

泥炭性軟弱地盤における既設構造物基礎の耐震補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ
（寒地地盤）

研究担当者：福島宏文、富澤幸一、江川拓也

【要旨】

近年、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの大規模地震が多発しており、橋梁などの公共構造物には所要の耐震性能の確保が求められている。特に、日本の橋梁には高度成長期に架橋され築後 50 年近くのものも多く老朽化が進んでいる。そのため、今後想定される大規模地震に対して上下部工の耐震補強と同様に、所要の耐震性能を確保していない既設基礎に対し、液状化対策も含めて対策を講じる必要があると考えられる。そこで本研究では、泥炭性軟弱地盤中の杭基礎の地震時挙動検討や調査工より、既設基礎の耐震補強技術として性能規定設計を考慮した耐震診断フローを提案した。また、泥炭性軟弱地盤における既設杭基礎の耐震技術として、杭周辺に地盤改良による固化改良体を併設する新たな耐震補強技術を大規模模型実験の実施により研究し、コンポジットパイル工法として特許・NTEIS を取得した。一連の実験より、コンポジットパイル工法の実用化・基準化に向け、未対策と対比した泥炭性軟弱地盤における杭の耐震性能の向上つまり地震時の応答変形の抑制効果を明らかにした。また、コンポジットパイル工法の液状化地盤における既設杭基礎の耐震補強効果の基礎資料を得た。

キーワード：泥炭、地震、杭基礎、耐震補強

1. はじめに

近年、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの大規模地震が多発しており、安全・安心な社会資本整備の構築が求められてきている。特に、北海道には脆弱な泥炭性軟弱地盤が広く分布するが、そこに築造された既設構造物基礎の地震に対する有用かつ合理的な耐震補強工法を早期に用意する必要があると考えられる。

以上の背景より本研究では、既設基礎の耐震性能評価および耐震補強技術として、現行設計法の今後の性能規定化を考慮した耐震診断フローを提案した。また、泥炭性軟弱地盤において、杭周辺に地盤改良による固化改良体を併設する新たな耐震補強技術を大規模模型実験により研究した。本工法は、コンポジットパイル工法と称し、特許¹⁾およびNTEIS²⁾を取得している。

本報では一連の実験検証より、コンポジットパイル工法の実用化・基準化に向け、未対策と対比した泥炭性軟弱地盤における杭の耐震性能の向上つまり地震時の応答変形の抑制効果を改良強度別に検討した。また、コンポジットパイル工法の液状化地盤における既設杭基礎の耐震性能向上に関する基礎資料を実験で確認した。

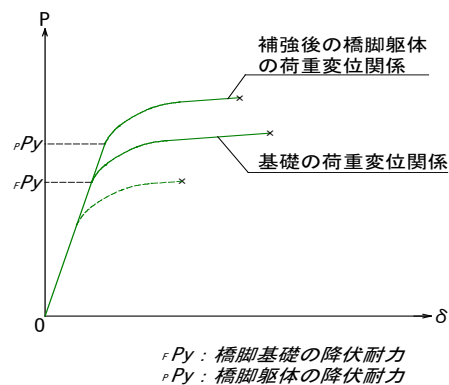
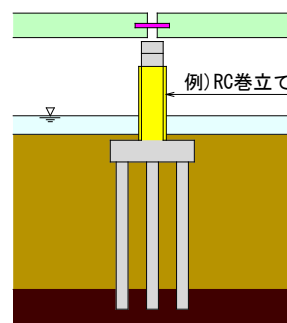


図1 基礎と橋脚降伏耐力（橋脚補強後の事例）

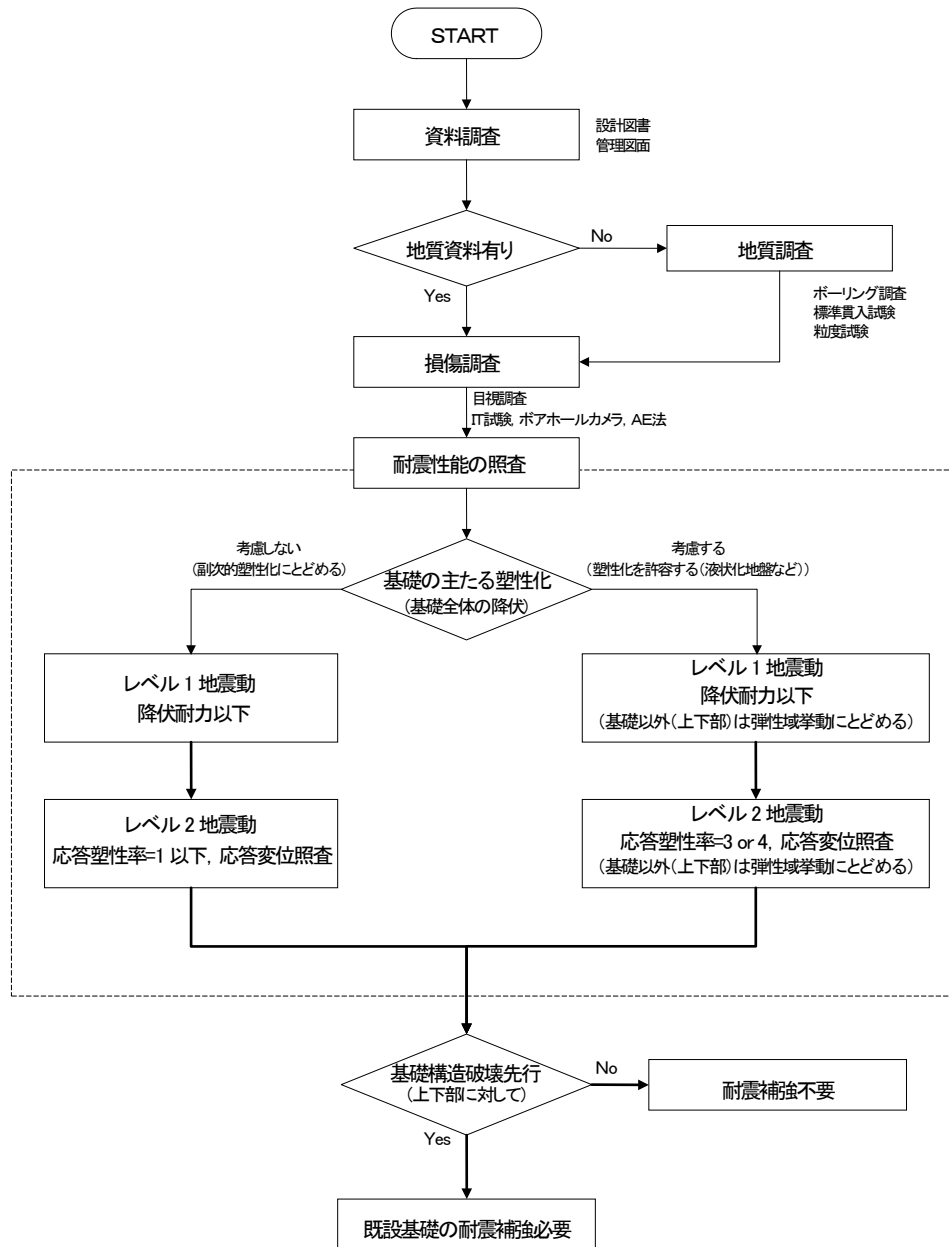


図2 既設基礎の耐震診断フロー

2. 泥炭性軟弱地盤における既設基礎の耐震性能

2.1 基礎の耐震性能と基礎補強技術

現行の道路橋設計法では、プレート境界型や内陸直下型の大規模地震動に対して橋脚や基礎などの構造部材は所要の耐震性能を確保するように規定されている³⁾。つまり、構造物基礎は地震時に大きな損傷や安全性を損なうような過大な変形を生じさせないことが重要となる。そのため既設基礎についても、現行照査指標に照らし、基礎の耐力・変形性能が著しく小さいものや損傷・変形が生じているものは、地震水平保有耐力を確保するための耐震補強を行うことが必要となる。取り分け、泥炭性軟弱地盤はせん断強度が過小であることから、その中に

施工された基礎は、近年の多発している大規模地震の被災事例を考慮し、合理的な耐震補強を講じる必要がある。大規模地震に対して橋梁は損傷を軽減するため、橋脚本体に比べて基礎は水平保有耐力が大きいことが求められる。ただし現在、橋脚本体や支承構造を中心に耐震補強が実施されているが、例えば橋脚をRC巻立てなどの補強した場合には、現場条件によっては基礎本体に負荷が加わり、図1に示すように降伏耐力 P_y が以下の関係となり逆に基礎の補強が必要になるケースもある。

$${}_rP_y < {}_pP_y$$

ここに、 ${}_pP_y$: 基礎の降伏耐力

pPy : 橋脚補強後の降伏耐力

特にこのようなケースでは、既設基礎の耐震性能を確保するため、必要に応じた耐震補強が必要と考えられる。

既設構造物基礎の補強技術としては、概ね以下の手法が提案されている⁴⁾。

1)基礎の耐力増加工法

フーチング補強・増杭工法・地中連続壁増設工法など

2)基礎周辺の地盤改良工法（液状化対策を含む）

置換工法・固結工法・地盤締め固めなど

なお既設基礎の耐震補強に際しては、実施の有無も含めた事由を整理し、関係機関と十分な協議を行うとともに、工法別の耐震性能を解析する必要がある。

2. 2 既設基礎の耐震診断フロー

泥炭性軟弱地盤では、前記したように必要性に応じて、既設基礎の耐震補強を施す必要があると考えられる。そこで、今後の性能規定設計法への連動を考慮し、既設基礎の耐震診断フローを提案した⁵⁾（図2）。この提案フローでは、既設構造物基礎の耐震性の判定は地質調査と損傷調査を実務の主体としており、その結果を踏まえて詳細な耐震性能照査を行うこととしている。ただし、この際のレベル1およびレベル2地震動に対する地震時保有水平耐力照査は、下部工躯体と同様に、過大な補強対策とならないように部材の許容応力ではなく降伏耐力の確保を念頭に置いている。照査の結果、フローにあるように、橋梁上部工および下部工に対して基礎構造破壊が先行すると想定される場合には、既設基礎の耐震補強が必要という判定となる。

この際の地質調査は液状化判定が主体であり、損傷調査については、地上部は周辺地盤変状、地中部は試掘・ボアホールカメラなどによる既設基礎の目視での損傷判定を行うことになる。

2. 3 既設杭基礎の耐震補強技術

（コンポジットパイル工法）

既設基礎の代表的な耐震補強技術には、前記したフーチング補強、増し杭、地中連続壁増設の他、鋼管矢板基礎増設、ケーソン基礎増設などがある。

ただし、これらの耐震補強は既設基礎と複合構造物となるため、明瞭な設計照査法が体系化されていない。また、液状化地盤の場合には、既設基礎の剛性をいくらか上げて根本的な対策とはならない。交通を供用しながらの具体的な施工管理法についても整備されているとは言い難い。そこで、せん断強度が過小な泥炭性軟弱地盤や液状化地盤において、杭と改良体を併用する複合地盤杭基礎技術⁶⁾を活用した既設杭基礎の耐震補強工法を研究開発した。この補強構造をコンポジットパイル工

法と称する（図3）。

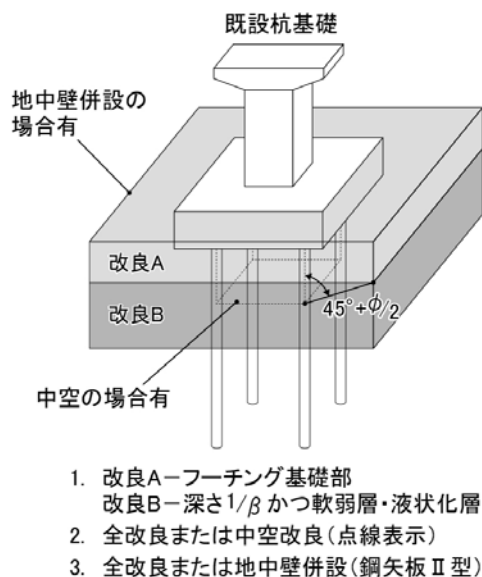


図3 コンポジットパイル工法の概要図

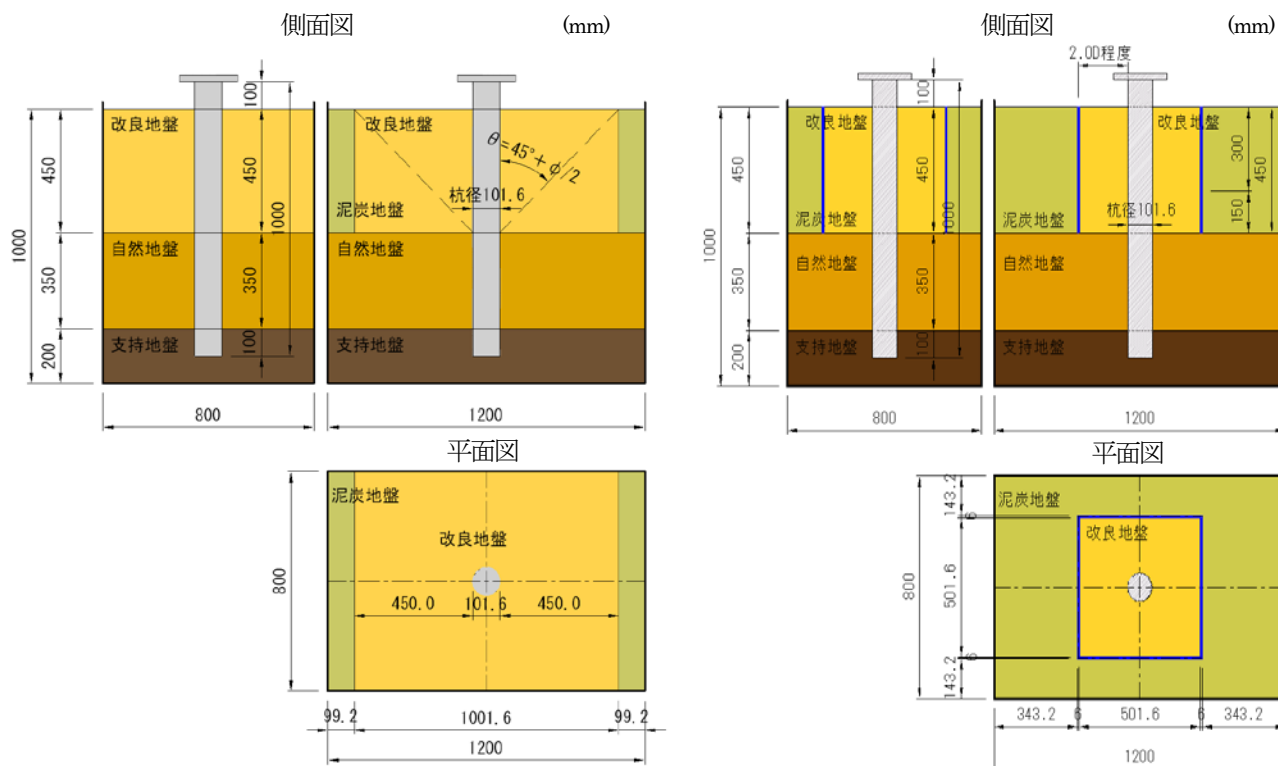
コンポジットパイル工法は、従来の増し杭工法などのように補強材と既設基礎を一体化させる従来手法とは異なり、既設杭基礎の周辺地盤を改善するすなわち固化改良体の反力効果に期待し、基礎の耐震性能の確保を図る技術である。

コンポジットパイル工法における固化改良体の改良範囲は、図示したように杭特性長 $1/\beta$ かつ軟弱層および液状化層の深さから受働土圧 $45^\circ + \phi/2$ （内部摩擦角 ϕ は一般に無視）の勾配で立ち上げた3次元範囲とする。地盤改良は地中部（改良B）およびフーチング基礎から上部（改良A）を一体施工できるのが特徴である。フーチング基礎部で地盤改良を施すことで受働土圧も期待できる。

この際に、フーチング基礎下の地盤改良が困難な現場条件では、中空とする。中空としても地震時のせん断変形が抑制され、液状化時の過剰間隙水圧は拘束できると考えられる。また、改良範囲を狭くする必要がある現場条件や仮締切りを必要とする場合には、改良体側面に地中壁（鋼管矢板II型）を併設する。

地盤改良および鋼管矢板は、桁下が低空頭でも施工可能な種々の機械が開発されており施工性に問題なく、コスト面ではコンポジットパイル工法は増し杭工法に対して、概算で約4割のコスト縮減が可能である。

以下に、コンポジットパイルの実用化に向けた一連の大規模模型実験の成果を整理した。



ケース2 (a) コンポジットパイル (固化改良体)

ケース3 (b) コンポジットパイル (鋼板補強)

図4 大規模模型実験モデル (単杭)

3. 既設杭基礎の耐震補強実験

3.1 単杭実験成果

既設杭基礎の大規模模型実験は、泥炭性軟弱地盤を対象に、せん断土槽 (幅 1200mm (加力方向) × 奥行 800mm × 高さ 1000mm、せん断枠 15 段) を用いた杭の静的水平交番載荷実験⁷⁾および大型振動台を用いた動的加震実験とした。本実験でせん断土槽を用いるのは、対策工である固化改良体外側の泥炭性軟弱地盤の変形挙動を再現するためである。図4に単杭のコンポジットパイル工法の大規模模型実験モデルを示す (ケース 2、3)。実験モデルは静的実験ケースおよび動的実験ケースをそれぞれ3ケースとした。ケース1の試験地盤は、上部層を未対策の泥炭地盤、中間層を自然地盤、下部層を支持地盤の3層系地盤としたものである。ケース2の試験地盤は、既往研究⁶⁾で杭と地盤改良を併用する複合地盤杭基礎で一定の耐震性の向上が検証されたことから、上部層に深さ $1/\beta$ から受働土圧の作用勾配 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ の3次元範囲を固化改良体で補強し、中間層を自然地盤、下部層を支持地盤の3層系地盤としたものである (図4 ケース2(a) 固化改良体)。ケース3の試験地盤は、実施工において改良

範囲を狭めたり水中施工時の仮締切りの必要性を想定し、上部層の固化改良体の受働土圧に相当する範囲の概ね半分を鋼板で負担してその周辺を泥炭地盤とし、中間層を自然地盤、下部層を支持地盤の3層系地盤としたものである (図4 ケース3(b) 鋼板補強)。つまり、ケース2、3ともに本報で提案するコンポジットパイル工法である。

以下、静的水平交番載荷実験の3ケースをケース1静、ケース2静、ケース3静とし、同様に動的加震実験の3ケースをケース1動、ケース2動、ケース3動と区分する。なお固化改良体は、ベントナイトを母材とし早強セメントを添加して所定強度となるように作成した。本実験における固化改良体による複合地盤は改良率 $a_p = 100\%$ の全面改良とし、本実験の基準値強度と定めた一軸圧縮強さ $q_u = 300 \text{ kN/m}^2$ 相当とした。セメント添加量は、事前配合試験の材令および発現強度より設定したが、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験結果より、固化改良体は一般土工部で泥炭性軟弱地盤に施工される改良体と強度特性はほぼ同類と判断される。また、自然地盤は N 値 10 相当 (単位重量 $\gamma = 17.7 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c = 22.7 \text{ N/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi = 37.6^\circ$) の砂質土地盤とし、締固め含水比 $w = 5\%$

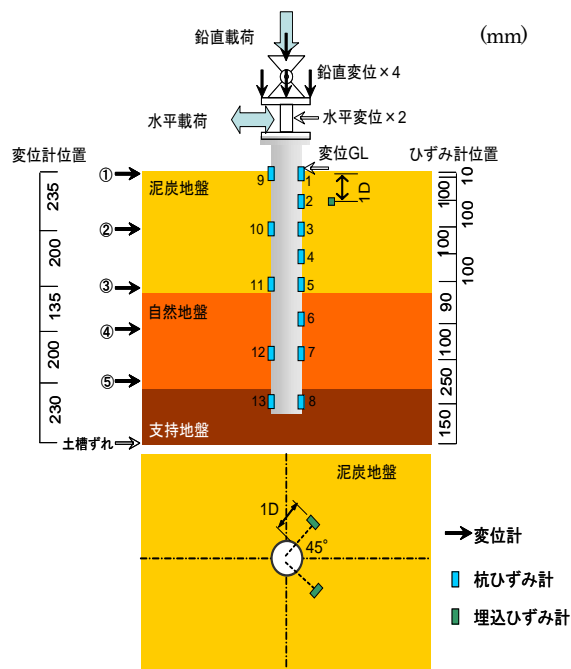


図5 計測器配置図

として造成した。試験杭は、実大規模を想定した鋼管杭（杭径 $D=101.6\text{mm}$ 、杭厚 $t=4.2\text{mm}$ 、長さ $L=1110\text{mm}$ ）の単杭を用い、セメント体の支持地盤に 100mm 貫入した先端支持杭とした。

実験時には、図5に示したように変位計を配置し、杭頭および杭地表面変位と深さ方向の地盤変位（せん断土槽の変形）を計測した。また、鋼管杭にはひずみゲージを杭外側に貼付し、実験時の杭曲げ応力を計測し、各水平変位レベルにおける杭の弾性挙動を管理した。なお、本実験の着目変位は杭地表面位置の相対水平変位量である。また実験時の地表面状況を目視およびビデオカメラで観察した。

3. 1. 1 静的水平交番载荷実験

静的水平交番载荷実験装置のセットアップ状況を写真1に示す。静的水平交番载荷実験にはせん断土槽を用いた。この際、油圧ジャッキは水平载荷では両端ピン構造、鉛直载荷では片側ピン、片側固定構造でリニアウエイにより水平移動可能とした。これにより鋼管杭には、水平载荷の各段階において常に鉛直方向の上乗荷重が作用する状態とした。

静的水平交番载荷実験の载荷方法は、変位制御による正負交番の繰返し载荷とした。その際の目標とする杭の地表面水平変位量 y は、杭設計時における常時および地震時荷重を想定し、以下の①から⑦を最大値とする各ステップ3回の繰返し载荷とした。

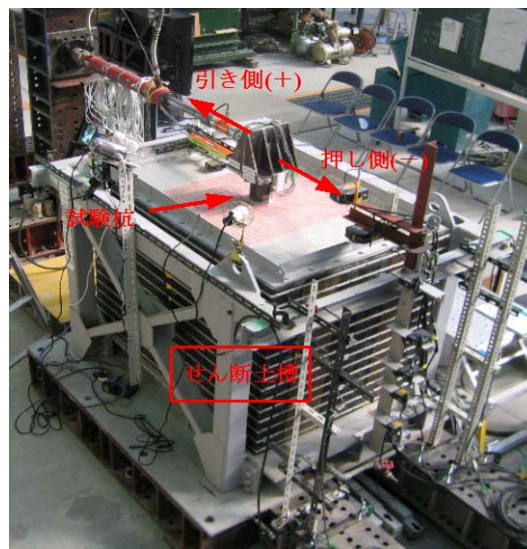


写真1 静的実験装置セットアップ

- ①杭径の 0.5%変位（杭地表面変位： $y = 0.5\text{mm}$ ）
- ②杭径の 1.0%変位（杭地表面変位： $y = 1.0\text{mm}$ ）
- ③杭径の 2.5%変位（杭地表面変位： $y = 2.5\text{mm}$ ）
- ④杭径の 5.0%変位（杭地表面変位： $y = 5.0\text{mm}$ ）
- ⑤杭径の 10.0%変位（杭地表面変位： $y = 10.0\text{mm}$ ）
- ⑥杭径の 25.0%変位（杭地表面変位： $y = 25.0\text{mm}$ ）
- ⑦杭径の 50.0%変位（杭地表面変位： $y = 50.0\text{mm}$ ）

この際に荷重ホールド時間は、変位収束を考慮し、一律1分間とした。なお、杭体には軸力5kNを油圧ジャッキで一定軸力となるように自動油圧制御で载荷した。

静的水平交番载荷実験で得られた3ケース（ケース1静、ケース2静、ケース3静）の水平荷重 H ～ 杭地表面変位量 y の関係を図6に示した。図によれば、未対策のケース1静では水平荷重に対する変位が非常に大きく、杭の水平抵抗が過小であることが分かる。ただし、残留変位は小さく杭は弾性挙動内にあると判断される。これに対して、杭周辺に固化改良体を併設したケース2静および固化改良体を鋼板補強したケース3静は、水平荷重 H ～ 杭地表面変位量 y の関係はほぼ同等で、各水平载荷時においてケース1静に対し3倍以上の比較的大きな水平抵抗が発揮されていることが分かる。また、最大荷重においても固化改良体の反力効果は持続している。つまり、対策工を施すことによる杭の変形抑制効果が発揮されているといえる。

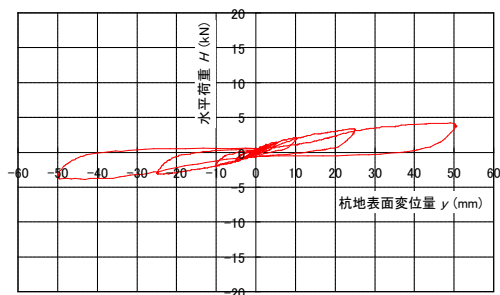
図7にケース1静、ケース2静、ケース3静の杭変位に伴う地表面の変状状態を示した。この地表面変位は最終荷重段階でのスケッチである。図によれば、ケース1静では、杭の载荷方向の前背面に泥炭地盤が隆起するせん断変形が認められた。また、载荷の横断方向に杭変位

量5mm以上つまり杭径5%の水平変位量で既にクラックの発生が確認された。ケース2静では、小中規模地震時の変形と想定される杭径1~2%の杭変位で固化改良体との多少の剥離が認められ、杭径10%の10mm変位で横断方向に微細なクラックが生じた。また、大規模地震時挙動と考えられる25mm変位で杭前面にせん断破壊が生じた。ケース3静では、杭が25mm変位でも多少の剥離はあったが固化改良体の損傷は認められない。ただし、補強鋼板の外側の泥炭地盤に隆起・亀裂などの変状が発生した。

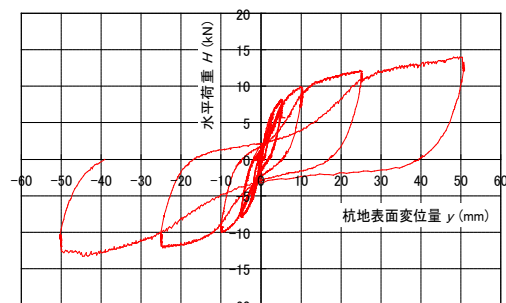
この結果、ケース2静およびケース3静のように固化改良体や鋼板の耐震補強を施すことにより、所要の杭水平反力を発揮することになるが、そのメカニズムは異なると考えられる。つまり、ケース2静では杭周辺の固化改良体の直接的な反力効果が認められるが、ケース3静では杭と鋼板補強した固化改良体が概ね一体として挙動するために、脆弱な鋼板の外側の泥炭地盤の強度で水平抵抗が支配されることになった。

図8に杭の各変位レベルにおけるケース1静、ケース2静、ケース3静の杭ひずみ分布を示した。図によれば、ケース1静では、杭地表面変位量 $y=50\text{mm}$ 時においても、杭最大ひずみは 400μ 程度と小さく、その最大値は泥炭地盤と自然地盤の境界部にある。これに対して、ケース2静では、杭地表面変位量 $y=50\text{mm}$ 時において杭最大ひずみはケース1静の約2倍である 800μ 程度と大きくなっている。その最大値は固化改良体のほぼ中央に移行している。また、ケース3静では、杭最大ひずみはケース2静よりやや大きく 800μ を上回り、最大値の発現位置はほぼ固化改良体と自然地盤の境界部となった。これは変位制御実験のため載荷重が大きいためである。ただし、これらのひずみ値も杭体の降伏値約 1500μ 以下である。

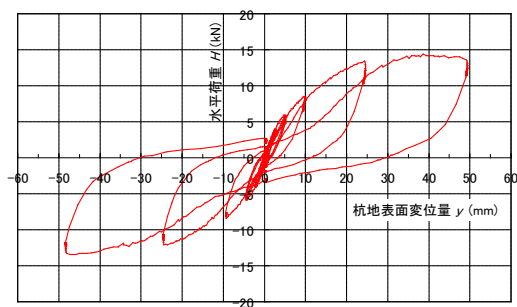
以上の3ケース(ケース1静、ケース2静、ケース3静)の静的水平交番載荷実験の結果、杭周辺に固化改良体を併設したケースおよびさらに固化改良体を鋼板補強したケースのコンジットパイルは、未対策の泥炭性軟弱地盤に対して、杭基礎は静的な慣性力に対する所要の変形抑制効果を示した。ただし、固化改良体だけの補強対策のケースは、大規模変形時では杭基礎そのものは問題ないと想定されるが固化改良体の損傷が懸念される。この場合には、大規模地震後に固化改良体の再固化などの対応をする必要がある。また、固化改良体を鋼板補強した補強対策のものは、大規模変形に対して、固化改良体の健全性を確保ができるものの、杭挙動が鋼板の外側の地盤強度に支配されることになり杭応力の増加などが留意点と考えられる。



(ケース1静) 未対策



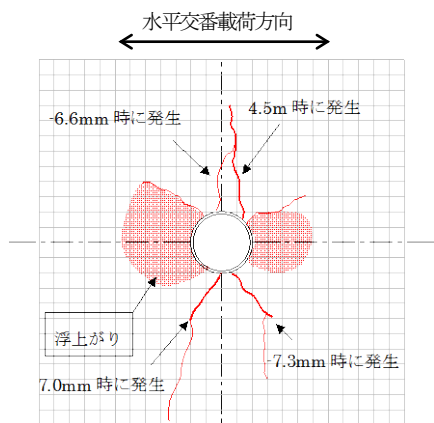
(ケース2静) コンジットパイル
(固化改良体) 改良強度: 300kN/m^2



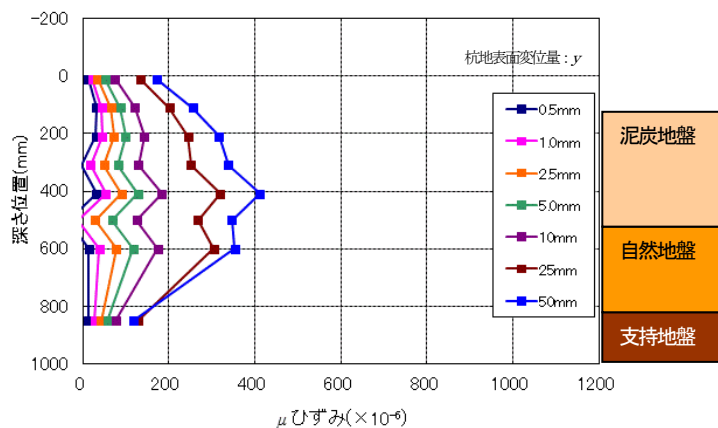
(ケース3静) コンジットパイル
(鋼板補強) 改良強度: 300kN/m^2

図6 静的水平交番載荷試験

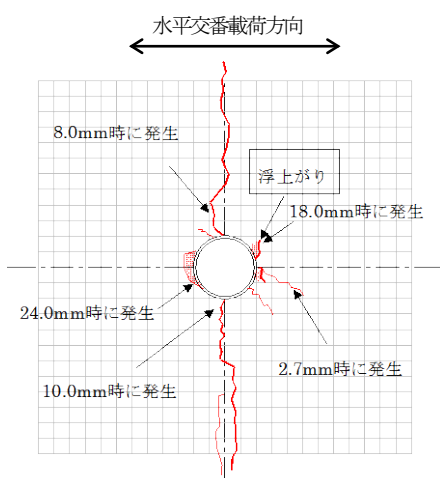
(水平荷重 H ~ 杭地表面変位量 y)



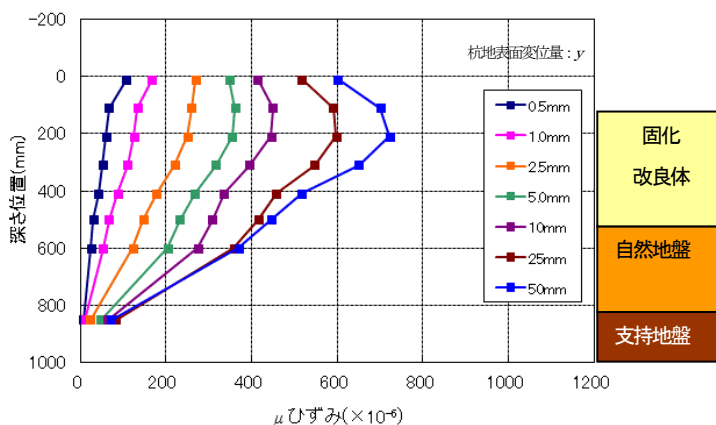
(ケース1 静) 未対策



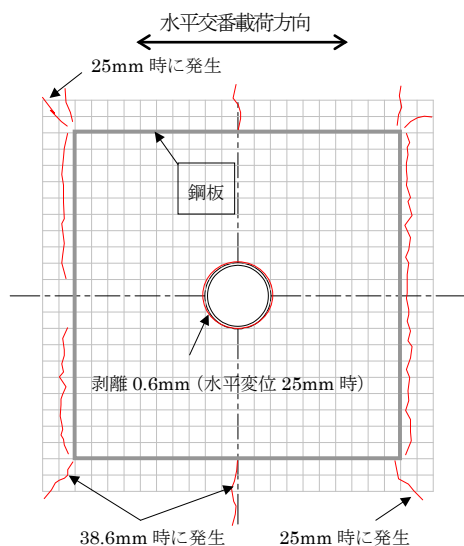
(ケース1 静) 未対策



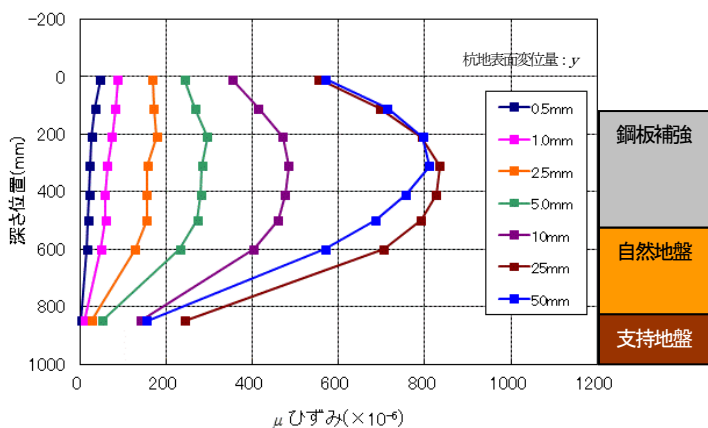
(ケース2 静) コンポジットパイル (固化改良体)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース2 静) コンポジットパイル (固化改良体)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース3 静) コンポジットパイル (鋼板補強)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース3 静) コンポジットパイル (鋼板補強)
改良強度 : 300kN/m²

図7 杭変位による地表面変状

図8 鋼管杭ひずみ分布

3. 1. 2 動的加振実験

動的振動実験で使用する大型振動台の全景を写真2に示した。大型振動台テーブルは、加振テーブルの自重を支持し、ピッチングおよびヨーイング方向の動きを低摩擦でガイドしながら作動できるようにする静圧軸受方式の支持装置である。その仕様は、自重支持軸受の4台とヨーイングガイド軸受の片側2台が固定式球面型静圧軸受、ヨーイングガイド軸受の残り2台とピッチングガイド軸受の4台はプリロードシリンダを内蔵した球面型静圧軸受で押し付け力を加える構造となっている。また、コンクリート基礎を150基の空気ばねで支持し、25mm浮上させることで実験棟建屋、敷地外への共振の影響を最小化している。



写真2 振動台実験装置

大型振動台を用いた動的加振実験は、以下の手順により実施した。

- ① ホワイトノイズで加振し杭の卓越振動数を測定する。
- ② 杭の卓越振動数で目標変位（静的試験と同等）となるような加速度のsin波を設定し加振する。
- ③ ホワイトノイズで加振し杭卓越振動数の変化を見る。
- ④ 変化した杭の卓越振動数で目標変位（静的試験と同等）に加速度を調整し加振する。
- ⑤ 上記①～④の作業を繰り返し、杭の水平変位＝杭径0.5%～50%（静的試験①～⑦）となるよう加振する。

ホワイトノイズは最大加速度30gal、1～20Hzまでとした。入力波の加速度時刻歴波形を図9に示した⁸⁾。この図の波形に倍率をかけることでsin波の振動数と最大加速度を調節した。また、波の前半3波と後半3波にコサインテーパをかけて振幅が徐々に変化するようにした。静的水平交番載荷実験の繰り返し載荷回数に合わせて、最大加速度振幅の波は3波入力することとし、テーパ部分と合わせて合計で9波を入力することとした。

目標変位は、静的水平交番載荷実験に合わせて、①杭径の0.5%変位、②杭径1.0%変位、③杭径2.5%変位、④

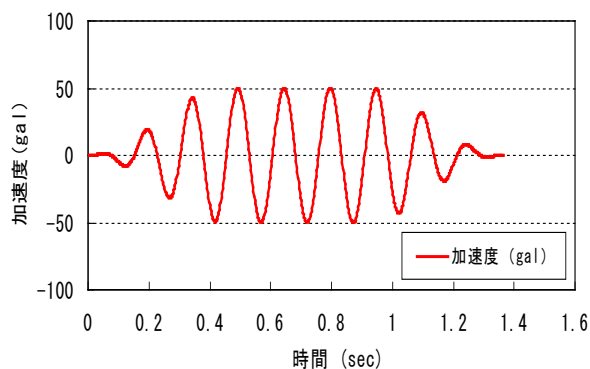
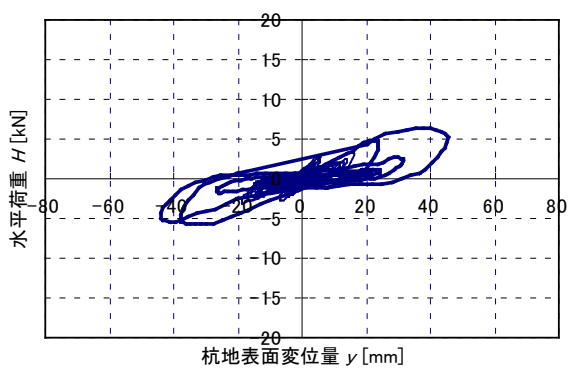


図9 入力加速度波形

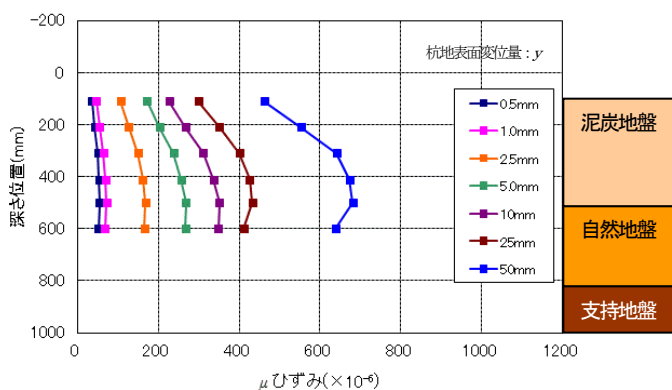
杭径5.0%変位、⑤杭径10.0%変位、⑥杭径25.0%変位、⑦杭径50.0%変位とした。

動的加振実験の3ケース（ケース1動、ケース2動、ケース3動）の実験成果を静的水平交番載荷実験に準じ、水平荷重 H ～杭地表面変位量 y の関係で整理し図10に示した。図によれば、未対策のケース1動では、静的実験と同様に動的な反力効果が過小であることが分かる。固化改良体を鋼板補強したコンポジットパイルのケース3動でも動的水平抵抗は比較的小さく、固化改良体を併設したコンポジットパイルのケース2動で大きな動的水平抵抗が発揮されている。ケース3動で動的水平抵抗がケース2動よりも小さくなるのは、静的と同様に、動的挙動が脆弱な鋼板の外側の泥炭地盤の反力に支配されるためと推察される。

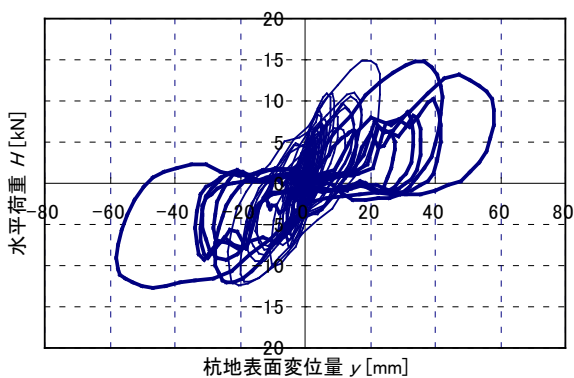
それぞれのケースの $y=50\text{mm}$ 相当の杭最大変位に対する動的諸元を整理した。まず、ケース1動では加振周波数は3.20Hz、最大入力加速度820galと小さい。これに対して、ケース2動では加振周波数は7.00Hz、最大入力加速度1681gal、同様にケース3動では加振周波数は6.00Hz、最大入力加速度1842galとケース1動のそれぞれ2倍程度である。このことから、杭に固化改良体を併設するコンポジットパイルの耐震性の向上が分かる。また、ケース2動とケース3動の杭応答を確認すると、杭最大変位 $y=50\text{mm}$ 相当で、ケース2動では杭最大応答加速度2667galに対し、ケース3動では最大応答加速度1655galであり、固化改良体を鋼板補強したケースより固化改良体のみケースで耐震性能が大きいと考えられる。ただし、固化改良体の地震時の健全性では、ケース3動で杭最大応答変位時でもなんら損傷が無かったのに対して、ケース2動では杭応答変位 $y=40\text{mm}$ 相当で杭横断方向に再固化が必要と考えられるクラックが生じた。つまり、ケー



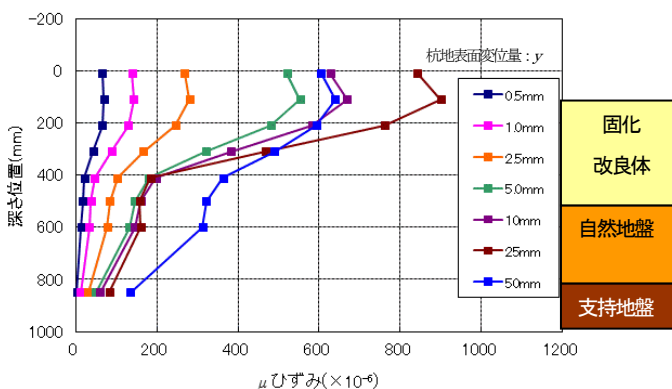
(ケース1動) 未対策



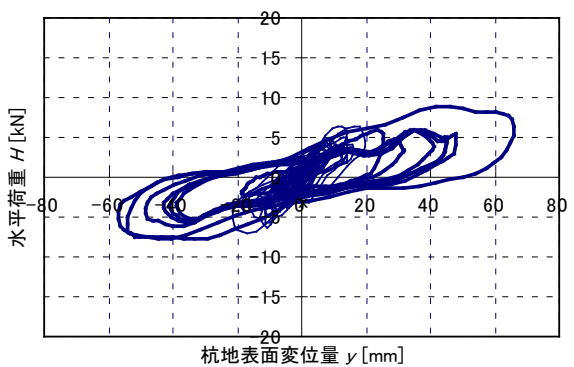
(ケース1動) 未対策



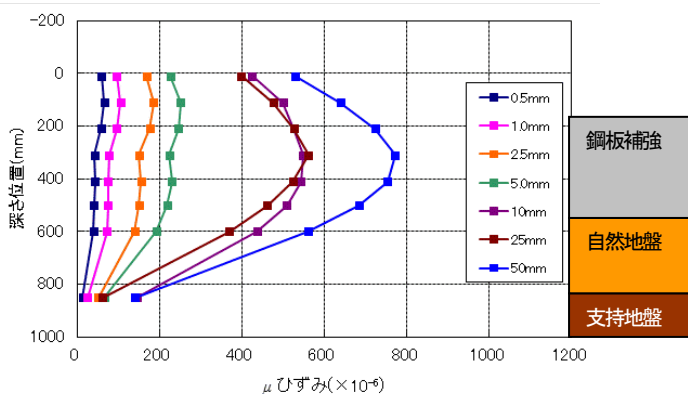
(ケース2動) コンポジットパイル (固化改良体)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース2動) コンポジットパイル (固化改良体)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース3動) コンポジットパイル (鋼板補強)
改良強度 : 300kN/m²



(ケース3動) コンポジットパイル (鋼板補強)
改良強度 : 300kN/m²

図10 動的加振動実験
(水平荷重 H ~ 杭地表面変位量 y)

図11 鋼管杭ひずみ分布
(ケース1動、ケース2動、ケース3動)

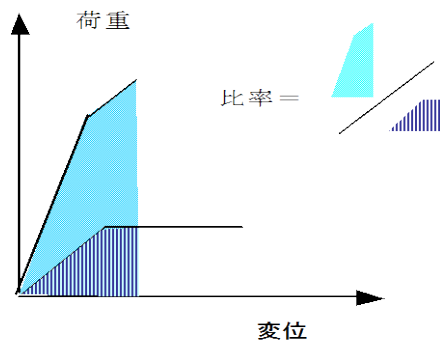


図12 エネルギー一定則モデル

ス3動の固化改良体を鋼板補強した補強対策のものは、静的慣性力に対する大規模変形時と同様に動的にも固化改良体の健全性を確保ができるものの、動的水平抵抗および杭最大応答加速度の考察からは、ケース2動の固化改良体のみ併設したコンポジットパイルで比較的大きな耐震性が確保され優位と判断される。

図11に杭の各応答変位レベルにおけるケース1動、ケース2動、ケース3動の杭ひずみ分布を示した。図によれば、ケース1動では、固化改良体と自然地盤の境界部に静的水平交番載荷実験結果の約1.5倍である 600μ 以上の杭ひずみが発生している。また、ケース2動の杭最大ひずみは 900μ と大きく固化改良体内で発生した。ケース3動の杭最大ひずみはケース2動よりやや小さく 800μ 程度であった。つまり、杭変形を同等で整理したため、ケース2動とケース3動では顕著な差が認められなかった。

杭基礎の耐震性の評価手法は種々あるが、ここでは対策工を実施したことによる地震時保有水平耐力すなわちエネルギー吸収効果で動的加震実験の水平荷重 H ～杭地表面変位量 y の関係を精査した。つまり、エネルギー一定則に基づき荷重～変位量の負担面積を各ケースで対比した。この際、エネルギー一定則とは弾塑性復元力特性を有する構造物が地震動を受けた場合に、弾塑性と弾性の両者の応答の吸収エネルギーを同量とする非線形挙動の推定法である³⁾。その結果、基礎に水平力が作用した際の吸収エネルギーを図12に示すように、荷重～変位の負担面積比で扱うことができる。

図13に動的加震実験の3ケース(ケース1動、ケース2動、ケース3動)水平荷重 H ～杭地表面変位量 y の骨格曲線を改めて整理した。図によれば、固化改良体を併設したコンポジットパイルのケース2動で比較的大きなエネルギー吸収効果を発揮していることが分かる。これを大規模地震時挙動と想定される杭変位量 $y=25\text{mm}$ (杭径25%)で表1に整理した。表中にエネルギー吸収量は

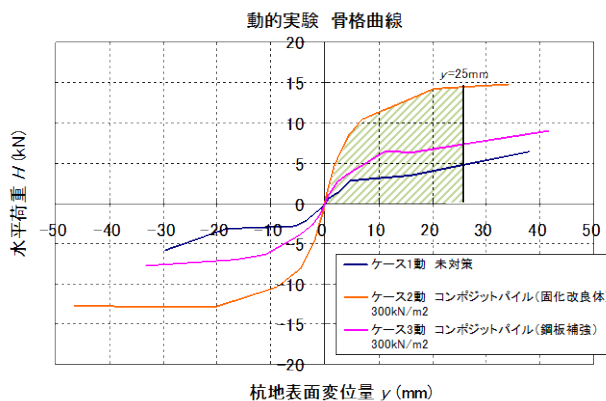


図13 動的加震実験のエネルギー吸収

表1 エネルギー吸収効果

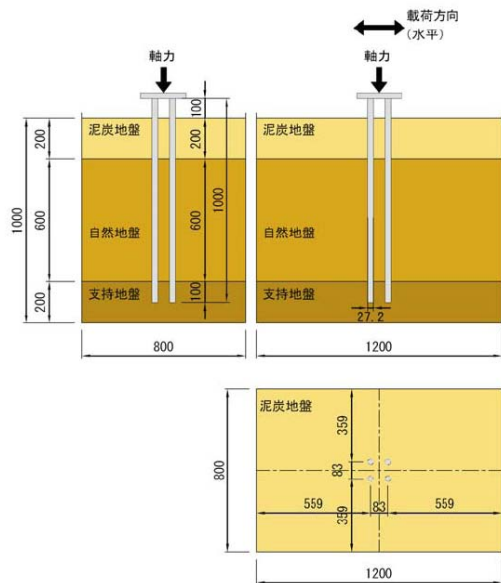
動的実験ケース	エネルギー吸収量 (kN・mm)	未対策との割合 (%)
ケース1動 未対策	78.29	100
ケース2動 コンポジットパイル (固化改良体) 300 kN/m ²	279.07	356
ケース3動 コンポジットパイル (鋼板補強) 300 kN/m ²	136.05	174

負担面積であるが、この結果、未対策のケース1動を100%基準とした場合、固化改良体を併設したコンポジットパイルのケース2動で356%、固化改良体を鋼板補強したコンポジットパイルのケース3動で174%のエネルギー吸収効果すなわち耐震性の向上を確認した。この結果からも、前記したように対策工としても耐震性は、鋼板補強するよりも固化改良体のみ併設したコンポジットパイルで優位と考えられる⁹⁾。

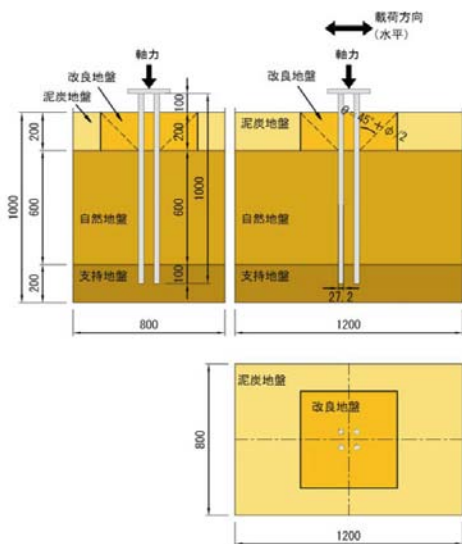
3.2 組杭実験成果

3.2.1 低強度改良 (300kN/m²)

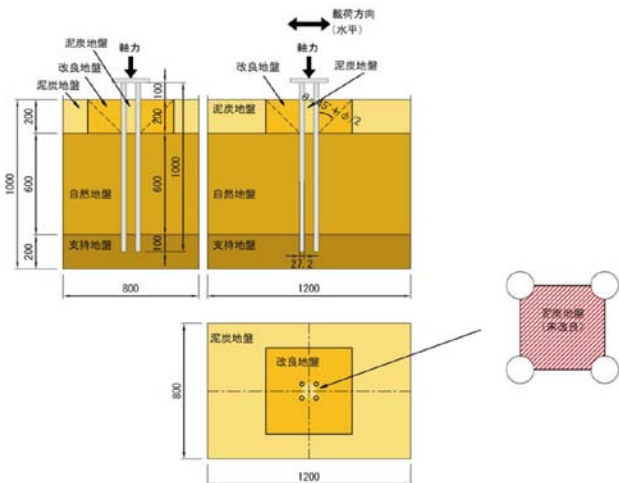
コンポジットパイル工法の組杭加振実験結果を示す。試験地盤は単杭と同様とした。ただし、各層厚は異なる。実験は未改良のケース4、上部層を全改良の300kN/m²相当の固化改良体としたケース5、改良体フォーミング基盤下を中空としたケース6とした(図14)。試験杭は4本組杭とし、SGP鋼管(直径27.2mm、肉厚2.8mm)を使用した。地震波は単杭加振試験とは異なり、レベル1地震動とし昭和35年宮城県沖地震動27sec(図15(a))、レベル2地震動とし平成23年東北地方太平洋沖地震動240sec(図15(b))を基盤から直接入射した⁹⁾。



ケース4 未改良地盤の試験体

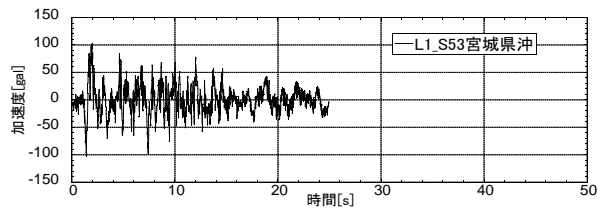


ケース5 全改良の試験体

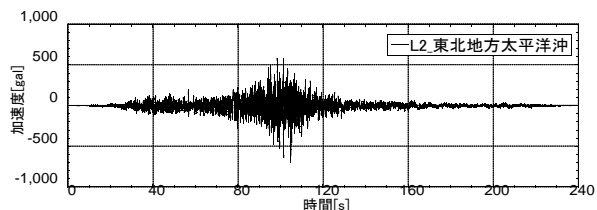


ケース6 中空改良の試験体

図14 組杭加振実験モデル



(a) 開北橋周辺地盤地震動 Max102gal



(b) 新晩翠橋周辺地震動 Max692gal

図15 組杭加振実験入力地震動

組杭加振実験の結果、レベル1地震動に対して杭頭変位量は、未改良のケース4で $y_4=4.41\text{mm}$ 、固化改良体の全改良のケース5および中空改良のケース6でケース4の約4分の1の $y_{5,6}=0.94\text{mm}$ となった。また、レベル2地震動においても杭頭変位量は、未改良のケース4で $y_4=81.05\text{mm}$ であったのに対して、固化改良体の全改良のケース5でケース4の約半分の $y_5=39.02\text{mm}$ 、中空改良のケース6でも $y_6=44.78\text{mm}$ であった。この結果、コンポジットパイル工法の地震動に対する既設杭基礎の変位抑制効果が検証された。また、固化改良体が全改良と中空改良で変位抑制に大きな差異は認められなかった。



写真3 レベル2加振による杭の変形(ケース4 未改良)

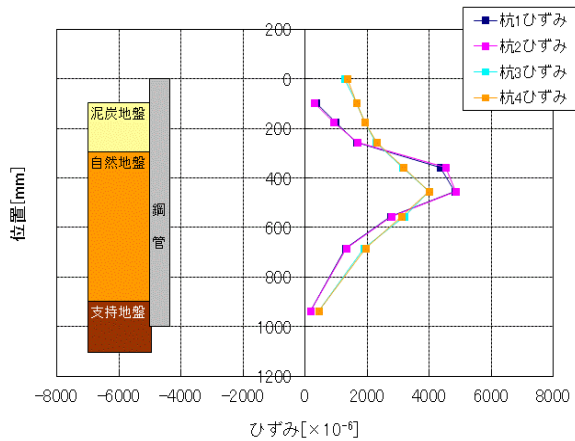
次に、耐震性能の評価として大規模地震時の杭ひずみの発現に注目した。図 16 に、平成 23 年東北地方太平洋沖地震動の加震に対するケース 4(a)、5(b)、6(c)の杭ひずみ分布を示した。図によれば、未改良のケース 4 では中央部の深さ位置で $\varepsilon = 4000 \sim 5000 \mu$ 程度の非常に大きな杭ひずみが発現している。写真 3 に示したように、レベル 2 加振で鋼管杭が大きく変形した。これに対して、固化改良体の全改良のケース 5 および中空改良のケース 6 では、杭ひずみの発現が $\varepsilon = 2000 \mu$ 程度とケース 4 に対して半減しており、杭および固化改良体の損傷もなく健全であった。この傾向は、昭和 35 年宮城県沖地震動の加震でも同様であった。

3. 2. 2 高低強度改良 (1800kN/m²)

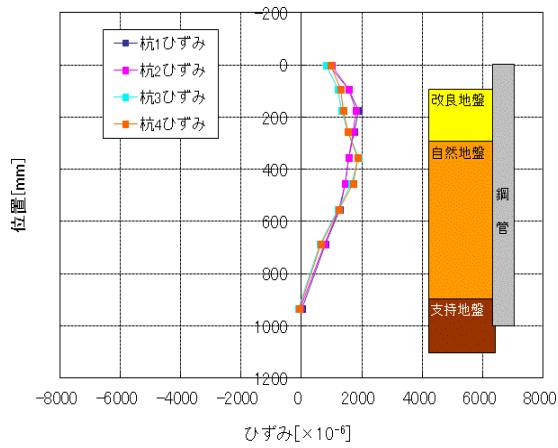
改良強度別の既設杭の耐震補強効果を確認するため、ケース 6 に対して上部層の固化改良体 (中空改良) を高強度 1800kN/m² 相当にしたケース 7 の加振実験を実施した。入力地震波は同様にレベル 2 地震動タイプ I 平成 23 年東北地方太平洋沖地震動 240sec (図 15 (b)) とした。代表的結果を以下に示す。

実験の結果、ケース 7 のタイプ I 地震動における杭頭変位量はケース 6 ($y_6 = 44.78\text{mm}$) に対して、 $y_7 = 36.00\text{mm}$ と低下傾向を示した。改良体側面の緩み状況もケース 6 とほぼ同様である。

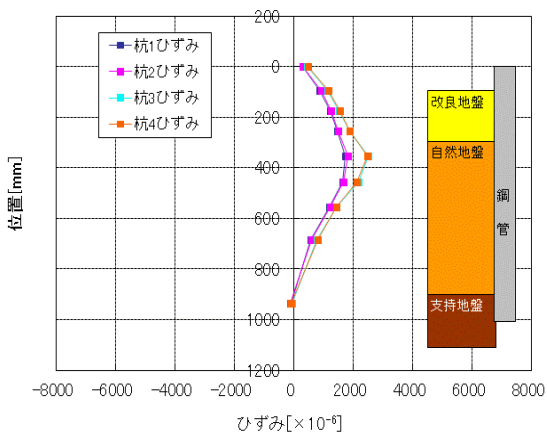
レベル 2 地震動に対する図 17 に改良体の表面状況、図 18 に加振時の杭ひずみ分布を示す。図によれば、固化改良は損傷せず、杭ひずみはケース 6 とほぼ同様の最大値 $\varepsilon = 2000 \mu$ 程度である。ただし、ひずみ最大値の発現位置は改良体内に収束している。



(a) ケース 4 未改良 (未対策)

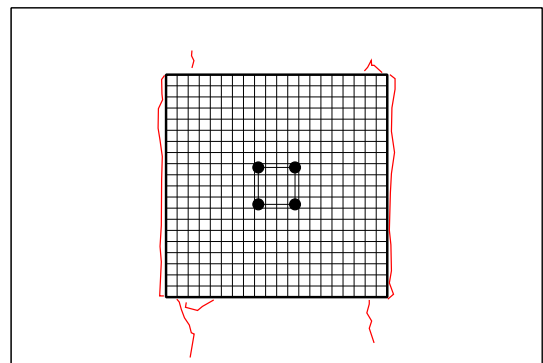


(b) ケース 5 全改良 300kN/m² (コンジットパイル工法)



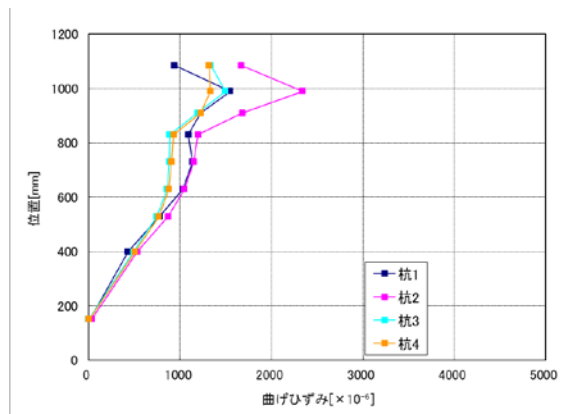
(c) ケース 6 中空改良 300kN/m² (コンジットパイル工法)

図 16 レベル 2 加振時の杭ひずみ分布



ケース 7 中空改良 1800kN/m²

図 17 レベル 2 加振時の固化改良体状況



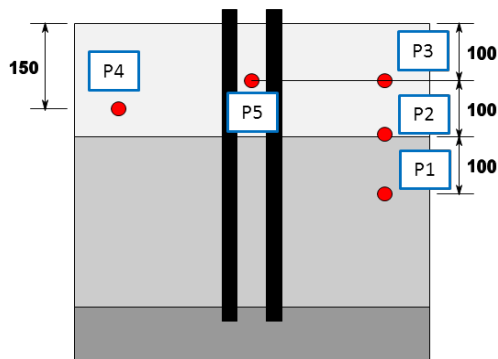
ケース 7 中空改良 1800kN/m²

図 18 レベル 2 加振時の杭ひずみ分布

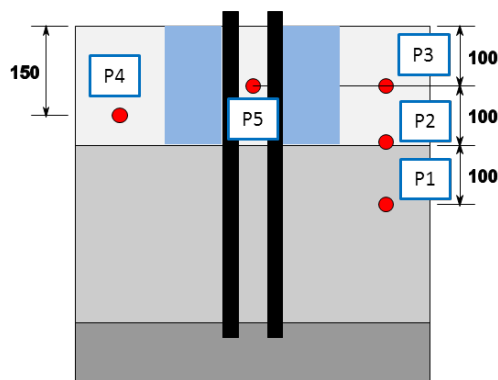
この結果より、コンジットパイル工法において改良強度の違いに対する既設杭補強効果の概ね大きな差異なく、鋼板補強などについては施工性や求める耐震性にに応じて設定する必要があると考えられる。

3. 3 液状化地盤での耐震補強効果

コンジットパイル工法の液状化地盤における耐震補強効果の基礎資料を得るため、未改良に対する改良地盤を施すことによる杭の耐震性能を加振実験で検証した。モデル図を図 19 に示す。



未改良 上層 N=10 砂層



改良強度 300kN/m² 中空改良

図 19 コンジットパイル工法の液状化実験

基礎資料を得る実験として基盤入力波は最大500galの図 20 に示した sin 波とした。実験中の状況を写真 4 に示したが、未改良および改良地盤の側面で液状化が発生した。

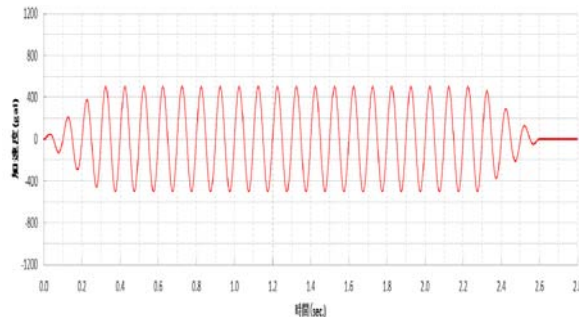


図 20 液状化実験入力波



未改良 上層 N=10 砂層



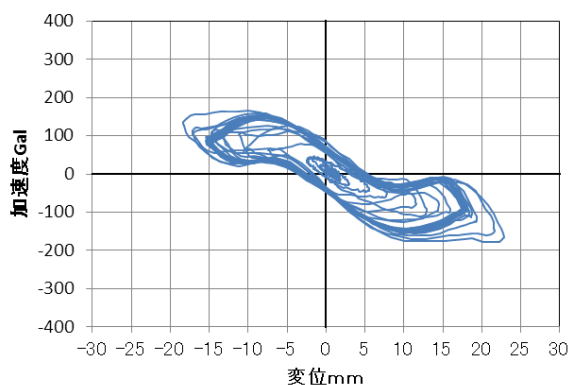
改良強度 300kN/m² 中空改良

写真 4 液状化実験状況

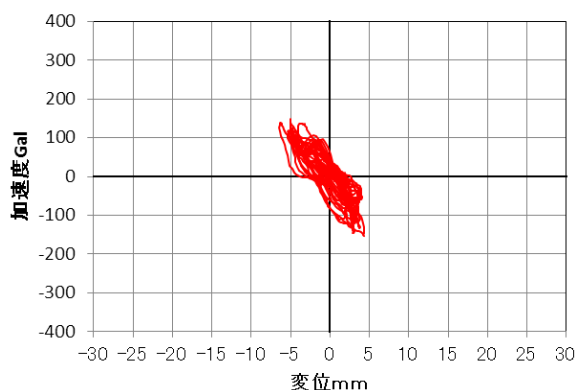
以下に、コンポジットパイル工法の液状化地盤における代表的な加振実験結果を示す。

図 20 は固有振動数等が異なる同等応答加速度時 (200gal 相当) の杭頭水平変位量を示したものである。図によれば、未改良で比較的大きな杭応答変位が発生しているのに対して、杭周辺に改良体を施工したコンポジットパイルでは、杭変位量が約 1/5 (未改良最大 20.20mm / 最大改良 4.27mm) に低下していることが分かる。この際に、未改良地盤では過剰間隙水圧が 1 以上となり明らかに液状化が発生しているが、コンポジットパイルの中空部で 0.8 程度と間隙水圧は拘束されている。

図 21 に加振時の最大杭ひずみ分布を示した。コンポジットパイルでは未改良に対して、杭ひずみが概ね半減 (未改良最大約 700 μ / 改良最大約 300 μ) し耐震性が向上することが確認された。

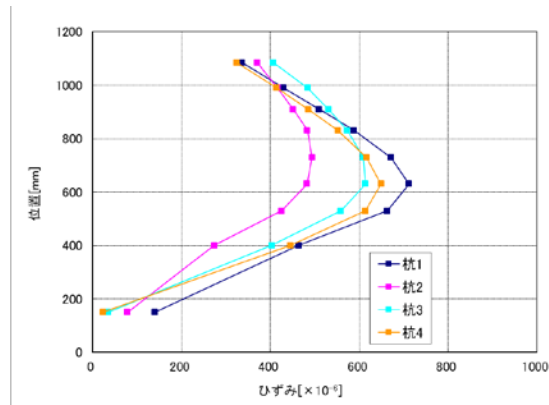


未改良 上層 N=10 砂層

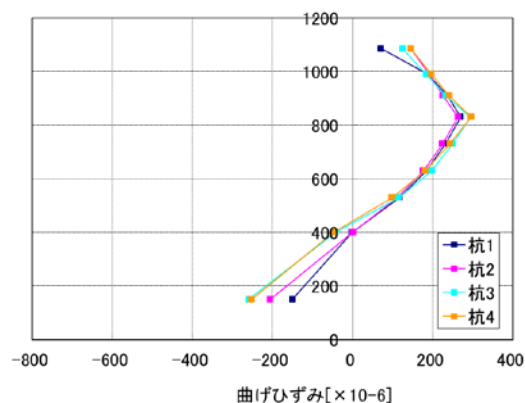


改良強度 300kN/m² 中空改良

図 20 液状化実験の加速度～杭変位図



未改良 上層 N=10 砂層



改良強度 300kN/m² 中空改良

図 21 液状化実験の杭ひずみ分布

以上の一連の実験結果より、既設杭基礎の周辺に固化改良体を併設するコンポジットパイル工法の泥炭性軟弱地盤および液状化地盤における補強技術の有用性が概ね検証されたものと考えている。

4. まとめ

本研究の結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 泥炭性軟弱地盤における既設基礎の耐震補強技術について
 - 1) 泥炭性軟弱地盤中の既設基礎は、現行照査指標に照らし、耐力・変形性能が著しく小さいものや既に損傷・変形が生じているものは、地震水平保有耐力を確保するため耐震補強を行うことが必要である。
 - 2) 基礎耐震補強技術として、今後の性能規定化を考慮し、既設基礎の耐震診断フローを提案した。
- (2) 泥炭性軟弱地盤における既設杭基礎の新たな耐震補強技術 (コンポジットパイル工法) の大規模模型実験成果について

ア. 単杭実験成果

- 1) 静的水平交番載荷実験の結果、杭周辺に固化改良体を併設および固化改良体を鋼板補強したコンポジットパイルは、未対策の泥炭性軟弱地盤に対して、静的な慣性力に対する所要の杭基礎の変形抑制効果を示した。
- 2) 固化改良体のみ補強対策のものは、静的な大規模変形時に固化改良体の損傷が懸念される。また、固化改良体を鋼板補強した補強対策のものは、固化改良体の健全性を確保ができるものの、静的な慣性力による杭挙動が鋼板の外側の軟弱地盤の強度に支配されることが留意点である。
- 3) 動的加震実験の結果、未対策では静的実験と同様に動的な反力効果が過小である。固化改良体を鋼板補強したコンポジットパイルでも動的な地盤反力は比較的小さいが、固化改良体を併設したコンポジットパイルで大きな動的水平抵抗を発揮した。鋼板補強した対策工が固化改良体のみ対策工よりも動的抵抗が小さくなるのは、静的と同様に、動的挙動が固化改良体の反力効果ではなく脆弱な鋼板の外側の泥炭性軟弱地盤の水平地盤反力に支配されるためと推察される。
- 4) 同一杭変位 ($y=50\text{mm}$ 相当) の杭加振周波数および最大入力加速度は、未対策 (3.20Hz、820gal) に対して固化改良体を併設 (7.00Hz、1681gal) および固化改良体を鋼板補強 (6.00Hz、1842gal) したコンポジットパイルはそれぞれ倍程度に大きくなった。また、杭最大応答加速度の同一杭変位の対比では、固化改良体を鋼板補強したケース (1655gal) より固化改良体のみケース (2667gal) で耐震性能が大きいと考えられる。
- 5) 杭基礎の耐震性をエネルギー吸収量で評価した場合、大規模地震時挙動と想定される杭変位量 $y=25\text{mm}$ では、未対策を 100% 基準とすると、固化改良体を併設したコンポジットパイルで 356%、固化改良体を鋼板補強したコンポジットパイルで 174% のエネルギー吸収効果すなわち耐震性の向上が確認された。

イ. 組杭実験成果

- ・改良体低強度 300kN/m^2

- 1) 低強度 300kN/m^2 コンポジットパイルの組杭加振実験の結果、レベル1地震動に対する杭頭変位量は、未改良のケースに対して約4分の1となった。また、レベル2地震動においても杭頭変位量は、未改良地盤に対してコンポジットパイルは半減した。この結果、コンポジットパイル工法の地震動に対する既設杭基礎の変位抑制効果が検証された。また、固化改良体が全改良と中空改良で変位抑制に大きな差異は認められなかった。

- 2) レベル2地震動である平成23年東北地方太平洋沖地震動の加震において、コンポジットパイル工法の耐震性に相当する杭ひずみは未改良地盤に対して、概ね半減した。未改良のケースでは鋼管杭が大きく変形した。この傾向は、レベル1地震動である昭和35年宮城県沖地震動の加震でも同様であった。

- ・改良体高強度 1800kN/m^2

- 1) 改良体高強度 1800kN/m^2 コンポジットパイルの組杭レベル2地震動加振実験の結果、杭頭変位量は改良体低強度 300kN/m^2 に対してやや低下傾向を示した。
 - 2) レベル2地震動の加震において、改良体高強度のコンポジットパイル工法は杭ひずみが未改良に対して、低強度 300kN/m^2 ほぼ同様に半減した。ただし、最大値の発現位置は異なる。
- (3) コンポジットパイルの液状化地盤での杭耐震補強効果について

- 1) 本条件の液状化地盤において、同等応答加速度時 (200gal 相当) の杭頭水平変位量は、コンポジットパイルで未改良地盤に対して約1/5 (未改良最大20.20mm / 最大改良4.27mm) に低下した。未改良では過剰間隙水圧は1以上で液状化が発生したが、コンポジットパイルの中空部で0.8程度と間隙水圧は拘束された。
- 2) 液状化地盤において、加震時の最大杭ひずみはコンポジットパイルでは未改良に対して、概ね半減し耐震性が向上した。

以上本報では、既設基礎の耐震診断フローを提案し、単杭および組杭の一連の実験成果より、杭周辺に地盤改良による固化改良体を併設するコンポジットパイル工法の耐震補強技術に関する有用な資料を得た。

一連の実験成果より、コンポジットパイル工法が泥炭性軟弱地盤および液状化地盤において既設杭の耐震補強に有効な一手法である事が概ね検証された。今後は、本工法の実用化に向け、関係機関とも協議し、求める耐震性に応じて現行基準に準じた設計施工法を確立する考えである。

参考文献

- 1) 特許第5077857号「複合地盤杭基礎技術による既設構造物基礎の耐震補強構造 (コンポジットパイル工法)」
- 2) 新技術情報提供活用システム: NETIS 登録番号 HK-130008-A 一般、コンポジットパイル工法、2013.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、pp.6-13、2012.
- 4) 日本道路協会: 既設道路橋基礎の補強に関する

- 参考資料，第3章 pp.1-25、2000.
- 5) 富澤幸一、西本 聡：既設構造物基礎の耐震診断フロー、土木研究所寒地土木研究所月報 No.705、pp.40-44、2012.
 - 6) 土木研究所寒地土木研究所：北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン、189p、2010.
 - 7) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説 第1回改訂版、pp.22-28、2010.
 - 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編、pp.32-64、2007.
 - 9) 富澤幸一、西本 聡：固化改良体を併設する既設杭基礎の耐震補強技術ーコンポジットパイルの耐震効果の実験検証ー、第10回地盤改良シンポジウム論文集、pp.329-336、2012.
 - 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp.109-131、2012.

SEISMIC STRENGTHENING TECHNIQUE OF EXISTING STRUCTURAL FOUNDATION IN PEATY SOFT SOIL

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2013

Research Team : Cold-Region Construction

Engineering Research Group

(Geotechnical Research)

Author : FUKUSHIMA Hirofumi

TOMISAWA Koichi

EGAWA Takuya

Abstract : Many severe earthquakes occurred in Japan such as 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and 2011 Tohoku Taiheiyo-oki Earthquake. Bridges in Japan have been severely deteriorated which are constructed more than 50 years ago. It is necessary to take remedial measures for existing foundations with insufficient seismic performance with consideration to the possibility of liquefaction.

The current report suggests a procedure for investigating the seismic behavior of existing pile foundations, and introduces the results of experiments on strengthened single- and group-pile foundations using the Composite-Pile Method in which a cemented soil is used around existing piles.

Keywords : peat, earthquake, pile foundation, reinforcement against earthquake