

鉄道高架橋の構造・基礎形式が地震後の角折れ等に及ぼす影響

神田 政幸* 出羽 利行**
 館山 勝*** 谷口 善則#

Relationships Between Angular Rotation of Railway Structures and Type of Structures, Foundations After the Earthquake

Masayuki KODA Toshiyuki DEWA
 Masaru TATEYAMA Yoshinori TANIGUCHI

The differential displacements between railway structures are termed as the angular rotation and the stagger in railway. They are the key indicators in design, construction, and maintenance for the railway structures. We focused on the long term passed railway structures, which received a large earthquake, and investigated the angular rotations and differential displacements. We analyzed and verified the relationships between types of structures, foundations and them.

キーワード：角折れ，目違い，不同変位，支持杭，摩擦杭，直接基礎

1. はじめに

鉄道の橋梁や高架橋の構造物間の不同変位量は角折れ・目違い（図1）と称し、構造物の設計・施工や供用中の維持管理において重要な指標となる。一般に、角折れ・目違いは構造物基礎の不同沈下に起因することが多く、角折れ・目違いと基礎の支持特性との関係等を実測データに基づき明らかにすることの意味は大きい。特に最近の新設線では、保守軽減を目的とした省力化軌道の敷設が多いことに加えて、既設線においても速度向上が図られる場合や乗り心地の観点からも角折れ・目違いを抑制することは益々重要となっている。

角折れ・目違いと基礎の支持特性との関係等は、過去に数例の調査結果が報告されており、いずれも支持杭に比べて摩擦杭が角折れ・目違いに対して有利な構造であるとしている^{1)~4)}。しかしながら、過去の調査はいずれも20年以上前で、建設後10年以内の期間に実施され

たものである。したがって、それ以上経年した場合や地震などの大きな外力を受けた場合の実構造物の角折れ・目違いと基礎の支持特性との関係等は不明で、要因分析も十分とは言えない。

本報告では、比較的長期の年数が経過し、調査直前に地震を経験した鉄道の橋梁や高架橋に着目し、角折れの他、不同沈下量を調べ基礎の支持特性との関係等について明らかにすることを目的として、実構造物の水準測量及び得られた結果のデータ分析を実施した。対象とした構造物は、建設後約30年経過し、その間に新潟中越地震（2004年10月23日発生）を経験した上越新幹線の高架構造物である。水準測量は、2005年10月～2006年1月に実施された。本報告では、測量結果から算出した角折れ・不同沈下量について、構造形式、基礎の支持方式、杭の施工法などに着目した分析結果について報告する。

2. 過去の調査概要^{1), 2)}

上越新幹線では、新潟平野の軟弱地盤帯で広域的に地盤沈下が発生する地域において、摩擦杭や不完全支持杭で支持される高架上に保守余裕の少ないスラブ軌道が採用されたことから、しゅん功後、角折れ・不同沈下量の調査が実施されている。その調査では、長岡～新潟間に建設された高架橋を対象に、しゅん功後10年間で合計3回（1976年、1981年、1984年）の水準測量が実施されている。その結果から高架橋の構造形式や基礎の支持方式（支持杭、不完全支持杭、摩擦杭）による角折れ・不

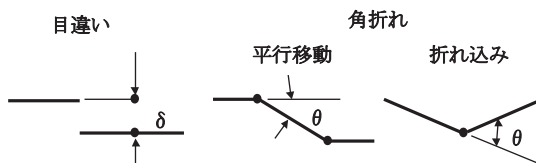


図1 角折れ・目違い（鉛直）

* 構造物技術研究部（基礎・土構造）
 ** 西日本旅客鉄道株式会社（前 構造物技術研究部）
 *** 構造物技術研究部
 # 東日本旅客鉄道株式会社

特集：基礎構造物の設計技術

同沈下量の違いなどが考察されており、構造形式では地中梁で連続的に繋げた背割構造系が、基礎の支持方式では摩擦杭が角折れ・不同沈下に対して優位であることが示されている。

3. 上越新幹線構造物の杭の設計の考え方

最初に、上越新幹線構造物の杭基礎の設計について、鉛直支持力の考え方を示す。上越新幹線の工事誌⁵⁾によれば、当時は設計に先だって杭の鉛直載荷試験が実施されており、その結果を考慮し、表1に示す支持方式別に許容鉛直支持力の標準値が定められた。

摩擦杭は、継ぎ杭の限界から標準杭長を25mとし、鉛直載荷試験⁶⁾から降伏支持力を730kN/本としている。したがって、摩擦杭の許容鉛直支持力については、降伏支持力を設計鉛直支持力とし、これに安全率 F_s を考慮し定めたものである。

一方、支持杭についても鉛直載荷試験（B支持杭区間である263k180m、杭長12m、杭径400mm）が実施されている⁵⁾。杭径400mmの杭の降伏支持力が1320kNで、そのうち先端が6割、杭周面で残りの4割を負担している結果を得ている。杭径350mmに換算すると、降伏支持力は約1068kNとなる。したがって、表1に示す支持杭の設計鉛直支持力は降伏支持力の70%程度であり、これに安全率 F_s を考慮し許容鉛直支持力を定めたものである。

鉛直支持力について現行の設計式で求めたものと対比することで、当時の設計方法が現行設計に比べて、どの程度安全側に配慮されていたかを試算してみる。

まず、摩擦杭について述べる。摩擦杭の載荷試験位置での柱状図を用いて現行設計標準⁷⁾に従い最大周面支持力 R_f と基準先端支持力 R_p を算定すると、それぞれ $R_f=1328kN$ 及び $R_p=63kN$ を得る。長期使用限界状態を考えた場合、打込み杭の地盤抵抗係数 $f_{rf}=0.30$ 、 $f_{rp}=0.30$ を

それぞれ R_f と R_p に乗じて、設計鉛直支持力 $R_{vd}=416kN$ を得る。これに対し、上越新幹線の設計で用いられた設計値は、極限鉛直支持力 $Q'_p=730kN/本$ であり、当時の安全係数 $F_s=3$ （常時）で除すると、許容鉛直支持力243kNを得る。当時の許容鉛直支持力243kNに対して現行基礎標準では $R_{vd}=416kN$ であることから、現行設計の58%であり、建設当時は安全側に支持力を評価し、設計が実施されていたと言える。

一方、支持杭については、同一条件の載荷試験の報告書等がなく現存する情報だけでは摩擦杭と同様な検討ができない。しかしながら、先端支持力は現行設計標準⁷⁾で基準先端支持力 $q_p=300N$ （ N : N 値、打込み杭、先端閉塞杭、砂質土）と示されており、上越新幹線の支持杭の設計で用いられたS49基礎標準¹¹⁾の支持力算定式（表1再掲、 $Q_p=300N \cdot A_p$ ）と同一である。したがって、当時の設計方法でも現行の設計方法でも、どちらで算定しても先端支持力については同じ値が得られる。一方、周面支持力については、当時の設計では考慮されていない。これは、周面と先端の両者を考慮する現行の設計方法に比べて安全側となっている。ここで、先に述べたように載荷試験結果によると先端支持力が60%、周面支持力が40%の分担割合であった。さらに、安全係数については、当時の安全率 $F_s=3$ と、現行の地盤抵抗係数 $f_{rf}=0.30$ 、 $f_{rp}=0.30$ は同じ安全性を与えることも併せて考えれば、当時（先端のみ）の支持杭の許容鉛直支持力は、現行（先端+周面）の設計鉛直支持力の約60%と解釈できる。したがって、支持杭もかなり安全側の設計がなされていたと言える。

以上をまとめると、工事誌等から上越新幹線構造物の杭基礎の許容鉛直支持力は摩擦杭、支持杭ともに実際の杭の鉛直支持力よりもかなり安全側の値が用いられ、現行設計基準⁷⁾で算定される設計鉛直支持力の60%程度の値であったと推察される。

4. 角折れ・不同沈下量の調査^{8), 9)}

4.1 調査区間

本調査では、図2に示すA～Dの4区間（A区間 摩擦杭：約3.9km、B区間 支持杭：約7.1km、C区間 直接基礎：約0.4km、D区間 支持杭：約2.1km、合計延長約13.5km）で水準測量を実施した。また、同図には中越地震の震源及び地震動を併せて示す。図3には、各区間のうちの一部の地質縦断図を示した。上越新幹線は、新潟駅に近づくにつれて、河川堆積物、海成粘土等から形成された軟弱地盤地帯に建設されている。図2のうちA、B区間は過去の3回の調査が実施された区間と同じ区間である。過去の調査では、これらのA、B区間以外に、長岡～燕三条間および燕三条～新潟間の不完全支持杭の2

表1 上越新幹線高架橋の杭の許容鉛直支持力の標準値[※]

地域区分	軟弱地盤	普通地盤 ¹⁾
杭径 (mm)	400	350
支持方式	摩擦杭 ²⁾	完全支持杭
設計鉛直支持力 Q の算定方法	杭の鉛直載荷試験	杭先端の支持力式 $Q_p=300NA_p$ N : 杭先端 N 値25 A_p : 杭先端面積 (m ²)
設計鉛直支持力 Q (kN/本)	730	720
許容鉛直支持力 (kN/本) ³⁾	243	240

※参考文献5)を加筆、修正。

- 1) 支持層が浅く、比較的地盤強度の高い中間層を有する地盤。
- 2) 軟弱地盤では摩擦杭の他に不完全支持杭も使用したが、ここでは省いた。
- 3) 常時の安全率 $F_s=3$ 。

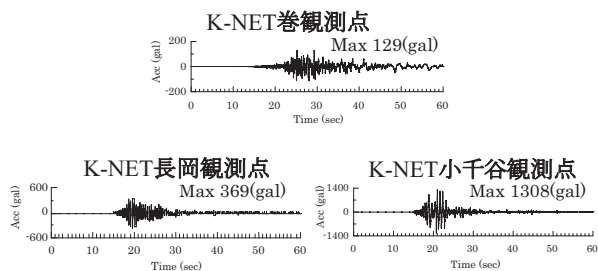
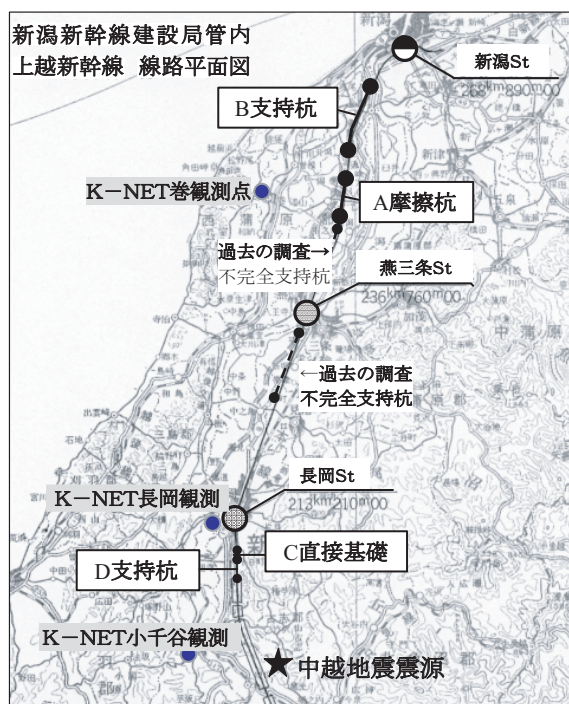


図2 調査位置および中越地震時の地震動

区間の調査が実施されているが、本調査では実施していない。C、D区間は今回の調査で新たに追加した区間である。中越地震の震源から遠く比較的地震動の小さいA、B区間に対して、震源から近いC、D区間の2つにグルーピングできる。

4.2 調査方法

構造形式は以下のように定義した(図4)。背割構造系とは、背割式高架橋(ブロック端の柱が隣接して設置され、2つの単柱が同一の基礎フーチング上に載っている形式)と隣接するゲルバー桁までを含めた区間とする。上越新幹線での背割式高架橋は、地中梁で各高架橋ブロックが連続するように繋がれた構造である。単純桁構造系とは、ほぼ同一桁長の単純桁とラーメン橋台が連続する区間とする。一般橋梁系とは、背割構造系と単純桁構造系以外の区間でゲルバー式高架橋や桁、ラーメン橋台、橋脚を含めたものである。

背割式高架橋については構造物間の境界と柱の位置で、ゲルバー式高架橋やラーメン橋台、橋梁については支点の位置で、軌道スラブ上を測点として水準測量を行った

表2 統計処理に用いた標本数

区間	キロ程	基礎の支持方式	構造形式			合計
			背割構造系	単純桁構造系	一般橋梁系	
A	249k160 ~ 253k094	摩擦杭	57	150	13	220 (38%)
B	257k045 ~ 264k170	支持杭	78	195	46	319 (55%)
C	208k254 ~ 208k695	直接基礎	13	0	0	13 (2%)
D	206k073 ~ 208k171	支持杭	29	0	0	29 (5%)
合計			177 (31%)	345 (59%)	59 (10%)	581

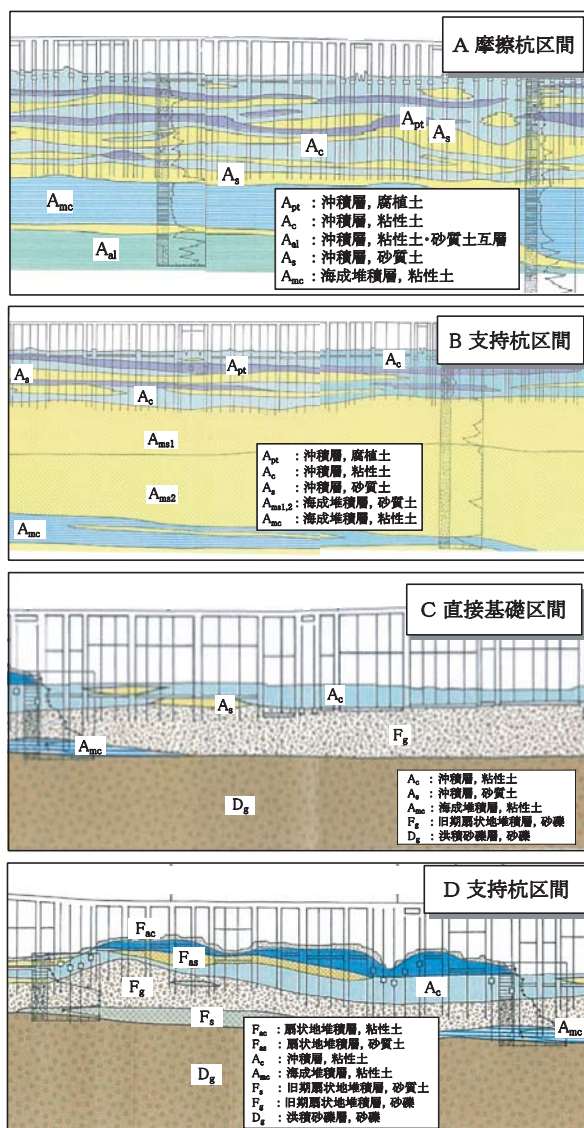


図3 地質縦断面図

(図4, 図5)。ただし、C、D区間は、中越地震後に軌道スラブの補修が行われているため、防音壁下のダクト壁天端を測点とした。得られた測定値をもとに、連続する3測点の測定値を順次使用して、それぞれの相対角および相対変位を算出し、角折れと不同沈下量を求めた(図

特集：基礎構造物の設計技術

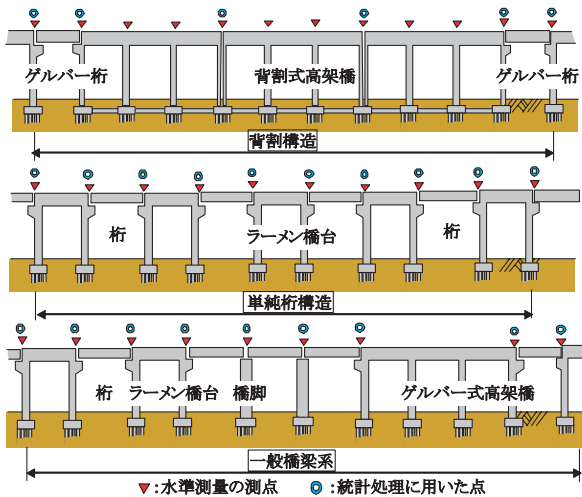


図4 構造形式と水準測量位置の関係



図5 水準測量の状況

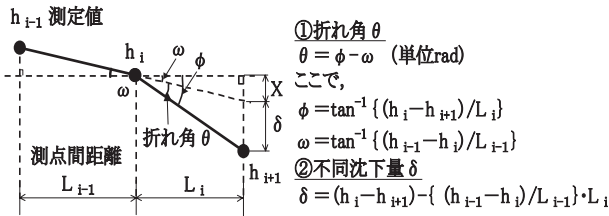


図6 角折れ及び不同沈下量の算出方法

6). 得られた角折れ・不同沈下量は、以下の①～③に着目して統計処理を実施した。統計処理に用いた標本数を表2に示す。

- ① 高架橋の構造形式（背割構造系，単純桁構造系，一般橋梁系）と不同沈下量の関係
- ② 基礎の支持方式（摩擦杭，支持杭，直接基礎）と角折れの関係
- ③ 杭の施工方法（打込杭，場所打ち杭）と角折れおよび不同沈下量の関係

5. 調査結果

5.1 角折れの最大値

各区間の角折れの最大値を表3に示す。中越地震の震源から遠く、比較的地震動の小さかったA区間とB区間においては、制限値 ($\theta=3.5 \times 1/1000\text{rad}$: 桁長 $L < 30\text{m}$)⁷⁾ を超過しているのは、B区間の1箇所 ($\theta=4.52 \times 1/1000\text{rad}$)

表3 角折れの最大値

		折れ角 (最大値)
A	摩擦杭	2.20
B	支持杭	4.52
C	直接基礎	5.96
D	支持杭	2.86
単位 (1/1000rad)		

だけであった。中越地震の震源から近かったC区間とD区間においては、制限値を超過している箇所は、Dの支持杭区間では0箇所、Cの直接基礎区間では3箇所 ($\theta=5.96 \times 1/1000\text{rad}$, $3.57 \times 1/1000\text{rad}$, $3.02 \times 1/1000\text{rad}$) であった。

5.2 構造形式別の分析

高架橋の不同沈下量について、構造形式に着目して統計処理を行った。角折れの算定には測点間距離が関係してくるが、構造系別に分類した場合には、構造系毎のスパンの違いが角折れ量へ影響するため、相対変位の指標を角折れとせず、不同沈下量として整理した。

A, B区間における構造形式別の不同変位量（不同沈下量）の頻度分布を図7に示す。構造形式別の不同沈下量は、背割構造系，単純桁構造系，一般橋梁系の順に平均値及び標準偏差が小さい結果となった。この結果は、過去の調査^{1), 2)}と一致しており、背割構造系が角折れ・目違いに対して有利な構造であることを示している。一般橋梁系では、24mm以上の大きな不同沈下が全体の20%程度生じていた。この不同沈下が大きな箇所を調べると、大規模な河川橋梁や比較的長スパンの桁のものが多かった。逆に、一般橋梁系の中でもラーメン高架橋と調整桁との組み合わせで同一構造が連続する区間では、さほど大きな不同変位は生じていなかった。

高架橋は軟弱地盤上に建設されたため、角折れ・目違いを抑える目的で、各ブロック間の不同変位の緩和に有利と考えられた地中梁を有する背割式高架橋が選定されている。そして、過去の調査で、実際に背割構造系が角折れに対して最も有利な構造であるという事実が確認されていた^{1), 2)}。今回の調査は、大きな地震を経験し、建設後約30年経過した時点で行ったものであり、大きな外

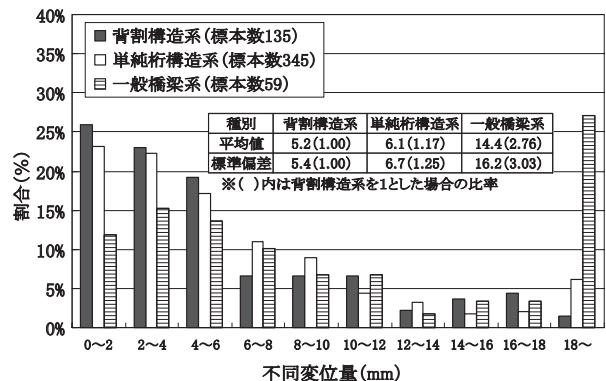


図7 構造形式別の不同沈下量

力及び長期的な作用が働いた場合であるが、このような場合でも、背割式高架橋が角折れ・目違いといった構造物間の相対変位を抑制するという目的に対して、良好に機能している事実を確認できたと言える。

5.3 基礎の支持方式別の分析

基礎の支持方式（摩擦杭，支持杭，直接基礎）に着目し，角折れについて統計処理を行った。なお，高架橋の構造形式の違いによる影響を排除するために，構造形式毎に分けて検討した。また，構造形式毎に分けることで，スパンがほぼ同一となることから，相対変位の指標として角折れで整理した。

背割構造系について，基礎の支持方式別の角折れの頻度分布を図8に示す。摩擦杭，支持杭，直接基礎の順に角折れの平均値及び標準偏差が小さい。支持杭に比べて摩擦杭の角折れが小さいという結果は，単純桁構造系，一般橋梁系でも同様の結果が得られている。摩擦杭は，支持杭に比べて沈下に対して杭頭反力の発揮が明確な上，3章で述べたように十分安全側の設計支持力が設定されていたため，構造物間の相対変位である角折れは小さくなったものと想定できる。支持杭区間同士（B，D区間）を比べるとD区間の方が角折れの平均値及び標準偏差が大きい。これはB区間に比べてD区間の方が震源地に近かったことが影響している可能性が考えられる。また，直接基礎は杭基礎に比べて角折れの平均値及び標準偏差が大きいことがわかる。中越地震での鉄道構造物の被害を調べた結果では，設計上は良質な支持層として取扱われる砂礫層に支持させた直接基礎形式の橋脚が数

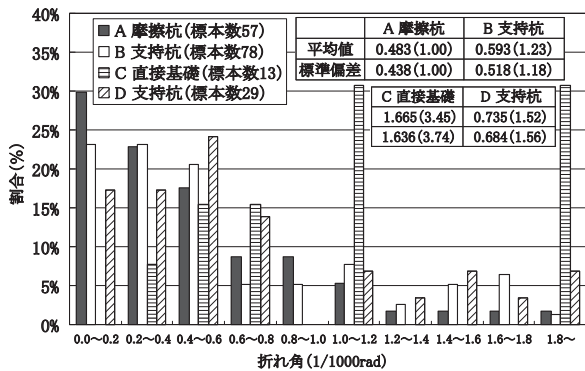


図8 基礎の支持方式別の角折れ（背割構造系）

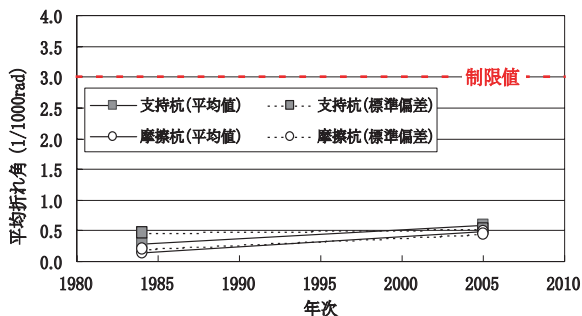


図9 背割構造系の折れ角の推移

cmの沈下を生じたと報告されている¹⁰⁾。今回の調査結果でも，N値30程度の砂礫層で支持されている直接基礎であるが，杭基礎に比べて角折れが明らかに大きい結果を得た。これより直接基礎のような浅い基礎は，総じて，沈下に対して敏感であると考察できる。

背割構造系における角折れの推移を図9に示す。過去の調査に比べて角折れは若干大きくなっているが，その大きさは，角折れの制限値に比べて極めて小さい領域である。図9の勾配を概観すると，過去の調査（地震前）と今回の調査（地震後）との角折れの増分は，支持杭の方が小さい傾向が見られる。一方で，それでもなお絶対値は摩擦杭の方が小さい。このことから，中越地震で比較的大きな地震動を受けたが，支持杭に比べて摩擦杭だけが極端に大きな角折れを生じたことはなかったと言える。

以上の結果より，比較的大きな地震を経験し，建設後約30年経過した橋梁や高架橋に生じている角折れは，制限値に対して極めて小さいことがわかった。また，支持杭に比べて摩擦杭は不同沈下・角折れを小さくする点で優れており，そのことは地震が作用した場合でも覆されることでは無いことがわかった。

5.4 杭の施工方法別の分析

支持杭区間（単純桁構造系）における杭の施工方法別の角折れの頻度分布を図10に示す。統計処理に用いた区間（黒鳥B，金巻BI，須上B，金巻7号B，大割BI，島原神田B，蓮方BI，北場B，五年BI）は，場所打ち杭区間と打込み杭区間が交互に存在しており，両者とも同じような地盤条件である。したがって，統計処理の結果には地盤条件の差異の影響はほとんど寄与せず，施工方法の差によるものとみなせると判断した。

場所打ち杭に比べて，打込み杭の方が角折れの平均値及び標準偏差が小さい結果である。過去の調査において

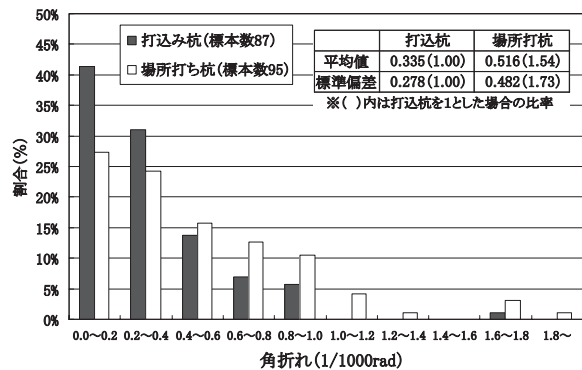


図10 杭の施工方法別の角折れ（支持杭，単純桁構造系）

表4 杭種別毎の不同沈下量（過去の調査）

杭種別	不同沈下量 平均値 (mm)	比率
打込み杭	2.54	1.00
場所打ち杭	3.29	1.30

特集：基礎構造物の設計技術

も、場所打ち杭の不同沈下量は打込み杭の不同沈下量に比べて3割大きな値であった(表4)。打込み杭は先端が杭打設時に締固められるのに対して、場所打ち杭は掘削時の応力解放の影響や土砂の沈降により発生するスライムが残る。これらの影響により、場所打ち杭の角折れは打込み杭よりも大きくなるものと推測される。

6. まとめ

調査結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 調査対象箇所では、過去の調査に比べ角折れは増加していた。ただし、その大きさは小さく十分に制限値内にあった。
- (2) 調査対象箇所では、背割構造系、単純桁構造系、一般橋梁系の順に不同沈下量の平均値及び標準偏差が小さく、背割構造系が角折れ・目違いに対して有利な構造であった。なお、しゅん功から10年以内に実施された過去の調査^{1)~2)}と同様の結果であった。
- (3) 調査対象箇所は、比較的大きな地震を経験し建設後約30年経過した橋梁、高架橋だが、支持杭に比べ摩擦杭の方が角折れの平均値及び標準偏差が小さかった。このことは、当該箇所の過去の調査^{1)~2)}及び他の事例^{3)~4)}と同様の結果である。また、直接基礎は杭基礎よりも角折れの平均値及び標準偏差が大きかった。
- (4) 単純桁構造系の支持杭区間において、場所打ち杭に比べて打込み杭の方が角折れの平均値及び標準偏差が小さかった。このことは、過去の調査^{1)~2)}と同様の結果である。

以上の角折れ及び不同沈下量に関する分析結果は、調査対象箇所の杭基礎の鉛直支持力に対して、摩擦杭及び支持杭の許容鉛直支持力がかなり安全側に設定されていること、さらに各地層を貫き周面支持に依存する摩擦杭の周面支持力は、先端支持に依存する支持杭よりも沈下に対して信頼性が高いものであることが要因と考えられる。

7. おわりに

建設後30年経過し中越地震を経験した時点での調査においても、過去の調査と同様に、摩擦杭は支持杭に比べて角折れ・不同沈下が小さく、地中梁で繋がれた背割構造系が不同沈下に対して有利であるとの結果を得た。したがって、過去に得られた摩擦杭や地中梁の不同沈下に対する有効性について、地震時や長期使用限界状態においても認められたこととなる。また、直接基礎は、杭基礎に比べて大きな角折れを生じたという結果を得た。これは、直接基礎は支持の大半を基礎底面地盤に委ねていることから、それら地盤に作用が加わった際には、その影響をまともに受けるため、杭基礎に比べて大きな沈下

が生じ易いからだと考えられる。

上記のような結果を得たが、特に杭の支持方式の優劣については、上越新幹線の構造物基礎は許容設計鉛直支持力にかなり余裕をもった設計であることから、現在の設計標準⁶⁾から求まる設計鉛直支持力のレベルに置き換えた場合に、同様の結果が得られるかどうかは定かでない。しかし、今回の結果から、少なくとも支持層がかなり深い場合に安易に支持杭にすることは得策ではなく、地震時の沈下を過度に恐れて摩擦杭を避ける必要はないものと考えられる。また、設計時に杭の支持方式を決定する際には、基礎の支持特性と地中梁や上部工の構造形式とを関連づけて構造全体系で考えること、適切な周面支持力(載荷試験から得た周面支持力)を設定することなどの配慮が重要であり、それにより合理的に良好な構造物が構築できることが、実構造物をもって証明されたのではないかと考える。

謝辞

現地調査ならびに計測データの整理に協力していただいたジェイアール東日本コンサルタンツ(株)の福島弘文様には、ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 地盤工学会：基礎の沈下予測と実際，丸善，pp.331-341，2000.2
- 2) 田口博一，南谷敏一，中山正司：軟弱地盤における高架橋の沈下挙動，国鉄構造物設計資料，No.88，pp.40-44，1986.12
- 3) 福島弘文，岡田勝也，青木桂一，石橋忠良：高架橋の目違いからみた杭基礎の支持力特性，国鉄構造物設計資料，No.77，pp.25-30，1984.3
- 4) 森重龍馬：高架橋の目違い特性とくい基礎の支持力特性，国鉄構造物設計資料，No.41，pp.5-10，1975.3
- 5) 上越新幹線工事誌(水上・新潟間)，日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局，1983.3
- 6) 上越新幹線大宮起点249k540m付近実基礎載荷試験実施概要書(鉄道総研内部資料)，1976.4
- 7) 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・抗土圧構造物，2000.6
- 8) 出羽利行，神田政幸，館山勝，山村啓一，福島弘文：高架橋の折れ角・不同沈下量からみた基礎の支持特性，第61回土木学会年次学術講演会，III，pp.791-792，2006.9
- 9) 神田政幸，出羽利行，館山勝，谷口善則：摩擦杭を用いた新幹線高架構造物の角折れ・不同沈下量調査，基礎工，Vol.36，No.10，pp.42-44，2008.10
- 10) 館山勝，加藤正二：新潟県中越地震における鉄道構造物の被害と教訓，基礎工，Vol.33，No.10，pp.43-47，2005.10
- 11) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説(基礎構造物編)，1974.6