

杭—地盤系の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻 建築地震地盤学領域
宮本研究室

秀 川 貴 彦

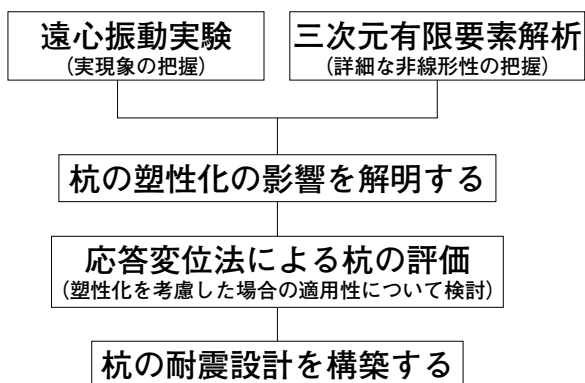
1. 序論

地震は恐ろしい自然現象である。大地震により建物が倒壊し、人命にも大きな影響が及ぶことは、誰もが理解しているところである。1995 年 1 月 17 日に発生した内陸直下型の兵庫県南部地震では阪神・淡路地域を中心に多くの建築物が倒壊し、多くの人命を奪った。2011 年 3 月 11 日には東北地方の太平洋沖で発生した海溝型の巨大地震と、その後の大津波によって建築物は倒壊し、海岸沿いに位置していた幾つかの街は全滅した。人的被害も不明者も含め膨大な数になろうとしている。また、福島第一原子力発電所が損傷を受けたことから、今回の地震が世界に与えた影響はとてつもなく大きい。日本はプレート境界上に存在する国であることから、今後も大地震の発生は十分懸念される。そのような避けることができない地震への対応として、耐震技術をより向上させ、その成果を耐震設計の

構築に反映させることで地震に強い街づくりを進めていく必要がある。

地震時には、地盤と建物が相互に影響しあう¹⁾。しかし、その際には不確定要素が多く、大地震時の建物の揺れを正確に予測するためには多くの課題を残している。不確定要素として、地盤の塑性化や建物の損傷が挙げられ、それにより揺れ方は大きく異なってくる。本研究では、大地震による地盤と杭の塑性化によって建物がどのように応答するか解明し、軟弱地盤に建設される建築物の耐震性を高めることを目的とした。そのために、地盤と杭の塑性化を取り入れた遠心振動実験と、そのシミュレーション解析を行った。また、杭の塑性化を考慮した杭設計の評価方法についても検討を行い、軟弱地盤に建設される杭基礎の耐震設計の構築に反映させる。

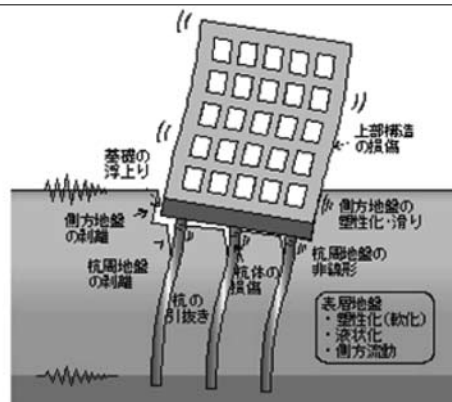
研究フロー



2. 遠心振動実験

杭頭部の杭断面が異なる 3 種類の杭を用いて、杭頭部を意図的に塑性化させる実験を行った。実験では、地盤の自重応力状態を再現できる遠心力载荷装置を用いた。図 1 に試験体と杭の詳細図を示す。試験体は、1/40 スケールの模型を想定している。Case1 で用いる杭は、直径 8mm、肉厚 2mm、長さ 201mm（実寸

不確定要素が多いため、予測するのが難しい



⇒不確定要素を明らかにしていく必要がある

大直径 32cm、肉厚 8cm) のアルミ製の中空杭（普通杭）である。Case2 で用いる杭は、塑性化しやすいように杭頭部の断面を薄くしたアルミ製の中空杭（塑性杭）である。Case3 で用いる杭は、さらに杭頭の断面を薄くしたアルミ製の中空杭（強塑性杭）である。入力波を図 2 に示す。入力波は、八戸波（八戸 1968 NS）とし、小加震（30gal）と大加震（250gal）を入力した。

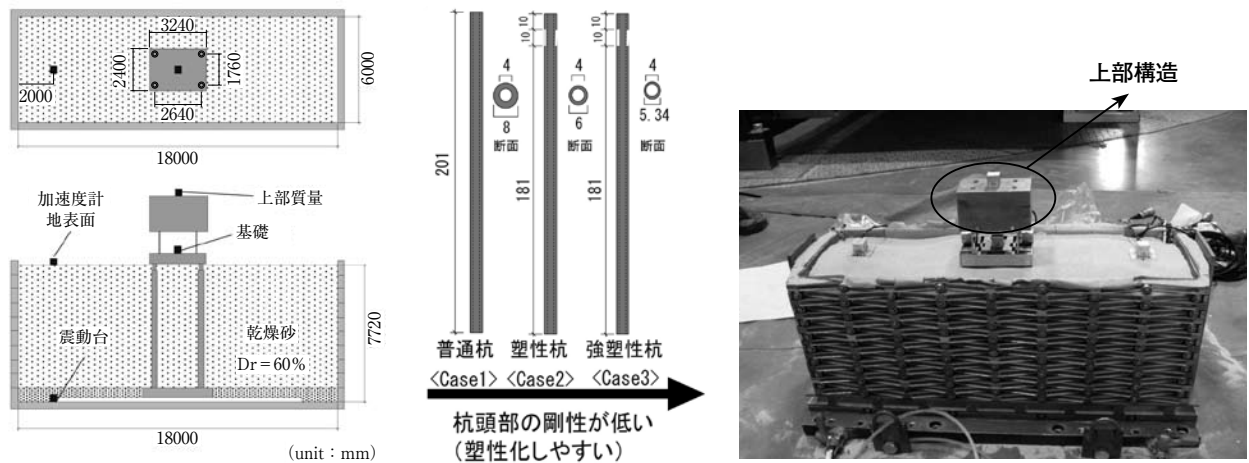


図1 試験体と杭の詳細図

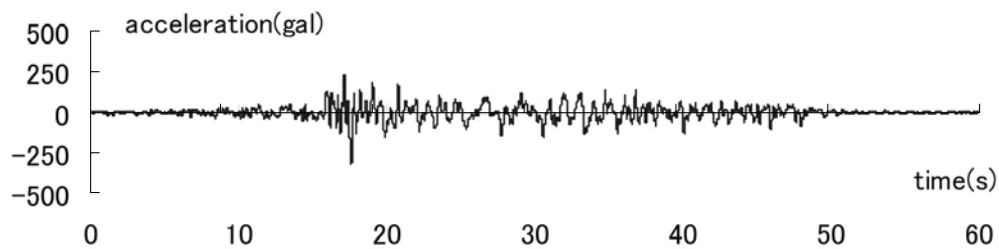


図2 入力波

図3に、遠心振動実験で得られた上部構造の加速度より算出した、上部構造の加速度応答スペクトルを示す。小加震では、各ケースでピーク値は約250galとなり、各ケースで違いは見られない。大加震では

Case1で約2800gal、Case2で約2200gal、Case3で約1300galとなっている。これより、杭頭部の塑性化状態が異なることで杭基礎建物の応答特性は大きく変化することがわかる。

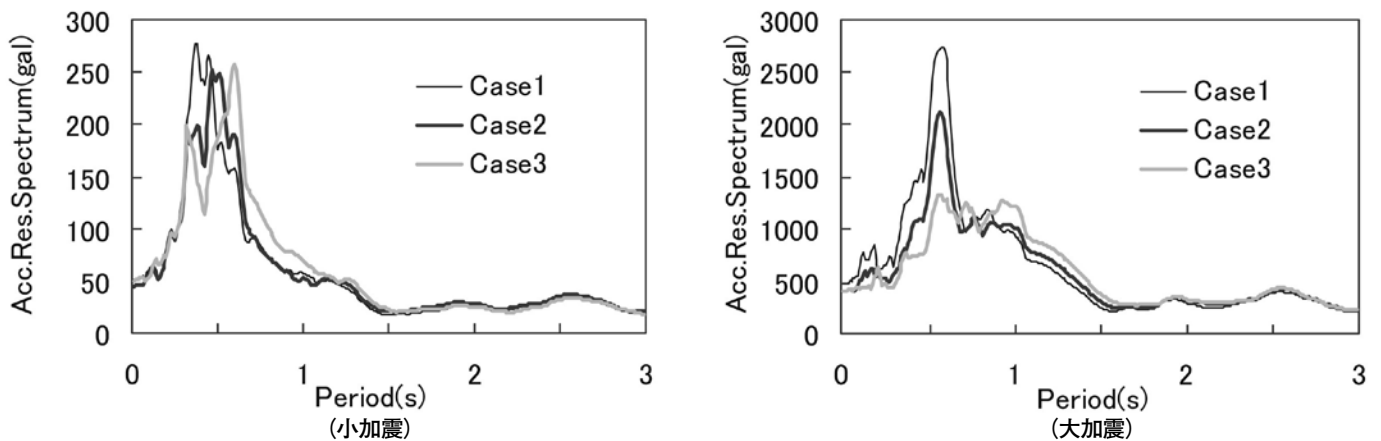


図3 上部構造の加速度応答スペクトル (h=5%)

3. 三次元有限要素解析

三次元有限要素解析を用いて、遠心振動実験のシミュレーション解析を行った。遠心振動実験の試験体を、図4のようにモデル化し、汎用ソフトであるLS-DYNA²⁾を用いてシミュレーション解析を行った。

上部構造および基礎はソリッド要素で剛体、地盤はソリッド要素で弾塑性体、また杭はシェル要素で杭頭部を弾塑性体、杭頭部以外を弾性体としている。地盤の非線形特性は、モール・クーロンモデルを採用した。

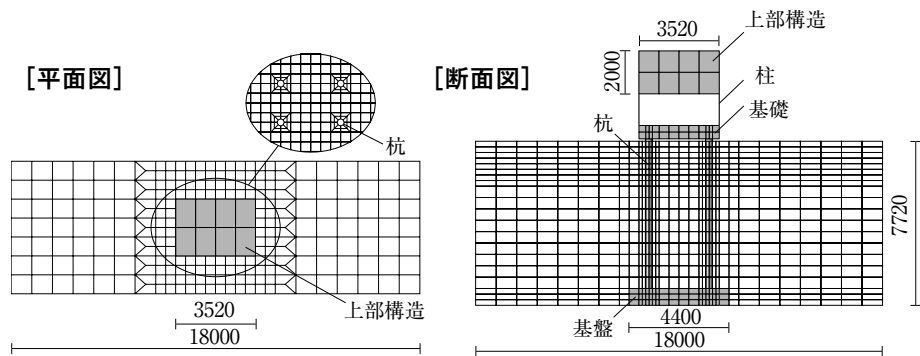


図4 三次元解析モデル

実験結果との対応を確認する。遠心振動実験によって杭頭部が大きく塑性化した Case3 の実験結果と解析結果について検討する。図5に、上部構造の加速度時刻歴を示す。解析結果は実験結果と良い対応を示している。また、加速度応答スペクトルにおいても実験結果と解析結果は概ね一致している。以上より、上部構造の応答を解析モデルで再現できていることが確認できる。

図6に、大加震により得られた Case3 の杭頭部および杭周辺部の塑性ひずみ分布を示す。杭頭部では、それぞれ4本の杭に塑性ひずみが確認できる。また、杭周辺部では、それぞれ杭周辺の地盤が大加震によって塑性化しており、他の杭に及ぼす影響はあまり大きくないことが確認できる。

以上より、三次元有限要素解析を用いたシミュレーション解析は、十分に妥当性があることがわかる。

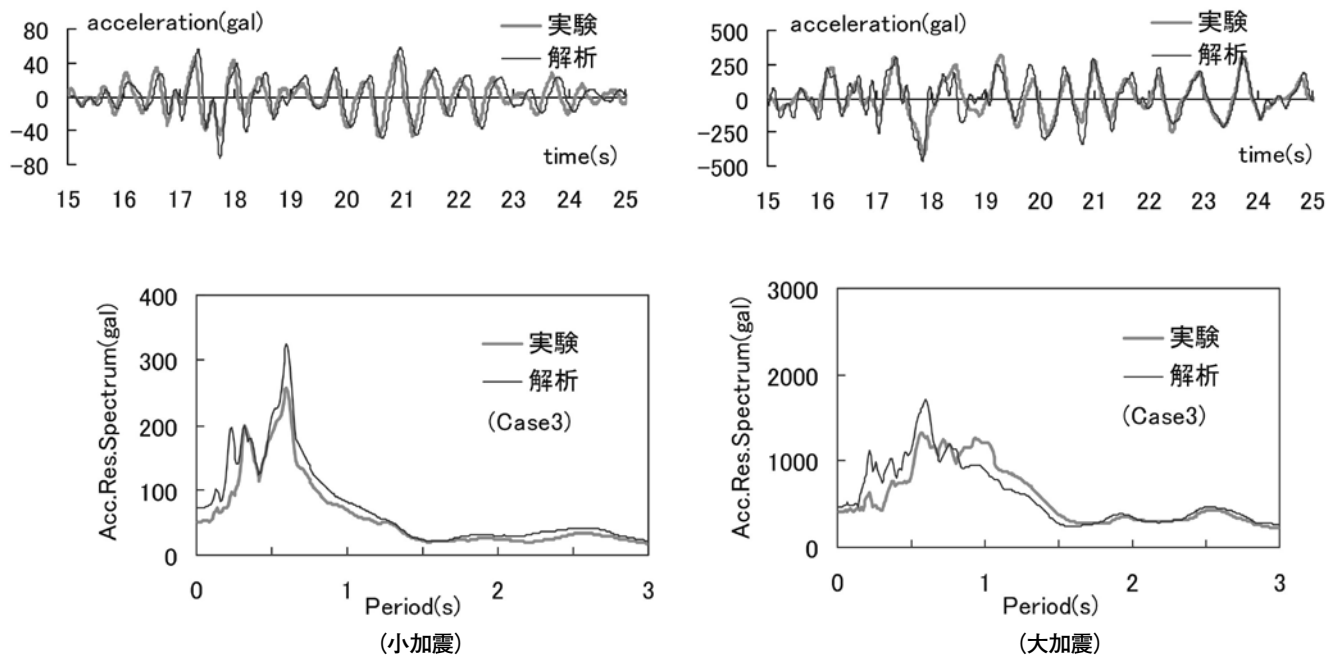


図5 上部構造の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル (h=5%)

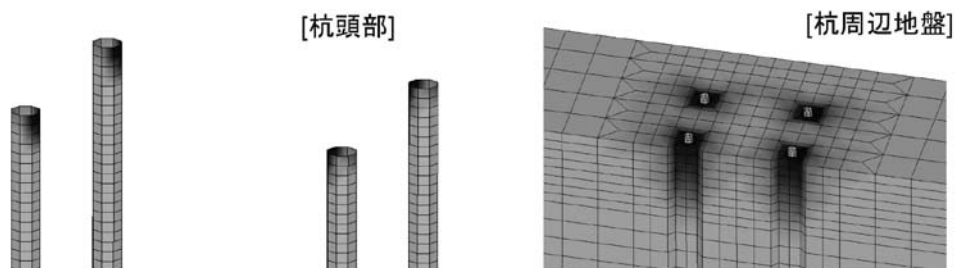


図6 杭頭部と杭周辺地盤の塑性ひずみ分布

杭頭部の塑性化が、上部構造の応答にどの程度の影響を与えるか三次元有限要素解析モデルを用いて検討を行った。Case3 の解析モデルを用いて、杭頭部を弾塑性とした解析モデルと、弾性とした解析モデルの 2 つについて検討した。杭頭部の塑性化による応答の違いを明瞭にするために、入力地震動はシミュレーション解析に用いた大加震の波形の加速度を 2 倍 (500gal) にした波形とした。

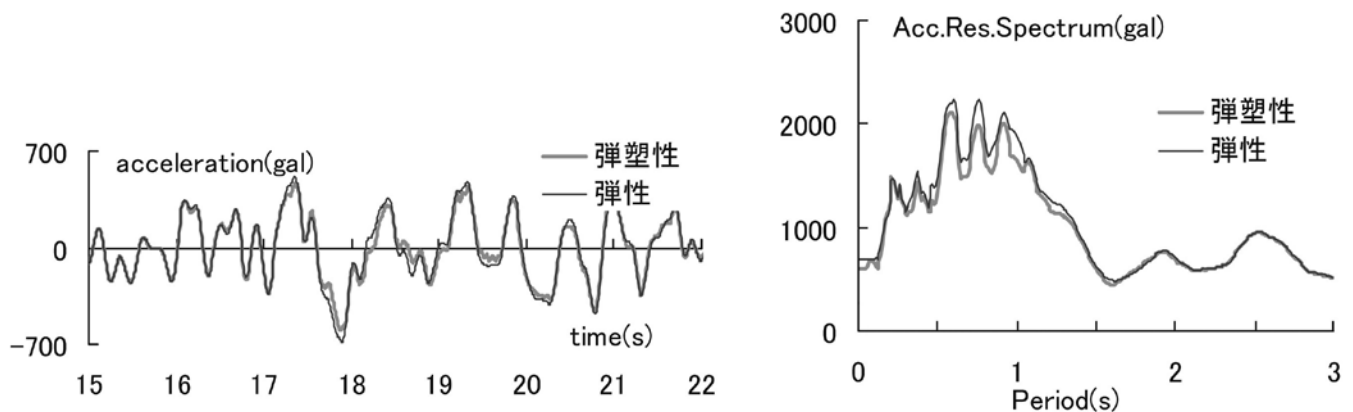


図7 上部構造の加速度時刻歴と加速度応答スペクトル (弾塑性と弾性の比較)

4. 応答変位法による杭の評価

杭の耐震設計では、動的な相互作用を考慮した解析の他に、応答変位法に基づく静的解析³⁾により杭応力を算出することができる。地震時の杭応力は、上部構造の慣性力により杭頭付近で大きくなる応力と、地盤震動により地中部で大きくなる応力から構成される。そのため、杭の応力を静的解析により求める際は、杭頭慣性力と地盤震動の影響を考慮する必要がある。杭頭慣性力と地盤変位を考慮した杭の応力算定方法には、図8に示すように、両者を同時に作用させて杭の応力を算定する方法と、それぞれの外力に対する応力を別個に算定して重ね合わせる方法がある。

各方法による杭応力の違いを明確にし、静的な算定

法の適用性について検討を行った。Case3 の動的解析と静的解析を比較検討する。図9に、動的解析による杭応力と静的解析による杭応力の結果を合わせて示す。杭頭慣性力と地盤変位を同方向に作用させた結果を静的 (同) で示し、逆方向に作用させた結果を静的 (逆) で示している。同時に作用させる方法では、静的解析の結果は動的解析の結果を包絡する分布となっている。そのため、静的解析の最大値をとることで十分安全側の評価となることが考えられる。個々に作用させる静的解析の適用性について検討する。動的解析による杭応力と単純和および二乗和平方根 (SRSS) による杭応力の結果を示す。曲げモーメントでは、静的解析の結果が動的結果よりも大きい結果となってい

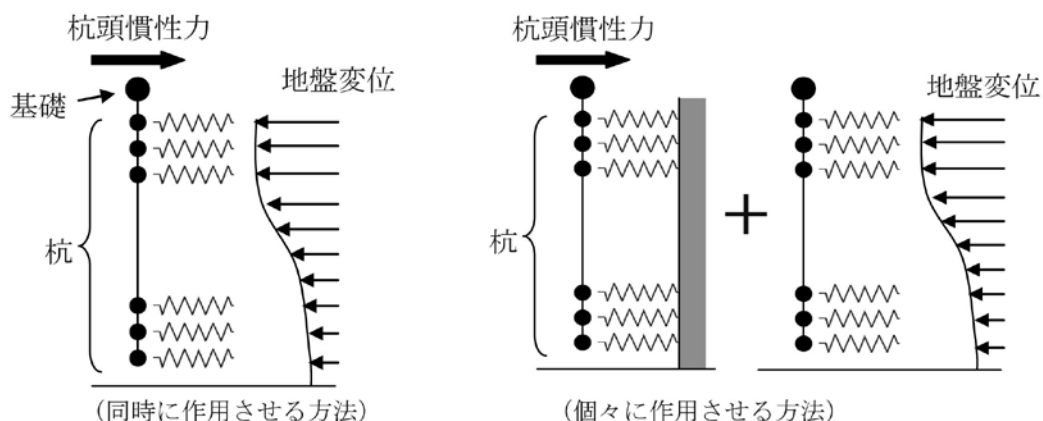


図8 静的解析による杭応力の算定方法

る。一方、曲率では、杭頭部において静的解析の結果が動的解析よりも小さい結果となっている。つまり、曲げモーメントでは静的解析が安全側の評価となっ

ても、変形である曲率では静的解析が危険側の評価となる可能性がある。

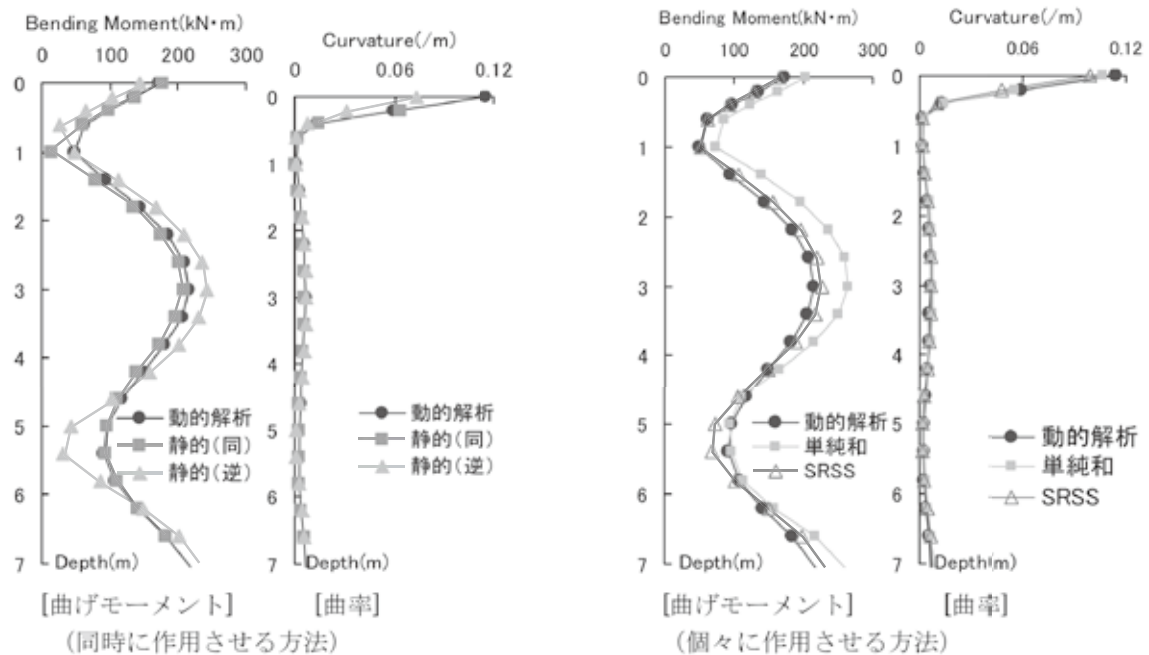


図9 静的解析と動的解析による杭応力の算定方法の

5. 結論

本研究は、軟弱地盤に建設されている杭支持構造物の耐震性評価技術の向上と、今後の耐震設計の高度化と合理化を目的として行った。得られた成果をまとめると次のようになる。

3種類の杭を用いた遠心振動実験より、杭頭部の塑性化状態の違いによる上部構造の応答性状の変化を明らかにした。また、三次元有限要素解析を用いたシミュレーション解析により、上部構造の応答や杭頭部および杭周辺地盤の塑性化を再現可能とするモデルを構築できた。応答変位法を用いた杭応力の評価では、上部構造の慣性力と地盤変位を同時に作用させる方法であれば、十分安全側の杭の設計となるが、個々に作用させる方法であれば、杭の曲率評価で危険側となる可能性があることを示した。

〈謝辞〉

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた宮本裕司教授に心から感謝致します。また、ご協力頂いた宮本研究室へ心より御礼申し上げます。

〈参考文献〉

- 1) 宮本裕司：建物の耐震性能と耐震性向上技術－建物の耐震性と相互作用、2009年度日本建築学会大会構造部門（振動）パネルディスカッション、pp.14～23、2009年8月
- 2) LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume I II, 2007.6
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001.10



鹿島建設技術研究所
都市防災・風環境グループに所属。
現在、地盤と建物の相互作用に関連した研究に従事。

(建築 平成 21 年卒 23 年前期)