

論文 RC 杭頭部のせん断耐力に及ぼす軸方向力の変動履歴の影響

中田 裕喜^{*1}・坂口 淳一^{*2}・渡辺 健^{*3}

要旨：構造物が地震作用を受けると、杭の軸方向力は変動し、引張軸力になることも多い。本検討では、実大 RC 杭に対し、非線形有限要素解析によって、軸方向力の大きさと変動履歴の考慮の有無が RC 杭頭部のせん断耐力に及ぼす影響を検証した。引張軸力に対し、軸方向力の変動履歴を考慮せずに初期荷重として与えた場合、ひび割れが杭頭部で局所化することで斜めひび割れに進展しにくくなり、引張軸力やコンクリートの引張強度の大きさに関わらず、変動履歴を考慮した場合と異なる損傷性状、せん断耐力となることがわかった。圧縮軸力に対しては、変動履歴の有無が損傷性状やせん断耐力に及ぼす影響は小さいことがわかった。

キーワード：RC 杭、せん断耐力、軸方向力、変動履歴、非線形有限要素解析

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書（設計編）¹⁾（以下、示方書）や鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）²⁾における棒部材の設計せん断耐力 V_{jd} は、単純支持された集中荷重が作用する矩形断面鉄筋コンクリート（以下、RC）はりに対する実験結果等に基づき、安全側に設定されたものである。一方、RC 杭は円形断面であることに加え、軸方向力および地盤反力による分布荷重を受け、また杭頭部ではモーメント分布に反曲点を有することが多い点に特徴がある。このような場合、RC 杭頭部のせん断耐力は、示方書のせん断耐力算定式よりも大きい値となる可能性がある^{3),4)}。このような特徴を反映するためには、非線形有限要素解析（以下、FEM）に基づいて、耐力等を算定することが合理的である。

RC 杭では、地震時の水平力の増加に伴って軸方向力が増加し、大きい圧縮軸力あるいは引張軸力となることも多い。構造全体系の応答値の算定を骨組み解析で行い、RC 杭のみを対象として FEM によって限界値の算定を行う場合においても、この軸方向力の変動履歴の影響を踏まえないといけない。また、RC 杭を有する構造物は非常に多いため、RC 杭の特徴を踏まえたせん断耐力算定式の構築は、非線形有限要素解析を用いる場合と比較して照査行為の省力化につながると考えられるが、算定式の構築や検証のために参照する RC 杭の実験⁵⁾や FEM³⁾に対しても、軸方向力の変動履歴の影響を明確にしておく必要がある。

軸方向力の変動履歴が耐力や変形性能に及ぼす影響を検討した既往の研究においては、RC 杭を対象としたものでは変形性能に着目したものであり⁶⁾、せん断耐力を対象としたものでは RC 柱に着目したものが多く⁷⁾。RC 杭頭部では、地盤反力等の影響によってせん断圧縮

破壊となる傾向にあり³⁾、断面形状や曲げモーメント分布の違いと合わせて、RC 杭頭部に対する軸方向力の変動履歴の影響は既往の研究と異なる可能性がある。

このような背景のもと、著者らは過去に、一般的な鉄道ラーメン高架橋（一柱一杭形式）の場所打ち RC 杭⁸⁾に対し、軸方向力や塑性化する地盤の反力の変動履歴がせん断耐力等に及ぼす影響を評価した⁹⁾。ただし、RC 杭で破壊させるために、ラーメン高架橋のモデルの RC 杭以外の梁と柱を弾性としたため、最大または最小となる軸方向応力 σ_{peak} （軸方向力を RC 杭の断面積で除した値で、圧縮を正）はそれぞれ 11.9 N/mm²、-8.4 N/mm² となり、一般的な構造物で生じる軸方向応力よりも大きい値であった。軸方向力に対する変動履歴の考慮の有無によるせん断耐力への影響は、軸方向力を踏まえたひび割れの発生時期や、ひび割れの発生時期の違いによるひび割れ進展経路の違い等によって変化することが予想されるため、軸方向力の大きさに依存する可能性がある。

本研究では、実大寸法の RC 杭に対し、FEM によって、軸方向力の大きさと変動履歴の考慮の有無が、RC 杭頭部のせん断耐力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 検討概要

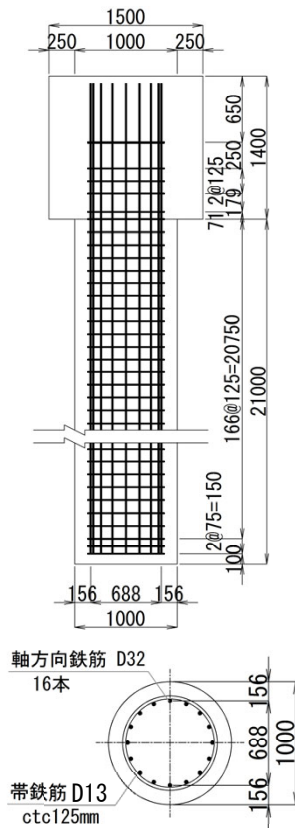
2.1 対象とする RC 杭

図-1 および表-1 に、対象とする RC 杭を示す。一般的な鉄道ラーメン高架橋の場所打ち杭であり、杭径 1m、杭長 21m である⁸⁾。ただし、せん断破壊するように、せん断補強鉄筋比 $p_w=0.20\%$ とした。施工方法はオールケーシング工法を想定した。コンクリートの設計圧縮強度 f_{cd} や設計引張強度 f_{td} 、ヤング係数 E_c は、文献²⁾に従って、コンクリートの施工条件に関する低減係数 ρ_c および材料

*1 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士（工学）（正会員）

*2 株式会社 HRC 研究所 鉄道構造技術部 修士（工学）（正会員）

*3 （公財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 Ph.D.（正会員）

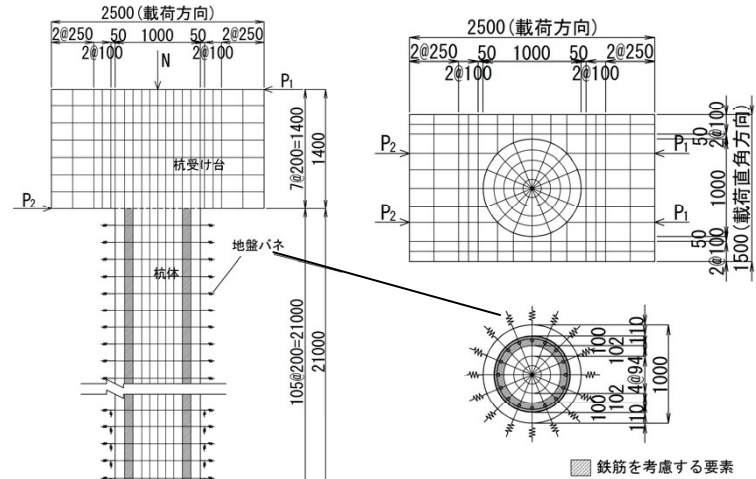


図－1 対象とした RC 杭（単位：mm）

コンクリート			軸方向鉄筋		せん断補強鉄筋		
f'_{cd} (N/mm^2)	f_{td} (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	p_t (%)	E_s (kN/mm^2)	p_w (%)	f_{yd} (N/mm^2)	E_s (kN/mm^2)
16.2	1.20 (1.71)*	22.4	1.62	200	0.20	345	200

f'_{cd} ：設計圧縮強度， f_{td} ：設計引張強度， f_{yd} ：設計降伏強度， E_c ， E_s ，ヤング係数， p_t ：軸方向鉄筋比， p_w ：せん断補強鉄筋比

※コンクリートの施工条件に関する低減係数 ρ_c を考慮しない場合（ $=f_{tk}/\gamma_c$ ）



図－2 解析のモデル化（単位：mm）

係数 γ_c を考慮した値とし、これらを解析での入力値とした。例えば、コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ に対応する引張強度 $f_{tk}=2.22\text{N/mm}^2$ に対し、 $\rho_c=0.7$ ， $\gamma_c=1.3$ を考慮して， $f_{td}=f_{tk}\cdot\rho_c/\gamma_c=1.20\text{N/mm}^2$ とした。

2.2 解析概要

図－2 に、解析モデルを示す。解析ツールは、FINAS/STAR Version 2018 Rev.180829 を用いた。1 本の RC 杭および杭受台（フーチング）を対象に、ソリッド要素でモデル化した。ただし、杭受台は、後述する荷重のために、実際よりも大きくしている。RC 杭の要素分割について、断面方向は 100mm 程度、長さ方向は 200mm を基本とした。

杭体の材料構成則は、文献^{1), 2)}に示されるアクティブクラック法に基づく非直交多方向固定／分散ひび割れによりひび割れを表現し、荷重履歴に応じた最大耐力以降の高非線形領域が追跡可能な岡村・前川らによる手法¹⁰⁾を適用した。なお、本研究では杭頭での破壊を対象とし、杭受け台や先端（下端）側の杭体は線形としている。材料構成則の概要を以下に示す。

コンクリートの圧縮側は、圧縮弾塑性破壊モデルを適用した。これは圧縮強度または圧縮強度に達するひずみ ϵ_{peak} 後は、弾性剛性残存率 K に基づいて緩やかに軟化するモデルである。引張側は、ゾーニング手法に基づき、ひび割れ後の Tension Stiffening および Tension Softening を考慮した。ひび割れ面における応力伝達構成則には、

ひび割れ面の接触面密度と局所接触応力に基づくせん断伝達モデルを適用した。鉄筋の構成則は、ひび割れ位置での塑性ひずみの局所化の影響を考慮した平均応力－平均ひずみ関係を適用した。この場合、鉄筋降伏強度は平均降伏強度として扱われる^{1), 2), 10)}。なお、既往の研究¹¹⁾において、円形断面を有する RC はりのせん断破壊に対し、これらのモデル化方法の妥当性が検証されている。ただし、軸方向引張力を受ける場合の解析手法の妥当性については、検証可能な実験の実施を含めて別途検討する必要があると考えているが、本論文では、種々の破壊形態等に対して多くの検証がなされている解析手法を用いることとした。

材料特性は表－1 のとおりとするが、軸方向鉄筋については、せん断破壊させるために設計降伏強度 f_{yd} を 1000N/mm^2 とした。

RC 杭と地盤の相互作用は、本検討ではバイリニア型の非線形ばね¹²⁾でモデル化した。表－2 に、杭周囲の地盤ばね 1 つあたりの特性を示す。杭周囲に水平およびせん断ばねを設けることとし、杭周囲の設計せん断地盤反力係数を考慮しない深さ $1/\beta$ （ β ：杭の特性値¹²⁾） $\approx 3.87\text{m}$ を参考に、杭頭から 4.0m までは水平ばねのみを配置した。なお、それぞれ該当する範囲の全ての節点に、水平およびせん断ばねを配置するが、各層において、それぞれ一方に荷重した場合の地盤反力が、文献¹²⁾と等価となるように地盤ばね定数や有効抵抗土圧力を設定した。

ただし、杭頭でせん断破壊が生じるように、文献⁸⁾に対し、地盤ばね定数および有効抵抗土圧力を3倍とした。また、杭先端には、鉛直、せん断、回転ばね（ばね定数はそれぞれ117750kN/m, 39250kN/m, 7360kN・m/rad）を設けた⁸⁾。全ての地盤ばねは、固定点とRC杭表面の節点間に配置している。

2.3 荷重方法および解析 Case

軸方向力以外の荷重方法について、鉄道ラーメン高架橋の中間ラーメン全体系を模擬したブッシュ・オーバー解析における杭頭での曲げモーメントとせん断力に基づき、本検討でのRC杭に荷重することとした⁹⁾。まず、中間ラーメン全体系の押込み（圧縮）側と引抜き（引張）側それぞれの地震前の初期状態における杭頭での曲げモーメントとせん断力に対する、地震による最大せん断力時における杭頭での曲げモーメントとせん断力の増分を、押込み（圧縮）側と引抜き（引張）側のそれぞれに対して算定した。そして、RC杭のみをモデル化した図-2に対して、 P_1 、 P_2 を制御することで、初期状態での杭頭の曲げモーメントとせん断力を導入した後、地震による杭頭での曲げモーメントとせん断力の増分を漸増荷重した。なお、本論文ではRC杭頭部のせん断耐力に着目しており、地盤反力や軸方向力によるRC杭の応力状態の再現が重要となる。したがって、漸増荷重は荷重制御とし、ポストピークは対象にしないこととした。

表-3に、解析 Case を示す。 σ'_{peak} と f_{id} をパラメータとし、軸方向力の変動履歴の考慮の有無で比較する。Case0は軸方向力を作用させないケースであり、比較のために設定した。なお、RC杭頭での曲げモーメントとせん断力は、引抜き（引張）側で得られた増分とした。

表-2 杭周面の地盤ばね1つあたりの特性

杭頭からの深度(m)	土質区分	水平ばね定数(kN/m)	水平有効抵抗土圧(kN)	杭周面の設計ばね定数(kN/m)	最大周面支持力(kN)
0~3	粘性土	884	17	—	—
3~8	砂質土	2651	40	398	4.4
8~16	粘性土	1767	33	265	3.7
16~20	粘性土	3535	66	530	7.4
20~21	砂質土	8837	123	1326	11.8

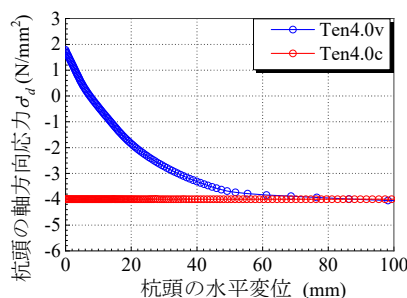
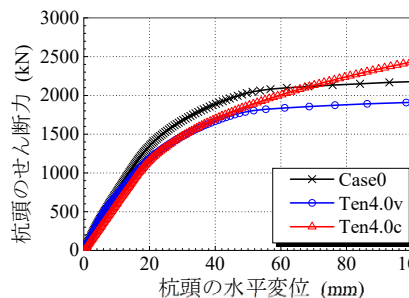
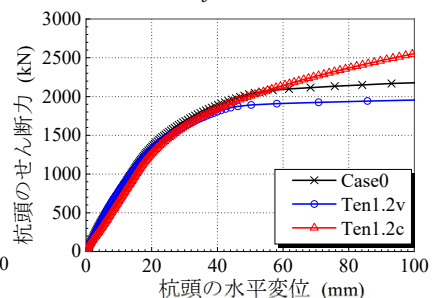


図-3 軸方向力の変動履歴
($\sigma'_{peak} = -4.0\text{N/mm}^2$)



(a) Ten4.0



(b) Ten1.2

図-4 杭頭のせん断力と水平変位の関係

軸方向力の変動履歴を考慮した Case(表-3において、末尾にvの記載がある Case)では、初期状態での杭頭での断面力や杭体の自重を荷重した後に漸増荷重を行い、杭頭が最大せん断力に概ね達した時に、所定の σ'_{peak} となるように軸方向力を作用させた。なお、軸方向力の変動履歴を考慮したいずれの Case も、初期状態での杭頭の軸方向応力 σ_d は 1.78N/mm^2 である。軸方向力の変動履歴を考慮しない Case (表-3において、末尾にcの記載がある Case)では、変動履歴を考慮した解析から得られた最大せん断力時の軸方向力を、初期荷重として荷重した後に漸増荷重を行った。図-3に、Ten4.0における軸方向力の荷重履歴を示すが、Ten4.0vでは初期状態での $\sigma_d = 1.78\text{N/mm}^2$ から、漸増荷重に伴う軸方向力の変動によって、 $\sigma_d = -4.0\text{N/mm}^2$ に漸近していることが確認できる。

Ten4.0およびCon7.0について、最近の一般的なラーメン高架橋等に対しては、押込み（圧縮）側の最大値は2~8N/mm²程度、引抜き（引張）側の最小値は-4~1N/mm²程度であったため¹³⁾、これを参考に σ'_{peak} を設定した。また、引張軸力（初期荷重）のみによるRC杭頭部のひび割れの発生が、損傷性状やせん断耐力に影響を及ぼす可能性があると考え、 σ'_{peak} の絶対値が $f_{id} = 1.20\text{N/mm}^2$ と一致する Ten1.2 および $\sigma'_{peak} = -1.20\text{N/mm}^2$ かつ $f_{id} = 1.71\text{N/mm}^2$ とした Ten1.2Ft も実施した。なお、Ten1.2Ftについては、 γ_c と ρ_c の考慮によって f_{id} 自体が小さくなっているため、 σ'_{peak} を小さくせずに f_{id} を大きくすることで、 f_{id} の影響を検証することとした。

軸方向力の変動履歴の影響が小さければ、設計作用時までの軸方向力の変動履歴を再現せずとも、初期荷重として軸方向力を与えてせん断耐力の算定を行ってもよい

表-3 解析 Case

Case	σ'_{peak} (N/mm ²)	f_{id} (N/mm ²)	軸方向力の変動履歴
Case0	0.0	1.20	軸方向力無し
Ten4.0	-4.0	1.20	・ Case名の末尾にv : 変動履歴を考慮
Ten1.2	-1.2	1.20	・ Case名の末尾にc : 変動履歴を非考慮（初期荷重として一定荷重）
Ten1.2Ft	-1.2	1.71	
Con7.0	7.0	1.20	

σ'_{peak} ：最大または最小の軸方向応力（軸方向力をRC杭の断面積で除した値で圧縮を正）、 f_{id} ：設計引張強度

こととなる。また、既往のせん断耐力に関する RC 部材の実験や FEM では、軸方向力を一定として行われていることが多いが、RC 杭のためのせん断耐力算定式の構築や検証において、これらを参照することも可能となる。

3. 引張軸力における載荷履歴の影響

3.1 σ_{peak} の影響

図-4 に、Ten4.0、Ten1.2 および Case0 の杭頭におけるせん断力と水平変位の関係を示す。なお、杭頭の水平変位が 100mm 以内では、表-3 に示す全ての Case において、軸方向鉄筋は降伏しなかった。

引張軸力が大きくなると初期の剛性は小さくなるが、変動履歴を考慮した Ten4.0v、Ten1.2v と比較すると、変動履歴を考慮しない Ten4.0c、Ten1.2c は、初期荷重として与えた引張軸力によって RC 杭にひび割れが発生するため、剛性がより小さくなった。なお、いずれの Case も杭頭のせん断力が 1000kN 程度から徐々に剛性が低下しているが、図-5 に示すように、杭周面の水平地盤ばねが塑性化し始めたためである。

Ten4.0v、Ten1.2v と Case0 では、杭頭の水平変位が 40mm 程度でせん断力の増加割合は小さくなった。なお、漸増荷重は荷重制御としているため、せん断力の低下は生じないが、本論文では変動履歴を考慮した Case と Case0 に対し、水平変位が 100mm 程度、あるいは解析の発散直前における杭頭のせん断力 V_{ana} をせん断耐力とみなして検討することとする。これは、変動履歴を考慮した Case と Case0 では 40mm 程度以降でせん断力があまり増加せず、本論文の目的であるせん断耐力に対しては水平変位の増加に対して大きな差がないこと、解析の収束性が確保されている範囲で、コンクリートの圧縮損傷を確認できた

ことを踏まえたものである。Ten4.0v、Ten1.2v について、引張軸力が大きくなると V_{ana} は小さくなった。一方、Ten4.0c、Ten1.2c は、40mm 程度以降もせん断力が増加し続け、Ten4.0v、Ten1.2v よりもせん断力が大きくなる結果となった。

図-6~9 に、変形図、最大主ひずみ、最小主応力およびせん断補強鉄筋のひずみの分布を示す。Ten4.0v、Ten1.2v と Case0 は V_{ana} 時を、Ten4.0c、Ten1.2c は Ten4.0v、Ten1.2v の V_{ana} 時を示している。また、図に示す最大主ひずみおよび最小主応力分布は、杭体内部（断面中心）を示している。Ten4.0v、Ten1.2v と Case0 について、最大主ひずみから杭頭で斜めひび割れが発生していると考えられるが、これに対応してせん断補強鉄筋は降伏している。また、最小主応力から、杭頭部で圧縮ストラットが形成され、圧縮ストラットの両端で大きい圧縮応力が発生していることが確認できるが^{3),9)}、引張軸力が大きくなると、圧縮ストラットが卓越する領域がやや小さくなっている。なお、変形図において、杭頭の要素で大きく変形しており、 V_{ana} 時にはコンクリートが圧縮応力を保

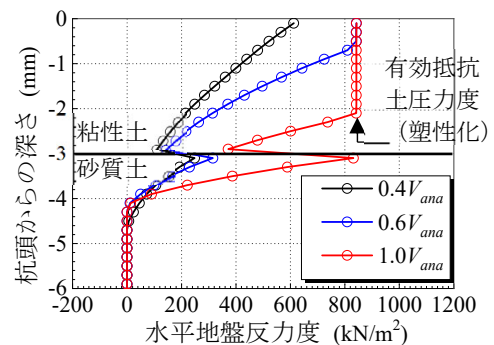
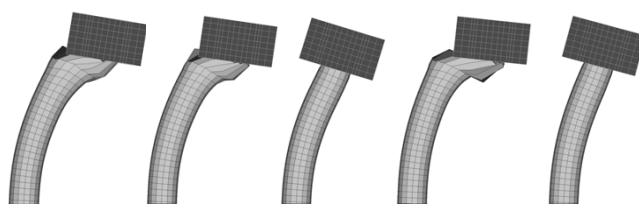


図-5 荷重方向前面の水平地盤ばねの反力分布
(Ten4.0v, $V_{ana}=1908\text{kN}$)



(a) Case0 (b) Ten4.0v (c) Ten4.0c (d) Ten1.2v (e) Ten1.2c
図-6 変形図 (V_{ana} , 変形倍率 25 倍)

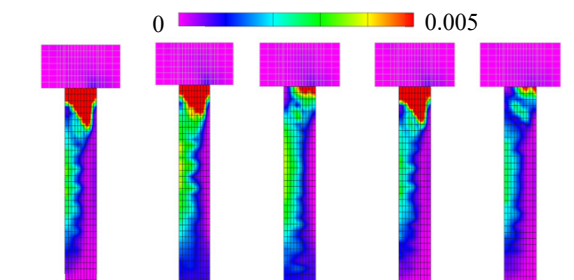
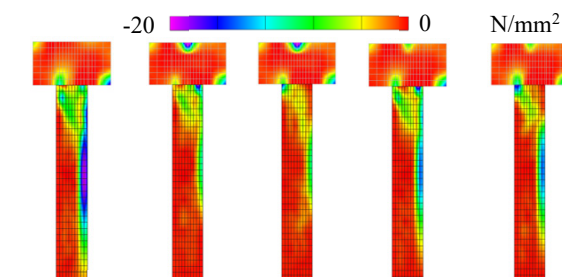


図-7 最大主ひずみ分布 (V_{ana})



(a) Case0 (b) Ten4.0v (c) Ten4.0c (d) Ten1.2v (e) Ten1.2c
図-8 最小主応力分布 (V_{ana})

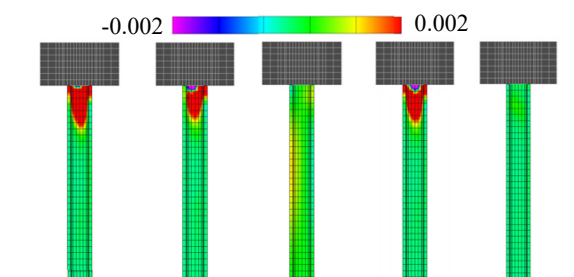


図-9 せん断補強鉄筋のひずみ分布 (V_{ana})

持しつつ、圧縮損傷が進行している。

一方、Ten4.0c、Ten1.2c は、 V_{ana} 時では杭頭の要素の顕著な変形は生じなかった。また、引張軸力が大きくなるほど杭頭での斜めひび割れに対応する最大主ひずみは小さくなり、せん断補強鉄筋は降伏しなかった。これは、初期荷重として与えた引張荷重によって、杭頭で最大主ひずみが局所化し、杭頭断面全域にわたってひび割れが発生したため、せん断力および曲げモーメントを作用させても、杭頭の曲げひび割れから斜めひび割れに進展しにくくなったためと考えられる。また、これによって Ten4.0c、Ten1.2c はせん断破壊に至らず、Case0 や Ten4.0v、Ten1.2v よりも大きいせん断力を示したと考えられる。

3.2 f_{td} の影響

図-10～12 に、Ten1.2Ft の杭頭におけるせん断力と水平変位の関係および最大主ひずみ、せん断補強鉄筋のひずみの分布を示す。Ten1.2c と比較して、Ten1.2Ftc は杭頭部での斜めひび割れやせん断補強鉄筋のひずみはやや大きくなった。しかしながら、Ten1.2Ftc は 40mm 程度以降もせん断力が増加し続け、Ten1.2 と同様な傾向となった。

以上を踏まえると、引張軸力やコンクリートの引張強度の大きさに関わらず、引張軸力の変動履歴を考慮せずに初期荷重として与えた場合、変動履歴を考慮した場合と異なる損傷性状、せん断耐力となることがわかった。したがって、引張軸力を受ける RC 杭のせん断耐力を評価するためには、変動履歴を考慮する必要がある。

4. 圧縮軸力における載荷履歴の影響

図-13 に、Con7.0 および Case0 の杭頭におけるせん断力と水平変位の関係を示す。Con7.0c は水平変位が 41mm を超えると解析が発散して終了した。圧縮軸力が作用すると、曲げひび割れが発生しにくくなることにより、初期の剛性は大きくなった。また、Con7.0v、Con7.0c のせん断力と水平変位の関係はほぼ一致しており、 $\sigma_{peak}=11.9 \text{ N/mm}^2$ とした文献 9) と同様な結果が得られた。

図-14～17 に、変形図、最大主ひずみ、最小主応力およびせん断補強鉄筋のひずみの分布を示す。Con7.0v と Case0 は V_{ana} 時を、Con7.0c は水平変位が 41mm の時を示しており、Con7.0v については $0.9V_{ana}$ 時も併記した。また、最大主ひずみおよび最小主応力分布は、杭体内部(断面中心)を示している。変形図から、Con7.0v は杭頭の要素で明確に大きく変形、破壊している。Con7.0c はそのような傾向はみられないが、Con7.0v の V_{ana} の直前までは、概ね同様な変形図であった。

最大主ひずみから、Con7.0c においても斜めひび割れが発生し、せん断補強鉄筋は降伏した。Con7.0v と比較すると、Con7.0c の最大主ひずみやせん断補強鉄筋のひず

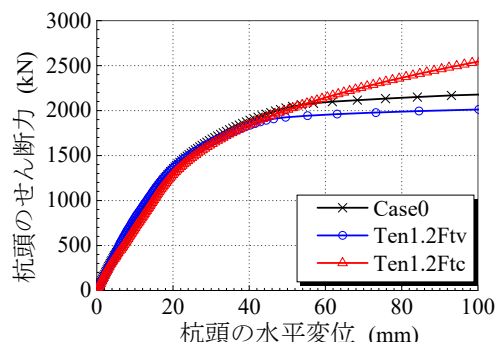
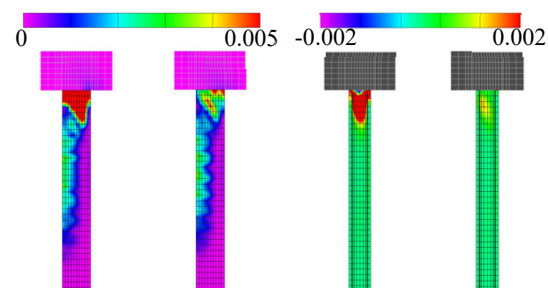


図-10 杭頭のせん断力と水平変位の関係 (Ten1.2Ft)



(a) Ten1.2Ftv (b) Ten1.2Ftc (a) Ten1.2Ftv (b) Ten1.2Ftc

図-11 最大主ひずみ 図-12 せん断補強鉄筋ひずみ分布 (Ten1.2Ftv の V_{ana}) 分布 (Ten1.2Ftc の V_{ana})

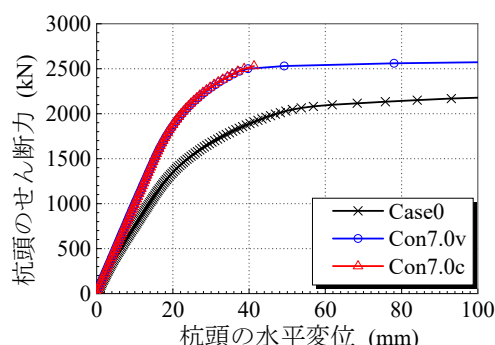


図-13 杭頭のせん断力と水平変位の関係 (Con7.0)

みが大きい領域はやや小さいが、Con7.0v の V_{ana} の直前までは概ね同様な分布であった。すなわち、大きい軸方向圧縮力を受ける場合、せん断補強鉄筋の降伏やコンクリートの圧縮損傷が生じると、急激に破壊が進行すると考えられるが、Con7.0c は V_{ana} (最終解析 STEP で、その後解析が発散) 直後に、Con7.0v と同様な損傷状況になると予想される。なお、最小主応力分布から、杭頭部で圧縮ストラットが形成されているが、引張軸力の Case と比較して、圧縮ストラットが卓越する領域が大きくなっている。

圧縮軸力が作用する場合、作用しない場合と比較して RC 杭の初期の曲げひび割れの発生や進展過程は異なる。一方で、杭頭部での斜めひび割れや圧縮ストラットが形成される領域は、この曲げひび割れが発生する領域と異なることから、せん断破壊時における損傷性状やせん断耐力に大きな違いは生じなかったと考えられる。

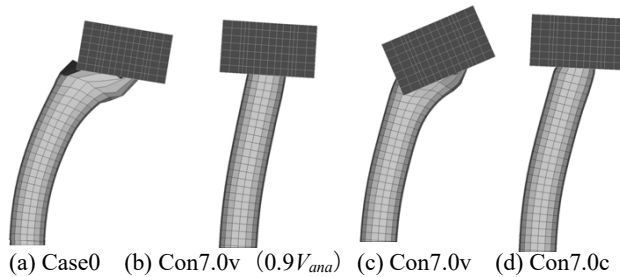


図-14 変形図 (V_{ana} , 変形倍率 25 倍)

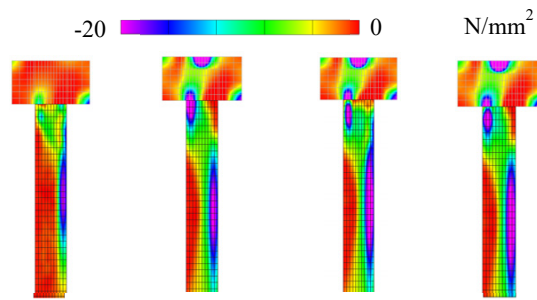


図-16 最小主応力分布 (V_{ana})

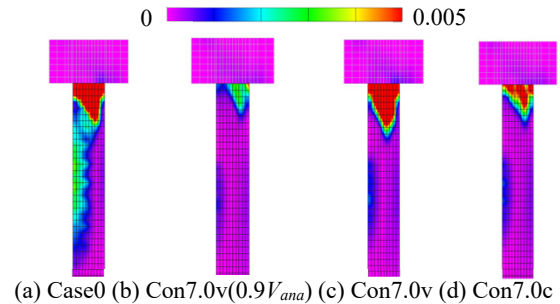


図-15 最大主ひずみ分布 (V_{ana})

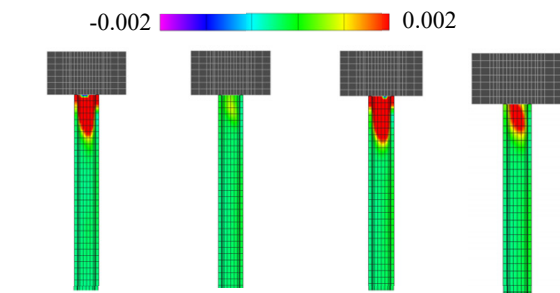


図-17 せん断補強鉄筋のひずみ分布 (V_{ana})

5. まとめ

- (1) 引張軸力に対し、変動履歴を考慮せずに初期荷重として与えた場合、軸方向力によって杭頭断面全域にわたってひび割れが発生したため、ひび割れが斜めひび割れに進展しにくくなり、引張軸力やコンクリートの引張強度の大きさに関わらず、変動履歴を考慮した場合と異なる損傷性状、せん断耐力となることがわかった。
- (2) 圧縮軸力の変動履歴の有無による曲げひび割れの進展過程の違いは、杭頭部での斜めひび割れや圧縮ストラットが形成される領域には影響しないため、変動履歴の有無が損傷性状やせん断耐力に及ぼす影響は小さいことがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書（設計編），2023.3
- 2) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，2023.1.
- 3) 北川晴之，中田裕喜，渡辺健，田所敏弥：分布荷重を考慮した RC 杭頭部における耐力の解析的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，pp.409-414，2021.
- 4) 土木学会コンクリート委員会（351 委員会）：コンクリート技術シリーズ 125 コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法-時空間性能評価技術の未来予想図Ⅱ-，2020.10.
- 5) 後藤源太，西谷朋晃，李首一，中谷隆生：既設場所

- 打ち杭のせん断耐力に対するせん断スパン比及び帯鉄筋の構造細目が及ぼす影響に関する検討，構造工学論文集，Vol.70A，pp.215-228，2024.3.
- 6) 谷村幸裕，渡邊忠朋，瀧口将志，佐藤勉：場所打ち鉄筋コンクリート杭部材の変形性能評価に関する研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.173-190，2002.
- 7) 横尾一知，北山和宏，小山明男，豊田浩一：変動軸力が鉄筋コンクリート柱のせん断性状に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.475-480，1998.
- 8) （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）照査例 RC ラーメン高架橋，2005.
- 9) 中田裕喜，坂口淳一，渡辺健：RC 杭のせん断耐力に及ぼす軸方向力および地盤反力の履歴の影響，第 24 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，Vol.24，pp.357-362，2024.
- 10) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則 技報堂，1991.
- 11) 牧剛史，土屋智史，斉藤成彦，渡邊忠朋：コンクリートの損傷指標を用いた RC 部材の三次元耐荷機構の数値解析的評価，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.78，No.1，pp.121-137，2022.
- 12) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），丸善，2012.
- 13) 中田裕喜，北川晴之，渡辺健，田所敏弥：等価せん断スパン法による RC 杭頭部のせん断耐力の評価，鉄道総研報告，Vol.38，No.11，pp.19-26，2024.