

5. 設計方法の変遷と今後の動向

5.1 港湾構造物分野

5.1.1. 港湾構造物の設計法の変遷

港湾における代表的な構造物には、防波堤などの外郭施設、岸壁などの係留施設などがあり、今日、これら構造物は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に基づき設計されている。第二次世界大戦以前の時代には、法的な位置付けのある技術基準や各種団体が策定した任意規格は存在せず、技術者は、廣井勇博士の「築港（前・後）」（明治31年刊行）や鈴木雅次博士の「港工学」（昭和7年発刊）などを参考に港湾構造物の設計を行っていたといわれている。公的な技術基準は昭和25年より整備が開始され、その後、法的な位置付けも明確化され、社会経済情勢の変化や技術の進歩にあわせて約10年ごとの大改定を経て今日に至っている。港湾構造物の設計法の変遷を整理した表を、表5-1-1に示す。各年の基準の概要については、5.1.2～5.1.9を参照されたい。

5.1.2. 港湾工事設計示方要覧（1950年）

港湾工事設計示方要覧は、港湾の設計法を本格的に取りまとめた最初のもので、昭和25年5月に刊行されている。その内容は、「繫船岸設計示方書」、「浚渫埋立計画及び施工標準」および「防波堤設計示方書」の3編から構成されている。

「繫船岸設計示方書」は、船舶を接岸係留させることを目的とする繫船岸の設計に関する一般の標準を示すもので、重力式、矢板式、柵式、栈橋、浮栈橋、係船杭（ドルフィン）が対象となっている。鋼構造物の設計に関する事項として、以下の規定が示されている。

- ①外力として床面等分布荷重、船舶牽引力、船舶衝撃力、土圧（常時および地震時）、残留水の水圧、浮力、地震力などの求め方が示されている。
- ②地震力は、水平震度のみを考え、その震度は地盤の良否、構造物の重要性、地理的状況に応じて0.05～0.3を採る。事例として、横浜港の10m岸壁は0.25、下関湾の9m岸壁は0.20が設定されたことが紹介されている。
- ③材料の許容応力度としては、鉄鋼材の場合には全て日本標準規格によることが規定されている。また、海水の作用により著しく腐食磨耗する欠点があるので、なるべくコンクリート材とすること、鉄鋼材を使う場合には材料の品質に特に注意する必要があることが示されている。船舶の牽引力、衝撃あるいは地震力を考慮した場合の許容応力度は、80%まで増加できると規定されている。

当時の港湾鋼構造物の代表である矢板式繫船岸は、施工設備が簡易で工費が安く工事を迅速に行えるので、工費に比べて能率ある岸壁を必要とする場合に採用されることが記述されている。しかし、耐久力および船舶の衝撃に対する抵抗力において十分でないところがあり、特に鋼矢板は干満潮位間の腐食がはなはだしいので十分な対策が必要であること、また水深10m以上の大岸壁の築造は困難が多いといった注意点も記述されている。鋼矢板の断面設計に関しては、矢板頭部のタイロッド取付け位置と水底付近の仮想点を支点とする桁と考えると、この桁に作用する土圧に対して矢板断面を設定する方法が示されており、水底付近の仮想点の算出方法が示されている。また、矢板の根入れ長に関しては、摩擦角に応じた計算式が示されている。

栈橋は鉄栈橋、RC杭栈橋、RC管はめ込み木杭栈橋、RC円筒および円筒横栈橋、橋脚式栈橋が紹介されており、鉄栈橋は軟弱地盤に適し施工が早い、構造が華奢で許容載荷力、船舶の牽引および衝撃に対する抵抗力が小さく工費も高いとされている。また、海水による腐食の問題もあるため、特殊な場合のほかはあまり使わないとされている。栈橋の支柱の断面は、床面活荷重と自重により算定し、船舶の牽引あるいは衝撃により生じる湾曲率を考慮に入れて余裕を与える方法が規定されている。また、腐食減厚への余裕を設け、算定所用厚に1mm以上の余裕を加えること、支柱の支点間の長さはその断面最小回転半径の120倍を超えないようにすることが規定されている。

矢板堤が防波堤施工標準に掲載されているが、特に説明は記述されていない。

5.1.3. 港湾工事設計要覧（1959年）

港湾工事設計要覧は、1959年6月に刊行されており、「防波堤および海岸保全施設」、「けい船岸」、「しゅんせつおよび埋立」の3編により構成されている。本要覧では、最新の海岸工学や土質工学の知見を取り入れ、いくつかの部分で港湾工事設計示方要覧から大きく進歩したものになっている（分量的にも約4倍）。

本設計要覧では、まず荷重の設定が充実され、死荷重、積載荷重、活荷重（列車荷重、自動車荷重、ホイールクレーン荷重・トラッククレーン荷重・カタピラクレーン荷重、軌条走行式クレーン荷重、群集荷重）、船舶の衝撃力、船舶のけん引力、風荷重、地震力、土圧および水圧について規定

されるようになった。特に地震力については、水平設計震度が3つの区分毎に設定されており、第1地区が0.25～0.15、第2地区が0.20～0.05、第3地区が0.10～0.00となっている。また、地盤反力と杭の支持力についても、計算方法が与えられている。

鉄鋼材に関してはJISによることが規定されたほか、鉄鋼材の防食の規定が充実された。鉄鋼材を海水に接する主要部材として用いる場合には、防食処理を必ず施すことが望ましいとされ、防食処理としては塗覆装と電気防食法があり、鉄鋼材の使用部位および部材の重要度に応じてそれらを単独または併用するように記述されている。構造用鋼材の許容応力度は、鋼道路橋設計示方書の数値を参考とすることが示されている。例えば、軸方向引張に関する許容応力度の基準値は1300 kg/cm²である。また、合成許容応力度および主荷重と温度変化の影響の検討では許容応力度の増加率を15%に、地震荷重または死荷重と地震荷重の影響の検討では80%にしてよいことが示されている。

鋼構造物の設計に関しては、矢板壁の計算法が明示され、セル式係船岸の設計法が提示された。鋼矢板の根入れ長の計算、矢板の最大曲げモーメントの計算(仮想ばり法)、タイロッド張力の計算のそれぞれの方法が示された。矢板断面の設計においては、曲げ応力度が材料の許容応力度の近くになるように設計すればよいと記述されている。なお、鋼矢板の許容応力度は1400～1800 kg/cm²、耐震設計では2100～2400 kg/cm²を標準としている。タイロッドの許容応力度は、SS41またはSM41で900 kg/cm²、耐震設計の場合で1400 kg/cm²となっている。セル式係船岸では、壁体幅の決定を外力のモーメントによって壁体断面の中立軸に生じるせん断力がセルの許容内部せん断抵抗を超えないように定める方法が規定され、せん断力および許容せん断抵抗の算定式が示されている。この許容値の算定に際しては、安全率として2.0～2.5(常時)、1.0～1.2(地震時)が標準とされている。また、矢板継手間張力の計算法も示され、その許容値として250 t/mが採られている。栈橋については、各栈橋構造に対する構造設計のためのモデル化と断面諸元の決定および構造細目が規定されている。くい式栈橋では、仮想固定点の設定、くい根入れ部の水平反力および許容水平抵抗力、鉛直反力および許容支持力、継ぐいに関する注意事項が示されている。他の構造の栈橋(円筒式栈橋、角筒式栈橋、橋脚式栈橋)にも同様の規定が示されている。

5.1.4. 港湾構造物設計基準(1967年)

港湾工事設計要覧の刊行後8年が経過し、港湾技術の進歩と電子計算機が設計業務に積極的に導入される事態を考慮して要覧の改訂が行われ、港湾構造物設計基準として1967年に刊行された。1967年の段階では第1編～第5編のみが刊行されているが、この部分は基礎的事項であり、総論、設計条件、材料、プレキャストコンクリート部材、基礎という構成になっている。これ以降、第6編～第10編については、翌年1968年9月に刊行されており、施設別の各種構造物の設計の手順、設計計算法などが記述されている。このように、前半で設計条件、材料といった共通事項を示した後、後半で水域施設、外郭施設など施設別に設計法を記述するという、現在の港湾の施設の技術上の基準・同解説の構成の緒になっている。また、体裁としても、基準の本文を枠囲みの中に記述し、それに解説と資料を付ける方式を採用し、これも現在の基準へと受け継がれている。また、図表やフローチャートの量もかなり増え、設計者の便が図られている。その結果、総頁数も相当増えることとなった。

設計に関する注目すべき記述として次のものがあげられる。

- ①安全率の解釈について、その設定の目的と意義、値の決定方法、安全率を低減させる場合の注意点などの説明が記述された。
- ②船舶の主要寸法として、大型船の標準船型、小型船の標準船型、漁船の標準船型が与えられた。

③地震力として、地域別震度 (0.05, 0.10, 0.15), 地盤種別係数 (0.8, 1.0, 1.2), 重要度係数 (0.5 ~ 1.5) の積で設計震度を与えるようになった。

④鋼材は、JIS 規格品を原則として用いることを標準とし、その場合の物性定数としてヤング係数 ($2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$), せん断弾性係数 ($8.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$), ポアソン比 (0.3), 線膨張係数 ($12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) が規定されている。また、許容応力度として一般の場合、SS41 で 1400 kgf/cm^2 , SS50 で 1700 kgf/cm^2 , SM50A で 1900 kgf/cm^2 が示されている。これらは、地震時荷重等の異常時荷重に対しては 1.5 倍してもよい旨が規定されている。

⑤鋼ぐいの許容応力度は、④の値をベースに部材の座屈長さ l と断面 2 次半径 r の比 l/r の関数で低減する式が示されている。

⑥鋼材の標準的腐食速度が示されている。この値は現行の基準とほぼ同じである。また、腐食代が十分にとれる場合は、防食法を適用しなくてよいとされている。

⑦鋼矢板式係船岸および横棧橋の設計については、設計の順序がフローチャートで示され、設計者の便が図られている。特に鋼矢板式係船岸では、矢板壁の計算図表が示され、最大曲げモーメント、タイロッド張力、根入れ長がグラフから容易に求まるように配慮されている。

5.1.5. 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (1979 年)

それまでの「港湾工事設計示方要覧」, 「港湾工事設計要覧」, 「港湾構造物設計基準」は、設計にあたって参考とすべき指針であり、行政的な裏付けはなされていなかった。昭和 49 年 (1974 年) の港湾法改正に際して、法第五十六条の二に「港湾の施設に関する技術上の基準」に関する条項が追加され、港湾の施設は「港湾の施設に関する技術上の基準」に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならないことが明記された。同年、全 16 条からなる「港湾の施設の技術上の基準」が、運輸省令として制定された。同省令の外郭施設や係留施設の条文では、それらの施設が十分に機能を発揮すること及び安全であることが記述されており、性能設計の「目的」, 「機能」, 「要求性能」, 「照査方法」のうち上位に位置する概念が盛り込まれている。

当時、運輸省港湾局内に常設されていた調査設計標準作成委員会では、新たな設計指針の作成にとりかかっており、同省令の肉付け作業と「港湾構造物設計基準」の改定作業を合体させて、省令に基づく「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の作成作業が上記委員会で進められた。

昭和 53 年 (1978 年) 10 月、同省令の解釈と運用が適切に行われるための運輸省港湾局長通達が発布され、その頃から同省令と港湾局長通達をあわせて「技術基準」と通称するようになった。昭和 54 年 (1979 年) 4 月には、港湾局長通達を本文とし、その解釈や解説を付け加えたものが、(社) 日本港湾協会より「港湾の施設の技術上の基準・同解説」として発刊された。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」は、それまでの参考とすべき指針的な性格と異なり、法的規制の性格を有するため、「港湾構造物設計基準」に比べて設計手法の解説的な部分をいくらか割愛した結果、「港湾構造物設計基準」より約 3 割縮小され総計 692 ページとなっている。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の特徴としては、以下が挙げられる。

- ① 波の変形と作用の取扱いが不規則波の概念で統一され、波浪スペクトルが設計手法の中に導入された。
- ② 直立壁面に働く波圧の算定式として昭和 48 年 (1973 年) に提案された合田式が採用され、重複波と碎波を区別せずに波圧の算定が可能になった。
- ③ 泊地の静穏度が波高の絶対値で規定された。
- ④ 港研方式による杭の横抵抗の計算が設けられた。
- ⑤ 埠頭の安全確保および利用増進を図るため、照明施設や標識等の付帯施設の具体的な規定が

設けられた。

⑥ コンテナ埠頭とカーフェリー埠頭の基準が設けられた。

上記特徴のうち、①の方向スペクトル波浪の回折図、不規則波の碎波変形、不規則波の越波流量などは、当時全く新しい研究成果であったもののすぐに採用されたが、②の波圧算定方式は、従来の式を改訂すると防波堤の設計断面が変わってしまうため、既設工事例とどのように折り合いをつけるかが課題となり、3年がかりの検討の末、採用された、という談話が残っている。

鋼構造については、引張強さ 24kgf/mm²級と 53kgf/mm²級の鋼材が新たに加わり、選択肢が広がった。ただし、解説に「一般に、港湾構造物にあっては、構造用鋼材を主要部材として使用することは少なく、また使用された場合でも座屈を生ずる危険は少ないので、圧縮の許容応力を引張の許容応力と同じに定めた。しかし、構造用鋼材を主要部材として使用し、しかも座屈の危険が予想されるときには、これに対して十分な考慮を払い、許容応力度も道路橋示方書（日本道路協会）に準じて低減する必要がある。」との一文があり、当時、今よりも港湾構造物に鋼構造が用いられることは少なかったことがうかがわれる。耐震設計については、それまで区分の無かった重要度係数（0.5～1.5）に、構造物の性格による4つの種別（特級、A級、B級、C級）が導入された。

表-5.1.2 構造物の種別と重要度係数

構造物の種別	構造物の性格	重要度係数
特定	A級構造物のうち①～③の程度が著しいもの	1.5
A級	① 構造物が震害を受けた場合、多くの人命・財産の損失を与えるおそれのあるもの ② 震災復興に重要な役割を果たすもの ③ 有害物または危険物を取り扱う構造物で、震害を受けた場合に人命又は財産に重大な損失を与えるおそれのあるもの ④ 構造物が震害を受けた場合、関係地域の経済・社会活動に重大な影響を及ぼすもの ⑤ 構造物が震害を受けた場合、復旧にかなりの困難が予想されるもの	1.2
B級	特定、A級及びC級以外のもの	1.0
C級	特定及びA級以外の小規模な構造物で容易に復旧が可能なもの	0.5

5.1.6. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（1980年）

1980年の港湾の施設の技術上の基準・同解説では、1979年の基準・同解説に加え、超大型石油タンカー用施設と海上貯油基地施設も基準の対象となった。

超大型石油タンカー用施設は、載貨重量トン数10万t以上の石油タンカー用に使用される港湾施設のことである。基準・同解説の中においては、固定式係留施設的设计手順および浮標式係留施設的设计手順についての記述がなされている。ここで、固定式係留施設とは、海底に固定された構造物を用いてタンカーを係留する施設であり、ドルフィンタイプと棧橋タイプに構造形式が分類される。さらにドルフィンタイプについては、杭式、ジャケット式、鋼製セル式およびケーソン式の4つの構造形式に小分類されている。また、浮標式係留施設とは、浮標を用いてタンカーを係留する施設で、一点係留浮標式と多点係留浮標式が存在する。一点係留浮標式は、1個または数個のアンカーチェーン等で係留された1個の浮標に係留索等でタンカーを係留する係留施設でタンカーが浮

標のまわりを自由に回転できる機構を有する。一方、多点係留浮標式は、1個または数個のアンカーチェーン等で係留された浮標を数個配置し、係留索等でタンカーを係留する施設である。

海上貯油基地施設は、貯蔵船およびその附帯設備が一体となって石油を貯蔵する形態の保管施設とその他の石油貯蔵に関連する施設を指す。海上貯油基地施設の主な特徴としては、陸上部の面積が少なく海洋空間を有効利用できること、地震による影響が少ないこと、住空間から離れた位置に立地できることが挙げられる。また、設計の基本方針としては、施設の機能、施設の重要度、耐用年数、自然状況、荷重、材料、安全率、施工方法、施工精度、工期、経済性、補償費、維持費の要素を考慮する必要があるとされている。海上貯油基地施設は、水域施設、外郭施設、係留施設に関する設計方法の他、この施設特有の保管施設、附帯設備および施設の維持管理に関する記述がなされている。設計荷重や鋼種における許容応力、降伏応力、特性値、基準強度については、1979年の基準と同様である。さらに、耐震設計、疲労設計および接合法についても1979年からの改正点はない。

5.1.7. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（1989年）

昭和55年（1980年）の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の発刊後10年が経過し、港湾空間に対する社会的要請が高質化及び多様化し、また技術的知見の蓄積等への対応も求められ、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」を改訂する必要が出てきた。そこで、昭和63年（1988年）10月、運輸省令の解釈と運用が適切に行われるための運輸省港湾局長通達が改訂され、平成元年（1989年）2月には、改訂された港湾局長通達を本文とし、その解釈や解説を付け加えたものが、（社）日本港湾協会より「港湾の施設の技術上の基準・同解説（改訂版）」として発刊された。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（改訂版）」は、上下2冊、総計968ページとなっている。改訂の特徴としては、以下が挙げられる。

- ① 安全快適な港湾空間創出技術として、マリーナ、浮体式施設、港湾の施設の維持管理方法について記述が加えられた。
- ② 砂質土の液状化の予測判定法が大幅に充実された。
- ③ 偏心傾斜荷重に対する支持力の検討方法が、従来の荷重分散法と三建法または片山・内田法の組み合わせから、ビショップ法による円形滑り法に変更され、大型ケーソン防波堤などの安定解析の信頼性が向上した。
- ④ 地盤改良法として、従来の置換工法、バーチカルドレーン工法に加えて、深層混合処理法、サンドコンパクションパイル工法など、新たな工法について記述が加えられた。
- ⑤ 杭の載荷試験結果が蓄積された結果、砂地盤に打ち込まれた杭基礎の支持力算定式の先端支持力係数が3/4に引き下げられた。

$$\text{従来：} Ru = 40 \cdot N \cdot Ap + \underline{N} \cdot As / 5 \quad (5.1.1)$$

$$\text{変更：} Ru = 30 \cdot N \cdot Ap + \underline{N} \cdot As / 5 \quad (5.1.2)$$

ここに、Ru：杭の極限支持力(tf)

N：杭先端地盤のN値

Ap：杭の先端面積(m²)

N：杭根入れ全長に対する平均のN値

As：杭周の全表面積(m²)

- ⑥ 直立消波ケーソン堤や上部斜面堤、浮防波堤など新形式防波堤の設計法が規定された。

5.1.8. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（1994年）

1994年の基準は、鋼矢板セル式係船岸、鋼板セル式係船岸、車止め、臨港交通施設、1989年の基準から対象となったマリーナについて、より詳細な記述がなされている。設計荷重は、1979年と同様である。一方、鋼種における許容応力、降伏応力、特性値および基準強度については、1989年の基準で見直しが行われているため、1994年の基準においても1989年と同様として取り扱われている。

5.1.9. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（1999年）

1999年の基準は、港湾の施設の技術上の基準の細目が運輸省告示として併設されている。また、1994年の基準で対象となっていた超大型石油タンカー用施設、海上貯油基地施設とともに海底パイプラインが参考技術資料として取り扱われている。1999年基準改正のポイントは、主に以下の6項目が挙げられる。

- ① レベル2地震動の設定と耐震強化施設の設計法
- ② 新しい地域別震度（5段階）と重要度係数の導入
- ③ 栈橋の設計に用いる設計震度と保有水平耐力法による耐震性能照査
- ④ 限界状態設計法によるRC構造物の部材設計
- ⑤ 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法
- ⑥ SI単位系の導入

a) 耐震設計

設計で考慮する地震動と港湾の施設の耐震性能を表-5.1.3に示す。

表-5.1.3 設計で考慮する地震動と港湾の施設の耐震性能

地震動レベル	耐震設計で考慮する地震動	対象施設	耐震性能
レベル1	再現期間75年の期待地震動	全ての施設 (他の基準等で規定のある施設を除く)	施設の健全な機能を損なわない
レベル2	再現期間数百年の期待地震動、プレート内地震動、あるいはプレート境界地震動	耐震強化施設(耐震強化岸壁、防災拠点等のうち耐震強化の必要な護岸)。その他、橋梁、沈埋トンネル等の港湾の施設でレベル2地震動を考慮すべき施設	所期の機能を保持する

なお、所期の機能を保持するとは、施設の被害が生じたとしても、それが軽微であり、地震後に速やかに機能の回復が行える状態を指している。表-5.1.3中の耐震強化施設は、震災直後の緊急物資輸送などの確保、経済社会活動の維持等を考慮してその耐震性を強化する耐震強化岸壁、震災時に市民等の安全を守る防災拠点等の護岸を言う。ここで、図-5.1.1にレベル2地震動に対する耐震強化岸壁の設計手順を示す。また、設計震度は、式(5.1.3)により算定される。

$$\text{設計震度} = \text{地域別震度} \times \text{地盤種別係数} \times \text{重要度係数} \quad (5.1.3)$$

地域別震度は、都道府県と地域をA地区からE地区までの5段階に分類している。A地区の地域別震度は0.15であり、E地区は0.08となっている。また、地盤種別係数は、第一種地盤の0.8から第三種地盤の1.2まで3段階で分類される。さらに、重要度係数は、特定、A級、B級およびC級

の4段階で与えられるが、耐震強化施設にあたっては特定の1.5を用いることとなっている。なお、C級の重要度係数は0.8である。

栈橋の設計に用いる設計震度は、基盤加速度の期待値に対し、地震応答解析より得られた海底面下の仮想固定点位置での加速度より求めた加速度応答スペクトルから、栈橋の固有周期に対応する応答重力加速度を重力加速で除した値としている。なお、レベル1の基盤加速度の期待値は、地域別震度と同区分のA地区からE地区の5段階で与えられるが、レベル2の基盤加速度の期待値は、マグニチュードと断層面距離で表される関係式によって算定される。また、保有水平耐力による耐震性能照査は、栈橋に部分的な破壊、損傷を許容する方法として、簡便法、弾塑性解析法および非線形動的解析法のいずれかの方法で行うとしている。

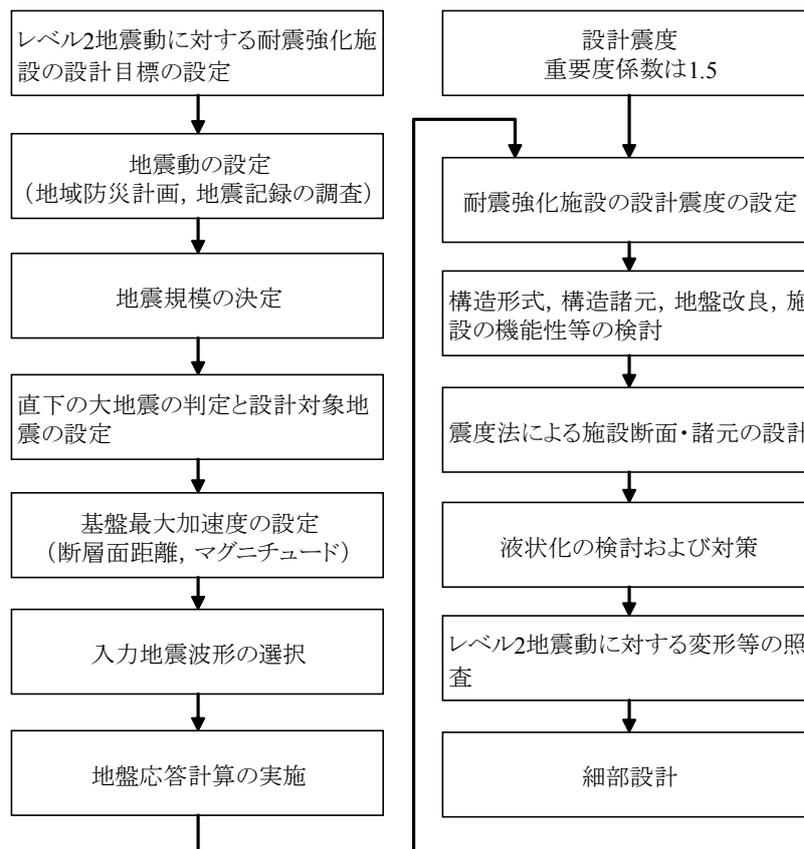


図-5.1.1 レベル2地震動に対する耐震強化岸壁の設計手順

b) 限界状態設計法によるRC構造物の部材設計

1999年の基準・同解説から防波堤および係留施設などのコンクリート構造物の設計は、限界状態設計法によるとされている。限界状態設計法とは、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態の3つの限界状態において、特性値と材料係数、荷重係数、構造解析係数、部材係数および構造物係数の5種類の安全係数を乗除した設計用値によって安全検討を行うものである。安全係数のうち材料係数、構造解析係数、部材係数の3つは、コンクリート標準示方書に従ったものであるが、荷重係数および構造物係数は、事例解析、許容応力度設計法との安全性の比較、他の構造物との比較等に基づいて定められている。

c) 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法

防波堤の滑動安全率は防波堤が滑り出さないことを前提として波圧時の 1.2 以上を標準とされてきた。この破壊安全率に基づく設計法は 1999 年の基準・同解説においても標準的方法とされているが、同基準・同解説においては、上記の設計方法に加え、信頼性設計法を用いて安定性を検討することが可能となっている。信頼性設計法において考慮すべき主な項目としては、沖波波高の出現確率、潮位の発生確率分布、波浪変形計算、波力の算定、自重、摩擦係数、滑り出しの判定が挙げられる。また、地盤の支持力の検討についても信頼性設計法を用いて期待沈下量を計算することができるとしている。

d) その他

その他の変更点としては、1999 年の基準・同解説から SI 単位系が用いられている。そのため、鋼種は全て書き換えがなされている。また、接合方法からリベットが削除された。

5.1.10. 今後の動向

本項で記述したとおり、港湾構造物の設計法の基準である「港湾の施設の技術上の基準・同解説」は、1950 年の港湾工事設計示方要覧の制定以降、着実に改訂を重ねて現在に至っている。それぞれの改訂に際しては、当時の確立された最新技術や研究成果を取り入れてきており、技術者たちの必須の書でもあった。

さて、昨今の性能規定化の流れを受け、2007 年制定の港湾の施設の技術上の基準においては、性能設計の考え方を前面に押し出した体系になっている。そのため、施設（構造物）の設置目的、要求性能、さらには要求性能をブレイクダウンした性能規定については、いわゆる省令「基準」として、明確に規定されている反面、照査法については推奨すべき手法を参考として示しているものの、設計者にその方法の選定を委ねている。したがって、「基準」としては遵守すべき事項のそうでない事項とが明確に区分けされており、設計基準としては好ましい体系になったと言える。今後もこの体裁が続けられるものと思われる。

一方、照査方法については、推奨すべき参考という位置づけではあるものの、信頼設計法をベースとした部分係数法が採用されている。これも世界的な流れから見て先進的であると考えられ、今後も原則的にその方針は変わらないものと推察される。施設（構造物）が有すべき構造システムとしての破壊確率の目標が明確になったことから、このための技術開発が進められることが期待される。本来、破壊確率を計算するには、設計変数すべての確率分布形を知っておく必要があるが、これは大変困難を伴うことになる。2007 年版の基準では、過去の設計事例のキャリブレーションによって部分係数の値が規定したものもあり、今後改善の余地が残されている。特に、鋼構造物で検討すべきは、鋼材の強度に係る部分係数の設定である。周知のごとく鋼材は保証降伏点が JIS 等で規定され、これに基づいて実際の製品が製造されているが、実際の強度は保証降伏点よりもかなり高い値であるのが通常である。そのため、厳密な信頼性の解析を行うと、強度に係る部分係数が 1 より小さい値となることになる。こういう照査体系もあり得るかも知れないが、現実には材料検査の問題等の観点から、保証降伏点に重きを置いた体系になっている。そのため、ここで得られる不整合を別の部分安全係数でカバーすることとなり、完成した照査体系になっているわけではない。このような点が今後改善されることが期待される。他にも、今後の研究や検討結果によって部分係数の精緻化を図っていく必要があると言える。

さらに、信頼性設計法の問題として、設計者の感覚でにわかに理解しにくいことがあげられる。安全率 1.2 と言えば経験のある設計者なら感覚で理解できるが、目標信頼性指標が 2.9 とか目標破壊確率が 1.9×10^{-3} といっても、なかなかピンときにくい。これから多くの経験を踏む必要がある。こ

のように、設計体系としては極めて合理的で性能が数値に裏付けされた説明性の高い手法となっているが、設計者にとっては必ずしも優しいものにはなっていないように思われる。今後、このような点にも改善がなされ、合理性と精緻性を維持しつつ、照査の段階で過誤の生じる可能性が少ない（設計者に優しく）体系にすべきではないかと考えている。

（横田弘，江崎慶治，笠原宏紹）

5.2 鉄道施設構造物分野

鉄道施設に用いられている鋼構造物としては、鋼鉄道橋が代表的であるが、他には鋼製橋脚、CFT柱、鋼管杭、鋼管井筒基礎、開削トンネルなどの本体構造物から各種の付帯設備まで、多種・多様である。鋼橋については、明治5年の鉄道開通後まもなくは錬鉄製の橋でしたが、明治23年頃から鋼材を用いて製作するようになり、その後100年以上にわたり使用されており、古い歴史がある。

ここでは、鋼製橋脚、CFT柱、鋼管杭、鋼管井筒基礎、開削トンネルを選定し、現行の設計標準と以下のように対応して、変遷ならびに今後の動向について述べる。

- 1) 鋼製橋脚：鉄道構造物等設計標準（鋼・合成構造物編）（表-5.2.1 参照）
- 2) CFT柱：鉄道構造物等設計標準（複合構造物）（表-5.2.2 参照）
- 3) 鋼管杭、鋼管井筒基礎：鉄道構造物等設計標準（基礎土圧構造物）（表-5.2.3, 表-5.2.4 参照）
- 4) 開削トンネル：鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）（表-5.2.5 参照）

なお、鋼構造物の設計に関しては、鋼・合成構造物編を準用して用いられているのが一般的であるので、設計荷重や耐震設計、疲労設計などについては1)にまとめて詳述する。

5.2.1 鋼製橋脚（鋼鉄道橋の示方書）の変遷

(1) 設計活荷重の変遷

明治前期はシェルビトン、ポーナルなどのイギリス人により、後期はドイツ、アメリカの新技術によるなど、明治40年頃までは、設計・製作共にほとんど先進諸外国の技術に頼っていたため、設計活荷重として決められたものはなく、設計者等により異なり各線においてまちまちであった。

明治39年(1906)鉄道国有法が公布され、同40年帝国鉄道庁が開設されたのを契機に、クーパーE荷重を用いた設計活荷重の規格の統一が図られて活荷重の基本となった。また、実設計も外人技師の援助の手を離れて、暫時日本人の手で行われるようになった。

以下に、鉄道構造物の設計活荷重の変遷について示す。

- 1) 明治11年 シェルビトンの設計活荷重 敦賀～長浜間の橋梁の設計に用いた荷重
- 2) 明治22年 九州鉄道会社 トラス及びプレートガーダーの設計に用いた荷重
- 3) 明治26年 ポーナルがプレートガーダーの設計に用いた荷重
- 4) 明治31年 クーパーが基本トラスの設計に用いた荷重
- 5) 明治35年 杉文三がプレートガーダーの設計に用いた荷重
- 6) 明治35年 Iビームけた及び東京市街プレートガーダーに用いた荷重
- 7) 明治42年 クーパーE荷重の制定
 - ・ プレートガーダー等の標準設計が行われた。
 - ・ 明治45年(1912)に鉄道橋設計示方書が制定され、広軌はE-45、狭軌はE-33の設計荷重が定められた。
 - ・ 大正10年(1921)主要幹線の設計活荷重はE-40を用いることとなった。
- 8) 昭和4年 KS荷重
 - ・ 昭和3年(1928)メートル法の施行に伴い、鋼鉄道橋設計示方書がメートル式に改訂され、橋梁の設計活荷重はKS-18と改制された。(フィートインチ・ポンド単位系からメートル・グラム単位系に改定され、E-40とKS-18の軸重・軸距はほぼ同じ)
 - ・ 昭和4年(1929)甲線はKS-18、乙線はKS-15、電車専用線はKS-12と定められた。
 - ・ 昭和30年(1955)1・2級線はKS-18、3級線はKS-16、4級線はKS-14を用いることとなった。
 - ・ 昭和58年(1983)1・2・3級線はKS-16、4級線はKS-14を用いることとなった。

(注) K は Kikansha, S は Special の頭文字

9) 昭和 62 年 EA 荷重及び M 荷重

- ・ 昭和 62 年(1987), JR 各社においては, 1・2・3, 4 級線は EA 荷重, 電車専用線 M 荷重を用いることとなった.

(注) E は Electric, A は Addition, M は Motor の頭文字

10) 昭和 36 年 NP 荷重

- ・ 昭和 36 年(1961) 東海道新幹線用荷重として NP 荷重が設定された. (山陽新幹線も同一)
- ・ 昭和 49 年(1974) 全国新幹線網建造物設計標準が定められ, 東北・上越新幹線の設計荷重として, N-16, P-17 が用いられることとなった.

(注) N;は Nimotu, P;は Person または Passenger の頭文字

(2) 耐震設計の変遷

a) 震度法による設計

濃尾地震(明治 24 年)を契機として, 建築物の耐震設計の研究が行われ, 大正 6 年に佐野利器博士による「家屋耐震構造論」が, わが国最初の耐震設計法とされている. この著において, 建築物の重量の何割かを水平方向に加えるという, いわゆる震度法が提案された.

鉄道構造物で耐震設計を行う必要性が認識されるようになったのは, 関東大地震(大正 12 年)の被害が契機である. 具体的な規定としては, 昭和 5 年に鉄道省制定の「橋梁標準設計」(建工 169 号)が初めて, その中に「自重および土圧に対し, 水平震度 0.2 を考慮する」ことが記されている.

震度法は, 水平震度 0.2 程度までの地震に対して, 構造物を弾性範囲にとどめようとする設計法であるが, このように設計すれば, 関東大震災の際に東京付近で生じた程度の地震動によっても, 致命的な被害を防止できるものと当時考えられた.

その後, 東南海地震(昭和 19 年), 南海道地震(昭和 21 年), 福井地震(昭和 23 年)などの大地震が発生し被害を受けた構造物もあったが, 戦中戦後の混乱期の中で, 設計基準を改訂するまでには至らなかった.

しかし, これらの地震被害を通じて, 地震活動には地域差があること, 地震被害は構造物を支える地盤の種別に大きく左右されることなどが明らかになった.

昭和 30 年, 国鉄制定の「土木構造物の設計基準(案)」には, それらの影響を考慮した設計法が採用された. この設計基準では, 地域によって基準となる震度を 0.3, 0.2, 0.15 に区分し, さらに, それを 4 種類の地盤種別と構造物種別(剛あるいは柔な構造物)の組合せで補正して設計震度を定める方法が採られた.

東海道新幹線の建設にあたって, 昭和 36 年「新幹線構造物設計基準(案)」がまとめられ, 当時の土木学会やその他の基準等を勘案し, 設計施工において十分耐震的な考慮を払うこととして, 水平震度 0.2 が標準とされた.

昭和 39 年に発生した新潟地震の後, 国鉄が土木学会に委託した「耐震構造設計に関する研究委員会」で, 建設地点の地震状況, 地盤の性質および構造物の重要度を考慮して設計震度を定める体系がまとめられた.

この成果は, 昭和 45 年「建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物)」に反映され, 地域別震度(0.2, 0.15), 地盤別係数, 線区係数を基に設計水平震度を求める方法が示された. 昭和 47 年制定の「全国新幹線網建造物設計標準」には, 構造物の剛性と列車の走行安全性から定まる構造物の許容不同変位の目標値が設定された. また, 新潟地震では, 砂地盤の液状化が原因の被害が多数発生したため, 昭和 49 年に制定された「建造物設計標準(基礎構造物および抗土圧構造物)」において, 地盤の液状化判定が導入された.

b) 修正震度法, 応答変位法, 変形性能を考慮した設計

昭和 53 年の宮城県沖地震では, 建設中の東北新幹線のコンクリート構造物が大きな被害を受けた。主な被害は, コンクリート桁を支える支承部の損傷, 高架橋の柱, 中層梁および橋脚躯体などに発生したひび割れである。このため, 新たな知見を加えた設計法の見直しが行われ, 「耐震設計指針 (案)」(昭和 54 年) がまとめられた。

この指針 (案) では, 地盤を普通地盤と軟弱地盤に分け, さらに構造物の振動特性により設計震度を変える修正震度法が導入された。さらに, 宮城県沖地震による被害から, 支承部の強化および落橋防止工の設置, RC 部材の変形性能向上のため配筋など構造細目にも配慮することなどが盛り込まれた。また, 軟弱な地盤において, 地震時の地盤変位を基礎構造物の設計に考慮する応答変位法が新たに導入された。

昭和 58 年に改訂された「建造物設計標準 (鉄筋コンクリート構造物)」には, RC 部材の変形性能を考慮した設計法が採り入れられた。この設計標準では, 設計震度の 1.5 倍程度の水平力に対して, 破壊安全度の照査を行うとともに, 高架橋の柱や梁などの地震の影響を大きく受ける部材には十分な変形性能を持たせるように定めた。これにより, 従前の構造物に比べ, 耐震性能の著しい向上が図られた。

JR 発足後の平成 4 年に制定された「鉄道構造物等設計標準 (コンクリート構造物)」では, 限界状態設計法が導入され, 設計地震動として 1000ga1 程度を想定することが明記された。この地震動に耐えるために必要な部材の変形性能を照査する方法も定められた。

一方, 鋼構造物は, この時点において地震による被害がコンクリート構造物に比べて少なく, また地震被害が支承部にのみ集中していたこともあり, 変形性能に期待した設計法は導入されなかった。支承部については, 基準となる震度を橋脚の種類等に応じて割増した値を用いることが, 昭和 58 年改訂の「建造物設計標準 (鋼鉄道橋・鋼とコンクリートとの合成鉄道橋)」に定められた。

c) 兵庫県南部地震以降の耐震設計

兵庫県南部地震以降の耐震設計については, 地震被害を踏まえ精力的な研究が行われ, その成果が平成 11 年「鉄道構造物等設計標準 (耐震設計)」(以下, 耐震標準) にまとめられた。この耐震標準の基本は, 従来の耐震設計で考えられていた地震動 (L1) に加え, 兵庫県南部地震のような断層近傍域で発生する非常に強い地震動等 (L2) も考慮して耐震性を照査する「2 段階設計法」と「性能照査型設計法」を採用したことにある。「性能照査型設計法」は, 想定する地震動に対し, 地震時および地震後に構造物に要求される性能を規定し, これを満足するように基礎や上部構造など各部位の損傷状態や残留変位を一定の制限値内にとどめる設計を行うものである。

設計地震動は, 基盤面および地表面でそれぞれ与えており, 地表面では地盤種別毎に L1 地震動 200~400ga1, L2 地震動 1000~2000ga1 (弾性応答加速度) とした。また, コンクリート構造物, 鋼構造物および鋼とコンクリートとの複合構造物のそれぞれについて, 変形性能をより高めた設計法が採用された。地震時の構造物の応答値は, あらかじめ作成された図表を用いて簡易に求める方法 (非線形スペクトル法), あるいはコンピュータシミュレーションを用いて時々刻々と変化する揺れを求める方法 (時刻歴動的解析法) のいずれかにより求めることとした。非線形スペクトル法は, 構造物が降伏するときの震度とその固有周期から, 構造物の揺れの最大値を読みとれるようにしたものである。すなわち, 揺れの大きさを, 構造物が降伏する時の変位に対して何倍の変位が生ずるかを応答塑性率 (μ) で表示したものである。したがって, 線形スペクトル法では, 時刻歴動的解析を行わなくても, 比較的簡易に地震による構造物の応答値が算定できるようになっている。

平成 18 年鉄道構造物等設計標準 (変位制限) が新たに制定された。この変位制限標準では, 常時のほか地震時においても, 列車の走行安全性に有利な構造物を設計することを基本とし, そのための具体的な性能照査の方法を定めたものである。地震時の構造物の設計においては, 走行安全性に

有利な構造物（できるだけ変位の小さい構造物）とするのを基本としているが、大規模地震動に対しては構造物の工夫だけで走行安全性を確保することが困難であることも示し、鉄道システム全体からみて適切な対策を実施し、減災に努めることを推奨している。

現在耐震設計に関する鉄道技術基準は、平成 11 年制定の耐震標準が現在適用されている。この耐震標準は、兵庫県南部地震による鉄道構造物の被害に鑑み、L2 地震動への対応や性能照査型設計法の導入など、先駆的な技術を積極的に取り入れたものである。しかし、その後の地震工学分野の研究の進展や新潟県中越地震など比較的大きな地震が近年多数発生している。このため、平成 18 年 3 月より検討委員会を設置し、平成 20 年度末を目標に耐震標準の改訂原案を作成する作業に入っている。改訂において、構造物に要求される性能と設計地震動、地盤の評価や耐震性能の照査方法、新技術の導入等の検討を精力的に行う予定である。

(3) 疲労設計の変遷

明治の初期には鋼鉄道橋の設計に海外の示方書をそのまま用いていた。その後、日本の技術力も向上し、明治の末には我が国最初の示方書が制定され、いくたびかの見直しや改訂を経て現在に至っている。これらの示方書における、疲労設計の変遷の概要を以下に示す。

a) ベーカー示方書(1895 年)

明治 28 年に圧延 I 形桁の設計に用いられた示方書でイギリスのベンジャミン・ベイカーの示方書を中国の鉄道技師キンダーが自国の鉄道橋の設計に適應するように改訂したものである。

この示方書では、リベット構造の疲労に対する配慮が示され、1 列車の通過中に、ある部材の応力が正負に交番する場合、いずれか絶対値の大きい方の応力に、反対符号である小さい方の応力の 1/2 を加えた応力に対して安全な断面となるように規定していた。

b) 溶接鋼鉄道橋設計示方書案(1960 年)

西ドイツの鉄道橋示方書を参考にした疲労照査手法を取入れ、継手を 5 分類し、それぞれの 200 万回疲労強度のみを示し、その部分の静的な設計応力がこれを上回らないようにしていた。なお、対象とした鋼材は 41 キロ(400N/mm²)級鋼および 50 キロ(490 N/mm²)級鋼である。

また、この示方書は東海道新幹線の設計にも使用されている。ただし、列車荷重の載荷頻度が 2000 万回以上になることを考慮し、標準活荷重である軸重 16 トンを 2 トン増した 18 トンを設計荷重とした。これは、車両の設計軸重 15 トンに乾燥疲労による割増 10%と、腐食疲労による割増 8%を考慮した係数 1.18 を乗じた 17.7 トンを切上げたものである。

さらに、山陽新幹線では乗車効率の増加傾向を考慮して、軸重を 3 トン増しとした 19 トンを設計荷重とした。すなわち、乗車効率 120%に相当する軸重 15.7 トンに 1.18 を乗じて 19 トンとしたものである。

c) 建造物設計標準(1970 年)

それまでの鋼鉄橋の示方書類を再構成したものであり、これによりほぼ現行の設計手法が確立した。疲労設計に関しても内外の実験等を反映して継手区分を見直し、また、各継手に対して 95%の非破壊確率を目安として許容応力度を整理し直した。

d) 全国新幹線網建造物設計標準(1972 年)

疲労に対する設計をより合理的にするため、橋桁に生じる変動応力の効果を実態に近づけるなど以下に示す配慮を行い、スパン毎に基本的な疲労許容応力度に乗じる係数を決めた。

- ・ 耐用年数を 70 年とした。
- ・ 設計荷重は以下の通りとした。
P 荷重（軸重 17 トン）：16 両編成 130 本／日
N 荷重（軸重 16 トン）：30 両編成 20 本／日
- ・ 長寿命域での強度評価として、各継手とも、200 万回を超えたところにも S-N 線図を延

長し、その勾配を表す定数 m を10とした。

- ・ 58キロ (570 N/mm²) 級鋼について適用可能とした。

e) 建造物設計標準の改訂 (1983 年)

従来の「発生応力度」に対し「応力範囲」を用い疲労の照査を行うことにした。また、同じ活荷重でも建造物が受ける繰返し回数は影響線長によって異なるため、これを考慮した係数を用いて以下のように、疲労許容応力範囲 σ_{fa} (垂直応力度) および τ_{fa} (せん断応力度) を計算する。

$$\sigma_{fa} = \beta \cdot \gamma \cdot \sigma_{f0} \quad (5.2.1)$$

$$\tau_{fa} = \beta \cdot \gamma \cdot \tau_{f0} \quad (5.2.2)$$

この疲労許容応力範囲を用い、以下の式により、疲労に対する安全を照査することとした。

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} \leq \sigma_{fa} \quad (5.2.3)$$

$$\tau_{\max} - \tau_{\min} \leq \tau_{fa} \quad (5.2.4)$$

ここに、

$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ($\tau_{\max} - \tau_{\min}$) : 計算作用応力範囲

σ_{f0} , τ_{f0} : 各継手の繰返し数 200 万回の基本疲労許容範囲

β : 平均応力を考慮した係数

γ : 影響線長、通過トン数および複線同時載荷等を考慮した係数

その他、S-N縮図の200万回強度とその勾配を明確に示した。すなわち、S-N線図は直線被害則に従い全て直線とし、その勾配を表す定数 m を以下の通りとした。

- ・ 溶接継手 (58キロ (570 N/mm²) 級鋼を除く) : 4
- ・ 溶接継手 (58キロ (570 N/mm²) 級鋼) : 3
- ・ 非溶接継手とせん断に関するもの : 5

f) 鉄道構造物等設計標準の改訂 (1991 年)

列車本数の多い高速線区等では、供用桁の疲労損傷が増加する傾向にあり、また、鋼鉄道橋の設計手法に限界状態設計法を導入するため、以下の問題点に対応するように改訂した。

1) 長寿命域の継手強度の見直し

設計荷重として「電車・内燃動車荷重」が設定され、想定する繰返し数が飛躍的に増加することに伴って、さらに精度の高い長寿命域の疲労強度の確認が必要になった。

従来の疲労試験データは継手をモデル化した小型試験片を用い、一定振幅の応力により、繰返し数 200 万回程度の試験によって得られたものが一般的である。しかし、溶接継手の疲労強度は残留応力等により寸法効果の影響を受けること、低応力・長寿命域での疲労特性は変動応力波形の形状によって変化することが近年明らかになっている。

このため鋼鉄道橋に用いられる基本的な溶接継手を配置した模型桁を用い、実応力頻度分布を想定した荷重による疲労試験を行い、低応力・長寿命域での各種継手の疲労特性を検討し、設計標準に取り入れた。

2) 設計手法の検討

疲労設計手法の見直しについては、従来から蓄積されてきた鉄道橋での実績をベースにしたが、内外の類似構造物における疲労設計に関する示方書が見直されており、これらと整合性を図ることも必要であった。このため日本鋼構造協会の「疲労設計指針(案)1989.11」の設計手法を導入し、疲労設計曲線の設定、継手の強度等級分類、疲労限の設定等についてこの指針の考え方を取り入れた。

すなわち、継手の強度等級については垂直応力を受ける継手で4等級から7等級にし、合理性を図った。また、疲労設計曲線の傾きは疲労亀裂の発生以外に実構造物で疲労寿命の大部分を占める亀裂の進展を考えると鋼種に無関係となるため、一定とすることとし、垂直応力を受ける継手で、その勾配を表す定数 m を3に統一した。

3) 実応力比の導入

継手の強度が実体に近づくことに対し、荷重効果の精度もこれとバランスをとる必要かでてきた。すなわち、継手の強度とバランスをとるように設計応力範囲を投定し、経済性を損なわないように配慮する必要があった。このため実測応力と設計計算応力との比を実応力比として疲労の照査式の設計応力範囲に取り入れた。

4) 繰返し数を考慮した係数

設計に用いる列車荷重に電車・内燃動車荷重が規定されたことに伴い、繰返し数を考慮した係数を新しく設けた。また、この係数は昭和 58 年の設計標準では、主に旧国鉄の列車荷重を基に算出したものであったが、新設計標準では全鉄道事業者の鋼鉄道橋に適用できるものにした。

(4) 鋼及び合成鉄道橋設計示方書の変遷

明治の初めは、イギリスの指導を受け、鉄道橋の設計に際し、確たる示方書が用いられることは無かったようである。

ポーナルは、トラスや板桁などの鉄道橋の設計においてイギリスのベンジャミン・ベイカーの示方書によったと言われている。

明治 30 年頃から、それまでのイギリスの技術に代わってアメリカの技術に依存するようになった。このとき用いた荷重が、いわゆるクーパー荷重と呼ばれるものである。

明治 39 年(1906)、鉄道国有化法が公布されて、それまでの民間会社線は明治 40 年ころにはほとんど国有化された。これに伴い、明治 42 年(1909)、設計荷重をクーパー E-33(動輪軸重 15t)と定め構造物の統一化が図られた。

我国において、初めて設計示方書が制定されたのは、明治 45 年(1912)で、これはフィート・インチ式によるものであった。

その後、昭和 3 年(1928)にメートル式に改められ、戦後には、溶接構造、合成桁、新幹線構造物、鉄骨鉄筋コンクリート構造物等に関する設計示方書が制定・改訂が行われ、現在に至っている。

これらの設計示方書は、許容応力度法によるものであるが、平成 4 年に限界状態設計法に移行した。以下に、鉄道の設計示方書の変遷について示す。

a) 明治 45 年 鋼鉄道橋設計示方書

我国で制定された最初の示方書である。内容は AREA 示方書とほぼ同じで、一部改訂補足したものである。

b) 昭和 3 年 鋼鉄道橋設計示方書

メートル法の施行に伴い、設計示方書がメートル式に改訂されたのに伴い、橋梁の設計荷重は KS-18 と改正され、以後、KS 荷重体系が昭和 61 年度まで続いた。また、許容引張応力度は 1200kg/cm^2 となった。

c) 昭和 15 年 鋼鉄道橋設計示方書 (土木学会)

昭和 3 年(1928)の示方書を改め、当時計画されていた新幹線の橋りょうの設計に参考とするために作られたので、結局案のままに終わったが、リベット孔の断面削除計算法等、その内容の一部は内規的に採用された。

d) 昭和 31 年 鋼鉄道橋設計示方書

上記示方書をもとにして研究・検討されて作られたもので、支間 120m 以下の単純プレートガーダー、単純トラスのリベット結合鉄道橋に適用した。

鋼材は SS41 を対象としており、許容応力度は昭和 3 年(1928)のものより高く、 1300kg/cm^2 で、衝撃係数などは下がっているので、10%程度鋼材は少なくなった。

e) 昭和 34 年 高張力鋼鉄道橋設計示方書案 (土木学会)

当時、高張力鋼はまだ JIS 規格がなかったが、市場にあるもののうち、一般的なものを想定して降伏点 32kg/mm^2 (RS32)および 36kg/mm^2 (RS36)の鋼材を用いたリベット結合鉄道橋の設計示方書を作成した。なお、許容応力には、疲労効果を考慮した。

f) 昭和 35 年 溶接鋼鉄道橋設計示方書(土木学会, 昭和 32 年制定, 35 年改訂)

昭和 6 年(1931)「電弧溶接鋼構造物設計および製作示方書(案)」が発表され、溶接補強や簡易な溶接構造物に用いられた。昭和 30 年頃から溶接橋りょうが盛んになるにつれ、示方書の作成が必要とされたので、土木学会に委託した。

材料は SM41 および SM41W を考慮し継手種類、応力の種類に応じて疲労効果を考慮した許容応力度を定めた。また、昭和 35 年(1960)には、SM50 を加えた。

この示方書は東海道新幹線用橋りょうをはじめ広範囲に利用された。

g) 昭和 36 年 新幹線鋼鉄道橋設計標準

新幹線用構造物の設計のために作られたものであるが、荷重・たわみなど、在来線の基準が適用できない事項について規定し、他の事項については、従前の示方書を適用している。

また、新幹線は電車荷重であり、繰り返しの影響が大きいと考えられるので新幹線標準荷重の軸重 16t を 18t とし、従来の許容応力度を用いている。

h) 昭和 38 年 合成鉄道橋設計示方書

合成桁鉄道橋は初めドイツの基準 DIN1078 を参考にして設計を行っていたが、本格的に利用されるようになったので、昭和 38 年(1963)合成桁鉄道橋設計示方書が作成された。

i) 昭和 45 年 建造物設計標準(鋼鉄道橋)

鋼鉄道橋設計標準(昭和 31 年)、高張力鋼鉄道橋設計示方書案(昭和 34 年)、溶接鋼鉄道橋設計示方書案(昭和 35 年)を統合し制定したもので、支間 150m 程度までの橋梁を対象とし、単純桁のみならず不静定構造物や橋脚へも適用することを考慮している。

材料として SM50Y, SM53, 耐候性鋼材および高力ボルトが追加され、許容引張応力度を降伏点の $1/1.8$ から $1/1.7$ (41 キロ級; 1400kg/cm^2)と上げた。

j) 昭和 45 年 全国新幹線網設計標準

東北・上越新幹線用の設計示方書で鋼鉄道橋設計標準(昭和 45 年)のうち適用の異なる事項をまとめたものである。

k) 昭和 49 年 建造物設計標準(鋼鉄道橋, 鋼とコンクリートの合成鉄道橋)

昭和 45 年に建造物設計標準に昭和 38 年の合成鉄道橋設計示方書を統合した。

また、鋼材に関しては SM58 が追加された。

l) 昭和 58 年 建造物設計標準(鋼鉄道橋, 鋼とコンクリートの合成鉄道橋)

昭和 49 年(1974)建造物設計標準(鋼鉄道橋, 鋼とコンクリートの合成鉄道橋)に、昭和 45 年(1970)全国新幹線網設計標準で規定されていた新幹線に関するものが取り入れられた。

また、衝撃係数に速度の影響が考慮され、許容引張応力度が降伏点の $1/1.7$ から $1/1.6$ (41 キロ級; 1500kg/cm^2)に上げられ、疲労の照査方法として、継手等級、応力変動の大きさおよび線路等級、部材の種類等を考慮するものにした。

m) 平成 4 年 鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)

これまでの許容応力度法から、限界状態設計法の書式となった。また、設計活荷重は、EA および M 荷重が用いられるようになり、疲労設計は鋼構造協会の「疲労設計指針」をベースに全面的な見直しが図られた。

2004 年から鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)の改訂に向けた委員会が始まっている。改訂に当たっては、全面的に性能設計が取り入れられることになる。

5.2.2 複合構造物の変遷

日本国有鉄道における鉄骨鉄筋コンクリート構造物（以下、SRC 構造物という）の設計は、昭和 51 年 11 月に制定された「SRC 構造物設計指針」に基づいて行われてきた。この間、建造物設計標準（鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物、鋼鉄道橋）の全面的な改訂に伴って、この設計指針も一部改訂された。

その後、これまでの各種 SRC 構造物の実績、部内外における各種実験研究と開発の成果などをふまえ、より合理的で経済性に優れた内容にすべく改訂が要望されるに至った。このため国鉄では昭和 59 年度から土木学会に委託して「SRC 構造物設計標準に関する委員会」（委員長 田島二郎埼玉大教授）を設置し、2 年間にわたり調査研究を行い、昭和 61 年 3 月にその最終報告「鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針」をとりまとめた。

また、JR に移行し、平成 4 年 10 月に発刊された「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」、「同（鋼・合成構造物）」においては、限界状態設計法が導入され、実設計に広く用いられるようになった。このため、鋼とコンクリートの複合構造物でも、コンクリート構造物、鋼・合成構造物の設計標準等との整合を図り、限界状態設計法に対応した設計法への移行が求められた。

このため、当時の運輸省の指導のもとに、平成 4 年 12 月に財団法人鉄道総合技術研究所に「鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計標準に関する委員会」（委員長 阿部英彦足利工業大教授）が設けられ、平成 7 年度末の完成を目指して、複合構造物の限界状態設計法について検討を重ねてきた。しかし、平成 7 年 1 月 17 日に兵庫県南部地震が発生し、複合構造物の設計法も再検討を余儀なくされ、期間を 1 年間延長し種々の検討を行ってきた。このような経緯で、「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）」が、平成 10 年 7 月に刊行された。

これらの示方書の概要について以下に示す。

(1) 複合構造物の示方書の変遷

a) 昭和 51 年鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針

昭和 40 年代になると、SRC 構造物への需要も増加してきた。

それまで、SRC 構造物の設計に際しては建築基準を準用していたが、鉄道土木特有の問題を考慮して、この指針が定められた。

b) 昭和 61 年 鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針

昭和 58 年(1983)の鋼鉄道橋、コンクリートの標準を取入れて、昭和 51 年(1976 年)の指針を改訂したものである。

それまでの指針では、許容応力度法による設計手法であったが、この指針では、限界状態設計法を採用しており、最新の設計示方書となっている。

c) 平成 10 年鉄道構造物等設計標準（鋼とコンクリートの複合構造物）

この複合構造物の設計標準として「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）」が平成 10 年 7 月に発刊された。

ここでは、この設計標準での設計の考え方を紹介する。

1) 適用範囲

鉄骨鉄筋コンクリート構造については、旧国鉄時代に「鉄骨鉄筋コンクリート構造物設計指針」（昭和 62 年）が作成されているが、今回、この内容を「RC 標準」、「鋼標準」との整合を図りながら、深度化している。コンクリート充填鋼管構造については、これまで独自の設計法がなく、新たに規定している。また、混合構造には、異種材料からなる合成部材を組み合わせて一つの構造システムとする混合構造物や鉄骨鉄筋コンクリート構造、あるいはコンクリート充填鋼管構造を主たる部材とし、鉄筋コンクリート部材、プレストレストコンクリート部材、鋼部材と組み合わせ一つの構造システムとする混合構造物についても適用の範囲に含まれている。

2) 設計法

設計法は、最近の内外の研究成果を取り入れ、限界状態設計法を適用しており、終局、使用、及び疲労の各限界状態に対する安全性の検討を行うこととしている。

終局限界状態における鉄骨鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力については、鉄骨を鉄筋とみなし、一般の鉄筋コンクリート部材と同様に平面保持の法則を仮定し算定する。また、せん断耐力については、鉄筋コンクリート部分により受持たれる耐力と鉄骨部分により受持たれる耐力の累加として算定する。

コンクリート充填鋼管部材(円形断面)の曲げ耐力については、コンクリートの限界圧縮ひずみを 6000μ として、鋼管を鉄筋とみなし一般の鉄筋コンクリート部材と同様に平面保持の法則を仮定し算定する。

なお、耐震に関する検討については、部材の塑性変形性能を前提とした設計法としており、設計に必要な部材じん性率の算定方法について示している。

3) 定着部・接合部の設計

複合構造物の設計を行う場合、部材間の接合に関しては、十分な検討が必要である。接合部で断面力が確実に伝達されなければ複合構造としての利点を十分に発揮できなくなるばかりでなく、弱点ともなる。標準では、柱とフーチング・基礎杭の定着部、及び柱・梁接合部の設計方法を示しているが、コンクリート充填鋼管柱に RC 梁あるいは SRC 梁を接合する一つの方法であり、梁に設置された鉄骨又は鉄筋の突起を鋼管内に差込み、コンクリートで固着する接合方法である。

この接合構造は、鋼管固体にほとんど加工を施す必要がないため経済的であること、コンクリートを介在させることにより、鋼管柱自体の施工誤差を吸収可能であり施工管理が容易となるなどの利点がある。

(2) 今後の動向

今後の鉄道工事は、線路直上や線路に近接した工事などのように制約条件の多い工事が増加すると考えられるため、複合構造へのニーズはますます高いものになると予想される。このような状況の中で、複合構造は自由度が高く、そのアイデアは無数にあると考えられ、新しい研究開発を通して今後のさらなる発展が期待できる。

5.2.3 鋼管杭

(1) 杭基礎の歴史

橋梁基礎に木杭を用いることは、明治初期から行われていたが、大正に入って必要に応じてコンクリート杭が用いられるようになった。プレストレストコンクリート杭(PC 杭)は、1962 年首都高速道路で初めて採用された。1967 年に JIS が制定され、1970 年頃武蔵野西線で大径 PC 杭(径 1.0m、長さ 46m)が用いられた。高強度プレストレストコンクリート杭(PHC 杭)は 1967 年に開発されたが、JIS 制定は 1982 年である。

鋼杭は、1894 年横浜港大棧橋の基礎に使用されるが、その後は普及せず、鋼管杭が 1960 年頃から用いられるようになった。1962 年東海道新幹線江尾橋梁で長さ 58m の鋼管杭を用いている。JIS 制定は 1963 年である。

SC 杭(鋼管複合杭)は、1970 年頃に開発された。1977 年上越新幹線燕三条駅高架橋に用いられた。1979 年 SC 杭設計指針が制定された。高いじん性能に着目し、1983 年頃京葉線湾岸埋立地の液状化地盤中の高架橋基礎杭の上杭に多く用いられた。JIS 制定は 2004 年である。

1960 年代には負の摩擦力による長尺鋼管杭の被害が問題化した。1970～3 年に武蔵野ヤードでネガティブフリクションおよびその対策の大規模な実験が行われた。ネガティブフリクション低減杭(SL 杭)は、1971 年日本鋼管が保護層付き SL 杭を開発、既製コンクリート杭の SL 杭も 1987 年か

ら順次開発された。

(2) 杭基礎設計法の変遷

a) 基準未整備時代

杭の鉛直支持力式は、1950年代には各種の杭打ち公式や古典的静力学的公式が用いられていた。

1960年に建設が始まった東海道新幹線では、RC杭と鋼管杭は主にデルマック D22により打ち込まれ、その支持力は動力学的公式によって算定された。また、重要構造物、軟弱地盤、摩擦杭、不完全支持杭箇所での多くの載荷試験(46箇所、76本)が行われた。

b) 土構造物の設計施工指針(案)

1967年に制定された。支持杭の安全率は、常時3、一時3、地震時2である。杭先端の極限支持力は、テルツァギー式を修正した算定式であり、杭周面の摩擦力は、砂質土と粘性土に分けて算出された。水平荷重に対しては、林・チャンの式による計算法が示された。

c) 場所打ちコンクリート杭の設計施工指針(案)

1969年に制定された場所打ち杭の施工方法が詳細に記述されている。アースドリル杭は、ベントナイト泥水を用いる場合の有効断面を公称径-100mmとしている。

d) 建造物設計標準(基礎構造物)

1974年に制定された。安全率は常時3、一時2、地震時1.5に変更された。杭先端の極限支持力は、N値を用いマイヤーホフ式の修正式($Q_p=300N_{Ap}$)になったが、杭周面の摩擦力はほとんど変わらなかった。

e) 耐震設計指針(案)

1979年に制定された修正震度法を採用し、軟弱地盤の杭基礎の設計に地震時の地盤変位の影響(応答変位法)を始めて取り入れた。

f) 既製杭の中掘先端根固め工法設計施工指針(案)

1971年に制定された代表的な拡大根固め5工法に対して支持力算定式、施工管理方法等を定めた。

g) 建造物設計標準改訂版

1986年に改訂され、杭の支持力は、杭径の10%沈下時の先端支持力を基準支持力とし、載荷試験事例を多く集め、周面摩擦と先端抵抗を分離して沈下量との関係を分析して各々に安全係数を乗じて算定する許容支持力算定式になり、精度が大幅に向上した。水平荷重に対しては、鉛直ばねによる基礎の回転変位を考慮した変位法が導入された。

h) 鉄道構造物等設計標準(基礎構造物)

鉄道総研を中心に1997年に制定され、限界状態設計法が導入された。杭基礎は1986年版と内容的にほとんど変わらないが、先端強化型場所打ち杭と中掘り先端根固め杭が追加された。

i) 鉄道構造物等設計標準(耐震設計)

1995年1月の兵庫県南部地震を契機に、レベル2地震動に対応した耐震設計標準が1999年に制定された。本標準は3段階の耐震性能を規定した性能照査基準となっている。また、部材や地盤抵抗の非線形特性を評価し、動的解析およびこれを基に作成した降伏震度スペクトル法を取り入れるなど、これまでにない斬新な基準となった。レベル2地震動による液状化や地盤変位などに対処するため、機械式継手による太径鉄筋とフープ筋を多くした場所打ち杭、鋼管杭、SC杭など変形性能の優れた杭の採用を促進させた。

(3) 新しい杭基礎工法

レベル2地震動に対する耐震設計の導入に伴い、液状化地盤や軟弱地盤での地震時地盤変位に対応した塑性変形性能を重視した杭や低騒音低振動で掘削土砂や廃棄泥水等の産業廃棄物の少ない環境に配慮した工法の必要性が高まった。一方、近接施工を伴う連続立体交差化工事や営業線の路下などの狭隙、空頭制限での施工、新旧構造物の不等沈下が問題になる既設線の拡幅工事などに適し

た工法の開発および採用が、鉄道総研、JR 東日本を始め、各鉄道会社において増加している。

a) ソイルセメント合成鋼管杭

排土量が少なく、場所打ち杭より支持力が大きいソイルセメント合成鋼管杭は、1995年秋田新幹線盛岡アプローチ高架橋において初めて採用された。鉄道総研は、1999年同時埋設方式、2000年後埋設方式の支持力等の地盤抵抗特性について暫定的に示した。2001年からJR四国土讃線高知駅連続立体交差事業で採用されている。

b) 回転貫入鋼管杭

先端に羽根を取付けた鋼管杭を支持層まで回転貫入することにより設置する回転貫入鋼管杭は、1985年頃から小口径杭が戸建住宅を対象に用いられ、1999年に径1200mmと大口径化し、現在は径1600mmまで適用できる。鉄道では、2001年名古屋市臨港鉄道金城ふ頭線で用いられ、2002年九州新幹線博多・新八代間の八代地区の液状化地盤の高架橋に用いられた。

c) 先端支持力強化場所打ち杭

先端支持力強化場所打ち杭は、先端地盤にあらかじめ荷重を与えて締め固め、支持力を高めて沈下量を低減させる工法であり、中間層の軟弱な地盤や沈下量制限の厳しい構造物に有効な杭である。鉄道総研、熊谷組、三井建設が共同開発したオールケーシング杭用のSENTANパイル工法は、1991年に横浜市高速鉄道3号線に最初に用いられた。その後、基礎設計標準や道路公団設計要領および道路橋示方書に支持力算定式が提示され、鉄道や高速道路に用いられている。一方、JR東日本が開発した先端プレロード場所打ち杭工法は、リバース工法やアースドリル工法などにも適用できる。2001年上越新幹線本庄早稲田駅高架橋のオールケーシング杭に初めて用いた。その後中央線三鷹・立川間連続立体交差化工事で用いている。

d) 低騒音低振動オールケーシング杭

掘削時の騒音、振動が大きいハンマーグラブに代えてアースドリル工法で用いるドリリングバケットによって掘削するアースドリル併用オールケーシング工法が2001年つくばエクスプレスの住宅接近箇所の高架橋で用いられた。2003年には低騒音低振動でハンマーグラブ掘削と同等以上の掘削能力を実現したスクリュードライバー工法を九州新幹線高架橋で用いている。

2005年から鉄道構造物等設計標準(基礎構造物・抗土圧構造物)の改訂に向けた委員会が始まっている。改訂に当たっては、全面的に性能設計が取り入れられることになる。杭基礎においても、新しい杭工法を取り入れることは勿論のこと、杭頭のヒンジ結合や斜杭なども正しく性能を評価して採用できることなどを期待している。

5.2.4 鋼管矢板工法

(1) 鋼管矢板基礎

鋼管矢板基礎は、鋼管矢板を現場で円形、小判形、長方形などの閉鎖形状に組み合わせて打込み、鋼管矢板の継手管内にモルタルを充填し、その頭部に頂版を設けて剛結することにより、鋼管矢板単体の剛性のみならず井筒全体としての剛性をもたせ、所定の水平抵抗と鉛直支持力が得られるようにした基礎構造物である。

このような鋼管矢板基礎は、杭基礎とケーソン基礎の中間的な基礎工と評価されるが、これは、継手のせん断剛性により各矢板が合成され、井筒全体が単体として働こうとすると同時に、その継手のせん断的なずれ変形が比較的大きく生ずるため、個々の矢板が個別に変形しようとする重ね梁的な挙動も示すからである。鋼管矢板基礎の特徴は、施工的には鋼管杭と同様項目が、設計的にはケーソンと杭の中間的な長所短所があげられるが、最大の特徴は、仮締め切り兼用工法をとり得ることであろう。仮締め切り兼用工法は、締め切り工法のように水中施工時に仮設工を設けることなく、1本の鋼管矢板が仮締め切り壁と基礎本体とを兼用するので、工期が短縮され、工費が節約されるだ

けでなく、仮締切り壁が剛性の高い鋼管矢板で構成され、その根入れも深いので施工時の安全性が極めて高いなどの長所を有している。

鋼管矢板基礎は、昭和 39 年頃より開発に着手され、昭和 42 年に水島地区での溶鉱炉基礎に用いられたのが最初で、その後昭和 44 年には石狩河口橋の基礎として初めて橋梁基礎に採用され、新しい水中基礎としての数々の長所が認められるようになった。

昭和 44 年には鉄鋼メーカー 5 社が建設省より研究補助金を受け、「矢板式基礎の施工性と構造特性に関する研究」を実施し、建設省、大学等の学識経験者および鉄鋼メーカーの関係者からなる矢板式基礎研究委員会が設置され、その成果として昭和 47 年に「矢板式基礎の設計と施工指針」が作成された。その後、末広大橋や新水郷大橋など次々と鋼管矢板基礎が採用されるようになってきた。その後、鋼管矢板基礎の規模が大型化し、井筒の断面形状も多様化するにつれ、各機関で研究が続けられ、阪神高速道路公団、日本国有鉄道、首都高速道路公団、建設省土木研究所、あるいは製鉄メーカーにおいて、模型実験や実物実験が多数実施され、また、上記の公的機関においても、それぞれの設計基準の作成が行われている。

日本国有鉄道(現 JR)では、昭和 56 年に「鋼管矢板井筒の設計施工指針(案)」を、さらに、昭和 62 年には鉄道総研より同指針(案)の改訂版である「鋼管矢板井筒の設計施工指針(案)」が作成されている。

近年では、井筒径が 50m 以上の大型鋼管矢板基礎についても検討がなされており、それに伴う技術課題として、継手剛性の向上や井筒幅が大きい場合の水平地盤反力係数の算出方法、井筒側面の地盤および井筒内部土の抵抗力等の問題を解決する必要がある、各関係機関でも、これらの問題点を解明すべく研究がなされている。いずれ近い将来にこれらの問題点も解決されて、大型鋼管矢板基礎が多数採用されることになるものと思われる。

(2) 地中連続壁基礎

地中連続壁基礎は、場場打杭の一種である地中連続壁(以下連壁と呼ぶ)を基礎に用いたものをさす。基礎形式は壁式基礎と井筒式基礎に分けられる。

連壁基礎が我が国で構造物基礎として、本格的に使われ始めたのは、建築分野において構造体として耐力壁および基礎杭(壁基礎)に使用するために(財)日本建築センターの評定制度が設けられ、最初の評定が行われた昭和 48 年以降である。土木分野においては、ケーソンの代替工法である井筒式基礎としての使用が先行した。昭和 40 年代後半より、首都高速道路公団、JR(旧国鉄)、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団で実績を積み昭和 62 年には建設省においてパイロット事業として採用されている。一方、壁式基礎に関しては、昭和 62 年に日本道路公団で水平載荷試験が初めて実施されたのを端緒に各企業体で、今後採用される気運にある。

5.2.5 開削トンネル

近年の地下空間利用に対する要求の増大に伴い、地下施設の建設が大規模化、大深度化し、かつ幅換して進められている。特に都市部における地下構造物の建設においては、限られた空間の中での急速施工、低コスト化が求められ、開削工法において従来仮設構造物として用いられてきた地下連続壁を本体利用するなどの技術開発が進められている。

こうした背景から、開削トンネル設計標準(案)においては、地下連続壁を本体に利用する場合の設計法について、鉄筋コンクリート(RC)連続壁のみならず、より省力化、薄壁化の可能な都市型の地下連続壁工法である鋼製連続壁についても規定している。

開削トンネル設計標準(案)では本体構造物においては限界状態設計法を原則とし、仮設構造物では許容応力度法を基本とした設計が示されているが、地下連続壁を本体利用する開削トンネルの設計においては、設計手法の場合ごとの使い分けによる煩雑性の排除と、同一構造物の設計思想の

統一性という観点から、地下連続壁構築後掘削完了までの各段階における施工時の安全性の検討においては、完成時と同様に限界状態設計法を用いることとした。

地下連続壁を本体構造物の壁体の全部あるいは一部として利用する場合は、施工条件、荷重条件、および構造形式等を考慮して設計する。

終局限界状態の照査においては断面耐力の照査のほか、主に鋼製地下連続壁において、周辺構造物あるいは他の地下構造物への影響を考慮して、一般に事業者等によって定められる変位制限値と応答変位量との照査を行う。施工時の照査については終局限界状態に対して行うものとし、ひび割れ等の使用限界状態に関しては施工時から完成時までの残留ひずみ、残留応力の累積を考慮して完成状態にて照査することを原則とする。

【参考文献】

- 1) 鉄道総合技術研究所編：(SI 単位版) 鉄道構造物等設計標準(鋼・合成構造物)，平成 12 年 7 月
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準(鋼・合成構造物)，平成 19 年 1 月
- 3) 久保田敬一：本邦鉄道橋梁ノ沿革ニ就テ，鉄道省大臣官房研究所業務研究資料，昭和 9 年 1 月
- 4) 鉄道施設技術発達史編纂委員会：鉄道施設技術発達史(復刻版)，平成 6 年 1 月
- 5) 佐藤勉：鉄道構造物の耐震設計の変遷，日本鉄道施設協会誌，平成 18 年 10 月
- 6) 阪本, 阿部, 小芝, 杉館：限界状態設計法による鋼鉄道橋の疲労設計，鉄道総研報告，平成 4 年 1 月
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準(鋼とコンクリートの複合構造物)，平成 12 年 7 月 (SI 単位版)
- 8) 山田正人：複合構造物入門，日本鉄道施設協会誌，平成 10 年 12 月
- 9) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準(基礎構造物)，平成 12 年 6 月 (SI 単位版)
- 10) 青木一二三：杭基礎の変遷と新しい杭基礎工法，日本鉄道施設協会誌，平成 18 年 3 月
- 11) 建設産業調査会：橋梁設計・施工ハンドブック，平成 2 年 1 月
- 12) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準(開削トンネル)，平成 13 年 3 月
- 13) 高山, 村田, 広沢, 田崎, 姉川：鋼製連続壁を本体利用した開削トンネルの設計法，鉄道総研報告，平成 12 年 8 月

表-5.2.1 鋼製橋脚の設計の変遷

年 代	和暦	西暦	設計示方書・標準・標準・指針ほか 鉄道開業	基準対象	基準のポイント 改正の主要ポイント	設計荷重	鋼材					耐震設計	接合法
							普通鋼	41級	53級	58級	59級		
明治28年	明治28年	1895年	ベシヤミン・ペーカーの示方書		リベット橋造の疲労に対する配座正負の	シールドポイント荷重 ポータル荷重	鋼鉄						現場
明治31年	明治31年	1898年	クーバーの示方書										リベット
明治43年	明治43年	1910年	AREAの示方書		AREAの示方書を一部改訂し補足 収め単位・ワイヤポイント・メー 製計活荷重・クーバー・KS	明治42年 E33 (鉄軌) E40 E45 (枕軌)							
明治45年	明治45年	1912年	鋼鉄道橋設計示方書			KS12 (電車専用線)							
昭和3年	昭和3年	1928年	鋼鉄道橋設計示方書 (単位メートル)			昭和4年 KS15 (乙線) KS18 (甲線)							
昭和15年	昭和15年	1940年	鋼鉄道橋標準設計示方書 (土木学会編)	支間120m以下のリベット橋造	新幹線鉄道 (弾丸列車) にも通 用 ただし、実用はしなかった	(KS-28)							
昭和31年	昭和31年	1956年	鋼鉄道橋設計示方書 (リベット最後の示方書)		鋼橋の設計施工および保守上の 留意点を反映し補外箇の示方書も 参考	KS14 (4級線) KS16 (3級線) KS18 (1.2級線)							
昭和34年	昭和34年	1959年	高張力鋼鉄道橋設計示方書 (案)		西ドイツの鉄道示方書を参考にし た疲労設計手法の導入								
昭和35年	昭和35年	1960年	溶接鋼鉄道橋設計示方書 (案)	東海道新幹線用									
昭和36年	昭和36年	1961年	新幹線構造物設計標準 (案)										
昭和38年	昭和38年	1963年	合成桁鉄道橋設計示方書 (案)	網とコンクリートの合成桁									
昭和45年	昭和45年	1970年	建造物設計標準 (鋼鉄道橋)										
昭和47年	昭和47年	1972年	全国新幹線建造物設計標準 (東北・上越・成田用)	全国新幹線標準法で定められた 新幹線の建造物									
昭和48年	昭和48年	1973年	建造物設計標準 (鋼鉄道橋)										
昭和48年	昭和48年	1973年	建造物設計標準 (鋼鉄道橋)										
昭和58年	昭和58年	1983年	建造物設計標準 (鋼とコンクリート合成鉄道橋)	支間120m以下の鋼鉄道橋	安全率の変更(1.6)、疲労設計手 法の全面的改訂、新幹線も含む	昭和58年 KS14 (4級線) KS16 (1.2級線) 新幹線NP16							
平成4年	平成4年	1992年	鉄道構造物等設計標準 (鋼 合成構造物)	支間150m以下の鋼鉄道橋	鉄骨応力法 限界状態設計 法、疲労設計手法を、SSC疲労設計 指針に合わせて改訂	昭和62年 EA17 EA15 (欄間車荷 重) M18 (電車専用線)							
平成11年 平成12年	平成11年 平成12年	1998年 2000年	鉄道構造物等設計標準 (鋼 合成構造物) SMA鋼		性能照査型の耐震設計								

表-5.2.2 複合構造物 (CFT 柱) の設計の変遷

年代 利権	西暦	設計示方書・基準・標準・指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼材					基本許容応力 (kg/cm ²)					耐震設計	疲労設計	接合法 工場		
						普通鋼	41級	50級 (RSS2)	53級	58級	普通鋼	41級	50級 (RSS2)	53級	58級					
昭和51年	1976年	SRC構造物設計指針	SRC構造	許容応力度 ・累加強度方式	昭和30年 KS14(4級線) KS16(3級線) KS18(1.2級線)	SM41	SM41	SM50	SM50	SM58	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
昭和54年	1979年	耐震設計指針案			昭和36年 新幹線NPI6	SM41	SM41	SM50	SM50	SM58	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
昭和58年	1983年	耐震設計指針(案)解説			昭和58年 KS14(4級線) KS16(1.2.3級 線) 新幹線NPI6	SS41	SM41	SM50	SM50	SM58	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
昭和62年	1987年	鉄骨鉄筋コンクリー 構造物設計指針	SRC構造	限界状態設計法(終局・使用・疲労) ・合成方式を採用	昭和58年 KS14(4級線) KS16(1.2.3級 線) 新幹線NPI6	SS41	SM41	SM50	SM50	SM58	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
平成11年	1999年	鉄道構造物等設計標準 鋼とコンクリー 複合構造物)	SRC構造 CFT構造	全面的に限界状態設計法による書式に 記述 ・耐震に閉じて、塑性変形性能を前提と し、部材しな性の定量的な評価手法を 示す。 ・部材接合部の耐荷力に閉じて、定量的 な評価手法を示す。 ・性能照査型の耐震設計	昭和62年 EA17EA15(機 関車荷重) M18(電車専用 線)	SS400	SM400	SM490	SM490	SM490	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
平成11年	1999年	鉄道構造物等設計標準 (耐震設計)			昭和62年 EA17EA15(機 関車荷重) M18(電車専用 線)	SS400	SM400	SM490	SM490	SM490	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)
平成14年	2002年	SI単位版・鉄道構造物等設計標準 (鋼とコ ンクリー 複合構造物)			昭和62年 EA17EA15(機 関車荷重) M18(電車専用 線)	SS400	SM400	SM490	SM490	SM490	1400	1900	2100	1800 (RSS2)	50級 (RSS2)	53級	58級	鋼材の比に 照し、地盤物の種 類等を考慮	溶接	高力ボ ルト (六角)

表-5.2.4 鋼管矢板井筒基礎の設計の変遷

年 代	設計示方書・標準・標準指針ほか	標準対象	基準のポイント 改正の主要ポイント	設計荷重	鋼材						前震設計	後震設計	接合法			
					普通鋼	41級	50級	53級	55級	普通鋼				41級	50級	53級
昭和54年	耐震設計指針案				SS41	SM41	SM50	SM50Y	SM58	SM58	1400	1400	1900	2700	2700	高力ボルト (六角) 溶接
昭和56年	鋼管矢板井筒の設計施工指針案			昭和58年 KS14(4級線) KS16(1.2級線) 新幹線NP16				SMA58		1500	1500	2000	2200	2600	高力ボルト (六角) (ノルシア) 溶接	
昭和62年	鋼管矢板井筒の設計施工指針(案)			昭和62年 EA17EA15(機 用車荷重) 118(電車専用 線)												
平成11年	鉄道構造物等設計標準(耐震設計)		性能照査型の耐震設計		SS400	SM400	SM490	SM490Y	SM490	SM490						
平成13年	鉄道構造物等設計標準(基礎構造物・坑 土圧構造物)	鋼管矢板井筒基礎	限界状態設計法			SMA400		SMA490	SMA570	2400	2400	3200	3600	4600	山および2地震動によ る2段階設計 性能照査型設計法	
平成18年	鉄道構造物に適用するシートパイル基礎 の設計・施工マニュアル(第2版)		仮土留めとして施工するシートパイルを 基礎の本体に利用							235	235	315	355	450		

表-5.2.5 開削トンネルの設計の変遷

年 代	設 計 示 方 書・基 準・指 針 ほか	基 準 対 象	基 準 の ポ イ ン ト (改正の主要ポイント)	設 計 荷 重	基 本 許 容 応 力 (kg/cm ²)						耐 震 設 計	接 合 法				
					普通鋼	41級	50級	53級	56級	59級						
昭和54年	耐震設計指針案				SS41	SM41	SM50	SM50Y SM53	SM58	1400	1400	1900	2100	2800	溶接	現場 高力ボルト (六角)
昭和58年	耐震設計指針(案)解説			昭和58年 KS14(4級線) KS16(1.2級線) 新幹線NP16				SMA58	1500	1500	2000	2200	2600		高力ボルト (六角) (トルシア)	
平成11年	鉄道構造物等設計標準(耐震設計)		性能照査型の耐震設計	昭和62年 EA17 EA15 (機関車荷 重) & 電車専 用線)	SS400	SM400	SM490	SM490 Y	SM570	基本強度						
平成13年	鉄道構造物設計標準(開削トンネル)	開削トンネル	限界状態設計法			SM400		SMA520 SMA490	0	2400	2400	3200	3600	4600		
平成14年	編製地下連続橋を本体利用する場合の設計施工指針(案)	地下連続壁	限界状態設計法							基本強度 (N/mm ²)						
										235	235	315	355	450		

5.3 道路施設構造物分野

道路施設における鋼構造物としては、鋼橋、トンネルの支保工・セグメント、沈埋函、鋼管杭・鋼管矢板などの基礎構造、土留めなどの抗土圧構造、衝突や落石に対する防護工やさらには照明・標識柱などの付帯施設まで多種多様なものがある。ここでは、それらのうち鋼橋の上部構造を除き、整った独自の設計体系を有する構造物として、道路橋の下部構造物とトンネル構造物の2種類をとりあげる。さらに、前者については鋼製橋脚と基礎構造物（鋼管杭・鋼管矢板）に、後者についてはシールドトンネルと沈埋トンネルに分けて、それぞれの構造物にかかわる設計基準の歴史・変遷と今後の動向を整理する。

5.3.1 道路橋下部構造物

(1) 鋼製橋脚

道路橋鋼製橋脚の設計において広く適用される設計基準は「道路橋示方書・同解説」（日本道路協会編）である。「道路橋示方書・同解説」ではコンクリート橋脚については「IV 下部構造編」で記載されているが、鋼製橋脚については、主として「II 鋼橋編」において記載されており、また耐震設計法は「V 耐震設計編」として独立して取り扱われている。表-5.3.1は、これら2つの指針の変遷をまとめたものである。ここでは、道路橋示方書の構成上、特に鋼製橋脚のみを抜粋して述べることは難しいため、鋼橋全般についての設計法の変遷を整理することにし、特に鋼製橋脚に関連する箇所主眼をおいてそれを取りまとめることにする。なお、道路橋にかかわる設計法の歴史については文献1)にも詳しく示されている。

a) 明治初期・基準制定前

明治のはじめに外国の橋梁技術が導入され、木橋の他にRC橋や鋼橋も少しずつ建設されるようになっていたが、当初は外国の基準、材料、技術者に頼っていた時代であり、日本人の設計技術者による橋が建設されはじめたのは明治の中期から後期にかけてのことである。しかし、この頃には未だ設計基準は十分には整備されておらず、設計は文献や既存橋梁を参考にして行われていたようである。

b) 最初の基準・明治19年「国県道の築造基準」

道路構造に関する最初の基準は明治19年に制定された「国県道の築造基準」であり、橋梁のみならず道路全般の建設について定められ、橋梁については活荷重なども規定されている。

c) 大正15年「道路構造に関する細則案」

その後、大正8年の「道路構造令」、「街路構造令」を経て、大正15年に「道路構造に関する細則案」が作成された。この中で初めて鋼材の規格や許容応力度が定められ、St39（引張強度3,900～5,000kgf/cm²）、許容応力度1,200kgf/cm²が記載されている。「道路構造に関する細則案」では橋梁を3等級に分類し、荷重に関しても死荷重、活荷重の他、衝撃荷重、風荷重、制動荷重、地震荷重、温度変化などが考慮されており、このうち活荷重には自動車荷重も考慮されるようになっている。

d) 道路橋単独での最初の基準・昭和14年「鋼道路橋設計示方書案」、「鋼道路橋製作示方書案」

鋼橋については昭和14年に道路橋単独での最初の基準である「鋼道路橋設計示方書案」と「鋼道路橋製作示方書案」が作成され、橋の等級分類や設計荷重が改訂された。その中では鋼材の規格や許容応力度の他に、桁組みやトラス等の設計細目やリベットによる接合も記述されている。鋼材としては一般構造用圧延鋼材SS41がはじめて規定され、許容応力度は1,300kgf/cm²と定められている。また自動車荷重については一等橋13t、二等橋9tと規定されている。地震の影響に関しては水平加速度0.2g、鉛直加速度0.1gと初めて具体的な数値が示され、この他、たわみ制限もはじめて導入されている。この昭和14年の「鋼道路橋設計示方書案」と「鋼道路橋製作示方書案」は戦

後の復興期まで用いられることになる。

e) 昭和 31 年「鋼道路橋設計示方書」, 「同製作示方書」

昭和 31 年になって「鋼道路橋設計示方書」, 「同製作示方書」(日本道路協会)が制定され, 活荷重として TL-20 (一等橋), 14 (二等橋)が規定されるなどの改訂が行われたが, 使用鋼材の規格は以前と同じ SS41 と SV34 のみの記載であった。

この頃には工場での部材の組立にリベットに代わって溶接が用いられるようになり, 昭和 32 年に「溶接鋼道路橋示方書」が制定され, その中で溶接構造用鋼材として SM41 が採用された。

f) 昭和 39 年「鋼道路橋設計示方書」

続いて昭和 39 年の「鋼道路橋設計示方書」改訂で, SS50, SM50 の 50 キロ鋼が追加され, 許容応力度も 41 キロ鋼で $1,400\text{kgf/cm}^2$, 50 キロ鋼で $1,900\text{kgf/cm}^2$ と現在使用されている値に変更になっている。

さらに, 昭和 42 年の「溶接鋼道路橋示方書追補」により, SM50Y, SM53, SM58 が追加されている。

g) 昭和 41 年「鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針」

昭和 30 年代後半から 40 年台前半の時期は橋梁技術の進歩が目覚ましい時期であり, 現場接合にはリベットに代わって高力ボルト接合が広く用いられるようになり, 耐候性鋼も実用化されている。これらの新しい鋼材や接合方法のみならず, 合成桁や箱桁の採用, 各種形式のアーチ橋の採用など新形式も多く採用されるようになった。

昭和 41 年には「鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針」(日本道路協会)が制定され, 高力ボルトの種類, 継手の設計, 施工などについて規定されている。この指針では, F9T と F11T が記載されている。その後, 高力ボルトに関しては, F8T が道路橋示方書に追加され, F11T が外れて現在は F8T と F10T が記載されている。

h) 昭和 48 年「道路橋示方書・同解説 I 共通編」, 「同 II 鋼橋編」

昭和 47 年から 55 年にかけて各種の基準の道路橋示方書としての統合が図られ, その第一歩として昭和 48 年に「道路橋示方書・同解説 I 共通編」と「同 II 鋼橋編」が制定された。共通編では適用範囲が従来の支間長 150m 以下から 200m 以下へと拡大されており, 鋼材の種類も SS41, SS50, SM41, SM50, SM50Y, SM53, SM58 が定められ, 耐候性鋼材についても SMA41, SMA50, SMA58 が記載されている。現場における接合方法としてはリベット, 高力ボルト, 溶接が扱われている。

i) 昭和 55 年「I 共通編」, 「II 鋼橋編」改訂

道路橋示方書・同解説は, 昭和 53 年に「III コンクリート橋編」が, 昭和 55 年には「IV 下部構造編」と「V 耐震設計編」が制定され, 現在の「I 共通編」, 「II 鋼橋編」, 「III コンクリート橋編」, 「IV 下部構造編」, 「V 耐震設計編」からなる体系が確立された。

また, 昭和 55 年には先に発行されていた「I 共通編」, 「II 鋼橋編」の改訂も行われた。トレーラー荷重の追加などが行われ, 現場接合に関しては高力ボルト, 溶接が主体の記述に変更になっている。

「V 耐震設計編」は昭和 46 年に制定されていた「道路橋耐震設計指針」をその後の研究成果や地震被害を踏まえて改訂したものであり, 修正震度法, 地盤の液化化の影響の考慮, 動的解析に用いる設計地震入力の求め方などが記載されている。

j) 平成 2 年 道路橋示方書改訂

その後, 技術の進歩や最新の研究成果を反映させるために平成 2 年に道路橋示方書の各編の改訂が行われている。この改訂ではリベット接合に関する記述が削除され, 昭和 59 年の「道路橋鉄筋コンクリート床版の設計施工指針」の内容が取り入れられた。耐震設計編では従来の震度法と修正

震度法を統合して改めて震度法と称し、3種類の地盤種別の導入など設計震度に関しての改訂が加えられた。

k) 平成5年 道路橋示方書改訂

平成5年には自動車台数の急増、車両大型化への対応のために「道路構造令」が改正されたことを受けて、道路橋示方書の「V 耐震設計編」以外の各編の改訂が行われ、活荷重が見直されるとともに橋の等級が廃止となった。自動車荷重は従来の20tf（一等橋）または14tf（二等橋）から一律25tfへと引き上げられ、25tfの大型車の通行頻度が低いA荷重と通行頻度が高いB荷重に区分された。

l) 平成8年 道路橋示方書改訂

平成7年1月に兵庫県南部地震が発生し、土木・建築構造物に過去最大の甚大な被害が発生した。道路橋でも高架道路の横転や落橋など、それまでに経験のない種類や規模の被害に見舞われた。それを受け、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧にかかわる仕様」（兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会）や各種の被害調査・分析研究成果を踏まえて平成8年に道路橋示方書の改訂が行われた。

耐震設計では供用期間中に発生する確率が高い地震動と発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動を対象とした二段階設計法が導入され、橋の重要度（A種、B種）に応じて要求される耐震性能を確保することを目標に設計を行うこととされた。供用期間中に発生する確率が高い地震動に対しては震度法によって、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動については地震時保有水平耐力法によって設計を行うことを基本とし、後者の地震動についてはプレート境界型を想定したタイプⅠと内陸直下型を想定したタイプⅡの2種類の地震動を考慮することとされた。また、地震時保有水平耐力法の導入に伴い設計で用いる鋼材の応力-ひずみ関係や塑性化を考慮した鋼断面の断面性能の設定についての記述が加えられた。

m) 平成14年 道路橋示方書改訂

国内外の設計基準の性能規定化への流れを受けて、工費の縮減や新技術・新工法の開発・採用を促すために道路橋示方書においても性能規定型の基準を目指して、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式に変更になった。従来の仕様規定の制定根拠が要求事項として記述され、従来の仕様規定に従えば要求事項を満足するとみなす「見なし適合仕様」が併記されている。また、耐久性や維持管理についても規定や解説が加えられた。

「Ⅰ 共通編」では基本理念として、使用目的との整合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮し、理論的な妥当性を有する手法、実験などにより検証がなされた手法など適切な知見に基づいて設計を行うことが規定されている。

「Ⅱ 鋼橋編」では要求性能の照査の原則と照査方法が示され、部材の応力度が許容応力度以下でたわみが許容値以内であることを確認し、各規定に従って安全性の照査を行う場合はそれを満足するとみなしてよいことが記述されている。この他、疲労の影響を考慮することが明記され、平成14年には「鋼道路橋の疲労設計指針」（日本道路協会）が刊行されている。

「Ⅴ 耐震設計編」では橋の重要度と地震動のレベルに応じた耐震性能（耐震性能1～3）が示され、各耐震性能に対する限界状態が設定された。また、供用期間中に発生する確率が高い地震動に対してレベル1、供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動に対してレベル2の呼称が用いられるようになり、鋼製橋脚についてはレベル2地震に対する設計での動的解析の適用が拡大された。

n) 今後の動向

平成14年の改訂によって道路橋示方書は以前の仕様規定から性能規定への第一歩を踏み出した。そこでは仕様規定の制定根拠が要求事項として明示されたものの、それと性能規定における要求性

能の関係は必ずしも明確にはなっていない。また性能の照査方法についても理論的な妥当性を有する手法、実験などにより検証がなされた手法など適切な知見に基づいて行うこととされ、原則が示されているが、具体的な実施方法や手法の妥当性判断基準などの提示については必ずしも十分ではない面があると考えられる。道路橋示方書は次期改定で本格的な性能規定型設計法への移行が予定されており、現在、それに向けた準備が行われている。

(2) 基礎構造物（鋼管杭・鋼管矢板）

道路橋構造物の基礎構造としての鋼管杭基礎、鋼管矢板基礎に着目して、その設計基準である道路橋示方書・下部構造編とその関連規準の変遷を整理したものが表-5.3.2である。道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編（日本道路協会編）は昭和 55 年に制定されており、これは、それより以前には 8 編に分かれていた「道路橋下部構造設計指針」（日本道路協会編）を整理統合し、道路橋示方書の体系化の一環としてとりまとめられたものである。

a) 道路橋示方書・下部構造編制定以前

前述の通り道路橋に関する設計基準の歴史は古く、明治・大正の時代から整備が始まっているが、基礎構造に関しては昭和 30 年代まで設計基準が制定されていなかった。新しい工法の採用などによって設計基準制定への要求が高まり、昭和 30 年代中頃に「道路橋下部構造設計指針」（日本道路協会）の作成に向けての検討が開始された。昭和 30 年代中頃はディーゼルハンマによる施工の効率化や耐震設計上の優位性などを背景に鋼管杭が急速に普及しはじめた時期であり、H 形鋼杭も仮設を中心に用いられていた。

道路橋示方書に統合される前の「道路橋下部構造設計指針」には、「調査及び設計一般編」、「橋台・橋脚の設計編」、「直接基礎の設計編」、「くい基礎の施工編」、「ケーソン基礎の設計編」、「場所打ちぐいの設計・施工編」、「くい基礎の設計編」、「ケーソン基礎の施工編」の 8 編がある。このうち、「くい基礎の設計編」が道路橋基礎構造にかかわる最初の設計指針として、昭和 39 年に分冊として他に先立って出版された。杭の設計に関する一般的な事項（単杭の支持力、杭体の強度計算、構造細目）について鋼管杭、RC 杭を中心に記述されているが、設計荷重や許容応力度などについては次回以降の分冊に記載するとされており、設計指針としては未完成な状態での発行となったようである。

その後、昭和 41 年になって「調査及び設計一般編」が発行され、各編に共通した前提として設計で考慮する荷重や使用材料が記載された。鋼種としては 41、50 キロ級の鋼種が記載され、それぞれの許容応力度が規定されている。また、現場での周継ぎ溶接については許容応力度を 90%に低減することなどが規定されている。

さらに、昭和 51 年に「くい基礎の設計編」の改訂が行われ、鋼種や許容応力に基本的な変更はないものの、鋼管ぐい(JIS A5525)に加え、H 形鋼ぐい(JIS A5526)が掲載された。また、現場周継ぎ溶接について、継手金具を使用する方法が記載された。

b) 昭和 55 年「道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編」

昭和 55 年にそれまでの「道路橋下部構造設計指針」の 8 編がまとめられ、「道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編」として統合された。この昭和 55 年の下部構造編では蓄積された載荷試験データをもとに杭の鉛直支持力の算定方法が改められ、中掘り工法の設計・施工に関する規定が新設された。鋼管に関しては STK41、STK50 が規定されている。

同じく昭和 55 年には「Ⅴ 耐震設計編」も制定されて、現在の道路橋示方書の体系が整備され、道路橋下部構造の設計は主として「Ⅰ 共通編」、「Ⅳ 下部構造編」、「Ⅴ 耐震設計編」の 3 編の示方書に基づいて設計されることとなった。以降、「道路橋示方書・同解説」は、平成 2 年、平成 6 年、平成 8 年、平成 14 年の改訂を経て現在に至っている。

c) 昭和 59 年「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」

昭和 40 年代中頃から比較的大型の構造物の基礎として鋼管矢板基礎が使われ始めていたが、設計基準としては昭和 47 年に矢板基礎研究委員会で編纂された「矢板式基礎の設計と施工指針」があるのみで、道路橋示方書には記載がない状況であった。鋼管矢板基礎の道路橋基礎としての体系化のために設計基準制定への要求が高まり、昭和 59 年に「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」（日本道路協会）が発行され、他の基礎形式との整合も考慮した設計法、構造計算方法が示された。この「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」は平成 9 年に「鋼管矢板基礎設計施工便覧」（日本道路協会）として改訂され、杭基礎設計・施工便覧と同様に道路橋示方書の補足・解説の役割を担っている。

d) 昭和 61 年「杭基礎設計便覧」

上記の下部構造編制定時に示方書に取り込まれなかった事項や示方書を補足する目的で昭和 61 年に「杭基礎設計便覧」（日本道路協会）が発行されている。その後、「杭基礎設計便覧」は平成 4 年に改訂され、このときには「杭基礎施工便覧」もあわせて発行された。これらの便覧は道路橋示方書を補足・解説するとともに最新の技術や研究成果を紹介する役割を担い、平成 19 年にも改訂が行われている。

e) 平成 2 年 道路橋示方書改訂

平成 2 年の「IV 下部構造編」の改訂では、昭和 55 年の制定時に整理しきれなかった事項や適用範囲などの整理が行われた。その他、それまで「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」（日本道路協会）として別途指針が制定されていた鋼管矢板基礎についての規定が追加され、杭頭接合方法についても統一的な仕様が提示された。ただし、鋼管矢板基礎については、詳細は「鋼管矢板基礎設計指針」を引用する形となっており、道路橋示方書への全面的な取り込みは後の平成 8 年の改訂を待つことになる。

f) 平成 5 年 道路橋示方書改訂

平成 5 年の改訂は自動車荷重の見直しが中心であったが、この他、JIS 改訂に伴い鋼種の表記が変更になり、鋼管に関しては SKK400, 490（鋼管ぐい）の他に、SKY400, 490（鋼管矢板）が記載された。

g) 平成 8 年 道路橋示方書改訂

前記の(1)鋼製橋脚で述べたように、平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震で土木構造物に甚大な被害が発生したことを受け、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧にかかわる仕様」（兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会）や各種の被害調査・分析研究成果を踏まえて平成 8 年に道路橋示方書の改訂が行われた。

「IV 下部構造編」においても、設計荷重以上の大きな地震力が作用しても橋梁の倒壊が生じないように保有水平耐力の照査を行う規定が盛り込まれ、橋脚の終局水平耐力が作用した状態においても基礎を降伏させないことを基本と考え、躯体以上の安全性が求められることとなった。この地震時保有水平耐力法の導入に伴い設計で用いる鋼材の応力-ひずみ関係や塑性化を考慮した鋼断面の $M-\phi$ 関係の設定についての記述が加えられた。その他、平成 8 年の改訂では鋼管矢板基礎に関して、「鋼管矢板基礎設計指針」の内容が道路橋示方書に取り込まれ、地中連続壁基礎に関する規定も加えられた。

耐震設計では供用期間中に発生する確率が高い地震動と発生する確率は低い大きな強度を持つ地震動を対象とした二段階設計法が導入され、橋の重要度（A 種、B 種）に応じて要求される耐震性能を確保することを目標に設計を行うこととされた。供用期間中に発生する確率が高い地震動に対しては震度法によって、供用期間中に発生する確率は低い大きな強度を持つ地震動については地震時保有水平耐力法によって設計を行うことを基本とし、後者の地震動についてはプレート境界型を想定したタイプ I と内陸直下型を想定したタイプ II の 2 種類の地震動を考慮することとされた。

この他、液状化の判定や影響の評価方法が大幅に見直され、護岸近傍などで液状化地盤の側方流動を受ける杭基礎の設計法なども記載された。

h) 平成 14 年 道路橋示方書改訂

国内外の設計基準の性能規定化への流れ、要求を受けて、工費の縮減や新技術・新工法の開発・採用を促すために道路橋示方書においても性能規定型の基準を目指して、要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式に変更になり、耐久性や維持管理についての規定や解説が加えられた。

「I 共通編」では基本理念として、設計にあたっては使用目的との整合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の容易さ、環境との調和、経済性を考慮し、理論的な妥当性を有する手法、実験などにより検証がなされた手法など適切な知見に基づいて行うことが示されている。

「IV 下部構造編」では他の各編と同様に、要求性能の照査の原則と照査方法が示され、部材の応力度が許容応力度以下で、かつ示方書の各規定に従って安全性の照査を行う場合はそれを満たすとみなしてよいことが記述されている。この他、平成 14 年の「IV 下部構造編」では、杭工法の種類としてプレボーリング工法、鋼管ソイルセメント杭工法、パイプロハンマ工法が取り込まれ支持力や構造細目についての規定が加えられた。

「V 耐震設計編」では橋の重要度と地震動のレベルに応じた耐震性能（耐震性能 1～3）が示され、各耐震性能に対する基礎の限界状態が設定されている。

i) 今後の動向

前記の(1)鋼製橋脚で述べたとおりであり、道路橋示方書は次期改定で本格的な性能規定型設計法への移行が予定されており、現在、それに向けた準備が行われている。

5.3.2 トンネル構造物

(1) シールドトンネル

トンネル構造物の設計において一般的に広く適用される基準としては「トンネル標準示方書」（土木学会）があげられる。シールドトンネルに関しては同標準示方書のシールド工法編・同解説において設計の考え方や設計荷重、使用鋼種・許容応力度などが規定されている。その変遷を整理したものが表-5.3.3 である。

a) 昭和 39 年「トンネル標準示方書」制定

「トンネル標準示方書」の初版が制定されたのは昭和 39 年のことである。日本のトンネル技術は、それよりもかなり以前から道路、鉄道、電力、灌漑など各分野で独自に、かつ相当の発展を遂げていたが、各分野の研究、経験を総合する観点から、昭和 36 年に土木学会においてトンネル工学委員会が設置され、そこで検討成果を集約する形で昭和 39 年 3 月に発刊されたものである。さらに、その修正版・同解説が同年 8 月に発刊されている。当初の「トンネル標準示方書」は山岳トンネルを主な対象としたものであり、シールドトンネルに関する指針、基準の出現は後述のように昭和 40 年代後半から 50 年代前半にかけてのこととなる。

b) 昭和 44 年「トンネル標準示方書」改訂

初版制定 5 年後の昭和 44 年には、早くも「トンネル標準示方書」の第一回目の改訂が行われているが、依然として山岳トンネルを対象とした標準示方書であった。その中では昭和 40 年に設置された鋼アーチ支保工の強度に関する研究委員会の成果が反映され、鋼製支保工の断面と建込み間隔の改訂などが行われている。

c) 昭和 44 年「シールド工法指針」

昭和 30 年代後半になると地下鉄、電力、通信、ガス、水道、共同溝など都市内のトンネル工事の必要性が高まり、シールドトンネルの実績が増加しはじめていたことを受けて、昭和 40 年にト

ンネル工学委員会の下にシールド工法小委員会が設置されて系統的な調査，研究が行われた．昭和 41 年には「わが国シールド工法の実施例・第 1 集」が発行され，そして，昭和 44 年に将来の標準示方書制定の足がかりとなる「シールド工法指針」（土木学会）が発行された．

d) 昭和 52 年「トンネル標準示方書（シールド編）・同解説」

その後，昭和 48 年に土木学会と日本下水道協会が協力して「シールド工用標準セグメント」が制定された後，昭和 49 年から土木学会トンネル工学委員会の下にシールド工法小委員会が再開されてシールドトンネルに関する標準示方書作成のための調査，検討，審議が行われた．昭和 52 年の標準示方書改訂の際に，その成果が「トンネル標準示方書（シールド編）・同解説」として統合され，従来の山岳トンネルを対象とした内容は「トンネル標準示方書（山岳編）・同解説」として改訂された．

シールド編で鋼製セグメント，山岳編では鋼製支保工が取り扱われており，設計荷重や材料強度，接合法などについて記載されているが，昭和 52 年のシールド編では土圧，水圧，上載荷重などの他に，併設トンネルの影響や地盤沈下の影響など設計荷重が詳しく分類，規定されており，使用鋼材としては SS41，SM41，SS50，SM50 の他，球状黒鉛鋳鉄 FCD45，FCD50 が記載され，それぞれの許容応力度が定められている．

なお，昭和 52 年には開削トンネルに関しても将来の標準示方書の足がかりとして，「開削トンネル指針」が刊行されており，次期昭和 61 年の標準示方書の改訂において，「トンネル標準示方書（開削編）・同解説」として統合され，その後，「トンネル標準示方書・同解説」は平成 8 年の改訂を経て，2006 年制定の山岳工法編，シールド工法編，開削工法編に至っている．

e) 昭和 61 年「トンネル標準示方書・同解説」改訂

昭和 61 年の改訂で山岳編，シールド編，開削編からなる現在の体系が整ったが，必ずしも各編で鋼種や材料強度の表記方法が統一されておらず，耐震設計の扱いについても開削編では一般には考慮しなくてもよいとされているなど扱いに差が見られる．

シールド編ではシールドを 6 形式に分類するとともに，2 次覆工に関する章が設けられ，それまで責任技術者の判断に委ねるとされていた地震の影響についての記述の充実が図られた．

f) 平成 8 年「トンネル標準示方書・同解説」改訂

平成 8 年の改訂では，SI 単位に改められ，鋼種や材料強度の表記が各編である程度統一されて，許容応力度の大幅な見直しが行われている．また，開削編とシールド編では 50 キロを上回る SM490Y が追加されている．

各編とも技術の進歩が反映され，シールド編では近接施工の影響に関する条文が追加された他，耐震設計に関しても応答変位法の記述など改訂時点で可能な範囲の記述が盛り込まれている．また，開削編でも耐震設計が必要な条件を示すなど，耐震設計に関しても各編間での扱いにある程度の統一が図られている．

g) 平成 18 年（2006 年）「トンネル標準示方書・同解説」改訂

平成 18 年の改訂では，他の構造物での動きに合わせて「トンネル標準示方書・同解説」の各編においても限界状態設計法への移行に向けた取り組みがなされ，維持管理，耐久性に関する条を設け，記述の充実が図られた．また，維持管理や性能照査型設計などの詳細について土木学会発行の各種トンネル・ライブラリーとの関連性を持たせ，それらと標準示方書の連携が図られている．

開削工法編では設計法が許容応力設計から限界状態設計へと移行し，シールド工法編でもトンネル・ライブラリー第 11 号「トンネルへの限界状態設計法の適用」の内容を取り入れて，覆工の設計に関して許容応力設計法と併記する形ではあるものの，新たに「限界状態設計法」編が設けられている．山岳工法編では設計体系に大きな変更は見られないが，覆工の性能規定型設計への配慮がなされ，その詳細をまとめたトンネル・ライブラリー第 15 号「都市部山岳工法トンネルの覆工設

計一性能照査型設計への試み」との連携が図られている。

2006年シールド工法編では、採用の少なくなった開放型シールドや圧気工法の記述が削減されて、特殊断面シールドや分岐シールドなどの特殊シールドの章が新設され解説が加えられている。さらに、昨今の動向や最新の技術を反映させるべく、大深度施工、長距離施工、高速施工、地中接合、地中切掘り、近接施工に関する記述や新しい形式の覆工についての記述の充実も図られている。また、使用鋼材に関しては許容応力度の規定はないものの、限界状態設計での適用に配慮してSM570が新たに追加され、球状黒鉛鋳鉄の座屈許容応力度なども新たに追加されている。

(2) 沈埋トンネル

沈埋トンネルに関しても昭和40年台に土木学会トンネル工学委員会で設計、施工に関する調査研究が行われ、昭和46年の「沈埋トンネルの設計・施工法に関する調査報告書」（土木学会）を経て、昭和50年に「沈埋トンネル耐震設計指針(案)」（土木学会）が刊行されている。

その後、これとは流れを異にするが、平成6年に鋼殻構造沈埋函、鋼コンクリート合成構造沈埋函などを対象として、「沈埋トンネル技術マニュアル」が(財)沿岸開発技術研究センターから刊行されている。その変遷を示したものが表-5.3.4であり、平成14年にはその改訂版がまとめられている。

平成14年の改訂では構造形式としてフルサンドイッチ式鋼コンクリート合成構造沈埋函が追加され、設計法については許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が図られている。また、耐震設計に関しては、従来の震度法あるいは応答変位法による設計から、応答変位法、応答震度法、有限要素法による解析などを用いた二段階設計法が導入されている。

(田中宏征、土橋 浩、長山秀昭、松田一史、新美勝之)

1) 多田宏行編著：保全技術者のための橋梁構造の基礎知識，鹿島出版会，2005.1.

表-5.3.1 道路橋鋼製橋脚に関する設計基準の変遷

年代 和暦	西暦	設計示方書・基準・標準・ 指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種					基本応力(許容応力、特性値、基準強度)			耐震設計	疲労設計	接合法
						4.1級	5.0級	5.3級	5.8級	4.1級	5.0級	5.3級	5.8級			
昭和14年	1939年	鋼道路橋設計示方書案	鋼道路橋全般を対象	最初の道路橋示方書	自動車荷重 一等橋：13tf 二等橋：9tf						許容応力 1300kg/cm ²					現場
昭和39年	1964年	鋼道路橋設計示方書 (日本道路協会編)	鋼道路橋設計・製作 示方書、溶接鋼道路 橋示方書を大改正		自動車荷重 一等橋：20tf(T-20) 二等橋：14tf(T-14)						許容応力 1400kg/cm ²					
昭和41年	1966年	鋼道路橋高力ボルト摩擦接合 設計施工指針(日本道路協会 編)	高力ボルト摩擦接合 を対象								許容応力 1400kg/cm ²					
昭和47年	1972年	鋼道路橋設計示方書(統合) (日本道路協会編)	各種示方書を統合	以前に発行されている示 方書類の統合							許容応力 2100kg/cm ²					
昭和47年	1972年	道路橋耐震設計指針 (日本道路協会編)	耐震設計を対象									震度法				
昭和48年	1973年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 (日本道路協会編)	共通編・コンクリー ト橋編・下部構造編 と分れて鋼橋のみ について対象。鋼製橋 脚も対象。	リベット接合から溶接主 体に変更。ラーメン構造 が追加になる。	T-14, T-20	SS41, SMA41, SMA41	SM50	SM50Y, SM53, SMA58	SM58, SMA58	許容応力 1900kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 2600kg/cm ²		考慮せ ず	溶接 リベット 現場溶接	高力ボルト 現場溶接
昭和55年	1980年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 ・V耐震設計編 (日本道路協会編)	鋼上部工・鋼製橋脚 が対象	連結は溶接及び高力ボルト が主体に変更。 修正震度法、流動化(液状 化)について規定、動的 解析を規定。	TT-43(S48運速)が追 加	SS41, SMA41, SMA41	SM50	SM50Y, SM53, SMA58	SM58, SMA58	許容応力 1400kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 2600kg/cm ²		鋼床版 のみ考 慮	溶接	高力ボルト 現場溶接 (リベット)
平成2年	1990年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 ・V耐震設計編 (日本道路協会編)	鋼上部工・鋼製橋脚 が対象	鉄筋コンクリート床版の 設計・施工指針の内容を 取り入れる。 修正震度法→震度法、地 盤種別を3種類、液状化 について改定、動的解析 の入り力地震動を規定。						許容応力 1400kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 2600kg/cm ²		鋼床版 のみ考 慮	溶接	高力ボルト 現場溶接
平成6年	1993年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 (日本道路協会編)	鋼上部工・鋼製橋脚 が対象	活荷重の変更	A・B活荷重	SS400, SMA400, SMA400W	SM490	SM490Y, SM520, SMA490W	SM570, SMA570W	許容応力 1400kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 2600kg/cm ²		鋼床版 のみ考 慮	溶接	高力ボルト 現場溶接
平成8年	1996年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 ・V耐震設計編 (日本道路協会編)	鋼上部工・鋼製橋脚 が対象	鋼材の品質規定の見直し し、製作・施工の合理化 への対応、耐震設計関連 の改定。 大規模地震を考慮、保耐 法の導入、液状化について 改定、動的解析の入り力 地震動を規定、落防改 定。	大規模地震を考慮	SS400, SMA400, SMA400W	SM490	SM490Y, SM520, SMA490W	SM570, SMA570W	許容応力 1400kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 2600kg/cm ²		鋼床版 のみ考 慮	溶接	高力ボルト 現場溶接
平成14年	2002年	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 ・V耐震設計編 (日本道路協会編)	鋼上部工・鋼製橋脚 が対象	性能規定型の示方書 耐久性の向上のため、疲 労を考慮。 2つの地震動を考慮、動 的解析の適用を拡大、液 状化について改定。	レベル1地震動 レベル2地震動	SS400, SMA400, SMA400W	SM490	SM490Y, SM520, SMA490W	SM570, SMA570W	許容応力 1400kg/cm ²	許容応力 2100kg/cm ²	許容応力 255N/mm ²		疲労設 計を本 格導 入：疲 労設計 指針に よる	溶接	高力ボルト 現場溶接

表-5.3.2 道路橋基礎構造物（鋼管杭・鋼管矢板）に関する設計基準の変遷（その1）

年代 西暦	設計示方書・基準・標準・ 指針ほか	標準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種					耐震設計	疲労設計	接合法 断面	現場			
					4.1級	5.0級	5.3級	5.8級	4.1級					5.0級	5.3級	5.8級
昭和39年	道路橋下部構造設計指針 — 1-1 鋼管杭の設計編 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼ぐい)	基礎のポイン ト(改正の主要ポイント) 道路橋下部構造の最初 の技術基準。部分的に 分冊出版。	設計で考慮する荷重 の種類として、主荷重 (死荷重、活荷重(風、 温度、地震など)、常時 従荷重を記載。常時 は基本的に死荷重十 活荷重を考慮。	4.1級	5.0級	5.3級	5.8級	4.1級	5.0級	5.3級	5.8級	溶接 (突合せ 溶接)			
昭和41年	道路橋下部構造設計指針 — 1-1 鋼管杭の設計編 (日本道路協会編)	後に続く各形式 の下部構造の設 計に共通した前 提、ないし基本 条件をとりまと め。	再度分冊出版。 調査、荷重、材料、計 算応力度のとりまと め。	設計で考慮する荷重 の種類として、主荷重 (死荷重、活荷重(風、 温度、地震など)、常時 従荷重を記載。常時 は基本的に死荷重十 活荷重を考慮。	SS41, SMA1A, B STK41	SM50A, B				許容応力 1900 (kgf/cm ²)			溶接 (許容応 力法を工 場溶接の 90%に低 減)	地震の影響は基 本的に鋼管橋 示方書の規定に よる。		
昭和43年	道路橋下部構造設計指針— 橋台・ 橋脚の設計編 (日本道路協会編)															
昭和43年	道路橋下部構造設計指針— 直接基 礎の設計編 (日本道路協会編)															
昭和43年	道路橋下部構造設計指針— くい基 礎の施工編 (日本道路協会編)															
昭和45年	道路橋下部構造設計指針— ケーブル基 礎の設計編 (日本道路協会編)															
昭和47年	矢板式基礎の設計と施工指針 (矢板式基礎研究委員会編)	橋梁、建 物の鋼管杭 基礎(鋼管矢 板、H形鋼矢板)	鋼管矢板基礎最初の指 針。道路橋下部構造設 計指針に規定がなく、 矢板式基礎研究委員会 で作成、発行。	道路橋下部構造設計 指針、道路橋耐震設 計指針に準拠。	SY24 (鋼管矢板)	SY30 (H形鋼矢 板)	SY40 (H形鋼失 板)			各構造物 の指針の 定める値	各構造物 の指針の 定める値	各構造物 の指針の 定める値		溶接 (突合せ 溶接)	震度法 修正震度法	
昭和48年	道路橋下部構造設計指針— 場所打 ちの設計施工編 (日本道路協会編)															
昭和51年	道路橋下部構造設計指針— くい 基礎の設計編改訂 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼ぐい)	技術の進歩、研究成果 の反映。杭の支持力・基 礎の設計方法、基 礎位置の整理・明確 化。不くいを除外。	道路橋下部構造設計 指針、道路橋耐震設 計指針に準拠。	JISA525 (鋼管ぐい) JISA526 (H形鋼ぐ い)	JISA525 (鋼管ぐい) JISA526 (H形鋼ぐ い)				許容応力 1900 (kgf/cm ²)	許容応力 1400 (kgf/cm ²)	許容応力 1900 (kgf/cm ²)		溶接 (継手金 具使用、 具を使 用)	震度法 修正震度法	
昭和52年	道路橋下部構造設計指針— ケーブル基 礎の施工編 (日本道路協会編)															
昭和55年	道路橋示方書Ⅳ 下部構造編 道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼ぐい)	道示・下部構造編 制 定。耐震設計編も同年制 定。	SM50, STK50	SS41, SMA1, SMA4, STK41	SM50, STK50	SM58, SMA58			許容応力 1400 (kgf/cm ²)	許容応力 2100 (kgf/cm ²)	許容応力 2000 (kgf/cm ²)		溶接 (継手金 具使用、 具を使 用)	震度法 修正震度法 (修正震度法の 適用範囲拡大、 地震種別・地域 区分見直し、流 動化(液状化)判 定、動的解析の 規定)	
昭和59年	鋼管矢板基礎設計指針・同解説 (日本道路協会編)	鋼管矢板基礎	道示に記載がなく、S47 指針以降の技術進歩の 反映。道路橋基礎とし ての体系化、他形式基 礎との整合を図るため 制定。	道路橋示方書に準 拠。取締り時の工 庄、水庄の算定方法 の記載。	SS41, SMA1, SMA4, STK41	SM50, SKY50, SKK50	SM50Y			許容応力 1400 (kgf/cm ²)	許容応力 2100 (kgf/cm ²)	許容応力 1900 (kgf/cm ²)		溶接 (継手金 具使用、 具を使 用)	弾性床上の有限 長梁、反照井筒 、立休骨組の 解析、群杭基礎 の4つの計算法 を記載。	
昭和61年	杭基礎設計便覧 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭)	道示・下部構造編を補 う目的で最新の杭基礎 の設計、施工技術を実 務的に解説。	道路橋示方書に準 拠。取締り時の工 庄、水庄の算定方法 の記載。	SS41, SMA1, SMA4, SKK41	SM50, SKY50, SKK50				許容応力 1400 (kgf/cm ²)	許容応力 1900 (kgf/cm ²)	許容応力 1900 (kgf/cm ²)		溶接 (継手金 具使用、 具を使 用)	流動化(液状化) の考え、側 方流動を受ける 杭の設計法に關 する解説。	

表-5.3.2 道路橋基礎構造物（鋼管杭・鋼管矢板）に関する設計基準の変遷（その2）

年代 和暦	設計示方書・基準・標準・ 指針ほか	標準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種				基本応力				耐震設計	疲労設計	接合法 断面
					4.1級	5.0級	5.3級	5.8級	4.1級	5.0級	5.3級	5.8級			
平成2年	道路橋示方書Ⅳ 下部構造編改訂 道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編改訂 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭) 鋼管矢板基礎	基礎のポイン ト(改正の主要ポイント) 技術進歩、研究成果の 反映(地盤反力、許容 変位などの見直し)。 鋼管矢板基礎の規定。 震度法、修正震度法を 一つに集約。												
平成3年	地中連続壁基礎設計施工指針 (日本道路協会編)														
平成4年	杭基礎設計便覧改訂 杭基礎施工便覧 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭)	調査研究成果、道示改 訂、JIS改訂の反映。施 工便覧制定、工法、計 画、管理等施工に関す る内容充実。		SKK400										
平成6年	道路橋示方書Ⅳ 下部構造編改訂 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭) 鋼管矢板基礎	車両大型化への対応、 活荷重変更。	A・B活荷重	SS400, SMA400, SKK400, SKY400	SM490, SMA490W, SKK490, SKY490	SM570, SMA570W								
平成8年	道路橋示方書Ⅳ 下部構造編改訂 道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編改訂 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭) 鋼管矢板基礎	耐震性向上、基礎の地 震時保有水平耐力法導 入。 鋼管矢板基礎の本格的 規定(鋼管矢板基礎設 計指針の全面的取り込 み)。	大規模地震を考慮	SS400, SMA400, SKK400, SKY400	SM490, SMA490W, SKK490, SKY490	SM570, SMA570W								
平成9年	鋼管矢板基礎設計施工便覧 (日本道路協会編)	鋼管矢板基礎	道示への全面的取込み に伴う指針の改訂、解 説の充実。仮締切り、 頂部結合部等の具体的 設計法、地震時保水水 平耐力法の解説など。		SKY400, SKK400										
平成14年	道路橋示方書Ⅳ 下部構造編改訂 道路橋示方書Ⅴ 耐震設計編改訂 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭) 鋼管矢板基礎	性能規定化、耐久性向 上、アール・リッジ杭工 法、鋼管/レール杭工 法、ハブ・ロッド工法を規 定。場所打ち杭、中掘 り杭、鋼管矢板基礎の 支持力見直し。	レベル1、レベル2 地震動の名称設定。 所下地震波の記述。 地震時土圧の見直 し。	SS400, SMA400, SKK400, SKY400	SM490, SMA490W, SKK490, SKY490	SM570, SMA570W								
平成19年	杭基礎設計便覧 杭基礎施工便覧 (日本道路協会編)	杭基礎(鋼管杭)	H8、14年の道示改訂を踏 まえ、それを補う便覧 を14年ぶりに改訂。レ ベル2耐震設計、性能規 定化や耐久性向上への 対応の他、最新の技術 開発や研究成果を反 映。		SKK400										

表-5.3.3 土木学会・トンネル標準示方書の変遷

年代 和暦	設計示方書・標準・標準・指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種				基本応力 (許容応力、特性値、基準強度)				耐震設計	疲労設計	接合法		備考
					41級	50級	53級	58級	41級	50級	53級	58級			断面	現場	
昭和39年	トンネル標準示方書 (昭和39年制定) (土木学会編)																
昭和39年	トンネル標準示方書 (昭和39年制定) 修正版・同解説 (土木学会編)																
昭和44年	トンネル標準示方書 (昭和44年改訂版) (土木学会編)																
昭和44年	シールド工法指針 (昭和44年初版) (土木学会編)																
昭和52年	トンネル標準示方書 (シールド編) ・同解説 (52年度版) (土木学会編)	シールドトンネル	・「シールド工事用標準セグメント」の考え方に合わせた。 ・荷重について詳しく分け規定した。	鉛直および水平土圧、水圧、自重、上載荷重の影響、掘削土内荷重、掘削土時荷重、地震の影響、併設トンネルの影響、地盤沈下の影響、その他	SS41, SM41, FGD45	SS50, SM50, FGD50	SS41, SM41, FGD45	SS41, SM41, FGD45	SS41, SM41, FGD45	1400kg/cm ² 800kg/cm ² 1500kg/cm ² 1800kg/cm ² 1100kg/cm ²	1700kg/cm ² 1000kg/cm ² 1900kg/cm ² 1100kg/cm ² 1100kg/cm ² 1600kg/cm ² 1900kg/cm ² 1200kg/cm ²	引張/圧縮 せん断 引張/圧縮 せん断 引張 せん断 引張/圧縮 せん断	立地条件、地山条件等を加味して定める。 責任技術者の判断に委ねる。	—	溶接	ボルト接合	鋼製セグメント 球状黒鉛鑄鉄セグメント
昭和61年	トンネル標準示方書 (シールド編) ・同解説 (61年度改定版) (土木学会編)	シールドトンネル	・シールドを6形式に分類した。 ・地震の影響について記述を充実した。 ・二次覆工に関する章を設けた。	鉛直および水平土圧、水圧、自重、上載荷重の影響、地盤反力、内荷荷重、施工時荷重、地震の影響、併設トンネルの影響、地盤沈下の影響、その他	SS41, SM41, FGD45	SM50A, FGD50	SS41, SM41, FGD45	SS41, SM41, FGD45	SS41, SM41, FGD45	1400kg/cm ² 800kg/cm ² 1500kg/cm ² 1800kg/cm ² 1100kg/cm ²	1900kg/cm ² 1100kg/cm ² 1600kg/cm ² 1900kg/cm ² 1200kg/cm ²	引張/圧縮 せん断 引張 せん断	立地条件、地山条件等を加味して定める。	—	溶接	ボルト接合	鋼製セグメント 球状黒鉛鑄鉄セグメント
平成3年	トンネル標準示方書 (シールド編) ・同解説 (平成3年度改定版) (土木学会編)	シールドトンネル	・SI単位に改めた。 ・許容応力度法によることを明記。 ・地震の影響について解説の量直しと充実。 ・近接施工の影響に関する条文を追加した。 ・許容応力度を大幅に見直した。	鉛直および水平土圧、水圧、自重、上載荷重の影響、地盤反力、内荷荷重、施工時荷重、地震の影響、併設トンネルの影響、地盤沈下の影響、その他	SS400, SM400, SM4400, STK400, FGD45-10	SM490, STK490, FGD500-7	SM490, STK490	SM490Y	SM490Y	160N/mm ² 90N/mm ² 220N/mm ² 170N/mm ² 110N/mm ²	215N/mm ² 125N/mm ² 300N/mm ² 190N/mm ² 220N/mm ² 130N/mm ²	240N/mm ² 140N/mm ² 336N/mm ²	立地条件、地山条件、当該地域の地震動等を考慮し検討を行う応答変位法が多い。	—	溶接	ボルト接合	鋼製セグメント メメント ダクタイルセグメント
平成18年	2006年制定、トンネル標準示方書 シールド工法編・同解説 (土木学会編)	シールドトンネル	・球状黒鉛鑄鉄の座屈許容応力度を新たに追記。 ・ダクタイルセグメントの局部座屈に対する許容応力度も追記。 ・セグメントの耐久性に関する章を新たに設けた。 ・「限界状態設計法」を行う場合の基本を示した。	鉛直および水平土圧、水圧、覆土の自重、掘削土の影響、地盤反力、内荷荷重、施工時荷重、地震の影響、併設トンネルの影響、地盤沈下の影響、その他の荷重影響、その他	SS400, SM400, SM4400, STK400, FGD45-10	SM490, STK490, FGD500-7	SM490, STK490	SM490Y	SM490Y	160N/mm ² 90N/mm ² 220N/mm ² 170N/mm ² 110N/mm ²	215N/mm ² 125N/mm ² 300N/mm ² 190N/mm ² 220N/mm ² 130N/mm ²	240N/mm ² 140N/mm ² 336N/mm ²	立地条件、地山条件、地震動の規模を考慮し、レベル1、レベル2地震動に対して照査。	疲労限界状態に関する照査には基本的には行わない。	溶接	ボルト接合	鋼製セグメント メメント ダクタイルセグメント

5.4 電力土木分野、送電・通信施設関係分野、エネルギー施設分野

5.4.1 水力発電用鋼構造物（水門扉）の設計に関連する基準類

(1)概要

本小節では、水門扉の構造設計に関連する基準類として、法的規制である「発電用水力設備に関する技術基準を定める省令・同基準解釈」¹⁾ならびに「河川管理施設等構造令」²⁾、一方、民間規格である「水門鉄管技術基準」³⁾ならびに「ダム・堰施設技術基準」⁴⁾の役割や概略について述べる。次に、それらの基準類のうち、水力発電分野のなかで代表的な民間規格である「水門鉄管技術基準」に係わる変遷について述べ、最後に、同技術基準の改訂にかかわる今後の動向について述べる。

(2)現行の基準類

水門鉄管協会「水門鉄管技術基準」³⁾

本基準は、わが国で初めて水門扉・水圧鉄管等の設計・製作・検査・据付に関して民間規定であり、1960年に発行された。同基準は、第二次世界大戦終戦後の国土復興のために1960年代から1980年にかけて、全国で数多く建設された治水および水力発電等の利水を目的とした水門扉・水圧鉄管ならびにそれらに付随する設備の設計の拠り所として大きな役割を果たしてきた。

経済通産省「発電用水力設備に関する技術基準を定める省令・同基準解釈」¹⁾

前者は、電気事業法に基づき、水門扉・水圧鉄管を含む発電用水力設備の保安確保のために必要な最小限度の規制を目的とするものである。後者は、同省令に定める技術要件を満たすべき技術的内容をできる限り具体的に示したものである。同基準解釈の構造設計法は、最大想定荷重とある安全率（水門扉用鋼材の場合、降伏点に対し2.0以上、水圧鉄管用鋼材の場合、降伏点に対し1.8以上）を有する許容応力度を対応させることを基本とした、許容応力度ベースの設計手法である。

なお、省令に定める技術的要件を満たすべき技術的内容は同解釈に限定されるものではなく、当該省令に照らして十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠があれば、当該省令に適合すると判断される。

国土交通省「河川管理施設等構造令」²⁾ならびに「ダム・堰施設技術基準」⁴⁾

前者は、ダム、堤防その他の主要構造物について河川管理上の保安を確保するために必要な最小限度の規制を目的とするのである。後者は、同構造令に定める技術要件を満たすべき技術的内容をできる限り具体的に示したものである。

なお、後者については、水門鉄管技術基準と技術的内容に関して、相互に整合が図られているが、計画・設計・施工する工作物の用途によって適用基準の使い分けが行われている。

(3)「水門鉄管技術基準」の変遷

同基準は、1960年の初版以降、発電用ダムの大型化に伴う水門鉄管の大型化や長径間ゲート等の出現、さらには使用材料の品質設計製作技術や溶接技術をはじめとする多岐にわたる技術進歩に応じて、その都度、改訂がなされてきた。これまでに同基準は、5回の改訂がなされてきたが、最新の改訂は、平成19年の第5回改訂であり、そこでは、従前の基準体系が、仕様規定型であったことに対して、はじめて各々の設備の要求性能を明確化し、当該性能を実現させるための具体的事項として「みなし規定」を条文化したことが最大の特徴である。

なお、各改訂におけるポイントや設計荷重条件の考え方等、具体的な内容については表-5.4.1に示すとおりである。

(4)今後の動向

水門鉄管技術基準の第5回改訂では、構造物の要求性能を実現させるための具体的事項として「みなし規定」の条文化がなされたが、今後は、技術のさらなる開発を促し、より一層のコスト削減を

図るため、性能規定化に向けた各種検討が実施されていくものと思われる。一方では、基準の性能規定化を進めるにあたり、国際基準との整合化の観点からも、本格的な取り組みが実施されるものと思われる。

5.4.2 送電用鉄塔の設計に関連する基準類

(1) 概要

本小節では、まず始めに現行の国内関連基準として、法的規制である「電気設備に関する技術基準を定める省令・同技術基準の解釈について」⁵⁾、民間規格である「架空送電規定」⁶⁾、さらには学会標準である「送電用支持物設計標準」⁷⁾について、それらの役割や概要について述べる。次に、学会標準として比較的歴史の古い「送電用支持物設計標準」を対象に、その基準変遷の概要について述べ、最後に、同設計標準の改訂にかかわる今後の動向について触れることとする。

(2) 現行の基準類

経産省「電気設備に関する技術基準を定める省令・同技術基準の解釈について」⁵⁾

前者（電技）は、電気事業法に基づき、電気工作物の保安確保のために必要な最小限度の規制を目的とする維持基準である。適合義務に対する行政の審査基準は、後者（電技解釈）に具体的に明示されている。電技解釈の構造設計法は、最大想定荷重とある安全率（鋼材の場合、降伏点に対し1.5以上）を有する許容応力度を対応させることを基本とした設計手法である。なお、電技解釈によらないものであっても、十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠をもって行う場合は設置可能とされている。なお、電技は、1997年の電気事業法の改正を受けて、性能規定型の記述内容に改訂されている。

日本電気技術規格委員会「架空送電規程」⁶⁾

本規程は、電技および電技解釈の内容と整合を図るとともに、自主保安を基本に自己責任原則を重視した自主規格・基準であり、2000年の改訂で、性能規定型の記述内容に改訂されている。本規程は、建設時の細部の材料、設計、施工、検査等の技術的な事項について法令を補完し、新技術の開発および社会情勢の変化に遅滞なく追従し得ることができるよう、柔軟に対応が図られていくものである。

電気学会「送電用支持物設計標準」⁷⁾

電気学会内に設置された電気規格調査会が定める標準規格であり、1979年の改訂がなされた以降、現在に至っている。同設計標準は、実効最大荷重と降伏点応力度とを対応させる設計手法であり、社会性ならびに経済性から合理的再現期間を有する想定荷重を有する想定荷重を採用している。荷重については、自然風の時間的、空間的変動性状や着氷雪現象の実態を把握して地域別に評価・区分され、1979年の改訂当時においては、設計にかかわる基本的な考え方は、他学会の構造物に対する考え方や、IEC・海外主要国に規格にもほぼ整合するものであった。

(3) 「送電用支持物設計標準」の変遷

「送電用支持物設計標準」(JEC)の歴史は比較的長く、1926年まで遡り、電気学会・日本電気工芸委員会により制定されたJEC-22が始まりである。そこでは、風荷重(風速40m/s)、被氷(6mm、比重0.9)および不平均張力荷重を重畳させ、材料の破壊強度に対して3.0の安全係数を有する許容応力度に対応させる設計手法が定められた。これまでに、同設計標準は、制定以来、JEC-127-1958までに4回の改訂を重ねたが、1958年～1961年にわたり、相次いで来襲した大型台風により、送電線路に相当の被害が生じたため、大型鉄塔の風圧荷重に対する上空遮増の考え方等が従来の設計内容に追加される形で、JEC127-1965が1965年に発刊された。同改訂以後も、風や氷雪による荷重については、実態把握が行われ、一連の実測を踏まえて、合理的な地域区分マップが策定されるとともに、実効最大荷重と降伏点応力度を対応させる方向へと設計の考え方が転換された。最終的には、

1979年に、送電用鉄塔、鉄柱、コンクリート柱に関する設計標準を統合して JEC127-1979 がまとめ上げられ、現在に至っている。

各改訂におけるポイントや設計荷重条件の考え方等、具体的な内容については、表-5.4.2 に示すとおりである。

(4)今後の動向

現行の JEC127 - 1979 では、前回の改訂から 30 年近くが経過していることと、構造設計の性能規定化への趨勢が強まってきていることから、性能規定型の設計体系への転換に向けた各種取り組みが、ようやくなされ始めている。将来的には、鉄塔単品としての設計精度の向上による合理性と、規模や重要性を勘案した送電設備全体としての設計作業効率化による合理性をそれぞれ勘案して、最適な設備設計を可能とする設計体系を志向していくものと思われる。

参考文献

- 1) 経済産業省：発電用水力設備に関する技術基準を定める省令・発電用水力設備の技術基準の解釈について，1997。
- 2) 国土交通省：河川管理施設等構造令，2000。
- 3) 社団法人水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，水門扉編 - 付解説 - ，2007。
- 4) 社団法人ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)，1999。
- 5) 経済産業省：電気設備技術基準・解釈早分かり，オーム社，2007。
- 6) 社団法人日本電気協会・日本電気技術規格委員会：架空送電規程 JEAC6001-2000,2000。
- 7) 電気学会・電気規格調査会標準規格：送電用支持物設計標準 JEC-127-1979,1979。

表-5.4.1 設計変遷一覧(水門鉄管技術基準)

年代	設計示方書・基準・標準・指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種(許容応力、降伏応力、特性値、基準強度)				疲労設計	耐震設計	接合法
					41級	50級	53級	58級			
昭和35年	水門鉄管技術基準初版	すべての水力発電所の水圧鉄管(鉄筋コンクリート管・木製管は対象外)ならびに、発電機・治水用・利水用ダムおよび取水せき・河川せき・またその他の水路工作物の放水・取水・排砂・防潮等に使用される水門扉など。	水圧鉄管・水門扉及びその他の鉄鋼構造物の設計・製作・据付・保守について規定。アンカーブロック・コングリート支台等についても、支持構造物として規定。	水圧鉄管:内圧,管自重,管内水重量,外圧,地震力等 水門扉:自重,静水圧,泥圧,波圧,浮力,地震力,風荷重等	溶接構造用圧延鋼材(以下同様) 1150kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	1600kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	1950kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	2400kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	振動防止の観点から考慮	溶接,リベット,高カボルト	
昭和43年	水門鉄管技術基準第1回改訂版	同上	・使用材料の範囲を拡大(水圧鉄管→SM50Yなど追加,水門扉→11種類から30種類に増加) ・許容応力を引き上げあるいは追加,降伏点規格値の1/2→1/1.8	水門扉に關して,"波圧や流水による水圧の変化及びこれに起因する振動による荷重増加"を追加。	水圧鉄管: 1300kgf/cm ² (厚さ40mm以下) 水門: 1200kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	水圧鉄管: 1750kgf/cm ² (厚さ40mm以下) 水門: 1600kgf/cm ² (厚さ40mm以下)	水圧鉄管: 1950kgf/cm ² (厚さ40mm以下) 水門は規定なし。	水圧鉄管: 2400kgf/cm ² (厚さ40mm以下) 水門は規定なし。	同上	同上	
昭和48年	水門鉄管技術基準第2回改訂版	上記に加えて,水門扉の対象範囲を拡大(高圧ローラーゲート,高圧ランジアルゲート,多段式シリンダゲート,長径間ゲート等をあらたに追加)	・使用材料の範囲の拡大(水門扉→30種類から35種類) ・高カボルトおよびPC鋼材の許容応力を規定。 ・常時使用状態にある高水圧水門の許容応力を規定。	水門扉における設計荷重に,地震時動水圧と地震時慣性力を新たに明記。	同上,ただし,高水圧水門扉の場合は, 1050kgf/m ² (厚さ40mm以下)	同上,ただし,高水圧水門扉の場合は, 1400kgf/m ² (厚さ40mm以下)	同上	同上	同上	同上	
昭和56年	水門鉄管技術基準第3回改訂版	同上(対象外とするその他の水門扉として,ステンレス鋼製,アルミニウム製,強化プラスチック製を新たに明記)	水圧鉄管:露出管と埋設管に区分,使用材料の一部削除と追加。 水門扉:使用材料の種類を41種類に拡大,閉閉装置及び選抜取水設備に関する条項,半自動溶接に関する条項の追加	設計荷重に,雪荷重を新たに明記。	同上。	同上。	同上	同上	同上	同上	
平成5年	水門鉄管・鉄鋼構造物編,溶接・接合編第4回改訂版	同上(対象外とする水圧鉄管として,鉄筋コンクリート管・強化プラスチック複合管を明記)。	水圧鉄管のみ: ・使用材料の種類が23種類に拡大(JIS規格管及びダクタイル鉄管の追加など)。 ・鋼材許容応力の見直し。 ・超音波探傷試験の採用。	同上。	1350kgf/cm ² (厚さ16以下) 1300kgf/cm ² (16<厚さ<40)	1800kgf/cm ² (厚さ16以下) 1750kgf/cm ² (16<厚さ<40)	2000kgf/cm ² (厚さ16以下) 1950kgf/cm ² (16<厚さ<40)	2400kgf/cm ² (厚さ16以下) 2350kgf/cm ² (16<厚さ<40)	同上	同上	
平成9年	水門鉄管技術基準第4回改訂版の部分改訂	同上(対象外とするその他の水門扉として,アルミニウム製,FRP製,ゴム製に文言変更)	水圧鉄管ならびに水門扉:海外の主要規格材料(ASTM, ISO, EN)の取り込み,材料の許容応力度を引張強度,降伏点に基づいて算出する式の記載。	第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	同上	同上	
平成19年	水門鉄管・鉄鋼構造物編,溶接・接合編第5回改訂版	同上。	要求性能を実証させるための具体的な事項として「みなし規定」を条文に導入。 技術進歩に伴う新技術の反映,管胴本体及び補剛材(管内空處時)の座屈に対する安全率を1.5以上と明記。	同上。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	JIS材については,第3回改訂版と同じ。	同上	同上	

5.4.3 塔状鋼構造物の設計に関する基準類

塔状鋼構造物は、昭和 55 年に「塔状鋼構造設計指針・同解説」が日本建築学会から制定され現在に至っている。これは昭和 37 年の鉄塔構造計算規準と昭和 40 年の鋼製煙突構造計算規準を一つにまとめたものである。前者はテレビ塔、マイクロウェーブ塔、照明塔、広告塔などを対象にしており、後者は主として独立鋼製煙突を対象とした計算規準である。昭和 45 年に計算規準が大幅に改訂された「鋼構造設計規準」が刊行されたため、その計算規準に準拠すること、鋼製煙突において当時特殊だった構造形式が一般的に数多く用いられたこと、を勘案して改定された。本指針では風荷重は「建築物荷重指針案」、部材の設計は「鋼構造設計規準」の範囲内であるが、煙突の筒体などで径厚比の制限を超える場合もあるので、その場合の許容応力度を決めるなど、独自に決めた部分もある（表-5.4.3 参照）。

5.4.4 通信鉄塔の設計に関する基準類

通信鉄塔においても、現行は許容応力度に基づいた設計になっている。平成 9 年に「通信鉄塔設計要領」において初めて通信鉄塔に特化した設計要領が刊行されており、それ以前は建築基準法に準拠した設計がなされていた。その後、平成 12 年の建築基準法の改正、平成 13 年の橋、高架の道路等の技術基準の改正に伴い、平成 15 年に通信鉄塔設計要領の改訂版が発行された。特徴は、風荷重、雪荷重の見直し、たわみ、ねじれの許容値を追加したことである（表-5.4.3 参照）。

塔状鋼構造物・通信鉄塔の構造物は許容応力度設計であり、今後は限界状態設計への移行が考えられるが、現行でも十分使用に耐え得るものであり、安易に改定するべきではないという意見もある。しかしながら、どれだけ余力があるかは不明であるため、地震荷重などに対しては現在の耐震設計の枠組みの中で安全性を確保する立場に立てば、別途終局状態の検討が重要となるため、一部限界状態を規定することも今後必要となると判断される。

表-5.4.3 設計変遷一覧 (塔状鋼構造物・通信鉄塔)

年代 和暦	西暦	設計示方書・基準・標準・指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種(許容応力、降伏応力、特性値、基準強度)			耐震設計	疲労設計	接合法	
						41級	50級	53級			58級	断面
			・何を対象として何を決めているか (例えば、道路構造物では、鋼橋 上部構造・下部(基礎)構造が あり、下部(基礎)構造は、さらに ケーソン基礎、杭基礎等に分類、 対象物がことなる。・対象物を整 理・分類してから記入するか)	基準のポイントや改正の主要 ポイントを記入する。	・設計荷重として新し く設定された荷重(種 類)および考慮され る荷重(荷重レベル) 等を記入				耐震設計 としての 特記事 項・考え 方を記入	疲労設計 としての 特記事 項・考え 方を記入		
昭和37年	1962	鉄塔構造計算規準	テレビ塔、照明塔等の高層建築の 屋上に設けられる塔状構造物	せいが高い重量構造物 への対応								
昭和40年	1965	鋼製煙突構造計算規準	鋼製煙突	風の振動(渦励振) 煙道部の開口部								
昭和55年	1980	塔状鋼構造設計指針・同解説	鉄塔類、鋼製煙突類、 塔状鋼構造物	・「鋼構造設計規準」との整合 ・上記2つの基準を統合 ・構造形態の変化に対応	風の動的効果 地震荷重、水雪荷 重、繰り返し応力、温 度応力	SM41, SM50, SM53, SM58 SS41, SS50, SS55 STK41, STK50 STKR41, STKR50		特になし	風による 疲労を 考慮す る。		鋼構造設計規準 に順ずる。	
平成9年	1997	通信鉄塔設計要領	通信鉄塔、反射板									
平成15年	2003	通信鉄塔設計要領・同解説	同上	風荷重、雪荷重の見直し。 たわみ、ねじれ許容値追加。	風荷重、雪荷重、地 震荷重、偏心による ねじれ	SN400, SN490 SS400, SS490, SS540, SM400, SM490, SM520 STK400, STK490, STKN400, STKN490		特になし	特になし		ボルト接 合、溶接	ボルト接 合、溶接

5.4.5 パイプラインの設計に関する基準類

(1)概要

高圧のガス・石油等埋設パイプラインの設計においては、1970年のガス事業法、1972年の石油パイプライン事業法の制定が設計方法の大きな転換期となっており、1974年に日本道路協会から発行された石油パイプライン技術基準（案）が、現在の高圧パイプライン設計の基礎となっている。その後の設計方法の変遷としては、主に地震に関する新しい知見および耐震設計技術を反映させるという観点で行われており、主荷重に関する設計法については大きな変化はない。それまでは風や雪、温度変化と同じく従荷重として扱われていた地震が、1982年の高圧ガス導管耐震設計指針の発行以降、主要設計項目の一つとして発展し、2000年の高圧ガス導管耐震設計指針（1次改訂）、2001年の高圧ガス導管液状化耐震設計指針の発行に到っている。

埋設パイプラインに適用される鋼管材料としては、基本的に1970年代と同じ規格が用いられており、小口径ではSTPG380等のJIS規格、大口径ではAPI 5L規格が主に用いられる。API 5L材は、初期の高圧パイプラインではX42～X60が用いられていたが、現在ではX65が主流となっている。また、一部パイプラインではより高強度のX80の適用が試みられている（表-5.4.4参照）。

(2)現行の基準類

石油パイプライン技術指針（案）

道路下に埋設する石油パイプラインの計画、設計、施工に関する技術基準として、1974年に発行された。耐震設計も含めた石油パイプラインの設計全般を単独の基準として扱っており、高圧ガス導管も概ねこの指針に従って設計されるようになった。本指針ではパイプラインの構造および内圧、土圧、自動車荷重等の主荷重と、風、地震、温度影響等の従荷重に対して応力照査方法が規定された。耐震設計については、L1地震動に対して応答変位法による応力度評価が採用された。

ガス工作物技術基準の解釈例

ガス工作物の一環としてのガス導管の構造についての技術基準の解釈例であり、2000年に初版発行された。本解釈例の発行以前も、ガス導管の構造については、ガス事業法の技術基準の告示に示されていたが、耐震設計については本解釈例で初めて示された。耐震設計に関しては、L1、L2地震動を対象とするが、その方法は後述の「高圧ガス導管耐震設計指針」を適用することとなっている。なお、本解釈例では自動車荷重としてT-20荷重が用いられているが、事業者の要望によりT-25荷重の適用も可としている。

高圧ガス導管耐震設計指針

高圧ガス導管の埋設部分に対して耐震設計の技術指針を定めたものであり、地震動によって導管に発生するひずみの算出方法や許容値を規定したものである。1982年に初版が発行された。耐震設計手法としては応答変位法によるひずみ評価が用いられている。1982年の設計指針はL1相当の地震動を対象とした指針であり、導管の供用期間中に数回のL1地震動を受けるという前提で、ASME Sec. の設計疲労曲線を基に繰返し数50回の極低サイクル疲労を想定した許容値を設定している。具体的には、直管についてはひずみ1.0%と座屈開始ひずみ35t/D(%)のうち小さい方を、曲管についてはひずみ1.0%を許容値としている。

高圧ガス導管液状化耐震設計指針

ガス導管の耐震設計のうち液状化に対する技術指針として、液状化の判定方法、液状化により発生する地盤変位、導管変形量の算出方法やその許容値を規定したものである。2001年に初版発行された。本指針では、これまでの耐震設計とは異なり限界状態設計法の考え方を取り入れており、部分係数法を用いた不等式形で変形量と許容値を設定している。本指針では、液状化による傾斜地盤の側方流動、護岸被害に伴う背後地盤の側方流動および地盤沈下を想定しており、地

盤の永久変位により導管に変形が生じるとしているため、疲労設計は考慮せず静的な一方向変形を考慮している。

(3)石油パイプライン技術指針(案)の変遷

「石油パイプライン技術指針(案)」は1974年の制定以来、一度も改定されていないこともあって、いわゆる限界状態設計法的な扱いはされていない。

(4)ガス工作物技術基準の解釈例の変遷

「ガス工作物技術基準の解釈例」は2000年の発行以降、「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」の発行に対応して、2002年に一次改訂された。また、2004年には二次改訂として海底設置導管に関する記述が加えられた。ここでは海底設置導管の耐震設計は陸上設置導管に準ずるとされている。

(5)高圧ガス導管耐震設計指針の変遷

1995年の阪神大震災を契機として、L2地震動に対する設計指針の制定が進められ、2000年にL2地震動に対する評価を規定した一次改訂版が発行された。改訂版ではL2地震動に対する評価方法として新たにひずみ算出方法と許容値を規定している。この改訂版ではL1地震動の評価方法は旧版(1982年)の考え方をそのまま踏襲するものとし、旧版と改訂版の2冊を組み合わせて使用する形をとった。L2地震動に対する許容値としては、供用期間中に1回有るか無いかという前提で3~5回の極低サイクル疲労を想定した許容値を設定している。具体的には、直管、曲管ともひずみ3.0%を許容値としている。2006年には旧版(1982年)と改訂版(2000年)を統合・再編纂した二次改訂版が発行された。

(6)高圧ガス導管液状化耐震設計指針の変遷

2001年に初版発行され、まだ改定はされていない。

(7)今後の動向

現在、基準類で明記されている鋼材はX65までであり、最近適用が試みられ、実績も増えつつある高強度のX80鋼管の基準への盛り込みについて今後検討が進められると考えられる。

表-5.4.4 設計変遷一覧 (パイプライン)

年代 西暦	設計示方書・基準・標準・指針ほか	基準対象	基準のポイント (改正の主要ポイント)	設計荷重	鋼種(許容応力、降伏応力、特性値、基準強度)				疲労設計	耐震設計	疲労設計	接合法	
					4.1級	5.0級	5.3級	5.8級				断面	現場
昭和49年	石油パイプライン技術指針(案)	道路下に設置する石油パイプラインの計画、設計、施工に関する技術基準。導管の構造、特に導管の応力照査方法(地震時含む)について規定がある。	初版発行(その後、改正なし)	内圧、土荷重、自動車荷重地震(L1相当)等	TS YS ksg ksg 3800, 2200 4200, 2500 API 5L X-42 4220, 2950 API 5L X-52 4640, 3660 API 5L X-60 5270, 4220 API 5L X-65 5410, 4570 (主要な管種のみ記載)	軸方向溶接(溶接鋼管の場合)	円周方向溶接	特に無し	応答変位法 応力度評価				
平成12年	ガス工作物技術基準の解釈例	ガス工作物の一環としてのガス導管の構造についての技術基準。導管の耐震設計について、「高圧ガス導管耐震設計指針」を参照。	初版発行 同解説例発行以前も、ガス導管の構造(管厚算定)については、ガス事業法の技術基準の告示に示されていたが、耐震設計については、本解説例で初めて示された。	内圧、土荷重、自動車荷重(指針上はT-20荷重、客先要望によりT-25対応有)地震(L1、L2)等	(上記管種は全て適用範囲) 耐震設計としての許容値については、参照先の「高圧ガス導管耐震設計指針」に記載。本解説例自体には記述なし。	<同上>	<同上>	耐震設計や疲労については、参照先の「高圧ガス導管耐震設計指針」に記載。本解説例自体には記述なし。				<同上>	
平成14年	ガス工作物技術基準の解釈例	ガス工作物の一環としてのガス導管の構造についての技術基準。導管の耐震設計について、「高圧ガス導管耐震設計指針」および「高圧ガス導管液化耐震設計指針」を参照。	1次改定 導管の耐震設計に関する参照先に「高圧ガス導管液化耐震設計指針」が加わった。	内圧、土荷重、自動車荷重(指針上はT-20荷重、客先要望によりT-25対応有)地震(L1、L2、液状化地盤変状)等	<同上>	<同上>	<同上>	耐震設計や疲労については、参照先の「高圧ガス導管耐震設計指針」、「高圧ガス導管液化耐震設計指針」に記載。本解説例自体には記述なし。				<同上>	
平成16年	ガス工作物技術基準の解釈例	<同上>	2次改定 海底設置導管に関する記述が加わった。海底設置導管の耐震設計も陸上設置導管に準じている。その後、解説例記載内容の微妙な改正はあるが導管構造や耐震設計に関する修正はない。	<同上>	<同上>	<同上>	<同上>					<同上>	
昭和57年	高圧ガス導管耐震設計指針	ガス導管の耐震設計についての技術指針。導管発生ひずみ算出方法や許容値を規定。	初版発行	地震動(L1相当)	(上記管種は全て適用範囲) 許容値は、以下のとおり。 直管 < 1.0%かつ 3.5t/D% (t: 管厚、D: 管径) 曲管 < 1.0%		L1地震動に対し50回、極低サイクル疲労を考慮	応答変位法 ひずみ評価				<同上>	
平成12年	高圧ガス導管耐震設計指針	<同上>	1次改定(大幅改定) L2地震動に対する評価を含めた2段階照査となった。L1に対する評価は、旧版(82年版を参照)	地震動(L1およびL2)	(上記管種は全て適用範囲) 許容値は、以下のとおり。 L1に対する評価: 同上 L2に対する評価: < 3.0% (直管・曲管共)		L1地震動に対し50回、L2地震動に対して3~5回の極低サイクル疲労を考慮	<同上>				<同上>	
平成18年	高圧ガス導管耐震設計指針	<同上>	2次改定 82年版と00年版を統合/再編纂した。内容の大幅変更はない。	<同上>	<同上>		<同上>	<同上>				<同上>	
平成13年	高圧ガス導管液化耐震設計指針	ガス導管の耐震設計(液状化)についての技術指針。液状化判定、液状化による地盤変位、導管変形量算出方法や導管変位の許容値を規定。	初版発行(その後変更なし)	液状化による地盤変位	(上記管種は全て適用範囲) 限界状態設計法の考え方を導入し、部分係数法を用いた不等式形で、許容値(変位量)を与えている。		疲労設計は考慮していない	限界状態設計法				<同上>	

5.4.5 貯槽の設計に関する基準類

(1) 鋼製石油貯槽（全溶接製）

昭和 37 年(1962 年) JIS B 8501（石油貯槽の構造（全溶接製））が、我が国の石油消費の増大に対応するために制定され、それ以降、石油貯槽はほぼこの規格に従い製作されてきた。この昭和 37 年に制定された JIS B 8501 は、API Standard 650 を骨子として、我が国で入手可能な材料、使用条件、使用実績など我が国の実情に合致するように修正が加えられている。

昭和 51 年(1976 年)には、昭和 50 年(1975 年)に発生した水島コンビナート石油事故（重油流出事故）の教訓を踏まえ、また、貯槽の大型化に対処するために全面的かつ大幅な改正が行なわれ、さらに、昭和 54 年(1979 年)には、水島コンビナート石油事故の原因について技術的問題点が出たこと、自治省消防庁の石油貯槽に関する技術基準等の整備があり、これとの整合等のために改正が行なわれた。

その後、平成 7 年(1995 年)に、我が国の実情に我が国の実情に合致した貯槽の標準とすることを目的に全面的な見直しと耐震設計に関する検討の必要のため改正が行なわれた。

(2) 球形ガスホルダー指針

球形ガスホルダー指針は、ガスの安定供給を図る上で重要な設備である球形ガスホルダーに関し、その設計、施工、維持管理に関して、通商産業省から日本ガス協会に委託された総合的な技術基準調査の成果を取り入れ、技術指針として制定された（平成元年(1989 年)）。

平成 12 年（2000 年）10 月には、安全規制にかかわる改正ガス事業法が施行され、安全規制合理化及び性能規定化に対応する技術指針の作成・改訂の必要性が増してきたこと、また、平成 7 年（1995 年）に発生した兵庫県南部地震クラスの高レベルな地震に対応する基準の整備が求められた。そのため、性能規定化された技術基準との整合、高レベル地震動の導入、維持管理規定の充実に係る見直しを行なった改訂が平成 16 年（2004 年）3 月になされている。

(3) L P G 貯槽指針

L P G 貯槽指針は、LPG 貯槽の保安の向上を図ることを目的に、その計画、設計、建設及び運転、維持管理までを総合的な技術指針として制定された（平成 4 年(1992 年)）。

平成 12 年（2000 年）10 月には、安全規制にかかわる改正ガス事業法が施行され、安全規制合理化及び性能規定化に対応する技術指針の作成・改訂の必要性が増してきたことから、最新の技術を取り込み、内容を最新化すると共に、高レベル地震動に対応した規定、性能規定化された技術基準、解釈例及び保安上有効な基準の取り込み、また、維持管理の重要性に対応するため、点検・検査対象、検査項目、検査方法及び周期についての見直しを行なった改訂が平成 17 年（2005 年）10 月になされている。

(4) LNG 地上式貯槽指針

LNG 地上式貯槽指針は、LNG 関連設備の中でも重要な設備の一つである LNG 地上式貯槽に関し、その設計、建設及び運用にかかわる総合的な技術指針として制定された（昭和 56 年(1981 年)）。

平成 12 年（2000 年）10 月には、安全規制にかかわる改正ガス事業法が施行され、安全規制合理化及び性能規定化に対応する技術指針の作成・改訂の必要性が増してきたこと、また、平成 7 年（1995 年）に発生した兵庫県南部地震クラスの高レベルな地震に対応する基準の整備が求められた。そのため、性能規定化された技術基準との整合、高レベル地震動の導入、PCLNG 地上式貯槽、ピットイン貯槽等の新技術の取り込み、維持管理の規定の充実に係る見直しを行なった改訂が平成 14 年（2002 年）8 月になされている。

(5) 容器構造設計指針・同解説

容器構造設計指針・同解説は、水槽・サイロの構造設計全般および、球形タンク支持構造・地上たて型円筒貯槽の耐震設計に適用する指針として制定された（昭和 59 年(1984 年)）。この指針

が検討されたのは、建築構造分野で新耐震基準の条文作成、また、他方において危険物内溶液を収蔵する容器構造の安全設計に係わる法令や技術基準の改定作業がそれぞれの所轄官庁により並行して進行していた時期である。

その後、平成2年（1990年）の改訂では、土木分野で開発された設計手法を参考として、地下容器をその対象として加えるとともに、建築基準法に示される2次設計（保有耐力設計）を基本として、最新の研究成果に基づき容器構造物のより現実的な崩壊モードを設定して、地震時のエネルギーの授受に着目した構造特性係数 D_s 値を示している。さらに、平成8年（1996年）の改訂では、SI単位の導入、基標準・規格・指針等の改定への対応、ステンレス鋼材の追加、地下容器の耐震設計の充実、地上たて型円筒貯槽の D_s 値の評価の改定、高速増殖炉容器の耐震設計の紹介と本指針との対応、1995年兵庫県南部地震における地上たて型円筒貯槽の被害例の解析と本指針との対応などがなされている。