

転倒工法における外壁倒壊災害の防止に関する研究

高橋 弘 樹*1 高 梨 成 次*1 堀 智 仁*1

規模の小さな建築物の解体工事では、ワイヤロープ等を用いて、外壁を引き倒して解体する「転倒工法」と呼ばれる工法が主に用いられている。この工法では、外壁下部を切削する「縁切り」と呼ばれる作業の後に、外壁を引き倒しているが、この縁切り作業中に外壁が倒壊して、災害が発生している。本研究では、転倒工法における外壁の倒壊災害を防止するため、転倒工法を模擬した実験と計算を行った。また、転倒工法の作業中に、外壁倒壊の防止方法が確立されていないことも災害発生の原因と考えられるので、実験により仮設部材を用いた外壁倒壊防止工法について検討した。これらの実験と計算結果に加え、筆者らが行った解体工事实務者へのヒアリング結果を参考にして、転倒工法における安全な作業手順と、適切な縁切り方法やワイヤロープの張り方等の留意事項を示した。

キーワード: 倒壊災害, 転倒工法, 外壁, 縁切り, 鉄筋コンクリート。

1. はじめに

建築物の解体工事では、外壁を引き倒して解体する「転倒工法」と呼ばれる工法が主に用いられている。この工法を用いる場合、規模の大きな現場では、図1に示すように、解体用機械を用いて外壁を引き倒すが、規模の小さな現場では、ワイヤロープ等を用いて人力により外壁を引き倒している。転倒工法を行う際は、図2に示すように、作業の最初に、外壁の建物外側への倒壊防止のためにワイヤロープ等を設置する。次に、外壁を転倒できる程度に切り出して、外壁下部を切削し、その後、レバーホイスト等を用いてワイヤロープ等に張力を与えて、外壁を引き倒している。

外壁下部を切削することを「縁切り」と呼んでおり、この縁切り作業中に、外壁が倒壊し、作業員が下敷きになるという災害が発生している²⁾。外壁倒壊の原因としては、外壁下部の切りすぎとともに、ワイヤロープ等を設置した状態で縁切り作業をするため、ワイヤロープ等の張りすぎが考えられる。ただし、解体工事の作業指針³⁾には、転倒工法の留意事項の概要は示されているが、安全に作業を行うための縁切り方法や、ワイヤロープの張り方等の具体的な基準は示されていない。また、縁切り作業中に、外壁が建物の内側に倒壊することを防止するための方法は確立されておらず、対策はとられていないのが現状である。

本研究では、転倒工法において外壁を安全に解体するため、実験と計算により、災害の多い鉄筋コンクリート造の外壁について²⁾、適切な縁切り方法とワイヤロープ等の張り方を検討するとともに、縁切り作業中の外壁倒壊防止工法について検討した。さらに、これらの実験と計算結果に加えて、筆者らが行った解体工事实務者へのヒアリング結果を参考にして、転倒工法の適切な作業手順とその留意事項を示した。

なお、解体工事实務者へのヒアリングは、公益社団法人全国解体工事業団体連合会と一般社団法人東京建物解

体協会に行っており、本研究では、これらのヒアリング結果を参考にしている。また、本研究では、柱または外壁を転倒させるときの強度を、柱または外壁の転倒強度とし、具体的には、柱または外壁下端の曲げモーメントにより評価した。この他、本論では、図3に示すような、柱や外壁の縁切り部分の平断面の形状を「縁切り形状」とし、縁切り部分の高さ方向の長さを「縁切り高さ」とした。

2. 柱の転倒強度に及ぼす縁切りの影響に関する検討

2.1. 縁切り形状の影響

適切な縁切り形状を検討するためには、縁切り形状と外壁の転倒強度の関係を定量的に評価する必要がある。



図1 解体用機械を用いた転倒工法

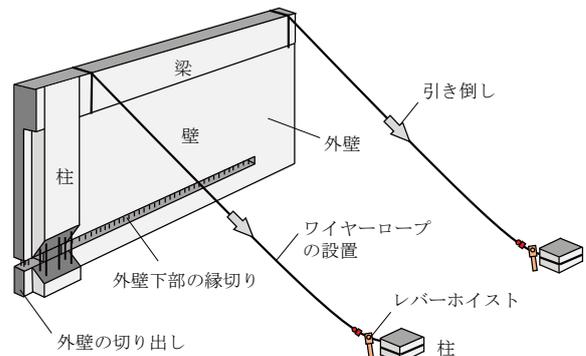


図2 人力による転倒工法

*1 労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 高橋弘樹

E-mail: takahah@s.jniosh.johas.go.jp

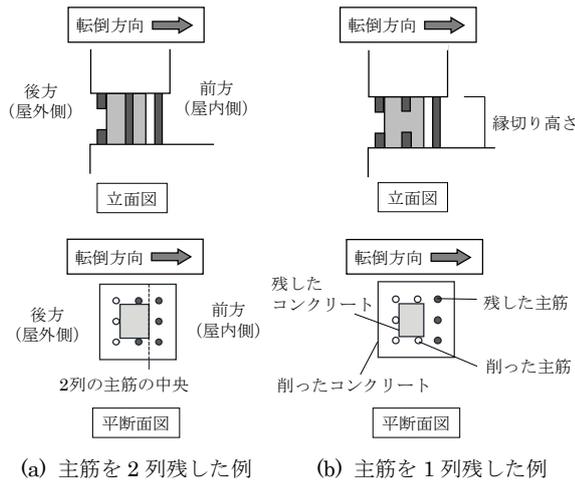


図3 柱の下部の縁切り

図2に示すように、外壁は主に、柱、壁、梁により構成されており、このうち柱は、外壁の転倒強度を検討するうえで、基本的な部材だと考えられる。そこで筆者らは、研究の第一段階として、外壁の基本部材である柱を対象として、縁切り形状をパラメータとした転倒実験を行い、縁切り形状と柱の転倒強度の関係を検討した⁴⁾。

その結果、図3(a)に示すように、転倒方向に対して前方2列の主筋を残すことが、縁切り形状として適切だと分かった。この場合は、主筋の位置を確認するため、主筋より外周のコンクリートを削る。主筋は転倒方向の後方を削り、転倒方向に対して前方の2列を残す。さらに、転倒方向の前方のコンクリートを、転倒方向に対して2列の主筋の中央付近まで削ると、柱の転倒強度は、コンクリート強度の影響をほとんど受けずに、最も前方に位置する主筋の座屈強度に依存することが分かった。また、この縁切り形状とすると、柱が建物の外側に転倒する場合は、コンクリートの圧縮強度の影響により、建物の内側に転倒する場合よりも、柱の転倒強度が高くなり、転倒しにくくなる。従って、この縁切り形状は、屋外に転倒する公衆災害を防止しながら、屋内に比較的倒しやすい方法と考えられる。

一方、図3(b)に示すように、転倒方向の前方に位置する主筋を1列残し、その主筋より前方にコンクリートがない縁切り形状は、この主筋を中心にして、主筋が曲げ破壊するため、柱の転倒強度は非常に小さかった。このような縁切り形状は、柱が不安定化しやすく、縁切り作業中に、柱が転倒する危険が高いと考えられる。

なお本論では以後、試験体の転倒方向の前方を、単に「前方」とし、転倒方向の後方を、単に「後方」とする。また、鉄筋の列数は、転倒方向に対する列数を示すものとする。

2.2. 縁切り高さの影響

縁切り高さも、柱の転倒強度を決定する要素になると考えられることから、縁切り高さをパラメータとした柱の転倒実験を行った⁵⁾。縁切り形状は、前節の検討から適切な形状と考えられる、図3(a)に示すような、前方の

コンクリートを削り、前方の主筋を2列残した柱とした。

実験の結果、柱の転倒強度は、前方主筋の座屈または、曲げに依存することが分かった。前方主筋の座屈発生の有無は、前方主筋の細長比 λ と限界細長比 Λ の関数に依存した。ここで、細長比 λ とは、座屈強度を表す指標であり、限界細長比 Λ とは、オイラー荷重が弾性限荷重に等しくなる時の細長比である。前方主筋の λ が Λ より小さいと、柱の転倒強度は、前方主筋の曲げに依存し、前方主筋の λ と Λ がほぼ同じ値であると、柱の転倒強度は、前方主筋の降伏点付近での座屈に依存した。また、前方主筋の λ が Λ より大きい場合は、柱の転倒強度は、前方主筋の弾性座屈に依存した。

3. 外壁の転倒強度に及ぼす縁切りの影響に関する検討

3.1. 検討方法

本章では、外壁の縁切り形状等をパラメータとした転倒実験を行い、適切な縁切り方法について検討した。さらに、外壁の縁切り方法と転倒強度の関係をより定量的に評価するために、外壁の転倒強度の計算方法を構築した。

3.2. 縁切り形状をパラメータとした外壁の転倒実験

3.2.1. 試験体概要

3.2.1.1. 試験体の寸法と重量

実験に用いた試験体を図4に示す。試験体の形状は、実務者ヒアリングの結果を参考にして、柱1本に壁と梁が付いたものとした。図4より、試験体は壁、柱、梁、土台により構成され、土台以外が外壁部分になる。外壁部分の高さは約3mであり、水平長さは1.74mである。また、壁の厚さは15cm、柱の断面は24cm×24cm、梁のせいは高さ30cm×幅24cmである。

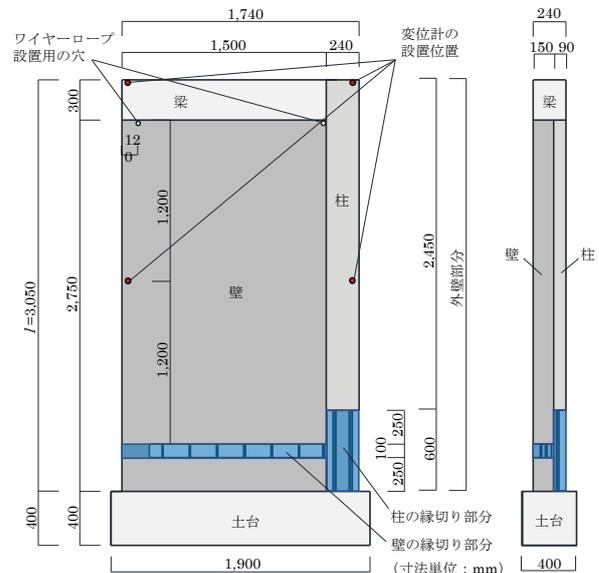


図4 実験に用いた試験体

なお、外壁部分の重量は、約 20kN である。

これらの試験体について、柱と壁の下部を縁切りした。柱は、柱の下端から高さ 60cm までを縁切りし、壁は、柱の縁切り高さの半分の位置を中心に、高さ 10cm を縁切りした。これらは、実務者ヒアリングの結果を参考にしたものである。

3.2.1.2. 材料特性

試験体の材料特性を表 1 に示す。試験体の壁および柱のコンクリートの呼び強度は 24N/mm² である。壁の縦筋については、種類は SD295A であり、呼び名は D10 である。柱の主筋については、種類は SD345 であり、呼び名は D22 である。表 1 に示すコンクリートの圧縮強度は JIS A 1107 と JIS A 1149 に準じて行った試験結果であり、主筋の引張強度は JIS G 3112 に準じて行った試験結果である。

3.2.1.3. 縁切り形状

試験体の縁切り部分の断面を図 5 に示す。試験体は 4 タイプ用意し、試験体名を図 5 に示すように、それぞれ I-1、I-2、I-3、I-4 とした。

図 5 より、I-1 は、解体現場で採用されている縁切り形状であり、本研究における標準試験体である。I-1 の柱は前方の主筋を 2 列残し、前方のコンクリートを削った。壁は、壁の端を削らず、それ以外のコンクリートを削り、主筋は残した。

I-2 も解体現場で採用されている縁切り形状の一つである。I-2 の柱の縁切り形状は I-1 と同じであるが、壁は、壁の端と転倒方向前方を残して、後方のコンクリートを切断し、主筋を 1 列切断した。

I-3 は、壁のコンクリートを全て削ったモデルであり、I-1 と比較して、壁の端のコンクリートの影響を調べるためのモデルである。

I-4 は、縁切りとして切りすぎと考えられるモデルであり、柱と壁ともに、前方のコンクリートと主筋を削り、主筋が 1 列になるように残したモデルである。

3.2.2. 実験概要

実験概要を図 6 に示す。図 6 に示すように、試験体の

表 1 試験体の材料特性

(a) コンクリート

試験体の部位	コンクリートの種類	呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	粗骨材最大寸法 (mm)	セメントの種類	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
柱	普通	24	18	20	N	22,300	36.8
壁	普通	24	18	20	N	25,800	39.9

(b) 鉄筋

試験体の部位	種類	呼び名	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
柱の主筋	SD345	D22	190,000	382	568	24
壁の縦筋	SD295A	D10	206,000	391	529	27

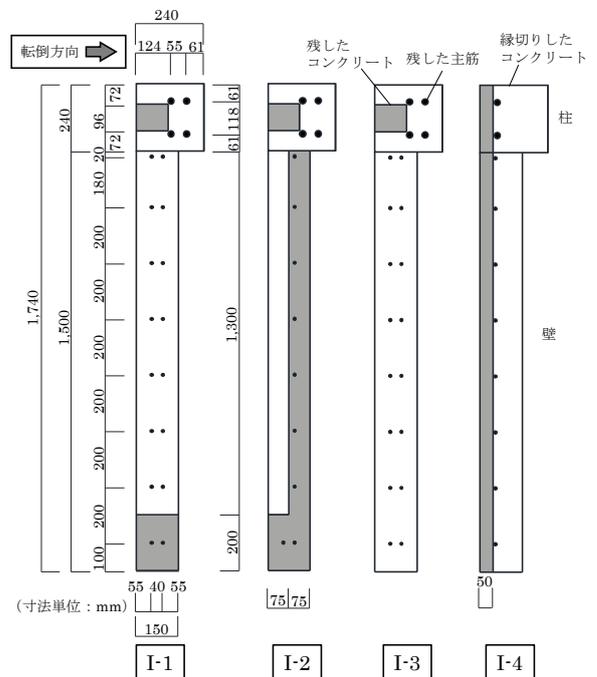


図 5 試験体の縁切り部分の平衡断面図

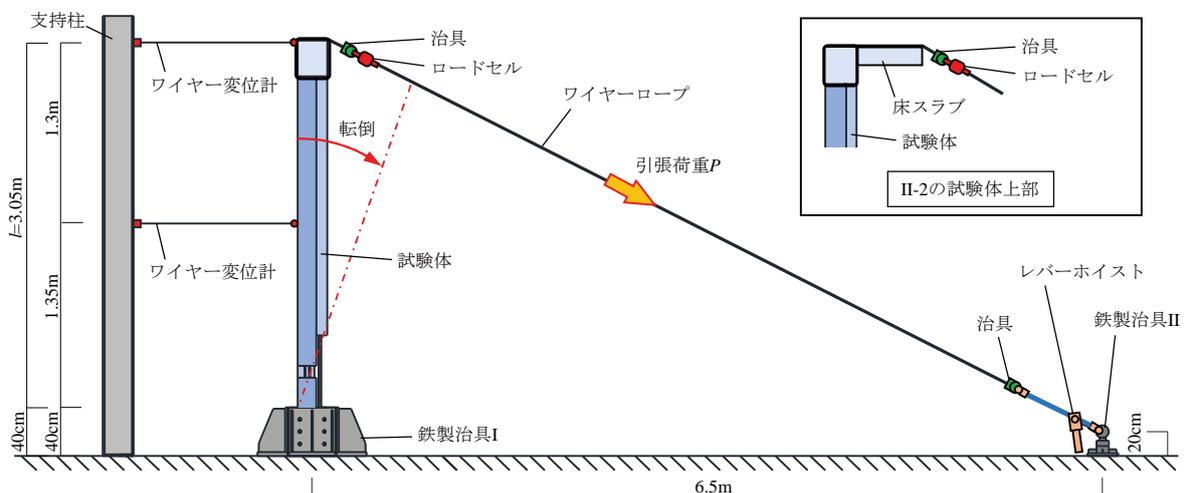


図 6 外壁の転倒実験の概要

土台上に鉄製治具 I を設置し、試験体を反力床に固定した。解体現場では、図 2 に示すように、外壁の梁にワイヤロープを 2 本巻き付け、それらのワイヤロープを、それぞれ 1 スパン離れた柱に設置して、レバーホイストを用いて、外壁を引き倒している。この状況を再現するため、本実験では、2 本のワイヤロープを、それぞれ図 4 に示すワイヤロープ設置用の穴に通して、図 7 に示すように梁に巻き付け、さらに、それらのワイヤロープを、図 6 に示すように、試験体から水平に 6.5m 離れた鉄製治具 II に、レバーホイストを介して設置した。ワイヤロープは、解体現場で一般的に使用されている 6×24、直径 14mm の JIS G 3525 に規定されているものを用いた。

実験では、レバーホイストによりワイヤロープに張力を与えて、試験体を引き倒した。このとき、ワイヤロープの上部に設置したロードセルにより、ワイヤロープの引張荷重を計測した。変位については、図 4 に示す、試験体の上部と中央部の左右両端付近に設置したワイヤ変位計により、試験体の転倒変位を計測した。

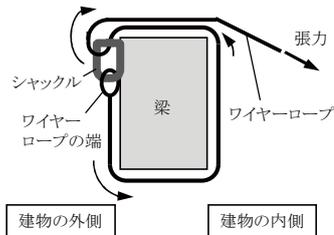
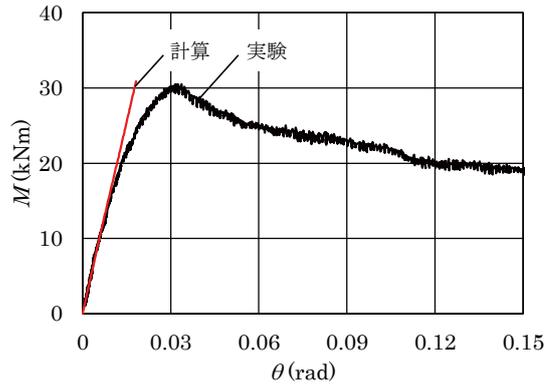


図 7 試験体へのワイヤロープの巻き方 (梁断面図)

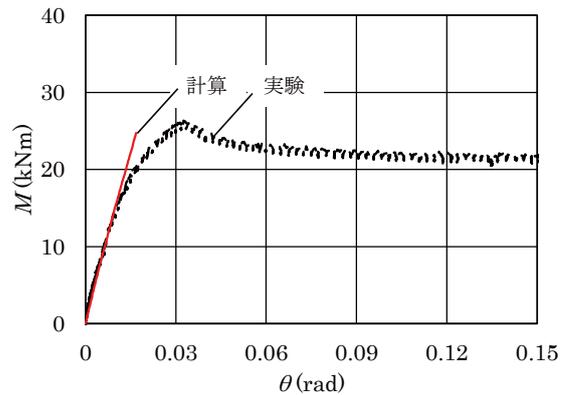
3.2.3. 実験結果と考察

実験結果を図 8 と表 2 に、柱下部の破壊状況を図 9 に、試験体の破壊状況を図 10 に示す。図 8 は計測結果より求めた外壁下端の曲げモーメント M と外壁転倒の部材角 θ の関係である。表 2 には、 M の最大値である M_u と、 M_u に対応する部材角 θ_u 、および弾性剛性 K を示した。

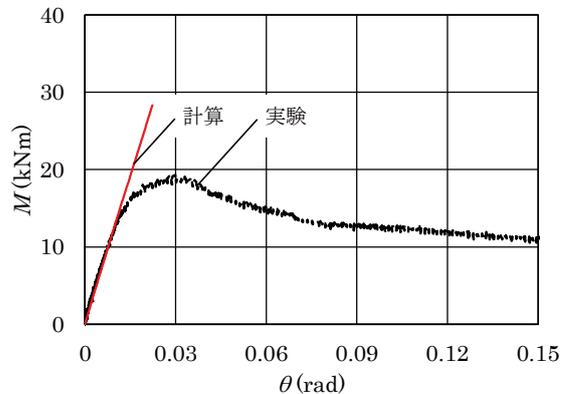
図 8 と表 2 より、試験体 4 体のうち、最も M_u の値が大きかったのは、I-1 であり、次いで I-2 の値が大きかった。どちらの試験体も、 K と θ_u の値は、ほぼ同じであり、転倒強度は、図 9 に示すように、柱の前方主筋の座屈に依存した。 $M-\theta$ 関係における、 M_u に達した後の負勾配は、I-1 よりも I-2 の方が緩やかだった。これは、図 5 に示す I-2 の壁の前方にあるコンクリートの圧縮強度の影響だと考えられる。ただし、I-1 の負勾配も急激に減少しているわけではないため、解体現場で I-1 のように縁切りしても、 M_u に達した後に、外壁が直ちに転倒することはないと考えられる。I-1 と I-2 の外壁頂部を水平に引っ張った場合、I-1 は $30.5\text{kNm}/3.05\text{m}=10\text{kN}$ の力が必要であり、I-2 は $26.3\text{kNm}/3.05\text{m}=8.6\text{kN}$ の力が必要である。第 4 章で記述するが、外壁に設置するワイヤロープは、直線になるほど張る必要はなく、ややたるみがある状態に張れば、外壁が建物の外側に転倒しても建物外周に設置した足場に当たることはない。ややたる



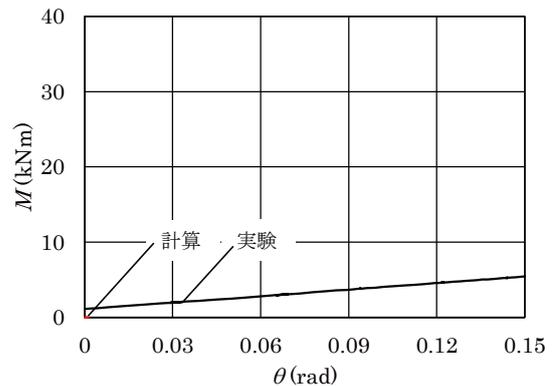
(a) I-1



(b) I-2



(c) I-3



(d) I-4

図 8 曲げモーメント M と部材角 θ の関係

みがある状態のワイヤロープの引張力は 0.5kN 程度であり、この張力であれば、I-1 と I-2 は、下部の縁切り作業中に、外壁が転倒する危険性は低いと考えられる。どちらの縁切り形状にするかは、解体現場の状況によると考えられるが、壁部分の縁切り形状をみると、コンクリートのみを削る I-1 の方が、主筋も切断する I-2 に比べて作業性は良いと考えられる。

図 8 と表 2 より、I-3 は I-1 に比べて、 M_u の値が 37% 程度低かった。図 5 に示すように、I-3 の縁切り部分には、壁にコンクリートがないため、壁の端にコンクリートがある I-1 よりも強度は低くなる。ただし、この部分のコンクリートの面積は小さくなく、試験体の転倒強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。それよりも、図 4 に示すように、I-3 では、引き倒しているときに外壁がねじれたため、このねじれの方が、試験体の強度低下に及ぼす影響は大きかったと考えられる。外壁下部を縁切りするときは、コンクリートを全て削って、主筋のみを残すと、外壁が不安定になりやすく危険である。解体現場では、壁の端のコンクリートを残した方が良く考え

られる。

試験体 I-4 は、試験体の設置作業中に縁切り部分のコンクリートが破断し、ワイヤロープを用いて引っ張る前に自立できなくなった。実験において、ワイヤロープの引張荷重はゼロであったため、図 8 に示す I-4 の $M-\theta$ 関係は、試験体の自重により外壁下端に作用する曲げモーメントの値のみを示した。表 2 に示す I-4 の M_u の値は、外壁が自立していると仮定した場合の外壁の自重による曲げモーメントの計算値である。ただし、この M_u の値は計算値であるため、実際にはこの値より低い値で転倒した可能性がある。I-4 のように、前方のコンクリートと主筋を切削して、壁と柱ともに主筋を一例残した縁切り形状は、外壁が自立することは難しく、縁切り作業中に外壁が転倒する危険性が高い。I-4 のような縁切り形状は切りすぎであり、解体現場でこのような形状に切削してはいけない。

3.3. 断面形状をパラメータとした外壁の転倒実験

3.3.1. 検討概要

実務者ヒアリングの結果より、解体現場では、柱部分の縁切り高さを 60cm～80cm 程度にするとのことであった。また、外壁を引き倒すとき、外壁上部の床スラブを残さない場合と、残す場合があり、残す場合は床スラブを転倒方向に 80cm 程度まで残すとのことであった。そこで、前節では、縁切り高さを 60cm とした床スラブなしの試験体を用意して、縁切り形状について、標準試験体の I-1 とそれ以外の試験体を比較した。

表 2 実験結果

試験体名	K (kNm/rad)	M_u (kNm)	θ_u (rad)
I-1	1,606	30.5	0.033
I-2	1,557	26.3	0.033
I-3	1,382	19.3	0.030
I-4	—	1.1	0.000

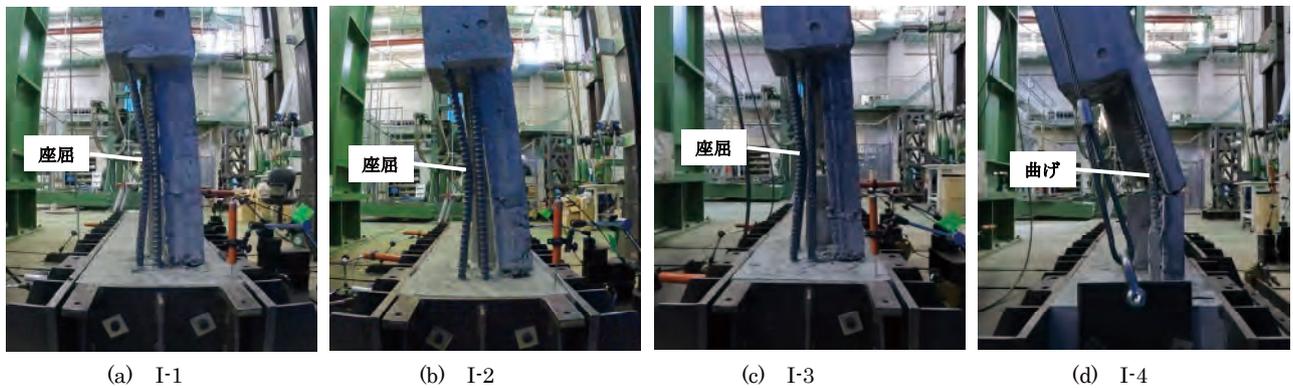


図 9 柱下部の破壊状況

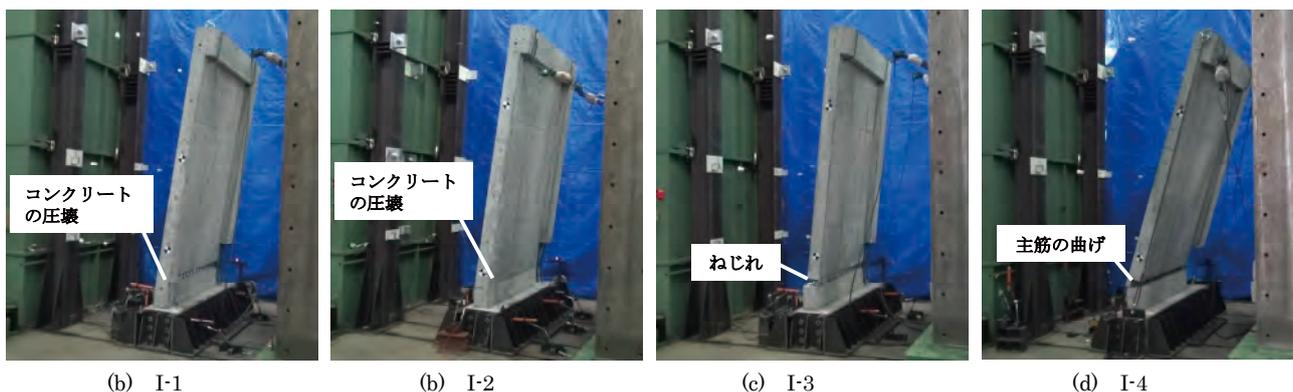


図 10 試験体の破壊状況

本節では、転倒工法の安全性を確認するため、ヒアリング結果を参考にして、柱の縁切り高さを 80cm とした試験体と、床スラブを転倒方向に 80cm 残した場合の試験体を用意して実験を行い、それぞれ前節の I-1 の結果と比較した。

3.3.2. 試験体と実験概要

実験に用いた試験体を図 11 に示す。柱の縁切り高さを 80cm とした試験体を II-1 とし、外壁上部に床スラブを残した試験体を II-2 とした。試験体の外寸と材料特性は、前節の試験体と同じであり、外壁下部の縁切り形状は、本研究の標準試験体である図 5 の I-1 と同じである。

図 11 に示すように、II-1 の壁部分の縁切り位置は、柱の縁切り高さの中央とし、壁部分の縁切り高さは I-1 と同じ 10cm とした。

II-2 の床スラブの幅は外壁の幅と同じ 1.74m であり、床の厚さは 15cm である。また、II-2 には、柱の上部に、梁も転倒方向に 80cm 残した。残した梁のせいは高さ 30cm×幅 24cm である。

実験概要は図 6 に示すとおりであり、試験体の設置・加力・計測方法は前節の方法と同じである。なお、II-2 については、実務者ヒアリングの結果を参考にして、図 12 に示すように試験体上部にワイヤロープを設置した。

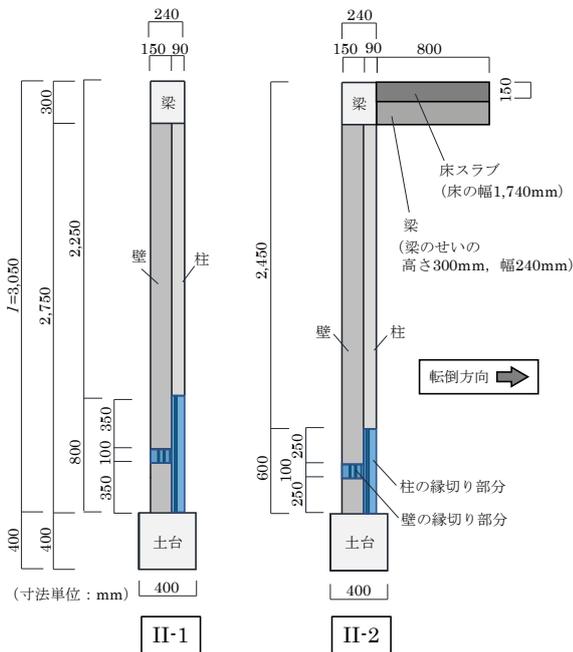


図 11 実験に用いた試験体の側面図

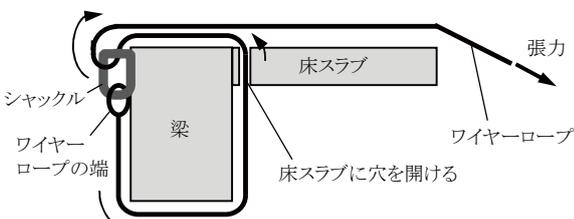
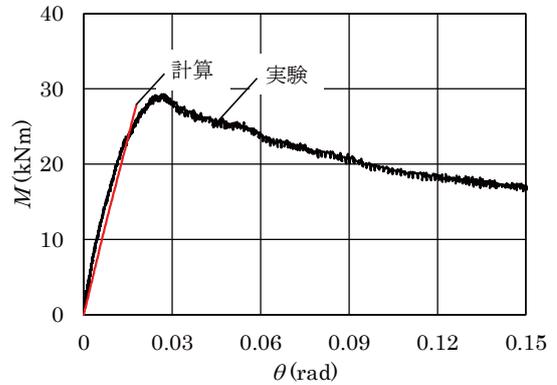


図 12 試験体 II-2 へのワイヤロープの巻き方 (梁断面図)

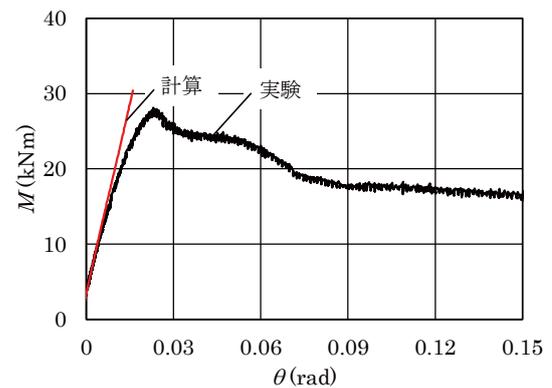
3.3.3. 実験結果と考察

実験結果を図 13 と表 3 に、柱下部の破壊状況を図 14 に示す。図 13 の縦軸は外壁下端の曲げモーメント M であり、横軸は外壁転倒の部材角 θ である。表 3 には、 M の最大値である M_u と、 M_u に対応する部材角 θ_u 、および弾性剛性 K を示した。

図 14 より、II-1 と II-2 の転倒強度は、ともに柱の前



(a) II-1



(b) II-2

図 13 曲げモーメント M と部材角 θ の関係

表 3 実験結果

試験体名	K (kNm/rad)	M_u (kNm)	θ_u (rad)
II-1	2,118	29.3	0.027
II-2	1,513	28.1	0.023



(a) II-1

(b) II-2

図 14 柱下部の破壊状況

方主筋の座屈に依存した。また、図 8、図 13、表 2、表 3 より、II-1 は I-1 に比べて、 M_u の値が 4%程度低かった。これは、II-1 の方が、柱の縁切り高さが高いため前方主筋の座屈長さが長くなり、オイラー荷重が低くなったためだと考えられる。一方、II-2 は I-1 に比べて、 M_u の値が 8%程度低かった。これは、床スラブの重量の影響により、外壁の下端部に作用する曲げモーメントが大きくなったためだと考えられる。II-1 と II-2 の強度については、実験誤差があったと考えられるが、これらの影響はあったと考えられる。II-1 と II-2 は、I-1 よりも最大強度は低いものの、I-4 のように強度が極端に低いわけではなく、外壁下部の縁切り作業中に、外壁が転倒する危険性は低いと考えられる。

3.4. 外壁の転倒強度の計算

3.4.1. 計算方法

外壁の転倒強度を、より定量的に評価するために、外壁の転倒強度の計算方法を検討した^{5,6)}。計算は、最初に表 1 の材料試験結果を参考にして、コンクリートと主筋の応力 σ とひずみ ϵ の関係を設定し、それらの関係に従って、外壁断面の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係を計算した。その後、外壁の転倒を図 15 のようにモデル化し、外壁下端の曲げモーメント M と部材角 θ の関係を計算した。この計算では、外壁の下端をピン、上端をローラとして、一定軸力のもとに部材下端に曲げモーメント M を与え、部材の変形は、先に計算した外壁断面の M - ϕ 関係に従うものとした。さらに、縁切り部分の前方主筋が座屈することを考慮して、縁切り部分の前方主筋に作用する軸力と曲げモーメントの関係から、座屈発生の有無を判定した。計算は、主筋の応力が引張強さに達するか、前方主筋が座屈すると判定されるまで行った。

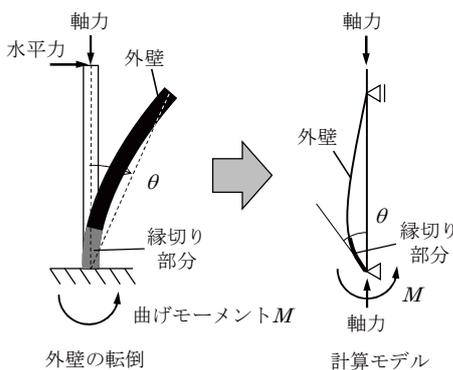


図 15 外壁の転倒と計算モデル

3.4.2. 計算結果

計算結果を図 8 と図 13、および表 4 に示す。表 4 には、柱下端の曲げモーメント M の最大値 M_u と、表 4 の K と同じ方法で算出した弾性剛性 K' を示した。

図 8 と表 2 と表 4 より、I-3 については、計算結果の方が実験結果より値が高い。これは、実験では、図 10 (c) のようにねじれが発生しているためである。本計算は、

ねじれについては考慮していないことから、計算結果の値が高くなった。この結果より、I-3 の実験のように、ねじれが発生すると不安定になり、ねじれなかった場合に比べて強度が小さくなることが分かった。それ以外の試験体については、最大強度付近での剛性が、計算結果の方が実験結果より大きい、 M_u と M'_u の値は概ねよい対応を示しており、本研究で検討した計算方法により、 M_u を推定できることが分かった。

表 4 計算結果

試験体名	K' (kNm/rad)	M'_u (kNm)
I-1	1,683	30.9
I-2	1,386	24.7
I-3	1,531	28.3
I-4	21	0.0
II-1	1,617	27.9
II-2	1,694	30.2

4. ワイヤロープの張力実験

4.1. 検討概要

転倒工法では、外壁の建物外側への転倒防止のために、ワイヤロープを外壁に設置した状態で、外壁下部を縁切りする。このワイヤロープの張力により、縁切り作業中に外壁が転倒することが考えられるので、実験により、ワイヤロープの張力とたるみの関係を調べた。

4.2. 実験概要

実験概要を図 16 に示す。外壁を想定した鉄骨柱を反力床に設置し、その鉄骨柱の上部にロードセルを介してワイヤロープを設置した。本実験は外壁を引き倒す実験ではなく、外壁に設置するワイヤロープの張力とたるみを調べる実験であるため、外壁を簡素化した鉄骨柱を用いて実験を行った。また、解体現場では外壁を 1 層ごとに引き倒すことから、1 層程度の高さを想定して、ワイヤロープを鉄骨柱の高さ 3.4m の位置に設置した。また、解体現場では、ワイヤロープを外壁から 1 スパン離れた柱等に設置して外壁を引き倒すことから、1 スパン程度離れたことを想定して、鉄骨柱から水平方向に 6.5m 離れた位置に鉄製治具を設置し、その鉄製治具にワイヤロープを設置した。解体現場では、レバーホイストを用いてワイヤロープを引っ張っていることから、本実験でも、ワイヤロープの下端部にレバーホイストを設置し、このレバーホイストを用いて張力を作用させた。

実験に用いたワイヤロープは、解体現場で一般的に使用されている、6×24、直径 14mm、破断力 96.6kN の JIS G 3525 に規定されているものである。

実験では、ワイヤロープの上部に設置したロードセルにより、ワイヤロープに作用する張力 T を計測した。ワイヤロープのたるみについては、ワイヤロープの張力 T

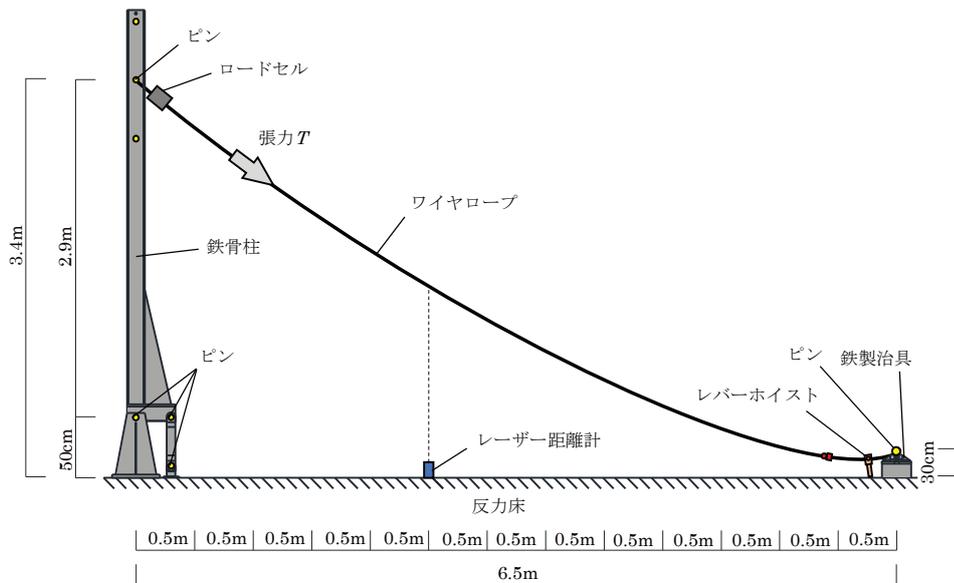


図 16 ワイヤロープの引張実験の概要

ごとに、レーザー距離計を用いて、地面からワイヤロープまでの鉛直距離を、水平方向 0.5m おきに計測した。

4.3. 実験結果

4.3.1 ワイヤロープの張力とたるみの関係

実験結果を図 17 に示す。図の縦軸は地面からワイヤロープまでの高さ y であり、横軸は鉄骨柱から鉄製治具までの距離 x である。図中の曲線は、ワイヤロープの張力 T が 0.1kN, 0.5kN, 3kN, 5kN の場合のワイヤロープのたるみ形状を示す。図 17 より、張力が大きくなるほど、たるみは小さくなり、張力 T が 3kN と 5kN の場合は、ほぼたるみがない状態になった。張力 T が 3kN と 5kN の場合は、たるみの形状がほぼ重なっており、これ以上張力をかけても、たるみの形状が変わらないほど張った状態になったと考えられる。

張力 T が 0.1kN の場合は、明らかにたるみがある状態である。たるみが大きい場合は、解体現場で外壁が建物の外側へ転倒すると、ワイヤロープにより外壁の転倒が制止される前に、外壁が建物の外周に設置された足場に当たって、足場を転倒させる可能性がある。引張材のたるみを、どの程度許容するかについては、引張材のたるみと外壁の建物外側への転倒変位 δ の関係を検討する必要があると考えられる。そこで、次節において、ワイヤロープのたるみと、図 18 に示すような外壁の建物外側への転倒変位 δ の関係を調べ、足場を転倒させる可能性について検討した。

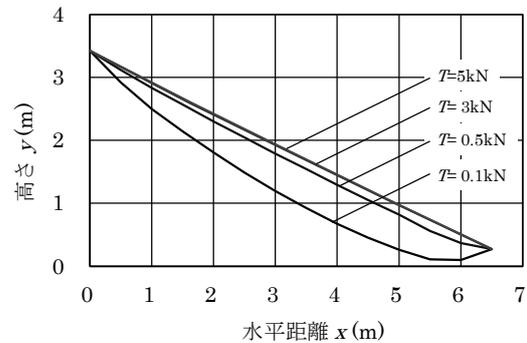


図 17 引張材のたるみ形状

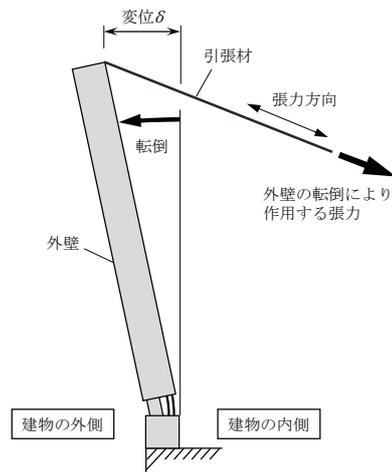


図 18 外壁の建物外側への転倒

4.3.2 足場転倒の可能性

前節で得られた実験結果を基にして、表 5 に示す一般的な規模の建物 η の外壁モデルが、建物の外側に転倒した場合の、ワイヤロープの張力 T と外壁の建物外側への転倒変位 δ の関係を計算すると、図 19 のようになる⁸⁾。

ここで、建物外周に設置する足場の建物の間隔を考えると、「足場先行工法のガイドライン」(平成 18 年 2

月 10 日改正) に、建物と足場の作業床との間隔を 30cm 以下にするように示されている。また、労働安全衛生規則 第 563 条において、足場の建地と床材(作業床)との隙間は 12cm 未満とされている。これらの値を参考にして、図 20 に示すように、建物と足場の作業床との間隔を 30cm とし、足場の建地と作業床との間隔を 12cm とすると、一般的な足場の建地の直径は約 5cm であるの

表 5 外壁モデルの寸法と単位体積重量

部材	部位	寸法
壁	厚さ	18cm
柱	断面	80cm
		80cm
梁	断面	70cm
		40cm
壁・柱	高さ	3.4m
壁・梁	長さ	3.25m
材料		単位体積重量
鉄筋コンクリート		24kN/m ³

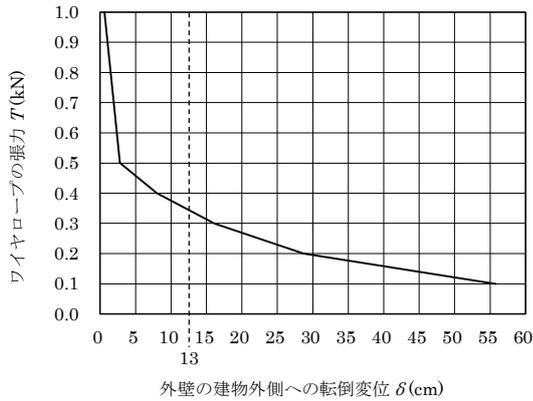


図 19 引張材の張力 T と外壁の建物外側への変位 δ の関係

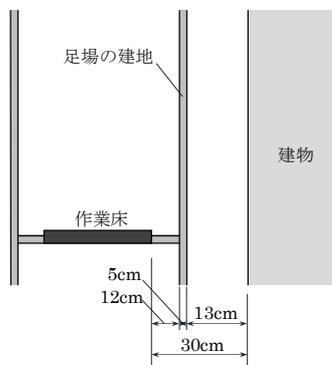


図 20 建物と足場との間隔

で、建物と足場の建地との間隔は 13cm (=30cm- 12cm - 5cm) になる。本研究では、この 13cm を基準にして、足場を倒す可能性について検討した。

解体現場では施工誤差等があることから、外壁の建物外側への転倒変位 δ の値について余裕をもって検討すると、図 19 に示すように、ワイヤロープの張力 T が 0.5kN であれば、 δ の値は 5cm 以下になるので、足場を倒す可能性は低いと考えられる。

図 8 と表 2 より、適切な縁切り形状と考えられる I-1 の最大曲げモーメント M_u は 30.5kNm である。試験体の外壁部分の高さは 3.05m であるので、I-1 試験体を引き倒すためには、約 10kN ($\approx 30.49\text{kNm}/3.05\text{m}$) の張力が必要である。ワイヤロープの張力 T が 0.5kN であ

れば、適切な縁切り形状とした I-1 のような外壁であれば、縁切り作業中に、ワイヤロープの張りすぎが原因で、外壁が建物の内側へ転倒することはないと考えられる。

図 17 より、 $T=0.5\text{kN}$ の場合のワイヤロープのたるみ形状は、 $T=3\text{kN}$ や $T=5\text{kN}$ の場合のように張ってほぼ直線になった状態に比べると、張力が緩んでややたるんだ状態である。転倒工法において、ワイヤロープを外壁に設置する際は、直線になるほど張る必要はなく、張った状態から張力を緩めて、ややたるんだ状態にすれば良いと考えられる。

5. 仮設部材を用いた外壁の転倒防止実験

5.1. 実験概要

転倒工法において、縁切り作業中に、外壁が建物の内側に転倒することを防止するための方法が確立されていないことから、仮設部材を用いた簡便な外壁の転倒防止工法を提案し、その強度等を実験により検討した⁹⁾。

実験概要を図 21 に示す。実験に用いた仮設部材は、断面の外径が 48.6mm、厚さが 2.4mm の単管パイプであり、長さ h は、1m、1.5m、2m の 3 種類である。図 21 より、反力床に外壁を模擬した鉄骨柱（以下、仮想柱とする。）を設置し、その仮想柱に単管パイプを設置した。単管パイプと仮想柱との角度は、単管パイプの自立のしやすさと、設置のしやすさ、および外壁下部の縁切り作業の作業性を考慮して、30 度とした。単管パイプの上端

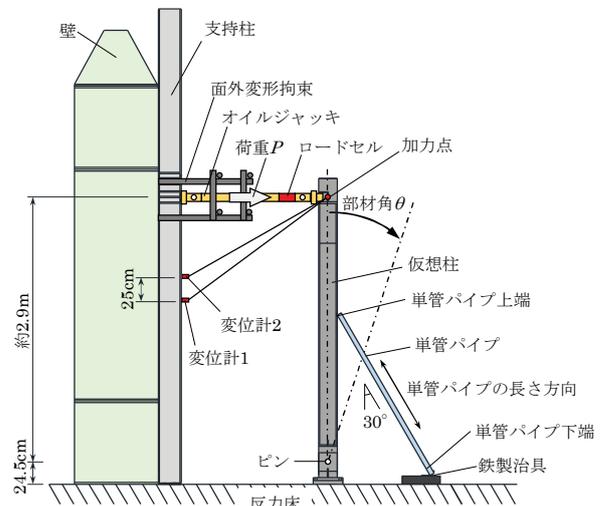
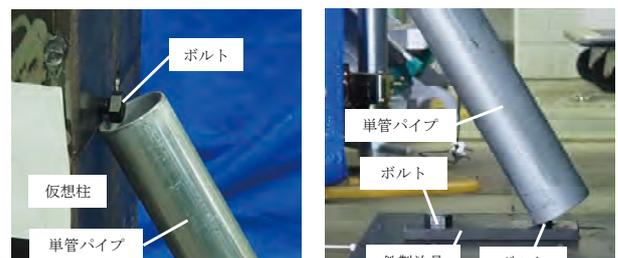


図 21 外壁の転倒防止実験の概要



(a) 単管パイプ上端 (b) 単管パイプ下端

図 22 単管パイプの設置状況

は、図 22 (a) に示すように、仮想柱にねじ込んだボルトに設置し、単管パイプの下端は、図 22 (b) に示すように、長さ 130mm、幅 50mm、厚さ 9mm の鉄板にボルトを取り付けた鉄製治具に設置した。鉄製治具と床との接続にもボルトを用いている。ボルトのねじの呼びは、M16 (ボルトのねじの直径が約 16mm) であり、ボルトの強度区分は、一般的に普通ボルトと呼ばれる 4.8 (最小引張強さ 420N/mm²) のものである。

実験では、外壁が転倒することを再現するために、仮想柱の上部にオイルジャッキを設置して、仮想柱を水平方向に加力した。以下、図 21 に示すように、オイルジャッキと仮想柱の接点を、加力点とする。仮想柱下端の境界条件は、外壁下部の切削により外壁が転倒することを想定して、ピン接合とした。ピンから加力点までの高さは約 2.9m である。加力の際に、オイルジャッキに設置したロードセルにより、加力点に作用する水平荷重を計測した。このとき、ワイヤ変位計により、加力点における仮想柱の転倒変位を計測した。変位計については、計測結果より仮想柱の部材角を計算するため、2 個の変位計を鉛直方向に 25cm 離して設置した。

5.2. 実験結果

実験結果を図 23 と表 6 に示す。図 23 の縦軸は加力点における仮想柱の水平荷重 P であり、横軸は変位計の計測結果より計算した仮想柱の部材角 θ である。表 6 には、加力点における仮想柱の最大水平荷重 P_m と、 P_m に対応する仮想柱の転倒角 θ_m 、および単管パイプの長さ方向に作用する最大荷重 P_{pm} を示す。

図 23 と表 6 より、加力点における仮想柱の最大水平荷重 P_m の値は 7.6kN から 8.0kN であり、単管パイプの

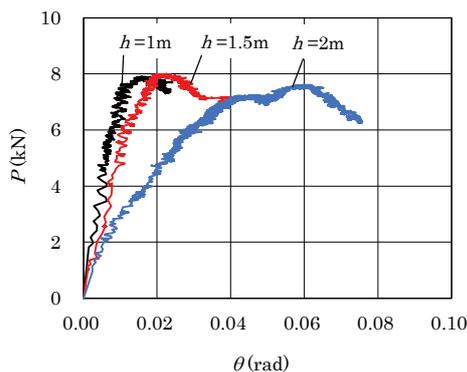


図 23 単管パイプに作用する力 P と仮想柱の部材角 θ の関係

表 6 実験結果と外壁モデルが転倒した場合の計算結果

単管パイプの長さ	実験結果			外壁モデルの転倒に関する計算結果	
	h (m)	P_m (kN)	θ_m (rad)	P'_{pm} (kN)	a
2	7.9	0.018	29.3	3.5	8.4
1.5	8.0	0.022	40.8	5.3	7.7
1	7.6	0.060	66.3	20.8	3.2



図 24 単管パイプの座屈

長さ方向に作用した最大荷重は、単管パイプの長さ h が短くなるほど大きな値となった。また、本工法の強度は、図 24 に示すように、単管パイプの座屈に依存した。

5.3. 性能評価

本工法の性能を評価するため、仮想の外壁モデルが転倒した場合に、単管パイプの長さ方向に作用する荷重を計算し、本工法が外壁モデルの転倒を防止できるか検討した。

表 5 に示す外壁モデルが転倒した場合に、 θ_m に対応する単管パイプの長さ方向に作用する荷重 P'_{pm} を計算すると、表 6 に示すような値になり、単管パイプの長さ h が短くなるほど大きな値となった⁹⁾。ここで、 P_{pm}/P'_{pm} の値を a として表 6 に示す。 a は本工法の強度の余裕の度合いを示しており、 a の値が大きいかほど外壁の転倒に対して強度に余裕があることを示す。実際の建設現場において、仮設構造物は、安全率が 2.0 以上であれば、個々の材料の材質的・寸法的なばらつき等に対して、安全側に対応できるものとされている¹⁰⁾。 a の値は、単管パイプの長さがいずれの場合も 2.0 以上であるので、本工法を用いて、外壁の倒壊防止に対応できると考えられる。

6. 転倒工法の作業手順と留意事項

本研究で行った実験と計算の結果と、解体工事実務者へのヒアリング結果より、転倒工法を安全に行うための作業手順と、その留意事項を検討した。それらを、主に図 25 と図 26 を参照しながら、以下に示す。

- ① 外壁にワイヤロープを設置する (図 25 ①)。ワイヤロープは壁に穴をあけ、図 7 に示すように、梁に巻き付ける。ワイヤロープは直線になるほど張らずに、ややたるみがある状態にする。
- ② 壁と梁を垂直方向に切断する (図 25 ②)。このとき、梁の鉄筋は残す。外壁は柱を 1 本残した状態で、1 層 1 スパン程度に切り出す (図 26 ①)。
- ③ 柱の下部を削る (図 25 ③)。削る高さは 60cm から 80cm とする (図 26 ②)。転倒後方の主筋を削り、転倒前方の主筋を、転倒方向に対して 2 列残す (図

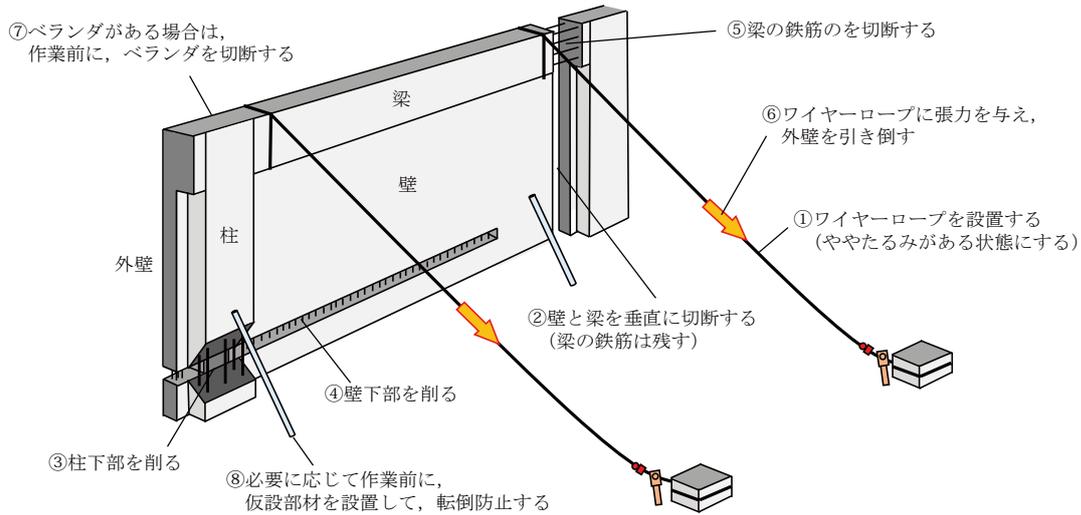


図 25 転倒工法の作業手順

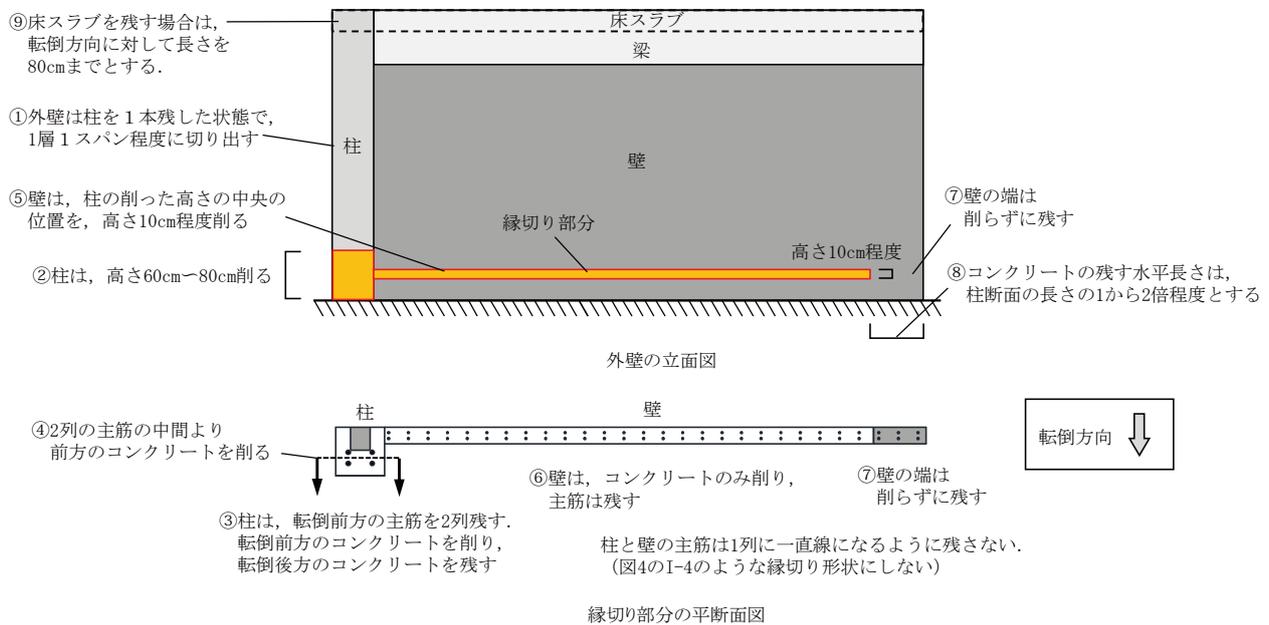


図 26 外壁の縁切りに関する留意事項

26 ③). コンクリートは、残した 2 列の主筋の中間より前方を削り、転倒後方のコンクリートを残す(図 26 ④).

- ④ 壁の下部を削る(図 26 ④). 削る位置は、柱の削る高さの中央とし、削る高さは、10cm 程度とする(図 26⑤). 削るのはコンクリートのみとし、主筋は削らない(図 26 ⑥). 柱がない側の壁端部は、コンクリートを残す(図 26 ⑦). コンクリートの残す水平長さは、柱断面の長さの 1 から 2 倍程度とする(図 26 ⑧).

なお、図 5 の I-4 のように、柱と壁の主筋が 1 列になるように残し、これらの主筋より前方のコンクリートを全て削った場合、縁切り作業中に外壁が転倒する危険が高いため、注意する必要がある。

- ⑤ 梁の鉄筋を切断する(図 25 ⑤).
⑥ ワイヤロープにより、外壁を引き倒す(図 25 ⑥).
なお、これらの作業前に、ベランダがある場合は、

ベランダを切断する(図 25 ⑦). 外壁上部の床スラブを残して引き倒す際は、転倒方向に対して長さを 80cm までとする(図 26 ⑨). 必要に応じて仮設部材を設置して、外壁の転倒防止措置を講ずる(図 25 ⑧). 仮設部材を設置する際は、断面の外径が 48.6mm、厚さが 2.4mm、長さが 1m~2m の単管パイプを用い、直径 16mm の普通ボルトと厚さ 9mm の鉄板により単管パイプを固定する。

7. まとめ

本研究では、実験と計算により、転倒工法における外壁下部の縁切り方法、ワイヤロープの張り方、および外壁の転倒防止工法を検討し、これらの結果と、解体工事実務者へのヒアリング結果を基に、転倒工法を安全に行うための作業手順とその留意事項を示した。

参 考 文 献

- 1) 解体工法研究会編. 改訂 新・解体工法と積算. 経済調査会. 2018.
- 2) 高橋弘樹, 大幡勝利, 高梨成次. 建築物の解体工事における災害防止対策の検討 (その1 死亡災害の調査). 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国). 2017; 1253-1254.
- 3) 建設業労働災害防止協会編, コンクリート工作物解体工事の作業指針. 建設業労働災害防止協会. 2001.
- 4) 高橋弘樹, 高梨成次, 堀智仁. 転倒工法における縁切り型に関する検討. 労働安全衛生研究. 2020; 13 2: 125-138.
- 5) 高橋弘樹, 高梨成次. 建築物の解体工事における災害防止対策の検討 (その7 縁切り高さをパラメータとした柱の転倒実験の概要), (その8 縁切り高さをパラメータとした柱の転倒実験の結果とその予測方法の検討). 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海). 2021; 1177-11180.
- 6) 高橋弘樹, 高梨成次, 堀智仁. 下端部を切削した鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力の計算方法の検討, 第52回安全工学研究発表会講演予稿集. 2019; 229-232.
- 7) 日本建築学会編, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説. 日本建築学会. 2018.
- 8) 高橋弘樹, 高梨成次, 堀智仁. 建物外壁解体の転倒工法における引張材の張りに関する実験的研究. 労働安全衛生研究. 2022; 15 2: 105-112.
- 9) 高橋弘樹, 高梨成次, 堀智仁. 建築物の解体工事における仮設部材を用いた外壁の倒壊防止工法の基礎的な強度実験. 労働安全衛生研究. 2022; 15 1: 13-22.
- 10) 仮設工業会編, 第10版 型枠支保工・足場工事 計画作成 参画者研修テキスト. 仮設工業会. 2020.