

IV下部構造編の改定と関連する調査研究

七澤利明・河野哲也・谷本俊輔

1. はじめに

本稿では、IV下部構造編（以下「IV編」という。）の規定及び従来の示方書からの変更内容のうち、主として熊本地震を踏まえた対応や、限界状態や部分係数の設定等について概要を紹介する。

2. IV編の構成

図-1に、IV編の構成を示す。今回改定されたII鋼橋・鋼部材編（以下「II編」という。）及びIIIコンクリート橋・コンクリート部材編（以下「III編」という。）と同様に、1章から4章では下部構造に関する共通事項が規定され、5章から14章においては、下部構造を構成する部材等の設計が規定されている。

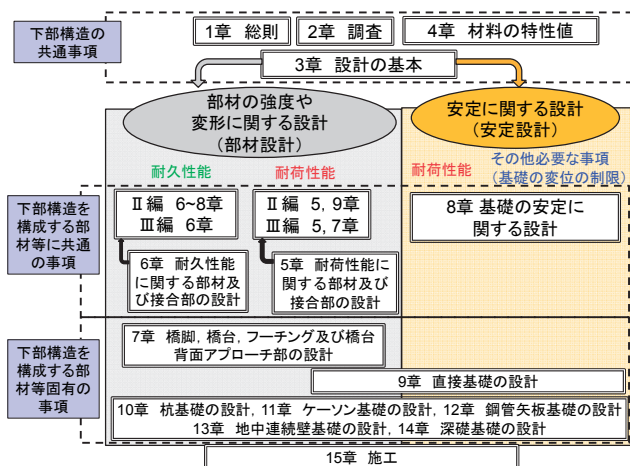


図-1 IV編の構成

下部構造を構成する部材等の設計は、部材の強度等に関する設計と安定に関する設計に区分されるが、今回の改定では、上部構造に限らず道路橋に用いる鋼部材・コンクリート部材に適用される規定がII編・III編に集約された。これを受け、部材設計に関しては、IV編には鋼部材・コンクリート部材の設計に関する共通事項は規定されておらず、下部構造特有の事項のみが規定されている。

3. 調査

調査は、現場の状況に応じて適切に方法、数量、調査位置等の調査内容を定めた上で行う必要があるが、熊本地震等による被災事例への対応や、調査の不足等により施工時や供用中に問題が生じないようにする観点から、より適切に調査内容を定めることが出来るよう記載が充実されている。

例えば斜面崩壊等に関しては、対象となる斜面変状の種類（斜面崩壊、落石・岩盤崩壊、地すべり、土石流）が明確にされている。また、土木研究所において既往の斜面崩壊等のパターン分類や傾向分析を行った結果に基づき、斜面崩壊等のパターンや注意すべき地形・地質、懸念される現象及び調査項目など、現場条件に応じて調査の範囲や方法等を適切に設定する際に参考にできる知見が示されている。

4. 下部構造の設置位置、形式及び形状

今回の改定では、熊本地震等において斜面崩壊等の影響により落橋等の重大な被害が生じたことを踏まえ、下部構造の設置位置、形式・形状に関する規定が見直されている。

下部構造が設置されている斜面にすべりが生じた場合、斜面の変位量に応じて基礎に作用する荷重が増加し、その荷重は最終的に概ね受働土圧相当に達することや、安全側として受働土圧を想定すると、その荷重は下部構造の耐力を大きく上回るものとなること、土木研究所で行った実験・解析の結果^{1),2),3)}から明らかになった。地震・豪雨によって斜面に生じる変位量は様々であるため、基礎に作用する荷重は必ずしも常に受働土圧相当に達するわけではないものの、斜面の変位量やこれに応じて変化する基礎への作用力を精度よく推定することが困難であることから、今回の改定では、斜面崩壊等の影響を受けない位置への下部構造の設置を標準とすることが規定されている。

また、斜面崩壊等が生じないよう斜面安定対策が実施された位置に下部構造を設置する場合、対策を行ってもある程度の変位等が生じる可能性が

ある。設計においては、このような不確かさも考慮する必要があることから、構造設計上の配慮について検討することが規定されている。例えば、土木研究所で実施した解析の結果、図-2に示すように、杭基礎や組杭深礎基礎については、単列よりも複数列とした方が斜面のすべりによる荷重を受けた場合の変位の抑制および抵抗力確保の観点から優れていること、また、橋脚基礎に適用されている柱状体深礎基礎については、組杭構造に比して荷重の作用幅が相対的に小さい等の理由により、複数列の組杭基礎と同等以上の抵抗力を有することが確認された³⁾。今回の改定においては、これらの知見を踏まえ、斜面の変状の影響が想定される場合における望ましい基礎形式・形状に関する記載が充実されている。

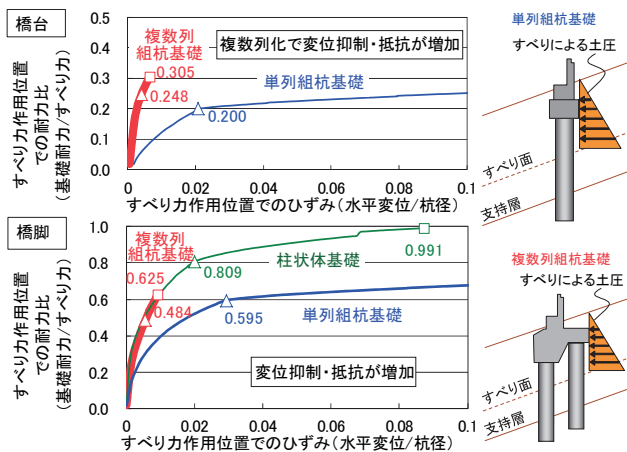


図-2 地盤のすべりに対する基礎の抵抗力の解析例
(上段：橋台の基礎、下段：橋脚の基礎)

5. 部材及び接合部に関する設計

接合部に関しては、連結される部材相互の応力を確実に伝達し所要の接合の機能を発揮させるためには、接合部の限界状態だけでなく、連結される部材の限界状態との関係が適切に制御されている必要がある。このため、各編共通事項として接合部に対する要求性能等が定められており、下部構造の各接合部についても、これを満足するような規定が定められている。特に、橋台部ジョイントレス構造においては、上部構造がI型断面の鋼桁の場合にスタッドを用いて橋台と接合する場合の設計法が新たに規定されている。これは、土木研究所・大阪工業大学・日本橋梁建設協会の共同研究にて実施した実験・解析結果に基づき⁴⁾、各設計状況において所要の安全余裕を確保すること

に加えて、接合部と橋台たて壁、桁の耐力の不確実性も考慮して、橋台たて壁や桁が限界状態3に達したときの断面力も確実に伝達できる接合構造の設計法が提案されたものである。

6. 各基礎の設計

基礎の安定照査について、従来の照査における位置づけが整理され、耐荷性能の照査に加えて変位の制限の照査が新たに規定されている。また、各基礎の照査方法、設計計算モデル等の見直しとともに、抵抗側の部分係数が規定されている。

部分係数は、設計における不確実性を考慮して定められるものであるが、基礎の設計の関係では、基礎の形式や工法、種類、さらには設計に用いる地盤物性値の評価方法や地盤の種類等によって不確実性の程度が異なる。従来の示方書では、基本的には条件によらず同じ安全率を用いて照査されていたが、今回の改定では、条件によらず同等の安全余裕を確保することにより精度に応じた合理的な設計を可能とするため、一部の耐荷性能の照査において、不確実性の大きさに応じて異なる部分係数値が定められている。また、地盤については抵抗だけでなく荷重として作用する場合もあるため、実際の挙動の平均的な応答を推定できるように、設計計算モデルなどが見直されている。

以下に、各基礎の照査方法の改定や部分係数の設定について、具体的な例を示す。

6.1 直接基礎の設計

従来の示方書で規定されていた直接基礎の支持力照査は、作用する鉛直荷重が荷重の偏心傾斜を考慮して求められる許容支持力を超えないことを照査するものであった。これは、直接基礎に作用する鉛直荷重 V ・水平荷重 H ・転倒モーメント M を比例的に増加させ、許容支持力に達しないことを照査するものである(図-3(a))。しかし、実際は、地震のような繰返し荷重を受ける場合には、 V については死荷重一定のままで変動せず、 H と M が増加する(図-4)。そこで、本節の冒頭に示したように実際に近い状態で照査する観点から、土木研究所において実施された加振実験、繰返し載荷実験の結果に基づいて、地盤の支持力を図-4中に示すように V - H - M から定まる曲面(支持力曲面)として定式化し、図-3(b)に示すように実際の荷重経路を考慮したうえで、 V - H - M の合力

が曲面内に留まることを照査する方法が規定された⁵⁾。

6.2 杭基礎の設計

杭の軸方向押し込み力に対する照査に関しては、近年の実態に応じた精度のよい設計とするため、近年実施された載荷試験を含む多くの実杭の載荷試験結果を土木研究所において分析し、この成果に基づいて従来よりも推定精度の高い支持力推定式が規定されている(図-5)。ただし、図-5に示されるように、支持力の推定精度は杭工法によって異なっている。このため、信頼性評価の結果等を踏まえて、表-1に示すように、推定精度の高い杭工法の場合、大きな抵抗係数値が設定されている。また、支持力を載荷試験により求める場合には、現地の地盤条件における支持力を直接確認することができることから、抵抗係数 Φ_y が1.00とされている。ただし、支持力は地盤の構成や性状等の条件によって異なるため、載荷試験により支持力を評価する場合の特性値や部分係数は、同じ支持力が得られるとみなせる条件においてのみ適用できることに注意する。調査・解析係数 ξ_1 についても、載荷試験を行う場合には、I 共通編で上限値として規定されている0.95となる。

地震時の許容変位は、基本的に杭径の1%とされていたが、今回の改定で、限界状態に対応した特性値や不確実性を考慮した部分係数等が定められている。橋脚基礎の照査における特性値に関しては、土木研究所において行った、杭だけでなく柱状体基礎も含めた水平載荷試験結果の分析に基づき、工法の違いによらず地盤の降伏により決まるものとして、基礎径(杭基礎の場合は杭径)の5%の変位が生じたときとされている(図-6)。

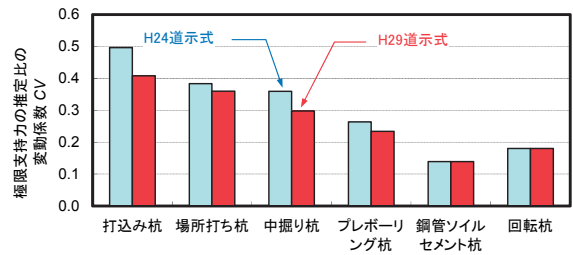


図-5 各杭工法の支持力推定式の推定精度 (H24道示とH29道示の比較)

表-1 軸方向力を受ける杭の支持に対する限界状態1の制限値を算出するための部分係数

地盤から決まる降伏支持力の特性値の推定方法	調査・解析係数 ξ_1	抵抗係数 Φ_y	
		打込み杭工法、場所打ち杭工法、中掘り杭工法	プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、回転杭工法
推定式	0.90	0.80	0.90*
載荷試験	0.95	1.00	

*摩擦杭の場合は0.80

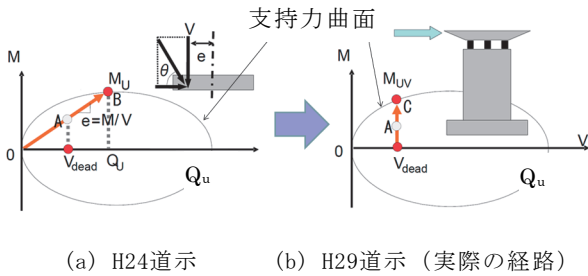


図-3 照査で想定する基礎底面の荷重経路

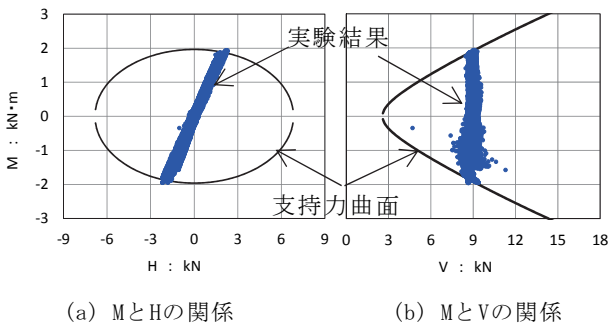


図-4 実験で得られた基礎底面に作用する荷重履歴

水平荷重に対しては、従来と同様に水平変位を指標として照査することとされ、水平荷重に対する抵抗の限界状態1の特性値や部分係数が定められている。従来の示方書における常時・レベル1

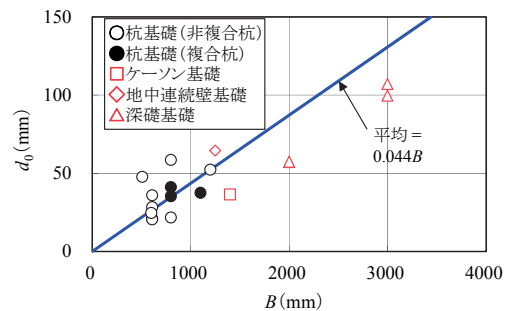


図-6 弾性限界変位 d_0 と基礎径 B の比較例

部分係数に関しては、調査・解析係数 ξ_1 について地盤条件や地盤調査法によって異なる値が定められている。これは、大竹らが、基礎に生じる水平変位に支配的な影響を及ぼす水平方向地盤反力係数 k_H の推定精度を載荷試験結果との比較により確認した結果、地盤条件や採用する地盤調査法によって k_H の推定精度が異なること、この要因は、図-7に示すように、地盤反力係数の算出に用いる変形係数 E の推定精度が、地盤条件や地盤調査法により異なることが明らかになったためである⁶⁾。こうしたことから、大竹らにより評価された地盤

反力係数の不確実性等も考慮して土木研究所において行った条件別の信頼性評価の結果等を踏まえて、地盤条件や地盤調査法によって異なる調査・解析係数値が定められている。なお、杭体の軸力及び曲げモーメントに対する照査においても、発生断面力が水平方向地盤反力係数の推定精度の影響を大きく受けるため、同様に条件に応じて異なる係数値が設定されている。

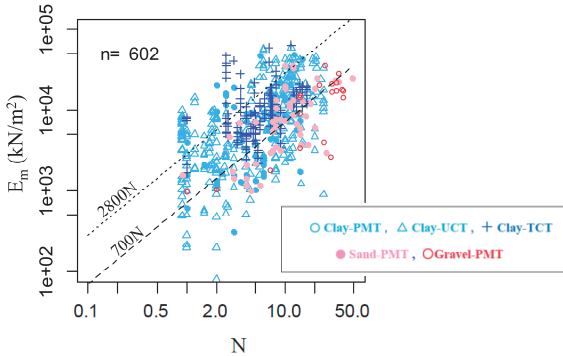


図-7 変形係数 E と N 値の関係

6.3 柱状体基礎の設計

各種柱状体基礎（ケーソン基礎，鋼管矢板基礎，地中連続壁基礎，深礎基礎）の設計に関して、従来の示方書では、設計で想定する変位レベルや基礎形式等に応じて設計計算モデルが異なっていたが、本節の冒頭に示したように、平均的な挙動を推定できるようにする観点から、載荷試験結果の分析に基づき、変位レベルや基礎形式・諸元によらない統一的な計算モデルが適用されることになった。また、部分係数については、水平荷重に対する抵抗の限界状態1において、杭基礎と同様に地盤調査法や地盤条件に応じた調査・解析係数値が定められている。

7. おわりに

今回の改定では、熊本地震を踏まえた対応や、限界状態や部分係数の設定等について、土木研究所等の研究成果が多く反映された。部分係数につ

いては、各照査の位置づけが明確化された上で、不確実性の要因に応じた値が規定されている。また、条件に応じて不確実性の度合いが異なる場合には、同等の安全余裕とする観点から、異なる部分係数値が設定されている。これにより、精度の高い地盤調査法や工法を用いる場合には、従来よりも合理的に設計を行うことが可能となった。また、このように、各技術の有する精度等に応じて合理的に設計を行うことができる手法が明確化されたことから、今後、新技術・新構造の開発や、設計技術の進展に伴う既設橋の性能評価も含めた設計の合理化が進むものと期待される。

参考文献

- 1) 石田雅博、七澤利明、西田秀明、遠藤繁人：地盤変状が道路橋の耐震安全性に及ぼす影響に関する基礎的研究、土木研究所資料、第4305号、2015.6.
- 2) 河村淳、真弓英大、谷本俊輔、七澤利明：地盤変状の影響を受ける斜面上に設置された道路橋の杭基礎に関する遠心模型実験、土木学会第71回年次学術講演会、pp.677~678、2016.9.
- 3) 河村淳、真弓英大、谷本俊輔、七澤利明：斜面変状の影響を受ける道路橋基礎の構造等の違いによる安定性への影響に関する数値解析、土木技術資料、第59巻、第5号、pp.36~39、2017.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所、大阪工業大学、(社)日本橋梁建設協会：橋上部ジョイントレス構造における鋼-コンクリート接合構造の設計・施工手法に関する共同研究報告書（その2）、第490号、2017.8.
- 5) 中谷昌一、七澤利明、白戸真大、西田秀明、河野哲也、木村真也：性能規定体系における直接基礎の安定照査法に関する研究、土木研究所資料、第4255号、2014.3.
- 6) 大竹雄、本城勇介、七澤利明、河野哲也、飯島翔一：道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート No.25-4、道路橋示方書の改定を踏まえた性能設計概念に基づく設計照査手法についての研究開発—特に下部構造物を中心として—、2016.7.
- 7) 七澤利明、西田秀明、河野哲也、木村真也、遠藤繁人：柱状体基礎の要求性能及び安定照査に関する研究、土木研究所資料、第4273号、2013.10.

七澤利明



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ
上席研究員
Toshiaki NANAZAWA

河野哲也



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ
主任研究員、博士（工学）
Dr. Tetsuya KOUNO

谷本俊輔



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ
研究員
Shunsuke Tanimoto