

橋梁上に設置した柱状付属構造物の耐荷力評価に関する 実験的検討

宇野津 哲哉¹・田中 将登²・青木 康素²・伊佐 政晃³
杉山 直也¹・松本 崇志⁴・奥田 貴矢⁴

¹正会員 （一財）阪神高速先進技術研究所 調査研究部（〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町4-5-7）

²正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室（〒530-0005 大阪府大阪市北区中之島3-2-4）

³正会員 阪神高速道路株式会社 大阪保全部 保全事業課（〒552-0023 大阪府大阪市港区港晴2-11-12）

⁴正会員 株式会社建設技術研究所 大阪本社 構造部（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7）

1. はじめに

既往の地震において橋梁上の照明柱やテレビ支柱（以下、柱状付属物と称する）の倒壊や脱落が確認¹されており、災害時の機能確保から当該構造物の耐震性を評価することが重要である。本検討では、柱状付属物に地震荷重が作用した際の各部材の破壊順序・破壊形態およびそれらを網羅した非線形特性を把握する目的として、柱状付属物基部付近をモデルとして取り出した実物大模型供試体を製作し、静的に正負交番繰返し載荷試験を実施した。また、載荷試験に対する再現解析をFEAにより行い、実構造物規模の柱状付属構造物における非線形特性に展開するための検討を行った。

2. 載荷試験概要

阪神高速道路では、現行のテレビ支柱と照明柱はそれぞれ高さ12mと10m程度を標準としているが、本実験では高さ2.3m程度までの供試体を製作し、ベースプレートから高さ2.0mの位置を載荷点として、正負交番載荷試験を行った。それぞれの試験体略図を図-1に示す。繰返し載荷回数は3回を基本とした。試験は図-2に示すように、鉛直ジャッキにてテレビ支柱もしくは照明柱の自重に相当する鉛直荷重を常時作用させながら水平ジャッキにて水平力を与えた。水平ジャッキの制御方法は変位制御、試験体上部の取付治具に水平ジャッキを固定、載荷させた。

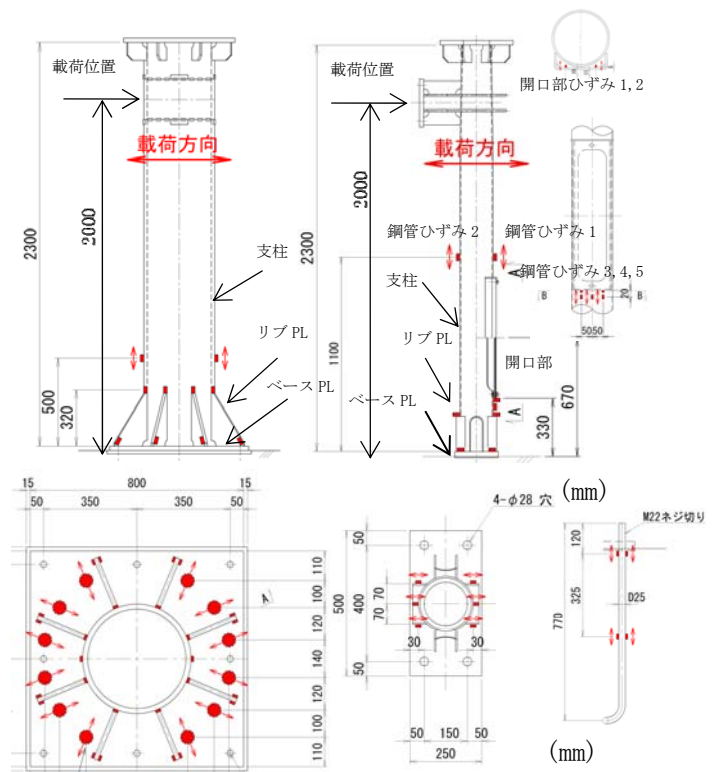


図-1 試験体図（左：既設テレビ支柱，右：既設照明柱）

また、テレビ支柱については、過年度検討した結果からアンカーボルトが弱点となることが想定されたため、現在設置されている既設テレビ支柱に加え、アンカーボルトをD25からD29に変更したアンカーボルト補強モデルとベースプレートを拡幅させアンカーボルトを増設したベースプレート補強モデルについても実験を行った（図-3）。

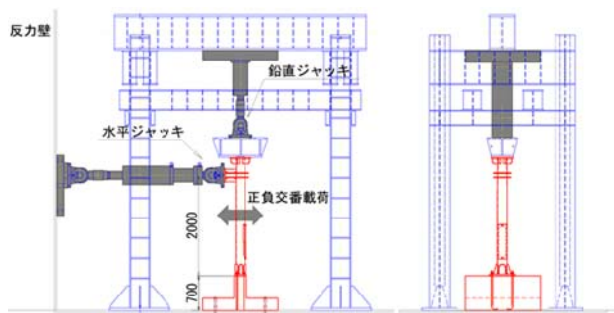


図-2 正負交番荷重試験装置の概要図

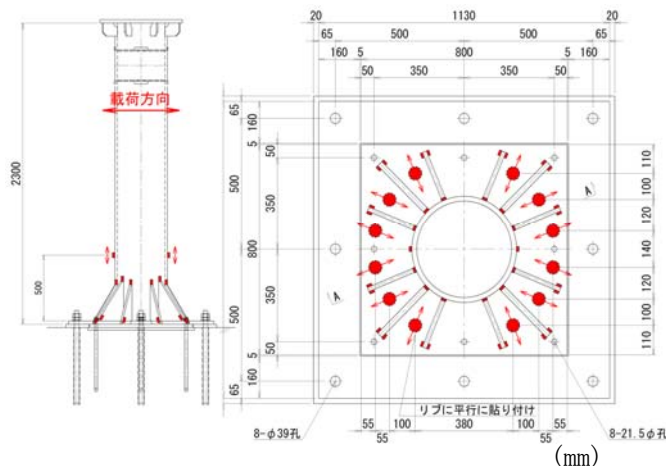


図-3 試験体図 (テレビ支柱(ベースプレート拡幅))

(1) テレビ支柱

支柱部は直径 $\phi 406.4\text{mm}$ 、板厚 $t=19\text{mm}$ の鋼管、ベースプレートは $t=25\text{mm}$ の板材で構成しており、D25のアンカーボルト8本でコンクリート基礎に固定した。コンクリート基礎部はRC橋脚天端を模擬して設計基準強度 27N/mm^2 のコンクリートブロックとした。

(2) 照明柱

支柱部は直径 $\phi 190.7\text{mm}$ 、板厚 $t=6\text{mm}$ の鋼管で、D25のアンカーボルト4本でコンクリート基礎に固定した。兵庫県南部地震の被災事例では施設配線用の開口部での座屈が多数確認されているため、本実験でも標準図どおりベースプレートから高さ670mm位置に開口部を設置した(図-1)。高速道路上の照明柱は、幅250mmの壁高欄天端に設置されており、外力作用時にコンクリートで圧壊することも想定されたため、壁高欄を模擬して配筋D13、主筋D16、設計基準強度 24N/mm^2 のコンクリート基礎とした。

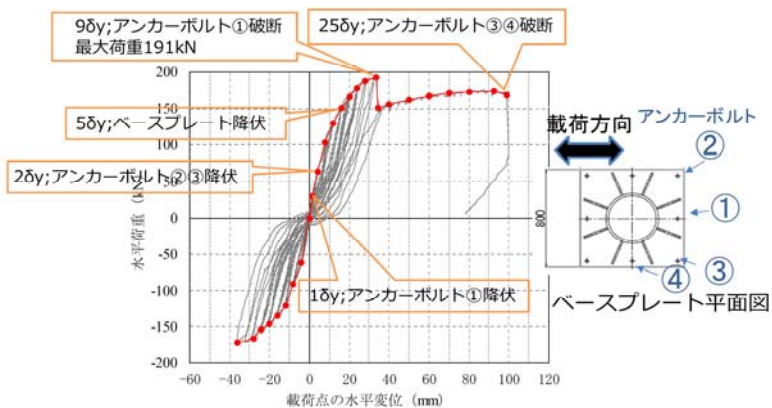


図-4 荷重-変位関係 (既設テレビ支柱)

3. 荷重試験結果とその評価

支柱、ベースプレート、リブ、アンカーボルトにおいて、図-1および図-3に示す位置で部材軸方向のひずみを計測した。アンカーボルトについては、ベースプレートの変形に伴って伸びることを想定し、鉛直変位を計測した。照明柱については、壁高欄のはらみだし挙動を高精度ラインセンサにより3次元的に計測した。

(1) 既設テレビ支柱

荷重と荷重点における水平変位の関係の実験結果を図-4に示す。4mmでアンカーボルト①の頂部が降伏ひずみに達したため、降伏変位 $1\delta y$ を4mmとした。

$2\delta y$ 荷重時にはベースプレートが変形し、アンカーボルト①頂部はベースプレートに引張り上げられ一時的に1mm伸びた。このとき、両端のアンカーボルト②③の頂部でも荷重を負担して降伏ひずみに達した。 $5\delta y$ 荷重時にベースプレートがアンカーボルト①②の間で降伏ひずみに達し、 $9\delta y$ 荷重途中の水平変位35mm時点でアンカーボルト①が11mm程度伸びたところで破断し、最大荷重191kNから荷重が急激に低下した。ただし、その他のアンカーボルトに荷重分散され、全体系としては倒壊に至るような致命的な破壊には至っておらず、抵抗荷重もその後微増ではあるが増加した。 $10\delta y$ 以降は正側への強制変位を単調増加させて荷重し、最終的に $25\delta y$ (100mm)まで荷重した時点でアンカーボルト③とその隣のアンカーボルト④が同時に破断し、大幅な耐力低下が生じ実験を終了した(図-5)。支柱は最終荷重においても降伏ひずみに至らなかった。

耐荷力評価としては、アンカーボルト①の頂部の破断で最大荷重は落ちるが、他のアンカーボルトに分散されるため全体系としては粘り強いといえる。

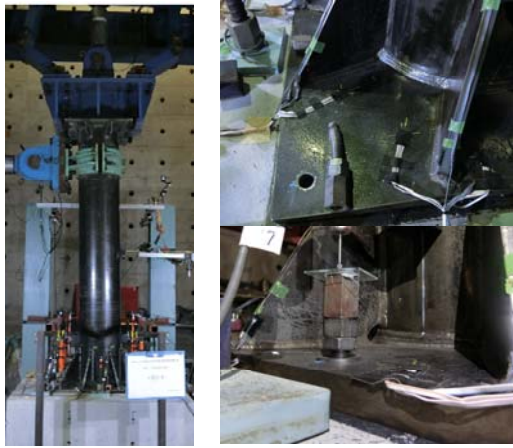


図-5 テレビ支柱終局時全景:左,
基部(引張側):右上, 基部(圧縮側):右下

(2) テレビ支柱 (アンカー補強)

荷重と載荷点における水平変位の関係の実験結果を図-6に示す。水平変位8mmで最外縁アンカーボルト①頂部が先に降伏したため、降伏変位 $1\delta y$ を8mmとした。ただし、 $1\delta y$ ずつ載荷させると損傷イベントを捉えられない恐れがあったため、 $0.5\delta y$ ずつの載荷とした。

載荷位置の水平変位が $1.5\delta y$ (=12.0mm) に到達した時点で、ベースプレートがアンカーボルト①②の間で降伏ひずみに到達した。アンカー①頂部はベースプレートに引き上げられ1mm程度伸びた。載荷位置の水平変位が $2\delta y$ (=16.0mm) に到達した時点で、アンカーボルト①に隣接するリブプレート下部が降伏ひずみに到達した。載荷位置の水平変位が $2.5\delta y$ (=20.0mm) に到達した時点でアンカーボルト②が、 $3.5\delta y$ (=28.0mm) に到達した時点でアンカーボルト③が降伏ひずみに到達した。載荷位置の水平変位が $5.5\delta y$ (=44.0mm) に到達した時点で、アンカーボルト①に隣接するリブプレート頂部と鋼管の結合部が降伏ひずみに到達した。アンカーボルト①の伸び量は8.4mmとなった。 $7.5\delta y$ (=60.0mm) の最大荷重290kN時点で荷重が低下し、 $8.5\delta y$ (=68.0mm) でアンカーボルト①が破断し耐力が急激に低下した。その後、現行テレビ支柱と同様に隣接ボルトに荷重分散された。その後緩やかに荷重は増加したがストローク限界となったため試験を終了した。なお、支柱および全てのアンカーボルトの頂部から330mm下に貼付したひずみゲージ位置は最後まで降伏ひずみに至らなかった。

最大荷重は現行テレビ支柱が191kNに対し、290kNとなり50%程度の耐力増加が確認された。また、現行と同様の履歴特性となり全体形としては粘り強い構造であった。

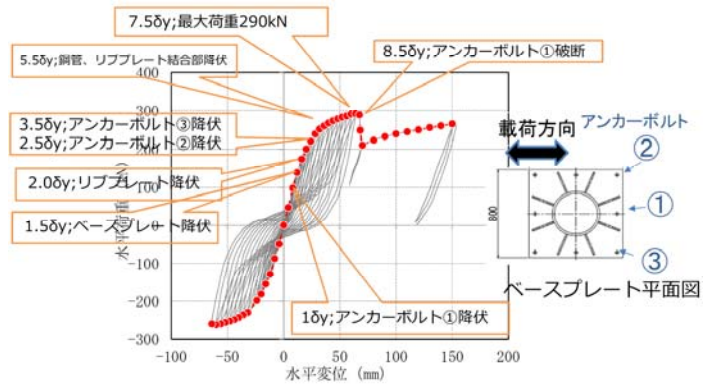


図-6 荷重-変位関係 (テレビ支柱アンカー補強)

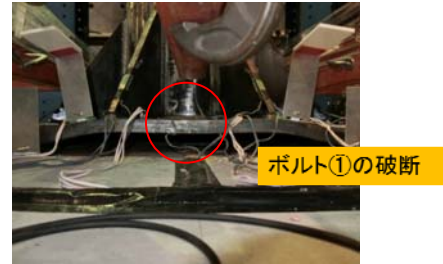


図-7 テレビ支柱 (アンカー補強)
最大荷重 (8.5δy) 時基部(引張側)

(3) テレビ支柱 (ベースプレート拡幅)

荷重と載荷点における水平変位の関係の実験結果を図-8に示す。載荷位置の水平変位が5mmに到達した時点で、アンカーボルトより先にリブプレート下部が降伏ひずみに達したため、降伏変位 $1\delta y$ を5mmとした。載荷位置の水平変位が $3\delta y$ (=15 mm) に到達した時点で、既設アンカーボルト①, ②, ③が降伏ひずみに達した。また、増設リブ頂部付近の支柱も降伏ひずみに達した。載荷位置の水平変位が $4\delta y$ (=20mm) に到達した時点で、既設リブプレート下部付近のベースプレートが降伏ひずみに到達した。載荷位置の水平変位が $5\delta y$ (=25mm) に到達した時点で、新設アンカーボルト①が降伏ひずみに到達した。 $13\delta y$ (=65mm) の最大荷重591kNの段階で引張り側リブプレートのベースプレート側溶接が破断し荷重低下が発生した (図-9)。その後、 $28\delta y$ (=140mm) まで載荷させたがストローク限界となったため試験を終了した。

最大荷重は、既設テレビ支柱の191kNに対し591kNと現行テレビ支柱の3倍程度の耐力増加となり、アンカーの破断は生じず、ベースプレートの塑性化およびリブプレートの溶接部での破断が生じてゆるやかな耐力低下を生じた。最終的には、大幅な耐力低下が生じる前に水平ジャッキのストローク限界に達している。履歴形状よりこれまでのケースと異なり、ベースプレートやリブプレートの塑性化が中心となったエネルギーの吸収に富む構造である。

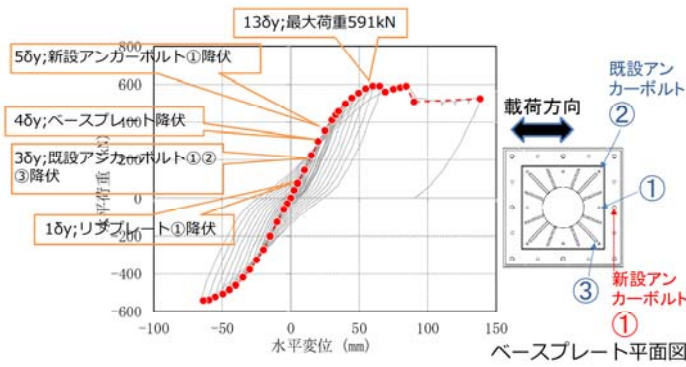


図-8 荷重-変位関係 (テレビ支柱ベースプレート拡幅)



図-9 テレビ支柱 (ベースプレート拡幅)
最大荷重時 (13δy) 基部 (引張側)

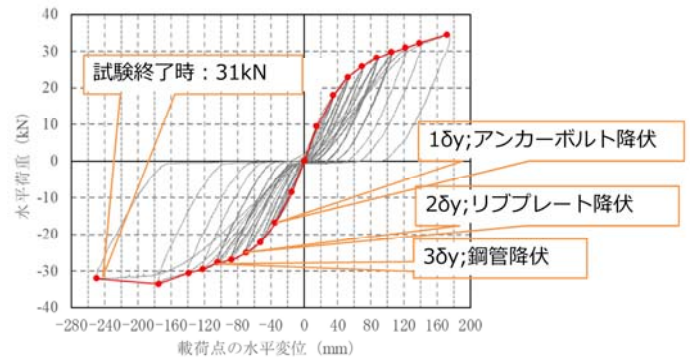


図-10 荷重-変位関係 (既設照明柱)



図-11 照明柱最大荷重時の全景:左,
基部 (引張側):右上, 基部 (圧縮側):右下

(4) 既設照明柱

荷重と載荷点における水平変位の関係の実験結果を図-10に示す。水平変位35mmでアンカーボルト頂部が先に降伏したため、降伏変位1δyを35mmとした。ただし、1δyずつ載荷させると損傷イベントを捉えられない恐れがあったため、0.5δyずつの載荷とした。

2δy (=70mm) の載荷でリブプレート頂部が降伏ひずみに、3δy (=105mm) の載荷時に開口部の下側位置の鋼管3および5 (図-1) で降伏ひずみを超える応答を示した。5δy載荷以降は、1方向 (押し側) への強制変位を単調増加させて載荷し、最終的に水平ジャッキのストローク限界である250mmまで載荷した。このとき、図-11に示すように引張側でベースプレートが持ち上げられるように変形し、アンカーボルトは4本とも伸びていた。破断や開口部の座屈などの、荷重が急激に落ちるような事象は生じなかった。開口部上側の鋼管 1, 2, 開口部下側の鋼管4および開口部1, 2 (図-1) は最終時においても降伏ひずみに達しなかった。コンクリート壁高欄に着目すると、側面に曲げひび割れが見られたが、はらみだしの挙動は見られなかった。試験終了時の荷重は31.0kNであり、荷重-変位曲線は原点に戻る挙動を示した。

耐力評価としては、先にアンカーボルトが降伏し塑性変形するが、全体系として脆性的に倒壊に至ることはなかった。兵庫県南部地震時に開口部で座屈する現象が見られたが、今回の実験で座屈しなかったのは当時より開口部が補強された構造を採用し

ているためと推察される。

4. 実験とFEAの比較

解析は複合非線形解析とし解析プログラムにDIANA³⁾を用いた。FEモデルを図-12示す。ベースプレート、ワッシャー、ナット、アンカーボルト、コンクリート基礎を非線形ソリッド要素、支柱、リブは非線形シェル要素、コンクリート基礎内の鉄筋は非線形埋め込み鉄筋要素とした。コンクリートの応力ひずみ関係は、圧縮軟化モデルおよび引張軟化モデルを組み合わせたものとし⁴⁾、ひび割れモデルには分散ひびわれモデルを用いた³⁾。鉄筋および鋼材の応力ひずみ関係は、降伏応力度を折れ点としたバイリニアでモデル化し、二次勾配は解析計算の安定性に配慮して初期剛性の1/100とした。各部位の材料特性値には実強度を用いた。ベースプレートとコンクリート基礎の接触要素は、圧縮力には抵抗するが引張力には抵抗しないインターフェイス要素を用いた。外力は、一様に鋼管上部に死荷重を作用させながら水平変位を漸増載荷するプッシュオーバーとした。

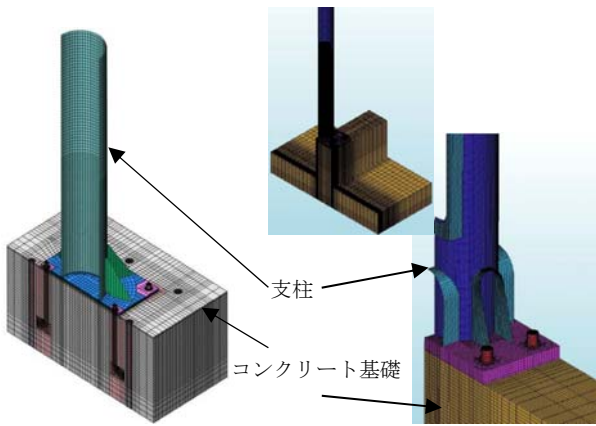


図-12 モデル概略図 左) テレビ支柱, 右) 照明柱

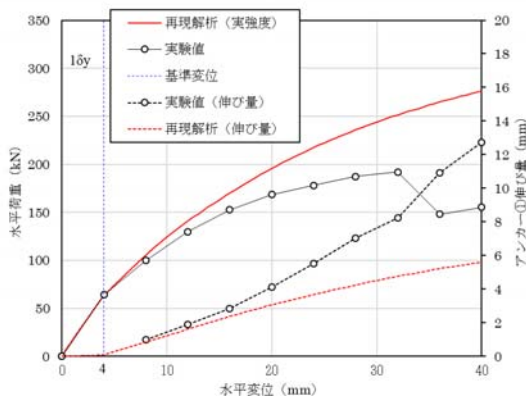


図-13 実験と荷重の変位関係

(1) 既設テレビ支柱

図-13 に実験と解析の荷重点位置における荷重-水平変位関係を示す。弾性挙動範囲である $1\delta y$ (アンカーボルト①が降伏する) までの水平荷重と水平変位の関係はよく再現できている。一方で、アンカーボルト①の降伏後、実験では解析と比較して剛性低下が見られた。ここで、図-13 に記載したアンカーボルト①伸び量と水平変位の関係から $2\delta y$ まではアンカーボルト①の伸び量を解析で再現できているが、それ以降の伸び量の急増は再現できていない。この要因として、解析ではポアソン効果によるアンカーボルトの細りを反映できていないことが推察される。次に、損傷イベントの比較であるが、水平変位 4mm で実験結果と同様アンカーボルト①が降伏する結果となった。なお、実験後基礎コンクリートを切断し破断したアンカーボルトを目視確認したが、アンカーボルトとコンクリートの付着切れはなく、ねじ切り部で変形が卓越していたことが分かった。

(2) テレビ支柱 (アンカー補強モデル)

図-14に実験と解析の荷重点位置における荷重-水平変位関係を示す。降伏変位 $1\delta y$ ($=8.0\text{mm}$) の初期剛性はFEAの方が実験に比較して若干高い傾向を

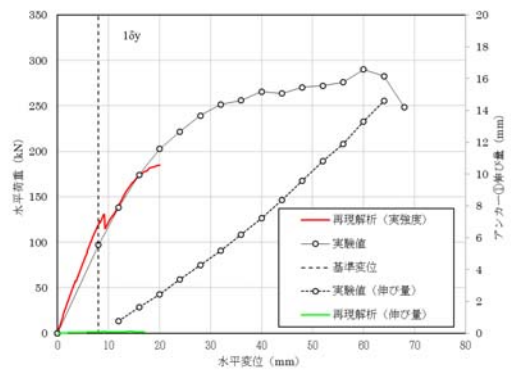


図-14 実験と荷重の変位関係

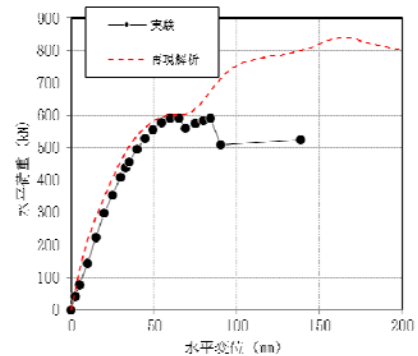


図-15 実験と荷重の変位関係

示す結果となった。FEAでは 8.7mm でアンカーボルト①が降伏した(実験では 8.0mm)。なお、 9.3mm 時に水平荷重が低下するが、荷重実験ではそのような挙動は見られなかった。この原因はアンカーボルト①のねじ切り部とベースプレート間に設置している接触要素の相対変形が急激に大きくなり、水平荷重の伝達が無くなった影響と推定される。FEAにおけるアンカーボルト①の伸び量は最大でも 0.1mm と荷重実験のようなアンカーボルトの伸び現象は見られなかった。 $4\delta y$ ($=16\text{mm}$) 以降の水平荷重は、FEAの方が荷重実験に比較して小さく、水平変位 20mm で解析が収束できず終了した。

損傷イベントは、FEAでは荷重実験と同様に、アンカーボルト①～②間のベースプレートが降伏し、その後リブプレート、アンカーボルト①のねじ切り部が降伏した。

(3) テレビ支柱 (ベースプレート拡幅モデル)

図-15に実験とFEAの荷重点位置における荷重-水平変位関係を示す。降伏変位 $1\delta y$ ($=5.0\text{mm}$) における初期剛性と、その後の剛性はFEAが実験に比較して若干高い傾向を示す結果となったが、実験でリブプレート溶接が切れ荷重が低下する $13\delta y$ ($=65.0\text{mm}$) まで荷重-変位関係の履歴がほぼ同じであった (FEAではリブプレートは水平変位 97mm で

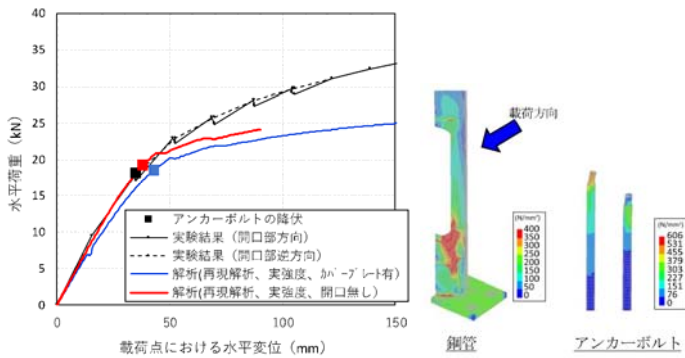


図-16 実験と荷重の変位関係：左，応力コンター：右

引張強度に達する)。損傷イベントは、テレビ支柱と同様に、既設アンカーボルト①，②，③の順番で降伏後，新設アンカーボルト①が降伏する。既設アンカーボルトが塑性化した後に新設アンカーボルトに荷重分担していくイベントは実験と同様であった。

リブプレートは水平変位7mm時に圧縮側ベースプレート接合位置が降伏し，支柱は水平変位19mm時に圧縮側リブとの接合位置において局所的に降伏に至るなど実験値よりイベント発生時の水平変位が大きい結果となった。

(4) 既設照明柱

図-16に実験とFEAの荷重点位置における荷重-水平変位関係を示す。ここでは，はじめに降伏したアンカーボルトに着目した。図より，FEA（青線）では18.5kN荷重時に水平変位43mmでアンカーボルトが降伏するのに対して，実験（黒線）では少し早く降伏する。また剛性もFEAの方が小さい。これは，FEAでは図-18に示すように先に開口部付近に応力が集中しており，アンカーボルトに荷重が伝達されるのが遅れるためと推察される。一方で，実験では正方向，負方向のどちらでも荷重-水平変位関係の履歴がほぼ同様であり，開口部がない無垢な鋼管と同等の挙動となっている可能性がある。そこで，開口部を設けない鋼管とした場合のFEA（赤線）を実施した。このとき，19.2kN荷重時に水平変位38mmでアンカーボルトが降伏する結果となり，実験でアンカーボルトが降伏する35mmまでの初期剛性は実験結果をよく再現できている。実験とFEAより，荷重初期の鋼管変形は開口部による剛性低下の影響はなく，開口部方向と開口部逆方向で同様の挙動を示した。

5. まとめ

本検討では，柱状付属物基部付近をモデルとして取り出した実物大模型供試体を製作し，静的に正負交番繰返し荷重試験を実施し非線形特性に展開するための検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 既設テレビ支柱では，はじめにアンカーボルト①が降伏強度に達した。アンカーボルト①が破断後，その他のボルトに荷重分担し倒壊に至る破壊は生じないが，その後単調荷重するとアンカー③④が破断し荷重が急激に低下する結果となった。履歴形状はスリップ型の形状であり，非線形挙動は，支柱が降伏していないことから鋼製支柱本体の塑性化よりもアンカーボルトの塑性化が主体となっている。また，アンカーボルトが破断後，他のボルトに荷重が分散されることから，全体的に粘り強い構造であることが分かった。
- 2) アンカー補強モデルも既設と同様にアンカーボルト①が破断後，隣接アンカーボルトに荷重分散されるが，最大荷重は，既設テレビ支柱が191kNに対し290kNと50%程度の増加となった。
- 3) ベースプレート拡幅モデルでは，他の2ケースとは異なり，先にリブプレートが降伏した後にアンカーボルトが降伏する。最大荷重は，既設テレビ支柱が191kNに対し591kNと既設の3倍程度の増加となった。
- 4) 既設照明柱では，先にアンカーボルトが降伏に達した。試験終了時にはアンカーボルトの破断や開口部の座屈などの荷重が急激に落ちるような事象は生じず，構造としての限界状態はアンカーボルトの降伏が先行することが明らかとなった。壁高欄コンクリートにははらみだし挙動は見られず，脆性的な破壊は生じなかった。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌一，1997。
- 2) 阪神高速道路株：土木工事共通仕様書，2020.7
- 3) DIANA FEA社：DIANA User's Manual Release 10.2
- 4) (公社)土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]
- 5) 伊佐政晃，篠原聖二，青木康素，宇野津哲哉，松本崇志，小野寺周：橋梁上に設置した柱状付属構造物の耐力評価に関する実験的検討，第39回地震工学研究発表会，A-23_1480，2019。