

柔構造樋門に関する研究



綿貫布征
調査第一部
次長



清水義治
調査第一部
主任研究員



高橋英徳
調査第一部
主任研究員

研究の背景と目的

治水施設のうち河川堤防を横断して設けられる樋門は、それ自身が堤防と同等の機能を保有する必要があるが、樋門の函体と堤体土との重量・剛性等の相違から函体と周辺土は密着し難く、特に沈下が大きい軟弱地盤における支持杭基礎の樋門においては、函体底版下の基礎地盤や周辺堤防に空洞が発生する例が少なくない。この空洞は洪水時の河川堤防の安全を脅かす重大な課題として認識され、その対策が急がれていた。

堤防の安全を脅かす主要因の一つとして、樋門と堤体との接触面に沿う浸透流の影響が従来から重要であると言われてきた。この浸透流による影響はルーフィングと呼ばれ、樋門本体と周辺堤防との間の沈下差・変位差によって、接触面のなじみが悪くなり、接触面に沿う浸透流が卓越することにより発生する。

樋門は堤防の下に構築される構造物であり、堤防盛土による地盤沈下等の地盤変位の影響を避けられない。しかしながら、従来の樋門の基礎形式は図 - 1 に示すように杭基礎等を用いた剛支持とすることが一般的であったため、樋門周辺地盤は沈下するのに対し、樋門本体は沈下が抑制されることから、図 - 2 に示すように函体周辺の空洞化や堤防のクラック発生等により、堤防の連続体としての機能を損なう危険性があった。

そこで、地盤あるいは基礎の沈下・変位に追随すること

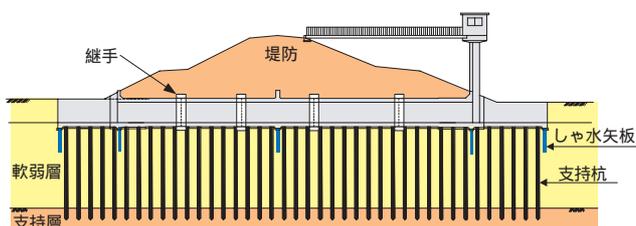


図 - 1 従来の支持杭基礎による樋門縦断面図

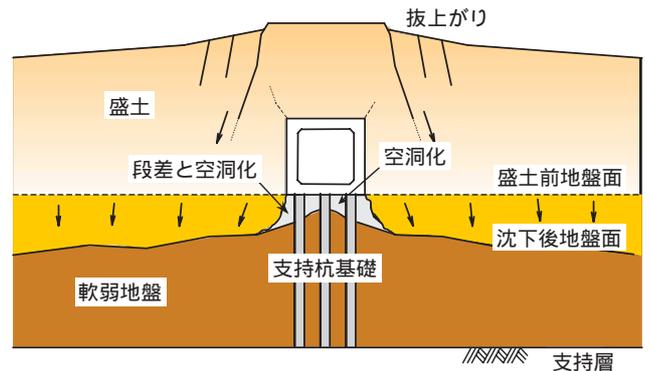


図 - 2 従来の支持杭基礎(剛支持)による堤体の変状と空洞化現象



写真 - 1 樋門設置状況

により、空洞化や抜け上がりによる堤防のクラックを防止でき、周辺堤防に悪影響を与えることが少ない柔構造樋門が提案され、平成10年に「柔構造樋門設計の手引き」が(財)国土技術研究センターから発刊され、樋門設計の拠り所となっている。また、平成11年10月に建設省河川局治水課長通達として「樋門の構造形式は、基礎地盤の残留沈下量および基礎の特性等を考慮して選定するものとし、原則として柔構造樋門とするものであること。」と樋門設計の基本原則を柔構造樋門とされ、現在に至っている。現在、直轄の既存樋門は13,000余りあり、そのうち約1割が柔構造樋門として施工される現状となっている。

この柔構造樋門の設計法は、「樋門と周辺堤防との相互作用を考慮した設計法」であり、他の土木構造物の設計法とは大きく異なる特徴のある設計法となっている。具体的には、従来の樋門の設計は「樋門本体の構造設計が中心であり、堤防(土圧)は荷重としてのみの扱いであった」のに対し、柔構造樋門の設計概念は「樋門の周辺堤防の安全性を優先して確保するため、樋門と周辺堤防との相互作用を考慮した設計」とするもので、「樋門本体の構造力学」と「周辺堤防の土質力学」との両者の接点を取り扱うものであるといえる。そのため、設計手法が未確立な部分もあり、課題は少なくない。

柔構造樋門の構造

樋門は図-3に示すようにコンクリート等の函体を継手により接続する構造となっている。柔構造樋門は、この継手部の変形能力を利用し、周辺地盤の沈下に追従する函軸たわみ性を有する。

この函体の構造形式や継手形式は現場条件、土質条件、工期、経済性等を考慮し選定する。

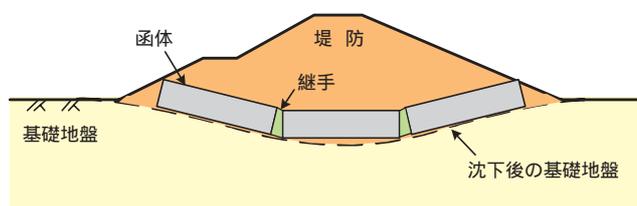


図-3 柔構造樋門の構造

1 場所打ちコンクリート構造の樋門

従来の樋門は現場打ちのRC構造とすることが原則であった。現場で施工されたコンクリートの函体は主に地盤の沈下が小さい場合はカラー継手、大きい場合には可とう継手で接合し、可とう性、止水性を確保している。カラー継手は図-4に示すようにコンクリート函体間に止水板を埋

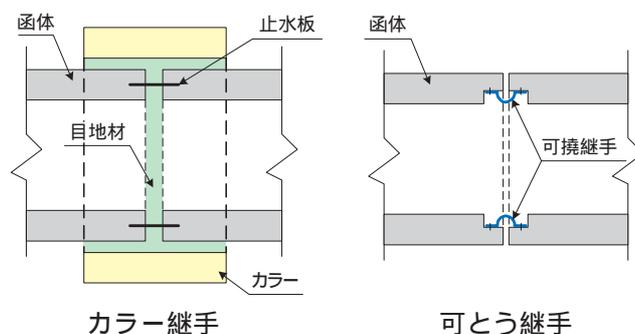


図-4 樋門の継手形状

め込み、さらにコンクリート製のカラーと呼ばれる、ひと周り大きな函体で覆う構造となっている。

また、可とう継手はゴム等の伸縮性部材を函体間に押さえ板とボルトにより接合する構造となっており、カラー継手に比べ、大きな変位を許容できる。

現場打ちのRC構造の特徴は施工実績が多く、施工も容易で、函体本体の施工コストが安いことである。しかし、盛土後の周辺地盤の沈下、側方変位等により函体に軸引張力が作用し、継手部の開口、止水板の破断、函体クラック等が顕在化することがある。また、配筋、型枠支保工設置、コンクリート打設、養生等の多様な現場作業が必要となることから、一般的に工期が長くなる傾向にあり、出水期の有無により仮設の規模に大きく影響し、コストが増大することがある。

2 プレキャストコンクリート構造の樋門

プレキャストコンクリート構造の樋門は工場で作成した長さ1~2mの函体を現場で組立、PC鋼材等の緊張材により緊張力を導入し、接合する工法である。本工法は緊張により函体にプレストレスを導入しているため、地盤変位により作用する軸引張力を相殺し、函体のクラックを抑制し、接合部の開口を防止できる。また、現場作業の省力化、効率化、現場工期の縮減効果、仮締切の規模縮小およびプレキャスト化による函体の品質向上が期待できる。継手構造は可とう継手が主流であるが、継手を用いずに函軸たわみ性を確保する弾性接合方式が提案され、試行されている。

(1) 可とう継手方式

各プレキャスト函体の函軸方向に緊張力を導入し、一体化した複数のスパンを可とう継手により接合するものである。接合部は剛構造であるため設計上はRC構造の樋門と同じである。

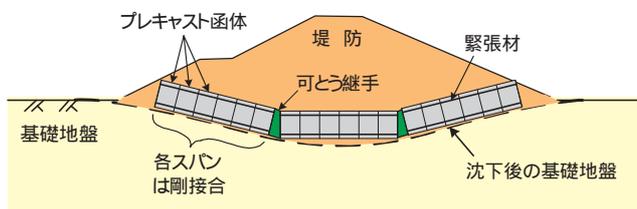


図-5 プレキャスト樋門(可とう継手方式)

(2) 弾性接合方式

弾性接合方式のプレキャスト樋門は、各プレキャスト函体間の接合部にゴム等の弾性体を挟み、本体縦断方向に緊張材により緊張力を導入する工法であり、接合部に弾性変形機能と止水機能を期待するものである。本方式の詳細は後述する。

3 樋門の基礎

柔構造樋門は堤体の機能確保のため、周辺地盤の沈下に追随し、樋門本体の沈下を許容している。しかし、過大な沈下は逆に周辺堤防に悪影響を及ぼすことがあるため、許容値を設け抑制する必要がある。地盤の沈下量はその許容値を超える場合には以下の地盤対策や沈下量をあらかじめ見込んだキャンパー盛土等により対策が必要である。

(1) 地盤改良工法

地盤改良工法は土質条件、周辺への影響、経済性等を考慮して選定する。工法としては主に軟弱土を良質土に置き換える置換工法、プレロード工法、セメント系および石灰系の改良材を用いる地盤改良工法、ドレーン工法、サンドコンパクション工法等が挙げられる。

(2) キャンパー盛土

キャンパー盛土は図-6に示すように沈下量を見込んで函体を上げ越して設置することにより、地盤の沈下に伴う

樋門の最終沈下量を実質的に少なく抑える工法である。

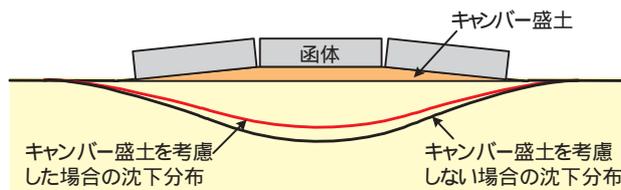


図-6 キャンパー盛土

柔構造樋門の課題

ここでは柔構造樋門の設計に極めて重要である樋門周辺堤防・周辺地盤の沈下、変位及び函体を接合する継手の課題と対策を中心に述べる。

1 地盤の沈下、変位の検討

樋門の設計において、樋門周辺堤防及び樋門本体の安全性を確保するためには、樋門周辺堤防・周辺地盤の沈下・変位を精度良く推定することが極めて重要である。前記の「柔構造樋門設計の手引き」では、“本体直近の堤防基礎地盤における本体設置後の沈下量を残留沈下量”と定義している。この残留沈下量は、“即時沈下と圧密沈下の和”として算定し、本体函軸に沿った残留沈下分布を推定して、それに追随する樋門とすることを設計目標の一つとして掲げている。

(1) 現行の即時沈下分布算定法の課題

現行の即時沈下分布算定式は、半無限弾性体の水平地盤上の帯状荷重による弾性沈下を算定するものであるが、図-7に示すように原地盤を多層成層地盤にモデル化し、さらに均一な単一層にモデル化することで、変形係数を換算する工夫により地盤の即時沈下分布を算定している。このため、地層の傾斜・湾曲、レンズ状の挟み層等の複雑な堆積環境を表現できるモデルとはなっておらず、軟弱層の分布の影響よりも荷重の分布の影響に支配される地盤沈下分布となり、結果として堤防の形状に類似した沈下分布を算出することになる。つまり、軟弱層の分布を反映したき

め細かな地盤の沈下分布を算定することができないのが現状である。

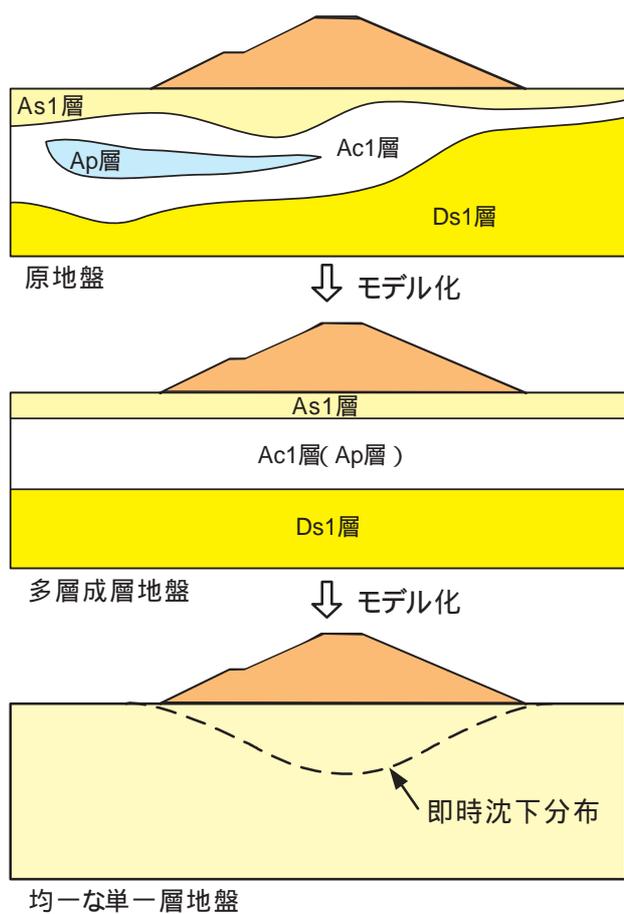


図 - 7 多層均質地盤へのモデル化

(2) 新しい即時沈下分布算定法の提案

これらの課題を解決するために、複雑な地盤構成を反映することができ、かつ実務レベルでも容易に用いることができる方法を検討している。

現在検討中の手法はブーシネスクの解やミンドリンの解を用いた地盤内応力から、沈下量を算定する方法である。本手法は沈下量を求める測線（例えば図 - 8の測線A~I）において適当な深さ間隔で盛土荷重に対する地盤内応力を上記解を用いて算出し、その地点における地盤の変形係数からひずみ量を計算し、深さ方向に積分するものである（ひずみ量と深さ間隔の積を足し合わせる）。本手法は比較的簡単な計算式で沈下量を算出できるため、表計算ソフト

等で簡単に行うことができ、実務上も非常に有効な手法であると考えられる。

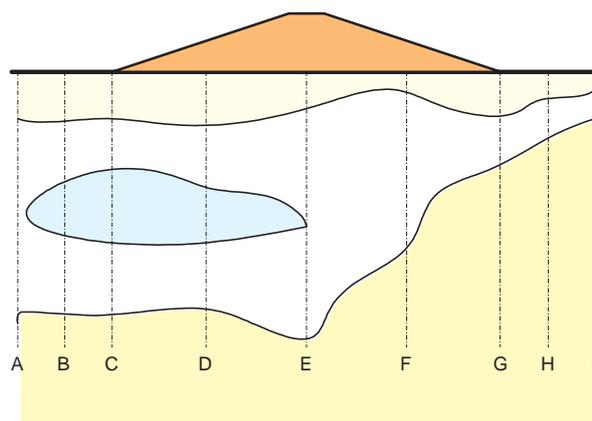


図 - 8 即時沈下分布算定の地盤例

本手法で算出した即時沈下分布をFEM解析解と比較したところ、同程度の精度で算出できることが確認できた。今後は実地盤において測定されている沈下分布との整合性を確認し、本手法の実用性を判断する必要があると考える。

また、残留沈下量と共に樋門の設計荷重である側方変位分布の算出法についても、本手法により検討を進めている。

2 継手に関する検討

柔構造樋門では、地盤の沈下に追従する柔構造とするために継手のフレキシブル機能に依存することとなる。継手の保有すべき機能としては、「変位差吸収（たわみ性の確保）」、「断面力の伝達（応力集中の回避）」、「函体内外への浸透水遮断等の水密性確保」の3点が挙げられる。

(1) 既存の継手の課題

現在、柔構造樋門の継手にはカラー継手、可とう継手が使われることが多いが、これら既存の継手の課題は、「断面力の伝達」に集約されるものと考えられる。カラー継手は本体構造に、可とう継手は周辺の堤体に応力集中の影響が発生することがある。

カラー継手の課題

カラー継手は剛支持樋管における実績は極めて多いが、継手部の開口等の変状例(止水板の破断に伴う水密性の喪

失、函体クラックの発生等)が少なくない。このため、柔構造の樋門の継手として利用するにはコスト面では有利であるが、変形能力が極めて少ないことから多くの制約がある。



写真-2 カラー継手(左)と可とう継手(右)

可とう継手の課題

可とう継手は変形能力は高く、柔構造を達成することは容易であるが、隣接する函体への応力の伝達がほとんど無く、継手部に大きな変位差が発生し易い。このため、継手の周辺堤防に空洞やクラックが発生することがある。また、コストが高いため、設計上は継手の数を減らす工夫がなされているが、結果的に継手部に変位差が集中することになる。

(2) 弾性接合方式のプレキャスト樋門の提案

公共事業において近年、「施工の省力化・省人化」「品質・耐久性の向上」「現場工期の短縮」「コスト縮減」などが強く求められている。そのため、樋門はプレキャスト化が進められており、継手もこれまでの課題を克服すべく、両継手の中間的な挙動をする様々な弾性継手が提案されている。ここでは、パイロット工事としての実績が積み重ねられているプレキャスト樋門における弾性接合方式について述べる。

従来方式のプレキャスト樋門

従来のプレキャスト樋門は図-5に示すように函体ブロックの函軸方向に緊張材を配置、ブロックの接合部を剛構造とし、スパン間に継手を設置して、継手によってたわみ性を得るものであった。

弾性接合方式のプレキャスト樋門

プレキャスト函体の各接合部にCRゴム(クロロブレン

ゴム)等の弾性体を挟み、本体縦断方向にPC鋼材等の緊張材によって緊張力を導入し、接合部の弾性変形機能と止水機能を確保するもので、一般に継手を要しないで高い函軸たわみ性を確保できる構造である。本方式では接合部1箇所あたりのせん断変形は小さいが多数のブロック接合部のせん断変形と、僅かな曲げ変形により、そしてそれらを重畳することで周辺地盤の沈下・変位モードにより近い樋門本体の沈下・変位モードが得られる。また、高価な可とう継手を要しないため、大幅なコスト縮減効果も期待できる。

本方式の施工時、最も留意する点は設計緊張力を緊張材に導入してCRゴムを必要量圧縮することである。そこで、実証工事においては緊張材に導入するプレストレス力およびCRゴムの圧縮量を管理項目とし、基準値を設け施工し、所定の緊張力、ゴム圧縮量を実現することができた。また、必要緊張力を確実に導入するためには緊張時の函体底面に作用する摩擦力を低減する必要があり、すでに実施された3件の実証工事では「鋼製プレート+グリース方式」「アウトリガー方式」「特殊ポリエチレンシート方式」とそれ

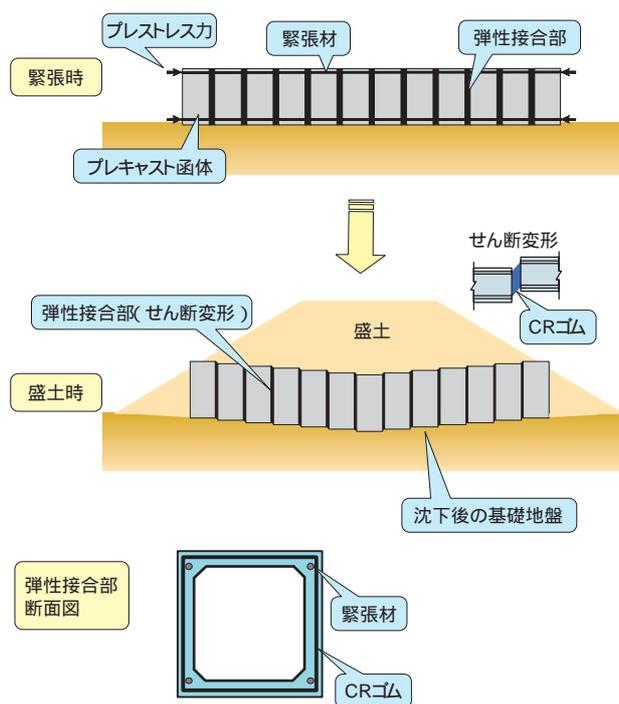


図-9 弾性接合方式のプレキャスト樋門



写真-3 弾性接合方式の接合部

それぞれ異なる摩擦低減処理を行うことにより、摩擦係数として $f < 0.1$ を達成した。

(3) 弾性接合方式のまとめ

- ・実証工事で得られたデータでは函体の沈下分布は滑らかな形状となっており、周辺地盤の沈下分布に追随していると考えられ、局所的な応力集中は見られない。
- ・長スパンの函体を一括緊張する場合、底面摩擦力により緊張力が中央付近に設置された函体まで十分に伝達せず、函体間に挟んだCRゴムが十分に圧縮されずに止水性に課題が発生することが懸念されていた。しかし、実証工事で最大約26mまで一度に緊張することができ、底面摩擦力も摩擦低減処理により低く抑えることが確認できており、これにより、さらに長スパンにおいても一括緊張が可能であると考えられ、緊張の工程は大幅に簡素化、短縮化が期待できる。
- ・実績が少なく設計法が確立されていないことから、実証工事で得られたデータをフィードバックし、設計法の妥当性を確認する必要がある。

おわりに

平成10年に(財)国土技術研究センターが発刊した「柔構造樋門設計の手引き」は5年余が経過し、“剛構造か

ら柔構造へ”と転換するための技術手引き書としての役割を担い、評価されているところである。

その一方で手引きが実際に活用され、現場施工を通じ明らかになったいくつかの設計・施工上の課題等について新たな知見を補足、追加する必要がある。

今までの検討を踏まえ、技術の進展に伴う現段階での主な課題を整理すると以下の通りである。

- ・地盤の側方変位分布の簡易算出方法の確立
- ・実データ検証による即時沈下分布および側方変位分布算出法の妥当性確認
- ・現在、一律に定められている残留沈下量の許容値の検討(諸条件によるフレキシブルな運用)
- ・パイロット工事の各種データを踏まえた弾性接合方式のプレキャスト樋門の設計法の妥当性検討
- ・大断面・大函長のプレキャスト樋門における弾性接合方式の検証
- ・樋門を構成する門柱等他の部位・部材のプレキャスト化に向けての検討

今後これらの課題の検討を進め、現場技術者の設計・施工支援のための技術資料として取りまとめる必要がある。

参考文献

- 1)(財)国土開発技術研究センター、1998年11月、「柔構造樋門設計の手引き」