

論文 RCセグメント用鋼製型枠に生じる圧力分布特性に関する検討

松浪 康行*1・阿部 義*2・染谷 洋樹*3・長嶋 文雄*4

要旨：RCセグメント用鋼製型枠に圧力計と加速度計を取付け、振動台加振による固練りコンクリートの締固め時に、型枠内部に作用する圧力分布などを計測した。得られた圧力分布波形の振幅確率密度分布解析、周波数分析、圧力分布特性に関する調査などを通して、型枠に作用する圧力のモデル化に関する検討を行った。また、この圧力モデルを用いて鋼製型枠の三次元FEM解析を行い、型枠に生じる応力分布特性などを明らかにした。

キーワード：RCセグメント型枠、圧力分布特性、周波数分析、FEM解析

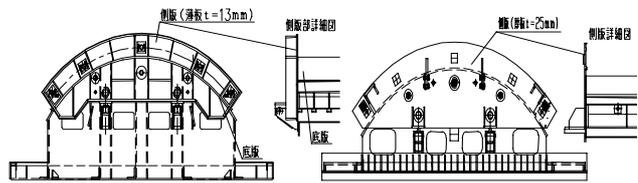
1. はじめに

RCセグメント型枠に要求される性能は、製品の寸法精度の確保だけでなく、内部に配置した鉄筋位置の保持、コンクリート打設圧力に対する剛性確保など多様である。また、密実なコンクリートにするため振動機による締固めが行われており、振動に対する耐力も要求される。しかし、型枠への要求性能に関する詳しい検討は未だ十分に行われていない。また、型枠を介して伝達する振動と固練りコンクリートの締固めメカニズムは、未だ定量的に解明されていない^{1),2)}。さらに、型枠は締固め振動を受けるために、特に型枠組立てボルトおよびその周辺の応力集中部分には金属疲労が懸念されるが、この種の問題を扱った例は過去に見受けられない。

そこで、RCセグメント用鋼製型枠に圧力計と加速度計を取付け、振動台加振による固練りコンクリートの締固め時に、型枠内部に作用する圧力分布などを計測した。得られた圧力分布波形の振幅確率密度分布解析、周波数分析、圧力分布特性に関する調査などを通して型枠に作用する圧力のモデル化に関する検討を行った。また、この圧力モデルを用いて鋼製型枠の三次元FEM解析を行い、型枠に生じる応力分布特性などを明らかにした。

2. 振動試験方法

振動試験方法は、一般的にRCセグメント製造に用いられているリブ型・型枠（内径 3200 × 桁高 200 : 5 分割）と、比較検討用としてフラット型・型枠の2種類を用いた。型枠重量は、リブ型およびフラット型ともに約 45kN に合わせ、フラット型は、重量調整のため、型枠下段に厚板（23kN）を取付けてある。型枠の特徴は、リブ型では側版にリブで補剛された薄板（ $t=13\text{mm}$ ）を用いているのに対して、フラット型は側版に厚板（ $t=25\text{mm}$ ）を用いていることである。



リブ型 (H=575mm) フラット型 (H=248mm)

$I=22.0 \times 10^6 \text{mm}^4$

$I=1.3 \times 10^6 \text{mm}^4$

() 内数値は、重心位置を示す。

図-1. 振動試験に使用した型枠

*1 石川島建材工業(株) セグメント事業本部 技術部 工修 (正会員)

*2 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

*3 石川島建材工業(株) セグメント事業本部 技術部長

*4 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工博

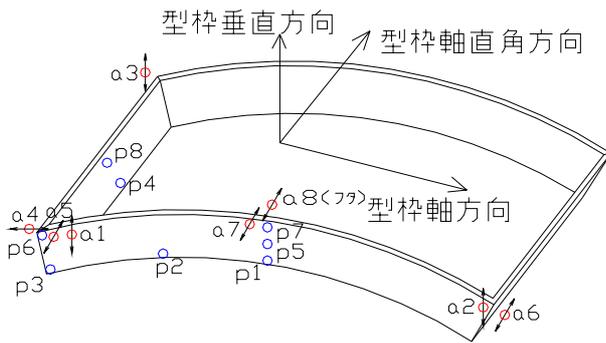


図-2 型枠計測位置

表-1 計測項目

	加速度計	圧力計
型枠軸方向	a5 ~ a7	p1 ~ p3
型枠軸直角	a4	
打設高さ方向		p1, p5, p7
側板端部		p3, p6
端板中央		p4, p8
垂直方向	a1 ~ a3	
型枠用鋼製蓋	a7, a8	

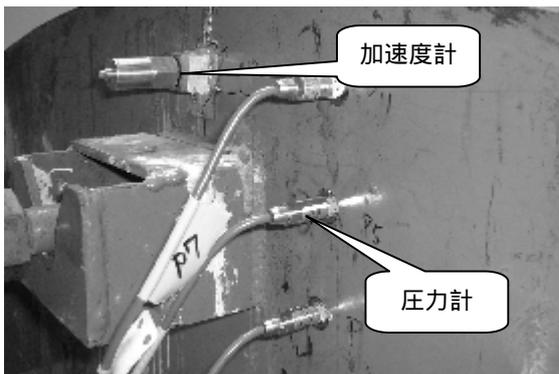


図-3.センサー取付け状況

表-2 振動試験ケース

	鉄筋無し	鉄筋有り
リブ型 (R)	R1, R2	RS1, RS2
フラット型 (F)	F1, F2	FS1, FS2

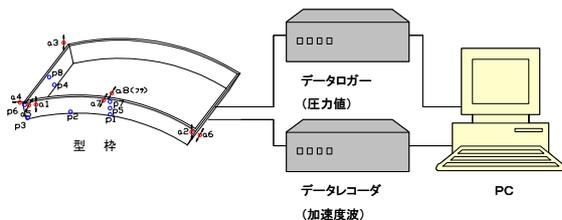


図-4 計測システム図

振動試験は、セグメント工場でセグメント製造ラインにて行った。計測に用いた（圧力計

PGM-5KC (500kMPa)) および加速度計 (0.2 ~ 8000Hz) の型枠設置位置を図-2 に示す。計測項目を表-1 に示す。また、締固め振動台にも加速度計を取付け、加振機の周波数特性を計測した。各センサーの取付け状況を、図-3 に示す。使用した加振機は周波数 50Hz の回転式である。加振機は締固め振動台下面に取付けられており、回転方向は型枠軸方向周りに回転するものである。また、加振時に型枠は締固め振動台に拘束せず、ストッパーに当たるまで自由にロッキング動と移動が可能であった。

計測は、型枠内へコンクリートを3回に分けて打設した際の、最終コンクリート充填締固め時に行った。計測システム図を、図-4 に示す。

振動試験ケースは、表-2 に示すように、型枠種別のほかに、鉄筋の有無についても試験を行った。試験は、各ケースについて2回、合計8回の振動試験を行った。

3. 締固め振動台の特性

振動試験に用いた締固め振動機の特徴を把握するため、締固め振動台のみを振動させ、加速度の計測を行った。締固め振動台の概略図を、図-5 に示すが、4隅を空気ばねで支持する構造となっている。計測は、振動台の4隅、すなわち EX1 (a_t1, a_t5), EX2 (a_t2, a_t6), EN1 (a_t3, a_t7), EN2 (a_t4, a_t8), で行った。型枠はEN側から振動室へ搬入し、振動室での振動締固め後にEX側より搬出した。

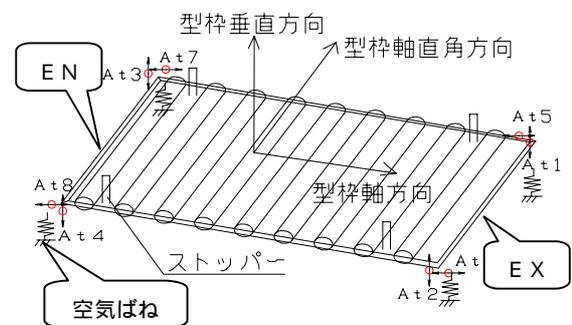


図-5 締固め振動台

計測した加速度波より、加速度平均パワーを

式(1)よりもとめた結果を図-6示す。

$$\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \approx \frac{1}{T} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \Delta t = \frac{1}{N \Delta t} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \Delta t = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \quad (1)$$

T:総振動時間、 t:単位時間(2ms)、N:分割数

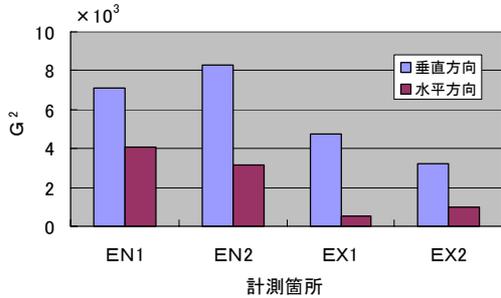


図-6. 締固め振動台加速度平均パワー

4隅すべてにおいて、垂直方向の加速度平均パワーが、水平方向の加速度平均パワーの約2倍程度となっている。振幅では、3割程度の差を示していた。これは、主に空気ばねによる影響と思われる。

製造ラインのE N側とE X側に加速度平均パワーに差が確認された。これは、加振機の加振中心と締固め台の重心にずれがあったためと考えられる。標準偏差値は、垂直方向で2.3G、水平方向で1.4Gを示していた。

4. 振動試験結果

4.1 振幅確率密度分布解析

計測された加速度波(F 2 - a 5)と振幅確率密度分析した結果を、図-7に示す。計測された加速度波は定常的な波形ではなく、加速度分布を把握するために統計的解析が必要であった。確率密度分布解析結果から、式(2)を用いて、標準偏差値を求めた(図-8)。

$$= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 - \bar{x}^2} \quad (2)$$

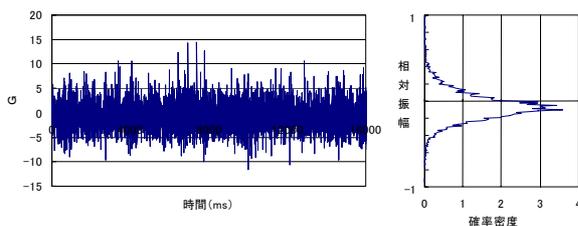


図-7. 加速度波形と振幅確率密度分布例

(F 2 - a 5)

フラット型(約2.8G)の方が、リブ型(約1.0G)の約2.8倍程度の標準偏差値を示しており、フラット型は、伝達振動加速度振幅が大きいことが確認できた。フラット型は、重量調整のための厚板が型枠下段に取付けられているため、型枠重心位置がリブ型より下回っている。これにより、フラット型の方がロッキングを起こしやすい構造であったことが原因の一つとして考えられる。鉄筋の有無の違いは、フラット型で鉄筋無し/鉄筋有り=1.1であり、リブ型では1.2であった。これは、コンクリート内に鉄筋があ

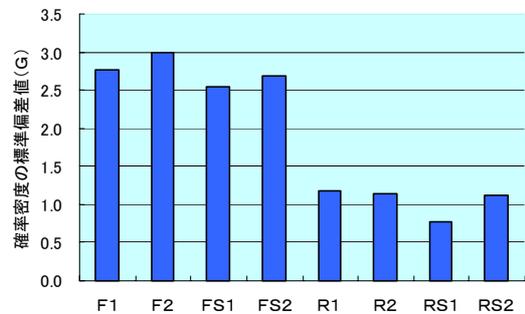


図-8. 加速度波の標準偏差値

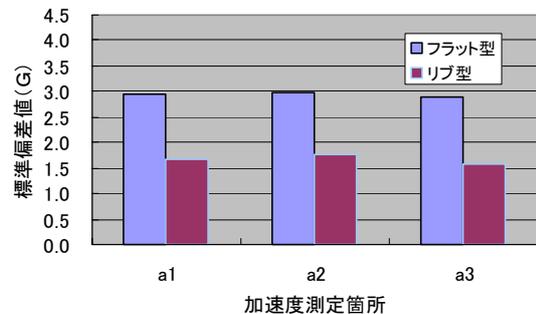


図-9. 型枠垂直(上下)方向の加速度分布

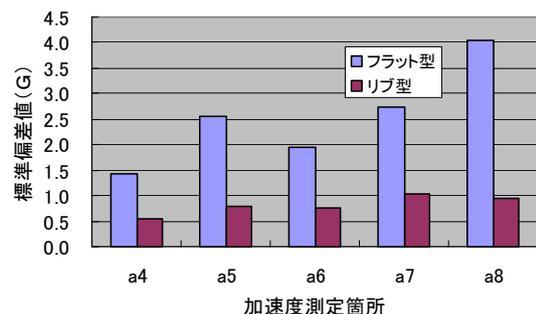


図-10. 型枠軸および軸直角方向の加速度分布

ることにより、型枠重心位置が上昇したためと思われる。

締固めに要する加振時間は、フラット型が平均3分間、リブ型が平均5分間であった。振動時間計測結果にフラット型の鉄筋の有無による違いは、確認できなかったが、フラット型は、リブ型よりコンクリート締固め性能が上回っていることが確認された。

以上より、発生加速度を大きくすることが、型枠の締固め性能を向上させる要因であり、締固め性能を定量的に評価できる指標であることが確認できた。

次に、型枠垂直、型枠軸直角（水平）および型枠軸方向（水平）方向の加速度波の標準偏差値を、図-9,10に示す。垂直方向(a1~a3)は、フラット型とリブ型ともに、それぞれほぼ均一な加速度標準偏差値となっている。フラット型では垂直方向は約2.9G、型枠軸直角（水平）方向は約2.4G（a5~a7の平均値）であり、加振機の加速度値の約1.5倍となっている。リブ型では垂直方向が約1.7G、型枠軸直角（水平）方向（約0.9G）であり、加振機の加速度の約0.7倍となっていた。

以上より、フラット型は、リブ型より大きい加速度が分布していることが確認できた。

4.2 圧力分布特性

計測された圧力値の振幅確率密度分析結果から、式(3)により求めた平均圧力値を、図-11に示す。

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \quad (3)$$

フラット型がリブ型の約1.3倍の平均圧力値を示している。これは、加速度波測定結果と同じ理由と考えられる。

同様に圧力値から標準偏差を求めた結果を、図-12に示す。加速度分布と同様な傾向が見られ、フラット型がリブ型の約1.5倍の標準偏差値を示している。平均圧力値と標準偏差値を加

えた動的圧力値を、図-13に示す。フラット型の圧力値は、鉄筋の有無に拘わらず一定の値を示している。フラット型はリブ型よりも大きくなっており、型枠構造の違いが、圧力値にも大きな影響を与えることが確認できた。圧力値の

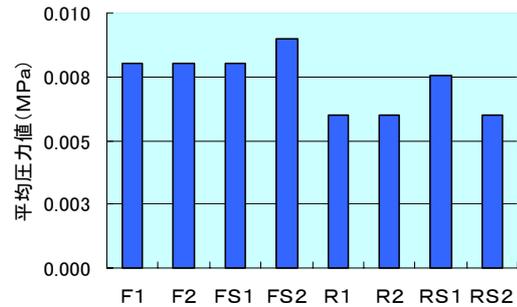


図-11.平均圧力値

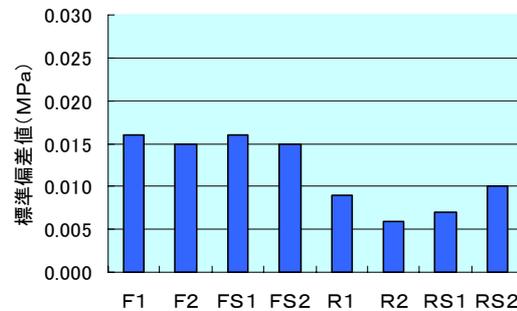


図-12.標準偏差値

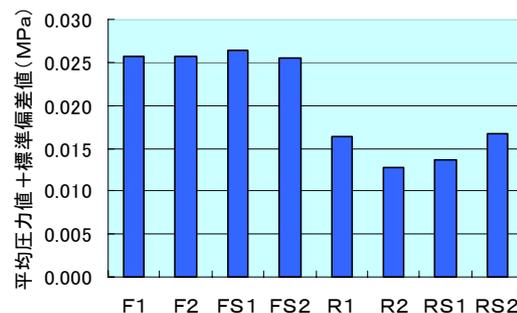


図-13.動的圧力値

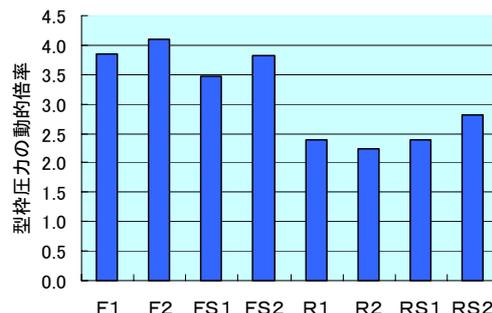


図-14.型枠圧力の動的倍率

違いは、フラット型/リブ型=約1.7であった。

次に、圧力計測位置にコンクリート打設圧力（静圧）が作用するとした「静的圧力」に対する図-13で示した動的圧力値の比、すなわち動的倍率を、図-14に示す。静的圧力値は、(コンクリート単位体積重量) × (圧力計の打設高さ) として算出した。図-14に示すように、圧力の動的倍率は、約2.2~約4.1倍である。動的応答倍率は、測定個所による差は特に見受けられなかった。ただし、コンクリート打設時の衝撃が大きいp7の圧力データに異常が認められたため、省いている。

型枠に作用する圧力分布を、図-15に示す。圧力は、フラット型およびリブ型に拘わらず、コンクリート打設高さと同振動加速度振幅に相関があることが確認された。図中に平均圧力値と標準偏差値を分けて示したが、平均圧力値は静的圧力に良く対応している。したがって、標準偏差値に対応するのは動的圧力であると判断される。図-16, 17に型枠端部中央部(p8, p4)および型枠側板隅角部(p6, p3)の圧力分布を示すが、両者も型枠軸方向の圧力分布と同様な傾向を示している。

4.3 周波数分析

加速度計測結果および圧力計測結果を、フーリエスペクトル解析した一例を、図-18に示す。スペクトル解析の結果、フラット型およびリブ型ともに、50Hzにてピークを有しており、加振機の振動を確実に伝達していることが確認された。その中では、型枠垂直方向が卓越しており、型枠軸方向が最も小さい値を示す傾向にあった。これは、前述した結果と同様な理由であると考えられる。

5. FEM解析

振動試験結果を用いてフラット型の三次元FEM解析を行った。解析には、1/4モデルを用い準静的解析を行った。側版、端部および底板

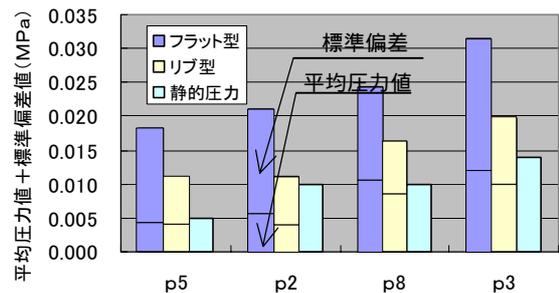


図-15.型枠軸方向の圧力分布

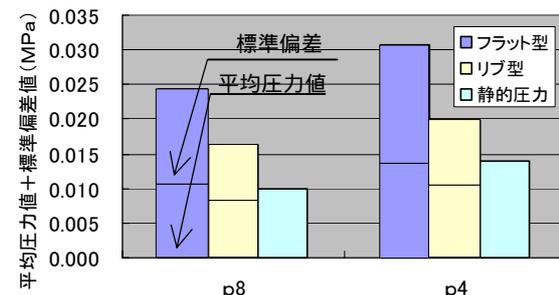


図-16.型枠端部（中央部）の圧力分布

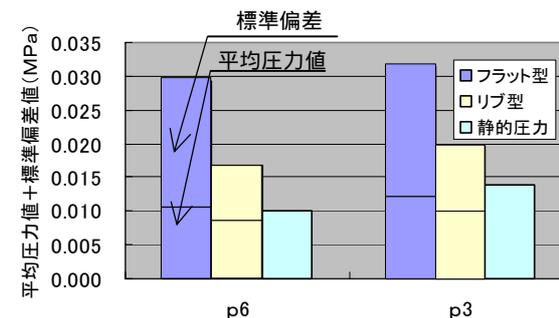


図-17.型枠端部（隅角部）の圧力分布

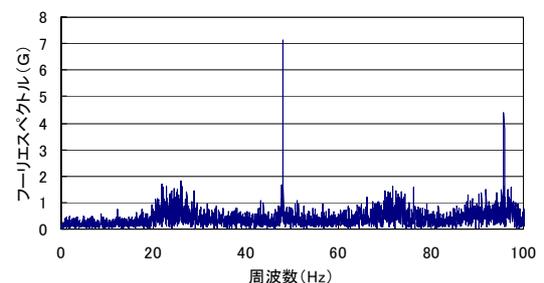


図-18.スペクトル解析結果

表-3 解析モデルの材料特性

鋼材	特性値
質量密度 (N・sec ² /mm ⁴)	8.01 × 10 ⁻⁹
弾性係数 (N/mm ²)	2.10 × 10 ⁵
ポアソン比	0.3

は、ソリッド要素とし、脚部補強版は板要素とした。境界条件は、側版と本体は、ボルト結合（ピン結合）とし、その他溶接は剛結合とした。荷重は、フラット型圧力値の3倍（ $p=0.03 \times 3 \times 0.1$ ）である0.1MPaを側版、端版および底版に作用させた。解析には鋼材自重も考慮して静的解析を行った。型枠解析条件を表-3に示す。

解析結果を、図-19に示す。最大応力度発生位置は、側版と本体との固定ボルト周りであり、そのほかに大きな応力集中は見られなかった。最大発生応力は、 $\sigma = 16.1 \text{ N/mm}^2$ であり、これは、変動振幅応力を受ける際の、応力範囲の打ち切り限界 $\sigma_{ve} = 42 \text{ N/mm}^2$ （鋼構造物の疲労設計指針・同解説：（社）日本鋼構造協会編）以内であり、型枠が疲労特性を有していることが確認できた。このとき最大変位は、1.137mmであった。これにより、型枠振動時の応力測定を型枠に作用する圧力値、加速度を計測することで型枠の疲労特性を推測することができると思われる。

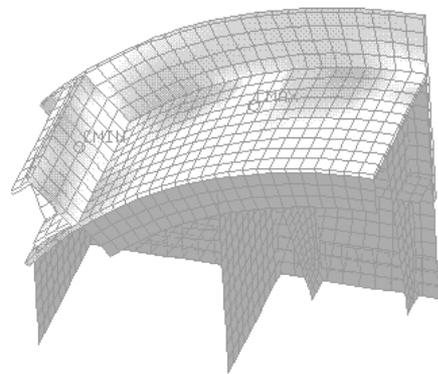
6. おわりに

セグメント製造ラインを用い、ほぼ実際に近い状況で、RCセグメント用鋼製型枠に生じる加速度や固練りコンクリートからの圧力を計測した結果をまとめると以下ようになる。

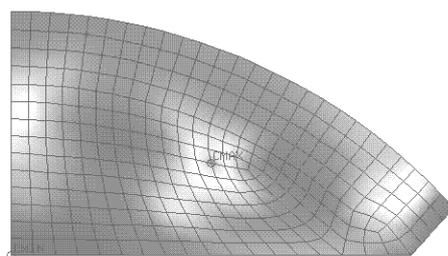
- (1) 計測波はランダムな成分を含むためデータ処理に苦労したが、振幅確率密度分布解析を用いることで、特性の抽出が比較的容易にできることがわかった。
- (2) 同一加振条件で、総重量もほぼ同じ型枠であっても、構造形式によっては、その振動加速度振幅は締固め振動台単独の加振加速度に対して減少したり、また逆に増幅したりすることがわかった。
- (3) 鉄筋かごの有無による加速度、圧力値の影響は、少なかった。また、鉄筋かごによるコンクリートの動揺に対する拘束作用は殆どないものと考えられる。

- (4) 型枠に生じる圧力は、振動加速度振幅に比例する部分と、コンクリート打設高さに比例する部分とで構成されることがわかった。
- (5) 2種類の圧力は、それぞれ動的圧力と静的圧力と見なすことができ、その動的倍率は当然場所によって異なるが、おおよそ2.2～4.1程度であった。
- (6) FEMによる型枠の準静的解析を行ったところ、最大応力発生位置は固定ボルト近傍であることがわかった。

今後は、加振機の周波数と材料分離の影響や、最適な締固め時間、振動方式、型枠の大きさによる違いの検討を進めて行きたいと思う。



「型枠 1/4 モデル図」



「側版応力分布」

図-19. FEM解析結果

「参考文献」

- 1) 若林正憲他：セグメント振動締固め製作時の合理的な加振方法の研究：トンネル工学研究論文報告書第7巻 1997年11月報告(41)：pp.325-330,1997
- 2) 尾上好夫，橘義規，橋本博英，若林正憲：セグメント振動締固め製作時の発生加速度の予測：土木学会第52回年次学術講演会講演概要集：pp.182-183,1997