

明 細 書

発明の名称：人工地盤構造物

技術分野

[0001] 本発明は、山間部などにおいて道路などを構築する際に、地形の影響を受けずに必要な傾斜及び幅員を確保できる人工地盤構造物に関する。

背景技術

[0002] 山間部に例えば道路などの人工的な地盤を構築する場合は、既存の斜面の道路面計画高さより高い部分は切土を行い、また、低い部分には盛土を行い、路面を平坦に成形した構造が用いられる。この場合、既存の斜面を改変するため、植栽及び生物の居住環境に及ぼす影響が大きく、環境保全の面で好ましくない場合が多い。また、谷合に橋梁を設置する場合には、大規模な橋脚を斜面に構築する必要があり、大規模な掘削及び基礎工事が必要である。この場合、環境に対する影響が大きいという、工期が長くなりコストも大きくなる。そこで、斜面に杭を設置し、その上に桁及び道路床版を設置する栈橋形式の人工地盤構造物が考案されている。人工地盤構造物は、地盤に道路方向及び道路直角方向に複数の鋼管杭が設置され、鋼管杭の上部に鋼管支柱が接合されている。また、鋼管杭又は鋼管支柱の上端には格点部が設置され、格点部を連結するように主桁及び横桁が設けられている。そして、主桁及び横桁の上方に床版が設置されている。鋼管杭又は鋼管支柱は、地盤から突出している部分が長いので、中間に中間格点部が設けられ、中間格点部を連結するように中間桁が設けられている（例えば、特許文献1参照）。これにより、人工地盤構造物の鋼管杭及び鋼管支柱は、互いに偏心調整しつつ接合されるとともに隣り合う鋼管杭又は鋼管支柱と連結されることにより、支持杭の地盤からの突出長が多大であっても曲げモーメント及び変位を抑えることができる。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第2021/090439号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 阪神大震災、東日本大震災、熊本地震などの地震の経験によって、道路構造物を含む人工地盤構造物の耐震性確保がこれまでに増して重要となっている。従来は、人工地盤構造物を構成する鋼管杭及び鋼管支柱（併せて支持杭と呼ぶ）の地盤から突出している部分は、地震による入力に対し、材料の弾性範囲内で強度を確保することを前提にして設計されていた。しかし、支持杭の地盤から突出している部分の強度が地震による入力に対し降伏点を超えないような設計をした場合、人工地盤構造物を構成する支持杭の外径が大きいのになり、重量も大きくなるという課題があった。

一方、例えばJIS A 5525に規定される鋼管ぐいを支持杭として用いた場合、その支持杭は、降伏点を超えた場合の性能について何ら規定されていないため、大地震による入力に対し塑性変形によるエネルギー吸収を期待できない、という課題があった。

[0005] 本発明は上記課題を解決するものであって、地盤からの突出量が大きい支持杭を備える人工地盤構造物において、大地震による振動に対し支持杭の塑性変形によるエネルギー吸収によって耐震性が向上した人工地盤構造物を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明に係る人工地盤構造物は、人工地盤が延びる第1方向及び前記第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭と、前記支持杭の上端に設置された上端格点部と、隣り合う2つの前記上端格点部を接続する第1桁部材と、前記上端格点部及び前記第1桁部材の上方に設置される床版と、を備え、前記支持杭は、レベル2地震動を受けたときの水平方向変位と水平荷重との履歴曲線が紡錘形状となるように設定されている。

[0007] 本発明に係る人工地盤構造物は、人工地盤が延びる第1方向及び前記第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭と、前記支持杭

の上端に設置された上端格点部と、隣り合う2つの前記上端格点部を接続する第1桁部材と、前記上端格点部及び前記第1桁部材の上方に設置される床版と、を備え、前記支持杭は、熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が85%以下であり、シャルピー吸収エネルギーが27J以上である。

発明の効果

[0008] 本発明によれば、地盤からの突出長さが多大な支持杭においても、上端格点部の位置精度を確保しつつ、支持杭の外径寸法及び重量を抑えられる。また、支持杭は、大地震に相当する入力であるレベル2地震動について水平方向変位と水平荷重との関係を測定したときに、履歴曲線が紡錘形状となるように構成されているため、塑性変形により安定して振動エネルギーを吸収することができる。人工地盤構造物は、このような支持杭を用いることにより耐震性が向上する。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]実施の形態1に係る道路構造100の模式図である。
[図2]図1の道路構造100のA-A部の断面構造の説明図である。
[図3]図1の道路構造100のB-B部の断面構造の説明図である。
[図4]図1の道路構造100のC-C部の断面構造の説明図である。
[図5]図1の道路構造100の第1桁部材41の配置の説明図である。
[図6]道路構造100の上部の構造の一例を示す斜視図である。
[図7]実施の形態1に係る道路構造100の上端格点部50a周辺の断面構造の一例の説明図である。
[図8]図7に示す上端格点部50aの上面図である。
[図9]実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部50b周辺の断面構造の説明図である。
[図10]実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部50bの上面図である。
[図11]実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部150b周辺の断面

構造の説明図である。

[図12]孔 9 5 に鋼管杭 2 0 を建て込んだ状態の説明図である。

[図13]実施の形態 1 の仮接合工程に用いられる型枠治具 7 0 の構造の説明図である。

[図14]覆工版 3 9 9 の一例を示す側面図である。

[図15]比較例に係る道路構造 1 0 0 0 の断面構造の説明図である。

[図16]実施の形態 1 に係る支持杭 1 0 に用いられる鋼管について正負交番試験を実施した場合の履歴曲線である。

[図17]正負交番試験の試験体の模式図である。

[図18]実施の形態 1 に係る支持杭 1 0 に用いられる電縫鋼管の溶接工程の説明図である。

[図19]実施の形態 1 に係る支持杭 1 0 に用いられる電縫鋼管の溶接部の断面図である。

[図20]強度試験用の試験片を採取した電縫鋼管の外径、板厚、成分の表である。

[図21]試験片を用いて引張試験を行って得られた公称応力と公称ひずみとの関係図である。

[図22]試験片を用いて引張試験を行って得られた結果を示している。

[図23]試験片を用いて引張試験を行って得られたシャルピー試験の結果を示す図である。

[図24]実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の上端格点部 5 5 0 a 周辺の断面構造の説明図である。

[図25]実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の上端格点部 5 5 0 a の上面図及び側面図である。

[図26]図 2 5 (b) の F - F 部の断面図である。

[図27]実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の中間格点部 5 5 0 b 周辺の断面構造の説明図である。

[図28]実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の上端格点部 5 0 a の変形例であ

る上端格点部 250a 周辺の断面構造の説明図である。

[図29]図 28 の上端格点部 250a の上面図である。

[図30]実施の形態 1 に係る道路構造 100 の中間格点部 150b の変形例である中間格点部 250b 周辺の構造の側面図及び上面図である。

[図31]実施の形態 1 に係る道路構造 100 の変形例の断面構造の説明図である。

[図32]実施の形態 2 に係る道路構造 100 の一例を示す模式図である。

[図33]図 32 の K 部の拡大図である。

[図34]図 32 のうち中間格点部 50b 又は 150b を備える支持杭 10a の拡大図である。

[図35]図 32 の L 部の拡大図である。

[図36]図 32 の M 部の拡大図である。

[図37]図 33、図 34、図 35 及び図 36 の各結節点間部材 10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb 及び 10Db の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。

[図38]図 35 に示される 2 本の支持杭 10 において、長い方の支持杭 10a の突出量 h に対する地盤側の結節点間部材 10C の長さ h_3 の比と式 (16) 及び式 (17) の G の値との関係を示すグラフである。

[図39]2 本の支持杭 10 の結節点間部材 10A 及び結節点間部材 10C の水平方向変位 δ と応力 σ との関係を示す図である。

[図40]図 32 の L 部の拡大図であり、図 35 に対し支持杭 10a を短く変更した場合の図である。

[図41]図 40 の長い方の支持杭 10 と短い方の支持杭 10a の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。

[図42]基準杭及び比較杭の材質の降伏応力が同じ場合と異なる場合の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。

[図43]基準杭及び比較杭の外径が異なる場合の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。

[図44]実施の形態2に係る道路構造100の説明図である。

[図45]実施の形態2に係る道路構造100の支持杭10の拡大図である。

[図46]実施の形態2に係る道路構造100のy方向に垂直な断面の説明図である。

[図47]実施の形態1に係る道路構造100の施工方法のフローである。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。なお、以下に説明する実施の形態によって本発明が限定されるものではない。各図は模式的に示すものであって、各部材の相対的な大きさや板厚等は図示する寸法に限定されるものではない。また、以下の図面では各構成部材の大きさの関係が実際のものとは異なる場合がある。

[0011] 実施の形態1.

図1は、実施の形態1に係る道路構造100の模式図である。図2は、図1の道路構造100のA-A部の断面構造の説明図である。図3は、図1の道路構造100のB-B部の断面構造の説明図である。図4は、図1の道路構造100のC-C部の断面構造の説明図である。図5は、図1の道路構造100の第1桁部材41の配置の説明図である。図6は、道路構造100の上部の構造の一例を示す斜視図である。道路構造100は、山間部等の起伏が大きい地盤に設置されるものである。道路構造100は、例えば、山間部の斜面に沿って道路を設ける場合、斜面に沿って設けられた既設道路を拡幅する場合、又は山間部の沢部を跨いで道路を通す場合等に用いられる構造である。実施の形態1においては、人工地盤構造物の一例として山間部の斜面に沿って設置された道路構造100について説明する。なお、図1に示すy方向は、道路構造100が延伸する方向であり、z方向は、支持杭10が延びる方向である。ただし、道路構造100は直線状に延びるものに限定されず、例えば図5に示すように上面視において曲線状に延びるものであっても良い。また、人工地盤構造物は、例えば山間部等の起伏が大きい地盤90において人工的な平地を構築するためのものであり、道路構造100以外にも

、例えばヘリポート、道路に接続された待避所及びドローンポートなどにも適用できる。人工地盤構造物は、その上面に建屋などの施設を構築することもできる。

[0012] 図2～図4に示すように、道路構造100は、地盤90に打設された複数の鋼管杭20を備える。鋼管杭20は、地盤90に設けられた孔に、杭頭21が地盤90の表面94から突出するように建てられる。地盤90は、ダウンザホールハンマ等によって堆積層92を貫通し、支持層93まで削孔されている。地盤90に設けられた孔に鋼管杭20を建て込み、孔にコンクリート又はモルタル等の充填材が充填されることにより、鋼管杭20は、地盤90に立設される。図2などに示されているx方向は、道路構造100が延伸するy方向及び支持杭10が延びるz方向に垂直な方向である。

[0013] 鋼管杭20は、道路として形成された人工地盤が延びる方向である第1方向に並列して地盤90に複数打設される。図5に示される様に、第1桁部材41が例えば斜面などに沿って曲がって配置されており、道路は、その第1桁部材41の上に道路床版99を設置して構成される。実施の形態においては、第1方向は、この道路に沿った方向である。また、道路床版99は、単に床版と称する場合がある。例えば人工地盤構造物がヘリポートとして使用される場合は、床版の上面にヘリコプターが着陸する。また、床版の上に建屋などの施設が構築される場合がある。

[0014] 道路構造100の複数の鋼管杭20は、第1鋼管杭20aと第2鋼管杭20bとを含む。第1鋼管杭20aは、上方に鋼管支柱30が接合される。鋼管支柱30は、道路床版99及び第1桁部材41が設置される地盤90の表面94からの高さに応じて、第1鋼管杭20aの上端に接合される。図1～図4中に示されている三角形の記号は、第1鋼管杭20aと鋼管支柱30との接合部11を示している。接合部11においては、第1鋼管杭20aと鋼管支柱30とが例えば溶接により接合されている。ただし、接合部11は、偏心接合部材60b（図11参照）が、地盤90側に位置する第1鋼管杭20aとの上方に接合される鋼管支柱30とを接合している構造であっても良

い。なお、地盤 9 0 に立設された柱状の構造を支持杭 1 0 と称する場合がある。特に、上述した第 1 鋼管杭 2 0 a と鋼管支柱 3 0 とを接合した構造は、支持杭 1 0 a と称する場合がある。

[0015] 鋼管支柱 3 0 は、第 1 鋼管杭 2 0 a の杭頭 2 1 a と接合され上方に延びている。鋼管支柱 3 0 の杭頭 1 2 には上端格点部 5 0 a が接合されている。上端格点部 5 0 a は、偏心接合部材 6 0 を用いて鋼管支柱 3 0 の杭頭 1 2 と接合されている。

[0016] 上端格点部 5 0 a は、第 1 方向において隣り合う上端格点部 5 0 a と第 1 桁部材 4 1 により連結されている。第 1 方向に沿って設置されている第 1 桁部材 4 1 を特に縦桁 4 1 a と呼ぶ。

[0017] 図 2 ～図 4 に示される様に、上端格点部 5 0 a は、第 1 方向に交差する第 2 方向に並列して隣り合う上端格点部 5 0 a と第 1 桁部材 4 1 により連結されている。第 2 方向に沿って設置されている第 1 桁部材 4 1 を特に横桁 4 1 b と呼ぶ。

[0018] 実施の形態 1 においては、図 2 ～図 4 に示される様に、鋼管杭 2 0 は、第 1 方向に交差する第 2 方向に沿って 2 本並べられている。横桁 4 1 b は、第 2 方向に並べられた杭頭 1 2 に接合された上端格点部 5 0 a を連結している。つまり、第 1 桁部材 4 1 は、第 1 方向及び第 2 方向に沿って設置され、それぞれ支持杭 1 0 の杭頭 1 2 同士を、上端格点部 5 0 a を介して連結している。第 1 桁部材 4 1 及び上端格点部 5 0 a の上面には、床版固定部材 4 2 が設置されている。道路床版 9 9 は、床版固定部材 4 2 を介して第 1 桁部材 4 1 及び上端格点部 5 0 a に固定される。なお、鋼管杭 2 0 は、第 1 方向に交差する第 2 方向に 2 本以上並べられていても良い。

[0019] 縦桁 4 1 a は、第 1 方向に並べられている支持杭 1 0 の杭頭 1 2 に接合された上端格点部 5 0 a を連結している。上端格点部 5 0 a は、縦桁 4 1 a が接続される 2 つの縦桁仕口 5 2 a (図 7 参照) を備える。図 5 に示す様に、道路構造 1 0 0 が斜面などに沿って曲げられて配置されている場合は、1 つの上端格点部 5 0 a に接続された 2 つの縦桁 4 1 a は、長手方向が互いに交

差するように延びる。したがって、上端格点部50aに設けられている2つの縦桁仕口52aも互いに交差するように延びている。

[0020] また、縦桁41aは、第2方向において並列されている第1の縦桁41aと第2の縦桁41abとを含む。図5において、第1の縦桁41aは、第1方向に並んで配置された支持杭10の杭頭12に設置された第1の上端格点部50aaと第2の上端格点部50abとの間を接続する。また、第2の縦桁41abは、第1方向に並んで配置された支持杭10の杭頭12に設置された第3の上端格点部50acと第4の上端格点部50adとの間を接続する。例えば、図5に示されるように、平面視において、山間部の斜面に沿って道路構造100が曲線状に設置されている場合、第1の縦桁41aaは、曲がって配置された道路構造100の内側に位置し、第2の縦桁41abは、曲がって配置された道路構造100の外側に位置する。このとき、第1の上端格点部50aaと第2の上端格点部50abとの間隔は、第3の上端格点部50acと第4の上端格点部50adとの間隔よりも短い。また、第1の縦桁41aaは、第2の縦桁41abよりも短い。なお、第1の縦桁41aaと第2の縦桁41abとは、互いに平行になる様に配置されていても良い。

[0021] 図5に示すように、横桁41bは、中央部に連結部43を備える。連結部43には縦桁41aが接続されている。連結部43に接続されている縦桁41aは、第1方向において隣り合う横桁41bの連結部43同士を接続している。横桁41bは、第1の上端格点部50aaと第3の上端格点部50acとを接続している。また、横桁41bは、第2の上端格点部50abと第4の上端格点部50adとを接続している。実施の形態1において横桁41bは、2つの上端格点部50aを一体にするように構成されている。さらに、横桁41bは、中央部に連結部43を備える。第1方向において隣合って配置されている横桁41bの中央部の連結部43同士は、第3の縦桁41acによって接続されている。なお、図5に示されている様に、第3の縦桁41acの第1方向における長さは、第1の縦桁41aaよりも長く第2の縦

桁 4 1 a b よりも短い。また、実施の形態 1 においては図 5 に示すように桁部材 4 1 が第 2 方向において 3 列並んでいる場合を説明したが、2 列であってもよく、さらに多数の桁部材 4 1 が並列されていても良い。また、道路構造 1 0 0 は、平面視において曲線状に設置するものに限定されず、直線状に配置されていても良いし、直線と曲線とが複合された形状に設置されていても良い。

[0022] 図 1 に戻り、第 2 鋼管杭 2 0 b は、上方に上端格点部 5 0 a が接続されている。上端格点部 5 0 a は、偏心接合部材 6 0 を用いて第 2 鋼管杭 2 0 b の杭頭 1 2 と接合されている。第 2 鋼管杭 2 0 b に接合されている上端格点部 5 0 a は、支持杭 1 0 a に接合されている上端格点部 5 0 a と同様に、第 1 方向及び第 2 方向に隣り合う上端格点部 5 0 a と連結されている。なお、上方に鋼管支柱 3 0 が接合されていない第 2 鋼管杭 2 0 b は、支持杭 1 0 b と称する場合がある。

[0023] 図 1 に示される様に、支持杭 1 0 a には中間格点部 5 0 b が設けられている。実施の形態 1 において、中間格点部 5 0 b は、支持杭 1 0 a のうち鋼管支柱 3 0 の中央部に設置されている。つまり、中間格点部 5 0 b は、道路構造 1 0 0 のうち、地盤 9 0 からの突出長さが多大な支持杭 1 0 a に設けられている。中間格点部 5 0 b は、隣り合う鋼管支柱 3 0 に設けられた中間格点部 5 0 b と第 2 桁部材 4 0 により連結されている。第 1 方向に沿って設置されている第 2 桁部材 4 0 を、特に縦桁 4 0 a と呼ぶ。

[0024] 図 4 に示される様に、中間格点部 5 0 b は、第 1 方向に交差する第 2 方向において隣り合う支持杭 1 0 に設置された中間格点部 5 0 b と第 2 桁部材 4 0 により連結されている。第 2 方向に沿って設置されている第 2 桁部材 4 0 を、特に横桁 4 0 b と呼ぶ。

[0025] 第 2 桁部材 4 0 は、図 1 及び図 3 に示される様に傾斜して設置されていても良いし、図 4 に示される様に水平に設置されていても良い。図 3 に示されている第 2 桁部材 4 0 は、支持杭 1 0 が打設されている地盤 9 0 の斜面に沿って傾斜されている。つまり、斜面の山側に打設された支持杭 1 0 に設けら

れた中間格点部50bは、斜面の谷側に打設された支持杭10に設けられた中間格点部50bよりも高い位置に配置されている。このように構成されていることにより、中間格点部50bが設置されている位置が地盤90の表面94から過剰に離れることがなく、支持杭10の地盤90から突出している部分の水平方向変位 δ が部分的に過度に大きくなるのを抑制し、振動による支持杭10の破壊を抑制できる。また、中間格点部50bは、図1及び図4に示される様に鋼管支柱30に設置されるものに限定されず、図3に示される様に第2鋼管杭20bに設置されていても良い。

[0026] (上端格点部50a)

図7は、実施の形態1に係る道路構造100の上端格点部50a周辺の断面構造の一例の説明図である。図8は、図7に示す上端格点部50aの上面図である。上端格点部50aと支持杭10とは、偏心接合部材60aにより接合される。偏心接合部材60aは、上端格点部50aの一部であり、支持杭10の杭頭12と組み合わせ、杭頭12に対する上端格点部50aの位置を調整するためのものである。即ち、上端格点部50aは、偏心接合部材60aにより、支持杭10と中心軸の位置がずれた状態であっても、支持杭10に接合することができる。

[0027] 実施の形態1において、偏心接合部材60aは、少なくとも上端格点部50aを構成する筒体である鋼管部材51aと支持部材55aとから構成される。実施の形態1においては、鋼管部材51aは、円筒形状になっている。鋼管部材51aの内部の上部には支持部材55aが設置されている。支持部材55aは、円筒形状である鋼管部材51aの中心軸Cを通り、板状の部材を十字形状に組み合わせて形成されている。なお、鋼管部材51aは、円筒形状に限定されるものではなく、矩形又は多角形等の断面形状の筒体であってもよい。

[0028] 上端格点部50aは、第1桁部材41が接続される縦桁仕口52a及び横桁仕口53aを備える。縦桁仕口52a及び横桁仕口53aと第1桁部材41とは、添接板44により縦桁仕口52a又は横桁仕口53aの端部と第1

桁部材 4 1 の端部とを挟みこみ、ボルト及びナットを用いて添接板 4 4 とそれぞれの部材の端部とを固定して接続される。

[0029] 上端格点部 5 0 a は、上部に板状の部材が取り付けられており、上面 5 7 a が平坦になっている。上面 5 7 a は、道路の傾斜に合わせて傾斜していてもよい。上面 5 7 a には、板状の部材を貫通する充填孔 5 6 a が開口されている。充填孔 5 6 a は、杭頭 1 2 と鋼管部材 5 1 a との間の空間に充填材 8 0 を注入するための孔であり、外部と鋼管部材 5 1 a の内部の空間とを連通する。

[0030] 支持部材 5 5 a は、下面に支持杭 1 0 a 又は 1 0 b の杭頭 1 2 の端面 1 4 が当接する。支持部材 5 5 a の下面と杭頭 1 2 の端面 1 4 とが当接することにより、上端格点部 5 0 a は、支持杭 1 0 の中心軸方向の位置、即ち高さ方向の位置が決まる。鋼管部材 5 1 a は、支持杭 1 0 の上端部の外周面を包囲している。充填材 8 0 が充填される前においては、鋼管部材 5 1 a の内側面と支持杭 1 0 の外側面との間には隙間が形成されており、上端格点部 5 0 a は、その隙間の分だけ支持杭 1 0 に対し、水平方向に移動させることができる。図 6 及び図 7 に示されるように、支持部材 5 5 a は、板状の部材を十字に組み合わせて形成されているが、その他の形態をとることもできる。支持部材 5 5 a は、上端格点部 5 0 a を杭頭 1 2 の端面 1 4 上に保持でき、充填材 8 0 の注入の際に障害にならなければその他の構造であってもよい。

[0031] 支持杭 1 0 は、杭頭 1 2 の位置が想定した位置からずれる場合がある。地盤 9 0 の表面 9 4 からの突出量が多大である場合には、鋼管杭 2 0 及び鋼管支柱 3 0 の単品の精度及び接合精度により、杭頭 1 2 の位置誤差が大きくなる場合がある。例えば、上端格点部 5 0 a の鋼管部材 5 1 a が円筒形状であり、杭頭 1 2 が円柱形状である場合、鋼管部材 5 1 a の内径を杭頭 1 2 の外径より 2 0 0 mm 大きく設定する。これにより、上端格点部 5 0 a は、例えば杭頭 1 2 に最大で 1 0 0 mm の水平方向の位置の誤差があっても正しい位置に設置でき、充填材 8 0 の充填性も確保することができる。

[0032] 充填材 8 0 は、上端格点部 5 0 a の上面 5 7 a に開口している充填孔 5 6

aから鋼管部材51aと杭頭12との隙間に充填される。鋼管部材51aは、下方が開口されている。そのため、充填材80の充填工程において、下方から充填材80が漏れ出ないように、型枠治具70（図13参照）を鋼管部材51aの下端面に当接させて開口を塞ぐ。型枠治具70については、別途説明する。充填材80が充填される鋼管部材51aと杭頭12との隙間を形成する鋼管部材51aの内側面及び杭頭12の外側面は、突起54及び13が設けられている。突起54及び13が固化した充填材80と噛み合うため、充填材80は、鋼管部材51aの内側面及び杭頭12の外側面に沿った方向にずれることがなく、上端格点部50aと支持杭10との間の荷重伝達を向上させることができる。

[0033] 突起13及び54は、鉄筋や棒鋼を曲げて溶接にて固定することにより形成してもよい。又は、鋼管部材51a及び支持杭10は、突起付き鋼板材により形成されていてもよい。例えば、鋼管部材51a及び支持杭10は、鋼板表面に縦横に突起を有する縞鋼板、高さ2mm程度の突起が並行して並びリブ付き鋼板により形成されたリブ付き鋼管を用いてもよい。縞鋼板又はリブ付き鋼管を使用することによって、鋼管部材51aに突起54を、及び支持杭10に突起13を溶接接合するための工費や工程を削減することができる。また、あらかじめ一体に形成されている突起13及び54がずれ止め突起の固定強度を向上させるため、上端格点部50aの鋼管部材51aは、高さ方向の寸法を縮小することが可能である。

[0034] （中間格点部50b）

図9は、実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部50b周辺の断面構造の説明図である。図10は、実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部50bの上面図である。中間格点部50bと支持杭10とは、偏心接合部材60bにより接合される。偏心接合部材60bは、中間格点部50bの一部であり、支持杭10と組み合わせ、支持杭10に対する中間格点部50bの位置を調整するためのものである。即ち、中間格点部50bは、偏心接合部材60bにより、支持杭10と中心軸の位置がずれた状態であっ

ても、支持杭 10 に接合することができる。

[0035] 実施の形態 1 において、偏心接合部材 60b は、少なくとも中間格点部 50b を構成する鋼管部材 51b から構成される。鋼管部材 51b は、筒体であり、実施の形態 1 においては円筒形状になっている。ただし、鋼管部材 51b は、円筒形状に限定されるものではなく、矩形又は多角形等の断面形状の筒体であってもよい。支持杭 10 を包囲する筒体である鋼管部材 51b は、中心軸が支持杭 10 の中心軸とずれた状態で接合可能であり、特に第 2 偏心接合部材と称する。

[0036] 図 10 に示されるように、中間格点部 50b は、第 2 桁部材 40 が接続される縦桁仕口 52b 及び横桁仕口 53b を備える。縦桁仕口 52b 及び横桁仕口 53b と第 2 桁部材 40 とは、第 1 桁部材 41 と同様に添接板 44（図 5、図 6 を参照）により縦桁仕口 52b 又は横桁仕口 53b の端部と第 2 桁部材 40 の端部とを挟みこみ、ボルト及びナットを用いて添接板 44 とそれぞれの部材の端部とを固定して接続される。

[0037] 中間格点部 50b の鋼管部材 51b は、筒体であるため上下方向の端部は開口されている。したがって、鋼管部材 51b と支持杭 10 との隙間の上端が、充填口 56b となり鋼管部材 51b と支持杭 10 との間の空間に充填材 80 を注入するための開口となり、外部と鋼管部材 51a の内部の空間とを連通している。

[0038] 充填材 80 が充填される前においては、鋼管部材 51b の内側面と支持杭 10 の外側面との間には隙間が形成されており、中間格点部 50b は、その隙間の分だけ支持杭 10 に対し、水平方向に移動させることができる。図 9 に示される構造の場合、中間格点部 50b を上下方向に支持する構造が無いため、中間格点部 50b を支持杭 10 に取り付ける際に中間格点部 50b の下端面に型枠治具 70（図 13 参照）を当接させて下側から中間格点部 50b を支持する。型枠治具 70 は、充填材 80 を充填する際に下側の開口から充填材 80 が漏れ出ないようにする機能も有する。

[0039] 支持杭 10 は、位置が想定した位置からずれる場合がある。地盤 90 の表

面 9 4 からの突出量が多大である場合には、鋼管杭 2 0 及び鋼管支柱 3 0 の単品の精度及び接合精度により、支持杭 1 0 の位置誤差が大きくなる場合がある。例えば、中間格点部 5 0 b の鋼管部材 5 1 b が円筒形状であり、支持杭 1 0 が円柱形状である場合、鋼管部材 5 1 b の内径を支持杭 1 0 の外径より 2 0 0 m m 大きく設定する。これにより、中間格点部 5 0 b は、支持杭 1 0 が最大で 1 0 0 m m の水平方向の位置の誤差を持っていても正しい位置に設置でき、充填材 8 0 の充填性も確保することができる。

[0040] 充填材 8 0 が充填される鋼管部材 5 1 b と支持杭 1 0 との隙間を形成する鋼管部材 5 1 b の内側面及び支持杭 1 0 の外側面は、突起 5 4 及び 1 3 が設けられていても良い。突起 5 4 及び 1 3 が設けられている場合、固化した充填材 8 0 と噛み合うため、充填材 8 0 は、鋼管部材 5 1 b の内側面及び支持杭 1 0 の外側面に沿った方向にずれることがなく、中間格点部 5 0 b と支持杭 1 0 との間の荷重伝達を向上させることができる。

[0041] 突起 1 3 及び 5 4 は、鉄筋や棒鋼を曲げて溶接にて固定することにより形成してもよい。又は、鋼管部材 5 1 b 及び支持杭 1 0 は、突起付き鋼板材により形成されていてもよい。例えば、鋼管部材 5 1 b 及び支持杭 1 0 は、鋼板表面に縦横に突起を有する縞鋼板、高さ 2 m m 程度の突起が並行して並びリブ付き鋼板により形成されたリブ付き鋼管を用いてもよい。縞鋼板又はリブ付き鋼管を使用することによって、鋼管部材 5 1 b に突起 5 4 を、及び支持杭 1 0 に突起 1 3 を溶接接合するための工費や工程を削減することができる。また、あらかじめ一体に形成されている突起 1 3 及び 5 4 がずれ止め突起の固定強度を向上させるため、中間格点部 5 0 b の鋼管部材 5 1 b は、高さ方向の寸法を縮小することが可能である。

[0042] (中間格点部 1 5 0 b)

図 1 1 は、実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の中間格点部 1 5 0 b 周辺の断面構造の説明図である。中間格点部 1 5 0 b は、鋼管部材 5 1 b の内部に支持部材 5 5 b を設置することにより、例えば第 1 鋼管杭 2 0 a と鋼管支柱 3 0 とを接合することができる。中間格点部 1 5 0 b は、鋼管部材 5 1 b

の内部に上端格点部 5 0 a が備える支持部材 5 5 a と同様の構造の支持部材 5 5 b を備える。また、中間格点部 1 5 0 b は、中間格点部 5 0 b と同様に支持杭 1 0 の中間部において縦桁 4 1 a 及び横桁 4 1 b により隣り合う中間格点部 5 0 b 又は 1 5 0 b と接続されても良い。

[0043] 支持部材 5 5 b は、下面に第 1 鋼管杭 2 0 a の杭頭 2 1 a の端面 2 2 a が当接する。支持部材 5 5 a の下面と杭頭 2 1 a の端面 2 2 a とが当接することにより、中間格点部 1 5 0 b は、支持杭 1 0 の中心軸方向の位置、即ち高さ方向の位置が決まる。充填材 8 0 が充填される前においては、鋼管部材 5 1 b の内側面と第 2 鋼管杭 2 0 b の外側面との間には隙間が形成されており、中間格点部 1 5 0 b は、その隙間の分だけ第 2 鋼管杭 2 0 b に対し、水平方向に移動させることができる。図 8 に示される上端格点部 5 0 a と同じように、支持部材 5 5 a は、板状の部材を十字に組み合わせて形成されているが、その他の形態をとることもできる。支持部材 5 5 a は、中間格点部 1 5 0 b を杭頭 1 2 の端面 1 4 上に保持でき、充填材 8 0 の注入の際に障害にならなければその他の構造であってもよい。

[0044] 支持部材 5 5 b は、上面に鋼管支柱 3 0 の端面 3 1 が載置される。支持部材 5 5 a の上面と鋼管支柱 3 0 の端面 3 1 とが当接することにより、鋼管支柱 3 0 は、支持杭 1 0 の中心軸方向の位置、即ち高さ方向の位置が決まる。充填材 8 0 が充填される前においては、鋼管部材 5 1 b の内側面と鋼管支柱 3 0 の外側面との間には隙間が形成されており、鋼管支柱 3 0 は、その隙間の分だけ鋼管部材 5 1 b に対し、水平方向に移動させることができる。以上より、中間格点部 1 5 0 b は、下方部材である第 1 鋼管杭 2 0 a と上方部材である鋼管支柱 3 0 とを中心軸を偏心させた状態で接合させることができる。中間格点部 1 5 0 b は、筒体である鋼管部材 5 1 b と支持部材 5 5 a とを備え、上方部材及び下方部材とを接合する。

[0045] 中間格点部 1 5 0 b は、図 1 1 に示される様に、鋼管部材 5 1 b の外側から内部に向かってねじ込まれるボルト 5 7 を備えていても良い。ボルト 5 7 は、支持杭 1 0 を構成する下方部材及び上方部材の鋼管部材 5 1 b に対する

位置を調整し、仮固定するものである。中間格点部 50b の内部に充填材 80 が充填され固化した後は、ボルト 57 の頭は除去しても良い。

[0046] (道路構造 100 の施工方法)

次に、実施の形態 1 に係る道路構造 100 の施工方法について説明する。

[0047] 図 47 は、実施の形態 1 に係る道路構造 100 の施工方法のフローである。道路構造 100 は、まず道路が延びる第 1 方向及び前記第 1 方向に交差する第 2 方向に並列して地盤 90 に鋼管杭 20 が打設される。この工程を鋼管杭打設工程と呼ぶ。鋼管杭打設工程は、まず地盤 90 にダウンザホールハンマなどを用いて削孔し、鋼管杭 20 を建て込む孔 95 (図 12 を参照) を形成する。図 2 ~ 図 4 に示すように、孔 95 は、地盤 90 の表面 94 側にある堆積層 92 を貫通し、支持層 93 に達している。

[0048] 図 12 は、孔 95 に鋼管杭 20 を建て込んだ状態の説明図である。図 12 の中心線から右側の部分は、鋼管杭 20 の中心軸を含む断面における構造を示している。鋼管杭 20 は、孔 95 の底面 96 に先端が達するように孔 95 に建て込まれる。そして、鋼管杭 20 の位置を決めた状態で、鋼管杭 20 の上端の開口から充填材 80 が注入される。充填材 80 は、例えばモルタル又はコンクリート等が用いられる。充填材 80 は、中空の筒形状である鋼管杭 20 を通り、孔 95 の底面 96 側の鋼管杭 20 の端部に設けられている貫通孔 15 から孔 95 と鋼管杭 20 の外側面との間の隙間 97 に流れ込む。

[0049] 隙間 97 に流れ込んだ充填材 80 は、鋼管杭 20 の内部の空間が充填材 80 に満たされるに従い、隙間 97 を上昇する。充填材 80 が隙間 97 から地盤 90 の表面 94 から流出するのが確認できれば、鋼管杭 20 と孔 95 との間の隙間 97 が充填材 80 で満たされたことが確認できる。鋼管杭 20 と孔 95 との間の隙間 97 に地盤 90 の表面 94 から充填材 80 を直接充填した場合、鋼管杭 20 の周りに均等に充填材 80 を充填するのが困難である。また、地盤 90 の条件によっては、孔 95 の表面が円滑ではなく、充填材 80 に土砂が混入したり、底面 96 まで十分に充填材 80 が充填されない場合がある。しかし、図 12 に示されている構造を用いて鋼管杭打設工程を行うこ

とにより鋼管杭 20 が地盤 90 に確実に打設される。

[0050] 鋼管杭 20 は、道路構造 100 に複数用いられる。複数の鋼管杭 20 は、全て上記の鋼管杭打設工程により地盤 90 に打設される。なお、道路構造 100 の複数の鋼管杭 20 は、図 12 に示される孔 95 を備えるもので無くとも良い。

[0051] 次に、複数の鋼管杭 20 のうち第 1 鋼管杭 20 a に鋼管支柱 30 が仮接合され、支持杭 10 a が仮組立される。また、支持杭 10 a の杭頭 12 及び複数の鋼管杭 20 のうち第 2 鋼管杭 20 b の杭頭 21 b に上端格点部 50 a が仮接合される。仮接合は、型枠治具 70 を用いることにより、一時的に鋼管支柱 30、上端格点部 50 a、及び中間格点部 50 b、150 b を、鋼管杭 20 に設置することである。これを仮接合工程と呼ぶ。特に、格点部 50 を杭頭 12、21 a 又は 21 b に設置する工程を格点部設置工程、型枠治具 70 を格点部 50 に設置する工程を型枠設置工程、型枠治具 70 を用いて格点部 50 を杭頭に固定する工程を固定工程、格点部 50 のうち中間格点部 150 b に鋼管支柱 30 を設置する工程を鋼管支柱建て込み工程、と呼ぶ。格点部設置工程、型枠設置工程、固定工程及び鋼管支柱建て込み工程は、仮接合工程に含まれる。以下に仮接合工程の詳細について説明する。

[0052] 図 13 は、実施の形態 1 の仮接合工程に用いられる型枠治具 70 の構造の説明図である。図 13 においては、上端格点部 50 a を鋼管杭 20 に設置する場合の図を示しているが、中間格点部 50 b、150 b を設置する場合においても型枠治具 70 の使用方法是同じである。例えば、鋼管杭 20 の杭頭 21 に中間格点部 150 b を設置する際に、鋼管杭 20 の杭頭 21 に型枠治具 70 を用いる。

[0053] 型枠治具 70 は、型枠板 74 を支持するブラケット 71 を備える。ブラケット 71 は、固定バンド 73 に接続されている。固定バンド 73 は、鋼管杭 20 の外側面を包囲する様にして鋼管杭 20 に着脱自在に固定され、ブラケット 71 の位置を固定する。固定バンド 73 により型枠治具 70 を鋼管杭 20 に設置する工程を特に型枠設置工程と呼ぶ。型枠設置工程は、仮接合工程

に含まれる。

[0054] 支持杭 10 が、図 11 に示される様に第 1 鋼管杭 20 a に鋼管支柱 30 を接合して構成される場合、まず、中間格点部 150 b が、鋼管杭 20 の杭頭 21 a の上に載置される。この工程を格点部設置工程又は中間格点部設置工程と呼ぶ。その後、中間格点部 150 b の仕口 52 に第 2 桁部材 40 が設置される。この工程を、桁部材設置工程と呼ぶ。中間格点部 150 b は、鋼管部材 51 b の下端面に型枠治具 70 の型枠板 74 を当接させるように設置される。この工程を型枠設置工程と呼ぶ。型枠板 74 は、中間格点部 150 b の内部に注入される充填材 80 が漏れ出ないように設置される。格点部設置工程、桁部材設置工程及び型枠設置工程は、仮接合工程に含まれる。また、格点部設置工程、桁部材設置工程及び型枠設置工程は、順番を入れ替えることもできる。

[0055] 図 13 に上端格点部 50 a 又は中間格点部 50 b に型枠治具 70 を設置した状態が示されている。図 13 に示す様に、格点部設置工程により杭頭 12 に中間格点部 50 b が設置された後に、中間格点部 50 b の下方に型枠治具 70 が設置される。なお、型枠治具 70 は、中間格点部 150 b に対しても同様に設置できる。ブラケット 71 は、調整ボルト 75 を備える。調整ボルト 75 の先端は、型枠板 74 の上に載置される中間格点部 50 b の鋼管部材 51 b の外周面に当接する。調整ボルト 75 は、ナット部材 76 と螺合しており、先端の位置を精度良く調整できるとともに、中間格点部 50 b の鋼管部材 51 b の位置を仮固定することができる。このように中間格点部 50 b の鋼管部材 51 b の水平位置を調整し固定する工程を固定工程と呼ぶ。固定工程は、仮接合工程に含まれる。

[0056] 中間格点部 150 b が第 1 鋼管杭 20 a の杭頭 21 a に取り付けられた後に、中間格点部 50 b に鋼管支柱 30 が建て込まれる。これを鋼管支柱建て込み工程と呼ぶ。鋼管支柱建て込み工程は、仮接合工程に含まれる。これにより、図 11 に示す様に、第 1 鋼管杭 20 a の上に鋼管支柱 30 が立設される。

- [0057] 次に、第1鋼管杭20aに鋼管支柱30が接続されている支持杭10a及び第2鋼管杭20bの杭頭12に上端格点部50aが取り付けられる。この工程を、格点部設置工程又は上端格点部設置工程と呼ぶ。上端格点部50aの設置は、中間格点部50bを鋼管杭20の杭頭21に設置するのと同様に、格点部設置工程、型枠設置工程、及び固定工程により行われる。
- [0058] 中間格点部150bが設置された後に、第2桁部材40が設置される。また、上端格点部50aが設置された後に、第1桁部材41が設置される。これらの工程を桁部材設置工程と呼ぶ。桁部材設置工程は、仮接合工程に含めることができる。
- [0059] 実施の形態1に係る道路構造100は、上記のように型枠治具70を用いることにより、格点部50に充填材80を注入しない状態で支持杭10a及び10bを仮組立することができる。そのため、仮組立した支持杭10a及び10bの上に覆工版（図示せず）を設置し、その上部に杭設置用の重機や資材を載置することにより、道路に沿った第1方向に次々に支持杭10a及び10bを立設することができる。支持杭10a及び10bの上に覆工版を設置する工程を、覆工版設置工程と呼ぶ。覆工版設置工程は、仮接合工程に含めることができる。鋼管打設工程と仮接合工程とは、交互に繰り返され、道路全長分又は所定の道路の長さの分の複数の支持杭10a及び10bが建て終わるまで繰り返される。以上の工程をまとめて、支持杭立設工程と呼ぶ。
- [0060] 支持杭立設工程により、支持杭10a及び10bが建てられ、支持杭10a及び10aの杭頭12に上端格点部50aが仮固定された状態になったら、格点部50の内部に充填材80が注入される。この工程を注入固化工程と呼ぶ。なお、格点部50は、上端格点部50a及び中間格点部50bを総称したものである。注入固化工程は、道路全長分の仮組立状態の支持杭10a及び10bを立設した後に、全ての格点部50について実施すると良い。
- [0061] 型枠治具70を用いなくて道路構造100を設置する場合、道路に沿った第1方向に最初の支持杭10を建て、格点部50に注入された充填材80を

固化させた後に覆工版を支持杭 10 の上に設置する。これを覆工版設置工程と呼ぶ。そして、設置された覆工版の上に重機を載せ、次の支持杭 10 を建てる。このような工程の場合、支持杭 10 を建てるごとに充填材 80 の注入固化工程が必要となるため、工期が長くなってしまう。一方、道路構造 100 は、型枠治具 70 を用いることにより、充填材 80 の注入固化工程の回数を抑えることができるため、工期を短縮することができるという利点がある。

[0062] 道路構造 100 は、注入固化工程が完了した後に覆工版が撤去される。これを覆工版撤去工程と呼ぶ。覆工版撤去工程の後に、道路床版 99 が設置される。これを床版設置工程と呼ぶ。

[0063] 図 14 は、覆工版 399 の一例を示す側面図である。覆工版 399 は、鋼管杭打設工程と仮接合工程とを繰り返している際に仮組立てされた支持杭 10 の上に載置されるものである。図 14 に示される覆工版 399 は、仮設の杭頭ブロック 350a を備えている。そのため、道路構造 100 の上端格点部 50a を設置せずに杭頭ブロック 350a を杭頭 12 にはめ込み、覆工版 399 を設置できる様にしたものである。このような覆工版 399 を用いることにより、鋼管杭打設工程のみをまとめて実施することができるため、杭打機の拘束時間を短縮することができる。

[0064] (支持杭 10)

実施の形態 1 に係る支持杭 10 は、一本の鋼管から構成される場合と、2 本以上の鋼管を接合して構成される場合がある。図 1 に示されている支持杭 10a は、図中の三角形の記号で示された接合部 11 において、地盤 90 に打設された第 1 鋼管杭 20a の上方に鋼管支柱 30 を溶接により接合して形成されたものである。この場合、接合部 11 は、図 9 に示す中間格点部 50b を備えていても良い。なお、接合部 11 は、図 11 に示す中間格点部 150b を用いて第 1 鋼管杭 20a と鋼管支柱 30 とを接合する構造であっても良い。また、図 1 に示されている支持杭 10b は、第 2 鋼管杭 20b のみから構成されている。

- [0065] 図15は、比較例に係る道路構造1000の断面構造の説明図である。図15は、道路が延びる方向である第1方向に垂直な断面を示している。比較例に係る道路構造1000は、地盤90中に複数の鋼管杭1010pが打設され、鋼管杭1010pの地表付近の部分にフーチング1091が設置されている。そして、フーチング1091の上方に鋼管杭1010pと比較して外径の大きい鋼管で構成された支柱1010が立設されている。
- [0066] 比較例に係る道路構造1000の鋼管杭1010pは、一般にJIS A 5525に規定されている鋼管ぐいを使用されている場合が多い。鋼管杭1010pは、例えばSKK400又はSKK490により構成され、直径400～600mm、板厚9～19mmのものが使用されていることが多い。
- [0067] また、比較例に係る道路構造1000の支柱1010は、例えばプレス鋼材などを組み合わせて製作された鋼管柱であり、例えば直径3000mm以上のものが使用される。
- [0068] 比較例に係る鋼管杭1010pは、地盤90中にあり損傷を受けた場合に修復が困難であることから、一般的に大地震によって損傷を受けないように、地震による入力を受けた場合であっても材料の弾性変形範囲内となるように設計される。
- [0069] また、比較例に係る鋼管杭1010pの杭頭に形成されたフーチング1091は、立設される支柱1010の基礎となるとともに、水平方向の投影面積が大きいため、地震による入力に加わった場合でも周囲の地盤90に支持される。これにより、鋼管杭1010pは、大地震によっても損傷を受けない。
- [0070] 比較例に係る支柱1010は、外径の比較的大きい製作管により構成されており、これも大地震による入力に対し次のように設計されている。支柱1010については、大地震時（レベル2地震動）においては、降伏点を超えて、塑性変形を許容し、塑性変形によるエネルギー吸収を考慮した設計が行われる。そして、支柱1010に使用される鋼管部材については、道路橋示

方書（「道路橋示方書・同解説 Ⅱ 鋼橋・鋼部材編」、日本道路協会、2017年12月、p. 10-11）によって次の特性が要求されている。

（１）シャルピー吸収エネルギー：JIS Z 2242 ≥ 27 J

（ただし、鋼種SM400、SM490、SM490Y、SMA490で、鋼材の厚さが16mmを超え50mm以下の場合）

また、鋼道路橋設計便覧（「鋼道路橋設計便覧」、日本道路協会、2020年11月、p. 41-48）では、構造用鋼材について塑性化を考慮する場合には降伏比についても検討を要することが記されており、JIS G 3475 建築構造用炭素鋼鋼管では、溶接鋼管の場合は降伏比について次の特性が要求されている。

（２）降伏比＝降伏応力／引張強度 $\leq 85\%$

上記の（１）及び（２）の特性を満たすことにより、比較例に係る支柱1010は、降伏後も耐力の増加が見込まれて、地震力に対する粘りが発揮される。

[0071] 以上のような比較例に係る道路構造1000の場合、大地震による入力に対し損傷を抑えるように設計されているが、地盤90中に設置されるフーチング1091や、支柱1010のように大規模な構造が必要となり、例えば山の斜面に沿って設置される道路などに適用することが困難である。

[0072] 一方、実施の形態1に係る道路構造100の場合、地盤90に打設された鋼管杭20を地盤90から突出させ、その上に上端格点部50a又は鋼管支柱30を接合することにより、地盤90からの突出量を大きくしている。また、支持杭10a及び10bは、上端格点部50a及び中間格点部50bを使用して第1鋼管杭20a又は第2鋼管杭20bに対し上端格点部50a及び鋼管支柱30を偏心させることにより、上端格点部50aの位置精度を確保している。一般的に、地盤90からの突出量が多い場合、支持杭10a及び10bの杭頭12の位置精度は設計された位置に対し誤差を生じやすいが、実施の形態1に係る支持杭10a及び10bは、偏心接合構造を採用しているため、杭頭12及び上端格点部50aの位置精度も確保しやすい。

- [0073] また、支持杭10a及び10bは、比較例で地盤90中に設置されている鋼管杭1010pとJIS A 5525に規定されている鋼管ぐいと同じ材料を使用している。つまり、鋼管ぐいSKK材又は一般構造用鋼管STK材が使用されている。したがって、実施の形態1に係る支持杭10a及び10bは、地盤90中の強度に関しては、十分に確保されている。しかし、JIS A 5525に規定されている鋼管ぐいの材料は、降伏後の塑性変形したときの強度については何ら規定されておらず、地盤90から突出した部分の強度を確保できないことが想定される。
- [0074] そこで、実施の形態1に係る支持杭10a及び10bは、道路構造100において耐震性に適した鋼管により構成されている。具体的には、実施の形態1の道路構造100においては、下記に説明する溶接後熱処理された「ERW-T」を用いた支持杭10a及び10bが用いられる。
- [0075] 図16は、実施の形態1に係る支持杭10に用いられる鋼管について正負交番試験を実施した場合の履歴曲線である。図17は、正負交番試験の試験体の模式図である。実施の形態1に係る支持杭10に用いられる鋼管は、レベル2地震動を加えた正負交番試験を実施したときに得られる水平方向変位 δ 及び降伏時水平方向変位 δ_y と水平荷重 P_H との関係が、図16に示されるような安定した紡錘形状の履歴曲線により表される。
- [0076] 図17に示すように、支持杭10に用いられる鋼管についての試験体においては、下端部に示されている外管が上端格点部50a、内管が支持杭10、固定部が第1桁部材41又は第2桁部材40に相当する。なお、図16及び図17の試験体に用いた内管は、一般構造用鋼管STK400材で構成された電縫鋼管であり、母材の降伏強度は 395 N/mm^2 である。また、試験体の内管は、外径が 508 mm 、板厚が 19 mm のものをを用いた。
- [0077] 図16の履歴曲線を得た正負交番載荷試験においては、試験体の上端に一定の軸方向荷重 P_v を加えつつ、水平方向に正負交番載荷を加えた。なお、水平方向の正負交番載荷は、鋼管の公称降伏ひずみ時の水平方向変位を δ_y としたときに、水平方向変位 $\delta = \pm 5\delta_y$ を最大として試験体の内管の上端

に加えた。正負交番載荷の水平荷重 P_H は、正負交番載荷の 1 サイクルごとに増加させた。図 1 6 及び図 1 7 に示す試験において、水平荷重 P_H はレベル 2 地震動に相当する荷重を負荷している。レベル 2 地震動による最大荷重の計算値は $P_H = 482 \text{ kN}$ であり、このときの鋼管の水平方向変位 δ は、 $\delta / \delta_y = 2$ である。試験体の鋼管は降伏し、変位は降伏したときの変位の約 2 倍となっている。

[0078] 図 1 6 に示すように、レベル 2 地震動の最大荷重を超えて載荷した場合、 $\delta / \delta_y = 5$ まで安定した紡錘形の履歴曲線が得られている。 $\delta / \delta_y = 5$ の時点において試験体の鋼管には、座屈及び破断の発生などの急激な破壊は発生していなかった。すなわち、この試験体の鋼管を用いている支持杭 10 は、レベル 2 地震動を受けても、鋼管が塑性変形して地震エネルギーを安定的に吸収することにより、座屈及び破断などの破壊が発生しない。

[0079] (支持杭 10 を構成する鋼管の製造について)

図 1 8 は、実施の形態 1 に係る支持杭 10 に用いられる電縫鋼管の溶接工程の説明図である。実施の形態 1 に係る支持杭 10 は、電縫鋼管が用いられている。図 1 8 の左から右へ鋼板がロールで曲げられながら移動していく。P-P 断面では、鋼板が C 字形に曲げられ、Q-Q 断面では、曲げ板の端部同士が近接し、R-R 断面で端部が接触する。この過程で、鋼板の両端に設置された給電接触子の間に高周波電流を流すことにより、R-R 断面の接合部に電流を集中させる。接合部の表面層は、抵抗熱により急速に加熱することにより溶融し、S-S 断面でスクイズロールによって曲げ板の端部同士が加圧されて接合される。曲げ板の端部同士が加圧されてできた溶接部は、電縫鋼管の面外に突出したビードが形成されている。T-T 断面は、溶接部面外に突出したビードを切削除去する。

[0080] 一般には、この状態で鋼管材として製造が完了するが、実施の形態 1 に係る支持杭 10 に用いる電縫鋼管は、溶接部に後熱処理を行ったものを使用する。電縫鋼管の溶接部の熱処理方法については、例えば特開 2009-173995 号公報に記載された方法がある。この方法では、外面ビードを切削

除去するビード切断機の後工程において誘導加熱装置が設置されている。誘導加熱装置は、電縫鋼管の溶接部の外面側及び内面側にそれぞれ誘導コイルを複数スタンド配置したものであり、溶接部の外面側及び内面側を誘導加熱するものである。内面側の誘導コイル稼働条件は、内面温度がA c 3変態点を超えるまでの前段スタンドではフルパワーに、後続のスタンドでは、内面温度がキュリー点超の所定内面温度に保持されるように設定される。外面側の誘導コイル稼働条件は、外面温度がA c 3変態点を超えるスタンドまではゼロ超フルパワー未満のパワーに、それ以降のスタンドでは外面温度がキュリー点超の所定温度に保持されるように設定して、誘導加熱が行われる。上記の熱処理方法によれば、質量%で、0.05% C、0.2% Si、1.4% Mn系の熱延鋼帯（A c 3変態点：860°C）を用いて、外径600 mm、板厚19.1 mmの電縫鋼管に加工製造した材料について、シャルピー吸収エネルギーを向上できることが示されている。

[0081] 図19は、実施の形態1に係る支持杭10に用いられる電縫鋼管の溶接部の断面図である。図19は、熱処理された電縫鋼管の溶接部を示しており、下側が鋼管外面、上側が鋼管内面である。溶接線は矢印で示した部分である。内外面に▽及び△で示した部分は、溶接の熱影響部の境界を示す。溶接の熱影響部の境界線は、鋼管内外面において、溶接線から左右それぞれ約2 mmの位置から板厚中心に向かって狭くなるつづみ型の痕跡が確認できる。溶接後熱処理範囲は、熱処理中心位置から鋼管外面では左右にそれぞれ約20 mm、鋼管内面では約7 mmである。溶接線と熱処理中心付近は約4 mmずれている。ただし、溶接線と熱処理中心とのずれは、製造ラインのシーム検出装置の精度によるものであり、ずれが0の場合もあり得る。図に示されるように、溶接による熱影響部は、溶接後熱処理範囲内にあり、上記の熱処理方法によって、溶接による熱影響部が溶接後に熱処理できていることが分かる。

[0082] （支持杭10の強度）

実施の形態1に係る支持杭10は、上記の製造方法により製造された電縫

鋼管であり、特に溶接部を含めた各部の降伏比85%以下であり、シャルピー吸収エネルギーが27J以上に確保されたものである。支持杭10は、このように構成されることにより、レベル2地震動に対し、塑性変形して安定したエネルギー吸収ができる。

[0083] 図20は、強度試験用の試験片を採取した電縫鋼管の外径、板厚、成分の表である。試験片を採取する電縫鋼管は、図18に示す製造方法で製造され溶接後熱処理された「ERW-T」と、化学成分がほぼ同等で熱処理されていない「ERW-N」の2種類である。それぞれ、これらの電縫鋼管は、JIS規格（JIS A 5525）を満足している。

[0084] （引張試験の結果）

図21は、試験片を用いて引張試験を行って得られた公称応力と公称ひずみとの関係図である。図22は、試験片を用いて引張試験を行って得られた結果を示している。引張試験片は、電縫鋼管の断面において、溶接部を基準として、0°、22.5°、90°、180°の4カ所について、鋼管軸方向にJIS 12C号試験片を採取した。なお、図22においては、試験片の降伏応力 σ_y 、引張強さ σ_u 、降伏比 $YR = \sigma_y / \sigma_u$ の結果を示す。

[0085] 図21(a)に示されるように、溶接後熱処理されていないERW-Nの試験結果において、溶接部を含まない母材から採取した試験片である22.5°、90°、180°のそれぞれの曲線は、ほぼ同じ曲線である。しかし、溶接部を含む0°の位置から採取した試験片は、母材から採取した試験片に対して降伏点及び引張強度が明らかに大きい。これに対して、図21(b)のERW-Tの場合は、溶接部を含む0°の位置から採取した試験片と、母材である22.5°、90°、180°の位置から採取した試験片との曲線の差異は小さくなっている。

[0086] 図22に示されているように、溶接後熱処理されていないERW-Nの場合、溶接部である0°では降伏応力 σ_y 、引張強さ σ_u ともに母材部より大きな値となっており、降伏比 YR は0.94を示している。一方、溶接後熱処理されているERW-Tでは、溶接部である0°について、降伏応力 σ_y

及び引張強さ σ_u の値は母材のものとの差が小さく、降伏比 Y_R についても0.85となっている。このことから、支持杭10を構成する電縫鋼管の溶接部の熱処理を行うことにより、溶接部の溶接による硬化を改善し、降伏点や引張強度を母材部と同等にでき、溶接部の降伏比 Y_R を0.85以下に調整できる。

[0087] 図23は、試験片を用いて引張試験を行って得られたシャルピー試験の結果を示す図である。試験片を採取した電縫鋼管は、支持杭10に用いられる図18に示す製造方法で製造され溶接後熱処理された「ERW-T」と、化学成分がほぼ同等で熱処理されていない「ERW-N」の2種類である。シャルピー試験の試験片は、上記の製造方法で道路橋示方書11に規定されているJIS Z 2242のVノッチ試験片とし、管周方向に沿って採取した試験片と管軸方向に沿って採取した試験片とした。管周方向の試験片では、ノッチ位置の溶接線に対する距離が、0mm、1mm、3mmの3種類とした。管軸方向の試験片は、溶接線を含む管軸方向から採取した1種類である。合計4種類のそれぞれについて3つの試験片を用いてシャルピー試験を実施した。

[0088] 図23においては、横軸を円周方向における溶接線の位置からの距離とし、距離による吸収エネルギーの分布を示している。熱処理を行っていないERW-Nについてみると、管周方向に沿って採取された試験片については、溶接線上で吸収エネルギーが小さく、シャルピー吸収エネルギーが27Jより小さな値となっている。一方で、熱処理を行ったERW-Tの場合は、管周方向に沿って採取された試験片、管軸方向に沿って採取された試験片ともにシャルピー吸収エネルギーが27Jより大きな値をとっている。

[0089] 道路橋示方書では、橋脚に用いられる材料であるSM490B、適用板厚 $6\text{mm} \leq t \leq 40\text{mm}$ においては、シャルピー吸収エネルギーが27J以上と規定されている。これに対し、図23に示す結果によれば、実施の形態1に係る支持杭10を構成するSKK材を用いた電縫鋼管は、上記に説明した製造方法及び溶接部の熱処理を行うことにより、シャルピー吸収エネルギー

を27 J以上にできる。したがって、実施の形態1に係る支持杭10は、JIS A 5525に規定された鋼管ぐい用のSKK材を用いつつ、大地震時の衝撃的な荷重に対して、橋脚として十分なエネルギー吸収能を発揮できる。

[0090] (上端格点部及び中間格点部の変形例)

実施の形態1に係る道路構造100の上端格点部50a及び中間格点部150bの変形例について説明する。以下において説明する上端格点部550a、250a、中間格点部550b、250bは、上記に説明した道路構造100の上端格点部50a及び中間格点部150bと置換が可能である。

[0091] 図24は、実施の形態1に係る道路構造100の上端格点部550a周辺の断面構造の説明図である。図24(b)は、図24(a)のE-E部の断面を示している。図25は、実施の形態1に係る道路構造100の上端格点部550aの上面図及び側面図である。図25に示すように、上端格点部550aと支持杭10とは、偏心接合部材560aにより接合される。偏心接合部材560aは、上端格点部550aの一部であり、支持杭10の杭頭12と組み合わせ、杭頭12に対する上端格点部550aの位置を調整するためのものである。即ち、上端格点部550aは、偏心接合部材560aにより、支持杭10と中心軸の位置がずれた状態で支持杭10に接合することができる。なお、上端格点部550aに用いられる偏心接合部材560aと中間格点部550bに用いられる偏心接合部材560bとを総称して、偏心接合部材560と総称する場合がある。

[0092] 偏心接合部材560aは、円柱形状の差し込み部材61と差し込み部材61の外周面に接合され放射状に延びるリブ部材62とを有する。差し込み部材61とリブ部材62とは、上端格点部550aを構成する筒体である鋼管部材51aの内側に配置されており、下部が鋼管部材51aの下端から下方に突出している。

[0093] 図26は、図25(b)のF-F部の断面図である。上端格点部550aの鋼管部材51aに接合されている下部プレート59は、鋼管部材51aの

内部から差し込み部材 6 1 が突出する開口部 5 9 a を備える。開口部 5 9 a は、差し込み部材 6 1 が挿通される程度に開口されている。リブ部材 6 2 は、鋼管部材 5 1 a の内部に配置されている内部リブ部材 6 2 b と、下部プレート 5 9 の下方に接合されている外部リブ部材 6 2 a と、からなる。すなわち、リブ部材 6 2 は、鋼管部材 5 1 a の内部と鋼管部材 5 1 a の外部とにそれぞれ接合されている。なお、外部リブ部材 6 2 a と内部リブ部材 6 2 b とは、差し込み部材 6 1 の強度及び剛性によって設置されていなくともよい。

[0094] 差し込み部材 6 1 及び内部リブ部材 6 2 b の上端は、上端格点部 5 5 0 a の上面 5 7 a を構成する上部プレート 5 8 に溶接により固定されている。また、内部リブ部材 6 2 b の下端は、下部プレート 5 9 に溶接により接合されている。内部リブ部材 6 2 b は、差し込み部材 6 1 の外周面にも接合されており、上部プレート 5 8、下部プレート 5 9 及び差し込み部材 6 1 を連結し、強度及び剛性を確保するものである。

[0095] 外部リブ部材 6 2 a は、下部プレート 5 9 の下方に配置され、下部プレート 5 9 の下面に接合されており、差し込み部材 6 1 の外周面にも接合されている。外部リブ部材 6 2 a は、下部プレート 5 9 と差し込み部材 6 1 とを連結し、強度及び剛性を確保するものである。

[0096] 図 2 5 に示されるように、上端格点部 5 0 a の上部に接合されている上部プレート 5 8 は、板状の部材を貫通する充填孔 5 6 a が 2 か所開口されている。充填孔 5 6 a は、差し込み部材 6 1 を挟んで対称な位置に設けられている。また、図 2 6 に示されるように、下部プレート 5 9 も上部プレート 5 8 と同様に充填孔 5 6 a が 2 か所設けられている。充填孔 5 6 a は、差し込み部材 6 1 と杭頭 1 2 との間に形成された空間に充填材 8 0 を注入するための孔である。つまり、上端格点部 5 0 a が杭頭 1 2 の上方に載置された状態において、充填孔 5 6 a は、外部と鋼管部材 5 1 a の内部の空間と差し込み部材 6 1 及び杭頭 1 2 との間に形成される空間とを連通する。例えば、外部からコンクリート又はモルタル等の充填材を注入するにあたり、注入パイプ（図示なし）を上部プレート 5 8 の充填孔 5 6 a から内部に挿入し、下部プレ

ート５９の充填孔５６ａに充填材を注入する。充填材８０は、上端格点部５０ａの一部である偏心接合部材５６０ａが差し込まれた杭頭１２の内部に充填され固化することにより、上端格点部５０ａと杭頭１２とを接合する。

[0097] 図２４に示されるように、杭頭１２は、先端が開口されており、内部の空間に充填材受け板１６が設置されている。充填材受け板１６は、杭頭１２の内部に差し込まれた差し込み部材６１の下端よりも下方に配置されている。充填材受け板１６は、充填孔５６ａから注入された充填材８０を支持し、杭頭１２の内部に充填材を保持するための部材である。

[0098] 杭頭１２は、端面１４が上端格点部５０ａの下部プレート５９の下面に当接する。つまり、上端格点部５０ａは、支持杭１０の端面１４に載置されている。これにより、上端格点部５５０ａは、高さ方向の位置が決まる。そして、上端格点部５０ａは、偏心接合部材５６０ａと杭頭１２の内面との隙間の分だけ水平方向にずらすことが可能である。これにより、支持杭１０の中心軸の位置がずれた場合であっても、上端格点部５０ａを設計通りの位置に配置することが可能となる。

[0099] 図２６に示されるように、差し込み部材６１は、円筒形状の鋼管である。ただし、差し込み部材６１は、円筒形状の鋼管に限定されるものではなく、断面が矩形状、楕円形状、長円形状又は多角形状の鋼管であってもよい。差し込み部材６１は、図２６において紙面上下方向及び左右方向の強度及び剛性が等しいものが望ましい。実施の形態１に係る道路構造１００は、差し込み部材６１が円筒形状であり、全方向に強度及び剛性が等しい。道路構造１００に必要とされる強度及び剛性に応じて差し込み部材６１は適宜形状を変更することができる。

[0100] 差し込み部材６１は、下端が板材６４で塞がれていても良い。板材６４は、円筒形状の鋼管で構成された差し込み部材６１の内部に充填材８０が侵入するのを防ぐことにより、上端格点部５０ａと支持杭１０との接合に必要な充填材８０の量を抑制することができる。また、板材６４の外形は、差し込み部材６１の断面形状よりも大きく形成され、差し込み部材６１の外周面よ

りも突出することにより、充填材 8 0 が固化した後に差し込み部材 6 1 が杭頭 1 2 から引き抜かれる方向についての強度が高くなる。

- [0101] 上記の差し込み部材 6 1 を用いた偏心接合部材 5 6 0 a は、中間格点部 5 5 0 b にも応用することができる。
- [0102] 図 2 7 は、実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の中間格点部 5 5 0 b 周辺の断面構造の説明図である。中間格点部 5 5 0 b は、上端格点部 5 5 0 a と同様に偏心接合部材 5 6 0 b を備える。偏心接合部材 5 6 0 b は、上部プレート 5 8 及び下部プレート 5 9 の両方から突出するように設けられた差し込み部材 6 1 と、差し込み部材 6 1 と上部プレート 5 8 及び下部プレート 5 9 とを接合するリブ部材 6 2 と、を備える。差し込み部材 6 1 は、リブ部材 6 2 により上部プレート 5 8 及び下部プレート 5 9 と接合されている。
- [0103] 差し込み部材 6 1 は、鋼管部材 5 1 b の内側に配置されており、上部プレート 5 8 及び下部プレート 5 9 を貫通するように配置されている。なお、差し込み部材 6 1 は、上部プレート 5 8 及び下部プレート 5 9 と直接接合されていても良い。
- [0104] また、差し込み部材 6 1 は、図 2 7 に示されるような上下に貫通する構成でなくともよく、上部プレート 5 8 の上面及び下部プレート 5 9 の下面にそれぞれ接合されて、上部プレート 5 8 の上面及び下部プレート 5 9 の下面のそれぞれから上下に延びるように構成されていても良い。
- [0105] 中間格点部 5 5 0 b の上方に延びる差し込み部材 6 1 は、上方部材である鋼管支柱 3 0 に挿入される。中間格点部 5 5 0 b の下方に延びる差し込み部材 6 1 は、下方部材である第 1 鋼管杭 2 0 a に挿入される。中間格点部 5 5 0 b から上下方向に延びる差し込み部材 6 1 は、それぞれ鋼管支柱 3 0 又は第 1 鋼管杭 2 0 a との間に差し込まれた状態で充填材 8 0 が充填されて、鋼管支柱 3 0、中間格点部 5 5 0 b 及び第 1 鋼管杭 2 0 a を接合する。中間格点部 5 5 0 b の偏心接合部材 5 6 0 b は、上端格点部 5 5 0 a と同様に下方部材である第 1 鋼管杭 2 0 a の中心軸と中間格点部 5 5 0 b の中心軸とをずらした状態で接合できる。また、偏心接合部材 5 6 0 b は、中間格点部 5 5

0 b の中心軸と鋼管支柱 3 0 の中心軸とをずらした状態で接合できる。

[0106] また、鋼管支柱 3 0 及び第 1 鋼管杭 2 0 a には、それぞれ充填孔 1 7 が設けられており、ここから充填材 8 0 が充填される。充填材 8 0 は、固化することにより、中間格点部 5 5 0 b と鋼管支柱 3 0 及び第 1 鋼管杭 2 0 a とを接合する。

[0107] なお、図 2 7 の G-G 部に示される、実施の形態 1 に係る中間格点部 5 5 0 b の鋼管部材 5 1 b の部分の断面構造は、図 2 6 と同様な構造である。ただし、G-G 部で示される断面においては、充填孔 5 6 a は設けられていなくても良い。

[0108] 次に、実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の上端格点部 5 0 a 及び中間格点部 1 5 0 b の別の変形例について説明する。

[0109] 図 2 8 は、実施の形態 1 に係る道路構造 1 0 0 の上端格点部 5 0 a の変形例である上端格点部 2 5 0 a 周辺の断面構造の説明図である。図 2 9 は、図 2 8 の上端格点部 2 5 0 a の上面図である。上端格点部 2 5 0 a は、鋼管部材 2 5 1 a と縦桁 4 1 a を接続する縦桁仕口 5 2 a と横桁 4 1 b を接続する横桁仕口 5 3 a とを備え、上面 5 7 a が平坦になっている。

[0110] 支持杭 1 0 の杭頭 1 2 の端面 1 4 には偏心接合部材 2 6 0 が接合されている。偏心接合部材 2 6 0 は、下端面が支持杭 1 0 の杭頭 1 2 に接合され、上端面が板部材 2 6 1 により形成されている。板部材 2 6 1 は、上面 2 6 2 が平坦になっており、上端格点部 2 5 0 a の鋼管部材 2 5 1 a の下端面 2 5 4 a を載置できる様に構成されている。板部材 2 6 1 は、上面 2 6 2 が鋼管部材 2 5 1 a の下端面 2 5 4 a よりも大きく形成されている。したがって、上端格点部 2 5 0 a の鋼管部材 2 5 1 a は、偏心接合部材 2 6 0 の上面 2 6 2 上において水平方向にずらして載置することができる。つまり、支持杭 1 0 と上端格点部 2 5 0 a とは、偏心接合部材 2 6 0 を用いて互いに中心軸を偏心させた状態で接合することができる。なお、変形例である偏心接合部材 2 6 0 を第 3 偏心接合部材 2 6 0 と呼ぶ場合がある。また、上面 2 6 2 を接合面と呼ぶ場合がある。

[0111] 図30は、実施の形態1に係る道路構造100の中間格点部150bの変形例である中間格点部250b周辺の構造の側面図及び上面図である。偏心接合部材260は、中間格点部250bと第1鋼管杭20aとの接合に用いても良い。道路構造100は、中間格点部250bの鋼管部材251bが第1鋼管杭20aと同じ断面形状になっている。中間格点部250bは、鋼管部材251bと縦桁仕口52bと横桁仕口53bとから構成されている。変形例においては、中間格点部250bは、実施の形態1における鋼管支柱30と一体化されていても良い。このように構成されることにより、偏心接合部材260を用いて接合して形成された支持杭10aに桁部材40を設置することができる。

[0112] <道路構造100の変形例>

次に、実施の形態1に係る道路構造100の変形例について説明する。

[0113] 図31は、実施の形態1に係る道路構造100の変形例の断面構造の説明図である。図2～図4に示されている様に、実施の形態1の道路構造100は、道路が延びる第1方向に交差する第2方向に2本の支持杭10が並列されているが、2本以上の支持杭10が並列されていても良い。また、道路構造100は、上端格点部50aと中間格点部50bとの間、又は2つの中間格点部50bの間を連結し、横桁41bに対し傾斜している斜め梁48を備えていても良い。斜め梁48は、支持杭10及び横桁41b又は横桁40bにより構成される矩形の構造の対角に位置する2つの格点部50を連結するものである。道路構造100は、斜め梁48によるトラス構造によって架構の変形が抑止され、部材応力が低減できる。さらには、斜め梁48は、第2方向に並んで設置されている斜め梁48a及び48bを含む。斜め梁48aは、道路構造100が設置される地盤90の山側に設置されており、斜め梁48bは、谷側に設置されている。山側に位置する斜め梁48aは、斜面に沿った方向に傾斜されていることが望ましい。また、図28においては、谷側の斜め梁48bは、山側の斜め梁48aと対称的な向きに傾斜しているが、同じ方向に傾斜させても良い。

[0114] 上端格点部50aと横桁41bは、予め一体に製作されており、格点桁となっても良い。また、中間格点部50bと横桁40bとは、予め一体に製作されており、格点桁となっている。これにより、格点部50は、個別に測量心出し設置する手間が省け、省力化、工程短縮が図れる。中間格点部50bも横桁40bと一体に製造されており、同様な効果をもつ。また、格点部50は斜材によって互いに接合されており、斜め梁48によるトラス構造によって架構の変形が抑止され、部材応力が低減できる。

[0115] また、実施の形態1においては、人工地盤構造物の一例として支持杭10の上端にのみ道路床版99を設けた道路構造100について説明したが、道路床版99は、支持杭10の軸方向において1層のみに限定されるものではなく、複数層の床版を有していても良い。例えば、支持杭10の中間部に道路床版99又はその他の用途に用いられる床版を設けても良い。この場合、中間格点部50b、150b、250b又は550bの上に道路床版99又はその他の用途に用いられる床版が設置される。複数の床版は、一部を道路床版99として使用し、その他を付帯設備を設置するための床版として使用される場合がある。

[0116] (実施の形態1に係る道路構造100の効果)

実施の形態1に係る道路構造100は、道路が延びる第1方向及び第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭10と、支持杭10のそれぞれの上端に設置された上端格点部50aと、隣り合う2つの上端格点部50aを接続する第1桁部材41と、上端格点部50a及び第1桁部材41の上方に設置される道路床版99と、を備える。支持杭10は、レベル2地震動を受けたときの水平方向変位と水平荷重との履歴曲線が紡錘形状となるものである。このように構成されることにより、道路構造100は、地盤90からの突出長さが多大な支持杭10においても、杭頭12の位置が調整でき、また、杭頭12に接合される上端格点部50aの位置及び第1桁部材41の位置の調整ができる。つまり、道路構造100を構成する鋼管杭20、鋼管支柱30、及び上端格点部50aのうち、下方に位置する下方部

材と下方部材の上方に接合される上方部材との中心軸を誤差の分だけずらし、位置調整ができる。そのため、支持杭10を地盤90に立設するにあたり、上端格点部50aの位置の精度を容易に確保できる。また、道路構造100は、地盤90からの突出量が長大な支持杭10を備えるが、支持杭10がレベル2地震動を受けた場合であっても塑性変形により安定してエネルギーを吸収できる様に構成されているため、耐震性に優れる。

[0117] また、実施の形態1に係る道路構造100によれば、支持杭10は、熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が85%以下であり、シャルピー吸収エネルギーが27J以上である。このように構成されることにより、支持杭10は、電縫鋼管で構成でき、かつエネルギー吸収性能が確保されている。

[0118] また、実施の形態1に係る道路構造100によれば、支持杭10は、鋼管製造時の溶接ビード切断の後工程において鋼管の内面又は外面に誘導コイルを設置した誘導加熱装置を用いて熱処理されている。そのため、支持杭10は、溶接後熱処理を加えた電縫鋼管で構成されるため、溶接部も他の母材部分と同等の性能を備え、エネルギー吸収性能が確保されている。

[0119] また、実施の形態1に係る道路構造100によれば、支持杭10は、鋼管ぐいSKK材又は一般構造用鋼管STK材を使用したものである。このように構成されることにより、道路構造100の支持杭10は、地盤90中における強度が従来どおり確保され、かつ地盤から突出した部分の耐震性も確保される。

[0120] 実施の形態2.

実施の形態2においては、実施の形態1に係る道路構造100などの人工地盤構造物の支持杭10上における中間格点部50b、150bの配置の詳細及び支持杭10の突出量の設定について説明する。実施の形態2に係る道路構造100の各部については、各図面において同一の機能を有するものは実施の形態1の説明で使用了図面と同一の符号を付して表示するものとする。

[0121] 図32は、実施の形態2に係る道路構造100の一例を示す模式図である。図32は、道路構造100をx方向から見た模式図を示している。道路構造100は、図32のK部に示すように、地盤90の表面94から突出した部分の長さhが異なる2つの支持杭10の上端同士が第1桁部材41により接続されている構造を有する。また、道路構造100は、図32のL部に示すように、2つの支持杭10の上端同士が第1桁部材41により接続され、一方の支持杭10の中間部に中間格点部50bが設けられている構造を有する。さらに、道路構造100は、図32のM部に示すように、2つの支持杭10の上端同士が第1桁部材41により接続され、かつ2つの支持杭10の中間部にそれぞれ設けられた中間格点部50b同士が第2桁部材40により接続されている構造を有する。なお、中間格点部50bは、中間格点部150b、250b又は550bで置換することもできる。また、中間格点部50bは、偏心接合部材60、260を用いていない格点部50であっても良い。

[0122] 道路構造100は、複数の支持杭10を備える。道路構造100が例えば山間部などの斜面や起伏がある地盤90に設置される場合、複数の支持杭10は、それぞれ地盤90からの突出する長さhが異なる場合がある。道路構造100が例えばレベル2地震動を受けた場合、地盤90の表面94から上に出ている部分は、水平方向（x方向及びy方向）に変位する。x方向又はy方向において隣り合う支持杭10に着目した場合、支持杭10に生じる曲げモーメントM及び応力 σ は、地盤90から突出する長さh及び中間部が第2桁部材40で接続されているか否かにより変わる。道路構造100は、支持杭10が塑性変形することにより地震動によるエネルギーを吸収し、耐震性を向上させるものである。したがって、隣り合って配置される2つの支持杭10は、一方の支持杭10に発生する応力が過大にならないように設定されるのが望ましい。

[0123] なお、図32においては、道路構造100が延伸するy方向に並んだ複数の支持杭10が示されているが、実際にはx方向（図32において紙面垂直

方向)にも支持杭10が並列されており、隣り合って配置される2つの支持杭10は、y方向だけでなくx方向に並列された2つ支持杭10を含むものである。

[0124] 道路構造100は支持杭10が第1桁部材41及び第2桁部材40により接続された構造であり、支持杭10は、地盤90の表面94と交差する部分である支点98、上端格点部50a及び中間格点部50b、150bを固定端とする両端固定梁としてモデル化することが可能である。以下において、道路構造100を構成する各支持杭10に発生する水平方向変位 δ 及び応力 σ について説明する。

[0125] 図33は、図32のK部の拡大図である。K部は、2つの支持杭10が上端で第1桁部材41により接続されている。そのため、地震動により道路床版99が水平方向に δ だけ変位したときに、一方の支持杭10の上端における変位 δ_1 と他方の支持杭10の上端における変位 δ_2 とは同じになる($\delta_1 = \delta_2$)。なお、図33中に示す破線は、地盤90からの各高さにおける支持杭10の水平方向変位 δ を示している。

[0126] 図33において、短い方の支持杭10を結節点間部材10Aと呼び、長い方の支持杭10を結節点間部材10Bと呼ぶ。一方の結節点間部材10Aの地盤90からの突出長さを h_1 とし、他方の結節点間部材10Bの地盤90からの突出長さを h_2 としたときに、 $h_1 < h_2$ となっている。道路床版99が所定の水平方向変位 δ を受けたときに、支持杭10に発生する応力 σ は、固定端となる上端格点部50a及び支点98において最大値となる。ここで、軸が鉛直方向に延びる両端固定梁に発生する曲げモーメント、水平方向変位及び発生応力の各計算式は、下記のように表される。

$$M = P \cdot h / 2 \quad \dots (1)$$

$$\delta = P \cdot h^3 / (12 E \cdot I) \quad \dots (2)$$

$$\sigma = M / Z \quad \dots (3)$$

ここで、M：曲げモーメント、P：水平方向荷重、h：結節点間部材長さ、 δ ：水平方向変位、E：ヤング率、I：断面二次モーメント、 σ ：結節点間

部材に発生する最大応力、 Z ：断面係数、である。

[0127] 上記の式(1)～(3)を基に、水平方向変位 δ は以下の式で表される。

$$\delta = 2M/h \times h^3 / (12E \cdot l) = \sigma Z h^2 / (6E \cdot l) \quad \dots (4)$$

[0128] また、図33の結節点間部材10Aに発生する応力 σ_1 （以下、最大応力を単に応力称する場合がある）と結節点間部材10Bに発生する応力 σ_2 との関係は、上記式(4)より次式(5)で表される。ただし、結節点間部材10A及び10Bは、材質及び断面形状が同じであり、ヤング率 E 、断面二次モーメント I 、断面係数 Z 、降伏応力 σ_y が同じである。また、図33に示すように $h_2 \geq h_1$ とし、結節点間部材10A及び10Bのそれぞれの水平方向変位 δ は等しく、 $\delta = \delta_1 = \delta_2$ で表され、これと上記式(4)とから、以下の式(5)が導かれる。

$$\sigma_2 / \sigma_1 = (h_1 / h_2)^2 \quad \dots (5)$$

つまり、図33の構造においては、突出長さが短い結節点間部材10Aは、長い方の結節点間部材10Bよりも発生する応力の最大値が大きくなる。

[0129] 図34は、図32のうち中間格点部50b又は150bを備える支持杭10aの拡大図である。図34を用いて、支持杭10に中間格点部50b又は150bを設けた場合（2層の場合）の結節点間部材10C及び10Dのそれぞれに発生する σ_3 及び σ_4 の関係について説明する。支持杭10aは、支点98、中間格点部50b及び上端格点部50aが固定端としてモデル化できる。支点98から中間格点部50bまでを結節点間部材10Cとし、中間格点部50bから上端格点部50aまでを結節点間部材10Dとし、結節点間部材10Cの長さを h_3 とし、結節点間部材10Dの長さを h_4 とし、 $h_3 < h_4$ となっている。なお、中間格点部50bが支持杭10の上端又は下端にある場合は、図33の支持杭10と同様に中間格点部50bが無い支持杭10と同じになる。

[0130] 道路床版99が所定の水平方向変位 δ を受けたときに、支持杭10の結節点間部材10C及び10Dに発生する応力 σ は、固定端となる上端格点部5

0 a、中間格点部 5 0 b 及び支点 9 8 において最大値となる。また、道路床版 9 9 の水平方向変位が δ であったとすると、結節点間部材 1 0 C の水平方向変位 $\delta 3$ と結節点間部材 1 0 D の水平方向変位 $\delta 4$ との関係は、 $\delta = \delta 3 + \delta 4$ で表される。

[0131] 上記の式 (4) を基に、図 3 4 に示された支持杭 1 0 a の結節点間部材 1 0 C に発生する応力 $\sigma 3$ 及び結節点間部材 1 0 D に発生する応力 $\sigma 4$ との関係は、次式で表される。

$$\sigma 4 / \sigma 3 = h 4 / h 3 \quad \cdots (6)$$

つまり、図 3 4 の構造においては、長さの短い結節点間部材 1 0 C のほうが長い方の結節点間部材 1 0 D よりも発生する応力の最大値が小さい。

[0132] また、図 3 4 において中間格点部 5 0 b が支持杭 1 0 a の中央にある場合、つまり $h 3 = h 4 = h / 2$ である場合を考える。このとき、結節点間部材 1 0 C 及び 1 0 D のそれぞれの水平方向変位は、 $\delta 3 = \delta 4 = \delta / 2$ であり、結節点間部材 1 0 C 及び 1 0 D のそれぞれに発生する応力 $\sigma 3$ 及び $\sigma 4$ は、 $\sigma 3 = \sigma 4$ である。従って、上記式 (4) より、

$$\delta = 2 \sigma 3 \cdot Z \times (h / 2)^2 / (6 E \cdot I) \quad \cdots (7)$$

と表される。

[0133] 一方、図 3 4 において支持杭 1 0 a の中間格点部 5 0 b が無い場合 (1 層の場合) を想定する。このとき、支持杭 1 0 a の水平方向変位 δ は、次のように表される。

$$\delta = \sigma \cdot Z \times h^2 / (6 E \cdot I) \quad \cdots (8)$$

[0134] 支持杭 1 0 a が 1 層の場合及び 2 層の場合であっても、上記式 (7) 及び式 (8) の水平方向変位 δ は等しいから、上記式 (7) 及び式 (8) から、 $\sigma 3 = 2 \cdot \sigma$ となる。つまり、支持杭 1 0 a の中央に中間格点部 5 0 b を設けた場合 (2 層の場合)、結節点間部材 1 0 C 及び 1 0 D に生ずる応力 $\sigma 3$ 及び $\sigma 4$ は、中間格点部 5 0 b が設けられていない場合 (1 層の場合) の 2 倍になることを意味する。このことは図 3 3 において、結節点間部材 1 0 A が塑性域にあり (降伏している)、結節点間部材 1 0 B が降伏しない場合で

あっても、結節点間部材 10B に中間格点部 50b を配置し 2 つの結節点間部材 10C 及び 10D を形成することにより、結節点間部材 10C 又は 10D に発生する応力を増加させて降伏させることが可能であることを意味している。この原理を利用して、支持杭 10 の突出量 h が極めて大きくなった場合において、中間格点部 50b 又は 150b を設置し 2 層構造とすることによって、基準となる 1 層の支持杭 10 と 2 層の支持杭 10 との両方が塑性域にあるように構成して、隣り合う 2 本の支持杭 10 の双方の塑性エネルギー吸収能を発揮させ、耐震性を向上させることが可能である。

[0135] 図 34 に示されているように中間格点部 50b を備える支持杭 10 の場合においても、結節点間部材 10C の長さ h_3 及び結節点間部材 10D の長さ h_4 が同じように設定されれば、結節点間部材 10C と結節点間部材 10D とが同時に塑性変形領域にあるため、より高いエネルギー吸収能力を発揮できる。

[0136] 道路構造 100 は、地震動を受けた際に一部の結節点間部材 10A ~ 10D に応力が集中しないようにするのが望ましく、より多くの結節点間部材 10A ~ 10D がエネルギー吸収能を発揮することにより、優れた耐震性能を発揮する。

[0137] 図 35 は、図 32 の L 部の拡大図である。道路構造 100 は、設置される環境と道路床版 99 の高さによって、支持杭 10 の地盤 90 の表面 94 からの突出長さが決まるものであり、例えば図 33 に示す 2 つの結節点間部材 10A 及び 10B の長さ h_1 、 h_2 の差が大きくなってしまう場合が考えられる。しかし、このような場合であっても、図 33 に示す長い方の支持杭 10 に中間格点部 50b を設置し、図 34 に示す支持杭 10a と同じ構造にすることにより、図 35 に示されている短い方の支持杭 10 (結節点間部材 10A) に生じる応力 σ_1 と長い方の支持杭 10a の結節点間部材 10C 及び 10D に生じる応力 σ_3 及び σ_4 とを近い値に調節できる。

[0138] 図 36 は、図 32 の M 部の拡大図である。道路構造 100 の 2 つの支持杭 10 に着目したときに、2 つの支持杭 10 の地盤 90 からの突出量が大きい

場合には、2つの支持杭10の両方に中間格点部50bを設置し、互いに中間格点部50b同士を接続しても良い。この場合、各支持杭10における中間格点部50bの位置を調整することにより、各支持杭10が備える結節点間部材10Ca、10Da、10Cb及び10Dbに発生する応力 $\sigma 3a$ 、 $\sigma 4a$ 、 $\sigma 3b$ 及び $\sigma 4b$ の値を近い値に調整できる。

[0139] 図37は、図33、図34、図35及び図36の各結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbの水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。図37(a)は、例えば図33の結節点間部材10Aの長さ $h1$ と結節点間部材10Bの長さ $h2$ との差が比較的大きい場合の図であり、図37(b)は、図33の結節点間部材10Aの長さ $h1$ と結節点間部材10Bの長さ $h2$ との差が比較的小さい場合の図である。なお、図37において、水平方向変位 δ と応力 σ との関係は比例するように表示されているが、これは説明のために簡略化したものである。図37の水平方向変位 δ と応力 σ との関係は、図34、35及び図36に示されている2本の支持杭10が有する複数の結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbに当てはまるものである。実施の形態2に係る道路構造100は、隣り合う2本の支持杭10が有する結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbを図37(b)に示される関係になるように設定するものである。

[0140] 図33に示されている2本の支持杭10を一例として、図37の水平方向変位 δ と応力 σ との関係について説明する。図37(a)において、 $\sigma 1$ で示されている線は、結節点間部材10Aの水平方向変位 δ に対する発生する応力 $\sigma 1$ の最大値の変化を示しており、 $\sigma 2$ で示されている線は、結節点間部材10Bの水平方向変位 δ に対する発生する応力 $\sigma 2$ の最大値の変化を示している。また、図37(a)は、結節点間部材10Aと結節点間部材10Bとの長さの差が比較的大きい場合を示している。結節点間部材10A及び結節点間部材10Bは、0から降伏応力 σy までは弾性変形し、降伏応力 σ

yから極限応力 σ_u までは塑性変形する。図33に示されている構造は、道路床版99が地震動によって水平荷重 P_H を受けて、水平方向に δ だけ変位したとき、結節点間部材10Aの応力 σ_1 は結節点間部材10Bの応力 σ_2 より大きくなる。水平方向変位 δ が増加すると、結節点間部材10Aは降伏応力 σ_y を超えて塑性化し、極限応力 σ_u に達すると耐力の限界となる。

[0141] このとき、結節点間部材10Bはまだ降伏応力 σ_y に達していない。このような場合、塑性変形によるエネルギー吸収は結節点間部材10Aに限定され、道路構造100の水平方向変位 δ を抑制する効果が少ない。すなわち、結節点間部材10Aに応力が集中して、この結節点間部材10Aの局所的な耐力限界により、道路構造100の耐震性が低く抑制される。つまり、結節点間部材10Aは、結節点間部材10Bよりも小さい水平方向変位 δ で降伏及び破断し、結節点間部材10Bがエネルギー吸収をする前に道路構造100が破損に至る。

[0142] 図37(b)は、結節点間部材10Aと結節点間部材10Bとの長さの差が比較的小さい場合を示している。図33に示されている構造は、道路床版99が地震動によって水平荷重 P_H を受けて、水平方向に δ だけ変位したとき、結節点間部材10Aの応力 σ_1 は結節点間部材10Bの応力 σ_2 より大きくなる。しかし、結節点間部材10Aの長さ h_1 と結節点間部材10Bの長さ h_2 との差が小さい場合は、地震動による水平方向変位 δ の増加によって、結節点間部材10Aの応力 σ_1 及び結節点間部材10Bの応力 σ_2 は同じように増加する。

[0143] 結節点間部材10Aが降伏後も変位が増加し、結節点間部材10Aは限界耐力に達する。結節点間部材10Bは、結節点間部材10Aにやや遅れて降伏し、塑性化する。図37(b)に示すように、結節点間部材10A及び結節点間部材10Bは、塑性変形領域が重なり合っており、範囲Wにおいてともに降伏点を超えて塑性化しエネルギー吸収効果を発揮する。これにより、図37(a)に示すように結節点間部材10Aと結節点間部材10Bとの長さの差が大きい場合においては、短い結節点間部材10Aに応力が集中して

いたのが、図37(b)に示すように結節点間部材10Aと結節点間部材10Bとの長さの差が小さい場合においては、短い結節点間部材10Aへの応力集中は緩和され、2つの結節点間部材10A及び10Bの両方が塑性変形によるエネルギー吸収能を発揮する。したがって、図33に示す構造は、塑性変形が進んだ後も結節点間部材10Aの限界耐力に到達せず、高い耐震性能を発揮する。

[0144] <図32の道路構造100のK部における支持杭10の長さ設定について>

例えば、図33に示される2本の支持杭10からなる構造の場合、短い方の支持杭10（結節点間部材10A）が降伏応力 σ_y に達したときの水平方向変位（降伏変位） δ_{1y} とする。このとき長い方の支持杭10（結節点間部材10B）の応力は、上記式（5）より、次のように表される。

$$\sigma_2 = \sigma_y (h_1 / h_2)^2 \quad \dots (9)$$

このとき、結節点間部材10Bの水平方向変位は、結節点間部材10Aと同じく δ_{1y} である。よって、結節点間部材10Bが降伏応力 σ_y に達したときの結節点間部材10Bの水平方向変位である降伏変位 δ_{2y} は、上記式（5）及び式（9）並びに図37に示されている σ_2 の弾性領域での比例関係より、次のように表される。

$$\delta_{2y} = \delta_{1y} \times \sigma_y / \sigma_2 = \delta_{1y} \times (h_2 / h_1)^2 \quad \dots (10)$$

[0145] 図33に示される2本の支持杭10からなる構造において、長い方の支持杭10（結節点間部材10B）の降伏変位 δ_{2y} が、短い方の支持杭10（結節点間部材10A）の降伏変位 δ_{1y} 以上で、短い方の支持杭10の限界水平方向変位（限界耐力における水平方向変位）以下であれば、少なくとも2本の支持杭10は塑性変形領域が重なる（図37(b)に示されている範囲Wが確保できる）。言い換えると、長い方の支持杭10（結節点間部材10B）の降伏変位 δ_{2y} は、次の範囲にある場合に2本の支持杭10の塑性変形領域が重なる。

$$\delta 1 y \leq \delta 2 y \leq 5 \cdot \delta 1 y \quad \cdots (11)$$

この式(11)と上記式(5)より、2本の支持杭10の突出量 $h1$ 及び $h2$ の関係は、 $1 \leq (h2/h1)^2 \leq 5$ となり、 $1 \leq h2/h1 \leq 2.23$ と表される。つまり、図33に示されている2本の支持杭10のそれぞれの突出量 $h1$ 及び $h2$ を上記の範囲に設定することにより、少なくとも2本の支持杭10は塑性変形領域が重なる。

[0146] なお、限界耐力は、降伏後にさらに結節点間部材を塑性変形させたときに、結節点間部材の応力が低下する限界の応力をいう。例えば、結節点間部材は、地震等の振動により繰り返し荷重を受けたときに、降伏点を超えて塑性変形を繰り返すと変位の増加とともに応力が上昇するが、所定の変位を超えると応力が低下する。このような点を限界耐力とする。限界耐力は、例えば材質の引張応力であるが、これに限定されるものではない。ここで、上記式(11)の最大値である $5 \cdot \delta 1 y$ は、結節点間部材が地震時の繰り返し荷重を受けたときの限界水平方向変位として設定されたものである。例えば、上記においては、図16に示されている実験結果を基に、降伏変位 $\delta 1 y$ の5倍を限界耐力における水平方向変位として設定している。ただし、限界水平方向変位は、結節点間部材の材質、断面形状及び長さによって異なる場合がある。

[0147] また、長い方の支持杭10（結節点間部材10B）の降伏変位 $\delta 2 y$ は、次の範囲にある場合に2本の支持杭10の塑性変形領域が重なる範囲 W を $2 \cdot \delta 1 y$ 以上の幅で確保できるため、十分な耐震性能を発揮できる。

$$\delta 1 y \leq \delta 2 y \leq 3 \cdot \delta 1 y \quad \cdots (12)$$

この式(12)と上記式(5)より、2本の支持杭10の突出量 $h1$ 及び $h2$ の関係は、 $1 \leq (h2/h1)^2 \leq 3$ となり、つまり、 $1 \leq h2/h1 \leq 1.73$ と表される。

[0148] <図32の道路構造100のL部における支持杭10aの中間格点部50bの位置について>

次に、図35に示されるように、2本の支持杭10のうち長い方の支持杭

10a のみに中間格点部 50b が設けられている構造について、長い方の支持杭 10 の突出量 h の条件を求める。図 33 のように 1 層の支持杭 10 を連結した構造が前述の $1 \leq h_2 / h_1 \leq 2$ 、23 又は $1 \leq h_2 / h_1 \leq 1.7$ の条件に入らない場合などには、長い方の支持杭 10 に中間格点部 50b が設けられる。中間格点部 50b は、隣接する支持杭 10 と連結されており、桁部材 40 の軸直角方向の回転が拘束されている。そのため、中間格点部 50b の上下の結節点間部材 10C 及び 10D は、両端固定梁としてモデル化できる。図 35 に示される支持杭 10a は、突出量 $h = h_3 + h_4$ 、 $h_3 \geq h_4$ とする。 h_3 は、地盤側の結節点間部材 10C の長さであり、 h_4 は、上端側の結節点間部材 10D の長さである。

[0149] 結節点間部材 10C の水平方向変位 δ_3 及び結節点間部材 10D の水平方向変位 δ_4 は、上記式 (4) から、それぞれ次のように表される。

$$\delta_3 = \sigma_3 \cdot Z \cdot h_3^2 / (6E \cdot I) \quad \dots (13a)$$

$$\delta_4 = \sigma_4 \cdot Z \cdot h_4^2 / (6E \cdot I) \quad \dots (13b)$$

また、上記式 (6) より、結節点間部材 10D の応力 σ_4 は、結節点間部材 10C の応力 σ_3 、結節点間部材 10C 及び 10D の長さ h_3 及び h_4 を用いて次のように表される。

$$\sigma_4 = \sigma_3 \cdot (h_4 / h_3) \quad \dots (14)$$

[0150] よって、支持杭 10a の水平方向変位 δ は、上記の式 (13a) ~ (14) より、

$$\delta = \delta_3 + \delta_4 = Z / (6E \cdot I) \times \{ \sigma_3 \cdot h_3^2 + \sigma_3 (h_4 / h_3) \cdot h_4^2 \}$$

$$= \sigma_3 \cdot Z / (6E \cdot I) \times (h_3^2 + h_4^3 / h_3) \quad \dots (15)$$

ここで $h_4 = h - h_3$ であるから、

$$\delta = \sigma_3 \cdot Z / (6E \cdot I) \times h^2 \{ h / h_3 - 3 + 3 (h_3 / h) \}$$

$$= \sigma_3 \cdot Z / (6E \cdot I) \times h^2 \times G \quad \dots (16)$$

と表される。ここで、

$$G = h / h_3 - 3 + 3 (h_3 / h) \quad \dots (16a)$$

である。

- [0151] 一方、2本の支持杭10のうち短い方の支持杭10（結節点間部材10A）の水平方向変位は、式（4）から、 $\delta = \sigma_1 \cdot Z \cdot h_1^2 / (6E \cdot I)$ と表されるから、これと式（16）より、

$$\sigma_3 \cdot Z / (6E \cdot I) \times h^2 \times G = \sigma_1 \cdot Z \cdot h_1^2 / (6E \cdot I) \quad \dots (16b)$$

であり、支持杭10aの応力の高い方の結節点間部材10Cの応力 σ_3 と短い支持杭10の応力 σ_1 との関係は次のように表される。

$$\sigma_3 / \sigma_1 = h_1^2 / (G \cdot h^2) \quad \dots (17)$$

- [0152] 上記式（17）によれば、図35に示されている短い方の支持杭10（結節点間部材10A）が、降伏応力 σ_y に達したときに（ $\sigma_1 = \sigma_y$ ）、Gが小さいほど、長い支持杭10の結節点間部材10Cの応力 σ_3 が大きくなり、長い支持杭10は降伏しやすくなる。逆に、Gが大きくなるほど長い支持杭10は降伏しにくい。

- [0153] 図38は、図35に示される2本の支持杭10において、長い方の支持杭10aの突出量hに対する地盤側の結節点間部材10Cの長さh3の比と式（16）及び式（17）のGの値との関係を示すグラフである。上述したように、Gの値は小さいほど結節点間部材10Cは塑性変形しやすく、Gの値が最小値周辺となるように、結節点間部材10Cの長さを設定すれば、2つの支持杭10の両方が塑性変形によるエネルギー吸収能を発揮しやすくなる。図38によれば、 $0.5 \leq h_3 / h \leq 0.75$ の範囲において、 $0.464 \leq G \leq 0.583$ となっている。

- [0154] 上記の支持杭10aの下端側の結節点間部材10Cの長さh3とGとの関係は、上端側の結節点間部材10Dにおいても同様に成立する。つまり、 $0.5 \leq h_4 / h \leq 0.75$ （このとき、 $0.25 \leq h_3 / h \leq 0.5$ となる）において、 $G = h / h_4 - 3 + 3(h_4 / h)$ で表され、Gの取る値の範囲は、 $0.464 \leq G \leq 0.583$ となる。この場合は、結節点間部材10Dのほうが結節点間部材10Cよりも塑性変形しやすくなる。

[0155] 以上より、図35において、長い方の支持杭10aの結節点間部材10Cの長さ h_3 は、 $0.25 \leq h_3/h \leq 0.75$ に設定できる。支持杭10aの突出量 h が大きく、もう一方の短い支持杭10（結節点間部材10A）よりも後に長い支持杭10aが降伏するとした場合、上記の条件の基で、結節点間部材10Cは、最も降伏しにくい条件である $G=0.583$ で降伏するように、2本の支持杭10の材質及び断面形状を設定しておけば、中間格点部50bの位置が仮に $0.25 \leq h_3/h \leq 0.75$ の範囲内で変動しても、2本の支持杭10は、少なくとも結節点間部材10A及び結節点間部材10Cの塑性変形領域が重なり、図37（b）に示す範囲Wにおいてエネルギー吸収性能を発揮できる。

[0156] 上記の場合とは逆に、長い方の支持杭10aが先に降伏して、後から短い支持杭10が降伏する場合がある。この場合は、長い方の支持杭10aが最も降伏し易い条件である $G=0.464$ の条件において、短い方の支持杭10（結節点間部材10A）が降伏する条件を設計すればよい。すると、長い方の支持杭10aの中間格点部50bの位置が $0.25 \leq h_3/h \leq 0.75$ の範囲内で変動しても、短い支持杭10の降伏条件は、安全側に設定できる。つまり、2本の支持杭10は、 $0.25 \leq h_3/h \leq 0.75$ の条件のもとで $G=0.464$ として検討し、塑性変形領域が重なるように設計されると良い。

[0157] <図32の道路構造100のL部における支持杭10の長さ h_1 について>

次に、図35に示されるように、2本の支持杭10のうち長い方の支持杭10aのみに中間格点部50bが設けられている構造について、短い方の支持杭10（結節点間部材10A）の突出量 h_1 の条件を求める。図35示される支持杭10aは、突出量 $h = h_3 + h_4$ 、 $h_3 \geq h_4$ とする。 h_3 は、地盤側の結節点間部材10Cの長さであり、 h_4 は、上端側の結節点間部材10Dの長さである。

[0158] 短い方の支持杭10（結節点間部材10A）が降伏応力 σ_y に達したとき

の降伏変位を $\delta 1 y$ とすると、長い方の支持杭 10 a の結節点間部材 10 C の応力は、上記式 (17) から次のように表される。

$$\sigma 3 = \sigma y \{ h 1^2 / (G \cdot h^2) \} = \sigma y (h 1 / h)^2 / G \quad \dots (18)$$

これより、結節点間部材 10 C が降伏したときの支持杭 10 a の変位 $\delta 3 y$ は、比例関係より、次のように表される。

$$\begin{aligned} \delta 3 y &= \delta 1 y \times \sigma y / \sigma 3 = \delta 1 y \times \sigma y / \{ \sigma y (h 1 / h)^2 / G \} \\ &= \delta 1 y \times (h / h 1)^2 \times G \quad \dots (19) \end{aligned}$$

[0159] 図 35 に示される 2 本の支持杭 10 からなる構造において、長い方の支持杭 10 a (結節点間部材 10 C) の降伏変位 $\delta 3 y$ が、短い方の支持杭 10 (結節点間部材 10 A) の降伏変位 $\delta 1 y$ 以上で、短い方の支持杭 10 の限界水平方向変位 (限界耐力における水平方向変位) 以下であれば、少なくとも 2 本の支持杭 10 は塑性領域が重なる (図 37 (b) に示されている範囲 W が確保できる)。言い換えると、長い方の支持杭 10 a (結節点間部材 10 C) の降伏変位 $\delta 3 y$ は、次の範囲にある場合に 2 本の支持杭 10 の塑性領域が重なる。

$$\delta 1 y \leq \delta 3 y \leq 5 \cdot \delta 1 y \quad \dots (20)$$

この式 (20) と上記式 (19) より、2 本の支持杭 10 の突出量 $h 1$ 及び h の関係は、 $1 \leq (h / h 1)^2 \times G \leq 5$ 、すなわち、

$$1 / G \leq (h / h 1)^2 \leq 5 / G \quad \dots (21)$$

となる。ここで、図 38 より求められた、望ましい結節点間部材 10 C の長さ $h 3$ の範囲である、 $0.25 \leq h 3 / h \leq 0.75$ において、結節点間部材 10 C が最も塑性変形しにくい G の値である、 $G = 0.583$ を上記式 (21) に代入すると、

$$1.31 \leq h / h 1 \leq 2.92 \quad \dots (22)$$

と表される。

[0160] また、長い方の支持杭 10 a の結節点間部材 10 C の降伏変位 $\delta 3 y$ は、次の範囲にある場合に 2 本の支持杭 10 の塑性領域が重なる範囲 W が $2 \cdot \delta$

1 y 以上になり、十分な耐震性能を発揮できる。

$$\delta 1 y \leq \delta 3 y \leq 3 \cdot \delta 1 y \quad \cdots (23)$$

この式 (23) と上記式 (19) より、

$$1/G \leq (h/h1)^2 \leq 3/G \quad \cdots (24)$$

であり、ここから2本の支持杭10のうち短い方の支持杭10の突出量 h1 と長い方の支持杭10aの突出量 h との関係は、

$$1.31 \leq h/h1 \leq 2.26 \quad \cdots (24a)$$

となる。

[0161] 図39は、2本の支持杭10の結節点間部材10A及び結節点間部材10Cの水平方向変位 δ と応力 σ との関係を示す図である。図39の線Aは、短い方の支持杭10（結節点間部材10A）の水平方向変位 δ と応力 σ との関係を示しており、線Bは長い方の支持杭10aの結節点間部材10Cの水平方向変位 δ と応力 σ との関係を示している。線Bに示されているように、降伏変位を $\delta 3 y \leq 3 \cdot \delta 1 y$ に設定する、すなわち長さ h 及び h1 の関係を $1.31 \leq h/h1 \leq 2.26$ に設定することにより、結節点間部材10A及び10Cの両方が塑性変形する範囲 W が $2 \cdot \delta 1 y$ の範囲で確保できる。

[0162] 図33の構造において、例えばレベル2地震動などの所定の入力があった場合、2つの結節点間部材10A及び10Bは両者とも塑性変形するように設定されると良い。例えば図35の構造において、レベル2地震動などの所定の入力があった場合、2つの支持杭10が備える複数の結節点間部材10A、10C及び10Dのうち、少なくとも2つの結節点間部材が塑性変形するように設定されると良い。また、図36に構造においても支持杭10が備える複数の結節点間部材10Ca、10Da、10Cb及び10Dbのうち、少なくとも2つの結節点間部材が塑性変形するように設定されると良い。

[0163] また、図33、図34、図35及び図36に示す構造において、1つの結節点間部材が塑性変形するように設定された場合であっても、その他の降伏していない結節点間部材は、既に塑性変形領域にある1つの結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように設定されると良い。

- [0164] なお、隣り合う2つの支持杭10の複数の結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbのうち、所定の水平方向入力があった場合において塑性変形している結節点間部材を第1結節点間部材と呼び、第1結節点間部材が塑性変形しているときに未だ降伏していない結節点間部材を第2結節点間部材と呼ぶ場合がある。
- [0165] 道路構造100は、複数の支持杭10を備えており、複数の支持杭10から2つの隣り合う支持杭10を取り出すと、図32のK部、L部、M部の何れかの構造になっている。支持杭10の支点98、中間格点部50b、上端格点部50aのうち隣り合う何れか2つの間の部分を結節点間部材と定義したときに、2つの支持杭10は、少なくとも2つの結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbから構成されている。これらの複数の結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbは、例えばレベル2地震動が加わったときに少なくとも2つが塑性変形領域にあるように設定されると良い。さらには、塑性変形領域にある2つの結節点間部材以外の結節点間部材（降伏していない結節点間部材）は、すでに塑性変形領域にある2つの結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように設定されると良い。
- [0166] さらに望ましくは、3つ以上の複数の結節点間部材10A、10B、10C、10D、10Ca、10Da、10Cb及び10Dbが塑性変形領域にあるように設定されると良い。さらには、同時に塑性変形領域にある複数の結節点間部材以外の結節点間部材（降伏していない結節点間部材）は、すでに塑性変形領域にある複数の結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように設定されると良い。
- [0167] <道路構造100全体の基準となる支持杭10の設定について>
上記の説明において、図35に示す2本の支持杭10のうち、長い方の支持杭10aの中間格点部50bの位置を $0.25 \leq h_3 / h \leq 0.75$ の範囲に設定することが望ましいとしたが、支持杭10aのうち下方の結節点間部材10Cは、上方の結節点間部材10Dよりも長くすると、さらに望まし

い。道路構造 100 の場合、地震などによる損傷が道路床版 99 を支える上部の桁部材 41 付近で発生しない方が良い。これは、損傷や変形が道路構造 100 の下部で発生しても、上部の道路床版 99 や桁部材 41 が健全であれば、緊急時の車両等を通行させることが可能であるからである。このことを考慮すると、図 35 に示す支持杭 10a のように 2 層構造の支持杭 10 では、塑性化する結節点間部材は下方の結節点間部材 10C に限定しておいて、上方の結節点間部材 10D において損傷及び変形が生じないようにすることが望ましい。つまり、図 35 に示す構造において、支持杭 10a の長さ h に対する結節点間部材 10C の長さ h_3 は、 $0.5 \leq h_3 / h \leq 0.75$ とするのがより望ましい。言い換えると、支持杭 10a の長さを h としたときに、支点 98 から中間格点部 50b までの長さは、 $0.5h$ 以上 $0.75h$ 以下とするのがより望ましい。

[0168] さらに、 $0.5 < h_3 / h \leq 0.667$ に設定することにより、図 38 のグラフにおいて、 G の取る値の範囲は、 $0.464 \leq G \leq 0.5$ となる。よって、支持杭 10a における中間格点部 50b による応力低減効果が向上し、長い方の支持杭 10a が短い方の支持杭 10 に対して遅れて降伏する場合において、支持杭 10a の突出量 h の範囲をより広く取ることができる。つまり、上記式 (23) において、 $G = 0.5$ を代入すると、 $1.31 \leq h / h_1 \leq 2.45$ となり、支持杭 10a の長さ h の取れる範囲が広がる。

[0169] 上記の説明においては、2 本の支持杭 10 がともに 1 層である場合（図 33 を参照）は、突出長が長い方の支持杭 10 が短い方の支持杭 10 の長さの 1.73 倍を超えると、短い方の支持杭 10 が降伏した後、限界変位に達するまでに、長い方の支持杭 10 が降伏してともに塑性エネルギー吸収性能を発揮できる範囲 W が $2\delta_1 y$ よりも小さくなり、十分な塑性エネルギー吸収性能を発揮できない。また、突出長が長い方の支持杭 10 が短い方の支持杭 10 の長さの 2.23 倍を超えると、短い方の支持杭 10 が降伏した後、限界変位に達するまでに、長い方の支持杭 10 が降伏せず塑性エネルギー吸収性能が発揮できない。さらに、支持杭 10 の突出量が $7m$ より低い場合は、

たわみ性が極度に小さくなり、特別に降伏点が高い材質を用いるか、又は板厚を厚くするなどの対応が必要になり、支持杭10の塑性エネルギー吸収性能を期待することが困難である。よって、道路構造100の全体の耐震性を検討する場合に、基準とする支持杭10の突出量 h_0 を、次のように設定する。なお、基準とする支持杭10を基準杭と称する場合がある。

(条件1) 突出量 h_0 は、7 m以上である1層の支持杭10のうち最も突出量が小さいものの突出量とする。

[0170] 上記(条件1)より、基準となる支持杭10を設定し、これと比較する支持杭10の突出量を h とすると、比較する支持杭10の h と基準となる支持杭10の突出量 h_0 の関係は、上記式(11)から、下記式(25)のように設定すると良い。なお、比較する支持杭10を比較杭と称する場合がある。

$$1 \leq h/h_0 \leq 1.73 \quad \dots (25)$$

また、比較する支持杭10が2層の場合には、比較する支持杭10の突出量を h とし、中間格点部50bの地盤90からの高さを h_t とすると、比較する支持杭10の突出量 h と基準となる支持杭10の突出量 h_0 の関係は、式(24)より、下記のように設定すると良い。ただし、比較する支持杭10の中間格点部50bの位置である h_t の範囲は、 $0.25h \leq h_t \leq 0.75h$ であることを前提とする。

$$1.31 \leq h/h_0 \leq 2.26 \quad \dots (26)$$

基準となる支持杭10(基準杭)に対し、上記の式(25)及び式(26)の範囲となるように比較する支持杭10(比較杭)を設定することにより、基準杭と上記式(25)又は式(26)の範囲に設定された比較杭は、塑性変形領域が重なる。

[0171] 上記の条件は、基準となる支持杭10の突出量 h_0 が、比較する支持杭10の突出量 h よりも短い場合を前提としているが、次に基準となる支持杭10のほうが比較する支持杭10よりも短い場合について説明する。

[0172] 比較する支持杭10が1層の場合であって、比較する支持杭10が基準と

なる支持杭10よりも長い場合は、比較する支持杭10の h と基準となる支持杭10の突出量 h_0 の関係は、上記式(25)の h と h_0 とを入れ替え、 $1 \leq h_0/h \leq 1.73$ より、以下のように設定すると良い。

$$0.58 \leq h/h_0 \leq 1 \quad \dots (27)$$

そして、上記式(25)及び式(27)の2つの条件を組み合わせ、比較する支持杭10の h と基準となる支持杭10の突出量 h_0 の関係は、次のように表される。

$$0.58 \leq h/h_0 \leq 1.73 \quad \dots (28)$$

[0173] 比較する支持杭10が2層の場合であって、比較する支持杭10が基準となる支持杭10よりも長い場合は、比較する支持杭10の h と基準となる支持杭10の突出量 h_0 の関係は、次のように表される。

$$0.86 \leq h/h_0 \leq 2.26 \quad \dots (29)$$

なお、上記の式(29)は、以下のように求められる。

[0174] 図40は、図32のL部の拡大図であり、図35に対し支持杭10aを短く変更した場合の図である。図41は、図40の長い方の支持杭10と短い方の支持杭10aの水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。図40及び図41を用いて、上記の式(29)の導出について説明する。図40のように2層の支持杭10aの突出量 h が1層の支持杭10の突出量 h_1 よりも短い場合、1層の支持杭10の応力 σ_1 は、上記式(17)より次のように表される。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_y \cdot (G \cdot h^2 / h_1^2) \\ &= \sigma_y \cdot (h/h_1)^2 \cdot G \quad \dots (30) \end{aligned}$$

[0175] よって、長い方の1層の支持杭10が降伏応力 σ_y に達したときの水平方向変位である降伏変位 δ_{1y} は、比例関係より、次のように求められる。

$$\begin{aligned} \delta_{1y} &= \delta_{3y} \cdot \sigma_y / \sigma_1 \\ &= \delta_{3y} \cdot \sigma_y / (\sigma_y \cdot (h/h_1)^2 \cdot G) \\ &= \delta_{3y} \cdot (h_1/h)^2 / G \quad \dots (31) \end{aligned}$$

[0176] 図40に示される2本の支持杭10及び10aにおいて、長い方の1層の

支持杭 10 の降伏変位 $\delta 1 y$ が次の範囲であれば、支持杭 10 及び 10 a は、両方とも塑性変形しており、エネルギー吸収性能を発揮している。

$$\delta 3 y \leq \delta 1 y \leq 5 \cdot \delta 3 y \quad \dots (32)$$

これに式 (31) を代入すると、

$$G \leq (h 1 / h)^2 \leq 5 G \quad \dots (33)$$

となる。

[0177] ここで、図 38 より求められた、望ましい結節点間部材 10 C の長さ $h 3$ の範囲である $0.25 \leq h 3 / h \leq 0.75$ において、 G が小さいほど上記式 (30) の $\sigma 1$ が小さくなる。ここで、図 40 の長い方の 1 層の支持杭 10 が降伏しにくい条件とするため、 $G = 0.464$ を選択し、上記式 (33) に代入すると、長い方の 1 層の支持杭 10 (結節点間部材 10 A) の長さ $h 1$ と 2 層の支持杭 10 a の突出量 h との関係は、 $0.681 \leq h 1 / h \leq 1.523$ より、

$$0.66 \leq h / h 1 \leq 1.46 \quad \dots (34)$$

となる。

[0178] また、長い方の 1 層の支持杭 10 の結節点間部材 10 A の降伏変位 $\delta 1 y$ は、次の範囲にある場合に 2 本の支持杭 10、10 a の塑性領域が重なる範囲 W が $2 \cdot \delta 3 y$ 以上になり、十分な耐震性能を発揮できる。

$$\delta 3 y \leq \delta 1 y \leq 3 \cdot \delta 3 y \quad \dots (35)$$

この式 (35) と上記式 (31) より、

$$G \leq (h 1 / h)^2 \leq 3 G \quad \dots (36)$$

であり、図 40 の長い方の 1 層の支持杭 10 が降伏しにくい条件とするため、 $G = 0.464$ を式 (36) に代入し、長い方の 1 層の支持杭 10 (結節点間部材 10 A) の長さ $h 1$ と 2 層の支持杭 10 a の突出量 h との関係は、 $0.681 \leq h 1 / h \leq 1.17$ より、

$$0.86 \leq h / h 1 \leq 1.46 \quad \dots (37)$$

となる。

[0179] 一方、図 35 のように支持杭 10 a の方が長い場合は、2 本の支持杭 10

のうち短い方の支持杭 10 の突出量 h_1 と長い方の支持杭 10 a の突出量 h との関係は、上記式 (24a) と同様に、

$$1.31 \leq h/h_1 \leq 2.26 \quad \dots \quad (38)$$

となる。よって、比較する支持杭 10 が 2 層の場合において、比較する支持杭 10 の h と基準となる支持杭 10 の突出量 h_0 の関係は、式 (37) 及び式 (38) の条件を併せて、上記式 (29) に示したように $0.86 \leq h/h_0 \leq 2.26$ となる。

- [0180] 上記の式 (28) 及び式 (29) の条件は、道路構造 100 の基準となる支持杭 10 (基準杭と呼ぶ) 及び比較する支持杭 10 (比較杭) が両方とも塑性変形領域が重なるようになるための条件であるが、必ずしも基準杭よりも長い比較杭と基準杭よりも短い比較杭との塑性変形領域が重なるわけではない。つまり、比較杭同士の間で、図 41 において示されている範囲 w_1 が必ずしも存在する訳ではない。しかし、複数の支持杭 10 の塑性変形領域の差を少なくし、複数の支持杭 10 の塑性化の性状を近いものにし、結節点間部材の長さも考慮して限界変位の設定を適切に設定することによって、基準杭よりも長い比較杭及び基準杭よりも短い比較杭の塑性エネルギー吸収性能を発揮する範囲が重なるように設定することも可能である。したがって、比較杭が上記の式 (28) 及び式 (29) の条件に適合しているかを評価することは、道路構造 100 の全体的な耐震性を評価する指標として利用できる。

- [0181] <支持杭 10 の材質及び断面係数 Z の設定>

道路構造 100 の支持杭 10 は、材質及び断面係数によって強度にばらつきがでる。例えば、支持杭 10 の材質が SKK400 の場合、降伏応力は 235 N/mm^2 であるが、SKK490 の場合、降伏応力は 325 N/mm^2 である。つまり、支持杭 10 の材質が SKK490 の場合は、SKK400 の場合に対し降伏応力が 1.38 倍大きくなる。

- [0182] また、支持杭 10 の外径が 500 mm の場合、板厚が 9 mm、12 mm、14 mm になると、それぞれ断面係数が $167 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 、 219×10^{-5}

m^3 、 $2.53 \times 10^{-5} \text{m}^3$ となる。なお、支持杭10の外径は、400mm～600mmの範囲に設定することができる。

[0183] 図42は、基準杭及び比較杭の材質の降伏応力が同じ場合と異なる場合の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。図42において実線は、基準杭の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を示している。一点鎖線及び破線は、比較杭の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を示している。破線は、比較杭の降伏応力が基準杭の降伏応力と同じ σ_y の場合であり、このとき降伏変位は基準杭の降伏変位 δ_0 の3倍である。このとき基準杭は、限界変位 $5 \cdot \delta_0$ に対し余裕を持った状態であり、基準杭と比較杭とは $2 \cdot \delta_0$ の幅で塑性変形領域が重なっており、ともに塑性エネルギー吸収性能を発揮できる状態になっている。

[0184] これに対して、図42において一点鎖線で示されるように、比較杭の降伏応力が大きく、 σ_c である場合を考える。このとき、比較杭は降伏しにくくなる。基準杭が限界変位 $5 \cdot \delta$ に達する前に降伏して、ともに塑性変形領域が重なるようになる条件は、基準杭の降伏応力を σ_{0y} としたときに、比較杭の弾性域の比例関係より、 $\sigma_{0y} \leq \sigma_c < 5/3 \cdot \sigma_{0y}$ 、すなわち

$$\sigma_{0y} \leq \sigma_c < 1.66 \cdot \sigma_{0y} \quad \cdots (39)$$

である。

[0185] よって、比較杭の降伏応力が基準杭の降伏応力の1.66倍未満であれば、基準杭と比較杭は塑性変形領域が重なり、ともに塑性エネルギー吸収性能を発揮する。例えば、一般に使用される杭の材質は、SKK400 ($\sigma_y = 235 \text{N/mm}^2$) 及びSKK490 ($\sigma_y = 325 \text{N/mm}^2$) 等である。SKK490の降伏応力は、SKK400の1.38倍であるため、比較杭の材質がSKK490で基準杭の材質がSKK400であっても、比較杭の降伏応力 σ_y は、上記式(39)の条件の範囲に十分入っているので、両材質とも支持杭10として適用可能である。

[0186] 図43は、基準杭及び比較杭の外径が異なる場合の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を模式的に表したものである。図43において実線は、基準杭の

水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を示している。一点鎖線及び破線は、比較杭の水平方向変位 δ 及び応力 σ の関係を示している。破線で示されている比較杭の降伏変位は基準杭の降伏変位 δ_0 の3倍である。このとき基準杭は、限界変位 $5 \cdot \delta_0$ に対し余裕を持った状態であり、基準杭と比較杭とは $2 \cdot \delta_0$ の幅で塑性変形領域が重なっており、ともに塑性エネルギー吸収性能を発揮できる状態になっている。

[0187] 破線で示されている比較杭に対し、外径又は杭を構成する板厚が異なる場合を検討する。外径が d であり、内径が d_1 の円筒形の鋼管杭である場合、

水平方向変位：上記式 (8) より $\delta = \sigma \cdot Z \times h^2 / (6 E \cdot I)$

断面係数：

$$Z = 0.0982 \times (d^4 - d_1^4) / d \quad \dots (40)$$

断面2次モーメント：

$$I = 0.0491 \times (d^4 - d_1^4) \quad \dots (41)$$

であるから、

$$\delta = \sigma \cdot h^2 / (6 E \cdot d) \times 2 \quad \dots (42)$$

と表される。つまり、比較杭は、外径 d と応力 σ が比例し、外径 d が小さくなると応力 σ も小さくなる。比較杭の外径が小さくなった場合は、比較杭が降伏しにくくなるが、比較杭の外径と基準杭の外径との比の逆数が 1.66 倍以下であれば、比較杭の降伏変位 δ_c は、基準杭の降伏変位 δ_0 の3倍～5倍の範囲内にある。例えば、基準杭の外径 D_0 が 600 mm であり、比較杭の外径 D が 400 mm の場合は、 $D_0 / D = 600 / 400 = 1.5 \leq 1.66$ となり、基準杭と比較杭とは $2 \cdot \delta_0$ の幅で塑性変形領域が重なっており、ともに塑性エネルギー吸収性能を発揮できる状態になっている。

[0188] <道路構造100の支持杭10の条件のまとめ>

(1) 道路構造100は、地盤90からの突出量が最も大きい支持杭10の突出量 h_{max} 、最も突出量が小さい支持杭10の突出量 h_{min} としたときに、 $h_{max} \geq 2 \times h_{min}$ である複数の支持杭10によって構成されている。

(2) 基準杭の選定

基準杭は、中間格点部50b又は150bを有さない支持杭10であり、突出量 h_0 が7m以上である支持杭10のうち最も突出量が小さいものとする。

(3) 比較杭の条件1

基準杭に対し比較対象となる支持杭10を比較杭と称し、比較杭が中間格点部50bを有さない1層構造である場合は、比較杭の突出量 h は、

$$1 \leq h / h_0 \leq 1.73$$

を満たす。また、比較杭が中間格点部50bを有する2層構造である場合は、地盤90から中間格点部50bまでの高さを h_t としたときに、 $0.25h \leq h_t \leq 0.75h$ であることを条件に、比較杭の突出量 h は、

$$1.31 \leq h / h_0 \leq 2.26$$

を満たす。

なお、比較杭が基準杭よりも遅れて降伏する場合と早く降伏する場合の両方を考慮すると、比較杭が1層構造である場合は、比較杭の突出量 h は、

$$0.58 \leq h / h_0 \leq 1.73$$

を満たし、比較杭が2層構造である場合は、

$$0.86 \leq h / h_0 \leq 2.26$$

を満たす。

(4) 比較杭の条件2

基準杭の降伏応力を σ_0 、比較杭の降伏応力を σ_x 、基準杭の外径を D_0 、比較杭の外径を D_x 、 $K_1 = \sigma_x / \sigma_0$ 、 $K_2 = D_0 / D_x$ としたときに

$$1 \leq K_1 \times K_2 \leq 1.66$$

を満たす。また、なお、比較杭が基準杭よりも遅れて降伏する場合と早く降伏する場合の両方を考慮する場合は、

$$0.6 \leq K_1 \times K_2 \leq 1.66$$

を満たす。

(5) 道路構造100を構成する複数の支持杭10について、上記(1)～

(4) の条件が満たされている支持杭 10 が、その全数のうち 1 / 3 以上、又は 1 / 2 以上含まれていることが望ましい。つまり、道路構造 100 を構成する複数の支持杭 10 について、全てが上記 (1) ~ (4) の条件を満たしていなくとも良い。

[0189] (実施の形態 2 の道路構造 100 の効果)

図 44 は、実施の形態 2 に係る道路構造 100 の説明図である。図 44 の道路構造 100 は、道路延伸方向である y 方向 (紙面左右方向) に支持杭 10 が並べられているだけでなく、紙面奥側を山側、手前側を谷側とし、山側と谷側に支持杭 10 が 2 列に並べられている。道路構造 100 は、道路延伸方向に並んでいる複数の支持杭 10 の突出量がそれぞれ異なっているだけでなく、斜面方向 (x 方向) に並んでいる支持杭 10 も斜面の傾斜に応じて突出量が異なっている。図 44 の地盤 90 の表面 94 は、複数の線により表されているが、点線が最も谷側に位置する支持杭 10 が打設されている地盤 90 の表面 94 を示しており、実線が山側に位置する支持杭 10 が打設されている地盤 90 の表面 94 を示している。図 44 の支持杭 10 は、左側から順に No. 1 ~ No. 11 まで番号を振っている。

[0190] [表1]

No.	突出量 (m)			比較杭 / 基準杭		適用範囲		判定	
	谷側杭	山側杭	基準杭	谷側杭	山側杭	最小	最大	谷側杭	山側杭
1	2.1	1.6	7.3	0.29	0.22	1	1.73	×	×
2	7.3	2.9	7.3	1.00	0.40	1	1.73	○	×
3	12.0	8.7	7.3	1.64	1.19	1.31	2.26	○	×
4	15.1	10.4	7.3	2.07	1.42	1.31	2.26	○	○
5	14.6	6.4	7.3	2.00	0.88	1.31	2.26	○	×
6	12.1	8.8	7.3	1.66	1.21	1.31	2.26	○	×
7	13.8	7.8	7.3	1.89	1.07	1.31	2.26	○	×
8	13.0	8.9	7.3	1.78	1.22	1.31	2.26	○	×
9	12.3	5.7	7.3	1.68	0.78	1.31	2.26	○	×
10	9.4	6.3	7.3	1.29	0.86	1	1.73	○	×
11	10.2	4.1	7.3	1.40	0.56	1	1.73	○	×

[0191] 表 1 は、図 44 の複数の支持杭 10 の仕様とそれが上記の条件に当てはま

っているかについての判定が記載された表である。表 1 には、No. 1～No. 11 の支持杭 10 の突出量と、基準杭の突出量に対する各支持杭 10 の突出量の比とが記載され、上記条件 (3) の $1 \leq h/h_0 \leq 1.73$ 又は $1.31 \leq h/h_0 \leq 2.26$ に当てはまるかどうか記載されている。表 1 においては、比較杭が基準杭よりも遅れて降伏する場合のみの条件で判定しており、条件に適合する支持杭 10 は、全ての支持杭 10 の 1/2 である。よって、図 44 の道路構造 100 は、上記の条件 (5) を満たすものである。また、上記条件 (2) に基づき表 1 に示す道路構造 100 においては、No. 2 の谷側にある支持杭を基準杭としている。

[0192] [表2]

No.	突出量 (m)			比較杭／基準杭		適用範囲		判定	
	谷側杭	山側杭	基準杭	谷側杭	山側杭	最小	最大	谷側杭	山側杭
1	2.1	1.6	7.3	0.29	0.22	0.58	1.73	×	×
2	7.3	2.9	7.3	1.00	0.40	0.58	1.73	○	×
3	12.0	8.7	7.3	1.64	1.19	0.86	2.26	○	○
4	15.1	10.4	7.3	2.07	1.42	0.86	2.26	○	○
5	14.6	6.4	7.3	2.00	0.88	0.86	2.26	○	○
6	12.1	8.8	7.3	1.66	1.21	0.86	2.26	○	○
7	13.8	7.8	7.3	1.89	1.07	0.86	2.26	○	○
8	13.0	8.9	7.3	1.78	1.22	0.86	2.26	○	○
9	12.3	5.7	7.3	1.68	0.78	0.86	2.26	○	×
10	9.4	6.3	7.3	1.29	0.86	0.58	1.73	○	○
11	10.2	4.1	7.3	1.40	0.56	0.58	1.73	○	×

[0193] 表 2 は、図 44 の複数の支持杭 10 の仕様とそれが上記の条件に当てはまっているかについての判定が記載された表である。表 2 には、表 1 と同じく No. 1～No. 11 の支持杭 10 の突出量と、基準杭の突出量に対する各支持杭 10 の突出量の比とが記載され、上記条件 (3) の $0.58 \leq h/h_0 \leq 1.73$ 又は $0.86 \leq h/h_0 \leq 2.26$ に当てはまるかどうか記載されている。表 2 においては、比較杭が基準杭よりも遅れて降伏する場合及び比較杭が基準杭よりも早く降伏する場合の両方を考慮した条件で判定しており、条件に適合する支持杭 10 は、22 本のうち 17 本で、全ての支持

杭 10 の 1 / 1.3 である。よって、図 44 の道路構造 100 は、上記の条件 (5) を満たすものである。

[0194] 以上のように、図 44 に示されている道路構造 100 は、山間部に設置され、複数の支持杭 10 の長さが大きく異なるものであるが、上記の条件 (1) ~ (5) の要件を満たしている。これにより、道路構造 100 は、例えばレベル 2 地震動を受けた際に、支持杭 10 のうち少なくとも 1 / 2 以上が塑性変形し振動によるエネルギーを吸収することにより、耐震性を発揮できる。

[0195] <結節点間部材の長さの制御>

図 45 は、実施の形態 2 に係る道路構造 100 の支持杭 10 の拡大図である。結節点間部材 10P の長さは、支持杭 10 の中間格点部 50b の位置で決定するものであるが、支持杭 10 が打設された地盤 90 内の構造でも調整が可能である。

[0196] 道路構造 100 の支持杭 10 は、地盤 90 に削孔された孔 95 内に建て込まれ、孔 95 と支持杭 10 の地中部 18a との間にコンクリート等の充填材 82 が流し込まれ固定される。図 45 においては、孔 95 の上部にある地中部 18 は、ウレタン又は発泡スチロール等の軟質材で構成された充填材 81 が流し込まれている。これにより、結節点間部材 10P の長さは、見た目上においては支点 98 から上部の部分の長さであるが、強度検討においては仮想支点 98a から上部の部分の長さになる。支持杭 10 は、地盤 90 の内部において強度の高い充填材 82 を充填する高さを調整することにより、結節点間部材 10P の長さを調整でき、他の支持杭 10 と塑性変形領域を合わせることが可能となる。また、一般に地盤 90 の支点 98 を移動させるには、盛り土又は掘削を行う必要があるが、図 45 の構造によれば、孔 95 に充填する充填材 82 を変更するだけで、結節点間部材 10P の長さの調整が可能となる。なお、下側に位置する充填材 82 を第 1 充填材、充填材 82 の上に充填される充填材 81 を第 2 充填材と称する場合がある。第 1 充填材 82 は、第 2 充填材 81 よりも強度及び剛性が高い。

[0197] 図46は、実施の形態2に係る道路構造100のy方向に垂直な断面の説明図である。道路構造100において、山間部の傾斜が大きい場合には、谷側の支持杭10と山側の支持杭10との突出量の差が大きい場合がある。この場合、谷側の支持杭10及び山側の支持杭10に中間格点部50bを設け桁部材40で接続すると、山側の支持杭10は、結節点間部材の長さが極端に短くなり、ともにエネルギー吸収性能を発揮できない場合が考えられる。このような場合には、谷側の支持杭10は2層で、山側の支持杭10は1層になるように桁部材40を配置する。つまり、桁部材40は、中間格点部50bと上端格点部50aとを接続するように設置されている。山側の支持杭10の上端格点部50aと谷側の支持杭10の中間格点部50bとを接続する桁部材40は、斜面に沿って傾斜している。なお、この桁部材40を第3桁部材と称する場合がある。

[0198] なお、実施の形態2においては、複数の支持杭10のうち少なくとも一部が2層の支持杭10である道路構造100について説明したが、複数の支持杭10のうち少なくとも一部が3層以上であっても良い。

[0199] 以上に本発明を実施の形態に基づいて説明したが、本発明は上述した実施の形態の構成のみに限定されるものではない。特に構成要素の組み合わせは、実施の形態における組み合わせのみに限定するものではなく、適宜変更することができる。また、いわゆる当業者が必要に応じてなす種々なる変更、応用、利用の範囲をも本発明の要旨（技術的範囲）に含むことを念のため申し添える。

[0200] 上記に説明した道路構造100を含む人工地盤構造物は、以下の付記1～20に示す各特徴の組み合わせも含み得るものである。その組み合わせについて下記に示す。

[付記1]

人工地盤が延びる第1方向及び前記第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭と、

前記支持杭の上端に設置された上端格点部と、

隣り合う 2 つの前記上端格点部を接続する第 1 桁部材と、
前記上端格点部及び前記第 1 桁部材の上方に設置される床版と、を備え、
前記支持杭は、
レベル 2 地震動を受けたときの水平方向変位と水平荷重との履歴曲線が紡
錘形状となるように設定されている、人工地盤構造物。

[付記 2]

前記支持杭は、
熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が 8
5 % 以下であり、シャルピー吸収エネルギーが 27 J 以上である、付記 1 に
記載の人工地盤構造物。

[付記 3]

人工地盤が延びる第 1 方向及び前記第 1 方向に交差する第 2 方向に並列し
て地盤に打設された支持杭と、
前記支持杭の上端に設置された上端格点部と、
隣り合う 2 つの前記上端格点部を接続する第 1 桁部材と、
前記上端格点部及び前記第 1 桁部材の上方に設置される床版と、を備え、
前記支持杭は、
熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が 8
5 % 以下であり、シャルピー吸収エネルギーが 27 J 以上である、人工地盤
構造物。

[付記 4]

前記支持杭は、複数の支持杭を含み、
前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点及び前記上端格点部を結節点
とし、隣り合う前記結節点の間の前記支持杭の一部を結節点間部材としたと
きに、
前記複数の支持杭のうち前記第 1 方向又は前記第 2 方向に隣り合って前記
地盤に打設された 2 つの支持杭は、複数の結節点間部材を備え、
前記複数の結節点間部材は、

レベル2地震動を受けたときに、塑性変形する第1結節点間部材と、降伏していない第2結節点間部材と、を備え、

前記第2結節点間部材は、

前記第1結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように長さが設定されている、付記1～3の何れか1つに記載の人工地盤構造物。

[付記5]

前記支持杭の中間部に設置される中間格点部と、

隣合う2つの前記中間格点部を接続する第2桁部材と、を更に備える、付記1～3の何れか1つに記載の人工地盤構造物。

[付記6]

前記第2桁部材は、

前記地盤の傾斜に沿った方向に傾斜している、付記5に記載の人工地盤構造物。

[付記7]

前記中間格点部を有する前記支持杭の長さを h としたときに、

前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点から前記中間格点部までの長さは、

$0.5h$ 以上 $0.75h$ 以下に設定される、付記5又は6に記載の人工地盤構造物。

[付記8]

前記中間格点部は、

前記支持杭の外側面を包囲して設置される筒体を備え、

前記支持杭の中心軸に対し偏心させた状態で設置可能な構造である、付記5～7の何れか1つに記載の人工地盤構造物。

[付記9]

前記支持杭は、

前記地盤に打設された第1鋼管杭の上方に鋼管支柱を接合して形成され、

前記第1鋼管杭と前記鋼管支柱との接合部は、

前記中間格点部の前記筒体が前記第 1 鋼管杭の上端部と前記鋼管支柱の下端部とにまたがって配置され、

前記中間格点部は、

前記第 1 鋼管杭及び前記鋼管支柱を偏心させた状態で接合可能な構造である、付記 8 に記載の人工地盤構造物。

[付記 10]

前記中間格点部は、

前記筒体の内部に前記第 1 鋼管杭の上端面が下方から当接する支持部材を備え、

前記鋼管支柱は、

下端面が前記支持部材の上面に当接し、前記支持部材の上方に立設される、付記 9 に記載の人工地盤構造物。

[付記 11]

前記支持杭は、複数の支持杭を含み、

前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点、前記中間格点部及び前記上端格点部を結節点とし、隣り合う前記結節点の間の前記支持杭の一部を結節点間部材としたときに、

前記複数の支持杭のうち前記第 1 方向又は前記第 2 方向に隣り合って前記地盤に打設された 2 つの支持杭は、複数の結節点間部材を備え、

前記複数の結節点間部材は、

前記 2 つの支持杭に所定の水平方向変位が生じたときに、塑性変形する第 1 結節点間部材と、降伏していない第 2 結節点間部材と、を備え、

前記第 2 結節点間部材は、

前記第 1 結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように長さが設定されている、付記 5 ～ 10 の何れか 1 つに記載の人工地盤構造物。

[付記 12]

前記複数の結節点間部材は、

複数の第 1 結節点間部材を備える、付記 11 に記載の人工地盤構造物。

[付記 1 3]

前記第 1 結節点間部材の降伏変位を $\delta 1 y$ 、前記第 2 結節点間部材の降伏変位を $\delta 2 y$ としたときに、前記第 2 結節点間部材の降伏変位 $\delta 2 y$ が、 $\delta 1 y \leq \delta 2 y \leq 3 \cdot \delta 1 y$ となるように前記第 1 結節点間部材及び前記第 2 結節点間部材の長さが設定された、付記 1 1 又は 1 2 に記載の人工地盤構造物。

[付記 1 4]

前記上端格点部は、
前記支持杭の外側面を包囲して設置される筒体を備え、
前記支持杭の中心軸に対し偏心させた状態で設置可能な構造である、付記 1 ～ 1 3 の何れか 1 つに記載の人工地盤構造物。

[付記 1 5]

前記支持杭は、
鋼管製造時の溶接ビード切断の後工程において鋼管の内面又は外面に誘導コイルを設置した誘導加熱装置を用いて熱処理されている、付記 1 ～ 1 4 の何れか 1 つに記載の人工地盤構造物。

[付記 1 6]

前記支持杭は、
鋼管ぐい S K K 材又は一般構造用鋼管 S T K 材を使用した、付記 1 ～ 1 5 の何れか 1 つに記載の人工地盤構造物。

[付記 1 7]

前記地盤に掘削され、前記支持杭が立設された孔と、
前記支持杭と前記孔との隙間に充填された第 1 充填材及び第 2 充填材とを備え、

前記第 1 充填材は、

前記第 2 充填材よりも下方に充填され、固化した後の強度が前記第 2 充填材よりも高い、付記 1 ～ 1 6 の何れか 1 つに記載の人工地盤構造物。

[付記 1 8]

前記支持杭の中間部に設置される中間格点部と、
隣合う2つの支持杭に設置された前記中間格点部と前記上端格点部とを接続する第3桁部材と、を更に備える、付記1～17の何れか1つに記載の人工地盤構造物。

[付記19]

前記複数の支持杭は、
地盤からの突出量が h_0 である1本の基準となる基準杭と、
地盤からの突出量が h である比較杭と、を備え、
 $0.58 \leq h/h_0 \leq 1.73$ の条件を満たしている、付記4に記載の人工地盤構造物。

[付記20]

前記複数の支持杭は、
地盤からの突出量が h_0 である1本の基準となる基準杭と、
地盤からの突出量が h であり、前記中間格点部を有する比較杭と、を備え、
、
 $0.86 \leq h/h_0 \leq 2.26$ の条件を満たしている、付記11に記載の人工地盤構造物。

符号の説明

[0201] 10 支持杭、10a 支持杭、10b 支持杭、10A～10D 結節点間部材、10Ca 結節点間部材、10Cb 結節点間部材、10Da 結節点間部材、10Db 結節点間部材、10P 結節点間部材、11 接合部、12 杭頭、13 突起、14 端面、15 貫通孔、16 充填材受け板、17 充填孔、18 地中部、18a 地中部、20 鋼管杭、20a 第1鋼管杭、20b 第2鋼管杭、21 杭頭、21a 杭頭、21b 杭頭、22a 端面、30 鋼管支柱、31 端面、40 (第2) 桁部材、40a 縦桁、40b 横桁、41 第1桁部材、41a 縦桁、41aa 第1の縦桁、41b 横桁、42 床版固定部材、43 連結部、44 添接板、48 梁、48a 斜め梁、48b 斜め梁、50 格点部

、50a 上端格点部、50aa 第1の上端格点部、50ab 第2の上端格点部、50ac 第3の上端格点部、50ad 第4の上端格点部、50b 中間格点部、51a 鋼管部材、51b 鋼管部材、52a 縦桁仕口、52b 縦桁仕口、53a 横桁仕口、53b 横桁仕口、54 突起、55a 支持部材、55b 支持部材、56a 充填孔、56b 充填口、57 ボルト、57a 上面、58 上部プレート、59 下部プレート、59a 開口部、60 偏心接合部材、60a 偏心接合部材、60b 偏心接合部材、61 差し込み部材、62 リブ部材、62a 外部リブ部材、62b 内部リブ部材、65 板材、70 型枠治具、71 ブラケット、73 固定バンド、74 型枠板、75 調整ボルト、76 ナット部材、80 充填材、81 充填材、82 充填材、90 地盤、92 堆積層、93 支持層、94 表面、95 孔、96 底面、97 隙間、98 支点、99 道路床版、100 道路構造、150b 中間格点部、200 道路構造、250a 上端格点部、250b 中間格点部、251a 鋼管部材、251b 鋼管部材、254a 下端面、260 (第3) 偏心接合部材、261 板部材、262 上面、350a 杭頭ブロック、399 覆工版、550a 上端格点部、550b 中間格点部、560a 偏心接合部材、560b 偏心接合部材、1000 道路構造、1010 支柱、1010p 鋼管杭、1010p 鋼管杭、1091 フーチング。

請求の範囲

- [請求項1] 人工地盤が延びる第1方向及び前記第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭と、
 前記支持杭の上端に設置された上端格点部と、
 隣り合う2つの前記上端格点部を接続する第1桁部材と、
 前記上端格点部及び前記第1桁部材の上方に設置される床版と、を備え、
 前記支持杭は、
 レベル2地震動を受けたときの水平方向変位と水平荷重との履歴曲線が紡錘形状となるように設定されている、人工地盤構造物。
- [請求項2] 前記支持杭は、
 熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が85%以下であり、シャルピー吸収エネルギーが27J以上である、請求項1に記載の人工地盤構造物。
- [請求項3] 人工地盤が延びる第1方向及び前記第1方向に交差する第2方向に並列して地盤に打設された支持杭と、
 前記支持杭の上端に設置された上端格点部と、
 隣り合う2つの前記上端格点部を接続する第1桁部材と、
 前記上端格点部及び前記第1桁部材の上方に設置される床版と、を備え、
 前記支持杭は、
 熱処理された電縫鋼管により構成され、溶接部を含めた各部の降伏比が85%以下であり、シャルピー吸収エネルギーが27J以上である、人工地盤構造物。
- [請求項4] 前記支持杭は、複数の支持杭を含み、
 前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点及び前記上端格点部を結節点とし、隣り合う前記結節点の間の前記支持杭の一部を結節点間部材としたときに、

前記複数の支持杭のうち前記第 1 方向又は前記第 2 方向に隣り合っ
て前記地盤に打設された 2 つの支持杭は、複数の結節点間部材を備え
、
前記複数の結節点間部材は、
レベル 2 地震動を受けたときに、塑性変形する第 1 結節点間部材と
、降伏していない第 2 結節点間部材と、を備え、
前記第 2 結節点間部材は、
前記第 1 結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように長さ
が設定されている、請求項 1 ～ 3 の何れか 1 項に記載の人工地盤構造
物。

[請求項 5] 前記支持杭の中間部に設置される中間格点部と、
隣合う 2 つの前記中間格点部を接続する第 2 桁部材と、を更に備え
る、請求項 1 ～ 3 の何れか 1 項に記載の人工地盤構造物。

[請求項 6] 前記第 2 桁部材は、
前記地盤の傾斜に沿った方向に傾斜している、請求項 5 に記載の人
工地盤構造物。

[請求項 7] 前記中間格点部を有する前記支持杭の長さを h としたときに、
前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点から前記中間格点部ま
での長さは、
 $0.5h$ 以上 $0.75h$ 以下に設定される、請求項 5 に記載の人工
地盤構造物。

[請求項 8] 前記中間格点部は、
前記支持杭の外側面を包囲して設置される筒体を備え、
前記支持杭の中心軸に対し偏心させた状態で設置可能な構造である
、請求項 5 に記載の人工地盤構造物。

[請求項 9] 前記支持杭は、
前記地盤に打設された第 1 鋼管杭の上方に鋼管支柱を接合して形成
され、

前記第 1 鋼管杭と前記鋼管支柱との接合部は、
前記中間格点部の前記筒体が前記第 1 鋼管杭の上端部と前記鋼管支柱の下端部とにまたがって配置され、
前記中間格点部は、
前記第 1 鋼管杭及び前記鋼管支柱を偏心させた状態で接合可能な構造である、請求項 8 に記載の人工地盤構造物。

[請求項10]

前記中間格点部は、
前記筒体の内部に前記第 1 鋼管杭の上端面が下方から当接する支持部材を備え、
前記鋼管支柱は、
下端面が前記支持部材の上面に当接し、前記支持部材の上方に立設される、請求項 9 に記載の人工地盤構造物。

[請求項11]

前記支持杭は、複数の支持杭を含み、
前記支持杭と前記地盤の表面とが交わる支点、前記中間格点部及び前記上端格点部を結節点とし、隣り合う前記結節点の間の前記支持杭の一部を結節点間部材としたときに、
前記複数の支持杭のうち前記第 1 方向又は前記第 2 方向に隣り合っ
て前記地盤に打設された 2 つの支持杭は、複数の結節点間部材を備え
、
前記複数の結節点間部材は、
前記 2 つの支持杭に所定の水平方向変位が生じたときに、塑性変形する第 1 結節点間部材と、降伏していない第 2 結節点間部材と、を備え、
前記第 2 結節点間部材は、
前記第 1 結節点間部材が限界耐力に達する前に降伏するように長さが設定されている、請求項 5 に記載の人工地盤構造物。

[請求項12]

前記複数の結節点間部材は、
複数の第 1 結節点間部材を備える、請求項 11 に記載の人工地盤構

造物。

- [請求項13] 前記第1結節点間部材の降伏変位を $\delta 1 y$ 、前記第2結節点間部材の降伏変位を $\delta 2 y$ としたときに、前記第2結節点間部材の降伏変位 $\delta 2 y$ が、 $\delta 1 y \leq \delta 2 y \leq 3 \cdot \delta 1 y$ となるように前記第1結節点間部材及び前記第2結節点間部材の長さが設定された、請求項11に記載の人工地盤構造物。
- [請求項14] 前記上端格点部は、
前記支持杭の外側面を包囲して設置される筒体を備え、
前記支持杭の中心軸に対し偏心させた状態で設置可能な構造である、請求項1～3の何れか1項に記載の人工地盤構造物。
- [請求項15] 前記支持杭は、
鋼管製造時の溶接ビード切断の後工程において鋼管の内面又は外面に誘導コイルを設置した誘導加熱装置を用いて熱処理されている、請求項1～3の何れか1項に記載の人工地盤構造物。
- [請求項16] 前記支持杭は、
鋼管ぐいS K K材又は一般構造用鋼管S T K材を使用した、請求項1～3の何れか1項に記載の人工地盤構造物。
- [請求項17] 前記地盤に掘削され、前記支持杭が立設された孔と、
前記支持杭と前記孔との隙間に充填された第1充填材及び第2充填材とを備え、
前記第1充填材は、
前記第2充填材よりも下方に充填され、固化した後の強度が前記第2充填材よりも高い、請求項1～3の何れか1項に記載の人工地盤構造物。
- [請求項18] 前記支持杭の中間部に設置される中間格点部と、
隣合う2つの支持杭に設置された前記中間格点部と前記上端格点部とを接続する第3桁部材と、を更に備える、請求項1～3の何れか1項に記載の人工地盤構造物。

- [請求項19] 前記複数の支持杭は、
前記地盤からの突出量が h_0 である 1 本の基準となる基準杭と、
前記地盤からの突出量が h である比較杭と、を備え、
 $0.58 \leq h / h_0 \leq 1.73$ の条件を満たしている、請求項 4 に
記載の人工地盤構造物。
- [請求項20] 前記複数の支持杭は、
前記地盤からの突出量が h_0 である 1 本の基準となる基準杭と、
前記地盤からの突出量が h であり、前記中間格点部を有する比較杭
と、を備え、
 $0.86 \leq h / h_0 \leq 2.26$ の条件を満たしている、請求項 11
に記載の人工地盤構造物。