

審査の結果の要旨

氏名 毛 無衛

本論文は **Experimental study on acoustic emissions during pile penetration in sand** (砂地盤への杭貫入に伴う AE 特性に関する模型実験) と題し、杭の支持力発現機構において周辺砂地盤の粒子破碎が果たしている役割について模型実験研究を行った成果である。

杭基礎は構造物の重量を支え、安定性を保つ普遍的な機構である。その動作メカニズムについて 1970 年前後に多くの研究が行われ、一定の成果が得られたものの、当時の計測技術の限界から進展が止まり、現代の杭基礎に関する議論は、経験に依存する面が多い。特に、杭本体と周辺地盤との力学的な相互作用については、載荷完了後の掘削調査こそ行われて興味深い知見が得られたものの、作用する荷重が増大して杭本体が沈下してゆくプロセスにおいてどのような相互作用が起こっているのか、実証が全く不十分であった。

論文提出者もメンバーに加わっていた先行研究では、杭の貫入に対する地盤の抵抗力は、旧来唱えられていた塑性論的なせん断破壊メカニズムによって発揮されているのではなく、杭先端直下の地盤が著しい圧縮を被ることによって発揮されるものであり、その結果、土粒子は著しく破碎されていることが見出された。しかしこの成果も載荷完了後の地盤掘削で見出された知見であるという限界があった。そこで本研究では、粒子の破碎時に発生する微小な音波(これをアコースティックエミッション、略称 AE と呼ぶ)を連続的に収録し、その特性を刻々に分析して、粒子破碎の状況を杭貫入の時系列に合わせて解明することを目指した。

本論文は英文 9 章から構成されており、第一章は上述のような研究の狙いを述べている。

第二章は既往の研究のレビューである。実験に伴う地中の現象を記録するには、従来から土圧計のようなものがあったが、これは応力集中現象の影響を受けるため精度が劣る。これに対して近年は画像解析の諸技術が進み、土槽の壁を透明にして内部で二次元的な杭実験を行うのであれば、土粒子の運動を刻々に追跡できるようになった。ただし実際の杭の挙動は三次元的であることに留意しなければならない。また、従来から載荷後の杭先端では粒子の破碎が著しく見出されており、杭挙動(荷重と沈下の関係)の非線形性において粒子破碎の演ずる役割への議論が存在した。しかし粒子破碎を刻々に検知できる方法が無く、議論は深まらなかった。AE は材料の破壊によって発生する微小な音波であり、その強弱から粒子破碎の程度を知る可能性があった。しかし実際には詳細な分析が不成功に終わっており、それ以上の研究は停止状態にあった。

第三章は模型実験装置に関する説明である。大小二種類の土槽の中に砂地盤を造成し、大型土層では一本杭(単杭)に加えて 3×3 の群杭載荷も多数行った。また透明な側壁沿いに 3 本の杭を設置して、杭の貫入時の砂地盤の変形を記録する画像解析用の実験も実施した。他方、小型実験は条件をパラメトリックに変えて多くの単杭三次元実験を実施した。また大小どちらのケースでも地表に空圧を載荷して地中の応力レベルを少しでも実地盤に近づける努力をした。AE の計測のためには、センサーを杭頭に設置して、地中で発生した微弱な音波を杭体に伝搬させて記録する方法が最も有効であった。ただし研究の後半では地中に高性能センサーを多数設置して、音波の到着時間のずれから音源(粒子破碎)位置を推定する研究も行った。

第四章は、実験に使用した砂材料の説明および実験方法の解説である。

既往の AE の実験研究の限界は、計測された微弱な音波の発生源が、必ずしも材料破壊とは限らなかったことである。今回の研究に照らせば、砂粒子の破碎が音波を発生することは確かであるものの、他にも粒子同士のズレ、コスレもまた音波を発生する。二種類の音波が混在すれば、そこから粒子破碎の情報を取り出すことは精度が劣る。そこで第五章では、一個の粒子を圧縮して AE を発生させた場合と、ズレやコスレの卓越する三つの状況（二個の粒子を擦りあう、砂層の中で固体を動かす、砂層を手でかき混ぜる）で計測した AE とを比較した。AE 記録をフーリエ変換して周波数領域で分析したところ、粒子破碎の起こる状況では AE の周波数に 100 kHz 以上が卓越するのに対し、ズレやコスレだけの状況では 100 kHz 以下（10 ないし 20kHz が卓越）することが分かった。この知見にもとづき、以後の AE 分析では 100 kHz 以上の高周波成分に着目する。

第六章では AE データの分析と解釈を行った。杭の貫入の初期には、荷重と変位の関係も線形弾性の挙動を示すが、この段階では作用する荷重も小さいため、AE も弱い。すなわち粒子は破碎が進まない。しかし杭の荷重変位関係が降伏し始めると AE の発生が激しくなる。降伏後には荷重変位関係は剛性の低い直線関係となって杭の貫入が進むが、この段階では AE の発生がやや減少する。また杭に載荷・除荷・再載荷を繰り返すと、過去の載荷履歴に影響されて杭の貫入抵抗が変動するが、これと AE 発生の変化も整合した。さらに、除荷時にも AE が発生することから、地盤のリバウンドが若干の粒子破碎を伴うことが推定された。

第七章では、AE 発生個所の推定を説明している。まず砂地盤中で P 波（音波）の伝搬速度を測定し、 $v=200\text{m/s}$ を得た。これを基に、貫入する杭の周辺複数の個所で AE を計測し、同一の粒子破碎から発生した AE の到着時刻の差から、音源位置を三次元的に推定した。結果によれば、閉じた杭先端から杭直径と同程度下がった位置に AE 発生の中心があり、それより側方や杭先端に接触する部分では AE は発生しない。杭先端に接触する部分の砂は杭体による拘束が著しく、等方圧縮的な応力状態にあつて破碎が生じにくいものと推定される。このような部分が存在することは、論文提出者も参加した先行研究で見出されている。これに対して直径の一倍程度下がった位置では破碎された砂が側方へ移動（杭貫入によるかき分け）できるため、最終的には杭の側面にも破碎砂が分布することになる。剛な粒子からなる珪砂と脆弱な珊瑚砂の両方を用いて実験を行い、一致する知見を得た。

群杭模型による AE 計測の結果を第八章が説明している。個々の杭が発揮する貫入抵抗は、過去の載荷履歴によって変化する。この複雑な事象は、計測した AE の強度と良好に一致し、AE が杭と地盤との力学的相互作用をよく反映すること、そして粒子破碎がこの相互作用において中心的役割を演じていることが明らかになった。

第九章は結論である。

以上をまとめると、従来の杭研究は力と変形という力学研究に留まる傾向があり、地盤と杭との相互作用を定量的に把握できない短所があつたのに対し、AE を用いた新たな分析では、地盤と杭の相互作用の研究において、単に力と変形の考察に留まらず、粒子破碎という現象を通じて地盤が著しい変形を発生する現象の時刻歴や位置までもが解明できるようになった。このことは地盤工学・基礎工学など当該学術の発展への貢献が大きい。よつて本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。

審査の結果の要旨

氏名 毛 無衛

本論文は **Experimental study on acoustic emissions during pile penetration in sand** (砂地盤への杭貫入に伴う AE 特性に関する模型実験) と題し、杭の支持力発現機構において周辺砂地盤の粒子破碎が果たしている役割について模型実験研究を行った成果である。

杭基礎は構造物の重量を支え、安定性を保つ普遍的な機構である。その動作メカニズムについて 1970 年前後に多くの研究が行われ、一定の成果が得られたものの、当時の計測技術の限界から進展が止まり、現代の杭基礎に関する議論は、経験に依存する面が多い。特に、杭本体と周辺地盤との力学的な相互作用については、載荷完了後の掘削調査こそ行われて興味深い知見が得られたものの、作用する荷重が増大して杭本体が沈下してゆくプロセスにおいてどのような相互作用が起こっているのか、実証が全く不十分であった。

論文提出者もメンバーに加わっていた先行研究では、杭の貫入に対する地盤の抵抗力は、旧来唱えられていた塑性論的なせん断破壊メカニズムによって発揮されているのではなく、杭先端直下の地盤が著しい圧縮を被ることによって発揮されるものであり、その結果、土粒子は著しく破碎されていることが見出された。しかしこの成果も載荷完了後の地盤掘削で見出された知見であるという限界があった。そこで本研究では、粒子の破碎時に発生する微小な音波(これをアコースティックエミッション、略称 AE と呼ぶ)を連続的に収録し、その特性を刻々に分析して、粒子破碎の状況を杭貫入の時系列に合わせて解明することを目指した。

本論文は英文 9 章から構成されており、第一章は上述のような研究の狙いを述べている。

第二章は既往の研究のレビューである。実験に伴う地中の現象を記録するには、従来から土圧計のようなものがあったが、これは応力集中現象の影響を受けるため精度が劣る。これに対して近年は画像解析の諸技術が進み、土槽の壁を透明にして内部で二次元的な杭実験を行うのであれば、土粒子の運動を刻々に追跡できるようになった。ただし実際の杭の挙動は三次元的であることに留意しなければならない。また、従来から載荷後の杭先端では粒子の破碎が著しく見出されており、杭挙動(荷重と沈下の関係)の非線形性において粒子破碎の演ずる役割への議論が存在した。しかし粒子破碎を刻々に検知できる方法が無く、議論は深まらなかった。AE は材料の破壊によって発生する微小な音波であり、その強弱から粒子破碎の程度を知る可能性があった。しかし実際には詳細な分析が不成功に終わっており、それ以上の研究は停止状態にあった。

第三章は模型実験装置に関する説明である。大小二種類の土槽の中に砂地盤を造成し、大型土層では一本杭(単杭)に加えて 3×3 の群杭載荷も多数行った。また透明な側壁沿いに 3 本の杭を設置して、杭の貫入時の砂地盤の変形を記録する画像解析用の実験も実施した。他方、小型実験は条件をパラメトリックに変えて多くの単杭三次元実験を実施した。また大小どちらのケースでも地表に空圧を載荷して地中の応力レベルを少しでも実地盤に近づける努力をした。AE の計測のためには、センサーを杭頭に設置して、地中で発生した微弱な音波を杭体に伝搬させて記録する方法が最も有効であった。ただし研究の後半では地中に高性能センサーを多数設置して、音波の到着時間のずれから音源(粒子破碎)位置を推定する研究も行った。

第四章は、実験に使用した砂材料の説明および実験方法の解説である。

既往の AE の実験研究の限界は、計測された微弱な音波の発生源が、必ずしも材料破壊とは限らなかったことである。今回の研究に照らせば、砂粒子の破碎が音波を発生することは確かであるものの、他にも粒子同士のズレ、コスレもまた音波を発生する。二種類の音波が混在すれば、そこから粒子破碎の情報を取り出すことは精度が劣る。そこで第五章では、一個の粒子を圧縮して AE を発生させた場合と、ズレやコスレの卓越する三つの状況（二個の粒子を擦りあう、砂層の中で固体を動かす、砂層を手でかき混ぜる）で計測した AE とを比較した。AE 記録をフーリエ変換して周波数領域で分析したところ、粒子破碎の起こる状況では AE の周波数に 100 kHz 以上が卓越するのに対し、ズレやコスレだけの状況では 100 kHz 以下（10 ないし 20kHz が卓越）することが分かった。この知見にもとづき、以後の AE 分析では 100 kHz 以上の高周波成分に着目する。

第六章では AE データの分析と解釈を行った。杭の貫入の初期には、荷重と変位の関係も線形弾性の挙動を示すが、この段階では作用する荷重も小さいため、AE も弱い。すなわち粒子は破碎が進まない。しかし杭の荷重変位関係が降伏し始めると AE の発生が激しくなる。降伏後には荷重変位関係は剛性の低い直線関係となって杭の貫入が進むが、この段階では AE の発生がやや減少する。また杭に載荷・除荷・再載荷を繰り返すと、過去の載荷履歴に影響されて杭の貫入抵抗が変動するが、これと AE 発生の変化も整合した。さらに、除荷時にも AE が発生することから、地盤のリバウンドが若干の粒子破碎を伴うことが推定された。

第七章では、AE 発生個所の推定を説明している。まず砂地盤中で P 波（音波）の伝搬速度を測定し、 $v=200\text{m/s}$ を得た。これを基に、貫入する杭の周辺複数の個所で AE を計測し、同一の粒子破碎から発生した AE の到着時刻の差から、音源位置を三次元的に推定した。結果によれば、閉じた杭先端から杭直径と同程度下がった位置に AE 発生の中心があり、それより側方や杭先端に接触する部分では AE は発生しない。杭先端に接触する部分の砂は杭体による拘束が著しく、等方圧縮的な応力状態にあつて破碎が生じにくいものと推定される。このような部分が存在することは、論文提出者も参加した先行研究で見出されている。これに対して直径の一倍程度下がった位置では破碎された砂が側方へ移動（杭貫入によるかき分け）できるため、最終的には杭の側面にも破碎砂が分布することになる。剛な粒子からなる珪砂と脆弱な珊瑚砂の両方を用いて実験を行い、一致する知見を得た。

群杭模型による AE 計測の結果を第八章が説明している。個々の杭が発揮する貫入抵抗は、過去の載荷履歴によって変化する。この複雑な事象は、計測した AE の強度と良好に一致し、AE が杭と地盤との力学的相互作用をよく反映すること、そして粒子破碎がこの相互作用において中心的役割を演じていることが明らかになった。

第九章は結論である。

以上をまとめると、従来の杭研究は力と変形という力学研究に留まる傾向があり、地盤と杭との相互作用を定量的に把握できない短所があつたのに対し、AE を用いた新たな分析では、地盤と杭の相互作用の研究において、単に力と変形の考察に留まらず、粒子破碎という現象を通じて地盤が著しい変形を発生する現象の時刻歴や位置までもが解明できるようになった。このことは地盤工学・基礎工学など当該学術の発展への貢献が大きい。よつて本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。

審査の結果の要旨

氏名 毛 無衛

本論文は **Experimental study on acoustic emissions during pile penetration in sand** (砂地盤への杭貫入に伴う AE 特性に関する模型実験) と題し、杭の支持力発現機構において周辺砂地盤の粒子破砕が果たしている役割について模型実験研究を行った成果である。

杭基礎は構造物の重量を支え、安定性を保つ普遍的な機構である。その動作メカニズムについて 1970 年前後に多くの研究が行われ、一定の成果が得られたものの、当時の計測技術の限界から進展が止まり、現代の杭基礎に関する議論は、経験に依存する面が多い。特に、杭本体と周辺地盤との力学的な相互作用については、載荷完了後の掘削調査こそ行われて興味深い知見が得られたものの、作用する荷重が増大して杭本体が沈下してゆくプロセスにおいてどのような相互作用が起こっているのか、実証が全く不十分であった。

論文提出者もメンバーに加わっていた先行研究では、杭の貫入に対する地盤の抵抗力は、旧来唱えられていた塑性論的なせん断破壊メカニズムによって発揮されているのではなく、杭先端直下の地盤が著しい圧縮を被ることによって発揮されるものであり、その結果、土粒子は著しく破砕されていることが見出された。しかしこの成果も載荷完了後の地盤掘削で見出された知見であるという限界があった。そこで本研究では、粒子の破砕時に発生する微小な音波(これをアコースティックエミッション、略称 AE と呼ぶ)を連続的に収録し、その特性を刻々に分析して、粒子破砕の状況を杭貫入の時系列に合わせて解明することを目指した。

本論文は英文 9 章から構成されており、第一章は上述のような研究の狙いを述べている。

第二章は既往の研究のレビューである。実験に伴う地中の現象を記録するには、従来から土圧計のようなものがあったが、これは応力集中現象の影響を受けるため精度が劣る。これに対して近年は画像解析の諸技術が進み、土槽の壁を透明にして内部で二次元的な杭実験を行うのであれば、土粒子の運動を刻々に追跡できるようになった。ただし実際の杭の挙動は三次元的であることに留意しなければならない。また、従来から載荷後の杭先端では粒子の破砕が著しく見出されており、杭挙動(荷重と沈下の関係)の非線形性において粒子破砕の演ずる役割への議論が存在した。しかし粒子破砕を刻々に検知できる方法が無く、議論は深まらなかった。AE は材料の破壊によって発生する微小な音波であり、その強弱から粒子破砕の程度を知る可能性があった。しかし実際には詳細な分析が不成功に終わっており、それ以上の研究は停止状態にあった。

第三章は模型実験装置に関する説明である。大小二種類の土槽の中に砂地盤を造成し、大型土層では一本杭(単杭)に加えて 3×3 の群杭載荷も多数行った。また透明な側壁沿いに 3 本の杭を設置して、杭の貫入時の砂地盤の変形を記録する画像解析用の実験も実施した。他方、小型実験は条件をパラメトリックに変えて多くの単杭三次元実験を実施した。また大小どちらのケースでも地表に空圧を載荷して地中の応力レベルを少しでも実地盤に近づける努力をした。AE の計測のためには、センサーを杭頭に設置して、地中で発生した微弱な音波を杭体に伝搬させて記録する方法が最も有効であった。ただし研究の後半では地中に高性能センサーを多数設置して、音波の到着時間のずれから音源(粒子破砕)位置を推定する研究も行った。

第四章は、実験に使用した砂材料の説明および実験方法の解説である。

既往の AE の実験研究の限界は、計測された微弱な音波の発生源が、必ずしも材料破壊とは限らなかったことである。今回の研究に照らせば、砂粒子の破碎が音波を発生することは確かであるものの、他にも粒子同士のズレ、コスレもまた音波を発生する。二種類の音波が混在すれば、そこから粒子破碎の情報を取り出すことは精度が劣る。そこで第五章では、一個の粒子を圧縮して AE を発生させた場合と、ズレやコスレの卓越する三つの状況（二個の粒子を擦りあう、砂層の中で固体を動かす、砂層を手でかき混ぜる）で計測した AE とを比較した。AE 記録をフーリエ変換して周波数領域で分析したところ、粒子破碎の起こる状況では AE の周波数に 100 kHz 以上が卓越するのに対し、ズレやコスレだけの状況では 100 kHz 以下（10 ないし 20kHz が卓越）することが分かった。この知見にもとづき、以後の AE 分析では 100 kHz 以上の高周波成分に着目する。

第六章では AE データの分析と解釈を行った。杭の貫入の初期には、荷重と変位の関係も線形弾性の挙動を示すが、この段階では作用する荷重も小さいため、AE も弱い。すなわち粒子は破碎が進まない。しかし杭の荷重変位関係が降伏し始めると AE の発生が激しくなる。降伏後には荷重変位関係は剛性の低い直線関係となって杭の貫入が進むが、この段階では AE の発生がやや減少する。また杭に載荷・除荷・再載荷を繰り返すと、過去の載荷履歴に影響されて杭の貫入抵抗が変動するが、これと AE 発生の変化も整合した。さらに、除荷時にも AE が発生することから、地盤のリバウンドが若干の粒子破碎を伴うことが推定された。

第七章では、AE 発生個所の推定を説明している。まず砂地盤中で P 波（音波）の伝搬速度を測定し、 $v=200\text{m/s}$ を得た。これを基に、貫入する杭の周辺複数の個所で AE を計測し、同一の粒子破碎から発生した AE の到着時刻の差から、音源位置を三次元的に推定した。結果によれば、閉じた杭先端から杭直径と同程度下がった位置に AE 発生の中心があり、それより側方や杭先端に接触する部分では AE は発生しない。杭先端に接触する部分の砂は杭体による拘束が著しく、等方圧縮的な応力状態にあつて破碎が生じにくいものと推定される。このような部分が存在することは、論文提出者も参加した先行研究で見出されている。これに対して直径の一倍程度下がった位置では破碎された砂が側方へ移動（杭貫入によるかき分け）できるため、最終的には杭の側面にも破碎砂が分布することになる。剛な粒子からなる珪砂と脆弱な珊瑚砂の両方を用いて実験を行い、一致する知見を得た。

群杭模型による AE 計測の結果を第八章が説明している。個々の杭が発揮する貫入抵抗は、過去の載荷履歴によって変化する。この複雑な事象は、計測した AE の強度と良好に一致し、AE が杭と地盤との力学的相互作用をよく反映すること、そして粒子破碎がこの相互作用において中心的役割を演じていることが明らかになった。

第九章は結論である。

以上をまとめると、従来の杭研究は力と変形という力学研究に留まる傾向があり、地盤と杭との相互作用を定量的に把握できない短所があつたのに対し、AE を用いた新たな分析では、地盤と杭の相互作用の研究において、単に力と変形の考察に留まらず、粒子破碎という現象を通じて地盤が著しい変形を発生する現象の時刻歴や位置までもが解明できるようになった。このことは地盤工学・基礎工学など当該学術の発展への貢献が大きい。よつて本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。