

7. 建設車両用タイヤを用いた締固め方法の開発

国立明石工業高専：○中口 順良、江口 忠臣
愛媛大学：室 達朗

1. 緒言

近年、高速道路建設や空港建設など現場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、厚層締固めが可能となる新たな締固め方法開発の要求が高まっている。また振動、騒音、多大なエネルギー消費を抑え、環境負荷を低減させる方法の検討は重要である。

従来、埋立地などの軟弱な地盤に構造物を建設する際、振動ローラが多用されてきた。しかしながら振動ローラは条件によって転圧回数による密度上昇のピークがあること、振動による搖すりこみ効果は期待できないことなどの問題点が存在する^{1) 2)}。

環境負荷低減の方策として、既存建設機械を代価利用することが挙げられ、重ダンプトラックに装着されているオフザロードタイヤ(Off the Road Tire, 以下ORタイヤと呼ぶ)を用いた低振動、高効率な締固め方法の開発を行う。

タイヤによる地盤の締固めにおいてタイヤと剛性輪（ロール）を比較した場合、タイヤの特徴は、タイヤ内圧を高めることにより表層の密度が上がる、締固め表層の水密性を高める、輪荷重（タイヤ1輪当たりの荷重）を大きくすることにより締固めが深層部までおよぶ、粘性の高い湿潤土においてこね返し効果（ニーディング効果）を持つことが挙げられる。これらの特徴から、地盤の締固めにタイヤを用いると、輪荷重とタイヤ内圧との組み合わせで締固め力を変えることができる。またタイヤというゴム質の持つ粘弾性特性により、シルト・ローム質といった粘性土において、通過したタイヤ踏面で転圧されることによってもこね返し現象が生じるため、その効果は著しい。

タイヤの接地面には接地圧が作用し、一般に接地

圧はタイヤの内圧とほぼ等しくなることが知られている。接地面下の地盤内部には、その接地圧に応じた応力が分布する³⁾。図-1はタイヤ内圧700kPaの時の垂直応力を深さ方向に図示した圧力球根である。土中の垂直応力が200kPaの伝播範囲を示し、接地圧を円形等分布荷重と仮定した。これより垂直応力はタイヤの接地面直下のみに影響するわけではなく、タイヤ接地面を中心に垂直方向、水平方向に広がる圧力球根を形成している。タイヤ内圧を一定にし、軸荷重を増加すると、同じ値の応力球根は深さ方向に拡大する特徴がある。またタイヤの走行によって地盤には垂直応力以外にせん断応力が作用する。

本研究では、踏圧面を確保しながら大きな輪荷重が得られるORタイヤを締固めに用いることを想定している。建設運搬車両である重ダンプトラックは、最大積載時の車両総重量が300tを超えるものもあり、タイヤ1本当り50t程度の荷重を支持していることになる。また、積載量の変更により、任意の荷重設定が行える利点がある。ORタイヤはそれ自身が変形することにより荷重を支持する特徴を持つ。ここでは、ORタイヤを用いることによって踏圧面を確保し、載荷重との組合せおよびORタイヤ変形の特徴を活用した厚層試料の締固め効果を検討することを目的とする。

2. 転圧試験

(1) 三軸圧縮試験

タイヤと地盤の接触状態を考える上で、地盤の各圧縮モデル係数を決定する必要がある。三軸圧縮試験により係数を推定し、また、せん断応力による締固め効果を評価する。試験は八面体垂直応力 σ_{oct} を一定に保持し σ_1 、 σ_3 を順次変化させることによつ

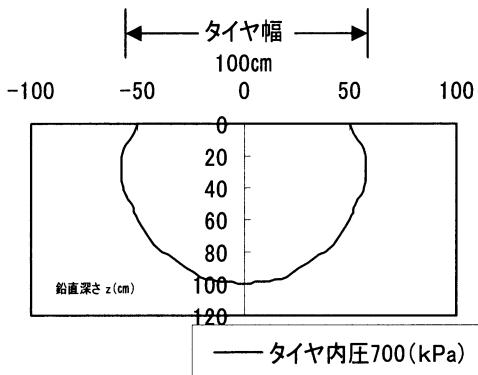


図-1 圧力球根（垂直応力 200kPa）

てせん断応力 τ_{oct} を制御した。 σ_{oct} は 100, 200, 300, 400kPa で載荷する。初期間隙比は 0.8, 0.9, 1.0, 試料砂は愛媛県松山産のまさ土を使用し、直径 50mm, 高さ 100mm の供試体とした。まさ土の土質特性は土粒子比重 ($27^{\circ}\text{C}/15^{\circ}\text{C}$) $G_s=2.66$, 平均粒径 $D_{50}=0.78\text{mm}$, 均等係数 $U_c=12.0$, 曲率係数 $C_c=3.0$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.88\text{g/cm}^3$, 最適含水比 12.8%である。

(2) 転圧試験

試験装置はエアシリンダー（最大容量 970 kPa）、載荷フレーム、ガイド、鋼製土槽 ($1000 \times 1000 \times 2200$ mm), モーター（土槽を送るもの）、供試タイヤ（外径 1055 mm, 幅 296 mm），土圧計 (SST) で構成されている。試験装置外観を図-2 に示す。

実タイヤによる締固め効果を考察するために室内転圧試験を行った。供試地盤は最適含水比に調整したまさ土を 1m の厚さでまき出し表面を成型した。転圧前の供試地盤間隙比は 1.134 であった。OR タイヤを静止状態で載荷し、その後純粹転動にて転圧を行った。軸荷重は 7.84kN, 10.78kN, 13.72kN の 3 通りで、繰り返し転圧をそれぞれ 10 回行う。OR タイヤの空気圧設定は 350, 500, 700kPa とした。

(3) 重ダンプトラック現場転圧試験

実際の重ダンプトラック走行による転圧効果を実証するために、試験ヤードにおいて現場転圧試験を行った。試験走路部 30m を設定し、試料土の厚さは 1m となるようにブルドーザーによってまき出した。転圧は積載状態にて走行速度 10~15km/h で行

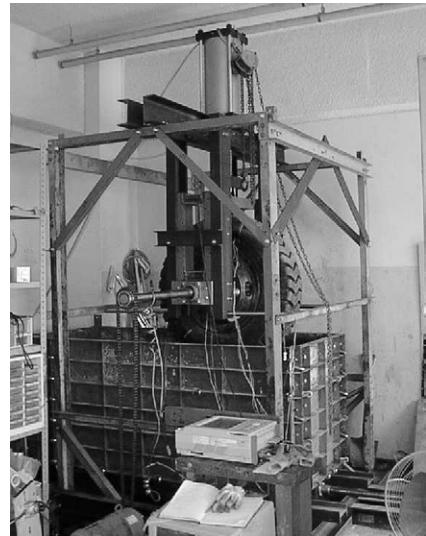


図-2 転圧試験装置

った。走行速度は通常の転圧ローラと比較して高速である。現場転圧試験は採石場において発生した粗粒土を用いて行った。OR タイヤの内圧は 600kPa に調整し、32t 積重ダンプトラックを満載状態にして転圧を行った。転圧後の密度計測には、自動走査式表面形 RI 密度計とフレーム型 RI 密度計を用いた。

3. 結果と考察

(1) 三軸圧縮試験結果

図-3 は八面体垂直応力と八面体せん断応力との応力比と載荷後の密度を示す。図中凡例の応力表示は八面体垂直応力である。一部のパターンを除き、各初期間隙比とも応力比 1.0 付近まで応力比が増加するに従って密度も増加している。八面体垂直応力を一定にし、応力比を増加させることにより八面体せん断応力を増加させた。つまり八面体せん断応力の増加に伴い密度も増加したといえる。しかし初期間隙比 $e=1.0, 0.9$ の場合、垂直応力 400kPa 載荷時、応力比を増加させていくと、一度密度上昇はピークを迎える後減少した。これは、初期間隙比が大きい供試体に対して、応力比が 0.7~0.8 付近まで負のダイレイタンシーにより密度は増加するが、その後正のダイレイタンシーが生じ、密度は減少したと考えられる。

各圧縮応力とも初期間隙比が大きい場合、初期間

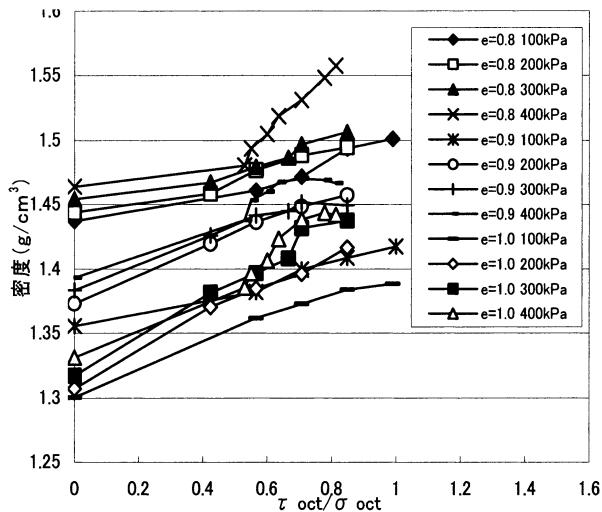


図-3 三軸圧縮試験による応力-密度関係

隙比が小さい場合と比べて、最終的な締固め後の密度は小さくなっている。初期隙比が小さければ八面体せん断応力を増加させていっても正のダイレイタシーや生じず、締固め効果は高くなると考えられる。

以上の結果より、八面体せん断応力が大きくなると密度も大きくなる傾向にあるので、八面体せん断応力は土の締固め効果を高めるといえる。しかし、実際に厚層まき出した土の初期隙比は1.0～1.1ぐらいであるため、現場で重ダンプトラックによって締固める場合、垂直応力とせん断応力の応力比が0.8以上になるような状態は避けるべきである。応力比が0.8以上になると先述通り、正のダイレイタシーより体積が膨張する可能性があるためである。今回の実験より考えられることは、初期隙比が大きい状態で締固めた場合、初期隙比が小さい状態で締固めた場合よりも十分に締固まってない時点で密度のピークを迎え、体積が膨張し密度は小さくなる可能性があるということである。すなわち、初期隙比が大きい状態で締固めた場合十分な締固め度を得ることができない可能性がある。これを防ぐために、初期隙比と体積が膨張し始める密度との関係を実験により推定すること、かつ応力比が0.8以上にならないようにすること、厚層まき出した土の隙比を小さくすることが必要であると考えられる。厚層まき出した土の隙比を小さくす

るには、まき出した後ドーザなどで土をならしてから重ダンプトラックによって締固めることによって、ある程度隙比を小さく抑えられると考えられる。

(2) 圧縮係数の推定

Bailey⁴⁾らは締固めを考察するにはせん断応力の効果を加えることが必要であるとし、締固めのモデルとして八面体垂直応力 σ_{oct} と八面体せん断応力 τ_{oct} を用いて次式を提案し乾燥密度を求めた。

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

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/cm^3)、BD:締固め後密度 (g/cm^3)である。このA, B, C, Dの各圧縮係数は三軸圧縮試験により決定する。

式(1)より、三軸圧縮実験で得られた八面体せん断応力、体積変化、および八面体垂直応力から最小二乗法により係数を推定した。ここで、係数A, B, Cは垂直応力だけを考慮して求めることができる。その後、せん断応力を考慮した係数Dを合わせて四つの係数を推定した。本研究で使用したまさ土の各係数の推定結果は表-1の通りである。現場においてこの圧縮モデルを用い、発生する軸荷重とせん断応力、初期密度を計測することで、タイヤに起因する締固めの影響の推測ができる⁵⁾、過剰転圧等を防ぎ環境負荷の低減につながる。

(3) 転圧試験結果

図-4は転圧回数に伴う八面体応力の推移を示す。転圧回数の増加とともに八面体垂直応力、八面体せん断応力共に大きくなる。しかしこの八面体応力は地盤層の圧縮量の減少に伴い、最終的にはある一定の値に漸近していくと考えられる。また応力伝達は深さ方向に減衰するため、深部では八面体応力

表-1 供試まさ土の圧縮モデル係数の推定結果

A	B(kPa ⁻¹)	C(kPa ⁻¹)	D
-0.211	-15×10^3	-1125×10^3	-0.101

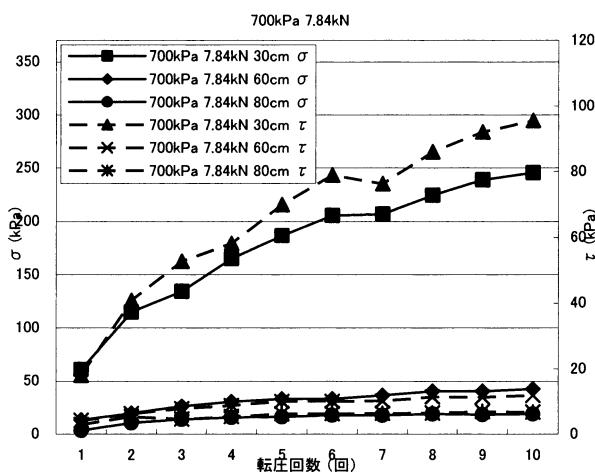


図-4 転圧回数による八面体応力の推移

は小さくなっている。転圧 10 回目の σ_{oct} は、深さ 30cm のものと比較して、60cm は 80% 減、80cm では 90% 減少している。 τ_{oct} についても転圧 10 回目で深さ 30cm のものと比較し、60cm は 90% 減、80cm では 95% 減少している。また八面体せん断応力の減衰の仕方は、700kPa のように高いタイヤ内圧と、7.84kN の小さい軸荷重では、接地圧がタイヤ内圧同等の高い応力から、低い応力の圧力球根が幾層も、深さ方向に小さく発生するので、深さ方向に応力のばらつきが生じたと考えられる。また、八面体せん断応力の減衰の仕方は、八面体垂直応力に比べて大きい。

しかし前述の緒言のとおり、タイヤ内圧が一定の場合、軸荷重が大きくなることで圧力球根の到達点は深部まで届く。これらを利用すれば、重ダンプトラックは大軸荷重によって、深部への圧力球根到達が期待でき、まき出し層内の応力差が小さくなると考えられる。

次に式(1)を用いた密度予測を図5、6、7に示す。図-5は軸荷重と密度の関係を示す。軸荷重が大きくなることにより密度は増加している。タイヤ内圧は一定であり、軸荷重を増加したことでの各応力の圧力球根の到達点はそれぞれ深くなる。よって

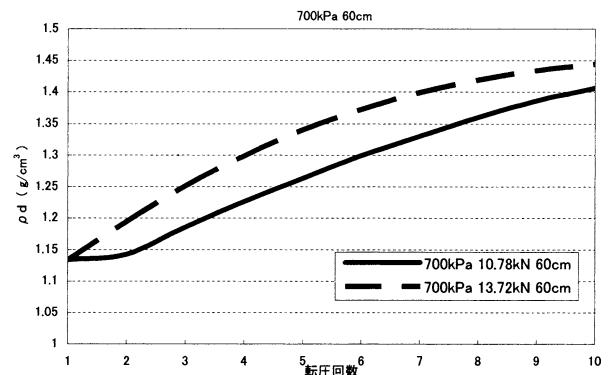


図-5 軸荷重を考慮した転圧回数と密度の関係

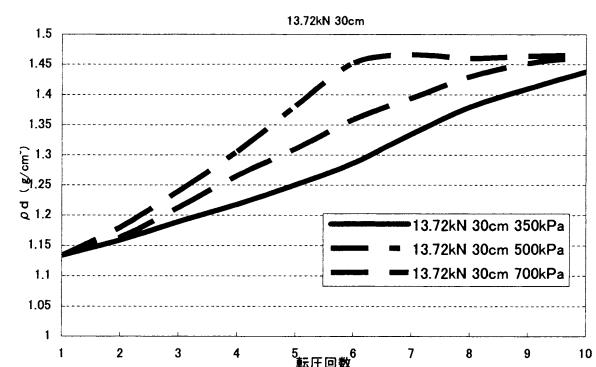


図-6 空気圧を考慮した転圧回数と密度の関係

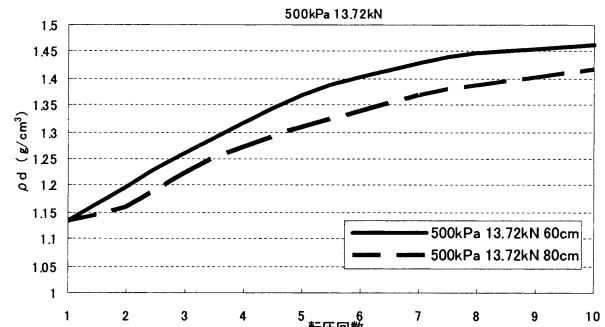


図-7 深さを考慮した転圧回数と密度の関係

同じ深さ地点には更に大きな圧力球根が届き、八面体垂直応力、八面体せん断応力は共に増加すると考えられるからである。また、軸荷重が大きい場合、密度上昇の立ち上がりも早く、初期転圧において効率的な締固めができる、環境負荷の低減につながると考えられる。つまり現場での車両の大軸荷重は、更なる締固めの効果が期待できると考えられる。図-6はタイヤ内圧と密度の関係を示す。転圧回数 4 ~

8回付近の初期の転圧においては、密度の高い順に500kPa, 700kPa, 350kPa となった。ここで、この実験に用いたタイヤ規格内圧は 550kPa である。規格内圧に最も近い500kPaでは垂直応力の締固め効果とせん断応力の締固め効果の組み合わせが初期転圧において最大になったと考えられる。また 700kPa では、垂直荷重のみを考慮した場合、接地面積が小さい分大きな垂直応力を作用させることができたが、タイヤ内圧をあげると弾性輪から剛性輪へと近づき、軟弱地盤での走行は困難になり、初期間隙比の小さい場合でも接地面積の減少によりせん断応力は発生しにくく、締固め効果は減少すると考えられる。しかし 10 回以上転圧を行うならば、せん断応力による締固め効果を垂直応力による作用で補い、500kPa 同等以上の締固め効果になると考えられる。350kPa の場合、接地圧はタイヤの空気圧を上回れないため、接地面下の応力は小さくなる。しかし、同じ軸荷重条件であれば、低いタイヤ内圧では、接地圧の最大値は低くなるが、同じ値の応力球根は大きくなり、深部まで届き、深さ方向における密度のばらつきを小さくすることができると考えられる。またタイヤの接地面積が広くすることで軟弱な地盤での走行を可能とし、踏圧面下で発生するせん断力も大きくなると考えられる。密度上昇の立ち上がりは遅いが、転圧回数を 10 回以上行うのなら、十分 500kPa と同等以上の締固め効果を有すると考えられる。タイヤ内圧の調整は載荷荷重とその走行地盤状態を考慮しなければならない。深さと密度の関係を図-7 に示す。10 回転圧で、60cm と 80cm の密度差は約 0.05g/cm³、締固め度の差は 2% 強である。ここで 0.05 g/cm³ は 80cm の 10 回転圧時付近の、一回の転圧で締固める成果と同等である。締固めにおいて、深さ方向の密度のばらつきは好ましくない。まき出し層内の密度のばらつきを抑制するために、軸荷重による圧力球根の到達深さを考慮して、まき出し層の深さを決定しなければならない。また、深さ 80cm では、転圧回数 1 ~ 10 回全てで τ は 0 とし垂直応力のみを考慮した場合、締固め度は平均で約 1.5% 減少している。せん断応力による締固め効果は十分期待できると考えられる。



図-8 重ダンプトラックによる転圧状況

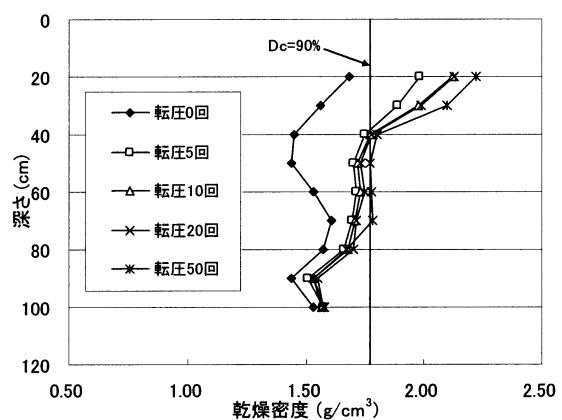


図-9 転圧後密度分布

以上の結果より、重ダンプトラックの特徴である大軸荷重による応力球根の拡大、大踏圧面による走行性、接地圧の制御、せん断応力の発生は締固めに有効であると考えられる。

(4) 重ダンプトラック現場転圧試験

実機を用いた転圧試験を行うことで、本方法の効果を検証する。図-8 は 32t 積重ダンプトラックによる現場転圧試験の状況である。図-9 は転圧回数の深さ方向の密度分布について、フレーム型 RI 密度計により測定した結果である。ブルドーザーによる敷き均し後の初期密度は高い状態にあるものの、深さ 80cm の位置まで基準密度の 85% を転圧 10 回で達成している。しかし、基準密度の 90% を達成するためには 70cm の深さで転圧 50 回が必要である。また転圧回数 50 回まで行っているが、過転圧は確認されておらず、この段階でも密度増加が生じてい

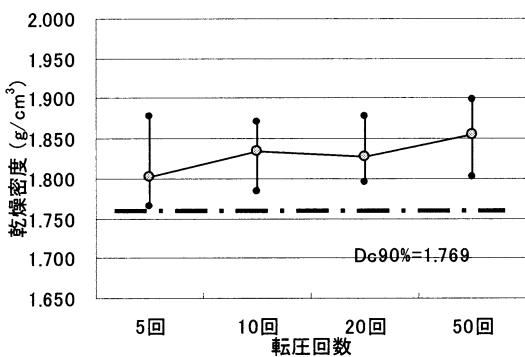


図-10 表面型 RI 密度計による測定結果

る。図-9の結果は18.00R33のタイヤサイズにおいても、深さ80cm程度まで一定の締固め効果を示しているが、本法の特徴である踏圧面確保による試料土の拘束が、大きく寄与していると考えられる。図-10は自動走査式表面型RI密度計による密度計測の結果である。全計測地点のばらつきも含めて表示している。転圧10回以降は全測定データについて、基準密度の90%を満足している。また、転圧10回以降のデータのばらつきも安定しており、現場適応時に管理が容易になると考える。

以上のように、現場転圧試験においても重ダンプトラックによる締固め効果は確認された。これはタイヤ走行の特徴である踏圧面確保による試料土の拘束、踏圧面内接地圧の均一性、走行によるせん断応力発生、さらに運搬車両を用いることによる大軸荷重が、それぞれ締固めに対して効果的に作用することを利用した結果である。

4. 結言

本研究においてせん断応力を考慮した厚層締固め効果について検討した結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 三軸圧縮試験結果より応力比を増加させることは八面体せん断応力を増加させることになり、八面体せん断応力の増加に伴い密度も増加する。垂直応力のみだけでなくせん断応力を考慮したほうが締固め効果は高い。
- (2) 初期間隙比が大きい場合せん断応力によってあ

る程度までは体積収縮するがその後、正のダイレイタンシーにより体積が膨張することがある。施工時ではまき出した土の初期間隙比の調整も十分検討するべきである。

- (3) タイヤ内圧を大きくすると弾性輪から剛性輪へと近づくため、せん断応力が減少する可能性がある。また、タイヤの規格以上の空気圧にすることは、初期間隙比の大きい供試体に対して締め固め効果は低くなる。
- (4) 密度予測式を利用して、最適締固め条件を選定することによって、過剰転圧などを防ぐことを可能とし環境負荷の低減や効率的な締固めができると考えられる。
- (5) ORタイヤと運搬車両の特徴を利用した重ダンプトラック実車両現場厚層転圧試験において、深層部まで一定の転圧効果が現れた。試料土に対する32t積重ダンプトラックによる転圧試験は、転圧50回、深さ70cmにおいて基準密度の90%に達している。

謝辞：本研究を進めるにあたり日本国土開発株式会社に現場試験のご協力を賜りました。ここに、記して感謝する次第であります。また、本研究の一部は平成16年度科学研究費補助金（基盤研究（C））によって行われた。

参考文献

- 1) タイヤ設計指針作成委員会：オフロードタイヤ工学、テラメカニックス研究会, pp. 20-21, 1999.
- 2) ローラ設計指針作成委員会：転圧ローラ工学—締固め性能に着目して—、テラメカニックス研究会, pp. 1-11, 1999.
- 3) 前出1) pp. 210-211
- 4) Alvin C. Bailey and Clarence E. Johnson : A Soil Compaction Model for Cylindrical Stress States, ASAE, pp. 1-4, 1989.
- 5) 江口忠臣・室達朗・生木泰秀・斎藤秀男：重ダンプ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VI（投稿中）