

# 論文 経年人孔の耐荷性能と補強効果に関する解析的検討

松尾 豊史\*1・井上 雅弘\*2・丸山 成人\*3

**要旨:** 本研究は、変状と補強を考慮した経年人孔の三次元有限要素解析を実施することにより、車両荷重条件下で、変状が人孔の耐荷性能に及ぼす影響および補強効果を評価したものである。この結果、想定される変状が生じた場合でも、鉛直荷重に対して端壁が有効に抵抗し、設計荷重時までについては耐荷性能が確保されることを示した。また、主な変状と補強方法の組み合わせに対して検討した結果、側壁上端部に初期欠陥を想定した大型人孔に対して、ハンチ部にモルタル打ち増し後、炭素繊維シート接着をした場合に、補強効果は最も高かった。

**キーワード:** 地中送電, 鉄筋コンクリート, 有限要素解析, 炭素繊維シート, 維持管理

## 1. はじめに

地中送電用人孔<sup>1)</sup>(以降、人孔と称する)は、ケーブルの接続部を収納するための設備であり、現場打ちの鉄筋コンクリート製人孔が大きな設置割合を占めている。これらの中には、建設後50年以上が経過した人孔が増加しており、変状に対する耐荷性能の低下が懸念される場合がある。万一、重量トラック通過時などに破壊すれば、ケーブル接続部の断線や公共交通への支障に繋がる可能性がある。変状を有する人孔に対しては、補強材を用いた補強などが実施される場合があるが、必ずしも補強効果は定量的に把握できていないのが現状である。

そこで、本研究では、経年人孔の保守点検における管理基準や補修・補強方法などを検討するための基礎資料とすることを目的として、炭素繊維シート(以降、CFSと称す)により補強を施した経年人孔の有限要素解析を実施することにより、変状を有する人孔の耐荷性能および補強効果を評価することとした。

本論文では、2章において、人孔の強度計算法および変状と補強方法について記述する。3章では、変状と補強を考慮した人孔の三次元有限要素解析の概要を記載する。4章では、人孔の耐荷性能に与える変状の影響を把握する。5章では、変状を有する人孔の耐荷性能に対する補強効果を評価する。

## 2. 経年人孔の現状

### (1) 人孔の強度計算法

人孔の強度計算には、その構造を二次元的にはボックスラーメン構造と見なせること、および計算の簡易性の観点から、たわみ角法などが用いられることが多い<sup>2)</sup>。端壁の影響を間接的に考慮する場合もあるが、通常は端壁や首部などを含めた三次元的な検討は行われない。

昨今、ボックスカルバート構造物の横断面を対象とした二次元有限要素解析手法なども適用されてきているが<sup>3)</sup>、人孔の強度計算に三次元有限要素解析手法を適用した事例は少ない<sup>4)</sup>。

### (2) 人孔の変状

電気協同研究会「地中送電用管路・洞道の保守技術」<sup>5)</sup>によれば、現場打ちの鉄筋コンクリート製人孔では、管路口周辺、首部、躯体部の変状が報告されている。管路口周辺では、管路口のひび割れや漏水に関連する変状が大半を占める。首部では、頂版中央内側などでひび割れが多く観察される。躯体部では、ひび割れの進展などに伴って発生する剥離・剥落に加えて、側壁上端部の打ち継ぎ面の施工不良などに起因した初期欠陥の割合も高い。また、過去の点検記録では、反発硬度法<sup>6)</sup>(テストハンマー法とも呼ばれる)による強度推定に基づいた強度不足判定なども報告されている。

本研究では、実際に観察される変状を勘案して、頂版にひび割れがある場合、コンクリート強度が設計値よりも低い場合、側壁上端部の打設面に初期欠陥がある場合を対象とした。

### (3) 人孔の補強方法

ひび割れの補修方法には、被覆による方法や注入・充填による方法があり、樹脂系およびセメント系補修材が用いられる。コンクリートの剥離・剥落などの断面欠損を伴う場合にはモルタル修復が実施される。強度不足が懸念される場合には、補強材による補強が施される。鋼材や繊維シートなどが補強材として用いられる。

繊維シート補強は繊維を編み込んだシートで引張力を分担するもので、繊維シートを壁面に貼り付けて施工する。関西電力では、経年人孔に対してCFSを用いた補強工法が適用されている。

\*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 関西電力 電力システム技術センター 地中送電グループ

\*3 電力計算センター 技術室 構造系解析部

### 3. 変状と補強を考慮した人孔の三次元有限要素解析

#### (1) 解析条件

解析ケースを表-1に示す。対象とした人孔は、設置量が多く標準的な構造寸法の人孔(幅 1.8m×高さ 1.8m×奥行 5.5m)と比較的構造寸法の大きい代表的な人孔(幅 2.0m×高さ 2.6m×奥行 8.0m)の2種類とした。人孔諸元を表-2に示す。人孔の変状は、図-2に示すように(i)頂版にひび割れがある場合、(ii)コンクリート強度が設計値よりも低い場合、(iii)側壁上端部の打設面に初期欠陥がある場合を想定した。人孔の変状と補強の組み合わせとしては、実際の適用事例を勘案して、(i)頂版にひび割れがある場合は、頂版内側に CFS 接着、(ii)コンクリート強度が設計値よりも低い場合は、内面全周に CFS 接着、(iii)側壁上端部の打設面に初期欠陥がある場合は、ハンチ部をモルタルで雁行に打ち増した後、CFS 接着を想定した。これら(i)~(iii)の人孔に対して、補強効果を評価した。

荷重条件には、文献7)に基づいて、自重および土かぶり 0.6mの埋め戻し土による常時土圧、122.5kN(=12.5tonf)の車輪による土圧を考慮する。設計荷重時における土圧分布を算定した結果を図-3に示す。

#### (2) 解析手法

構造解析には、三次元非線形有限要素解析を用いた。解析プログラムは、汎用解析コード ABAQUS/Standard Ver.6.5<sup>8)</sup>を使用した。

コンクリートのひび割れモデルは分散ひび割れモデルとし、圧縮応力-圧縮ひずみ関係および、引張強度、破壊エネルギーについては文献9)、引張応力-引張ひずみ関係については文献10)に基づいて、それぞれ設定した。鉄筋の材料モデルは鉄筋降伏以降に応力が一定となる完全弾塑性型を採用した。鉄筋とコンクリートの付着については、完全付着とした。想定する荷重の範囲で CFS に発生する応力レベルでは界面での付着切れや破断は生じないと判断されたため<sup>11)</sup>、引張剛性のみをモデル化

し、コンクリートとは剛結の条件とした。

人孔躯体を三次元有限要素でモデル化し、コンクリート部をソリッド要素で、鉄筋を面要素でモデル化した。解析メッシュ図を図-4に示す。モデル底面の鉛直変位を拘束し、対称境界条件を与えた。頂版ひび割れは、鉄筋降伏前のひび割れ発生を想定し、簡便性を重視して、頂版中央部の弾性係数を 1/10 とすることによりその影響を考慮した<sup>12)</sup>。初期欠陥がある場合については、打ち継ぎ面がコールドジョイントとなった場合を想定し、頂版と側壁上端部の境界面を2重節点とした上で、境界面には Coulomb 摩擦に基づいた接触条件を考慮し、摩擦係数は 0.587 とした<sup>13)</sup>。なお、解析手法の適用性については、解析結果は同形状供試体の載荷実験における荷重変位関係、ひび割れ損傷状況などが概ね一致することを確認している<sup>4)</sup>。

表-1 解析ケース

No.	構造寸法	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	変状条件	補強
1	標準	24	なし	なし
2	標準	24	頂版ひび割れ	なし
3	標準	24	頂版ひび割れ	あり
4	標準	10	なし	なし
5	標準	10	なし	あり
6	標準	24	初期欠陥	なし
7	標準	24	初期欠陥	あり
8	大型	24	なし	なし
9	大型	24	初期欠陥	なし
10	大型	24	初期欠陥	あり

表-2 人孔諸元

項目	標準人孔	大型人孔
内空寸法(m) (幅×高さ×奥行)	1.8×1.8×5.5	2.0×2.6×8.0
壁厚(cm) (側壁, 端壁, 頂版)	20,20,25	同左
土被り(cm)	60	同左
頂版配筋 (SD295A)	短辺方向	D16@150
	長辺方向	D9@300
		D10@300

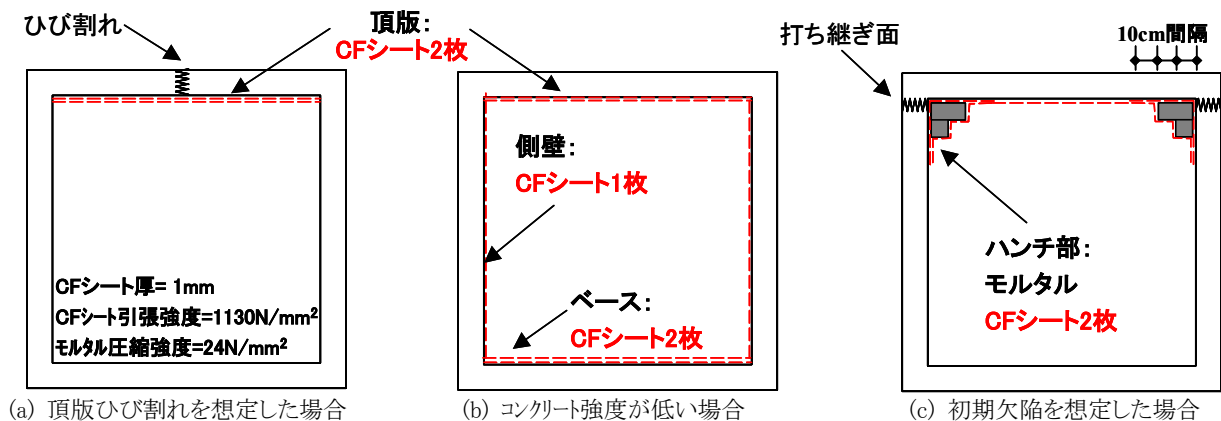


図-2 想定する変状と補強の組み合わせ

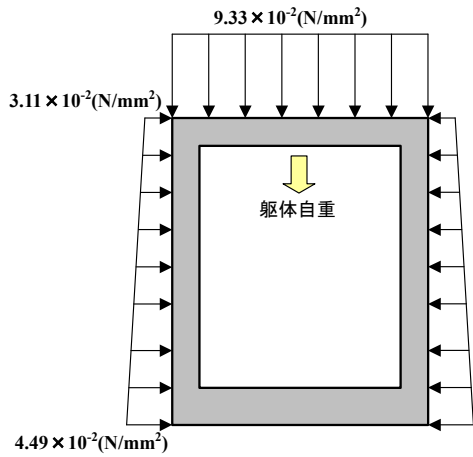
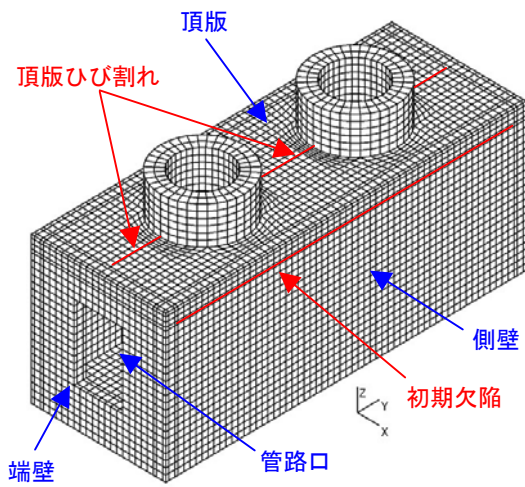
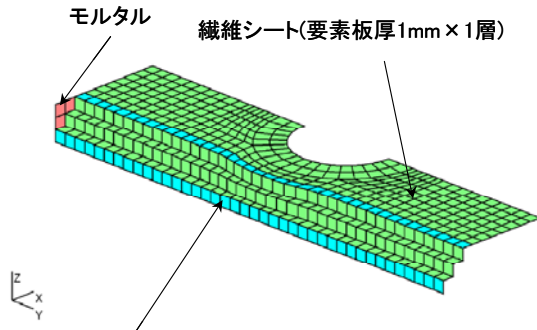


図-3 設計荷重時の土圧分布(標準人孔の場合)



(a) 躯体部(標準人孔)



(b) 補強部(初期欠陥あり)  
図-4 解析メッシュ図

#### 4. 耐荷性能に与える変状の影響評価

##### (1) 解析結果および考察

###### a) 頂版ひび割れを想定した場合

変状条件として、頂版中央部にひび割れがある場合(No.2)とない場合(No.1)におけるコンクリートおよび鉄筋に発生する最大引張応力の比較を図-5に示す。これによると、コンクリートの最大引張応力に変化がないのは、既に頂版部でひび割れが発生しているためである。一方、鉄筋の最大引張応力は2.4倍に増加している。これは、頂版

中央部にひび割れがあるとコンクリートは引張応力を分担できず、鉄筋が引張応力を分担するためである。

###### b) コンクリート強度が低い場合

劣化に伴いコンクリート強度が低下した場合(No.4)としない場合(No.1)にコンクリートに発生する引張応力およびコンクリートに発生する引張応力と引張強度との比を図-6に示す。これによると、コンクリート強度が変化しても、コンクリートに発生する引張応力自体はほとんど変化しないことが分かる。しかしながら、コンクリート強度が低い場合は、コンクリートの発生引張応力と引張強度の比が0.94となり、ひび割れ発生に近い応力レベルであった。これは、コンクリート強度が低い場合には、コンクリートに発生する引張応力は同じでも、引張強度が相対的に低下するため、ひび割れが発生しやすくなることを示している。

###### c) 初期欠陥を想定した場合

標準人孔に対して、頂版と側壁上端部の間に初期欠陥がない場合(No.1)とある場合(No.6)における変形図と主応力分布図の比較を図-7に示す。構造の対称性を考慮して、1/4モデルのみを表示した。これによると、初期欠陥を想定した場合は、初期欠陥部で滑りが生じ、側壁のたわみが大きくなっていることが分かる。また、側壁上端に発生する応力が低減している一方で、側壁下端に発生するコンクリートの引張応力が初期欠陥なしの場合

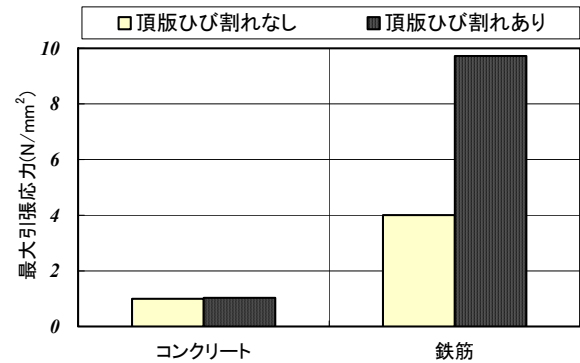


図-5 発生引張応力比較(頂版ひび割れの有無)

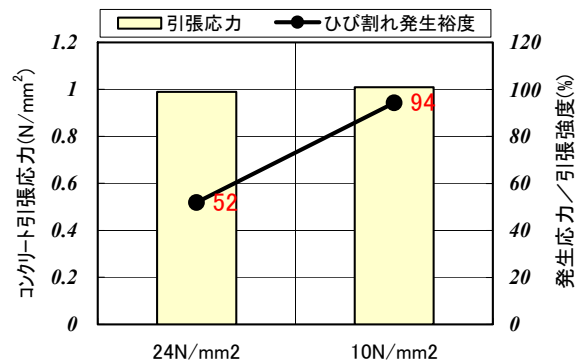


図-6 コンクリート引張応力と引張強度の比

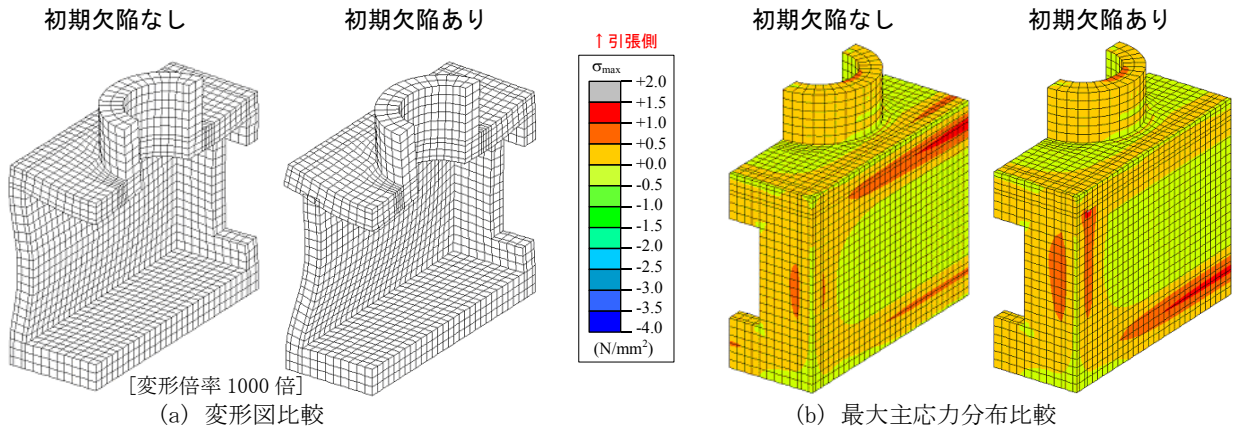


図-7 標準人孔の解析結果比較(初期欠陥の有無)

合よりも大きくなっていることが分かる。しかしながら、初期欠陥を考慮した場合においても、躯体部にひび割れは生じなかった。これは、側壁上端部に初期欠陥があると、側壁が片持ち梁的な挙動を示し、側壁下部に発生する引張応力が大きくなるものの、端壁の支持効果が大きいためであると考えられる。

(2) 経年人孔の耐荷性能

a) 構造寸法の影響

大型人孔に初期欠陥を想定した場合(No.9)における変形図と主応力分布図を図-8に示す。これによると、図-7に示した標準人孔の結果と比べて、側壁のたわみが大きくなり、側壁下端に発生するコンクリートの引張応力が大きくなっている。図-8の灰色の部分の概ねコンクリートの引張強度を超えて、ひび割れが発生している箇所となる。標準人孔では、ひび割れが発生しなかったのに対し、大型人孔では側壁の上下端部にひび割れが発生した。図-9によれば、初期欠陥がある場合、標準人孔は鉄筋応力が約1.5倍に増加し、大型人孔は鉄筋応力が約1.8倍に増加した。これは、構造寸法が大きいほど初期欠陥の影響も大きくなることを示している。また、大型人孔の鉄筋に発生する最大引張応力は標準人孔の約2.8倍になった。今回対象とした大型人孔の場合、部材厚が同じで、内空高さが約1.4倍になっているため、標準人孔よりも端壁の効果が小さかったものと考えられる。

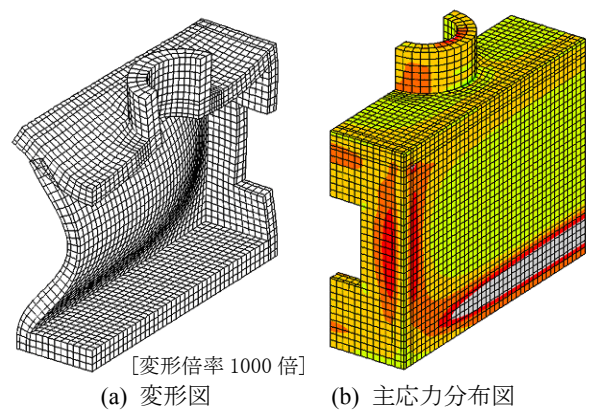


図-8 大型人孔の解析結果(初期欠陥あり)

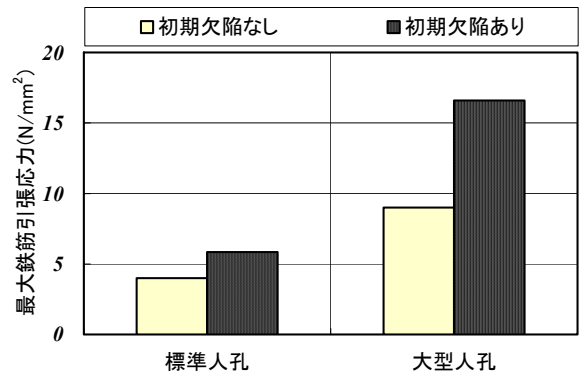


図-9 鉄筋引張応力比較(初期欠陥の有無)

かになった。これは、主に、鉛直荷重に対して端壁が有効に抵抗し、頂版の変形を拘束する効果が大きいためであると考えられる。

b) 変状の影響

人孔の変状条件として、(i)頂版にひび割れがある場合、(ii)コンクリート強度が低い場合、(iii)側壁上端部に初期欠陥がある場合を想定し、人孔の耐荷性能に与える影響を評価した。この結果、躯体部に発生する局所的な応力が大きくなり、曲げひび割れが発生する場合があるものの、設計荷重作用時までは鉄筋降伏やせん断ひび割れの発生、コンクリートの圧壊などの状態には達せず、耐荷性能が確保されることが明らかになった。

5. 補強効果に対する評価

(1) 解析結果および考察

a) 頂版ひび割れを想定した場合

頂版ひび割れを想定した場合(No.3)の補強の効果を評価した結果を図-10(a)に示す。これによると、補強がない場合に比べて補強がある場合は、最大コンクリート引張応力が6.2%、最大鉄筋引張応力が32.7%の割合で低減した。



頂版ひび割れがある場合には、CFS による補強は主として鉄筋に発生する応力を低減する効果が認められた。これは、鉄筋に発生していた引張力を補強した CFS が分担するためであると考えられる。補強が頂版のみであるので、側壁のコンクリートに発生する応力には大きな変化はなかった。

b) コンクリート強度が低い場合

コンクリート強度が低い場合(No.5)の補強の効果を評価した結果を図-10(b)に示す。これによると、補強がない場合に比べて補強がある場合は、最大コンクリート引張応力が 9.5%、最大鉄筋引張応力が 1.4%の割合で低減した。補強はコンクリートに発生する応力を若干低減する効果があった。鉄筋に対する効果が小さいのは、ひび割れが発生していないためであると考えられる。

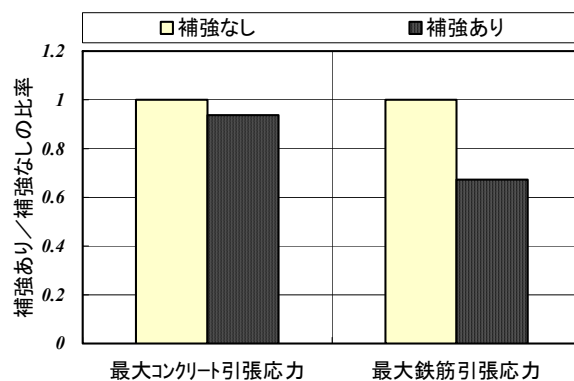
c) 初期欠陥を想定した場合

初期欠陥を想定した場合(No.7)の補強の効果を評価した結果を図-10(c)に示す。これによると、補強がない場合に比べて補強がある場合は、最大コンクリート引張応力が 67.5%、最大鉄筋引張応力が 49.8%の割合で低減した。側壁上端部に初期欠陥がある場合には、補強がコンクリートおよび鉄筋に発生する応力を低減する効果は大きい。これは、初期欠陥部における滑りを拘束する効果が大きいためと考えられる。このため、頂版下面や側壁外面下部に発生する応力が大きく低下した。

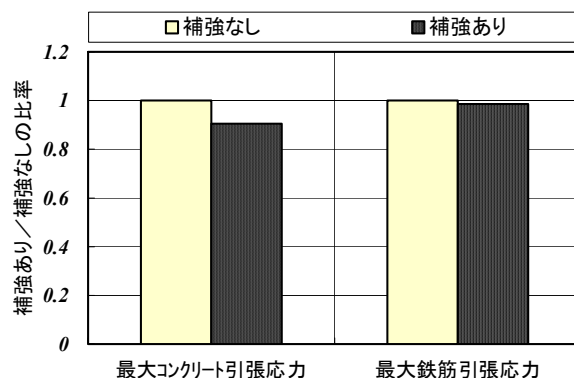
(2) 補強効果の比較検討

各解析結果における最大鉄筋引張応力に着目した低減の効果を比較すると、大きい順に(iii)ハンチ部にモルタル打ち増し後、CFS 接着(側壁上端部の打設面に初期欠陥がある場合)、(i)頂版内側に CFS 接着(頂版にひび割れがある場合)、(ii)内面全周に CFS 接着(コンクリート強度が設計値よりも低い場合)であった。

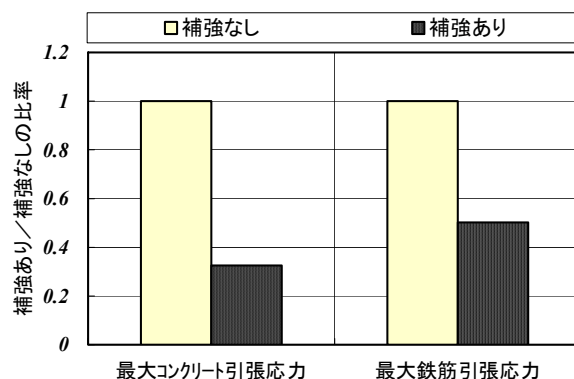
初期欠陥を想定した場合の大型人孔解析結果(No.10)を図-11に示した。これによると、補強を施すことにより、



(a) 頂版ひび割れを想定した場合

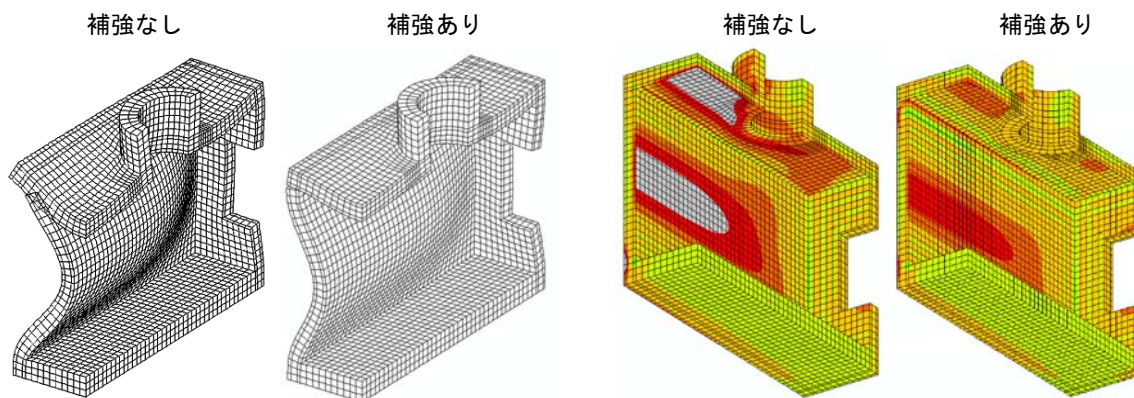


(b) コンクリート強度が低い場合



(c) 初期欠陥を想定した場合

図-10 各解析結果の発生応力比較(補強の有無)



(a) 変形図比較(変形倍率 1000 倍)

(b) 最大主応力分布比較

図-11 初期欠陥を有する大型人孔の解析結果比較(補強の有無)

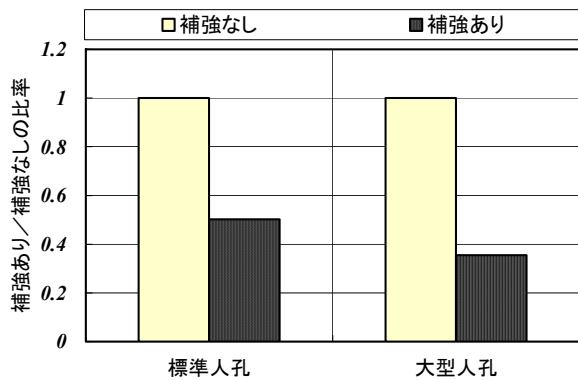


図-12 構造寸法が補強効果に及ぼす影響  
(最大鉄筋引張応力)

頂版と側壁の変形が小さくなり、頂版や側壁に発生する最大主応力が大きく低減していることが分かる。(iii)の場合に最も効果が顕著であったのは、初期欠陥に起因する頂版と側壁の変形に対して、補強が有効に作用し、かつ端壁が頂版と側壁の変形の影響を受けずに、鉛直荷重を支持できるためと考えられる。この効果は、標準人孔よりも大型人孔の方が高く、図-12に示すように補強を施さない場合(No.9)に比べて頂版の中央部内側における最大鉄筋引張応力が約35%になった。

## 6. まとめ

本研究は、変状と補強を考慮した人孔の三次元有限要素解析を実施することにより、車両荷重条件下で、経年人孔の耐荷性能に与える変状の影響と補強効果を評価したものである。人孔の構造寸法については、標準人孔(幅1.8m×高さ1.8m×奥行5.5m)、大型人孔(幅2.0m×高さ2.6m×奥行8.0m)を対象とした。本研究で得られた成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 人孔の変状条件として、(i)頂版にひび割れがある場合、(ii)コンクリート強度が低い場合、(iii)側壁上端部に初期欠陥がある場合を想定し、それぞれの変状が人孔の耐荷性能に与える影響を評価した。その結果、各条件下で躯体部に発生する局所的な応力が小さくなり、曲げひび割れが発生するところがあるものの、設計荷重作用時までについては鉄筋降伏やせん断ひび割れの発生、コンクリートの圧壊などの状態には達せず、耐荷性能が確保されることを示した。これは、鉛直荷重に対しては端壁が有効に抵抗し、頂版の変形を拘束する効果があるためである。
- (2) 人孔の補強と変状の組み合わせとして、(i)頂版内側にCFS接着(頂版にひび割れがある場合)、(ii)内面全周にCFS接着(コンクリート強度が設計値よりも低い場合)、(iii)ハンチ部にモルタル打ち増し後、CFS接着(側壁上端部の打設面に初期欠陥がある場合)を想定した。これら(i)~(iii)の人孔に対して、補強効果を評

価した。これらの結果、各条件下で補強を施すことにより、コンクリートや鉄筋に発生する引張応力を低減できることを確認した。鉄筋の最大引張応力に着目した低減の効果は、大きい順に(iii)、(i)、(ii)であった。この効果は、上述の大型人孔において最も高く、補強を施さない場合に比べて頂版(中央部内側)の最大鉄筋引張応力が約35%になった。これは、初期欠陥に起因する頂版と側壁の変形に対して、補強が有効に作用したためであると考えられる。

今後、本研究成果を、経年人孔の保守点検における管理基準や補修・補強方法などを検討するための基礎資料として、人孔の合理的な維持管理方針に反映していきたい。

## 参考文献

- 1) 電気書院：電力ケーブル技術ハンドブック, 1989.
- 2) 電気協同研究会・地中電線路プレハブ管路専門委員会：地中送配電線路用プレハブ人孔・管路一人孔・管路の強度設計法一, 電気協同研究, 第31巻, 第1号, 1975.
- 3) 土木学会・原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針, 2005.
- 4) 松尾豊史, 井上雅弘, 福田欣也: 地中送電用人孔の耐荷性能に関する検討, 土木学会第61回年次学術講演会, V-460, p.915-916, 2006.
- 5) 電気協同研究会：地中送電用管路・洞道の保守技術, 電気協同研究第64巻第1号, 2008.
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2003-, 2003.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編)・同解説, 2002.
- 8) ABAQUS, Inc.: ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.5
- 9) 土木学会：【2007年制定】コンクリート標準示方書[設計編], 2008.
- 10) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 11) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー101, 2000.
- 12) 金津努, 西内達雄：ジョイント部のせん断すべり破壊基準に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, p.783-788, 1995.
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム, 第4章ひびわれコンクリートの数値解析, 1990.