

論文の内容の要旨

論文題目 Behavior of Pile Group Embedded near Surface Fault Rupture
(地震断層近傍の群杭基礎の挙動)

氏 名 サダル アミール アハマッド

1999年に台湾で発生した集集地震(Chi-Chi Earthquake)では断層破壊面が地表まで到達し、これによって橋梁などの社会基盤施設に甚大な被害が発生した。これら断層変位に直接関わる被害事例は、地盤の加速度や速度が最大の課題となる通常のシナリオとは全く異なった見地に立って検討される必要がある。被害を受けた橋梁の多くは、河川が山地から平野に流れ出る扇状地に位置しており、いたがってこれらの基礎は河川が長い歳月をかけて運んできた砂礫地盤中に埋設されている。巨礫を含む未固結の堆積層の直下に断層変位が生じると、ひずみは広範囲に分散され、かつその範囲は砂地盤の物性のみならず断層の伏角等、幾何学的な諸元にも大きく支配される。結果的に埋設された基礎は、主要な破壊領域から離れていたとしても変形を受ける可能性もある。この問題を分析するためには、未固結の堆積層の変形に加えて、杭と地盤の相互作用という 2 つの現象を同時に議論する必要がある。縦ずれ及び横ずれの断層変位によって生じる未固結の地盤の変形に関してはこれまでに様々な研究事例があるが、乾燥した砂を用いた実験、あるいは数値計算による検証がその多くを占めている(例えば、Bray 1999, Stone 1988 等)。一方で、断層破壊が構造物に及ぼす影響に関する研究事例は少ない。この研究は、地盤が変形する際の地盤と杭基礎との相互作用を数値計算と模型実験によって検証することを目的とする。

断層破壊が構造物に与える影響の数値解析は、疑似静的時刻暦法を用いた Material Point Method (MPM)によった。MPM では、計算対象は物質粒子 (Material Point : MP) のク

ラスターとして表現される。対象となる物質の物性値（ラグランジュ変数）を運ぶ MP は、空間に固定されたオイラー座標の格子境界を自由に移動することができる。この計算格子は計算対象となる物体の仮想位置全体を覆うもので、計算を通してその形が一定に保たれるため、従来の有限要素法にありがちな格子の大変形による計算の破綻がない。したがって大断層のような変形問題の記述には極めて適した手法であるが、一方で不均一性やセル内に存在する境界等を明確に表現できないことがこの手法の欠点である。言い換えれば、格子の大きさが MPM の信頼度を決定する。断層の問題を検討する上でこれらの MPM の欠点のある程度改良しておくことが必須である。形状関数やメッシュ形状の選択など、通常の有限要素法で使われる技巧も含めて、MPM の改良手法を提示し、その効果を確認した（第 2 章）。

メッシュ礫混じりの未固結地盤の構成モデルも重要である。ここでは Drucker-Prager, Mohr Coulomb, Smoothed Hyperbolic Mohr Coulomb そして Generalized plasticity model を検討の対象とした（第 3 章）。

数値解析の結果のみ示すのではなく、現れた現象を支配する要因や、そこに伏在する物理的背景を洞察し簡潔に既述することが、その結果を工学的に実地に応用する上で重要になる。そこで断層を介して接する 2 つの地盤を 2 つの弾性棒で表現し、それらがその長さ方向に一様に分布する断塑性ばねを介して接しているという簡単な断層の力学モデルを想定した。そしてその下端に基盤断層変位に相当するずれを加えたときのずれの伝播を解析的に表現し、現象を支配すると考えられるパラメータを抽出した。そのパラメータをもって MPM の解析結果を検討し、層厚や基盤のずれが異なるケースでもパラメータで再記述した尺度で見ると相似性の強い状況が現れることを確認した。これらの議論は 2 つの棒を拘束する圧力を深さ方向で変化させた場合、さらに断層伏角やダイラタンシーの影響を取り込んだ場合にも拡張されている（第 4 章）。

未固結地盤の物性と、断層の幾何学的パラメータを変化させて、まず 2 次元のパラメトリックスタディを行ない、断層によって生じる未固結地盤の変形のパターンとそれが杭（壁）基礎に与える影響を検討した。ここでは特に地盤材料のダイラタンシー特性、表層の厚さ、断層の俯角などの影響に重点が置かれた。自然に堆積する地盤は、概して良配合の粒状体の集合である。地盤がせん断を受けると、収縮するという明確な兆候を見せることもなく膨張を続け、せん断変位がせん断層の厚さの 2 倍から 3 倍に達すると、体積が最大となる。よってここで議論される地盤は、一定の弾性を持つ一様で等方性の物質と仮定されている。関連流れ則によるモール・クーロンの破壊基準がその塑性挙動を表す。自然堆積地盤は巨礫の中に細粒分を含むことを考慮すると、せん断層はせん断過程を通じて膨張し続けるものと仮定された。その結果、逆断層では断層破断面の沿う方向の主要せん断面に加えて、これと共役なせん断面が現れ、結果として左右から収縮する地盤に押し出されるように土楔が形成されていく様子が確認できた。そのような地盤の中にあつて杭基礎は（断層面から離れていても）水平方向に地盤の変形に追従して変形する一方で、体積膨

張と土楔の押し上げに伴う地盤の盛り上がりには杭基礎は抵抗し、地盤の上昇が拘束される様子も確認された（第 5 章）。

しかしながら実際の杭基礎と地盤の相互作用は 3 次元空間で確認されるべきであり、そのためには 3 次元への MPM の拡張と、またそれを検証するための実験が必要である。そこで水密性の砂箱を用いた断層模型実験も行われた。この実験では、地盤を飽和させたまません断することが可能であり、乾燥した地盤、水で飽和した地盤の双方についての実験を行った。前章で示したように群杭の軸方向剛性の効果が大きく、せん断層の発達と地盤の変形パターンに大きく影響することが観測されたが、断層面（せん断層）の発達も杭周りで杭の存在に大きく影響を受け変化している様子が確認された。また **push-over** 実験を通して、MPM の妥当性を検討した（第 6 章）。

上記の実験では検証の幅に限界があり、これを補うために他の実験例や数値解析例を用いて MPM の検証を行い、概ね良好な一致を得た。ただし他の手法では解析可能な変形範囲が限定され、これを超える MPM の結果については今後さらに可能な手段で確認を進めていく必要がある（第 7 章）。