

29. 厚層締固め方法と密度管理

○明石工業高専・江口忠臣
愛媛大学名誉教授・室達朗

1. はじめに

締固めは土工の品質を大きく支配する重要な工法である。転圧を伴う土質材料の締固めにおいては、締固め層内の均質性を確保するため薄層による締固めを基本としている。しかし、近年の土工量が増大している現場において、効率的な締固め方法が必要とされており、その対策として厚層による締固めについていくつかの検討が為されている^{1), 2)}。筆者らはこれまでいくつかの厚層締固めに関する検討を行ってきた^{3), 4)}。一方、厚層締固めにおいては深層部の密度を保証するための計測システムが必要となるが、これを簡易に行うことは困難である。

本稿ではこれまで検討してきたタイヤ式車両および履带式車両の転圧効果の厚層地盤に及ぼす機械条件を考察するとともに、転圧によって生じる地盤内応力から深層部の密度を算出する新たな密度管理手法の適応性を検討した。

2. 履帯およびタイヤ締固め

本研究で使用した履帯およびタイヤによる締固め実

験装置は図1, 2に示すようなものである。既報のタイヤ転圧実験においては重ダンプトラックによる試験施工も行っている。

履帯転圧装置はT字型グラウサを持つゴム製で鉛直方向に強制振動させる加振機を登載している。装置重量は4.9kN, 最大加振力は9.8kNであり、装置重量の2倍の加振力を有する。土槽サイズは幅1500mm, 長さ6500mmである。

タイヤ転圧装置はメインフレーム、載荷用エアシリンダ(最大負荷20kN)、載荷フレーム、鋼製土槽、土槽送り装置、土槽移動用レール、供試タイヤ、動力装置で構成されている。土槽のサイズは幅1000mm, 長さ1200mm, 高さ3500mmである。

供試地盤は、試料砂として愛媛県松山産のまさ土を使用した。気乾燥状態で最大粒径4.75mm以下に調整した。まさ土の土質特性は土粒子比重(27℃/15℃) $G_s=2.66$, 平均粒径 $D_{50}=0.78$ mm, 均等係数 $U_c=12.0$, 曲率係数 $U_c=3.0$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.88\text{g/cm}^3$, 最適含水比 $w_{opt}=12.8\%$ である。最

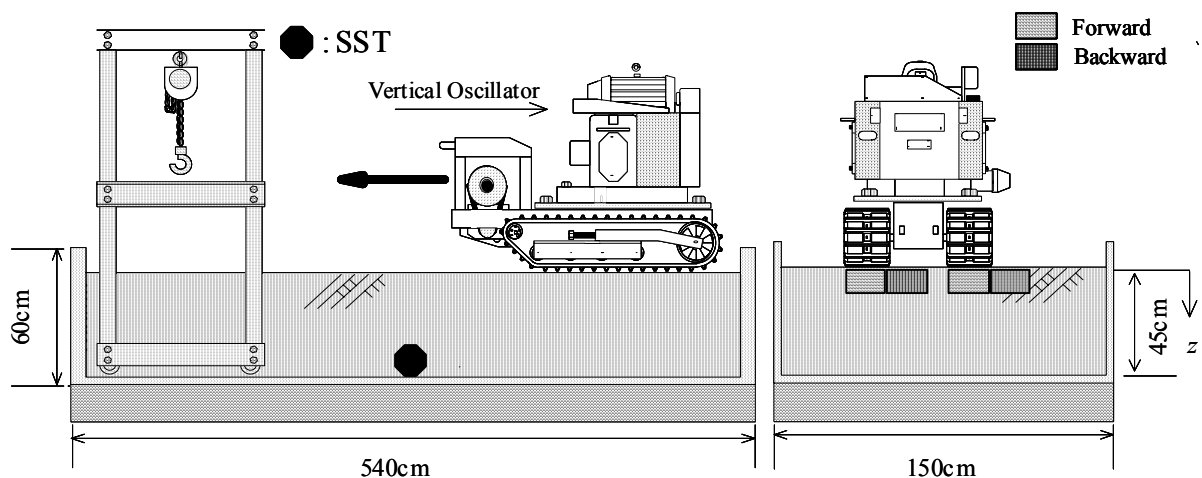


図1 履帯転圧実験装置

適含水比はJIS A 1210 1.1aの突き固めによる締固め試験から求めたものである。

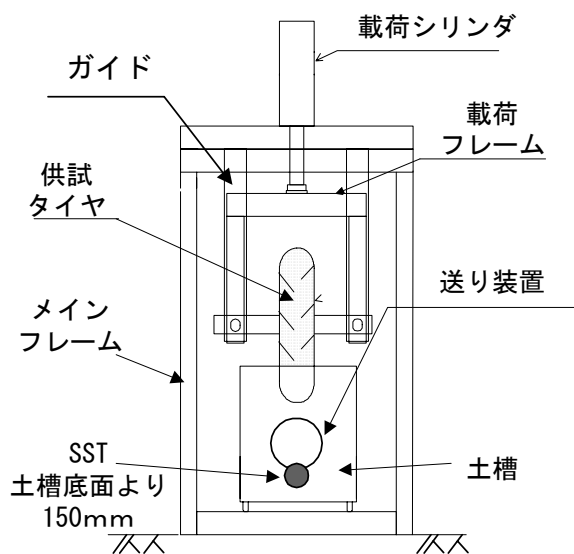
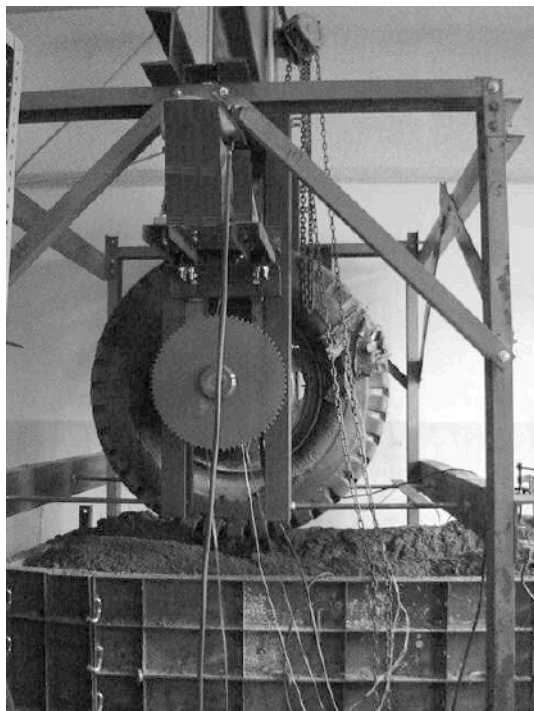


図2 タイヤ転圧実験装置

3. 履帯転圧

図1の履帯転圧装置を用い転圧実験を行った。実験では最大鉛直加振力を装置総重量で除した荷重比 α と振動数 f を設定した。荷重比は1.0および1.8とし、振動数は12～30Hzとした。転圧は無振動にて3回転圧後

振動転圧とした。転圧後、コーン貫入試験によりコーン指数から乾燥密度を求めた。コーン指数と乾燥密度の関係は予備実験から次式によるものとした。

$$\rho_d / \gamma_w = 1.271 \left[\frac{q_c}{\{1 + 3.101(z/H)\} p_0} \right]^{0.109} \quad (1)$$

ここに ρ_d は乾燥密度、 γ_w は水の単位体積重量、 q_c はコーン指数、 z は深さ、 H は試料土の層厚、 p_0 は大気圧である。

また、供試地盤内にSST (Stress State Transducer)⁵⁾を土槽底面の位置に埋設し、地中における垂直応力 σ_z およびせん断応力 τ_{zx} を測定した。

地表面沈下量を転圧回数ごとに計測した。計測はデプスゲージを用い、各履帯6ヶ所について行い平均値を沈下量とした。

図3は沈下量と転圧回数の関係を示したものである。荷重比1.0、振動数12Hz、16Hzの場合と荷重比1.8、振動数16Hzについて示した。転圧回数 $N=3$ までは装置の自重のみで転圧している。いずれの荷重比も同じ条件でありほぼ等しい値を示している。転圧回数4回目以降は振動転圧の結果である。振動転圧を行うことにより沈下量は大きく増加している。転圧回数が10回を超えると沈下量変化はほぼなくなっている。振動数16Hzでの荷重比1.0および1.8の沈下量はそれぞれ11.8cmと14.3cmであり、その差は2.5cmとなっている。これは加振力の増加が沈下量に大きく影響することを示している。

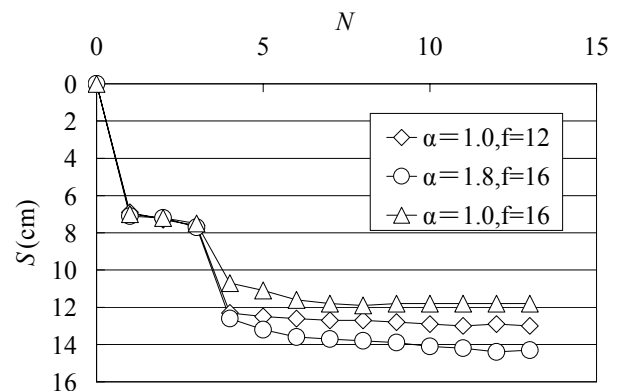


図3 試料沈下量と転圧回数

図4、図5は転圧後の乾燥密度と振動数の関係を示したものである。最大乾燥密度、深層部乾燥密度ともに振動数増加とともに減少していることがわかる。換言すれば振動数を減ずれば大きな締固め効果を得ることができるといえる。载荷比1.0以下は転圧装置が接地した状態で载荷を行う振動転圧であり、载荷比1.0を超えるものは衝撃を伴う転圧となる。今回の結果はいずれの場合においても上述の現象が生じており興味深い。

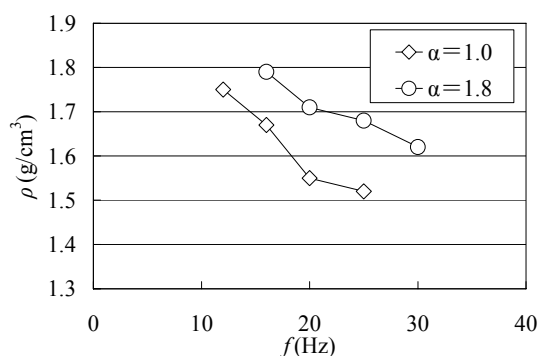


図4 最大乾燥密度と振動数

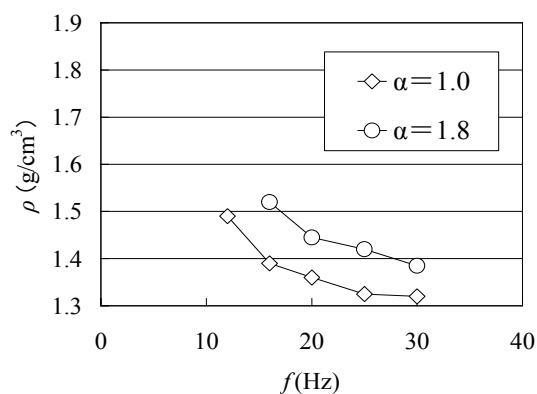


図5 深層部乾燥密度と振動数

ことになる。したがって、まきだした試料土の各深さにおける密度はどの程度の力が伝播しているかに依存しているといえる。

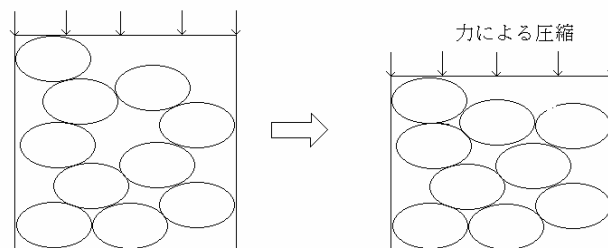


図6 荷重による土の圧縮

重ダンプトラックによる厚層転圧効果は応力比が大きく寄与している可能性について前出 3)にて指摘しているが、この点に着目して実験を行った。

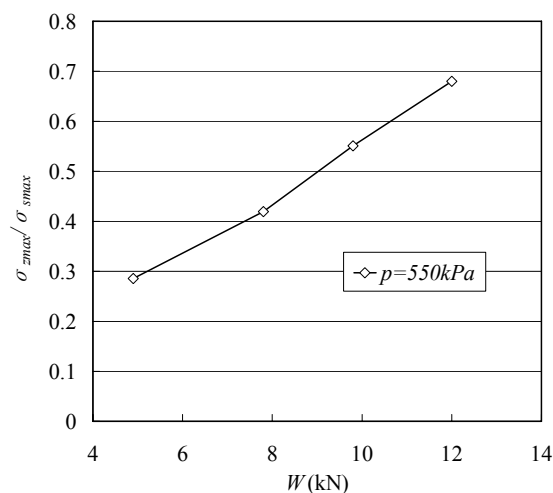


図7 軸荷重と応力比

4. タイヤ転圧

供試タイヤの空気圧 550kPa に設定し軸荷重 12kN までの無振動転圧試験を行った。土の締固めとは土に外作用を加え、土粒子同士の相互移動を生じさせることにより土粒子を密の状態にすることを意味する。荷重による締固めは、土粒子に力を加え粒子間接点において強制的に相互移動を生じさせる作用である。これは図6に示すように外力により土の空隙を破壊していく

図7は転圧実験における深さ 40cmでの軸荷重と応力比の関係を示したものである。応力比は載荷面における接地圧と試料土のある深さにおける応力との比と定義している。実験結果から軸荷重の増加に伴って応力比も大きくなっている。土の締固めが外力に依存しているとすれば、応力比が大きくなれば大きな力がその深さに到達していることになり密度増加につながる。さらに、タイヤの場合はその荷重支持機能からそれ自

身が変形するという特徴を持っている⁶⁾。この特徴は締固めを意図して造り込まれたものではないが、効果的な利用を見出すことができる。図8は軸荷重 W を増加させた時の載荷面直下の応力 $\sigma_{s_{max}}$ を示したものである。図から軸荷重増加による載荷面直下の応力状態の変化は小さいことがわかる。

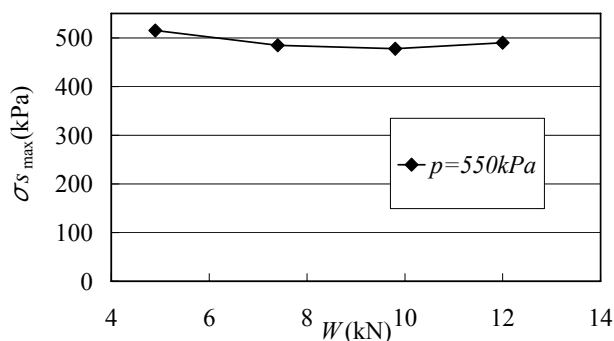


図8 軸荷重と載荷面下応力

大きな締固め効果を得ようとする方策は載荷する力を大きく採ることが挙げられるが、載荷面が剛であると載荷面直下の応力が大きくなり深さ方向の応力減衰が顕著になる。一方、今回の結果から得られた応力比を大きく採ることが可能な方策を講ずれば、締固め後の深さ方向の密度差が小さくなると考えられ、厚層締固めにおける品質向上に寄与することになる。



図9 現場施工試験

図9は重ダンプトラック現場施工試験の状況であり、図10はその結果³⁾である。現場試験のため浅層部の初

期密度が大きい影響があるものの深層部まで所定の密度を実現しており応力比増加の効果が現れていると考えられる。

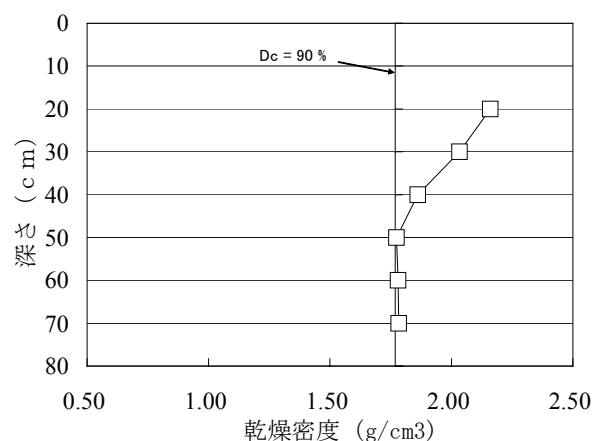


図10 重ダンプトラック現場施工試験結果

5. 締固めに与える振動数の効果

3. で述べたように載荷時の振動数が締固めに与える影響は十分に考慮する必要がある。ここでは載荷比を1.0としてタイヤにて振動転圧実験を行った。

図11は振動数と密度との関係を示したものである。実験装置の構造上振動数の設定は2Hzまでしか行えなかった。実験結果から無振動転圧に対して振動数を増加させると密度が増加していることがわかる。この振動数－密度関係からは振動数を2Hzより大きくした場

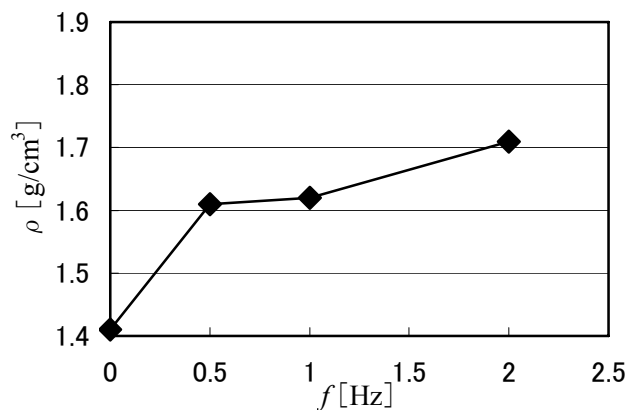


図11 タイヤ振動転圧結果

合、密度は増加していくと考えられる。一方、図4からは振動数の減少とともに密度が増加する結果が得られており、この2つの結果を勘案する必要がある。単純に载荷比 1.0 でほぼ同じ条件であるとして2つの結果をまとめると図12のようになり、2つの結果の間付近に転圧後密度を最大にする振動数が存在する可能性を指摘できる。

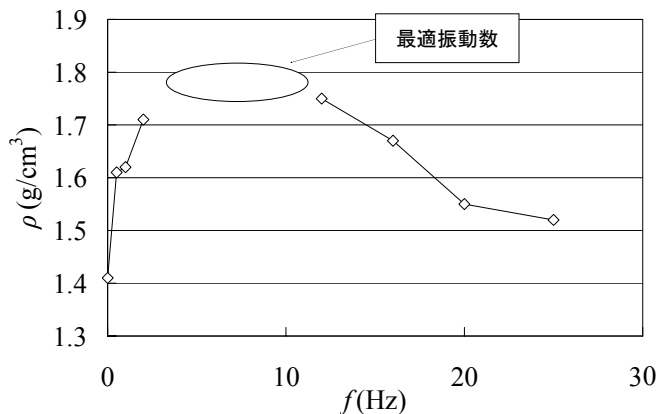


図12 振動数と転圧後密度

次に最適振動数について考察する。図13は重ダンプトラックタイヤが地盤を走行する際の挙動をモデル化したものである。ここで、 m_1 : 重ダンプトラックの質量(kg), m_2 : タイヤの質量 (kg), m_e : 振動時の偏心質量 (kg), r : タイヤの回転半径 (m), k_2 : 地盤剛性, c_2 : 地盤の粘性減衰係数(Nsec/m)である。起振力 F_0 は(2)式で表され、振幅は(3)式で表される。

$$F_0 = m_e r (2\pi f)^2 \quad (2)$$

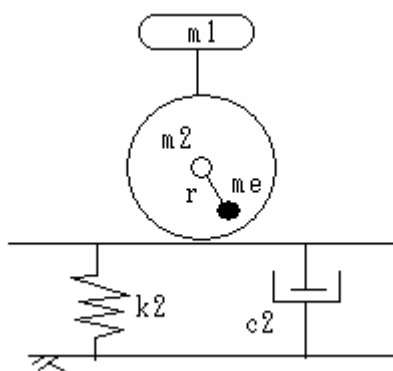


図13 タイヤー地盤モデル

$$a_p = A / (2\pi f)^2 \quad (3)$$

ここで、 f はタイヤの振動数(Hz), A はタイヤの振動加速度 (m/sec^2) である。起振力は振動数により増加するため振動数を大きく採ることが良いが、逆に振幅は小さくなりそれぞれの効果の最も良い組合せを探らなければならない。このような現象から実際には両者の相反する関係を同時に満足する最適な振動数が 2Hzから 16Hzの間に存在すると推定され、その振動数は(4)式で表すことができる。

$$f_{opt} = \left\{ \frac{(m_1 + m_2) g A}{16\pi^4 m_e r \eta} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

ここで、 g : 重力加速度(m/s^2), η : 起振力による沈下量 (m) である。(4)式は起振力による締固めエネルギーとタイヤがもつポテンシャルエネルギーの和を微分し、最適な振動数を求めたものである。今回の実験条件から求めた最適振動数は 4.1Hzとなり推定範囲内となっている。また、締固めにおいて地盤固有振動数がその効果に影響を与えることがわかっており⁷⁾、地盤剛性と転圧荷重との関係から最適振動数を推定すれば次式となる。

$$f_{opt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_1 + m_2}} \quad (5)$$

地盤剛性 k_2 を得るにはタイヤの落下試験を行い、タイヤに取り付けた加速度計を用いて衝撃加速度を計測した。これにより地盤剛性を算定する方法⁸⁾を用いた。(5)式より得られた最適振動数は 6.1Hzとなりこれも推定範囲内である。いずれの振動数も一般的な振動転圧には用いられない領域であり、大きな効果が期待できることから载荷システムをさらに検討する必要がある。

6. 密度管理

Bailey et al., は八面体垂直応力を一定に保持し八面体せん断応力を作用させると密度と八面体応力比には線形関係が成り立つことを明らかにし (6)式を提案している⁹⁾。

$$\ln(BD) = \ln(BD_i) - \left\{ (A + B\sigma_{oct})(1 - e^{(-C\sigma_{oct})}) + D\left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{oct}}\right) \right\} \quad (6)$$

ここで、A：締固め係数、B、C：締固め係数 (kPa⁻¹)、D：せん断応力による体積ひずみの構成係数、BD_i：初期密度 (g/cm³)、BD：締固め後の密度 (g/cm³) である。三軸圧縮試験結果から八面体垂直応力と八面体せん断応力を決定し、体積変化から密度を求め、得られた値を用いて最小二乗法によりA,B,C,Dを求めた。転圧試験時にSSTで測定した応力から σ_1 , σ_2 , σ_3 を求め、(7)式により八面体応力を求めた。

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{9}} \quad (7)$$

履帯転圧装置による載荷比 1.2 の結果について考察する。(6) 式を用いて算定した密度とコーン貫入試験結果から求めた密度について比較し、両者の差が小さければ SST を用いて得た密度が正確であるといえる。図 1 4 に各振動数における実測密度と予測密度を示す。いずれも誤差は 1%以下となっており良好な関係にあるといえる。

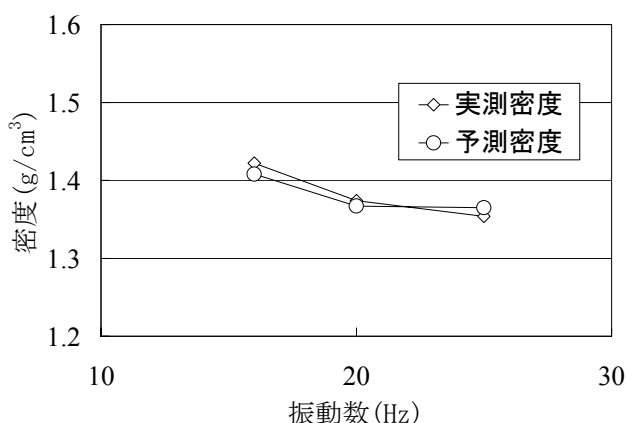


図 1 4 実測密度と予測密度の比較

7. おわりに

厚層締固めに資する諸条件とその密度管理についていくつかの考察を行った。振動転圧における締固め効果を左右する振動数に関して、従来の振動数領域とは異なる値に効果を期待できることを示した。さらに得

られた知見に対する検証を進めていかなければならない。

参考文献

- 1) 益村公人, 三嶋信雄, 三浦清一: 厚層締固めによって生じる道路盛土内の密度勾配と圧縮沈下挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.672/VI-50, pp.155-167, 2001.
- 2) 石原公明, 麻生公裕, 苗村康造, 谷口利久: 牽引式マンモスバイブロタンパー工法の開発, 平成元年度建設機械と施工法シンポジウム 1990.
- 3) 江口忠臣, 室達朗, 生木泰秀, 斎藤秀男, 重ダンブトラックタイヤを用いた厚層転圧工法に関する研究, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.19-30, 2005.3
- 4) T. Eguchi, Y. Honda, Y. Oiki, T. Muro, Measuring Method of Compacted Soil Density in a High Lifted Compaction Using Tracked Vehicle, 15th International Conference of the ISTVS Proc., N0.3A07pp.1-13, 2005.9
- 5) T.A. Nichols, A.C. Bailey, C.E. Johnson and R.G. Grisso: A Stress State Transducer for Soil, Transaction of the ASAE, Vol.31, No.5, pp.1237-1241, 1987.
- 6) 江口忠臣, 室達朗: 離散化タイヤモデルによる建設車両タイヤの基礎的変形性状解析, 土木学会論文集 No.665/VI-49, pp.81-90, 2000.
- 7) T. Muro, S. Kawahara, T. Mitsubayashi: Comparison between centrifugal and vertical vibro-compaction of high lifted decomposed weathered granite sandy soil using a tracked vehicle, Journal of Terramechanics, Vol.38, No.1, pp.15-45, 2001.
- 8) K. Tateyama and T. Fujiyama: Evaluation of ground properties and its application to the automatic adjustment system for vibration conditions in vibratory soil compaction, Proc. of the 13th Int. Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.645-652, 1996.
- 9) A.C. Bailey, C.E. Johnson: A Soil Compaction Model for Cylindrical Stress States, Transactions of the ASAE, Vol.32, No.3, pp.822-825, 1989.