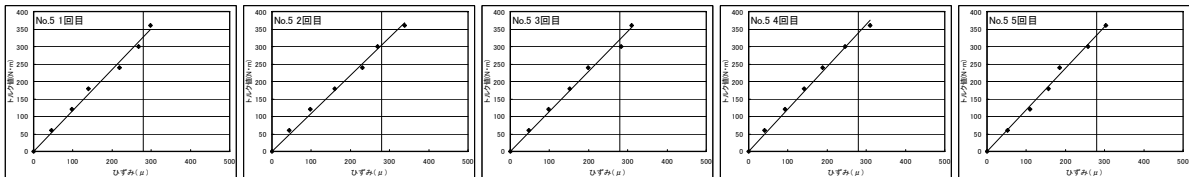
[No.3]



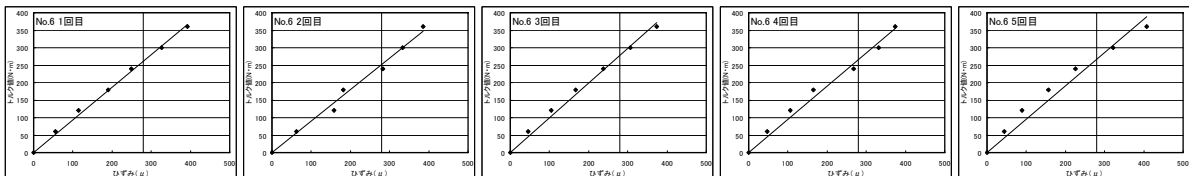
[No.4]



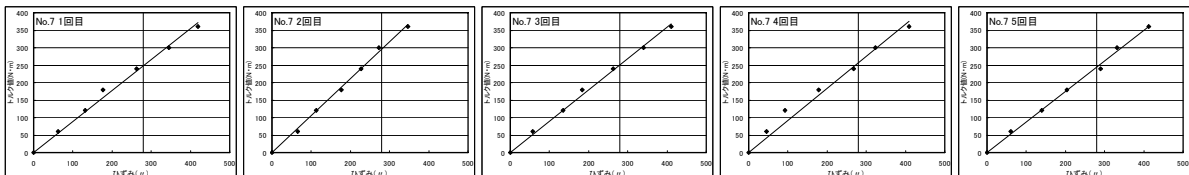
[No.5]



[No.6]



[No.7]



[No.8]

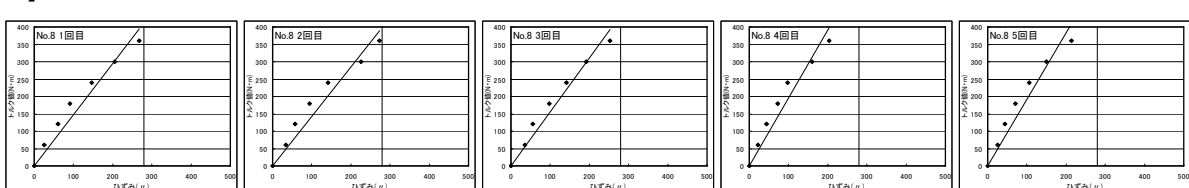


図-77 トルク-ひずみ関係図

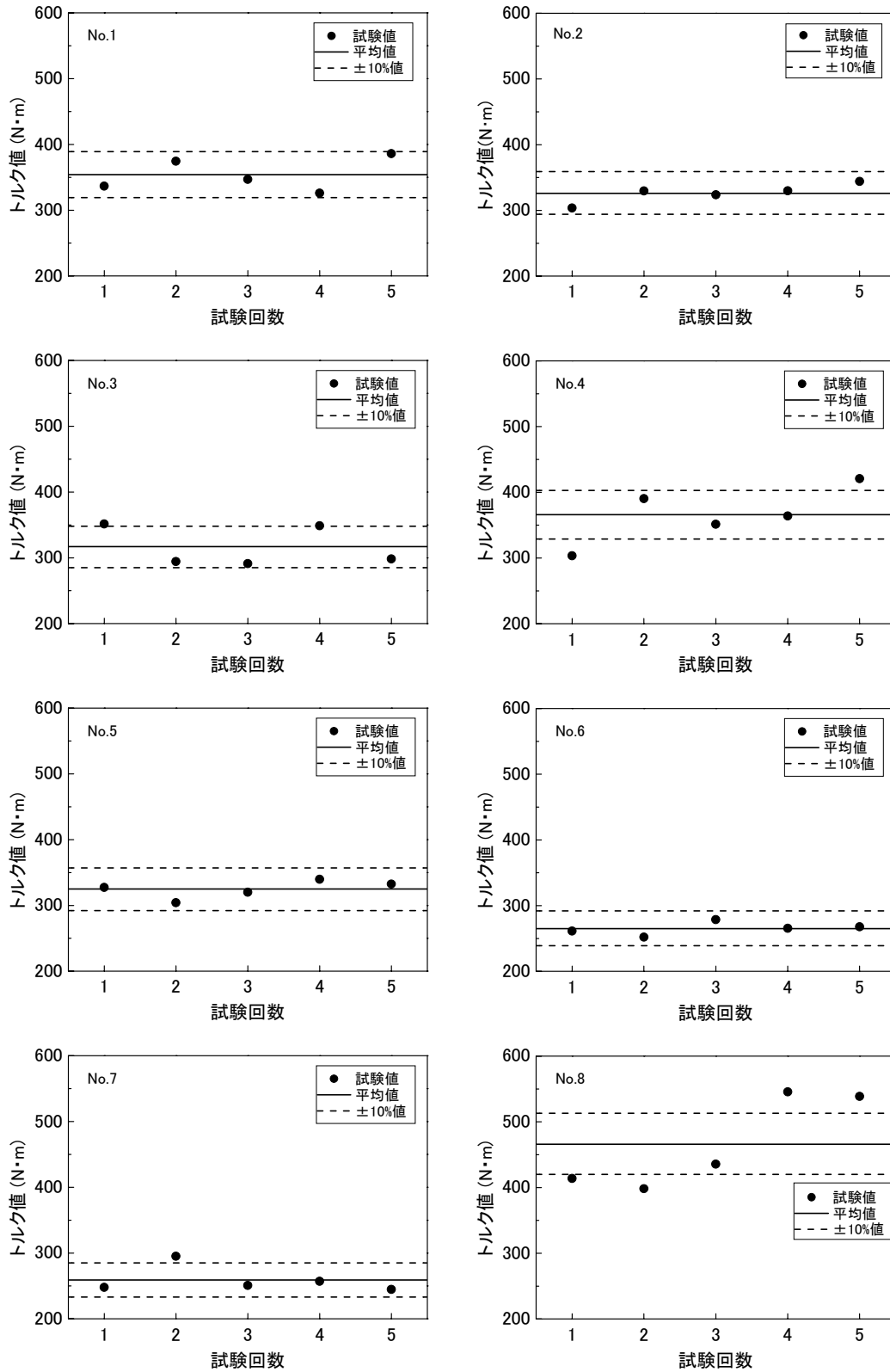


図-78 40kNの締結力に相当するトルク値

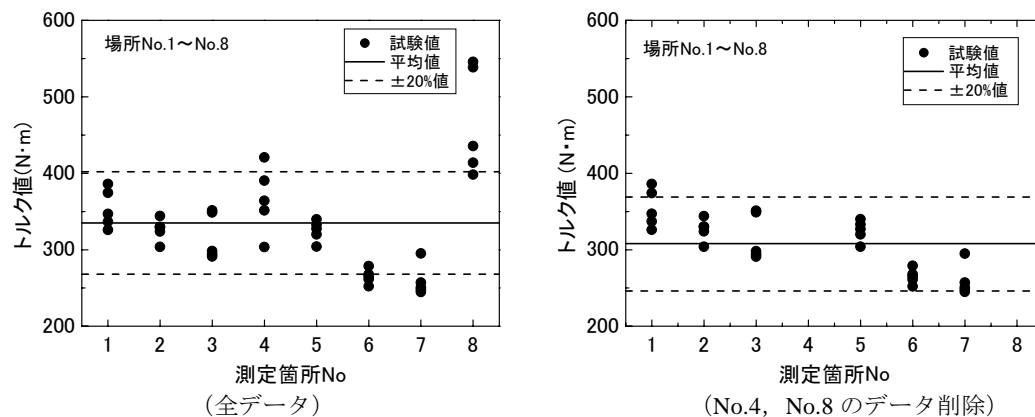


図-79 トルク-ひずみ関係図

表-38 ボルト締結力の減少に及ぼす影響

| 締結力減少の要因 | ① | ② | ③ | ④ |
|----------|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------|
| | 緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形 | トルクのばらつき | PC版の温度伸縮 | PC版と路盤とのなじみ |
| 緩衝版 | 40kNの締結力に対して最大20%程度(8kN) | 40kNの締結力に対して20%(8kN) | — | 最大で10kN程度 |
| PC版 | ゴムの面圧が緩衝版に比べて小さいため、上記以下(8kN) | 40kNの締結力に対して20%(8kN) | 最大で10kN程度 | 最大で10kN程度 |
| 備考 | 3.10 緩衝ゴム改良試験の結果より | 3.11 トルク値のばらつき確認試験の結果より | 3.4 PC版の温度伸縮を模擬したスライド試験(2)の結果より | 走行載荷試験の結果より |

3.12 ボルト締結力の管理方法

今回の実験より、ボルト締結力の減少に及ぼす影響をまとめた結果を表-38に示す。

締結力減少の要因としては、①緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形、②トルクのばらつき、③PC版の温度伸縮に伴う版の移動による変動、④航空機荷重の作用に伴うPC版と路盤のなじみ（荷重作用により路盤が圧密されることによるものなじみ）、による影響が考えられた。

①の緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形による締結力の減少は、40kNの締結力に対して最大で8kN程度の低下であった。

②のトルク値のばらつきは、同一ボルト孔に対して5回の試験を行った結果、40kNの締結力に対して10%程度、ボルト孔全体に対して20%(8kN)程度の低下であった。

③のPC版の温度伸縮に伴うボルト締結力の変動は、スライド試験(2)の結果より最大で10kN程度の低下であった。

④のPC版と路盤とのなじみは、走行載荷試験の結果より最大で10kN程度の低下であった。

このうち③については、締結金具の取り付け方法、PC版の温度伸縮による移動量等により変化することが予想されること、④については走行載荷試験場と実際に何回も繰り返し走行が行われた現地のエプロン舗装版下では状況が異なることが予想される。

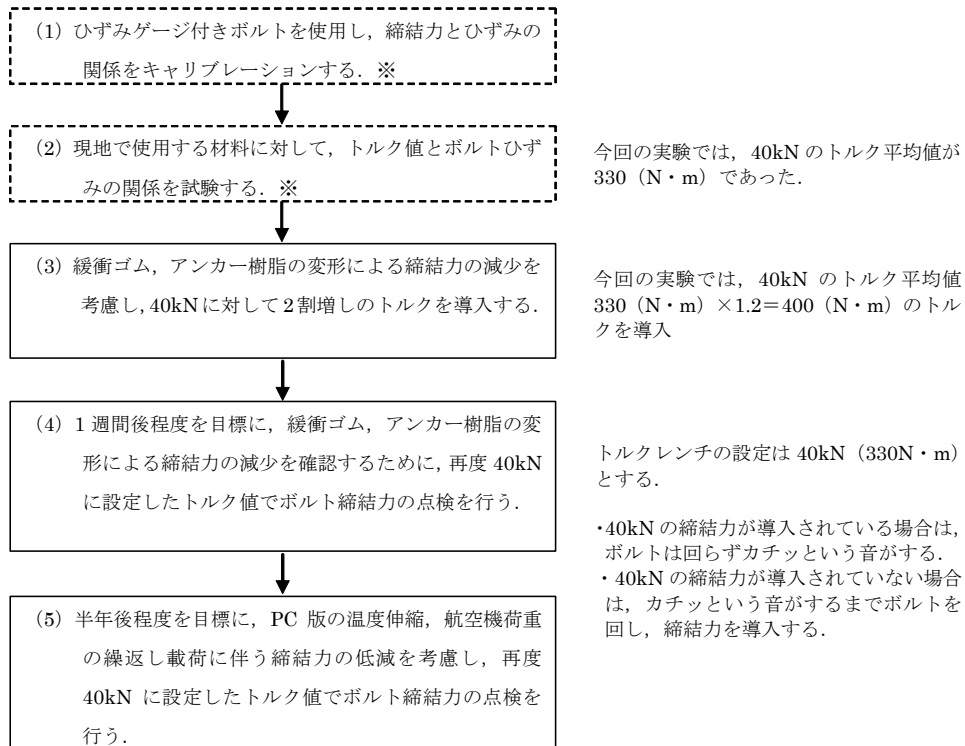
またボルトに過度な締結力を導入した場合は、PC版の温度伸縮に対してボルトが変形してしまう可能性があること、ボルト締結力がPC版と枕版に生じる隙間に及ぼす影響については、PC版と緩衝版の連続性を確認するための静的載荷試験の結果より、ボルト間隔が2.2mの場合、ボルト締結力が40kNでも20kNでもほぼ同等な値であること（図-50）、走行載荷試験の結果より、ボルト間隔が1.1m、2.2mの場合、ボルト締結力が30kN程度に低下していても、PC版と枕版に生じる隙間に大きな差は生じなかったことから、ボルト締結力が20~30kN程度に低下してもポンピング現象、グラウト材の粉砕化が生じる可能性は非常に小さいものと考えられる。

そこでボルト締結力の管理は、ボルト締結力の減少が確実な①の緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形による減少量(8kN)に対しての締結力を余分に与え、締結力導入から1週間後に①による締結力の減少を確認するため、半年程

度経過後には③PC版の温度伸縮, ④航空機の繰り返し载荷によるPC版と路盤のなじみによる締結力の減少を確認するため, 40kNの締付力に設定したトルク値でボルト締結力の点検を行う方法を提案する.

なおアンカー部の材料としてエポキシ樹脂を使用する場合は, 最低でも1週間は材料の養生を行った後に締

結力を導入する必要があるが, この養生期間はエプロン供用に影響を及ぼすものではない.



※締結ボルトの直径が変更する場合, ボルトのねじ山, 締結金具の構造が変更になった場合は, 適宜試験を実施する.

図-80 ボルト締結力の管理フロー

3.13 締結金具の構造・取り付け方法およびボルト締結力管理方法のまとめ

一体化構造を既設 PC 舗装版に採用するために、締結金具の構造・取り付け方法ならびにボルト締結力の管理方法についてまとめた結果を以下に示す。

(1) 締結金具の構造・取り付け方法

締結金具は、全ねじボルト、ロングナット、アンカー定着用材料（エポキシ樹脂あるいはモルタル系材料）、グラウト止めパッキン、カセット、カセットと既設舗装版を一体化させるためのグラウト材、座金、緩衝ゴム、ボルト、蓋から構成した。

実施工を想定したケースにて締結金具の取り付けを行ったが、基本的には問題なく作業を行うことができた。但しボルトのアンカー定着用材料にエポキシ樹脂を用いてボルト締結力を導入する場合には、材料を注入してから 1 週間は養生する必要がある。

アンカー定着用材料としてエポキシ樹脂とモルタル系材料を使用した引抜き試験を行った結果、ボルト降伏荷重(170kN)相当の荷重に対しても、特に異常は認められなかった。

緩衝ゴムと座金を接着し一体化することにより、ゴム変形による締結力を減少することが可能である。

(2) ボルト締結力の管理方法

ボルト締結力の減少に及ぼす要因は、①緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形、②トルクのばらつき、③PC 版の温度伸縮による版の移動による影響、④PC 版上に繰り返し航空機荷重が作用することによる PC 版と路盤とのなじみによる影響 があり、①、②はそれぞれ最大で 8kN 程度、③、④はそれぞれ最大で 10kN 程度の減少が考えられる。

一方で、ボルトに過度な締結力を導入した場合には、PC 版の温度伸縮によりボルトが変形する可能性があること、また PC 版と緩衝版の連続性を確認するための静的載荷試験の結果より、ボルト間隔が 2.2m 程度であればボルト締結力が 20kN でも 40kN でも PC 版と枕版との間に生じる隙間はほぼ同等、走行載荷試験の結果でも、ボルト締結力が 30kN 程度に低下しても、PC 版と枕版との間に生じる隙間はほぼ同等であることが確認された。

そこでボルト締結力に関しては、締結力導入時に 40kN の締結力の 1.2 倍（①緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形による締結力の減少量を考慮）を導入し、その後 1 週間後（①緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形）と半年後程度（③PC 版の温度伸縮による版の移動による影響、④PC 版上

に繰り返し航空機荷重が作用することによる PC 版と路盤とのなじみによる影響）を目安に、トルクレンチに 40kN の締結力相当のトルク値を設定して、ボルトの点検を行う方法を提案する。

3.14 まとめ

場所打ち PC 舗装版の版端部の「ポンピング現象」を改善するための構造的対策として、PC 版の端部と緩衝版をそれぞれ枕版と固定することにより、PC 版端部と緩衝版を一体化する構造について、

- ① 温度変化による PC 版の伸縮が、版端部にボルトを配置しても問題なく作用するか。
- ② ボルト締結力、配置間隔が、緩衝版と PC 版の一体化構造に及ぼす影響
- ③ PC 版への締結金具の取り付け方法ならびにボルト締結力の管理方法

についての検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

①については、PC 版の伸縮を模擬したスライド試験を実施した結果、締結金具内の滑り面にテフロン加工を施した材料を使用すること、ボルト径は締結力、せん断力の検討に加えて曲げ変形を考慮したボルト径を用いることで対応できることを確認した。

②については、PC 版端部を模擬した供試体を製作して静的載荷試験を行い、PC 版が枕版に全面的に支持された構造であれば、ボルトがない状態においても PC 版と枕版との間に生じる隙間の値は小さいこと、PC 版が枕版に支持されていない状況、載荷面付近の PC 版下に空隙がある状況では、締結ボルトを配置することによる PC 版と緩衝版の一体化の効果が確認できた。またボルトの配置間隔が 1.1m の場合は、ボルト締結力によらず一体化の効果があること、ボルト間隔が 2.2m、3.3m と広くなるに従い、ボルト締結力により PC 版と枕版との間に生じる隙間に差が生じる傾向を示した。

③については、4 章の走行載荷試験を実施する際に締結金具の取り付け試験を行い、基本的には問題なく作業を行うことができた。

ボルト締結力の減少に及ぼす要因は、(1) 緩衝ゴム・アンカー樹脂の変形、(2) トルクのばらつき、(3) PC 版の温度伸縮による版の移動による影響、(4) PC 版上に繰り返し航空機荷重が作用することによる PC 版と路盤とのなじみによる影響 があるため、これらの影響を考慮したボルト締結力の管理方法を提案した。