

重錘の回転落下による砂地盤の締固め効果

金谷 守¹・國生 剛治²・吉田 保夫³・鳴海 直信⁴

¹正会員 工博 財団法人 電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工博 中央大学 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³株式会社 シーアールエス (〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁴正会員 海洋工業株式会社 (〒160-0015 東京都新宿区大京町25)

著者らは、重錘に回転を与えて落下させることにより、落下エネルギーに加えて回転エネルギーも利用することによって、より効率的に砂地盤の締固め改良を図る工法を提案している。本報告では、室内の小型模型実験と現地での比較的規模の大きい試験を行って、重錘に回転を与えた場合と与えない場合の砂地盤の締固め効果に関する比較を行った。落下試験前後のコーン貫入抵抗値の変化によって締固め効果を比較したところ、回転を与えた方が抵抗値の増分が大きくなる傾向が得られた。また、地盤の沈下量についても回転落下の方が大きくなる結果が得られたことなどから、重錘に与えられた回転エネルギーが砂地盤の締固めに対して有効に作用していることが示された。

Key Words : *dynamic compaction, rotation, sandy ground, model test, field test*

1. はじめに

100~250kN(10~25tf)の重錘を20~30mの高さから繰り返し落下させて地盤を締固める工法は、1960年代後半にフランスのMenard技術研究所で開発された。我が国には1973年に技術導入され、動圧密工法あるいは重錘落下締め固め工法と呼ばれ、その工法の簡易さゆえにこれまで多くの施工実績を重ねてきている。一般に本工法は砂地盤や砂礫地盤に適用して、深さ5~15m程度までのN値を10~15程度まで改良することが多いが、岩砕や廃棄物地盤などにも適用されており、基礎地盤の支持力増加、残留沈下量の軽減、液状化防止、廃棄物の減容化などを主な目的としている。

重錘落下工法に関しては、これまでに模型実験、現場試験などによる締固めメカニズムの検討^{1)・2)・3)}や数値解析的検討⁴⁾、現場計測に基づいた改良効果の検討⁵⁾や施工管理⁶⁾および設計法の提案⁷⁾などいくつかの研究が行われてきた。これらの多くは、締固め改良効果を打撃によるエネルギーと関連づけて検討している。それに対して、土谷²⁾は、飽和地盤を対象として最大せん断ひずみと残留間隙水圧の関係から改良効果を予測する手法を提案し、大島³⁾は、不飽和地盤に対

象とした遠心模型実験や現場試験から、締固め効果は重錘の運動量に依存することを示し、目標改良深度と総運動量からシリーズ施工数に応じて打撃点間隔を決定する新たな設計法を提案している。一方、著者らは重錘に回転を与えた状態で落下させることにより、落下エネルギーに加えて回転エネルギーも利用することによって、より効果的な締固め改良を図る工法を提案し^{8)・9)}、模型実験や現場試験などによって改良効果を検討してきた。

本報告では、重錘に回転を与えた状態で落下させた時の砂地盤の締固め改良に着目し、室内での小型模型実験と現地での比較的規模の大きい試験を行って、回転を与えた場合と与えない場合の締固め効果に関する基本的な比較を行った結果について述べる。

2. 室内小型模型実験による検討

(1)実験装置

図-1に、模型実験装置の概要を示している。土槽は、幅1.5m・奥行き1.5m・高さ1.1mの直方体型である。この土槽内に砂地盤を作成し、地盤ができあがった後、

重量490N(50kgf)、厚さ0.03m、直径0.5mの鉄製の円形重錘を1.0mの高さまで吊り上げ、回転を与えない実験ではそのまま地盤に落下させる。一方、回転を与える実験では、重錘を回転させ、所定の回転数に達した時点で落下させた。図-2には、回転落下装置の概要を示した。重錘にはギアとホルダが取り付けられており、エアチャックによってホルダを締め付けてから吊り上げる。自由落下の実験では所定の高さでエアチャックを開放することにより重錘を落下させる。回転落下の場合には、圧縮空気をエアモータに送り、ギアを介して重錘に所定の回転を与えてからエアチャックを開放して落下させるようになっている。なお、重錘には回転落下時に地盤と重錘の間で空回りが生じ、回転エネルギーが地盤に有効に伝達されなくなることをできるだけ回避する目的で重錘底面に十文字状に突起を取り付けた。

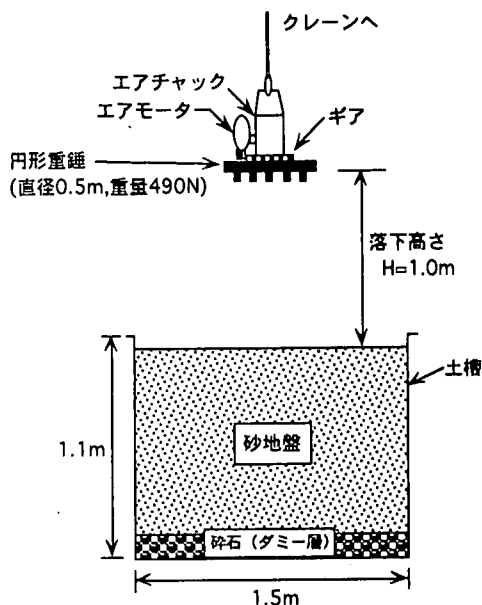


図-1 模型実験装置の概要

(2) 実験方法

図-1に示した土槽底面にダミー層として厚さ0.1mほどの締め付けた碎石層を作成し、その上に厚さ約1.0mの砂地盤を作成する。ダミー層は1回のみ作成し、実験毎に砂地盤だけ作り替えている。砂地盤の作成にあたっては砂層を7層に分け、各層ごとに含水比10%程度に調整した砂を土槽に投入しては表面に板を敷いて軽く踏み固めることによって相対密度が $D_r=10\%$ 程度の非常に緩い砂地盤を作成した。非常に緩い砂地盤とした理由は、改良効果を明瞭にすることを意図したためである。実験に使用した砂は利根川砂で、その平均粒径は0.34mmである。実験では、落下試験終了後の地盤解体時に地盤中の変形を調べる目的で薄い白砂層を数層設けた。以上の模型地盤作成が終了した後、先端断面積 2.0cm^2 、先端角 60° のポータブルコーン貫入試験機で初期状態のコーン貫入抵抗値を測定し、その後落下試験を行う。落下回数は25回とし、落下試験後に再度コーン貫入抵抗値を測定する。貫入抵抗値の測定位置は、打撃孔直下と打撃孔中心からの距離 D_c が0.35mと0.55mの同心円上とし、それぞれ数点測定を行った。なお、打撃前のコーン貫入抵抗値は概ね $q_c=200\sim 500\text{ kPa}$ ($2\sim 5\text{ kgf/cm}^2$)の範囲であった。

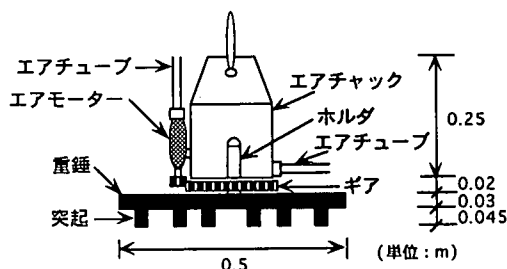


図-2 回転装置のメカニズム

$$\text{落下エネルギー: } E_g = M \cdot g \cdot H \quad (1a)$$

$$\text{回転エネルギー: } E_r = I \cdot \omega^2 / 2 \quad (1b)$$

ここに、 M : 重錘の質量、 I : 重錘の回転慣性、
 g : 重力加速度、 H : 落下高さ、
 ω : 回転角速度

今回の実験では、重錘を高さ $H=1.0\text{m}$ から落下させるとし、コンプレッサーの容量の制限ならびに落下エネルギーに回転エネルギーを加えることによる締め固め効果の違いの明瞭化のため、落下エネルギーと回転エネルギーの比を1:1に設定し、回転数を4Hzとした。

(4) 実験結果

図-3には、打撃孔直下と打撃孔中心からの距離が $D_c=0.35\text{m}$ 、 0.55m の位置でのコーン貫入抵抗値の増分 Δq_c (平均値)の深度分布の比較を示している。回転落

(3) 実験条件

実験は、重錘を吊り上げた後に回転を与えないで落下させる「自由落下試験」と、常に同じ方向に回転を与えて落下させる「回転落下試験」、打撃毎に回転方向を逆転させる「交番回転落下試験」の3種類を実施した。

重錘の落下エネルギーと回転エネルギーは次式で表される。

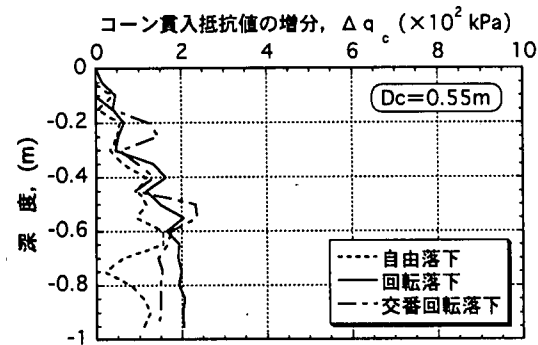
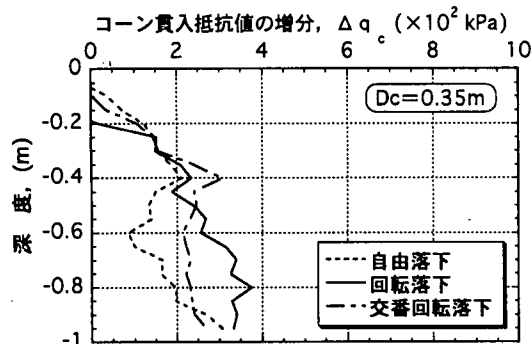
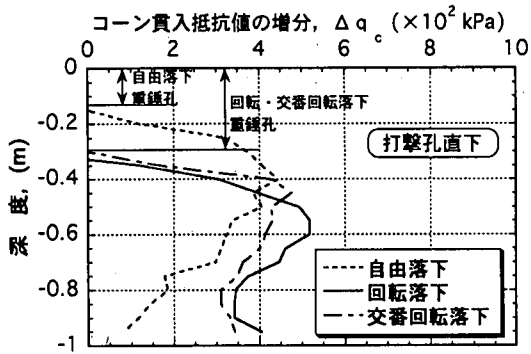


図-3 打撃によるコーン貫入抵抗値の増分の比較

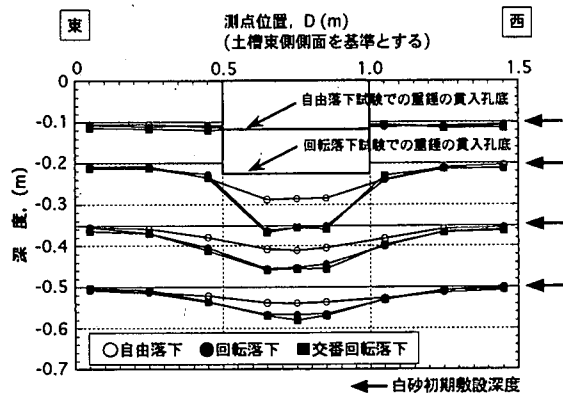


図-4 地盤内の鉛直変位の比較

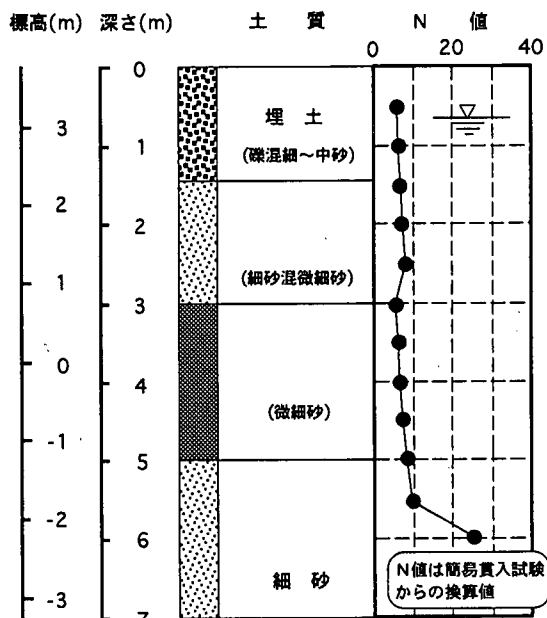


図-5 試験実施地点の土質とN値

下の場合、自由落下に比べてより深部まで貫入抵抗値の増加が大きくなっており、この傾向は打撃孔直下に限らず $D_c=0.35m, 0.55m$ の地点まで及んでいる。これは、回転を与えることにより、平面的にも貫入抵抗値が増加する領域が拡大することを表している。図-4には、地盤内の鉛直変位の比較を示した。地盤中の鉛直変位は明らかに回転落下の方が大きく、その差は打撃孔底から放射状に広がっているのが明瞭に認められ、コーン貫入抵抗値の差と整合するものである。

3. 現地試験による検討

実際の重錘落下工法では、 $100\sim 250kN(10\sim 25tf)$ の重錘を20m程度の高さから落下させるのが一般的である。例えば、半径 R 、厚さ t 、密度 ρ の円盤型の重錘に回転振動数 f の回転を与えて高さ H から落下させることを考えた場合、落下エネルギーは、式(1a)より $E_g = MgH = \rho \pi R^2 t g H$ 、回転エネルギーは、式(1b)より $E_r = I \omega^2 / 2 = \rho \pi^3 R^4 t f^2$ と表される。ここで、落下エネルギーと回転エネルギーの比を1:1にするとし、長さの単位をmとして $\pi^2 \approx g$ を考慮すると、 $E_r / E_g = (\pi^2 R^2 f^2) / (gH) = 1$ より、 $R \approx \sqrt{H} / f$ が導かれる。従って、 $H =$

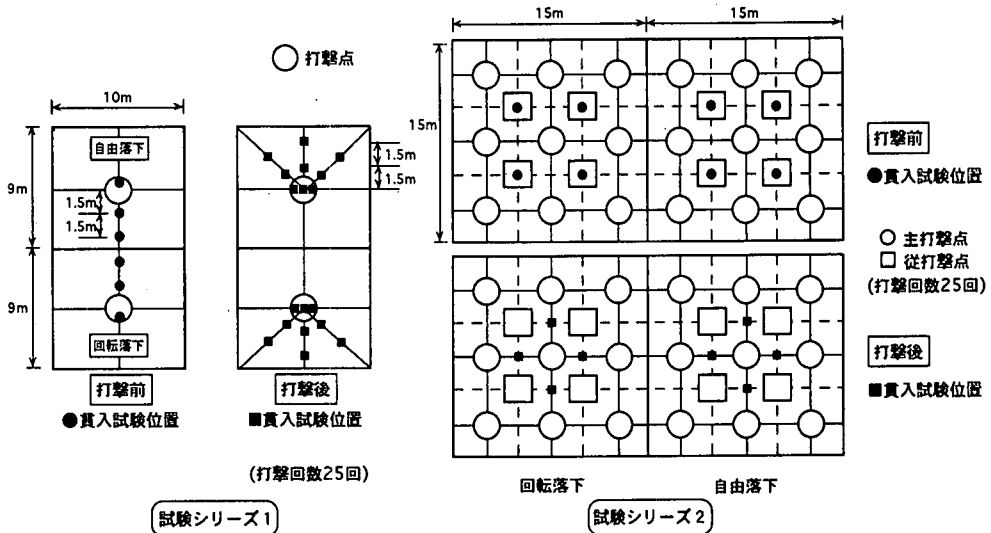


図-6 落下条件，打撃点の配置と打撃前後のコーン貫入試験実施位置

20m, $f=3.0\text{Hz}$ の場合には $R=1.5\text{m}$ となり，現状の技術で十分実現が可能であるといえる．以下では，実規模に比べてやや規模が小さいが，模型実験で得られた知見を確認する目的で現地試験を実施した結果について示す．

(1) 試験ヤードと地盤状況

現地試験を実施した場所は，東京電力富津火力発電所に隣接する送電線用の埋め立て地であり，この敷地内に $40\text{m}\times 45\text{m}$ の試験ヤードを設けた．試験に先立って簡易貫入試験機¹⁰⁾による簡単な地盤調査を実施したところ，地表からGL-2m付近まで N 値に換算した値で10~30程度まで締固まっており，現状のままでは重錘落下による締固め効果が十分発揮できないことが判明した．そこで，試験を実施する前にバックホーを用いて試験ヤード内の地表面下約2mを攪拌し，打撃前の地盤を緩めることにした．攪拌後の簡易貫入試験による換算 N 値の深度分布を図-5に示す．GL-5m以浅の試験対象範囲における N 値は概ね $N=6\sim 8$ 程度になっていることから，試験の実施可能な地盤になっていると判断される．

浚渫土である埋立土は概ね細砂で構成されていたが，一部に礫や貝殻を混入しており，所々粘性土の塊の存在が認められた．なお，細砂の平均粒径は約 0.18mm である．

(2) 試験ケースと条件

試験は大きく分けて2シリーズ行った．図-6に落下条件と打撃点の配置を示している．試験シリーズ1は，

2.で示した模型実験の延長で， $10\text{m}\times 9\text{m}$ をひとつの試験区域とし，自由落下試験と回転落下試験のそれぞれに対して打撃回数25回の試験を行った．試験シリーズ2は， $15\text{m}\times 15\text{m}$ を試験区域として自由落下試験と回転落下試験のそれぞれに対して打撃回数25回の打撃を主打撃9点，従打撃4点加え，打撃前後の地盤の平均的な締固め度を比較しようとするものである．

(3) 試験装置の概要

回転落下試験を行うにあたって，新たに試験装置を作製した．図-7にその概要を示している．用いた油圧チャックの容量から重錘の重さを $29.4\text{kN}(3\text{tf})$ とし，落下高さを10mとすると，式(1a)，(1b)ならびにエネルギー比を1:1に設定するという条件から，直径 2.1m ，厚さ 0.11m の鉄製の円形重錘を3Hzで回転する必要がある．一方，上空で重錘を回転させる際には回し始めにある程度の反力を必要とすることから，図に示すように重錘の上に油圧チャックを装着した反力桁を設け，回転落下試験時にはワイヤーを介して地盤上の反力体に結合することによって反力を取った．重錘の回転は，反力桁に取り付けられた2基の油圧モーターにより車輪を回転させる方式を採用した．なお，重錘の底面には，落下したときの空回りを低減する目的で， 0.05m 角の鋼棒を放射状に8本溶接して取り付けた．重錘の吊り上げには， $245\text{kN}(25\text{tf})$ 吊りの油圧クレーンを使用した．

(4) 測定項目

a) 試験シリーズ1: 落下試験前に地盤の初期状態での

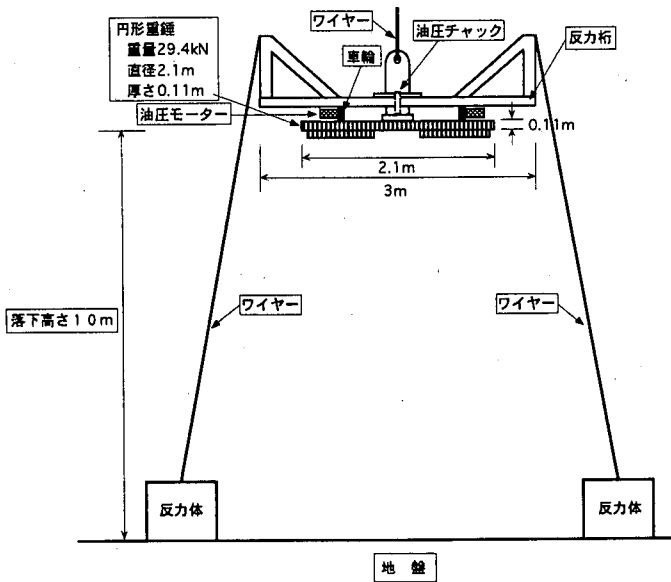


図-7 落下試験装置の概要

コーン貫入抵抗値を調べるため、オランダ式二重管コーン貫入試験機（先端断面積 10cm^2 ，先端角 60° ）による静的貫入試験を行う。調査位置は、各々のケースに対して3点とし、図-6に示すように打撃孔直下と打撃孔中心からの距離 $D=1.5\text{m}$ ， 3.0m の地点とした。また、レベル測量により試験前の地表の標高も測定した。落下試験時には、所定の打撃回数の時点で重錘の貫入量、打撃孔の直径などの測定を行った。落下試験終了後は打撃孔を埋め戻し、間隙水圧消散が終了するまでしばらく放置した後に、レベル測量による地表の標高の測定と図-6に示す位置でのコーン貫入試験を行った。なお、本地点では地下水位が当初予測していた深さ $GL-1.2\text{m}$ より浅く $GL-0.6\text{m}$ 付近にあったため、打撃を繰り返すに従って打撃孔底に水が溜まり打撃効率が低下することが懸念された。そこで、試験を実施する前に 0.5m 程度現地の砂を余盛りしてから落下試験を行うことにした。

b) 試験シリーズ2：落下試験の前に図-6に示す位置でコーン貫入試験を行うとともに地表の標高を測定する。打撃時の地表の標高の測定は、主打撃終了後と従打撃終了後にそれぞれ行った。打撃後のコーン貫入試験は、地盤の平均的な締固め度を比較する目的で、図-6に示すように試験区域中央付近の打撃を加えていない地点において測定を行った。この試験においても、事前に 0.5m 程度の余盛りを行ってから落下試験を実施している。

(5) 試験結果と考察

打撃試験前のコーン貫入抵抗値は、 $qc=3\sim 4\text{MPa}$ ($30\sim 40\text{kgf/cm}^2$)になっていた。これは、例えば埋立・浚渫土（砂）に対して提案されている qc 値と N 値の関係式 $N=qc/(4\sim 6)^{11)}$ の分母の係数を5として N 値を求めた場合、 $N=6\sim 8$ 程度になることから、図-5に示した簡易貫入試験の結果と整合すものである。なお、標高 $1\sim 1.4\text{m}$ 付近にコーン貫入抵抗値が急激に落ち込む層が存在していたが、ここには粘性土層が存在していたと推測される。

図-8には、試験シリーズ1による打撃孔直下と打撃孔中心からの距離が $D=1.5\text{m}$ ， 3.0m の位置でのコーン貫入抵抗値の増分 Δqc （平均値）の深度分布を示している。なお、局所的に大きな抵抗値が発生しているのは礫当たりによると考えられる。打撃孔直下ならびに $D=1.5\text{m}$ での貫入抵抗値をみると、回転落下の方が貫入抵抗値の増分が明らかに大きくなっており、小型模型実験で得られた知見が比較的規模の大きい条件に対しても当てはまることが判る。また、模型実験で認められた傾向と同様に自由落下に比べて回転落下では貫入抵抗値が増加する領域が地盤のより深部まで及び、打撃孔中心からの距離 $D=1.5\text{m}$ の結果に見られるように平面的にも締固め領域が拡大している様子が伺われる。図-9および図-10には、重錘貫入量ならびに地盤の沈下量と打撃回数の関係を示している。全打撃終了時点における重錘の貫入量、地盤の沈下量のいずれも回転落下が自由落下の1.5倍程度大きくなっていることか

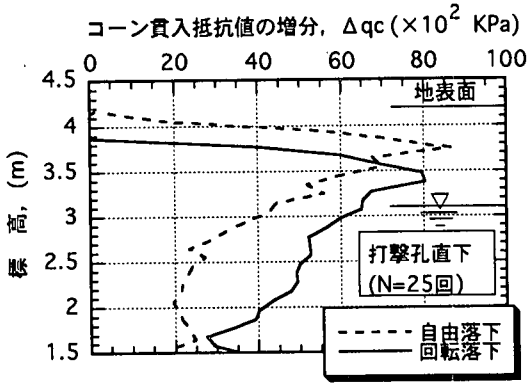


図-8 打撃によるコーン貫入抵抗値の増分の比較

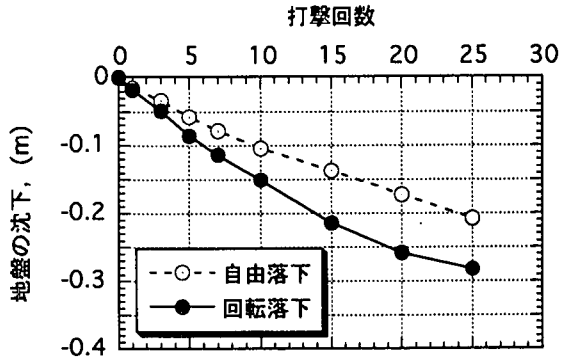


図-9 重錘の貫入量と打撃回数との関係(シリーズ1)

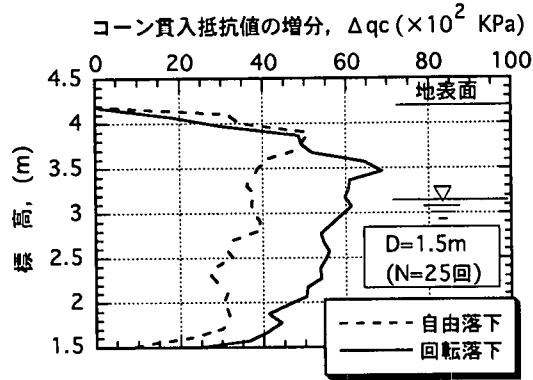


図-10 地盤の沈下と打撃回数との関係(シリーズ1)

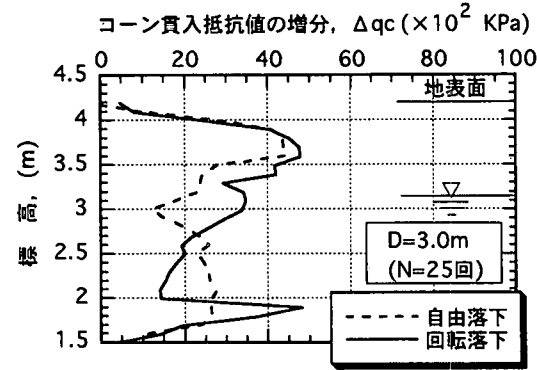


図-11 打撃前後のコーン貫入抵抗値の比較

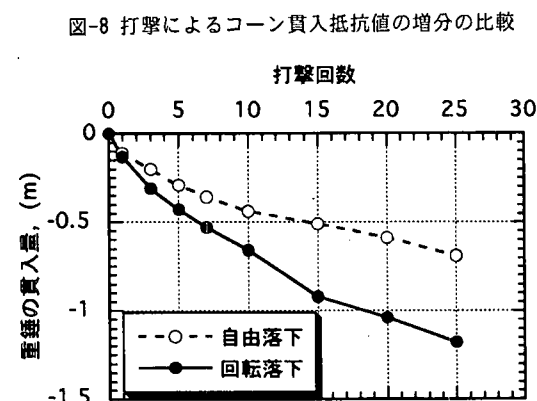
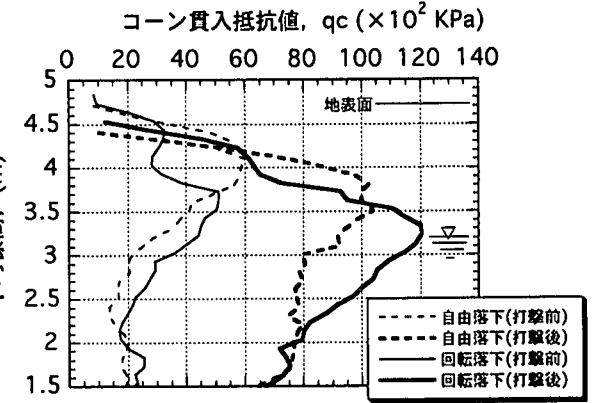


図-12 打撃前後のコーン貫入抵抗値の増分の比較



ら、回転落下の方が地盤の締固め度が向上し、その結果がコーン貫入抵抗値の増加にも反映されていることが判る。

図-11および図-12には、それぞれ試験シリーズ2での打撃前後のコーン貫入抵抗値の変化(平均値)および

その増分値(平均値)の比較を示した。本シリーズにおいても、回転落下の方がコーン貫入抵抗値が大きくなる傾向が認められ、締固め効果の向上が図られているのが判る。一方、図-13には、回転エネルギーの有無による地盤の沈下量の差異を比較する目的で、敷地内(15m×15m)に共通に加えられた自由落下成分の総打撃エネルギー(E_t)と地盤の平均沈下量の関係を示した。総打撃エネルギー E_t は、

$$E_t = (\text{重錘の重量}) \times (\text{落下高さ}) \times (\text{打撃回数}) \times (\text{打撃点数}) \quad (\text{kJ}) \quad (2)$$

で表されるとし、重錘の重量=29.4kN(3tf)、落下高さ=10m、打撃回数=25、打撃点数=9(主打撃終了時)、13(全打撃終了時)とした。この場合、両試験での地盤の沈下量の差は回転エネルギーの有無の違いによってもたらされたことになる。図によると、回転落下の方が地盤の沈下量が大きく、全打撃終了時点における沈下量の差は概ね0.05mで、この差が回転エネルギーによってもたらされたものである。これは自由落下で生じた地盤の沈下量の20%程度に相当する。

さて、通常、重錘落下工法では試験シリーズ2の打撃点配置に示したように、敷地に対して一定間隔で格子状に打撃点を配置し、繰り返し重錘を落下させることによって地盤を締固めるといふ施工が行われる。以下では、他地点での施工実績に基づく既往の結果を参考にしながら、今回実施した試験シリーズ2の結果と併せて回転落下を含めた簡易な施工管理の可能性を検討してみる。なお、既往のデータはすべて砂質系の埋立地盤(初期のN値は10以下)を対象に行われたものであるが、地点によって打撃仕様や敷地面積などが異なるため、比較のための統一的な指標として単位面積あたりの打撃エネルギーを用いる。自由落下成分による単位面積あたりの打撃エネルギー E_f は、次式で表現される¹⁾。

$$E_f = (\text{重錘の重量}) \times (\text{落下高さ}) \times (\text{打撃回数}) \times (\text{打撃点数}) / (\text{分担面積}) \quad (\text{kJ/m}^2) \quad (3)$$

上式に対して、本試験では右辺の第1項から4項までは式(2)で用いた値を採用すればよいが、第5項の分担面積については次のようにした。図-6の打撃点配置図を見ても判るように、15m×15mの敷地に対して主打撃は格子状に均等に打撃点が配置されていることから、主打撃に対する分担面積は図-14に示すように15m×15mとする。それに対して、本来主打撃点の間を埋めるように打撃しなければならない従打撃については、敷地の制約から中心付近の4点しか打撃を与えていないた

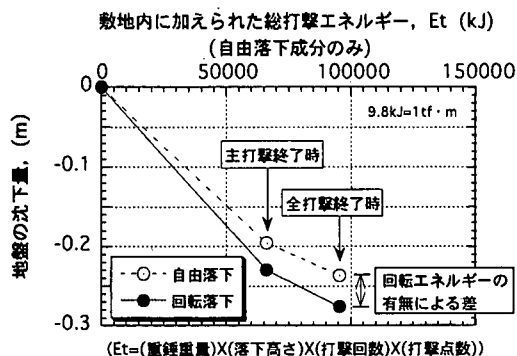


図-13 地盤の沈下量と敷地内に加えられた総打撃エネルギー(自由落下成分のみ)の関係

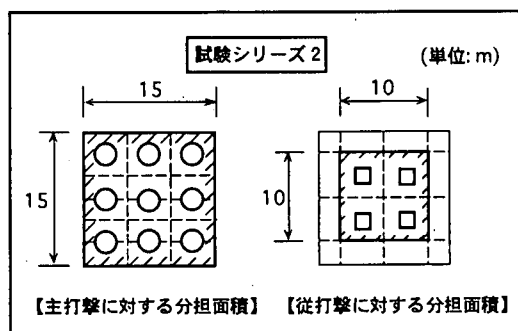


図-14 打撃に対する分担面積の考え方

め、他地点のデータと同じ土俵で比較するために分担面積を図-14に示すように10m×10mとみなして従打撃による単位面積あたりの打撃エネルギーを求めた。

図-15は、単位面積あたりの打撃エネルギーの増加に伴う地盤の沈下量の変化の傾向を調べるために準備したものである。打撃エネルギーとしては、式(3)による自由落下成分のみを用いている。図中の●と■がそれぞれ本試験での自由落下試験ならびに回転落下試験の結果であり、いずれも2点の内の打撃エネルギーが小さい方が主打撃終了時点に対応し、大きい方が従打撃も含めて全打撃が終了した時点に対応している。なお、本試験の従打撃による地盤の沈下量の増分については、敷地15m×15mに対する値に換算するため、実測の沈下量の増分値に対して分担面積比(15m×15m)/(10m×10m)=2.25を乗ずることによって与えている。地層構成や初期の地盤状態などの条件が同一ではないことからデータのばらつきが認められるが、本試験結果は他地点に比べて沈下量が大きめになっており、図中のKS地点(○印)に近い値となっている。これは、両地点とも原地盤の地下水位が高かったため、打撃前に

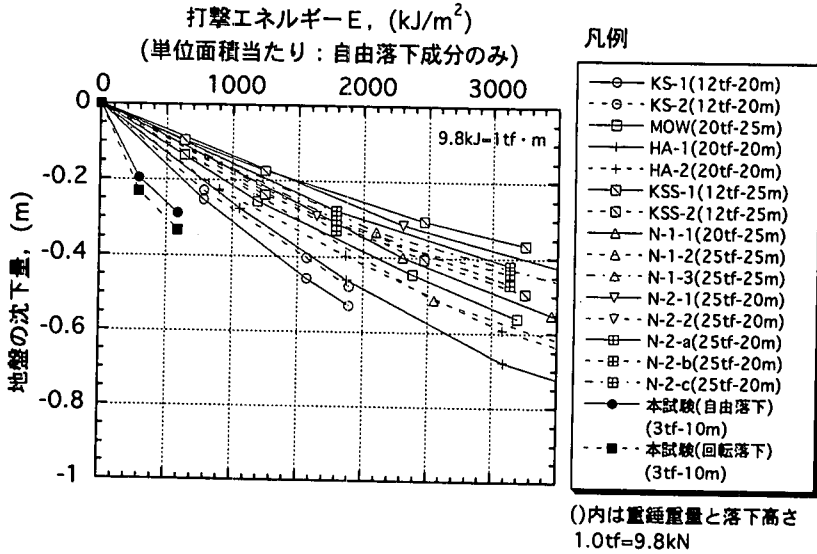


図-15 地盤の沈下量と単位面積あたりの打撃エネルギーの関係

0.5~0.6m程度の余盛りを施したことが、本試験では打撃前に地表付近を強制的に緩めたこと、などが原因になっていると考えられる。地点によらず全体的に最も大きな特徴は、単位面積あたりの打撃エネルギーと地盤の沈下量の関係はいずれも概ね双曲線関係になることであり、所定の仕様で打撃を繰り返すことによって地盤にエネルギーを加えていくと、打撃エネルギーの増加に伴って地盤の沈下量の増分が小さくなり、次第にこれ以上締まらない状態に近づいていくことを示している。この間、地盤のN値が増加していくのは、例えばMayneらの報告⁵⁾にも示されている。これらの様子を模式的に示したのが図-16である。ここで、地盤の沈下量S(増分値)と打撃エネルギーE(増分値, 単位面積当たり)の比 S/E で定義される打撃効率¹²⁾を考えると、打撃エネルギーと地盤の沈下量の関係が双曲線的な関係であることから、打撃の継続に伴って打撃効率の値は小さくなり、逆にN値は大きくなっていくことになる。地盤の沈下量Sと打撃エネルギーEは、複雑な地盤調査をすることなく簡易な測定と計算によって求められることから、この打撃効率 S/E と打撃による地盤の平均的なN値との関係が与えられていれば、簡易に改良の程度を把握することが可能になる。そこで、他地点のデータも含めて、打撃による平均N値(砂質系地盤)と打撃効率 S/E の関係をプロットしてみたのが図-17である。回転落下試験の単位面積あたりの打撃エネルギーについては、式(3)の右辺第1項と第2項を式(1b)の右辺に置き換え、式(3)から回転成分のエネルギーを求め、自由落下成分のエネルギーとの線

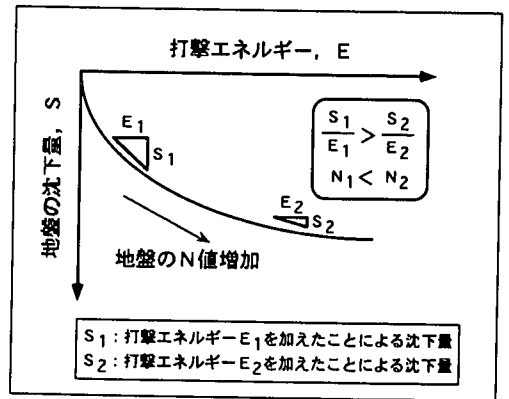


図-16 打撃効率の考え方の概念図

形和を仮定して与えた。また、本試験のデータについては、全打撃終了後のコーン貫入抵抗値 qc 値しか測定されていないので、平均的な qc 値から換算係数を5としてN値を求めている。先に示した通り、打撃の進行とともに S/E は減少し、それとともにN値は増加するが、回転の有無にかかわらず本試験データは他地点の平均的な関係と概ね一致しており、回転落下の場合にも従来の自由落下のデータで得られた関係式で打撃に伴う地盤の平均的なN値を評価し得る可能性が示唆される。ただし、本試験結果は限られた条件下での結果であり、今後様々な条件下での試験を行って検証する

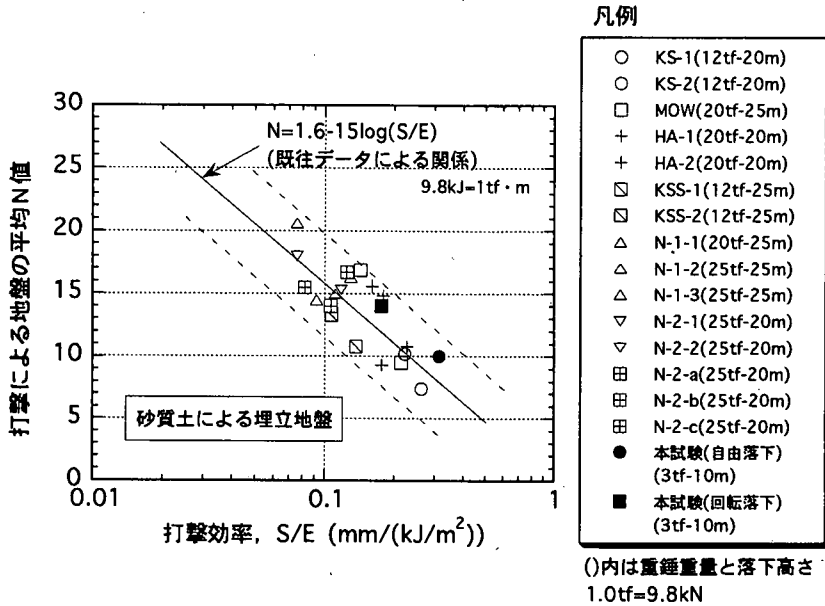


図-17 打撃による地盤の平均N値と打撃効率の関係

必要がある。

4. 結語

本報告では、重錘に回転を与えた状態で落下させた時の砂地盤の締固め改良に着目し、室内での小型模型実験と現地での比較的規模の大きい試験を行って、回転を与えた場合と与えない場合の締固め効果に関する比較を行った結果について示した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

1. 室内小型模型実験による検討

室内小型模型実験では、重さ490N(50kgf)の円盤形重錘(直径0.5m, 厚さ0.03m)を高さ1mから砂地盤に落下させて締固め効果を比較した。回転落下試験では、落下エネルギーと回転エネルギーを1:1にするため回転数を4Hzとした。

(1)打撃前後のコーン貫入抵抗値の変化によって締固め効果を比較したところ、回転を与えて落下させた場合の方が地盤のより深部まで貫入抵抗値が増加し、平面的にみても貫入抵抗値が増加する領域が拡大する傾向が得られた。

(2)回転を与えて落下させた方が重錘の貫入量も大きく、地盤内の鉛直変位も大きくなることから、より締固め効果が向上することが示された。

2. 現地試験による検討

室内小型模型実験によって得られた知見を確認する目的で、軟らかい砂質系の埋立地盤を対象とした比較的規模の大きい現地試験を実施した。試験では、29.4kN(3tf)の円盤形重錘(直径2.1m, 厚さ0.11m)を高さ10mから落下させた。回転落下試験では、落下エネルギーと回転エネルギーを1:1にするため回転数を3Hzとした。

(1)模型実験と同様に、締固め効果を打撃前後のコーン貫入抵抗値の変化によって比較したところ、回転を与えて落下させた場合の方が貫入抵抗値が増加する結果が得られた。これらは、模型実験の結果と一致している。また、回転を与えた方が打撃による地盤の平均沈下量も大きくなることが確認された。

(2)重錘落下による地盤の締固め効果の簡易予測法のひとつである平均N値と打撃効率の関係について既往のデータも参考にしながら検討した。本試験による結果は、回転の有無に関わらず既往のデータと概ね一致する傾向を示していた。これは、回転落下の場合にも打撃中の地盤の平均沈下量の測定と打撃エネルギーの計算によって地盤の概略の締固め度を予測できる可能性を示唆している。

3. 今後の課題

本研究で得られた知見は限られた条件の下での結果

である。今後は、地盤条件、落下エネルギーと回転エネルギーのエネルギー比、落下高さ、重錘重量や形状などをパラメータとした種々の条件下での試験を行って、今回得られた知見の実証を図る必要がある。また、経済性の評価なども重要な課題といえよう。

謝辞：現地試験の実施にあたっては、東京電力（株）富津火力建設所の方々に試験ヤードの提供など多大なご協力を頂いた。また、（財）電力中央研究所地盤耐震部の西好一部長ならびに田中幸久上席研究員には有益なご意見を頂いた。ここに記して心より感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば, Poran, C.J., Heh, K.S. and Rodriguez, J.A.: Impact Behavior of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.4, pp. 81-92, 1992.
- 2) 土谷尚：動圧密工法による砂質地盤の締固めに関する研究, 東京大学学位請求論文, 210p., 1995.
- 3) 大島昭彦：重錘落下による地盤の締固めに関する研究, 大阪市立大学学位請求論文, 161p., 1997.
- 4) 例えば, Poran, C.J. and Rodriguez, J.A. : Finite Element Analysis of Impact Behavior of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.4, pp.68-80, 1992.
- 5) 例えば, Mayne, P.W., Jones, J.S.Jr. and Dumas, J.C.: Ground Response to Dynamic Compaction, *Proc. ASCE*, Vol.110, No.6, pp.757-774, 1984.
- 6) 三笠正人, 木下哲生, 丸井英一：新しいT値による重錘落下締固め工法の管理, 土と基礎, Vol.34, No.8, pp. 35-42, 1986.
- 7) 大倉卓美：動圧密工法, 土木・建築技術者のための実用軟弱地盤対策技術総覧, 産業技術サービスセンター, pp. 733-744, 1993.
- 8) 吉田保夫, 金谷守, 國生剛治, 池田通陽：重錘の回転落下による地盤の締め固め効果, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.2047-2048, 1995.
- 9) Kanatani, M., Yoshida, Y., Kokusho, T. and Ikeda, M. : Model Tests on Densification of Sandy Ground by Dynamic Consolidation Method with Rotational Ram, *Proc. 3rd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, 1997.
- 10) 吉田保夫, 川崎了：サンプリング可能な簡易コーン貫入試験機の開発, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp. 41-42, 1990.
- 11) (社)土質工学会：土質調査法-第2回改訂版-, 土質工学会編, pp.226-239, 1982.
- 12) 湯浅健二, 坂本容, 山崎秀次, 大倉卓美：動圧密工法による岩砕埋立地の地盤改良と効果確認, 土と基礎, Vol.35, No.5, pp.39-44, 1987.

(1998.4.20 受付)

DENSIFICATION OF SANDY GROUND BY DYNAMIC COMPACTION WITH ROTATIONAL HAMMER

Mamoru KANATANI, Takaji KOKUSHO, Yasuo YOSHIDA and Naonobu NARUMI

The authors have proposed a new dynamic compaction technique making use of not only free fall energy but also rotational energy of the hammer for the purpose of the advancement of the densification of the granular soil ground. In this study, the small scale model tests and the large scale field tests to simulate the usual dynamic compaction method (DCM) and the dynamic compaction method with rotational hammer (RDCM) were conducted. From the test results, it is verified that the increments of the cone penetration resistance by RDCM are generally larger and the settlement of the ground surface by RDCM is larger than DCM.