

はりモデルによるせん断破壊が生じる既設基礎杭 の挙動検証

後藤 源太¹・西谷 朋晃²・中谷 隆生³・李 首一⁴

¹正会員 工修 株式会社高速道路総合技術研究所（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

²正会員 工修 西日本高速道路株式会社 関西支社（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）

³正会員 NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社（〒732-0057 広島市東区二葉の里三丁目5-7
GRANODE広島5F）

⁴正会員 NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社 大阪支店（〒532-0002 大阪市淀川区東三国四丁目13-3）

1. はじめに

一般に、道示に規定される杭基礎の降伏の定義は『上部構造の慣性力の作用位置での水平変位が急増し始めるとき』となっているが、地盤条件や基礎形式によってその抵抗特性が大きく異なり一概には決め難いことから、杭基礎においては、以下の状態に達した時を降伏の目安としている。

1. 全ての杭において杭体が降伏する
2. 一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達する

これと併せて部材の照査として、杭やフーチングのせん断照査を行う。

既設橋の耐震補強設計の中で実施された既設杭基礎の耐震性能照査では、曲げの照査については、設計要領¹⁾に準じて照査することで大半の既設杭基礎が照査を満足するが、せん断の照査については、例えば、耐震補強対象の既設基礎杭約 1000 基を対象とした調査では、全体の約 7 割を占める場所打ち杭において、約 3 割の既設杭基礎が照査を満足しない結果となっている。

設計上「せん断破壊先行」となる杭基礎について、平成 24 年道路橋示方書及び杭基礎設計便覧に示される解析モデル（以下、現行設計モデルと呼ぶ）では、せん断力がせん断耐力に達した後の耐力低下を考慮しないため、杭のせん断破壊後の挙動を模擬し、解析的評価を行うことは困難である。また、設計要領¹⁾の塑性率は、杭部材の曲げ損傷を前提に、冒頭で述べた降伏の目安により降伏を判断するが、杭部材がせん断破壊する場合の降伏については明らかになっていない。加えて、新設杭の照査では、一般に

杭単体そのものに対し評価することになっているが、既設杭の照査では、杭単体そのものに対する評価とすべきか、あるいは、冒頭の杭基礎の降伏の目安 1 で述べたように、杭基礎を構成する全ての杭を 1 つの構造とみなして評価すべきかは明確ではない。

以上のことから、本稿では、既設基礎杭に多い場所打ち杭を対象として、杭部材のせん断破壊が先行する場合に着目し、杭部材のせん断破壊を想定した梁バネモデルによる非線形漸増解析により挙動検証を試みた結果を報告する。

2. 解析的検討

本章では、解析モデル、解析ケース・解析方法及び解析結果について述べる。

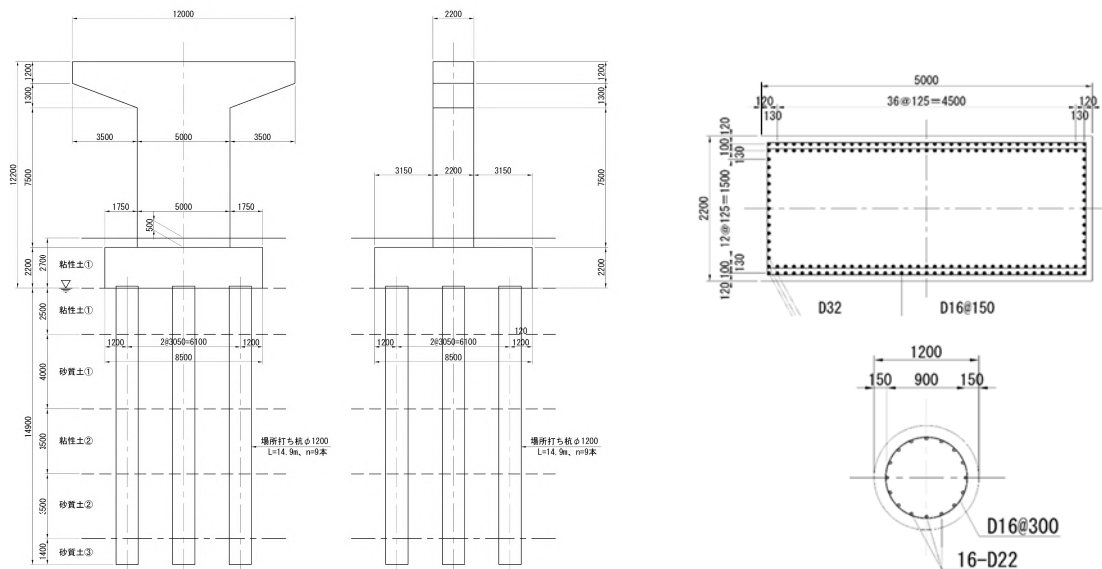
(1) 解析モデル

a) 解析モデルの設計条件

解析モデルの橋脚形状、地盤条件及び柱・杭の配筋図を図-1に示す。杭の主筋については、一般には 20本程度の主鉄筋が配置されるが、柱よりも先に基礎が降伏するような鉄筋量にした。また、杭の帯鉄筋についても、一般には杭頭部では150mm間隔で配置されるが、杭部材のせん断破壊が先行するよう全長に渡り300mm間隔とした。

b) 地盤条件

解析に用いる地盤条件を表-1に示す。地盤定数は、平成24年道路橋示方書及び設計要領第二集の標準値を用いており、砂質土に関しては、粘着力、また、粘性土に関しては、内部摩擦角を考慮していない。



(a) 構造概要・地盤構成 (b) 柱配筋図(上図)・場所打ち杭配筋図(下図)
 図-1 解析モデル作成にあたり検討対象とした橋脚及び杭の設計条件

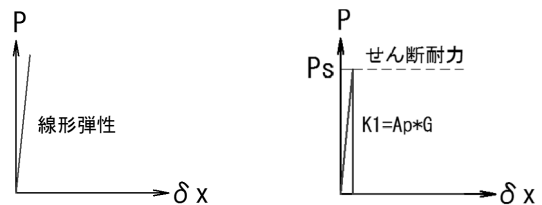
c) 各部材のモデル

柱部材は、線形とした。また、フーチングについては、杭部材の曲げ破壊とせん断破壊の影響を確認するため、現行設計モデルと同様に剛部材とする。

(2) 解析ケース・解析方法

表-2に解析ケースを示す。現行設計モデルでは、杭のせん断に対する非線形性は考慮しないが、地中部にある杭のせん断耐力（平成24年道路橋示方書）到達後の挙動を検証した事例はないため、図-2に示すように、せん断に対しては「線形」としたケース（Case-00）と、「非線形：せん断破壊後は荷重を保持しない」としたケース（Case-01, Case-02）の2ケースについて検討する。図-3に各解析ケースの解析モデルを示す。杭の鉛直支持について、一般的に底版下端に極限押し込み力と極限引抜き力を上限とする軸方向バネkVを設けるが、杭のせん断破壊が鉛直方向の変位にどのように影響するかを確認するため、現行設計モデル（Case-00）に加えて、深礎杭の設計に準じて、杭体の周面摩擦を上限とする鉛直せん断バネ（杭前面バネの1/3）と杭先端極限支持力を上限とする杭先端バネ（引抜きはゼロ）で支持するケース（Case-01, Case-02）についても検討する。なお、フーチング周辺の埋戻しが十分に行われ地盤面が長期にわたり安定して存在する場合、フーチング前面の地盤抵抗を期待する場合があることから、底版前面受働抵抗の有無の影響についても確認した（Case-01：無, Case-02：有）。

図-4に解析方法のイメージを示す。自重解析



(a) 線形弾性 (b) 非線形弾性

図-2 杭部材のせん断に対するモデル

表-1 地盤条件一覧表

	N 値	単位重量	粘着力	内部摩擦角	地震時変形係数
	(回)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(度)	(kN/m ²)
粘性土①	5	17.0	30	0	28,000
砂質土①	10	17.0	0	27	56,000
粘性土②	5	17.0	30	0	28,000
砂質土②	15	19.0	0	30	84,000
砂質土③	50	19.0	0	40	280,000

表-2 解析ケース

	柱	底版	フーチング 前面 受働抵抗	杭		杭周面バネ			
				曲げ	せん断	水平方向	鉛直方向 (周面摩擦)	杭頭バネ (考慮 非線形)	杭先端 ローラー
Case-00	線形	剛部材	無視	非線形	線形	非線形	---	考慮 (非線形)	鉛直 ローラー
Case-01	線形	剛部材	無視	非線形	非線形	非線形	非線形	無	バネ
Case-02	線形	剛部材	考慮	非線形	非線形	非線形	非線形	無	バネ

(Step-1)を行い、自重解析による変位、鉛直力を引き継いだ状態で非線形漸増解析 (Step-2) を行う。一般的な質点に震度を乗じる荷重増分解析 (荷重制御) では解析が収束しないケースもあるため、柱天端の節点1に1mの強制変位を与える変位増分解析 (変位制御) とした。

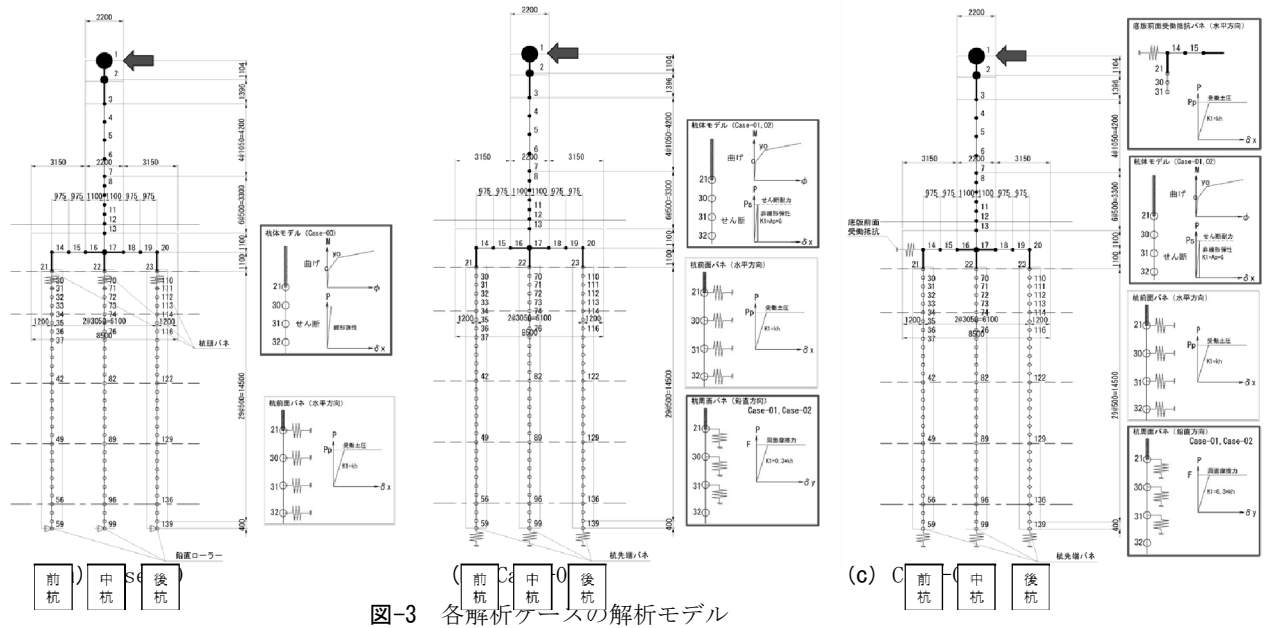


図-3 各解析ケースの解析モデル

(3) 解析結果

a) 橋脚天端でのP-δ曲線

図-5に各ケースの橋脚天端のP-δ曲線及び杭基礎の破壊状態を示す。破壊状態の一覧表の破壊順序の各番号は、P-δ曲線の図中内の各番号と対応している。

現行設計モデル（Case-00）では、前杭が押し込み力に達する（図中③）と、P-δ曲線が水平となり、降伏に至った。Case-01、Case-02では、中杭、後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する（図中③）と、P-δ曲線が水平となり、降伏に至った。

現行設計モデルでは、後杭が引抜きに達した段階でP-δ曲線に剛性低下がみられる一方で、杭部材でのせん断破壊を考慮したCase-01、Case-02では、早い段階で杭先端に引抜きが生じるものの、P-δ曲線に剛性低下は見られなかった。これは、Case-01、Case-02の杭の鉛直方向せん断ばね（周面摩擦力）が荷重を保持しているため、Case-00のような剛性低下が生じなかったと考えられる。

b) せん断破壊時の荷重の再配分について

Case-01は橋脚天端変位0.086m時に前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する。その後、前杭はせん断力を保持できないため、前杭が負担していたせん断力が中杭、後杭に分配され、中杭、後杭のせん断力の増加率（勾配）が大きくなる（図-6）。この解析結果から、本解析では荷重の再配分が考慮できていると考えられる。なお、中杭、後杭の解析結果は重なるため、見かけ上、中杭の結果のみに見えている。

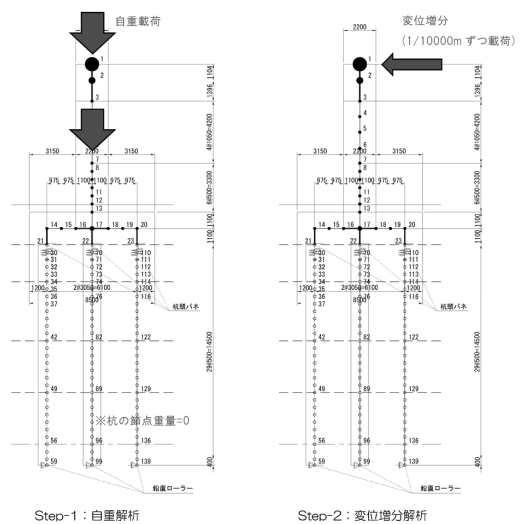
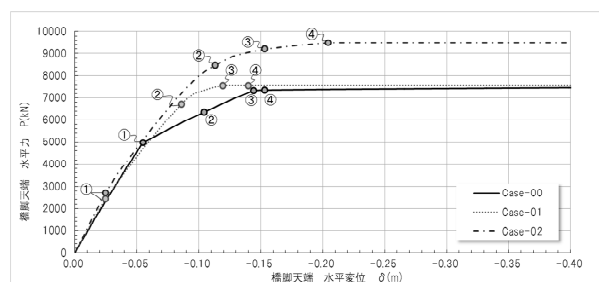


図-4 杭部材のせん断に対するモデル



(a) 橋脚天端のP-δ曲線

破壊順序	Case-00	Case-01	Case-02
①	後杭が引抜きの上限に達する	後杭の杭先端で引抜きの上限に達する	後杭の杭先端が引抜きの上限に達する
②	後杭と中杭の地中部で杭体曲率が降伏に達する	前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する	前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する
③	前杭が押し込みの上限に達する	中杭と後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する	中杭と後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する
④	前杭の地中部で杭体曲率が降伏に達する	前杭の杭先端が押し込みの上限に達する	前杭の杭先端が押し込みの上限に達する

(b) 杭基礎の破壊状態

図-5 各ケースの橋脚天端でのP-δ曲線及び杭基礎の破壊状態

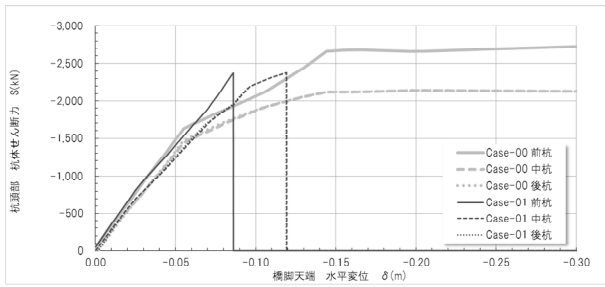


図-6 杭頭部杭体せん断力と橋脚天端水平変位の関係 (Case-00及びCase-01)

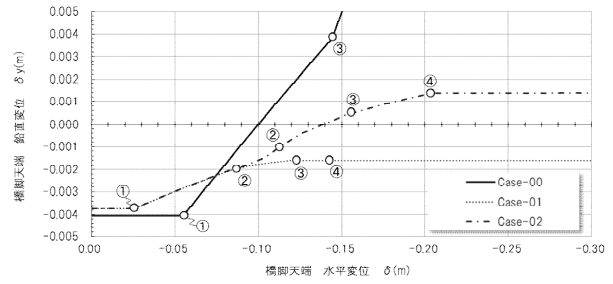
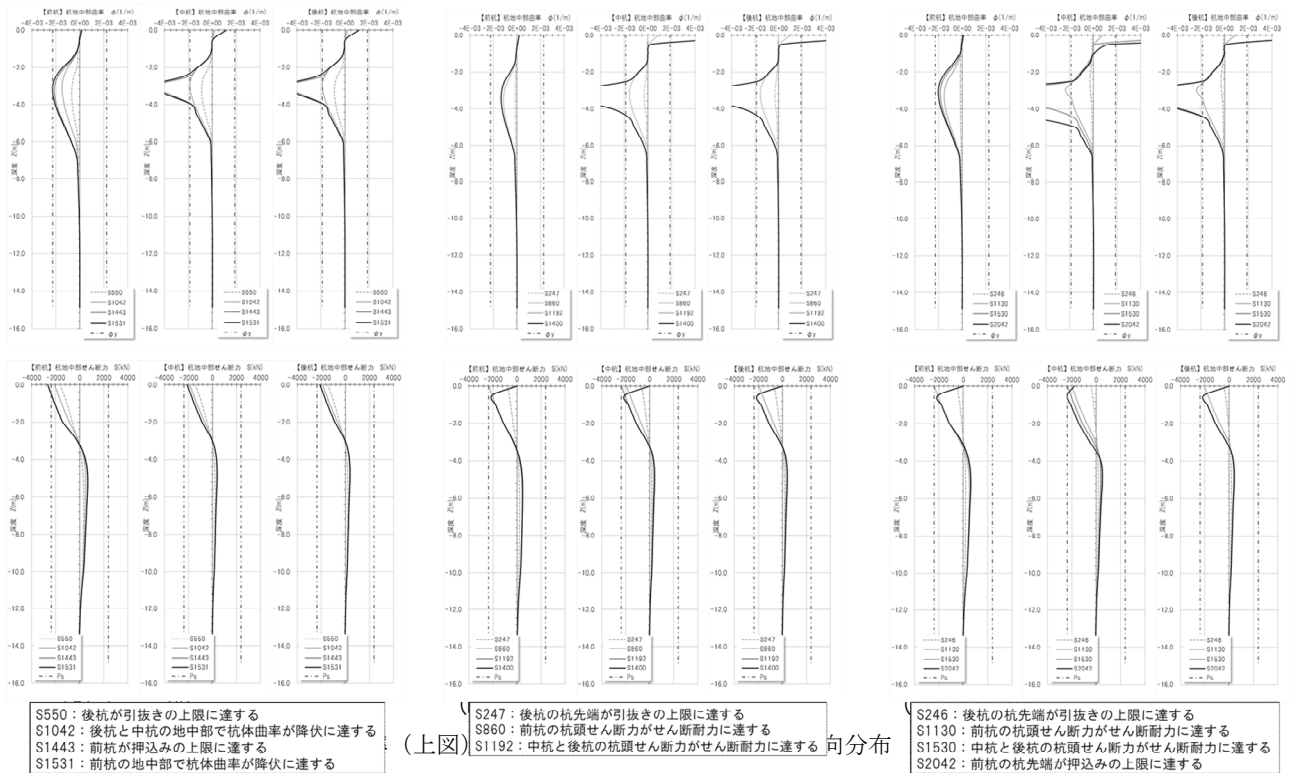


図-7 各ケースの鉛直変位と水平変位の関係



S550: 後杭が引抜きの上限に達する
 S1042: 後杭と中杭の地中部で杭体曲率が降伏に達する
 S1443: 前杭が押込みの上限に達する
 S1531: 前杭の地中部で杭体曲率が降伏に達する

S247: 後杭の杭先端が引抜きの上限に達する
 S860: 前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する
 S1192: 中杭と後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する

S246: 後杭の杭先端が引抜きの上限に達する
 S1130: 前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する
 S1530: 中杭と後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達する
 S2042: 前杭の杭先端が押込みの上限に達する

(上図) 向分布

c) 橋脚天端の鉛直変位と水平変位との関係

図-7に橋脚天端の鉛直変位と水平変位の関係を示す。図中内の各番号は、図-5の破壊状態の一覧表の破壊順序の各番号と対応している。どのケースも、後杭が引抜きの上限に達する(図中①)と、橋脚天端の鉛直変位が増加し始めることが分かる。これは、P-δ曲線の剛性変化の理由と同様と考えられる。また、Case-00とは異なり、Case-01、Case-02では、杭頭がせん断破壊した後(図中③以降)、鉛直方向変位は殆ど変化しないことも分かる。これは、水平変位の増加に伴い、杭とのせん断結合が切れた底版が水平方向に変位するためと考えられる。

d) 杭体の曲率及びせん断力の深さ方向分布

図-8に杭体の曲率及びせん断力の深さ方向分布を

示す。なお、図中凡例のSは解析Stepを意味し、図に示したStepで生じた特徴的な事象を図の□囲いで示している。どのケースもせん断力は杭頭で卓越し、曲率は深さ3.0m付近で卓越するという同様の分布を示し、想定どおり、杭頭でのせん断破壊が生じたと考えられる。

3. 解析結果に対する考察

本章では、2章での結果を踏まえた考察を各節に示す観点で述べ、杭部材のせん断破壊が先行する場合の杭基礎の耐震性能評価を行う上での知見を整理する。

(1) せん断破壊時の各杭の状態について

新設橋の設計では、組杭のいずれかの杭（概ね前杭のせん断破壊が先行）がせん断破壊に達した時を杭基礎のせん断破壊としているが、**図-5**に示したように、前杭がせん断破壊に達しても、中杭、後杭がせん断破壊に達するまではP- δ 曲線に明確な折れ点は見られなかったことから、既設杭基礎のせん断照査では、**1章**で述べた降伏の目安と同様に、全ての杭がせん断破壊に達した時を杭基礎全体のせん断破壊として問題ないと考えられる。ただし、Case-01、Case-02では、**表-2**に示すように、杭体の周面摩擦及び杭先端バネを非線形でモデル化しており、杭体がせん断破壊しても杭の軸力伝達機能並び杭先端地盤の鉛直抵抗は低下しないと仮定している。この仮定が成立するかどうかは検証の必要があると考える。また、全ての杭がせん断破壊に達した後は、P- δ 曲線は低下するはずであるが、低下しなかった。その点については、本章3節にて詳述する。

(2) 杭基礎のフーチング前面の受働抵抗の考慮について

フーチング前面の受働抵抗を期待する Case-02 では、その効果により、前杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達するタイミングが Case-01 よりも遅い(**図-6**と**図-9**の比較より)。このことから、せん断破壊が先行する場合においても、フーチング前面土砂の受働抵抗の効果は大きいことが想定される。

また、「平成 24 年道路橋示方書IV下部構造編」において、フーチング周辺の埋め戻しが十分に行われた地盤が長期にわたり安定して存在する場合、設計においてフーチング前面の受働抵抗を期待しても良いとされていることから、フーチング根入れ部分の周辺地盤が完全に締め固められた場合や、洗掘されないように根固めされた場合、あるいは下層の地盤の液状化や軟弱化によって周辺地盤が移動しないことが確かめられている場合等、フーチング前面地盤の受働抵抗が期待できる条件が整っている場合には、せん断破壊が先行する場合においても、底板前面土砂の受働抵抗を設計上考慮した方がより合理的な設計につながるものとする。

(3) せん断剛性の低下に伴う曲げ剛性の低下を考慮した検討について

2章での結果の中で、杭頭部でせん断破壊が生じると、せん断剛性、曲げ剛性ともに剛性は低下するため、杭体に作用する曲率、せん断力ともに応答値は増加しなくなるはずであるが、Case-01、Case-02

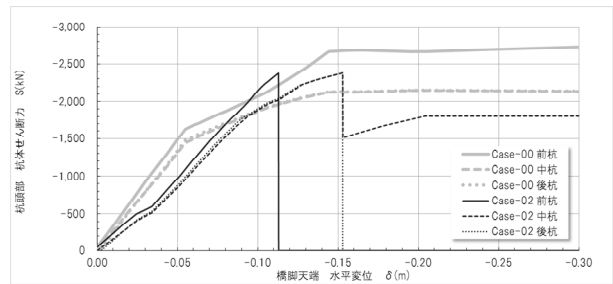


図-9 杭頭部杭体せん断力と橋脚天端水平変位の関係 (Case-00及びCase-02)

- 1) Case-02 で変位漸増解析を行い、前杭杭頭でせん断破壊が生じた Step で解析を止める。
- 2) Case-02 の解析モデルで、前杭の杭頭部のみ、断面積 A、断面二次モーメント I、ヤング係数 E、せん断弾性係数 G の値を初期値の 1/10000 とする。この時、曲げ、せん断とも応答値が増加しないよう、解析上、非線形特性はバイリニア（微小な応答値を保持）とする。
- 3) 2) で変更した解析モデルに 1) の応答値（変位、断面力）を引き継いだ状態で、変位漸増解析を再開する。
- 4) 1) と同様に、中杭、後杭の杭頭でせん断破壊が生じた Step で解析を止める。
- 5) 2) で変更した解析モデルから更に、中杭、後杭の杭頭部の剛性を 2) と同様に初期値の 1/10000 とし、変位漸増解析を再開する。
- 6) 5) で得られた P- δ 曲線と**図-5(a)**で示した Case-02 の P- δ 曲線との比較を行う。

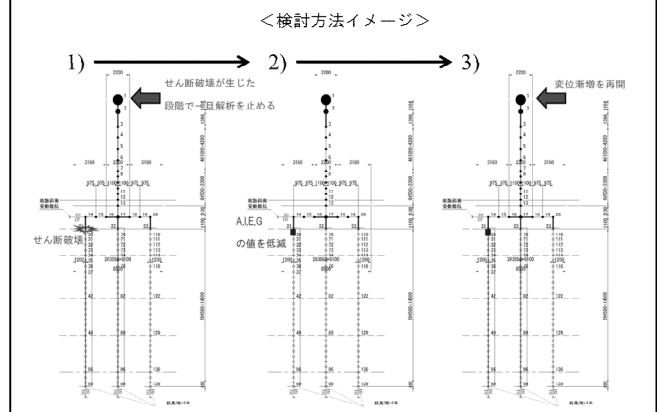


図-10 せん断剛性の低下に伴う曲げ剛性の低下を考慮した検討方法

の応答値を見ると (**図-8**)、杭頭部でせん断破壊後も曲率が増加していた。これは、解析モデル上、せん断剛性の低下と曲げ剛性の低下が連動していないためと考えられる。

そこで、本節では、Case-02を対象にせん断剛性の低下に伴う曲げ剛性の低下を考慮した検討を行う。

a) 検討方法

検討方法は**図-10**に示すとおりである。

b) 検討結果

図-11、図-12に本節a)の検討で得た解析結果を示す。なお、図中の黒実線の解析結果が途中で終了しているのは、中杭と後杭のせん断破壊が生じた段階以降、解析が不安定となったためである。図中内の各番号は、図-5の破壊状態の一覧表の破壊順序の各番号と対応している。

前杭でせん断破壊が生じ、中杭・後杭の杭頭でせん断破壊が生じるまで（図中の③付近まで）の挙動は、橋脚天端の水平力（図-11）及び橋脚天端の鉛直変位（図-12）のどちらの観点でも、Case-02と同様の結果となることが確認できた。

本検討では、全杭がせん断破壊した後（図中の④以降）の挙動を確認することができなかったものの、全ての杭でせん断破壊が生じるまで（図中の③付近まで）は、荷重低下が生じない可能性が確認できた。また、このことは、本章1節でも述べた、「全ての杭がせん断破壊に達した時を杭基礎全体のせん断破壊として問題ない」という考察を改めて確認できたとも考えられる。

4. まとめ

既設基礎杭に多い場所打ち杭を対象として、杭部材のせん断破壊が先行する場合に着目し、杭部材のせん断破壊を想定した梁バネモデル（Case-01、Case-02）による非線形漸増解析により挙動検証を試み、次のような結果と考察を得た。

(1) 解析結果

Case-00では、前杭が押し込み力に達すると、P- δ 曲線が水平となり、降伏に至った。Case-01、Case-02は、中杭、後杭の杭頭せん断力がせん断耐力に達すると、P- δ 曲線が水平となり、降伏に至った。

Case-00では、後杭が引抜きに達した段階でP- δ 曲線に剛性低下がみられる一方で、杭部材でのせん断破壊を考慮したCase-01、Case-02では、早い段階で杭先端に引抜きが生じるものの、P- δ 曲線に剛性低下は見られなかった。これは、Case-01、Case-02の杭の鉛直方向せん断ばね（周面摩擦力）が荷重を保持しているため、Case-00のような剛性低下が生じなかったと考えられる。

(2) 考察

新設橋の設計では、組杭のいずれかの杭（概ね前杭のせん断破壊が先行）がせん断破壊に達した時を杭基礎のせん断破壊としているが、本検討において、

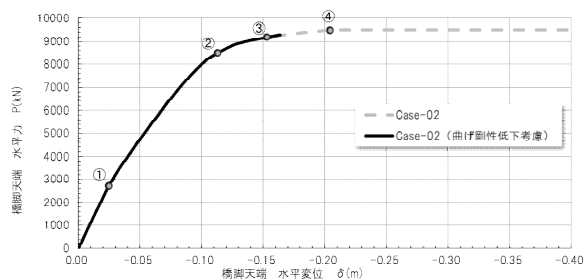


図-11 橋脚天端でのP- δ 曲線(Case-02及び曲げ剛性低下を考慮したCase-02)

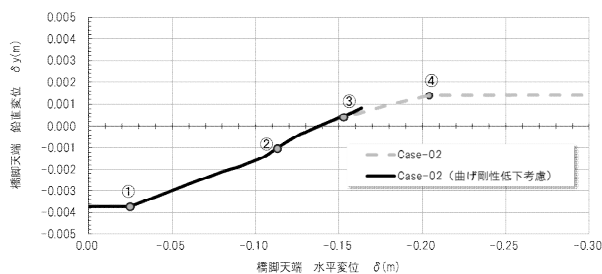


図-12 橋脚天端での鉛直変位と水平変位の関係(Case-02及び曲げ剛性低下を考慮したCase-02)

前杭、中杭、後杭の全ての杭がせん断破壊に達するまではP- δ 曲線に明確な折れ点は見られなかったことから、既設杭基礎のせん断照査は、曲げの照査同様、全ての杭がせん断破壊に達した時を杭基礎全体のせん断破壊として問題ないと考えられる。ただし、本解析では、杭体の周面摩擦及び杭先端バネを非線形でモデル化しており、杭体がせん断破壊しても杭の軸力伝達機能並び杭先端地盤の鉛直抵抗は低下しないと仮定している。この仮定が成立するかどうかは検証の必要があると考える。

(3) 今後の展望

杭基礎の挙動評価では、本検討のような解析的検討を実際の挙動と比較し、解析結果の妥当性や解析上の仮定（杭体がせん断破壊後も地盤の鉛直抵抗は低下しないこと）の成立性を確認することが重要となる。今後、載荷実験結果との比較により妥当性の検証を行う予定である。また、せん断剛性の低下と曲げ剛性の低下との連動もさらに検証の必要がある。

謝辞：本研究は、(国研)土木研究所、首都高速道路(株)との共同研究の一環として実施したものであり、関係各位からは貴重な意見を頂いた。ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株、中日本高速道路株、西日本高速道路株:設計要領第二集橋梁保全編, 2020.