(16) 突起付きPCウェルと鋼製橋脚の接合部の 耐荷性状に関する実験的研究

奥村 学1・寺澤 正人2・大久保 宣人3・津川 優司4・豊田 幸司5・山根 章6

¹正会員 片山ストラテック株式会社 橋梁本部 技術部門 技術課 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21) E-mail:okumura@katayama-st.co.jp

²正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地) E-mail: Masato_Terazawa@tobishima.co.jp

³正会員 片山ストラテック株式会社 橋梁本部 技術部門 技術課 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21) E-mail:okubo@katayama-st.co.jp

⁴正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地) E-mail: Yuji_Tsugawa@tobishima.co.jp

⁵正会員 復建調査設計株式会社 構造部門 大阪支社 設計室 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-4-13) E-mail: toyota@fukken.co.jp

6正会員 復建調査設計株式会社 構造部門 大阪支社 設計室(〒532-0004大阪市淀川区西宮原1-4-13) E-mail: a-yamane@fukken.co.jp

交通量の増大による幹線道路の渋滞は、大きな経済損失を招くばかりではなく、周辺環境への負荷も大きいなど問題となる.著者らは、立体交差化急速施工法の新工法として「すっきり工法」を開発した.

「すっきり工法」は、PCウェル杭基礎と鋼製橋脚の接合部において、突起付きPCウェルによる新しい 接合構造を採用している.この接合構造は、従来のアンカーフレームを有する接合構造のように、頂版コ ンクリートの打込み後、コンクリートの強度発現のための養生期間を待たずに、鋼製橋脚の据付けが可能 である.

本研究では、突起付きPCウェルを有する接合部の力学的特性の把握と安全性を確認するため、架設系と 完成系の2種類の実験供試体を用いて載荷実験を実施し、3次元非線形FEM解析により実験結果を検証 した.

Key Words : overpass bridge, PC Well with bracket, connection between PC Well and Steel pier, load carrying behavior, loading test,

1. はじめに

交通量の増大による幹線道路の渋滞は、大きな経済損 失を招くばかりではなく、周辺環境への負荷も大きいな ど問題となっている.立体交差化による交通渋滞の解消 が各地で計画され、立体交差化工事の施工中における交 通渋滞の緩和や周辺環境への影響を低減した立体交差化 急速施工法の開発が進められている¹⁰.著者らは、立体 交差化急速施工法として「すっきり工法」を開発した.

「すっきり工法」は、PCウェル杭基礎と鋼製橋脚の 接合構造に特徴があり、最頂部のPCウェルに突起付き PCウェルを採用している.従来のアンカーフレームを 有する接合構造では、鋼製橋脚を据付けるには、頂版コ ンクリートの打込み後、コンクリートの強度発現のため の養生期間を待つ必要があった.一方、「すっきり工 法」では、PCウェル杭基礎の施工後、直ちに鋼製橋脚 の据付けが可能となり,現場工程の短縮を図っている. 突起付きPCウェルピースを写真-1に示す.また,試設 計を実施した7径間連続鋼床版箱桁橋の立体交差想定橋 梁を図-1に示し,突起付きPCウェルを有する接合部の構 造概要を図-2に示す.



写真-1 突起付き PC ウェルピース



図-1 立体交差想定橋梁(7径間連続鋼床版箱桁橋)



図-2 接合部の構造概要

この接合構造は、PCウェル杭基礎の最頂部のPCウェ ルにコンクリート突起を設け、鋼製橋脚を四隅のアンカ ーボルトで定着し、鋼製橋脚の据付後に、頂版コンクリ ートの打込みを行い、鋼製橋脚とPCウェル杭基礎を全 てのアンカーボルトで定着している.

本研究では、突起付きPCウェルと鋼製橋脚の接合部 の力学的特性を把握するとともに、架設時と供用下での 安全性を確認するため、架設系と完成系の2種類の実験 供試体を用いて、載荷実験および実験供試体の3次元非 線形FEM解析を実施した.

2. 載荷実験

PCウェルと鋼製橋脚の接合部は、上部構造から鋼製橋 脚に作用する断面力をPCウェル杭基礎に伝達する重要な 部材である.架設系においては、頂版コンクリート打込 み前の突起が十分な耐力を有することが要求される.完 成系においては、基礎部材の一部として地中に埋設され ることから、地震による損傷を受けた場合の点検や補修 が困難であるため、接合部を構成する各部材はレベル2 地震時においても塑性変形しないことが要求される。



図-3 実験方法

そこで、突起付きPCウェルと鋼製橋脚の接合部の力学 的特性を把握するとともに、架設時と供用下での安全性 を確認するため、架設系と完成系の2種類の実験供試体 を用いて載荷実験を実施した.

(1) 実験方法

載荷実験は、大阪工業大学八幡工学実験場にて実施し、 鉛直方向ジャッキ(容量:2MN)で上下部工の死荷重に 相当する荷重を載荷した状態で、水平ジャッキ(容量: 2MN)により温度荷重または地震による慣性力に相当す る水平荷重を載荷する.実験方法を図3に示す. 実験供試体は、立体交差化橋梁のPCウェル杭基礎と鋼 製橋脚の接合部を部分的に取り出し、図-4に示すような 架設系モデルと完成系モデルの2種類を製作した.実験 供試体の規模は、実験装置の能力および製作性を考慮し て縮尺1/4とした.

架設系モデルは、PCウェル杭基礎を施工した後、鋼製 橋脚を据付けた状態である.PCウェルの頂版コンクリー トが無い状態であり、PCウェルと鋼製橋脚は突起部のア ンカーボルト8本で定着された供試体である.

完成系モデルは、鋼上部工を架設した後、PCウェルの 頂版コンクリート施工が完了した状態であり、PCウェル と鋼製橋脚は突起部および突起外のアンカーボルト20 本で定着された供試体である.

実施工では、架設系において鋼桁および鋼製橋脚の死 荷重に対して、突起部のアンカーボルト8本のみで支持 するため、頂版コンクリートの硬化後となる完成系にお いて、突起部のアンカーボルトと突起外のアンカーボル トで応力状態に差異が生じる.しかし、今回の載荷実験 では、完成系モデルにおけるアンカーボルトの応力状態 の差異はモデル化していない.

主な計測項目は、鋼製橋脚に関しては鋼製橋脚の水平 変位とアンカーボルトの鉛直方向歪みを計測し、PCウェ ルに関してはPCウェル躯体の水平変位、PC鋼棒の鉛直方 向歪み、コンクリート歪み(鉛直方向・円周方向・3軸 方向)および鉄筋の円周方向歪みを計測した.



図-4 実験供試体(架設系・完成系モデル)

(2) 実験供試体の設計方針^{2),3)}

実験供試体の設計は,接合部の耐荷力に着目した載荷 実験であるため,接合部材を許容応力度法で設計して, 鋼製橋脚に関しては相対的に強度を高めて,接合部以上 の耐力を有するように設計した.

架設系モデルは、想定する常時荷重(D+T)および レベル1地震時荷重(D+EQ)に対して、アンカーボル ト、PCウェルおよび突起に作用する応力度を許容応力度 以下とする.ただし、架設系モデルの温度荷重Tは、急 速施工法の短い施工期間を考慮して、標準温度を20℃と して±20℃まで変化するものと仮定した.突起付きPCウ ェルの突起部のアンカーボルトは、エポキシ樹脂系接着 剤でコンクリートと定着させ、アンカーボルトの突起部 の埋込み長は、エポキシ樹脂とコンクリートの許容付着 強度より決定した.

完成系モデルは、想定する常時荷重(D+L+T)およびレベル1地震時荷重(D+EQ)に対して、アンカーボルト、PCウェルおよび突起に作用する応力度を許容応力度以下とする.ただし、完成系モデルの温度荷重Tは、架設時の施工性を考慮して、標準温度から±40℃まで変化するものと仮定した.

実験供試体に使用した材料の設計仕様と材料試験結果 を表-1に示す.

表-1 実験供試体の材料仕様 (a) 鋼材の材料仕様

項目	呼び径	材質	設計仕様 σ _{sy} (N/mm ²)	材料試験結果 σ sy (N/mm ²)
アンカーボルト (接合部)	D38	SD345 (異形鉄筋)	345	368.0
PC 鋼棒 (PC ウェル)	$\phi 23$	C種1号 SBPR1080/1230	1080	1174.4
異形鉄筋 (PC ウェル)	D13	SD345 (異形鉄筋)	345	375.7

(b) コンクリートの材料仕様

項目	設計仕様	材料試験結果 σ _{ck} (N/mm ²)		
	σ_{ck} (N/mm ²)	架設系モデル	完成系モデル	
PC ウェル	40	65.9	71.6	
コンクリート	40	05.2	71.0	
頂 版	40	_	ECO	
コンクリート	40		00.0	

(3) 架設系モデルの実験結果

架設系モデルの荷重-変位曲線を図-5に示す.

まず,正方向の水平載荷では,圧縮側のアンカーボル トが圧縮降伏する(水平荷重=215.4kN)付近で荷重-変位の関係に変局点を見られた.その後,引張側のアン カーボルトが引張降伏する(水平荷重=255.8kN)まで載 荷したが,コンクリート突起の破壊が認められなかった.

次に、水平荷重を除荷して、負方向の水平載荷を行った。荷重-変位の関係は、正方向載荷とほぼ同等のものであったが、水平荷重が-251.4kNに到達した時点で、 引張側のコンクリート突起がせん断破壊した。その際、 PCウェル本体には損傷がほとんど認められなかった。



図-7 荷重-変位曲線 (完成系モデル)

架設系モデルのPCウェルひび割れ状況図を図-6に示す. 突起部のひび割れの発生および伸展状況は、載荷中に正 確に把握することは困難であったが、突起表面に設置し たコンクリート3軸歪みゲージの計測値より推察するこ とが可能である. そこで, 主引張応力がコンクリートの 実引張強度4.5N/mm²を超えた時点でひび割れが発生した と仮定すると、正方向載荷時に圧縮側となる突起Aの腹 部にせん断ひひ割れ(1)2)が発生し、負方向載荷時(この 場合には突起Aは引張側となる)にひび割れ③が発生し た後に、ひび割れ④が発生したものと推察される. さら に、主引張応力のうちひび割れ③に関連する主引張応力 の負方向載荷における引張応力の増加は急激なものであ った.これは、せん断ひび割れ(斜めひび割れ)が突起 前面から付け根位置上面に向けて進展し、せん断破壊の 破壊面が突起全長に渡って形成されたことを示している. これらより突起の破壊を決定づけたひび割れは、ひび割 れ③であると判断される.

PCウェル本体には、水平荷重載荷時に作用する鉛直力 により円周方向引張応力が作用し、鉛直方向ひひ割れが 発生した. 突起付きPCウェルは、突起部に均等な軸力が 作用しないため、突起部がPCウェル本体に対してねじれ るような挙動を示し、それに伴い引張応力が付加されて



図-8 PC ウェルひび割れ状況図 (完成系モデル)

突起付きPCウェルのコンクリート側面にひび割れが多数 発生したものと推察される.ただし、突起付きPCウェル の円周方向鉄筋(帯筋)の計測値は、60N/mm²程度と低 いものであり、発生ひび割れ幅も最大で0.1mm程度と比 較的小さいものであった.

架設時に作用する想定荷重としては,死荷重(D)と 温度荷重(T:温度変化±20℃)を考えており,その想 定設計荷重は54.9kNである.終局耐力は,この想定設計 荷重に対して約4.5倍を有しており,架設時におけるコ ンクリート突起は十分な安全性を有していることが確認 できた.

(4) 完成系モデルの実験結果

完成系モデルの荷重-変位曲線とPCウェルひび割れ状 況図をそれぞれ図-7,図-8に示す.

最緑端の引張側アンカーボルトが、実引張降伏ひずみ に到達したと判断される時点での水平変位を基準降伏変 位($\delta y = \pm 18mm$)として、その倍数となる水平変位で 繰返し交番載荷を実施した.なお、水平ジャッキ容量お よび載荷装置の制約より、正方向の水平載荷+5 $\delta y = +$ 90mm、負方向の水平載荷-4 $\delta y = -72mm$ まで載荷した.

最緑端のアンカーボルトが,実引張降伏応力に到達し

たと判断される時点での水平荷重は549kNであり,圧縮 側のコンクリート支圧応力を考慮したRC方式で算出した 実設計降伏荷重502.1kNの1.1倍であった.よって,アン カーボルト引張力は,RC方式によれば実状に即した推定 が可能であると言える.

緑端の引張側アンカーボルトが,実引張降伏応力を越 えた後,荷重の再分配がなされ,順次,より内側にある アンカーボルトが引張降伏応力に到達していった.

その後、 $+5\delta$ y時点ではPCウェル本体の基部に曲げ圧 壊箇所が見られ、PC鋼棒が降伏していることから、PCウ ェル本体の曲げ変形性能は 5δ y程と判断される.

水平荷重が最大となる終局荷重は、載荷装置の制約に より得ることが出来なかったが、+5 δ yの載荷時点にお いて耐荷力が微増であることから判断して、終局荷重に 非常に近い状態であったと推察される.

弾性範囲内(±1δy以下)におけるアンカーボルトお よびPCウェル側面の鉛直歪みの鉛直方向分布と断面方向 分布を図-9に示す。

まず,鉛直方向分布に着目すると,引張側アンカーボ ルトの鉛直歪みは,三角形分布を示しており,アンカー ボルトのほぼ全長にわたって付着応力度が作用している. 圧縮側アンカーボルトは,鋼製橋脚のベースプレート下 のボルトナットを介して,圧縮力が作用している.ただ し,圧縮側アンカーボルトの歪み量は引張側アンカーボ ルトの約40%であり,残りの圧縮力はコンクリート支圧 が受け持っているものと推察される.

を示しており、鋼製橋脚に作用した水平力がアンカーボ ルト、そして頂版コンクリートを介して、PCウェルに確 実に荷重伝達されていることが確認できた.

また, ±18 y以上の塑性域においては, アンカーボル トのネジ部のみが降伏した状態で, 頂版コンクリート埋 込部のアンカーボルトは降伏まで至らず, アンカーボル トと頂版コンクリートの付着応力が十分に作用していた.

次に、断面方向分布に着目すると、許容設計荷重(D +T+L)である水平荷重123kN時点では、鋼製橋脚のベ ースプレートと無収縮モルタルの付着が効いているため、 鋼製橋脚とPCウェルの完全合成が保持されているものと 推察される.許容設計荷重以上が作用すると、ベースプ レートと無収縮モルタルの付着が切れ、RC方式の設計で 想定している状態に移行していることが分かる.

繰返し交番載荷による荷重-変位曲線は、釣鐘型の安 定した繰返し挙動を示しており、突起付きPCウェルの突 起部においても大きな損傷が発生していないことから、 突起付きPCウェルの接合部は、十分な耐荷力や変形性能 を有することが確認できた。

3. 3次元非線形 F E M 解析

突起付きPCウェルを有する接合部の荷重伝達機構を確認し、載荷実験結果に対する解析的検証を目的として、 架設系モデルと完成系モデルの実験供試体を対象とした 3次元非線形FEM解析を実施した.



PCウェル側面の鉛直歪み分布は、順当な曲げ変形挙動



(1) 解析モデル

解析モデルは、構造の対称性と載荷荷重が鉛直方向と 水平方向の2方向であることを考慮して1/2モデルとし た. コンクリート, 無収縮モルタルおよびアンカーボル トはソリッド要素、鋼板はシェル要素、鉄筋とPC鋼棒は 梁要素でモデル化した. コンクリートには分布ひび割れ モデルを適用した.また、鋼製橋脚基部ベースプレート と無収縮モルタルの界面およびPCウェル基部と供試体基 部ベースプレートの界面には、浮上り挙動を再現するた め接触要素を考慮した.水平荷重の載荷方法は、正方向 の一方向とし、変位制御型載荷増分法にて解析した.

(2) 解析結果

架設系モデルと完成系モデルの荷重-変位曲線の解析 結果を図-10に示す.また、架設系モデルの変形図の解 析結果を図-11に示す.実験値と解析値は、架設系モデ ルおよび完成系モデルとも概ね一致している.

架設系モデルの解析では、アンカーボルトとコンクリ ート間の結合に非線形な付着特性を考慮することにより, 破壊点を実験値と整合させることができた.よって、架 設系の破棄性状は、アンカーボルトの付着切れおよび引 抜き力によるコンクリート突起のせん断破壊であると推 察される.

完成系モデルの解析では、PC鋼棒の付着剛性とPCウェ ル基部底面の剥離応力を考慮することにより、荷重一変 位曲線が実験値と整合できた.

また、荷重-変位曲線の他、アンカーボルト応力やPC ウェルのコンクリート応力についても概ね一致しており,

図-11 FEM解析結果(変形図)

本解析モデルにより載荷実験における供試体の変形挙動 を再現できることが確認できた.

4. おわりに

本研究では、突起付きPCウェルと鋼製橋脚の接合部 の力学的特性を把握するため、載荷実験および実験供試 体の3次元非線形FEM解析を実施した.得られた主な 知見を以下に示す.

- (1) 突起付きPCウェルと鋼製橋脚の接合部の載荷実験よ り、架設時および供用下における接合部の力学的特 性や安全性を確認することができた.
- (2) 接合部の3次元非線形FEM解析より、載荷実験に おける供試体の変形挙動および部材レベルでの応力 状態を概ね再現できることが確認できた.

謝辞:本載荷実験の遂行にあたりご指導を頂いた大阪工 業大学 栗田章光 教授ならびに大山 理 准教授に謝意を 表する.

参考文献

- 1) 竹内直文他:特集「進む立体交差化」,土木施工 第48 巻第8号 pp1-83, 2007.
- 2)日本道路協会:道路橋示方書·同解説 II 鋼橋編, 2002.
- 3) PC ウェル工法研究会: PC ウェル工法設計・施工マニュアル -設計編-, 2002.

EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD CARRYING BEHAVIOR OF CONNECTION BETWEEN PC WELL WIHT BRACKET AND STEEL PIER

Manabu OKUMURA, Masato TERAZAWA, Nobuhito OKUBO, Yuji TSUGAWA, Koji TOYOTA and Akira YAMANE

A heavy traffic on trunk road not only suffer economical big loss, but also destroy the environment of around area. Recently, the overpass bridges are constructed in order to reduce the traffic jam the crosssings in urban area. Authors are developing a new quick construction method of a overpass bridges calles "SUKKIRI METHOD BRIDGE".

In this construction method, new connection between PC Well and Steel pier were developed. To investigated the mechanical characteristics and load carrying behavior of this new connection, loading test and FEM analysis were carried out.