

# 新しい構造の技術開発に必要なこと

春日 昭夫\*

## 1. 新しい技術

新しい技術を開発するインセンティブは何であろうか。

建設業界においては、「コスト縮減」、「工期短縮」、「品質向上」、「市場の拡大・開拓」、「環境保全」、「材料の高性能化」などが新しい技術のキーワードになろう。いずれにせよ、新技術にいたる理由や何を克服したかったのか、という明確な動機があると思われる。

筆者もこれまでいくつかの技術開発に携わってきたが、そのなかでもオリジナリティーのある構造をいくつか紹介したい。エンジニアなら誰でも、人がやったことがないものについては強烈なインセンティブが働くものである。しかし、開発したあと会社としてきちんと商品化されているか、となると一段とハードルが高くなる。ここでは、なぜその構造にいたったか、何を克服したかったのかを中心に、新しい技術開発の必要条件を整理していきたいと思う。

## 2. バタフライウェブ橋

### 2.1 開発の経緯

鋼板ウェブとコンクリート床版を組み合わせた合成構造は1983年のフェルテサントーバン橋で開発されたが、コンクリートのクリープによりプレストレス力が鋼板に流れ効率が悪いため、波形ウェブ橋や複合トラス橋が生まれた。

とくに波形ウェブ橋は日本独自の発想であったが、国内で普及せずに逆輸入するかたちとなって実績は100橋を超える。波形ウェブ橋はコンクリート床版との接合部が橋軸方向にわたるために、その接合のディテールは簡素化できるが、鋼材の折り曲げや溶接、現場での波形鋼板どうしの接合などの費用が発生する。一方、複合トラス橋はコンクリートとの接合部が点となるため、支間の長大化にしたがってその軸力が大きくなり、ディテールが複雑になる。しかし、座屈に関しては従来の理論が使える、波形ウェブ橋のように多くの座屈実験をすることなく設計が可能である。

筆者は幸い両方の構造形式の開発に携わる機会を得た。

そして、それぞれの欠点を克服できる新しい複合構造はないものかと考えるようになった。開発目標は、①波形ウェブ橋のように接合部が橋軸方向にわたるもの、②複合トラス橋のように鋼材どうしの接合がなくプレキャストセグメント工法にも適用可能である、というそれぞれの利点を兼ね備えた構造である。そして、鋼部材の加工をできるかぎりなくすということにも重点を置いた。技術開発のキーワードは、「コスト縮減」と「市場の拡大・開拓」である。後者は、この構造が鋼橋に優位性がある40～60mの支間長をターゲットにしているからである。

その結果が図-1に示すバタフライウェブ橋である。これは、ダブルワーレントラスの線材を面材に置換したトラス構造からの派生である(図-2)。ダブルワーレントラスを選んだ理由は、引張り材が支持点となるために一次の座屈モードは現れず、逆対称の2次モードが卓越して座屈耐力が増加すると考えたからである。そして、鋼管などのダブルワーレントラスは交点の加工が複雑になるが、鋼板で

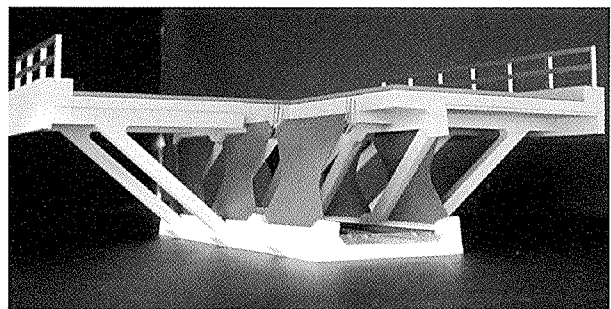


図-1 バタフライウェブ橋

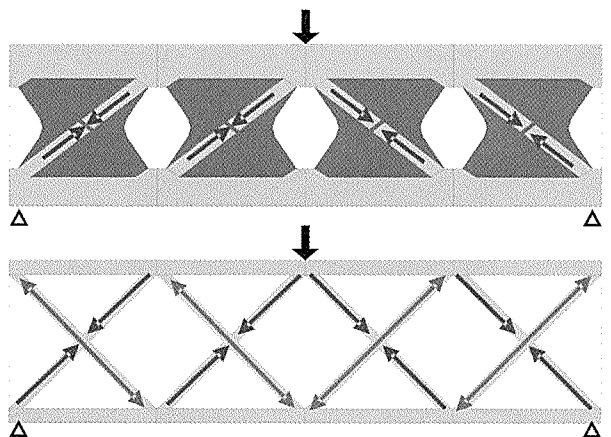
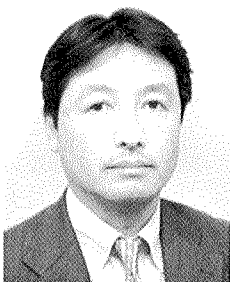


図-2 バタフライウェブの構造特性



\* Akio KASUGA

三井住友建設(株) 土木管理本部  
PC設計部長

あれば蝶形に切断するだけで問題にならない。さらには、コンクリート床版との接合を孔あき鋼板ジベルにすれば鋼板の加工は切断するだけですみ、極端に製作費用を削減することが可能になる。残った課題は、圧縮方向の領域の座屈をどうやって制御するかということであった。従来の鋼構造であれば座屈に対してスティフナーを取り付けるが、溶接をして疲労による課題を残したくなかったため、スタッドを打ってコンクリートの補剛材を合成することにした。

これで、バタフライウェブの耐力と破壊モードを実験で確かめれば、座屈と疲労をクリアした複合構造が実現することになる。

### 2.2 縮小モデルによる実験<sup>2), 3)</sup>

バタフライウェブ橋の破壊モードを検証するために、図-3に示す要素モデル(縮尺1/2)と図-4に示す梁モデル(縮尺1/3)を用いた。前者がバタフライウェブの耐力を、後者がプレキャストセグメント工法を想定したコンクリート上下床版の耐力を見るためのものである。要素モデルによる実験から、図-5に示すようにコンクリートの補剛の有無にかかわらず、非線形FEMにより耐力を予測することが可能であることがわかった。また、梁モデルからは、図-6のように文献<sup>4)</sup>によるせん断伝達耐力が精度よく最大荷重を予測できることも判明した。バタフライウェブの耐力力はくびれた部分の幅と板厚、補剛コンクリートの圧

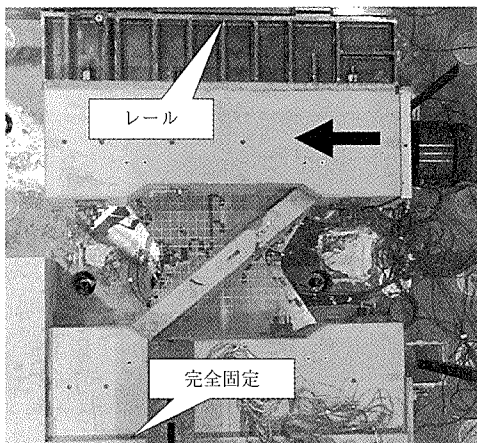


図-3 要素モデル供試体

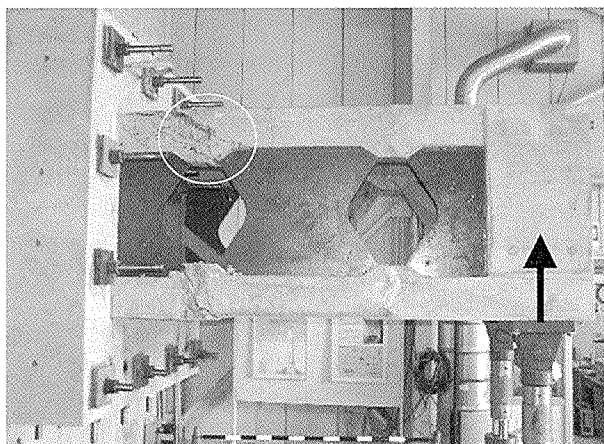


図-4 梁モデル供試体

縮強度を用いて簡単に計算することができる。実際の設計においては、それぞれの部位の強度に対してどの程度の安全を見込むかが重要であるが、たとえばバタフライウェブの板厚は、コンクリートの補剛効果を考慮しないで鋼板だけでせん断に抵抗すると考えた場合2倍近い余裕がある。これはそれほどのコストアップにもならず、ウェブが十分な安全性をもった構造とすることができる。

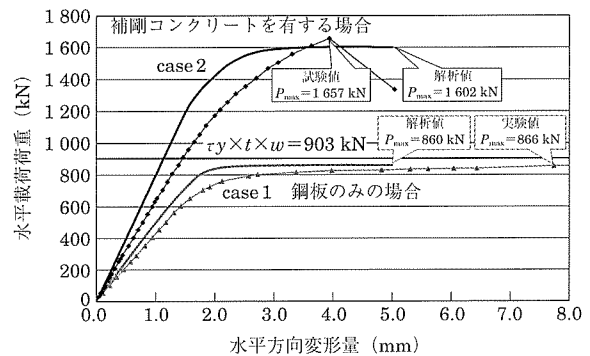


図-5 要素モデルにおける荷重—水平変位の関係

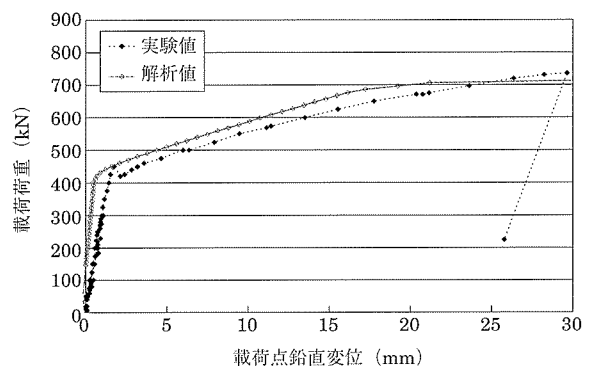


図-6 梁モデルにおける荷重—鉛直変位の関係

### 2.3 実構造物への適用に向けて

バタフライウェブの耐力力が簡単な式で求められることがわかったので、その形状、つまり高さやくびれた部分の幅、板厚によって適用範囲がないのかどうかを探るのが次のステップである。これには非線形FEMによるパラメータ解析を実施した。結果は別の稿に譲るが、簡易式の適用範囲は確かに存在する。

以上の実験や解析は示方書でカバーしきれない部分を補足し、実構造物に適用しても従来の構造物と同等の性能を発揮できると考える。できるかぎり鋼板の加工工程を減らすために、鋼板はコンクリートに埋め込むことを基本としているが、この接合部の耐久性については波形ウェブ橋で既往の研究がある<sup>9)</sup>。また、その他の方策としてはステンレス鋼板でカバーされたクラッド鋼板を使用することも可能である。

バタフライウェブに鋼板を使用した場合、溶接をしない一枚物で運搬できる大きさの制限から、桁橋の場合は最大支間長が65 mほどになる。そして、鋼板以外にもコンクリートを用いることもできる。この場合は超高強度繊維補

強コンクリート (UFC) が最適である。引張り領域にはプレストレスを導入して耐力を向上させる。コンクリート製であれば、分割して現場でプレストレス力により一体化することができるので、鋼板を用いた場合よりもバタフライウェブの形状が大きくでき、適用支間長を長くすることが可能である。また、鋼板に比べて耐久性の課題も解消する。

図 - 7 に鋼板の場合と同じ形状の UFC を用いた要素試験結果を示す。破壊モードの予想はくびれた部分のせん断破壊であったが、試験結果は圧縮領域の接合部近傍が圧壊して引張り領域が破断するモードであった。UFC は圧縮強度の大きさに比べてせん断強度はそれほど高くない。したがって UFC は面材よりもトラスなどの線材に用いた方が利点を活かせるので、バタフライウェブはまさに UFC の利点を最大限に使った構造であることがわかった。これはこの構造がトラスからの派生であることを考えると納得がいく。

バタフライウェブ橋は、鋼板とコンクリートのどちらにも適用できることで可能性を広げた。そしてコンクリート製のバタフライウェブは、超高強度という「材料の高機能化」がなければ実現性が低かったであろう。ちなみにコスト比較はいずれの材料もそれほど差異がない。

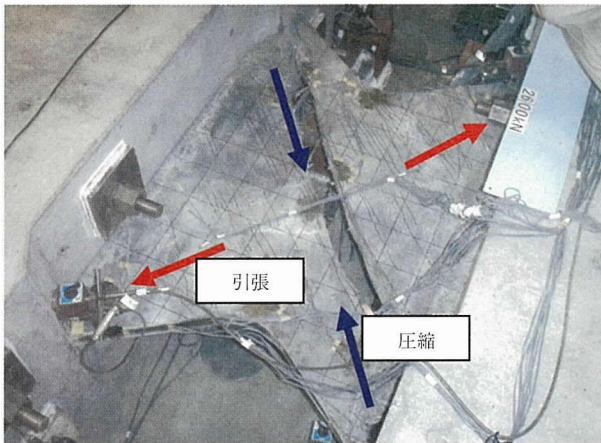


図 - 7 UFC 要素モデルの破壊状況

### 3. P & PH 橋脚

#### 3.1 開発の経緯

コンクリート橋脚のほとんどは鉄筋コンクリート (RC) 構造である。これは、橋脚には粘りのある鉄筋を用いて、エネルギー吸収能がありじん性に富んだ構造が好ましいと考えられているからである。その一方で、橋脚にプレストレスを導入してエネルギー吸収能を犠牲にする代わりに、残留変位を小さくする構造も提案されている<sup>6)</sup>。建築でも、今までのじん性設計と異なる、プレストレスを柱に導入した新しいコンセプトの設計法が提案されている<sup>7)</sup>。これは残留変位を小さくすることで地震後の復旧性を容易にし、補修費 / 再構築費で表される PML (Probable Maximum Loss, 予想最大損失率) を抑えて、建物の資産価値を高めようとするを意図している。

このように、従来の RC 構造に加え PC 構造を橋脚に用いようとする流れのなかで、公共性の高い橋梁の復旧性を重視した構造を開発しようと考えた。地震後の復旧費用まで考えた LCC についてはこれからの議論に期待するところが大きい。残留変位を極力小さくして、損傷させる部材を特定し、そこを交換するだけで元の性能を復旧させる新しい構造を実現するという目標を掲げた。こうすることによって、地震後まで考慮した LCC も最小化できると考えたのである。この構造の技術的キーワードは、「工期短縮」、「品質確保」、「市場の拡大・開拓」である。とくに、急速施工が要求される都市内の立体交差などがターゲットになる。

その結果が図 - 8 に示す P&PH 橋脚 (Precast Prestressed Hybrid Pier) である。まず、残留変位を小さくするには必然的に PC 構造の橋脚とする必要がある。そして、今までのように鉄筋が連続していたのでは、この鉄筋が損傷した場合は従来の構造と同じ性能になる。したがって、鉄筋を連続させないプレキャストセグメント工法とし、軽量化を図りプレストレス力が有効に作用するように、鋼板を内側に合成した複合構造を採用した。特徴としては以下のようなことがあげられる。

- ① プレストレス力は鋼板にのみ導入する。
- ② 鋼板どうしの接合はメタルタッチとし現場で溶接しない。
- ③ コンクリート部の目地は無収縮モルタルを注入し圧縮側は複合構造とする。
- ④ 鋼板の接合位置につなぎ材を配置し地震後はこれを交換して性能を復元する。
- ⑤ せん断は鋼板に設けたせん断キーで抵抗させる。

鋼板に作用する応力は圧縮側だけで、RC 橋脚の鉄筋のように正負交番応力を受けないため座屈することがない。

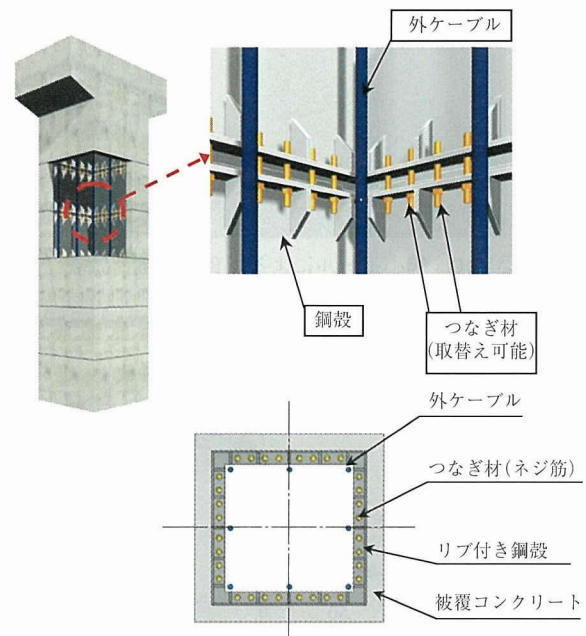


図 - 8 P & PH 橋脚

また、図 - 9 に示す概念図のように、プレストレス力とつなぎ材の量によって性能を自由に設定することができる。

### 3.2 縮小モデルによる実験<sup>8)</sup>

P&PH 構造の挙動と復元性を検証するために、1/4 の縮小モデルを使った正負交番載荷試験をおこなった (図 - 10)。つなぎ材が想定した地震時損傷のひずみに達したあと、これを交換し 2 回目の正負交番載荷をおこなった結果、1 回目の性能とほとんど変わらないことが確認できた。図 - 11 に示す履歴ループは、残留変位が小さい PC 構造特有の復元性が現れている。また、接合面の目開きは最下段部に集中し、挙動はその上の部分が剛体として回転するロッキ

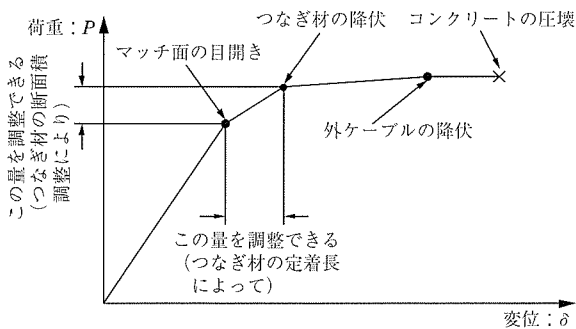


図 - 9 P&PH 橋脚の P - δ 概念図

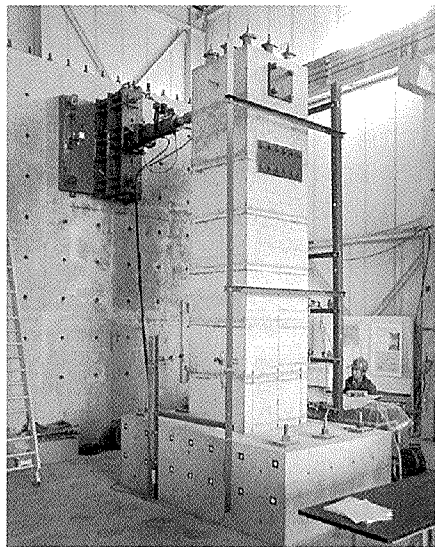


図 - 10 縮小モデルによる正負交番載荷試験

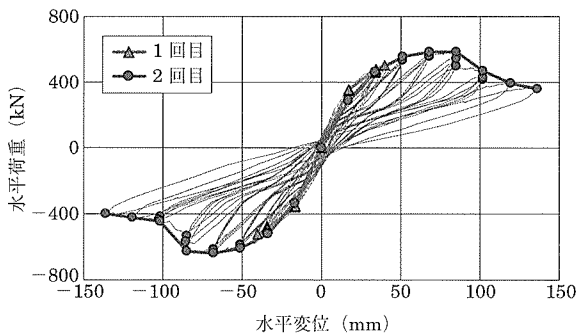


図 - 11 履歴ループ

ングである。

P&PH 橋脚は今までの RC 橋脚とまったく異なる思想の構造である。したがって RC 橋脚と同等の安全性をどうやって担保するか、鋼板、つなぎ材、外ケーブル、コンクリートといった材料をどのように組合せて最適の構造を構築するかが課題である。

### 3.3 実構造物への適用に向けて

P & PH 橋脚はつなぎ材を用いて仮止めすることで、高さ 15 m 程度のものであれば 1 ~ 2 日で架設できる。そのあと外ケーブルの緊張、コンクリートの間詰めをおこなって完了する。そして、間詰めを内側から施工できるようにすることで外側に足場が一切不要になる。セグメントは工場製作なので、運搬上の形状の制限がある。したがって高橋脚になると複数個の P&PH セグメントを組合せたマルチセル形式とする必要がある (図 - 12)。P & PH 橋脚の技術は、平成 17 年度の独立行政法人 土木研究所の共同研究テーマである「耐震性にすぐれたプレキャストコンクリート橋脚構造に関する研究」に応募し、現在設計、施工マニュアルを作成中である。また、マルチセル方式の正負交番載荷実験も予定している。

この新しい技術は柱部材であれば何にでも適用可能であり、たとえば、風力発電のタワーやコア構造をもった塔状建築物のコアにも使用できると考えられる。

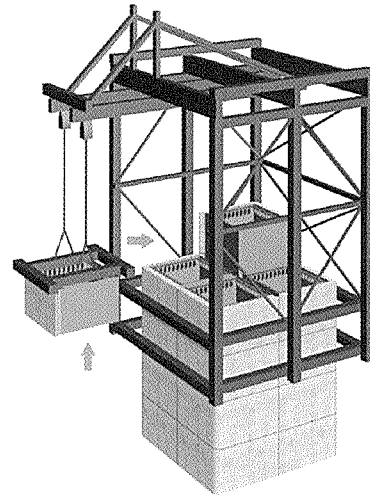


図 - 12 マルチセル形式

## 4. プレキャストベル形タンク

### 4.1 開発の経緯

上水道のタンクは、壁と屋根から構成される。そして施工は、壁をまず構築して屋根を施工するという、段取りがまったく違う二種類の工種が存在する。とくに、屋根は水圧がかからないため自重に耐えるだけの薄い部材であるが、エアドーム工法やアルミ屋根などがあることからわかるように、施工で一番苦勞する部分である。一方、壁は構造的には軸対称のシェル構造で水圧に抵抗するが、壁の付け根の大きな曲げモーメントに対して、鉛直方向と水平方向の

プレストレス力で抵抗する。つまり部材の厚さがこれらの取り合いで決定されることになる。これらの課題を解決するために掲げた目標は、①一度の施工で壁と屋根が造れないか、②部材厚さを応力で決まるようにできないか、ということであった。技術開発のキーワードでいえば、「工期短縮」と「品質確保」である。

その結論が、鉛直方向に分割したプレキャスト部材を組合せた釣鐘形の形状で、プレストレスを外ケーブルとして部材の外に配置し、そのための鉛直リブを有したベル形タンクであった（図 - 13）。そして、このリブは水圧による鉛直方向の曲げにも抵抗するので、鉛直方向を RC 構造とすることができるという利点も有する。また、外ケーブルであるため、プレストレス力の摩擦損失が少なく、従来の構造に比べて定着箇所数を低減できる。まさにプレストレスの原理にたとえられる樽のたがである。ベル形タンクは従来のプレキャストタンクと比べて屋根の構築がないため、さらに 1 箇月の工期短縮を図ることができる。しかしながら、プレキャスト部材を工場などで製作して現地へ搬入するために、自ずとその大きさが制限される。したがってこの新しい構造のターゲットは、最大でも 2 000 m<sup>3</sup> クラスということになる。

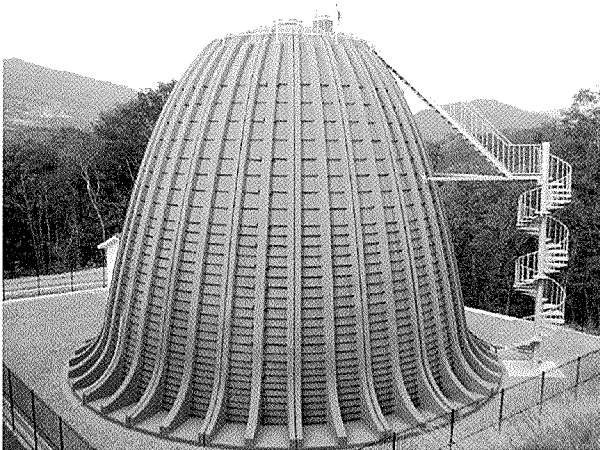


図 - 13 プレキャストベル形タンク

#### 4.2 構造検討<sup>9)</sup>と適用事例<sup>10)</sup>

ベル形タンクの解析は FEM によりおこなう。水平方向はプレキャストであるために、つねにフルプレストレスとなるように PC 鋼材を配置する。鉛直方向は、もっとも厳しい満水時にリブに 1.0 N/mm<sup>2</sup> 程度の引張が発生するが、ひび割れ発生限界以内である。

水平方向のプレストレスは、内ケーブルであれば 120°ごとに定着するが、外ケーブルの場合同程度のプレストレスを得るためには 180°で定着すればよい。したがって、アンカー数を 2/3 に低減できる。

プレキャストベル形タンクの適用事例は、図 - 13 に示す有効容量 1 130 m<sup>3</sup> の禁配水池である。最大内径は 14 m、頂上高さは 13.2 m で、側面形状が 3 次放物線になっている。20 分割されたプレキャスト部材は、長さが 15 m、重量が 17 t になる。リブが配置されているとはいえ非常にフレキ

シブルな部材であるため、製作時、架設時の取扱いには十分な補剛をおこない、ストック時に変形が生じないように工夫が必要であった。

#### 4.3 今後の展開

プレキャストベル形タンクは、壁と屋根を一体化しているために従来の形状に比べて高さが高くなる。しかし、液体の固有周期が短くなるために地震時のスロッシングが小さくなる。また、PC 鋼材がすべて外ケーブルであるために維持管理が容易である。国内はまだ 1 000 m<sup>3</sup> ~ 2 000 m<sup>3</sup> の小型のタンクの需要が多い。プレキャスト部材の搬入路と工期短縮という条件がそろえば競争力のある技術である。

今後この技術の展開として、ベル形を上下に結合して卵形消化槽とすることを検討している（図 - 14）。ターゲットは RC 消化槽が優位にある小型の消化槽である。従来のように剛体で支持するのではなく、消化槽をフレームで支持することによりシェルに大きな面外応力を発生させない。タンクと同様、鉛直方向は RC 構造であるために従来の卵形消化槽と比べると PC 鋼材量は半分になる。RC 消化槽と比べた場合も、初期コストは高いが保温性能の差によるランニングコストを考えると約 10 年でトータルコストが逆転する。

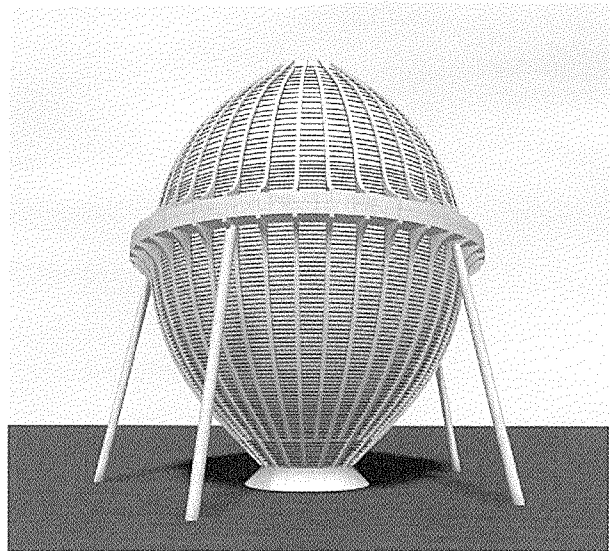


図 - 14 卵形消化槽への適用

## 5. 新しい技術の開発に必要なこと

ここに述べてきたように、新しい構造の技術開発はその動機と、何を克服したいのかということを確認して開発目標を掲げることから始まる。当然途中で進路変更を余儀なくされる事態もあろうが、技術的なキーワードがはっきりしていればその効果や商品の価値を説明することはいつでも可能である。また、拡大解釈しがちな新技術のターゲットをまず絞り込むことで、実用化へのハードルを少しでも低くすることができる。そして、そのステップがクリアされれば次のステップへ、というように常に適用拡大の青写真を描いておくことも重要である。

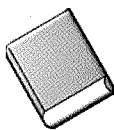
バタフライウェブ橋は、鋼橋の競争力が勝っている 40～60 m 支間の橋梁を、P&PH 橋脚は急速施工が要求される都市内立体交差を、ベル形タンクは 2 000 m<sup>3</sup> までの比較的小型なものをそれぞれ最初のターゲットとしており、トータルコストの縮減や工期短縮などの付加価値を創造する技術である。

新しい構造を橋梁に適用する場合は、供用限界状態のみならず終局限界状態の破壊モードまで検証しないと設計が完結しないことが多い。そして、道路橋示方書などで設計できないときは、示方書と同じレベルの安全性、耐久性を保証する設計思想をしっかりと組み立てておかなければならない。最終的には設計思想の検証には模型による破壊実験が必要になり、これにはコストと時間がかかる。しかし、ここまでのプロセスを経て初めて第三者機関による認証の材料がそろふことになる。あるいは、ここまでのプロセス自体がどこかの事業主体や大学との共同研究になることもあるであろう。最初にあげた技術開発のキーワードをもとに、克服すべき課題を見つけて創造力を働かせる。これには設計、施工、材料などの幅広い知識はもとより、エンジニアとしての勘を養う必要があるのではないだろうか。これから、日本からの新しい構造の発信に微力ながら貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 島田, リップルウェブ Girder による鋼板のせん断試験, 土木学会論文集, No.124, pp.1 - 10, 1965
- 2) 片, 高木, 中積, 春日, 新しいウェブ形式を有する複合橋に関する研究, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.413 - 416, 2004
- 3) 片, 高木, 中積, 春日, 新しいウェブ形式を有する複合橋の接合部に関する研究, 第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.527-530, 2006
- 4) 土木学会, コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 2004
- 5) 小野, 大城, 桜田, 大浦, 波形鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の耐久性の検討, コンクリート工学, Vol.44, pp.23 - 29, 2006.8
- 6) (社)プレストレストコンクリート技術協会, プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン, 平成 11 年 11 月
- 7) 西山, 付着制御とプレストレスによる損傷制御設計の可能性, 橋梁と基礎, pp.120 - 123, 2006.8
- 8) 鈴鹿, 浅井, 平, 春日, プレキャスト PC 複合橋脚に関する基礎的研究, 第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.445 - 448, 2006
- 9) 中積, 春日, 佐々木, 石井, プレキャストベル形タンクの開発, 第 12 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.637 - 640, 2003
- 10) 中積, 十亀, 大木, プレキャストベル形タンクの設計と施工一帯配水池一, 第 15 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.65-68, 2006

【2007 年 2 月 26 日受付】



新刊図書案内

PC技術規準シリーズ

## 複合橋設計施工規準

頒布価格：会員特価 6 000 円（送料 500 円）

：非会員価格 6 825 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版