

第3章 弘道館記碑の復旧工事までの調査と設計

第1節 石材の回収保管・状況調査・碑の保護

1 崩落石材の回収・保管

(1) 回収

震災後、復旧方針が定まるまでは崩落した石材には手を着けず、現場の状況を保存していた。崩落石材の回収は平成24年3月20日～31日である(図21～図24)。

回収の方法は、碑身の中軸線の左右、台石の上下に分けて回収位置を記録し、以下の分類でクッション性のある梱包材で梱包した。

- ①文字のあるもの 梱包材 青
- ②文字はないが、平滑面をもつもの 梱包材 白
- ③文字がなく、平滑面もないもの 梱包材 白

なお、小片については、ポリ袋に回収し、分類番号と回収位置を記入した。

(2) 運搬・保管

分類、梱包した石材はコンテナなどに収納し、仮の保管場所とした国老詰所内の弘道館資料展示室に搬入した。最も重い石材で98.5kgあり、運搬には自動車の他、運搬用に作った木製担架やリアカーなどを用いた。



図21 拓本を参考にした崩落前の位置確認



図22 石材の採取位置の記録



図23 採取中に接合関係が判明した石材



図24 石材の梱包状況

2 崩落石材の回収後の被災状況調査

全ての崩落石材を回収した後、碑身と台石の被災状況を調査した。

(1) 碑身の状況

碑身全体に大小の亀裂が多数存在する。大きく崩落した内側に前方に迫り出した石塊があって、本体から剥離し、亀裂の幅は3cm程であった(図25～図27)。亀裂の間に石片が挟まれていると、接合することができないため、直径7mmのファイバースコープを用いて小片の存在を確認した(図28)。

また、碑身背面のコンクリートと台石表面のコンクリートの打継部に沿って隙間が生じており、ここでもファイバースコープを挿入し、隙間にコンクリートの小片を確認した。碑身全体については、碑身上部から重りを糸で下げたところ、上部で4cm程の前傾が確認できた。一方、遺存する碑文面に定規を当てて、スライドさせながら平滑度を調べたところ、定規と碑文面の間に隙間はほとんど

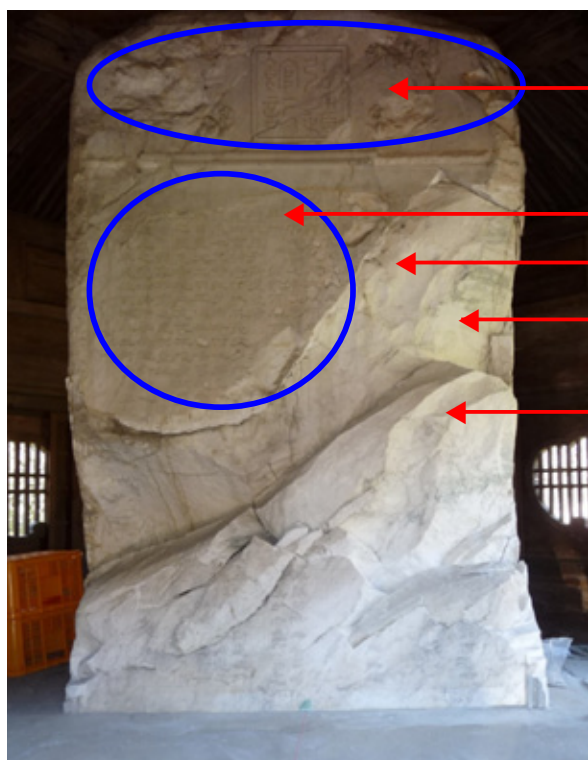


図25 崩落石材整理後の損傷状況



図26 3cmの亀裂部分



図27 ファイバースコープによる亀裂内調査



図28 亀裂内で確認した崩落石材



図 29 碑身の傾きと遺存碑面の平滑度の計測状況

なく、平滑で当時の施工技術の高さを確認できた。

(2) 台石の状況

台石を覆うモルタル面で水平器を当てて計測したが、水平は保たれていた(図 30)。



図 30 台石を覆うモルタル面の水平状況確認

3 碑身の保護

(1) 碑身の養生

残存碑身のうち、亀裂に挟まっている破片や外れそうな石材を取り外した。

大きな亀裂の開口部にはテープを貼り、これ以上小片などが入り込まないような防止処置を行った。大きく迫り出している石塊をロープを使って固定した。このロープは極細ナイロン繊維を編んだもので、二本締めで 100kg 程度のものを持ち上げる強度がある。大きく抉れた部分には発泡スチロールを充ててラッピング材で梱包した(図 31)。

碑身上部の外縁部には薄い剥離があり、ラッピング材が直接当たると割れる恐れがあるため、剥離した隙間に粘土を詰めて、碑面の健全な部分に発泡スチロールを当て、ラッピング材を浮いた位置に巻き付けて、ラッピング材が直接破損箇所に当たらないように配慮した。

ラッピングは碑身全体に及び、巻き付け回数は 10 回を越えている(図 32)。なお、開梱時には発泡スチロールに刻字が写し取られていたため、碑身を持ち上げるための締め付けはかなりの圧力があつたと思われる。

(2) 碑身の転倒防止対策

前傾状態となっている碑身が、余震等により転倒することのないように、記碑転倒防止工事を行った(図 33)。これはその後行われる発掘調査時の作業員の安全を確保するものでもある。杉材でヤグラを組み、斜材は八卦堂の基礎に架ける構造とした。

設 計：伊藤平左エ門建築事務所

設置工事期間：平成 24 年 4 月

施 工：長洲工務店

工 事 費：304 千円



図 31 碑身のラッピング状況



図 32 養生を施した碑身



図 33 碑身の転倒防止対策

第2節 発掘調査

発掘調査の概要は次の通りである。

調査期間	茨城県教育委員会文化課
調査体制	吹野富美夫・芳賀友博（文化財保護主事） 櫻井克己・藤生かな子（嘱託）
調査期間	平成24年4月25日～27日
調査目的と調査方法	今回の試掘調査は、東日本大震災によって被災した弘道館記碑に免震装置を設置するための事前調査で、八卦堂創建時の基壇の有無、基壇の構造、台石の深度等を確認するため、八卦堂内部床面において実施するものである。碑身の正面・背面・左右両側面の4箇所にトレンチを十字状に設定し、実施する（図34）。基壇が発見された場合には、基壇への影響を最小限にすることに配慮しながらも、可能な範囲でサブトレンチを設定して、目的の達成に努めるものとした。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ・基壇が床面を覆う玉砂利層上面から約15cmの深さで全面にわたり確認された（図35）。 ・基壇の上面までに確認された層は、4層（第1～4層）に分層される。 ・第2・3層からは、鉄釘（和釘・洋釘）等が出土した。鉄釘は和釘が主体で、洋釘は少量であった。 ・基壇については、サブトレンチを設定し、玉砂利層上面（室内床面）から63cmの深さまで調査したところ、さらに4層（第5～8層）の版築層を確認した（図36）。いずれも特に締まりの良い礫混じり粘土層で、第7層は寒水石（大理石）の細片を含んでいる。 ・台石を覆うモルタルの厚さは17cm程であり、深さは第5層上面までで、底での厚さは10～16cmである。
調査所見	基壇は創建当初のもので、重要な遺構として現状保存する必要がある。八卦堂の当初の基壇が現在の床面から浅い位置で、良好に残存していることが確認されたことにより、現在の床面を掘り下げて免震装置を設置することは難しい。

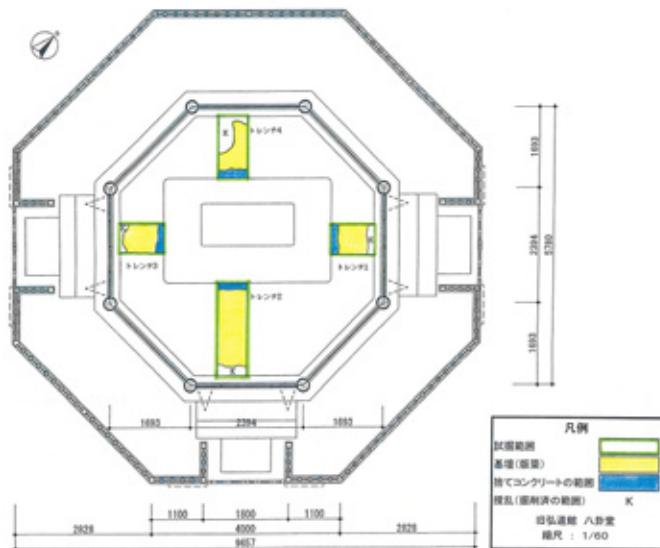


図34 八卦堂の試掘調査平面図（茨城県教育委員会提供）



図35 トレンチ2の基壇検出状況（茨城県教育委員会提供）



図36 八卦堂基壇の断面（茨城県教育委員会提供）

第3節 構造予備調査

1 台石を覆うコンクリートの除去・ホゾ観察調査

(1) 調査方法

碑身と台石の接合部（ホゾ）および台石の状態の把握を目的に、台石の四方4箇所でも部分的に台石を覆うコンクリートを除去した（図37～38）。

(2) 調査期間 平成25年1月

(3) 調査所見 次の通りである。

規模	台石の大きさは、文献に記される寸法に近似する。但し、不整形な部分もあり、若干の誤差がある。 実測値 幅 1,518mm 長さ 3,058mm 高さ 610mm 文 献 幅 5 尺（1,515mm） 長さ 10 尺（3,030mm） 高さ 2 尺（606mm）（1 尺＝303mm）
形状	台石の形状は、上面は平らで側面は若干の内転びとなり、角は大きく丸面をとる。長方形の四隅は未確認ながら現状のコンクリート面と同様に丸みを持つと思われる。
下の状況	西面背面では、版築上に白色の粒状のものを約5cm敷き、台石を据えた状況が確認できた。恐らくは台石の全面に敷設されていると思われる。また、この粒状のものは寒水石の粒ではないかと思われる。
毀損状況	トレンチ内での台石の状況は、北面・東面では健全であるのに対し、南面では亀裂・剥離が多く、西面では欠損している。また南・西面の表面は濃い茶褐色の汚れが付着している。戦災による影響と思われる。
ホゾ	南・東・北面で、碑身・台石の境界にホゾが確認された。その目地幅は6～12mmで、隙間に泥岩の細片を詰めている。
コンクリート	台石を覆うコンクリートは、仕上げ塗りを併せて上面約10cm、側面約25～27cmである。コンクリートには径5mm程度の丸鋼を荒い間隔で入れている。
側面	側面では、台石側に大き目の礫を積んでコンクリートを流し込んでいる。そのため、側面コンクリート内には空洞が多い。

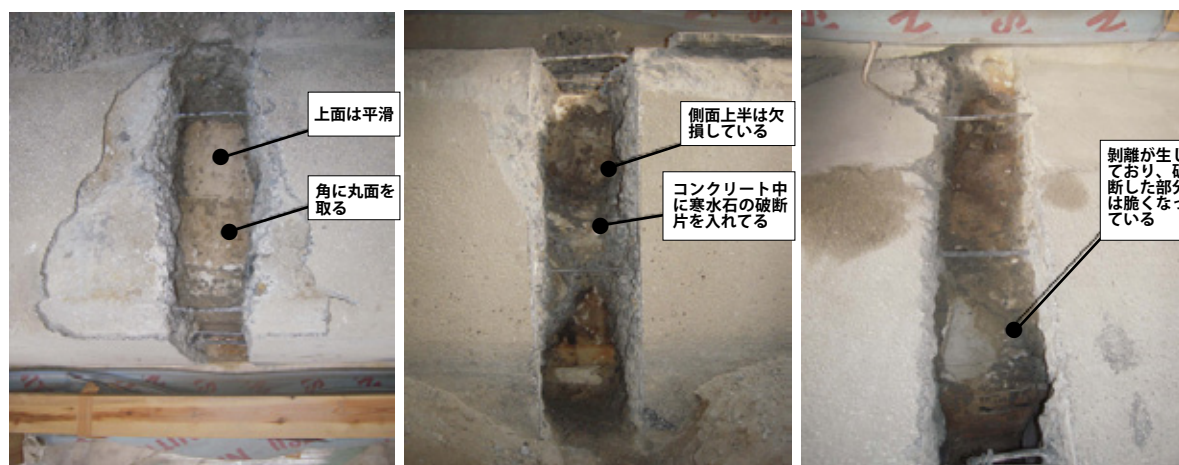


図37 コンクリート除去後の状況（左：正面上面の状況 中央：西面側面の状況 右：南面角部の状況）

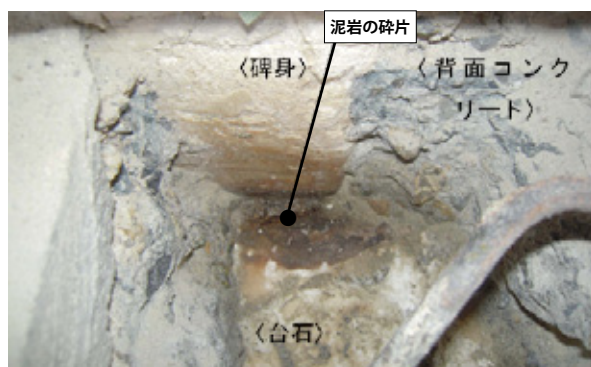


図38 北面ホゾの状況

2 碑身側面の擬岩除去・構造観察調査

(1) 調査方法

碑身両側面（北及び南）の下部で、前記調査箇所の上に調査箇所を設定し、昭和 48 年に設置された擬岩及び FRP を部分的に除去して昭和 28 年に打設されたコンクリートの状態を観察した。

この結果を受けて、背面コンクリートの状態を把握するため、台石コンクリート上面より約 1.2m 高に対象箇所を追加した。

(2) 調査期間 平成 25 年 1 月

(3) 調査所見 次の通りである。

碑身背面の昭和 28 年に打設されたコンクリートの状態	背面コンクリートの厚さは、下部で碑身から約 30cm、上部は碑身背面の凹凸に応じて厚くなる。
	背面コンクリートは台石を覆うコンクリートの上に打設されており、昭和 48 年修理当時の写真から小径丸鋼の差筋が設置されていると思われるが、現状では碑身の前傾に伴って浮いた状態となる。
	背面コンクリートの下部 10cm 程度は脆弱で、手削（てはつ）りによって骨材の砂利が簡単に外れる。
	背面コンクリートは、高約 1.2m の位置（上部）では堅牢な状態であった。恐らくは打設時の状況により下部のみ脆弱となったものと思われる。
	昭和 28 年当時の施工方法として、先ず碑身背面の凹凸を埋める補充コンクリートを打ち、これに補強となる背面コンクリートを打ち継ぎした可能性が高いと考えたが、何れの調査箇所でも明確な打ち継ぎの痕跡は見られなかった。
	昭和 48 年修理時の写真から、背面コンクリートには寒水石の破断片を混入している。
昭和 48 年修理による擬岩の状態	昭和 48 年の修理は、碑身上面及び両側面のコンクリートをはつり取り、凹凸のあるコンクリート面に FRP を塗り、平滑な状態としている。FRP の厚さは 1 ～ 3cm 程度であり、堅牢な状態が維持されている。
	FRP 面に網状ガラス繊維を貼り付け、その上に擬岩材を塗布している。擬岩材は修理時の記録にエポキシ樹脂とあり、恐らくはこれに寒水石粉を混合したものと思われる。厚さ 2 ～ 3mm 程度で、硬い状態が維持されている。

3 まとめ

以上の構造予備調査により、背面コンクリートについて一定の情報を得ることができた。

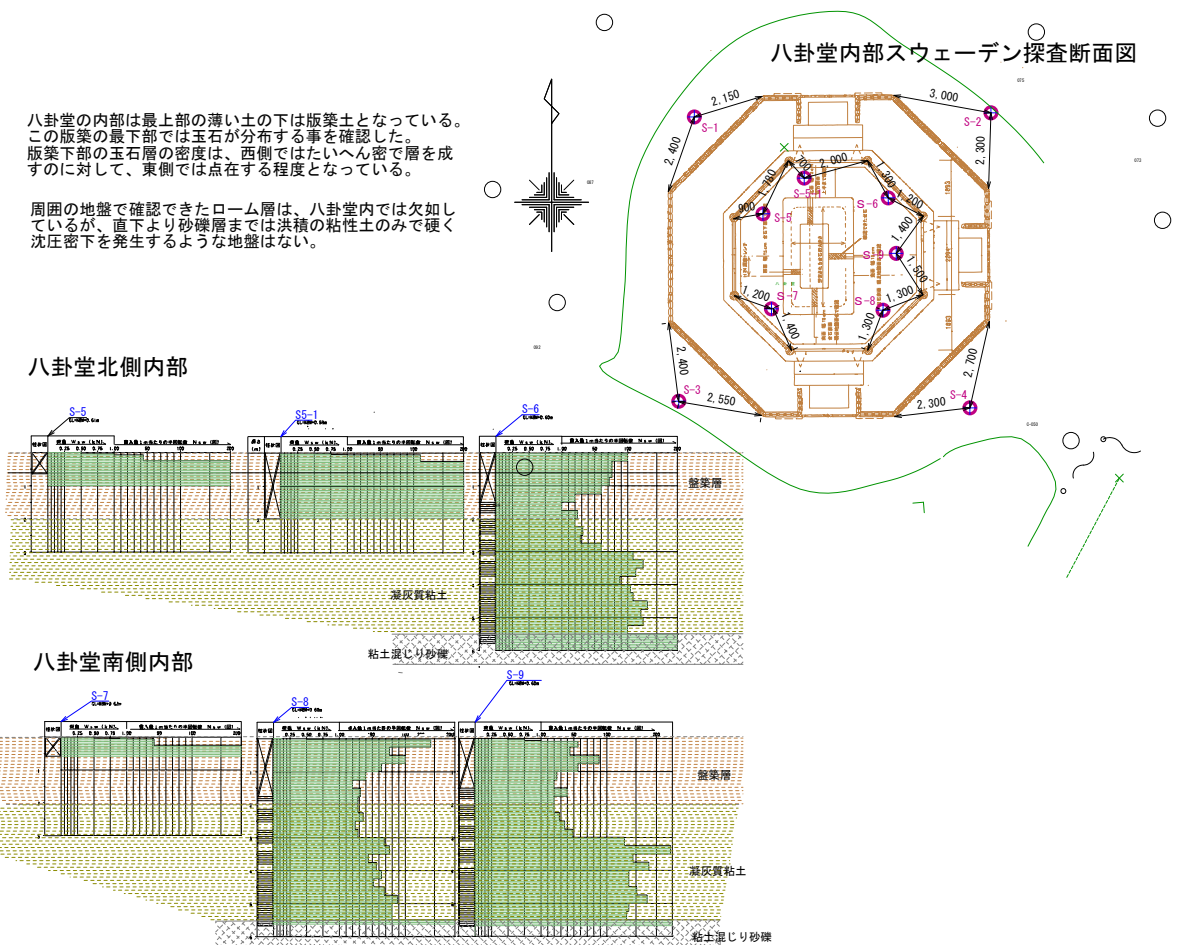
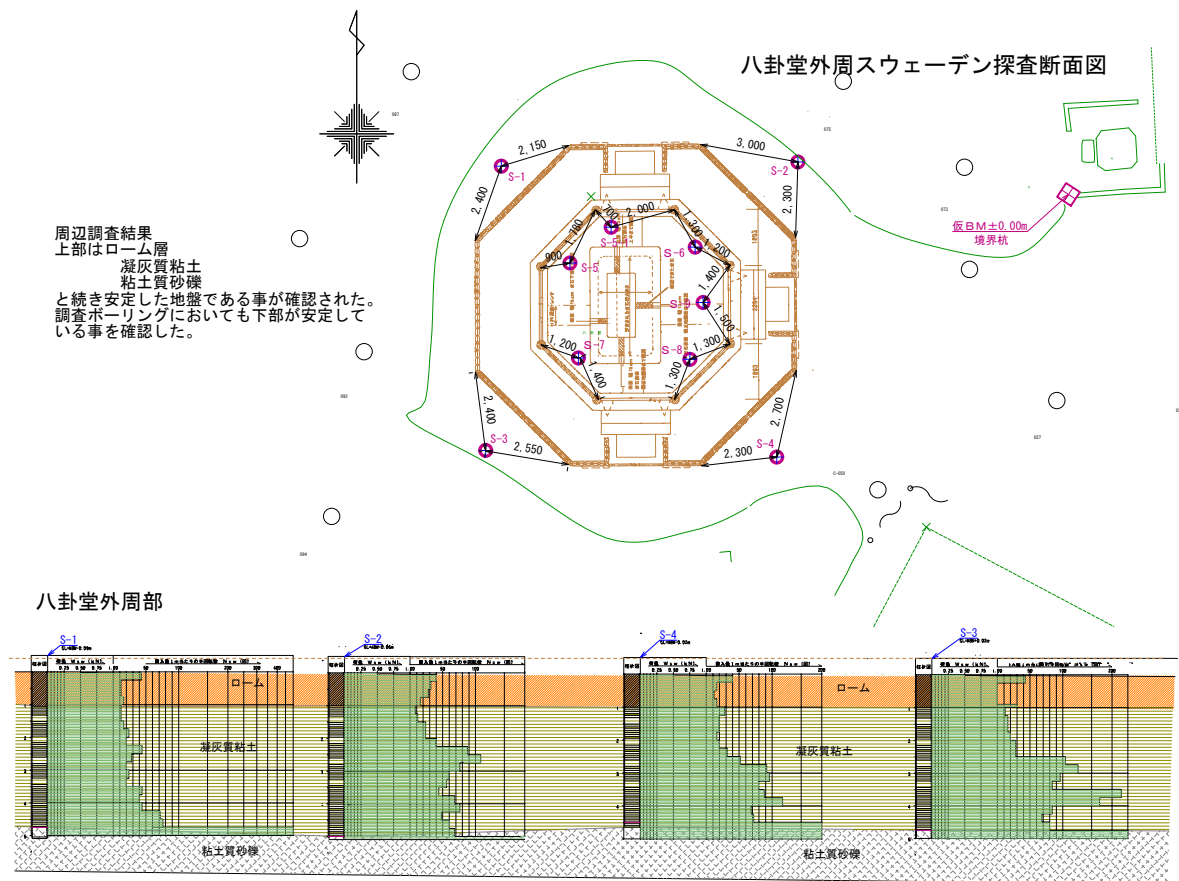


図 40 八卦堂の外周部及び内部におけるスウェーデン式サウンディング探査断面図

3 コーンペネトロメータ調査

八卦堂室内4箇所、八卦堂保護柵付近4箇所、保護柵から数mの2箇所、計10箇所でコーンペネトロメータ調査を実施した（図41）。

堂内は非常に硬質、貫入不能で、 $p_c=1,500\text{kN/m}^2$ 以上であった。一方、保護柵内で 1.5m、八卦堂周辺で 1m 程度掘削されており、強度は低い。

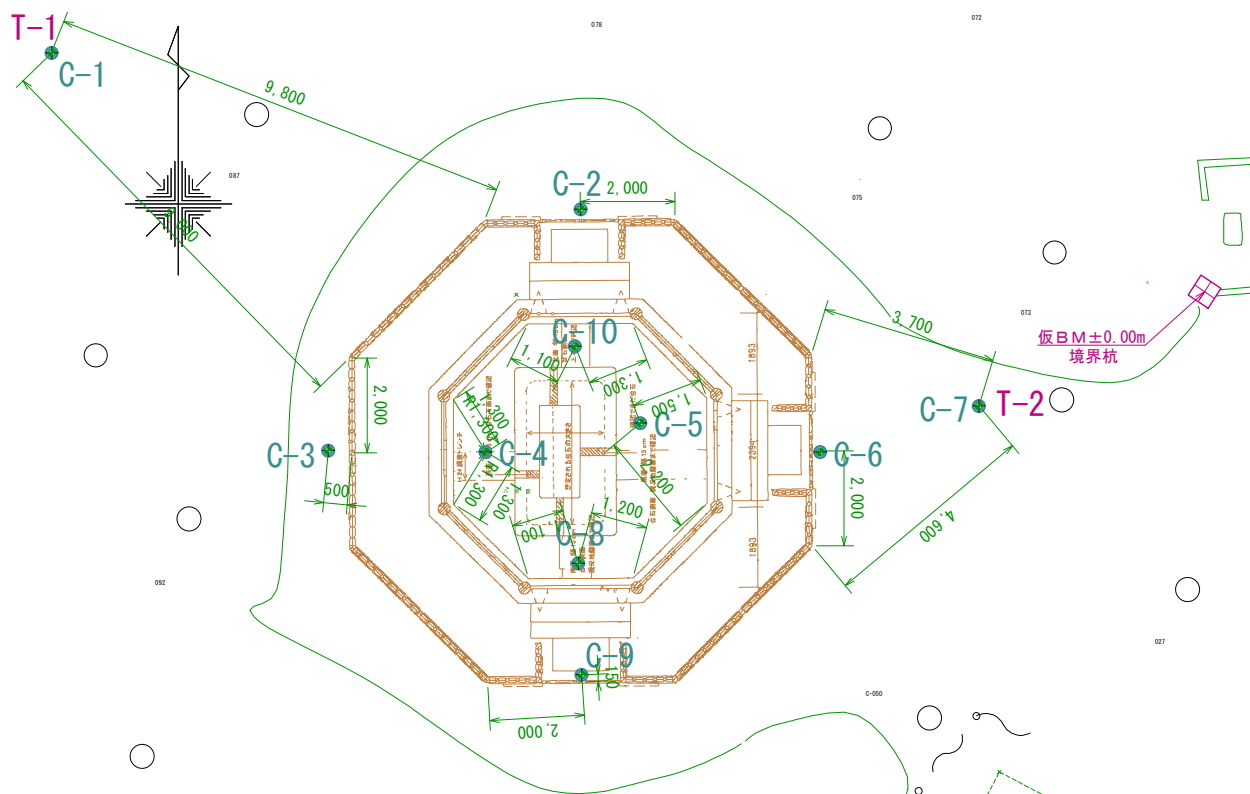


図 41 八卦堂の外周部及び内部におけるコーンペネトロメータ調査結果位置図

4 シュミットハンマー試験

台石の四方4箇所では部分的に台石を覆うコンクリートを除去した部分において、ロックシュミットハンマーにより、寒水石の静弾性係数と一軸圧縮強度を非破壊で測定し、微細亀裂も含めた値の分布傾向を測定した(図42)。

その結果、弾性係数は碑身の安定性を確保できる大きさを持っており、微細な亀裂分布も全体的な分布で、集中する状況を確認していないことを確認した。

5 室内土質試験

地盤の最上層 0.7m までは人為的に乱れていることが確認されているため、それより下部のローム層と有機質粘土層で試験をした。

採集した試料により、粘着力と内部摩擦角、変形係数及び圧密降伏応力を確認した。八卦堂と記碑の基礎を十分に支持できる地盤で、地盤の変形量が地震時も許容する値であり、基礎により圧密沈下を生じる心配も無い地盤である事を確認した。

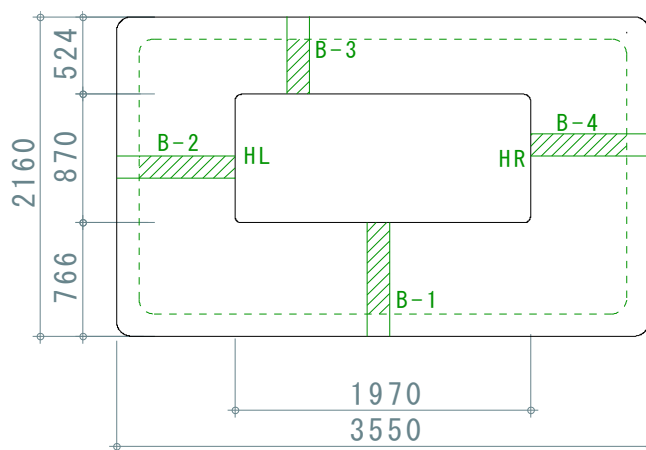


図 42 弘道館記碑台石部におけるシュミットハンマー試験実施状況

第5節 地震時の碑身の安定解析

1 解析の概要

碑身背面に打設されたコンクリート（昭和28年）を除去した形状で、地震による転倒に関する検討を行った。解析条件は大地震を想定し、建築基準法施行令、第88条の地震力の考え方に基づき¹⁾、碑身に加わる横方向の地震力と重量との比を0.3とし、碑身の重心に0.3Gの地震力が静的に加わるとして計算を行った。ここで、Gは重力加速度（980 gal）を示す。

解析結果より、現状のように碑身が、台石に載っているだけの場合、地震による転倒モーメントが、転倒を抑えるモーメントの値より大きくなり、転倒の危険があることが分かった。一方、碑身を台石に接着し、碑身と台石を一体化させた場合には、地震による転倒モーメントが、転倒を抑えるモーメントの値より小さくなり、転倒の危険がないことが分かった。そのため、地震対策のために、碑身を台石に接着することを提案した。

2 碑身の安定解析

碑身および、台石の大きさ、物性値等を表1、表2に示す。

表1 碑身体体の形状、重量

	記号	値	単位
碑身幅	Ah	1.930	m
奥行	Bh	0.583	m
底面積	Sh	1.125	m ²
高さ	Hh	3.285	m
体積	Vh	3.382	m ³
重量	Wh	7440	kg

表2 台石本体の形状、重量

	記号	値	単位
台石幅	Ad	3.156	m
奥行	Bd	1.616	m
底面積	Sd	5.100	m ²
高さ	Hd	0.610	m
体積	Vd	2.966	m ³
埋込深さ	Dv	0.030	m
埋込体積	Vv	0.034	m ³
純体積	Vdv	2.932	m ³
台石重量	Wd	6450	kg

ここで、寒水石の比重は2.2とした。

図43に、弘道館記碑の模式図を示す。地震時に碑身に加わる力は、碑身の重心に0.3Gの地震力が静的に加わるとして検討を行う。この場合、碑身を矢印方向へ転倒させるモーメント Mh1 は、次の式で表すことができる。

$$Mh1=0.3G \cdot Wh \cdot Hh/2 \quad (1)$$

一方、転倒を抑える方向に働くモーメント Mw1 は、次の式で表すことができる。

$$Mw1=G \cdot Wh \cdot Bh/2 \quad (2)$$

(1) 式、(2) 式に、表1の値を入れて計算を行うと以下の結果が得られる。

転倒方向に働くモーメント Mh1 =36 kNm、一方、転倒を抑える方向に働くモーメント Mw1=21 kNm となり、転倒方向に働くモーメントが大きくなり、大地震の場合は、転倒する可能性があることが分かる。ここでは、実際には碑身と台石の間に、鉄製のダボが設置されているが、転倒を押さえるための機能が、小さいと考え、解析には入れてはいない。

次に、碑身と台石が一体化された状態での、地震時の転倒に関する計算を行う。碑身、台石を転倒させるモーメントは、碑身部分の転倒方向に働くモーメント Mh2 と台石部分の転倒方向に働くモーメント Md2 の和になる。この総和を Mt2 とすると以下の式で表すことができる（図44）。

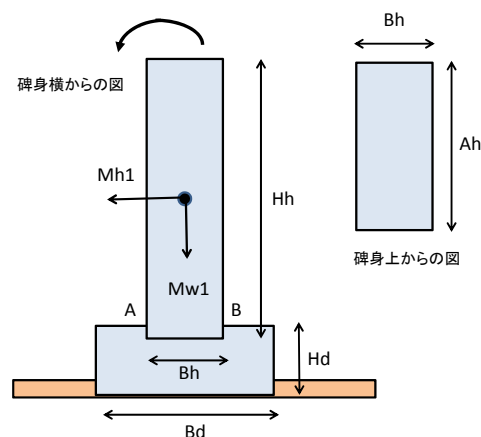


図43 碑身と台石を接着しない場合

$$Mt2 = Mh2 + Md2 = 0.3G \cdot Wh \cdot (Hh/2 + Hd - Dv) + 0.3G \cdot Wd \cdot Hd/2 \quad (3)$$

一方、転倒を抑える方向に働くモーメント $Mw2$ は、碑身の部分と台石の部分のモーメントの和になり、以下の式で示される。

$$Mw2 = G \cdot (Wh + Wd) \cdot Bd/2 \quad (4)$$

(1) 式、(2) 式に、**表 1**、**表 2** の値を入れて計算を行うと以下の結果が得られる。

転倒方向に働くモーメント $Mt2 = 54 \text{ kNm}$ 、一方、転倒を抑える方向に働くモーメント $Mw2 = 110 \text{ kNm}$ となり、転倒を抑える方向に働くモーメントが大きくなり、大地震の場合でも、転倒する可能性がないことが分かる。

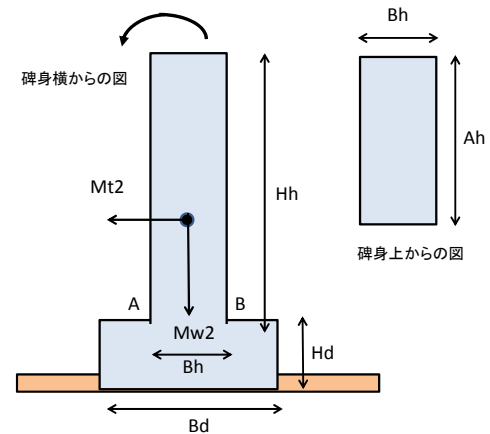


図 44 碑身と台石を接着する場合

3 碑身と台石接着部の応力解析

次に、碑身と台石を接着した場合に、大地震の時に、**図 44** の碑身底部の A 点と B 点に、どのような値の応力が発生するかを求める。地震時に、(1) 式で表したモーメントが碑身に加わる場合に、碑身底面での応力は、碑身重量による応力に、このモーメントによる曲げ応力の影響が加わることで、点 A では、応力が圧縮方向に変化し、点 B では、引っ張り方向に変化することになる。ここで、点 A による応力を σ_A 、碑身重量による応力を σ_C 、地震時に碑身に加わるモーメントによる曲げ応力を σ_T とすると、以下のようになる。

点 A における応力は、

$$\sigma_A = \sigma_C + \sigma_T = \frac{G \cdot Wh}{Sh} + \frac{Mh1 Bh}{I} \quad (5)$$

ここで、 I は、中立軸に関する断面二次モーメントであるので以下の式で表される。

$$I = \frac{1}{12} Ah (Bh)^3 \quad (6)$$

(6) 式を (5) 式に代入すると、以下の式が得られる。

$$\sigma_A = \frac{G \cdot Wh}{Sh} + \frac{6Mh1}{Ah \cdot (Bh)^3} Bh = \frac{1}{Sh} (G \cdot Wh + \frac{6Mh1}{Bh}) \quad (7)$$

同様に σ_B は、下記の式で示される。

$$\sigma_B = \frac{G \cdot Wh}{Sh} - \frac{6Mh1}{Ah \cdot (Bh)^3} Bh = \frac{1}{Sh} (G \cdot Wh - \frac{6Mh1}{Bh}) \quad (8)$$

(7) 式、(8) 式に、**表 1** の値を入れて計算を行うと以下の結果が得られる。

点 A では、 $\sigma_A = 0.40 \text{ MPa}$ 、点 B では、 $\sigma_B = -0.27 \text{ MPa}$ となり、A 点では、圧縮方向の応力が加わり、B 点では、引っ張り方向の応力が加わることになる。そのため、B 点では、現状では碑身が持ち上がり、転倒の危険があることがこの解析結果からも分かる。碑身と台石の接着に、エポキシ樹脂を使用すると、硬化したエポキシ樹脂は、日本工業規格で示される様に¹⁾、15 MPa 以上の引っ張り強度を持っているので転倒を十分に防ぐことができると考えられる。

参考文献

- 1)：建築基準法施行令、第 88 条（地震力）、昭和 25 年 11 月 16 日政令第 338 号、最終改正、平成 26 年 12 月 24 日政令第 412 号、2014
- 2)：建築補修用注入エポキシ樹脂、JIS 6024、日本工業規格、2008

第6節 被災原因と復旧方針

1 被災原因

碑身には元々石特有の極微細な亀裂や節理が潜在していたと考えられる。天保9年の建立後、今回の地震ほどの規模ではないにしろ、安政大地震、関東大震災、その他の地震の影響を受けてきたと考えられるが、明確な被害はなかった。ところが、昭和20年の空襲により八卦堂が全焼した際に、火災で高温にさらされ、元々あった微細な亀裂が拡大したり、新たな亀裂の発生があり、碑身が脆弱になっていたことが考えられる。

また、これらの亀裂については昭和47年当時の技術では亀裂の深いところまでは樹脂充填による石材の強化ができていなかったことも考えられる。

今回の地震は、東西方向すなわち前後方向の揺れが大きく、碑身が前傾することにより、碑身下部前方に応力が集中し、前面の一部が崩落、周辺の亀裂の破断を誘発したと考えられる（図45上）。

2 復旧方針

「弘道館記碑等復旧事業の経過」で記した通り、戦災・震災という被害の大きさから三度とこのようなことのないようにという思いが関係者には強くあり、第1回委員会設立前から修復に関しては免震化が課題となった。しかしながら、台石の地下には当初からの八卦堂の基壇の版築が良好に残されていることが明らかになり、台石の下に免震装置を入れることは困難になった。次に、台石と碑身の間に免震装置を入れることも考えたが、台石を埋設すると、現在の八卦堂の基壇を高くする必要があり、外観の変容が著しくなるなど史跡の現状変更として適当ではないと判断した。実施設計に向けた各種調査の結果、碑身を修理施設に移動させて修理することとした（図45下）。

構造に関する修理方針は、①背面のコンクリートなどの不安定要因を取り除き、建碑当初の構造的な安定性を取り戻すこと、②免震化ではなく、耐震化を図ること、③アラミド繊維を碑身の背面および碑文面下に敷設するなどして、碑身そのものを強化すること、④亀裂の接着や空洞の充填により碑身や台石の強化を図ること、⑤碑身と台石を接着し一体化すること、とした。これらによって耐震化が図られることになる。

外観に関する修理方針は⑥復元はしないが、できるだけ建碑当初の外観を取り戻す、⑦碑文石は碑文面を薄くスライスカットし、碑身内部の石材を接着・強化した後に再構成する、⑧碑文面上部など以前の修理には手を加えない、⑨碑文面の欠失箇所は仕上げ面を一段下げて質感も変えることとした。これらによって修理の履歴を残しながらも、碑文面においては戦災及び震災による欠失部と残存部を明確にした。

なお、これらの修理方針は崩落石材の回収を始めた時点や実施設計時から決まっていたものではなく、その後の検討や、石材の解体等によって記碑の状態がより詳しく把握できるようになってから決定した。特に、⑤の碑身と台石の一体化については、修理も後半に入ってからであり、不可逆的な修理方法に抵抗感がなかったわけではないが、碑身には亀裂が内在している現状に鑑み、決定したものである。

第7節 実施設計

調査や検討を踏まえて、実施設計を完成させた。実施設計図書は大きくⅠ．記碑の仮設修理施設への移動（図46～図52）、Ⅱ．仮設修理施設での作業（図53～56）、Ⅲ．修理後の再設置、に分かれるが、Ⅰ．とⅢ．は手順が逆であるがほぼ同様の図面であるため、ここではⅢ．は省略した。

被災断面模式図

正面側

背面側

碑身

補充コンクリート

背面コンクリート

転倒モーメント

石材の崩落

鉄製ダボ

隙間発生

ダボ穴

補充コンクリート

台石コンクリート

底面前部に過剰な応力

3285

260 100 100

30

100

150

460

610

125

506

583

427

修復模式図

正面側

背面側

補充コンクリート

寒水石部分

背面コンクリートの除去

砕いた寒水石 + エポキシ樹脂

エポキシモルタル

アラジド繊維

凝石材

寒水石

スライスカットした石材

エポキシ樹脂

アラジド繊維

エポキシ樹脂

寒水石

台石コンクリートの除去

凝石処理

台石

接着

図 45 被災時の碑身と碑身の修復模式図

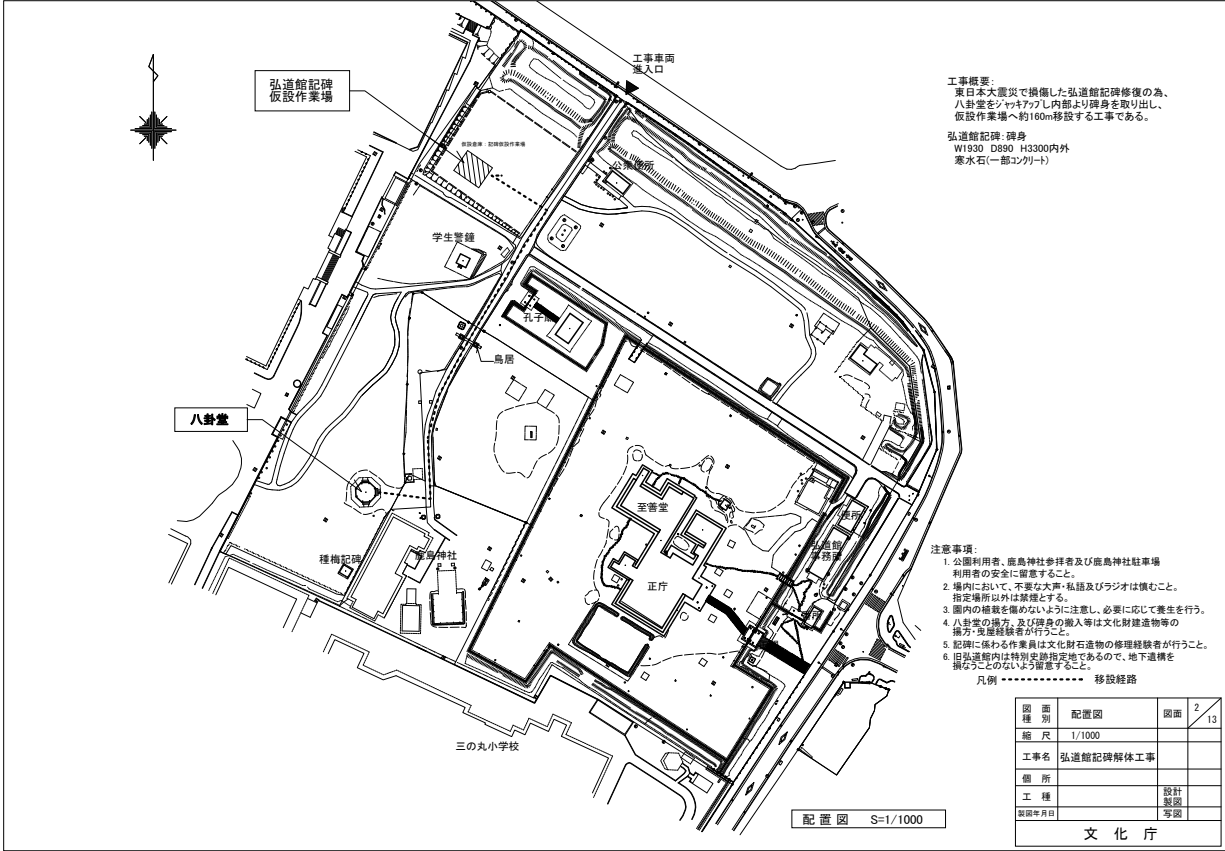
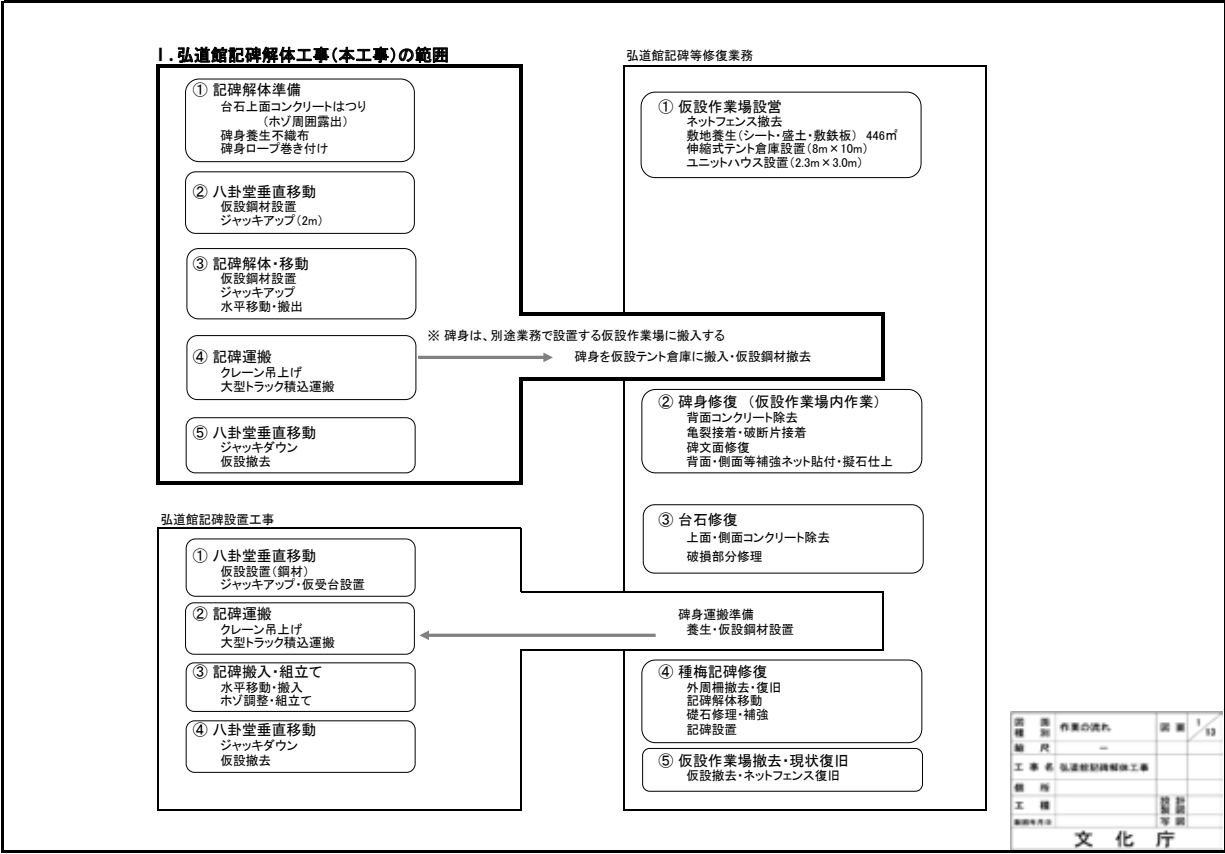


図 46 弘道館記碑の解体修復工事計画図

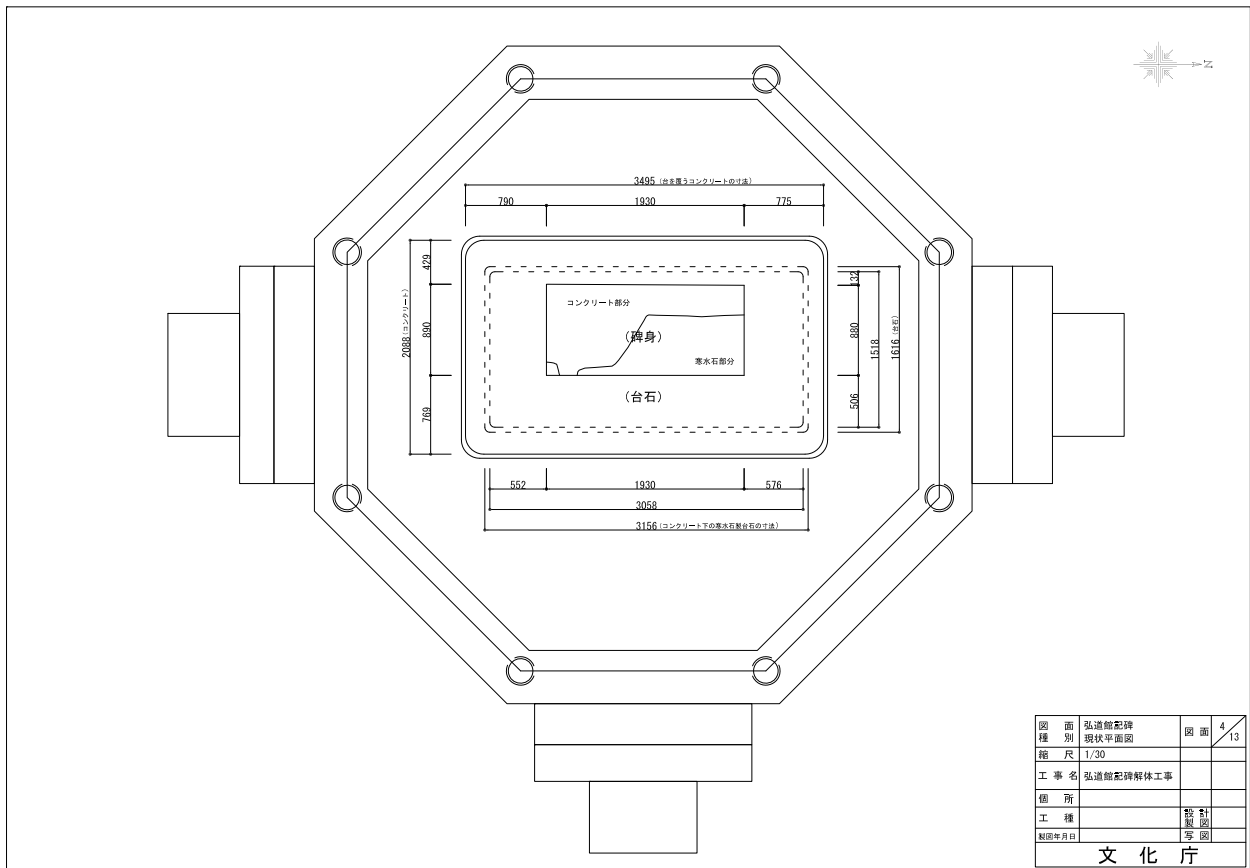
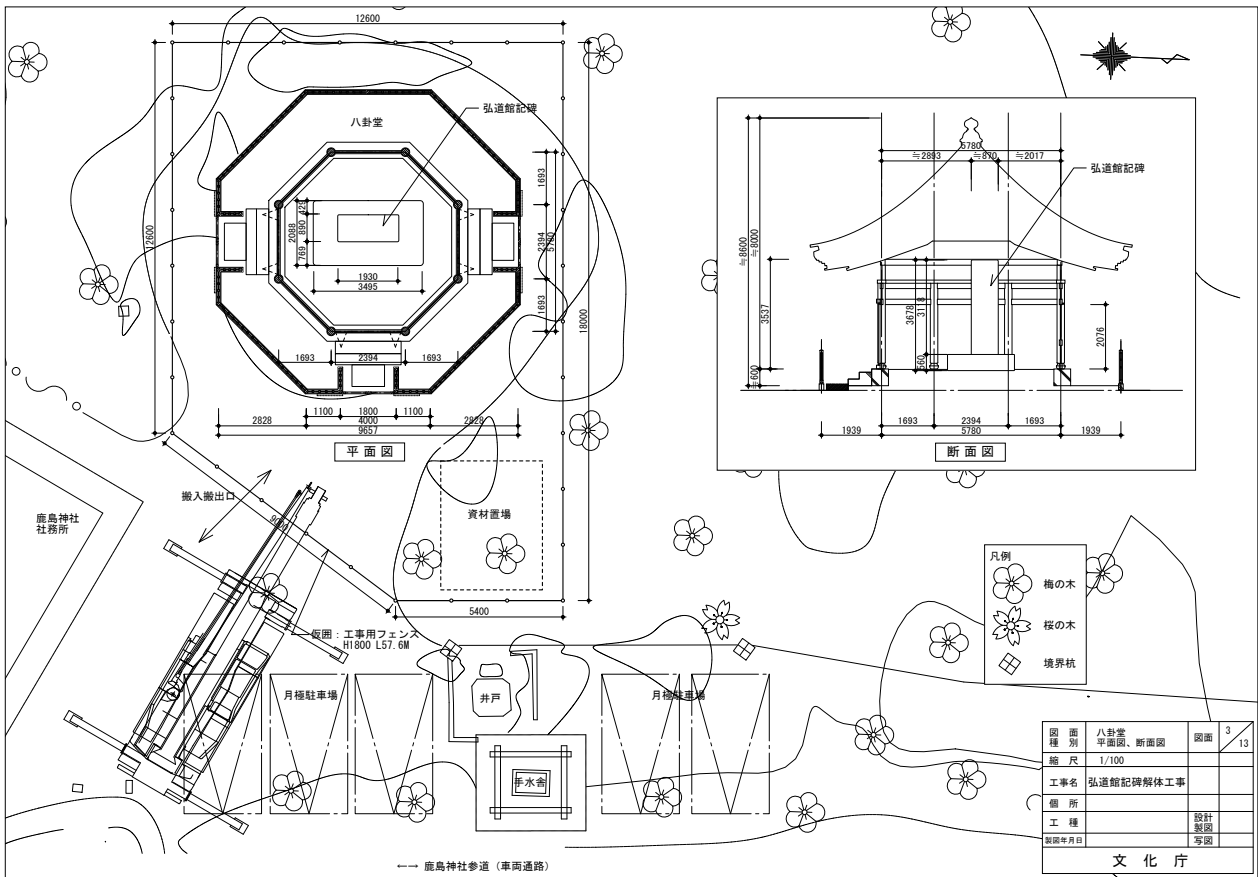


図 47 弘道館記碑の解体修復工事計画図

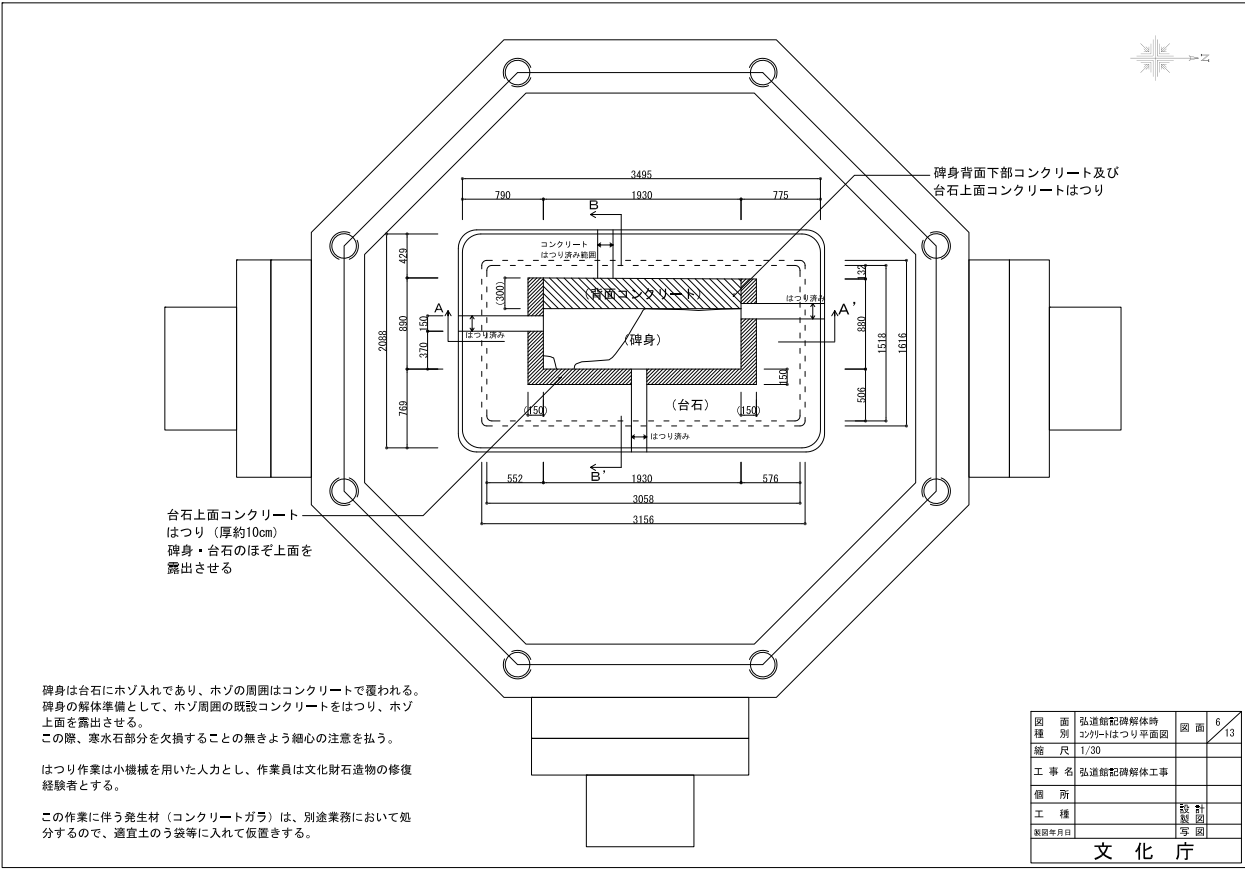
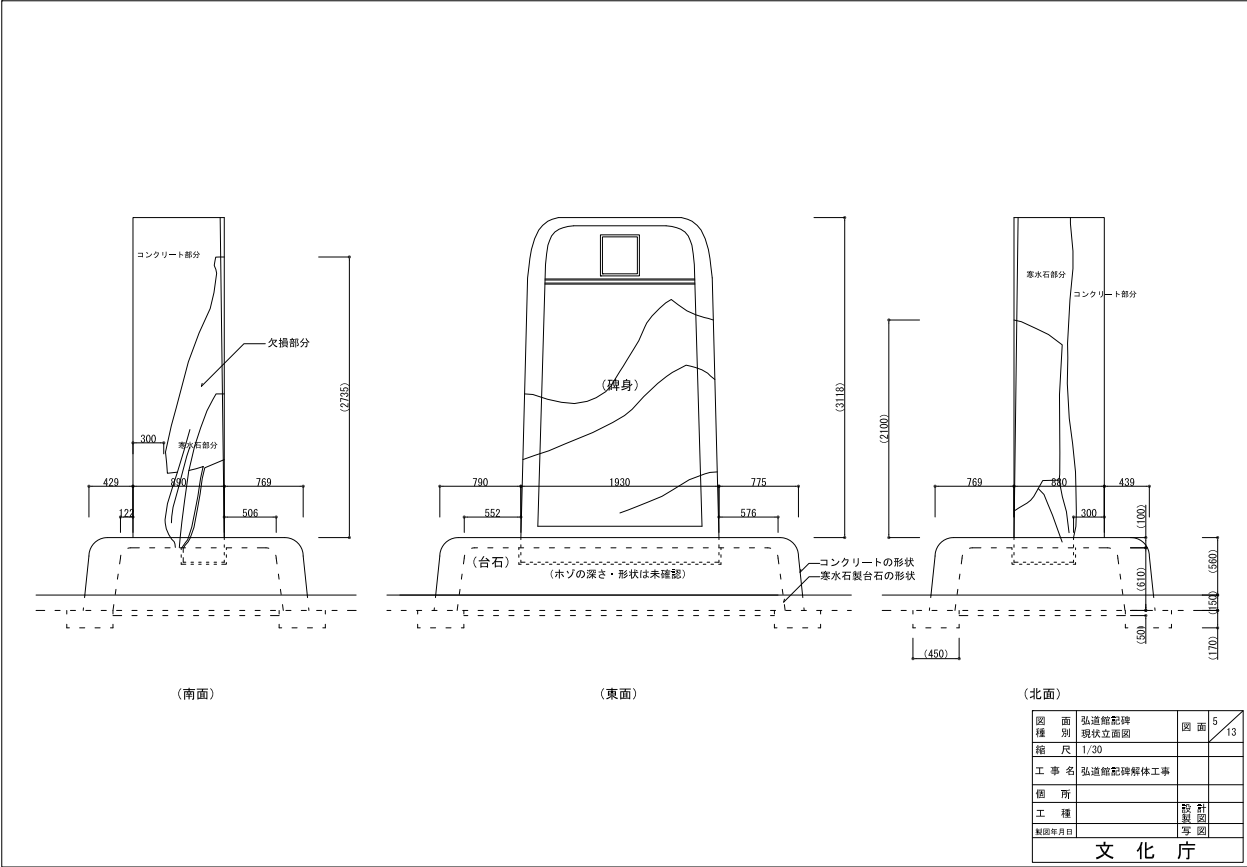


図 48 弘道館記碑の解体修復工事計画図

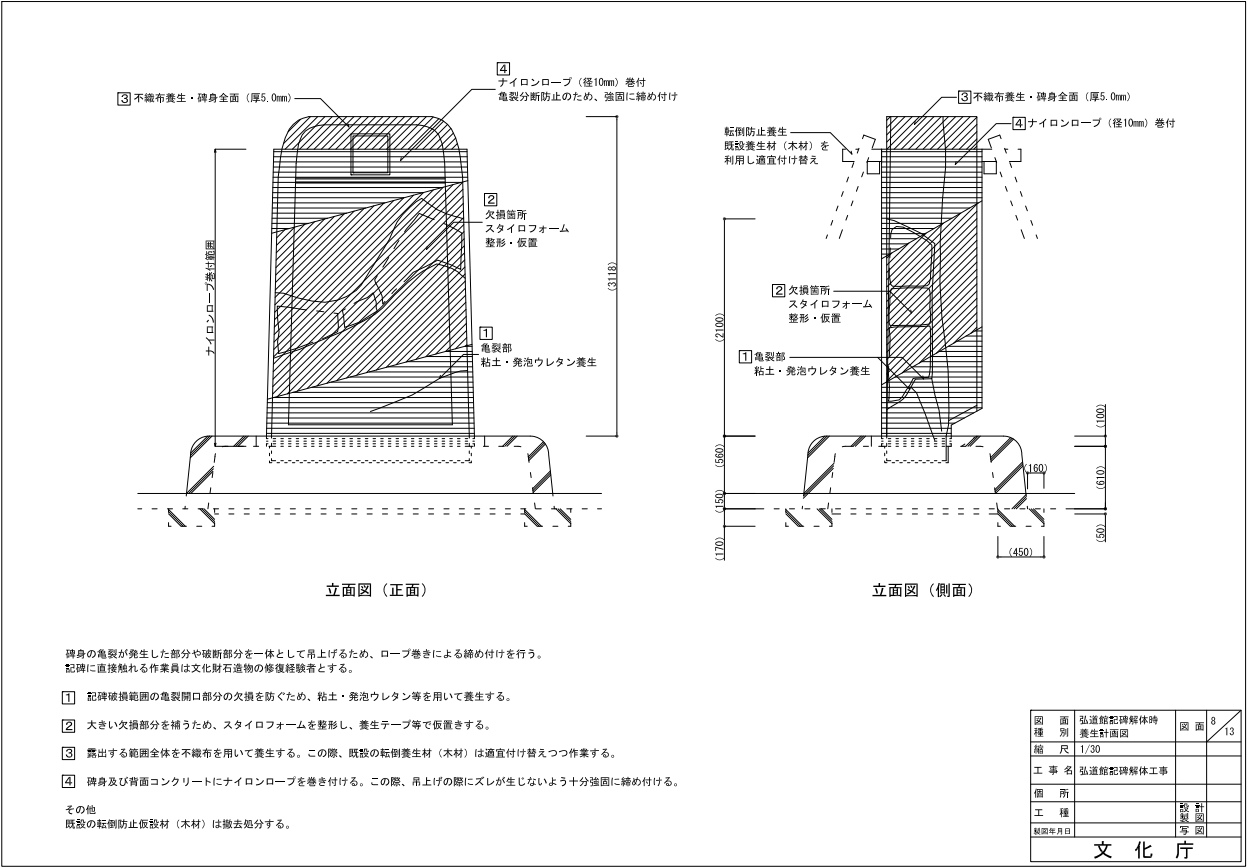
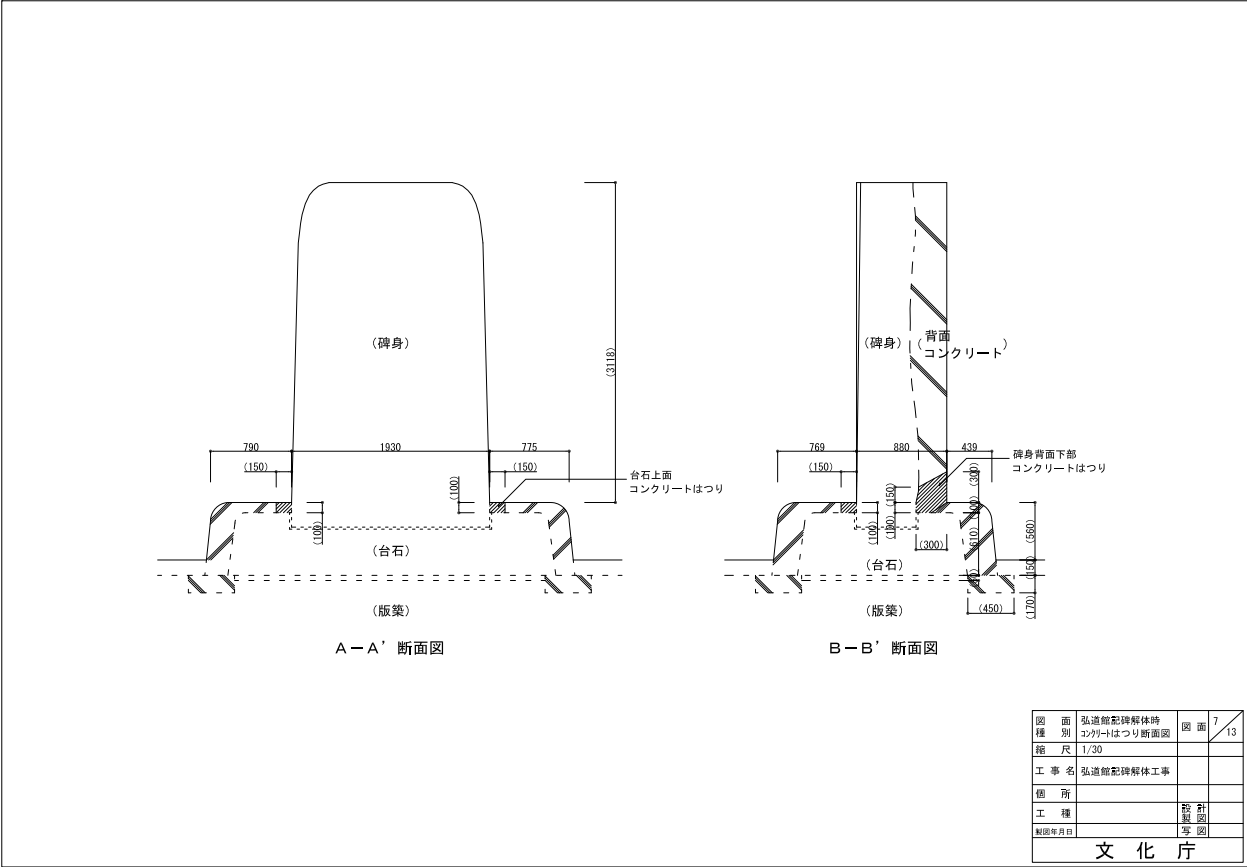


図 49 弘道館記碑の解体修復工事計画図

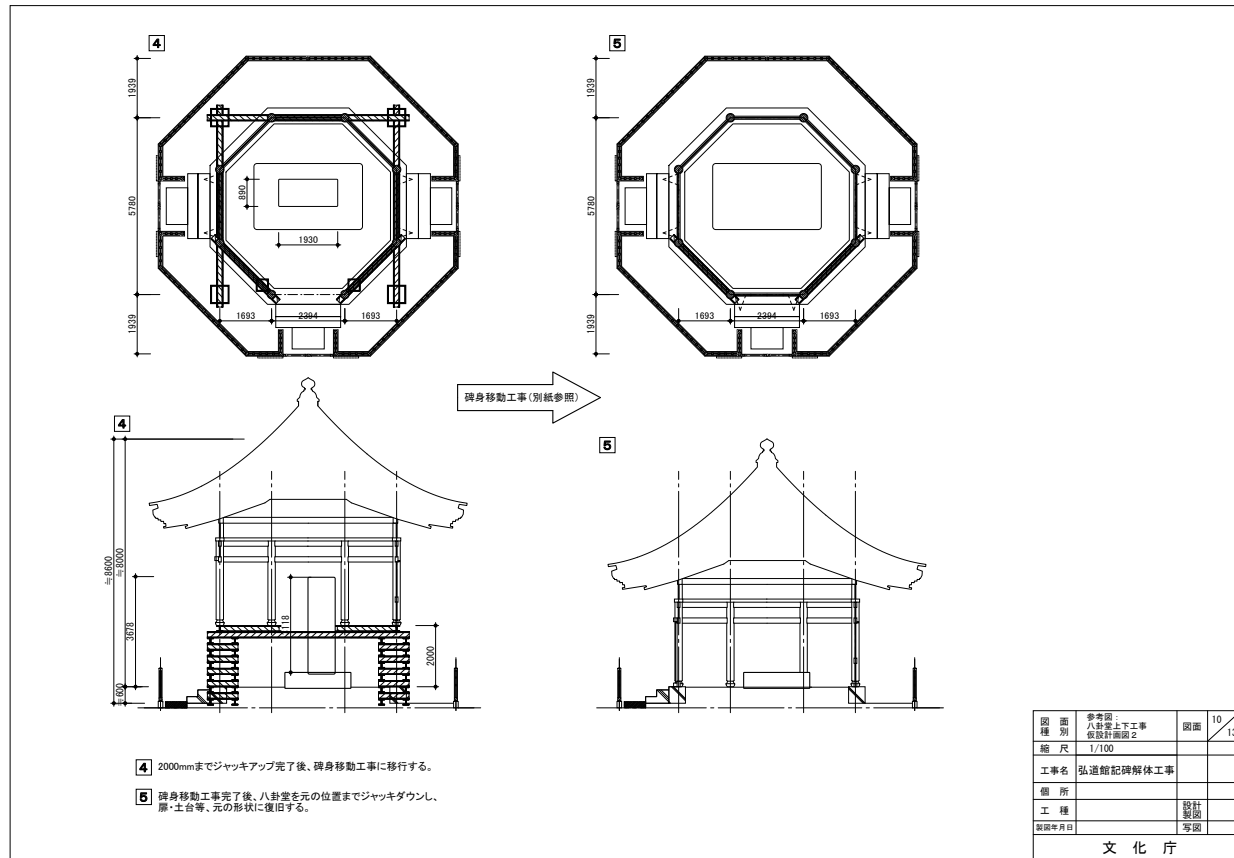
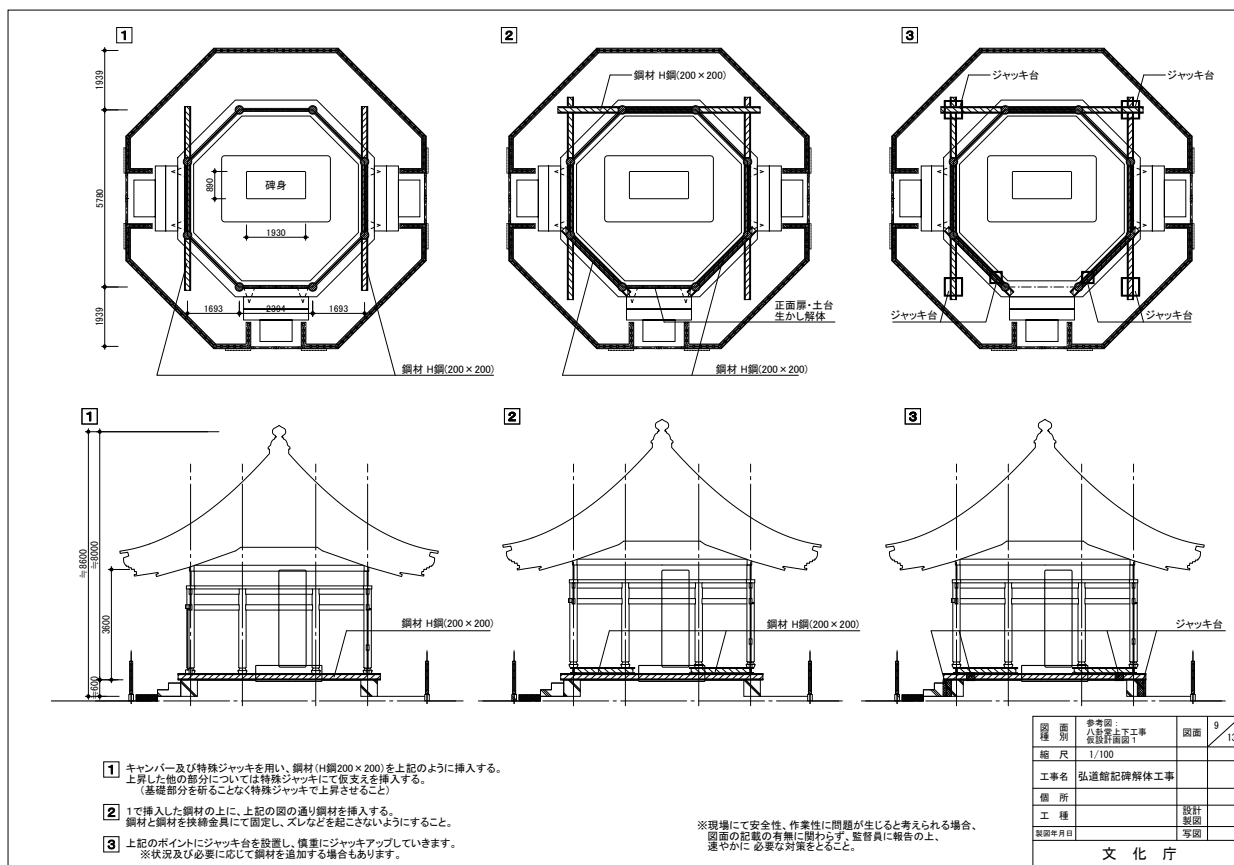
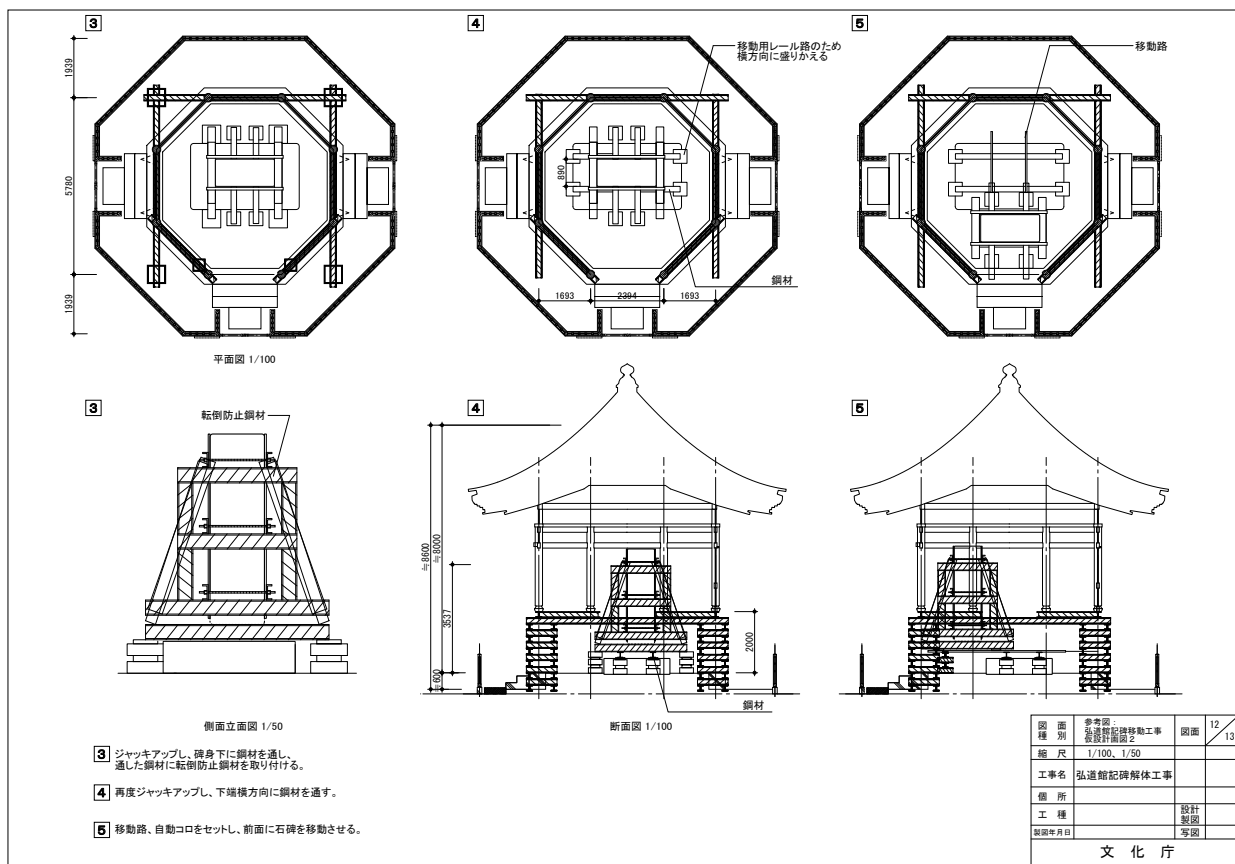
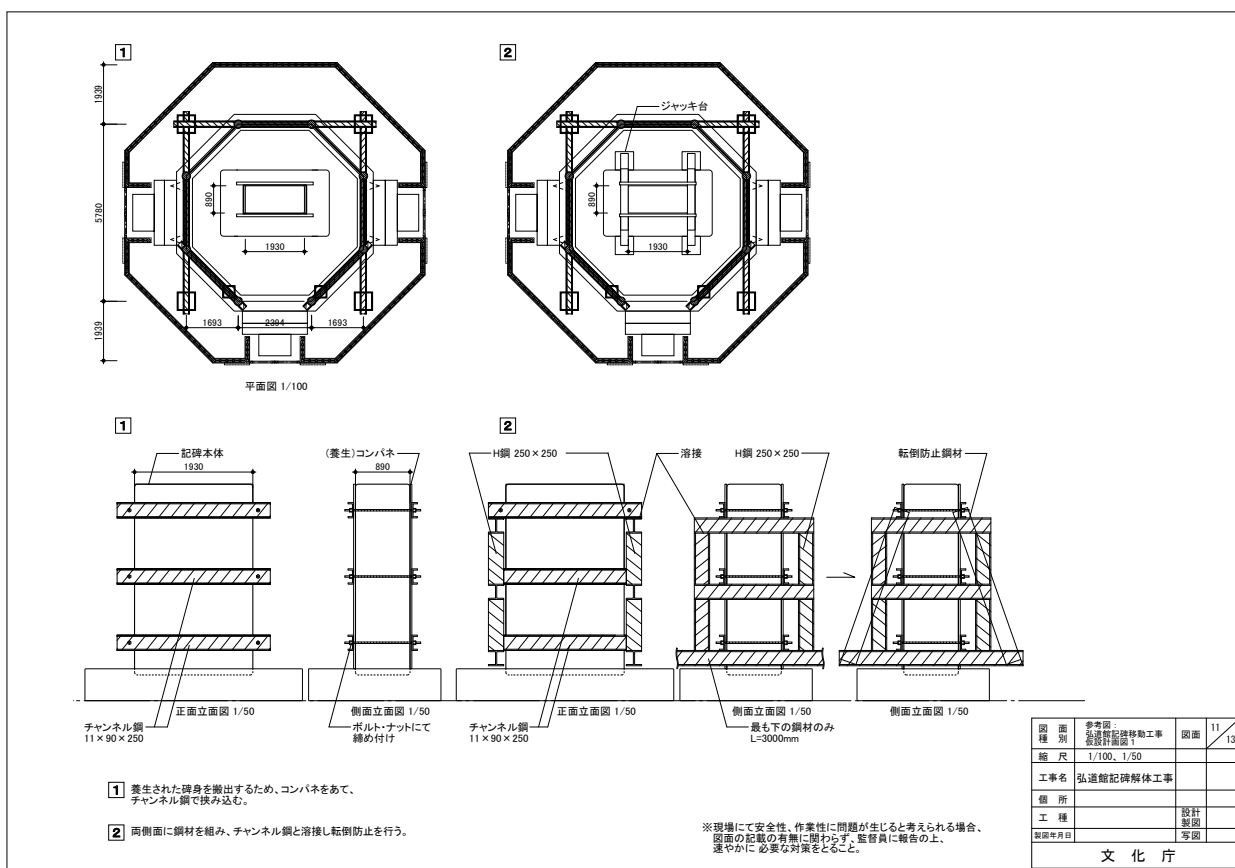


図 50 弘道館記碑の解体修復工事計画図



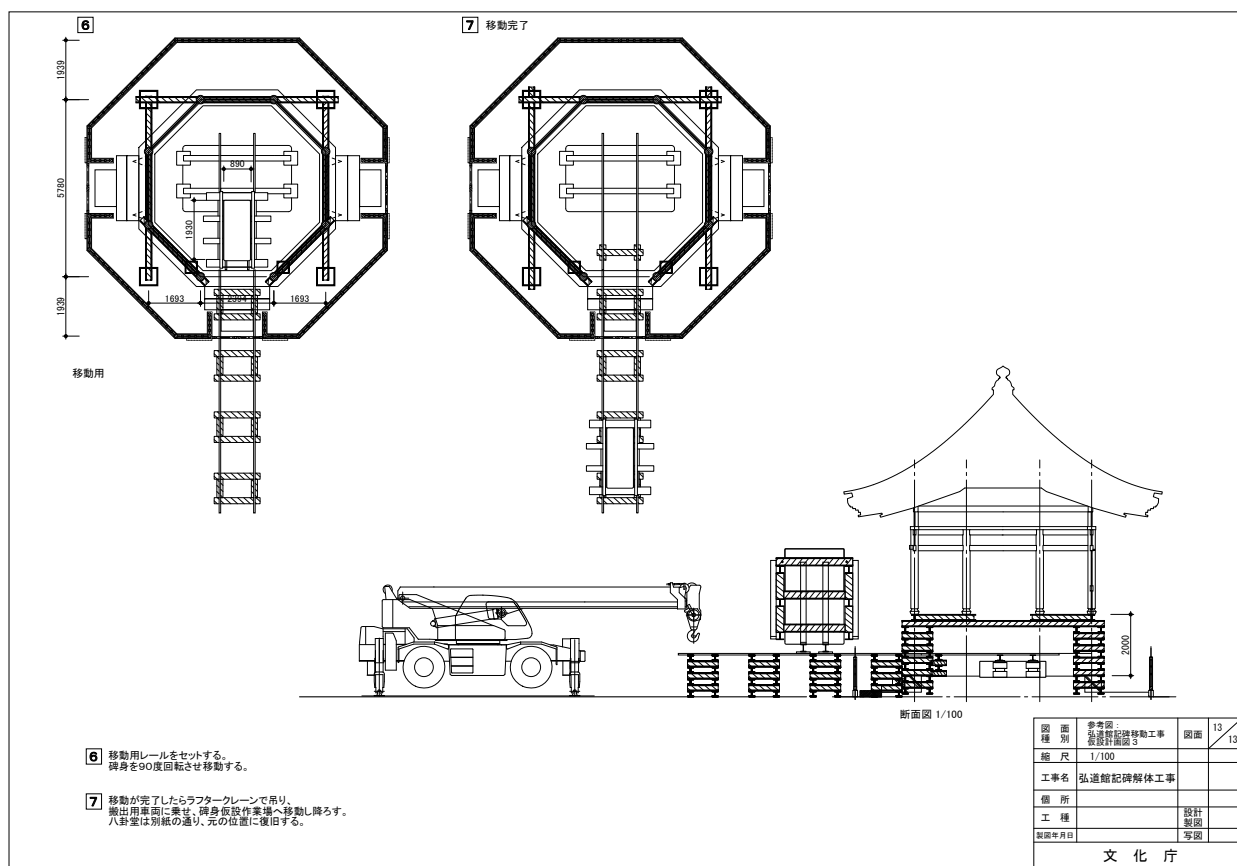


図 52 弘道館記碑の解体修復工事計画図

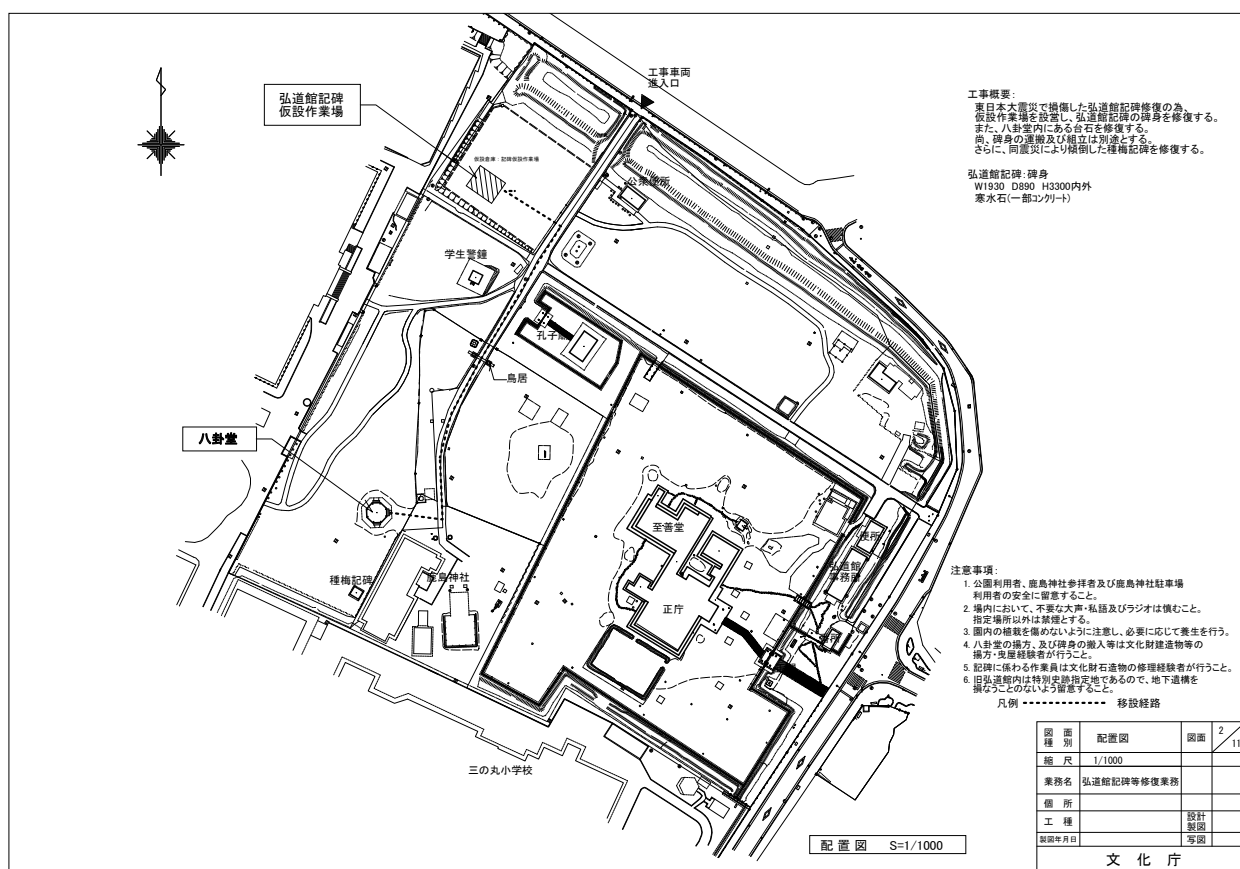
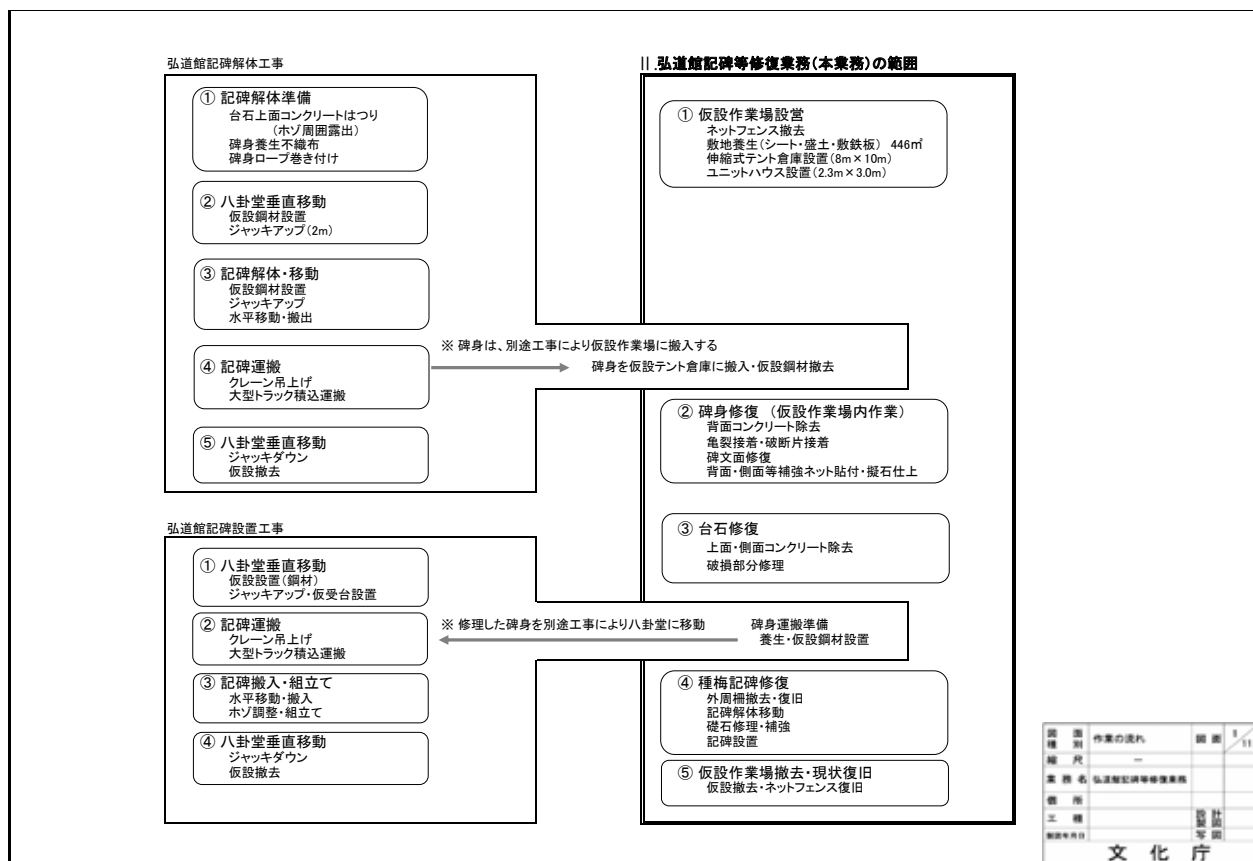
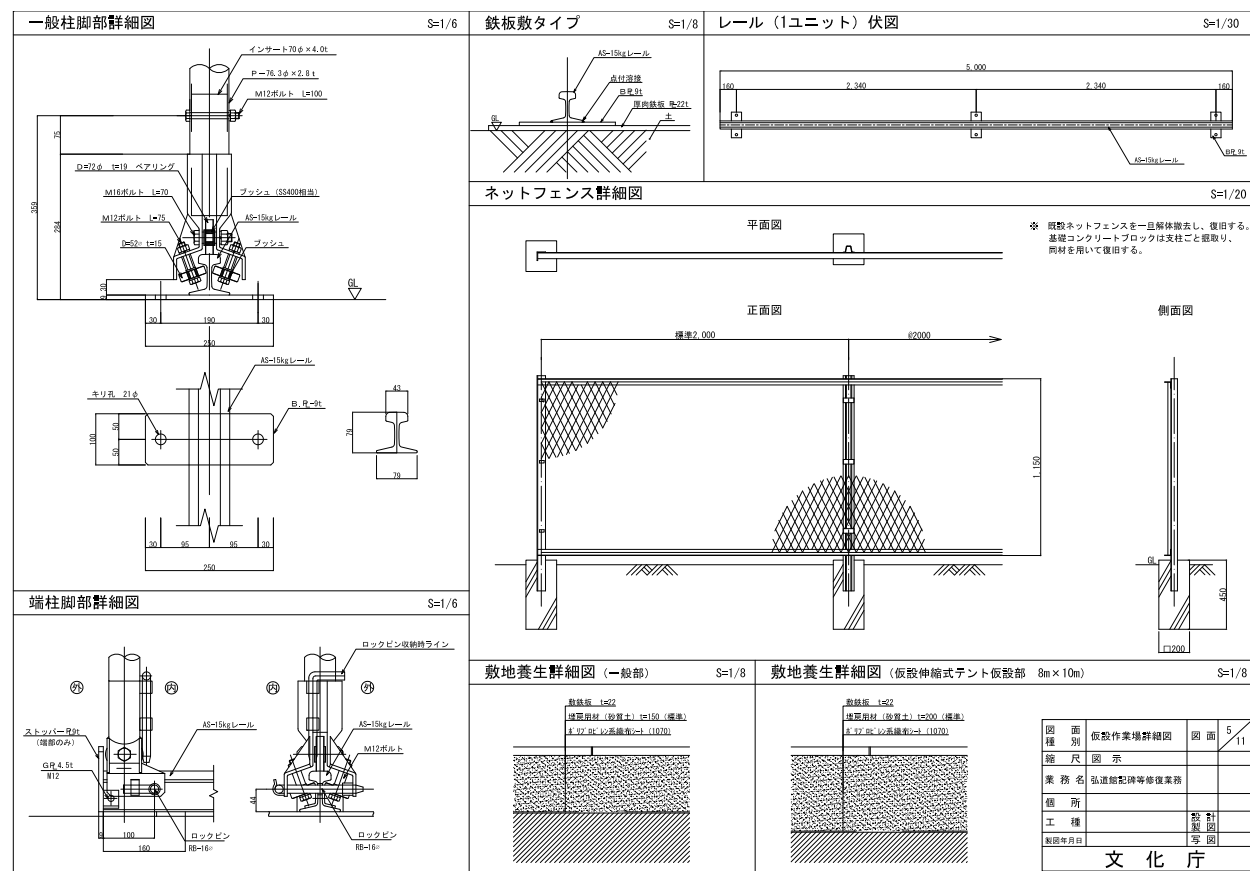
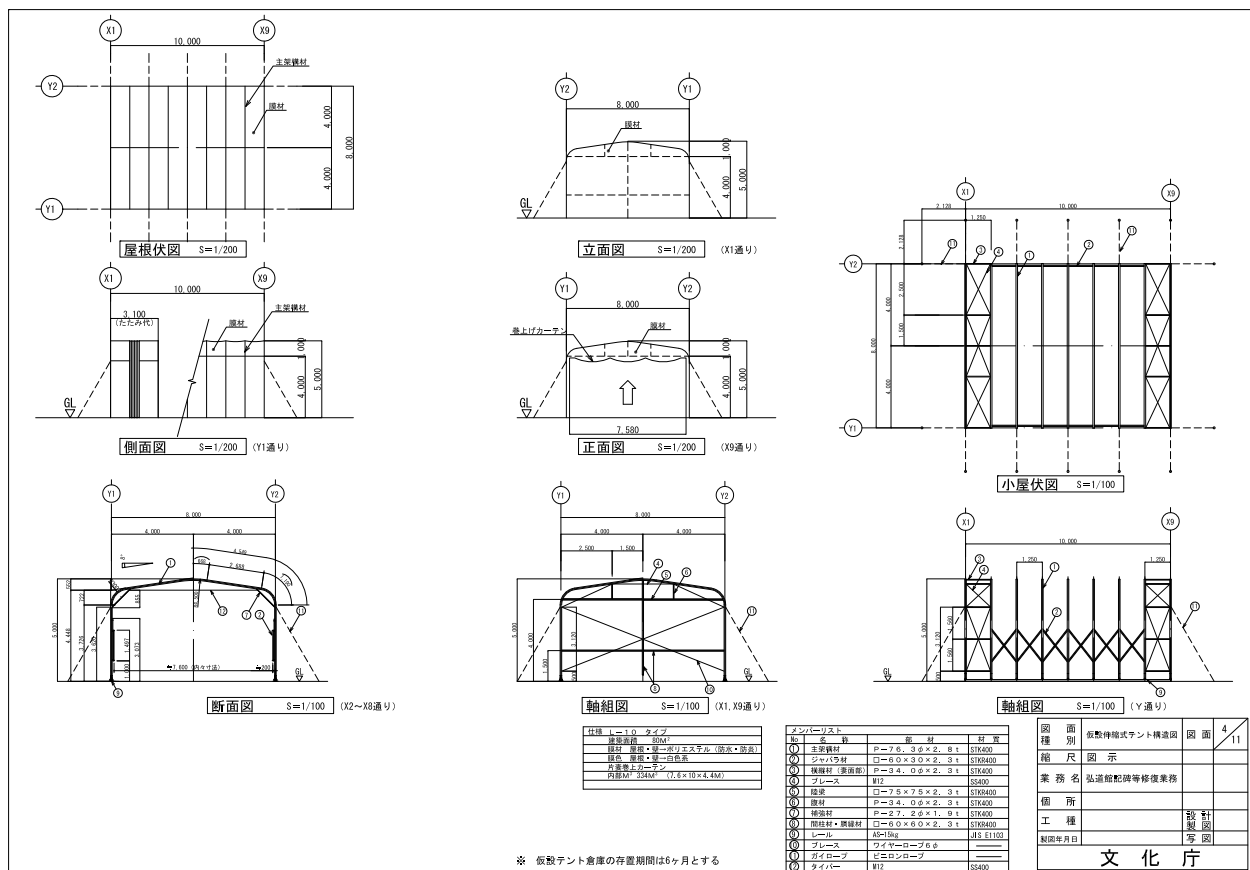


図 53 弘道館記碑の修復計画図



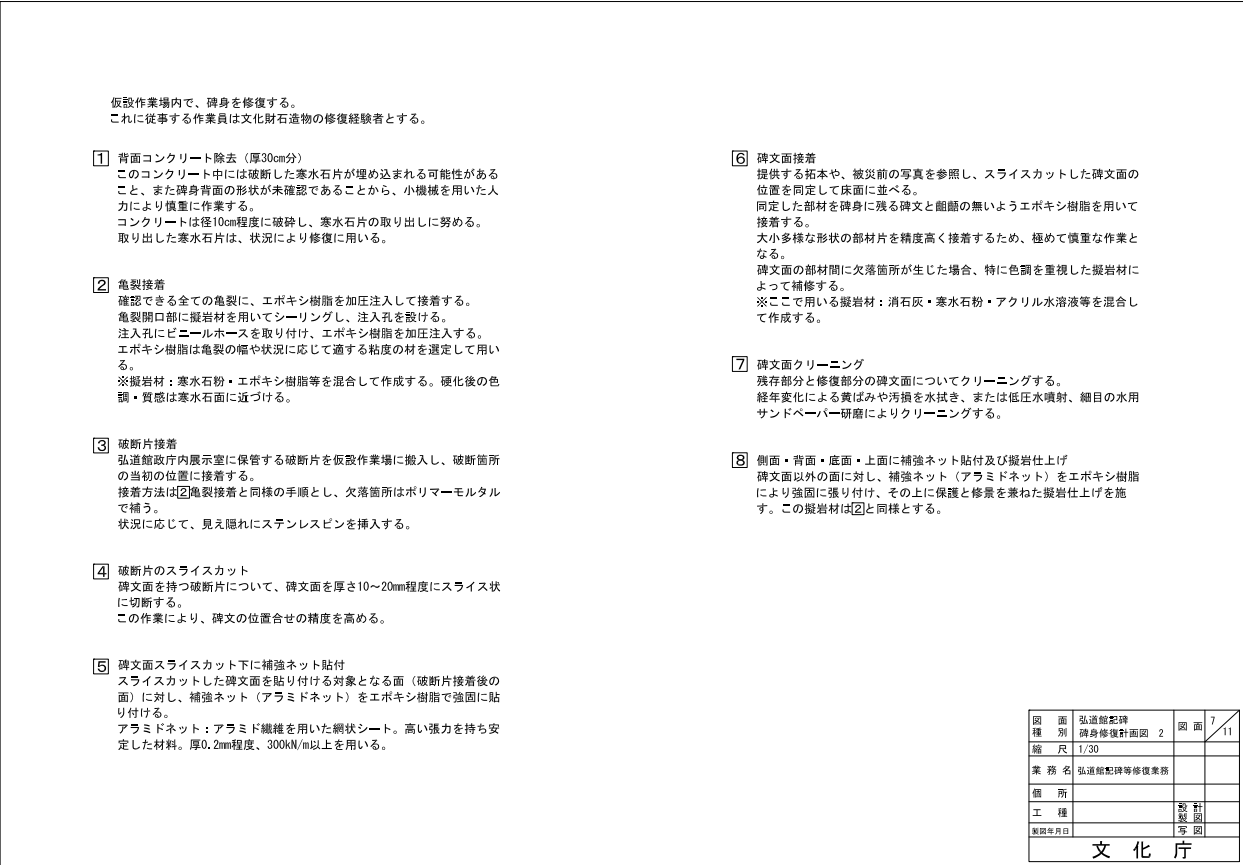
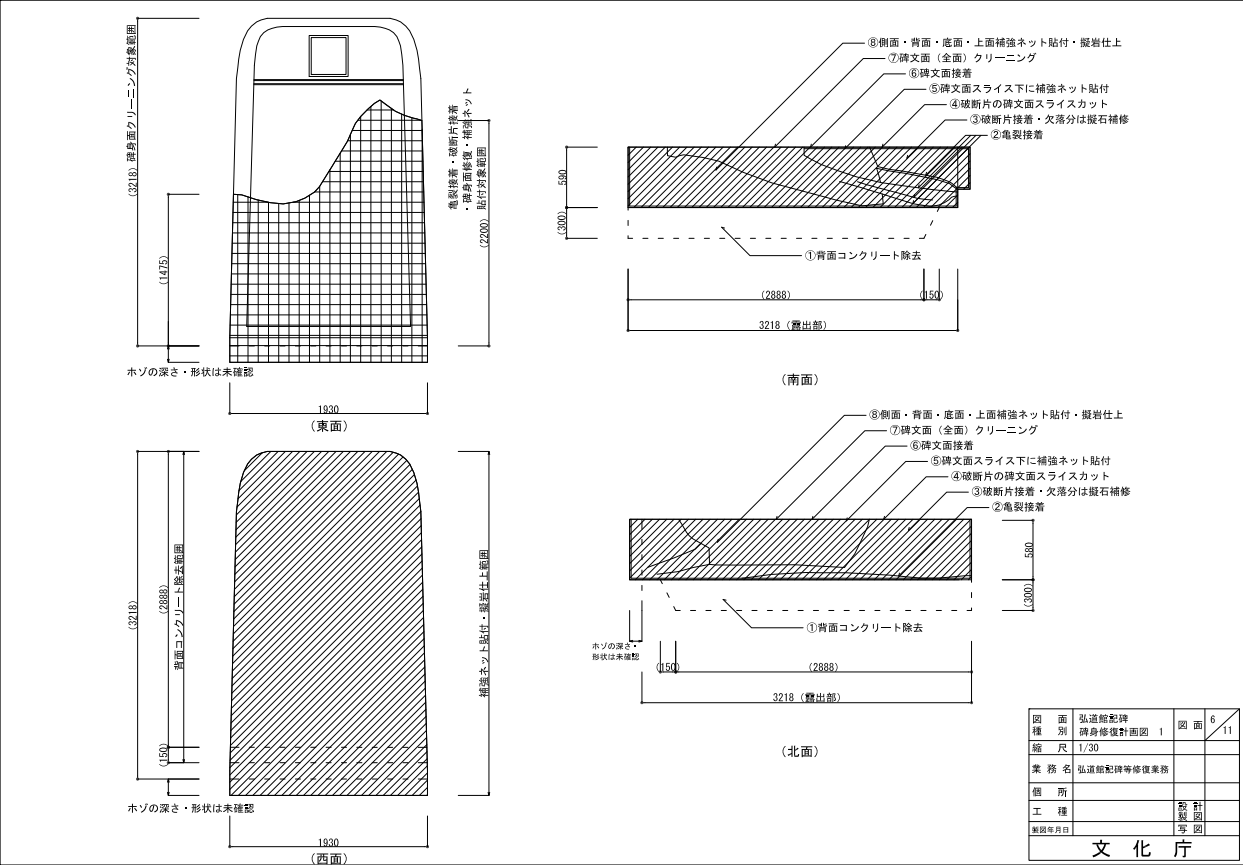


図 55 弘道館記碑の修復計画図

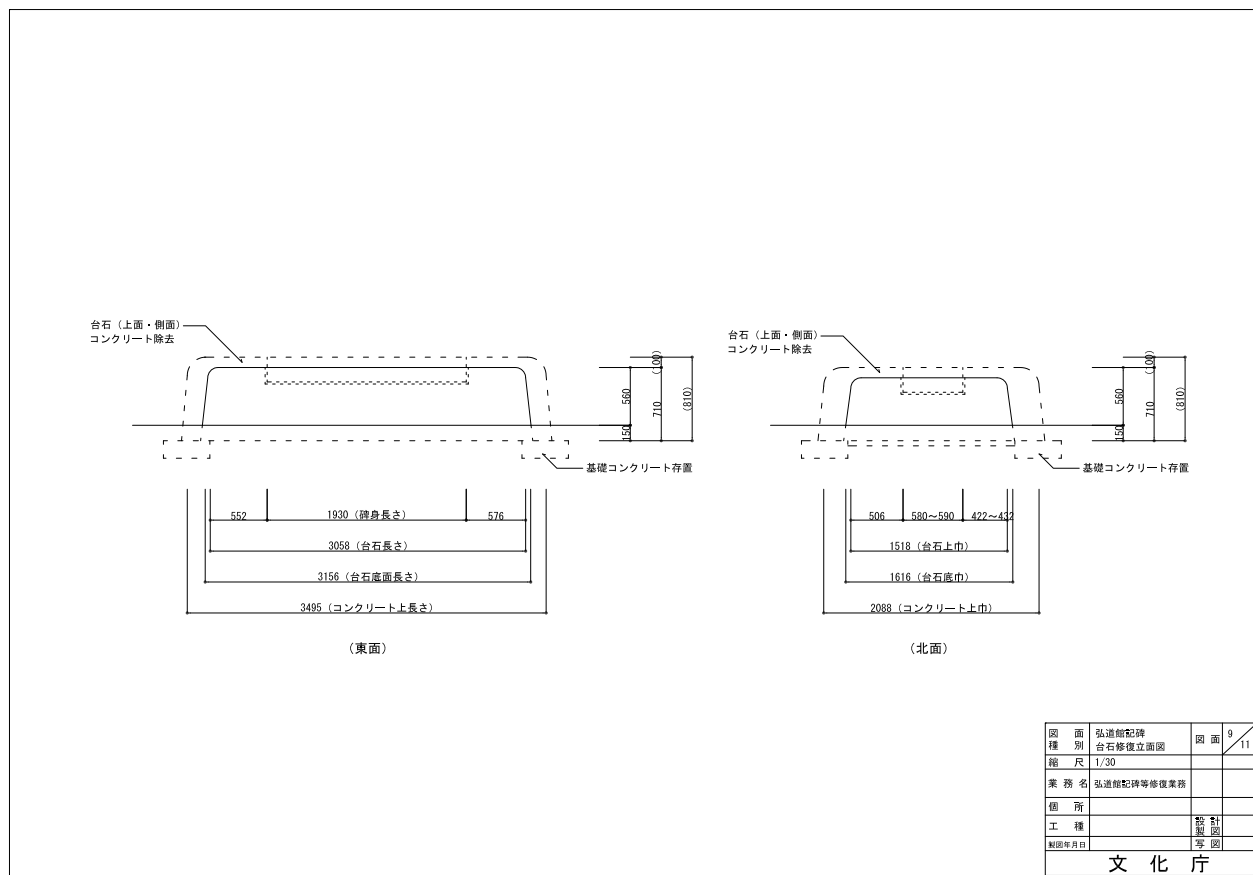
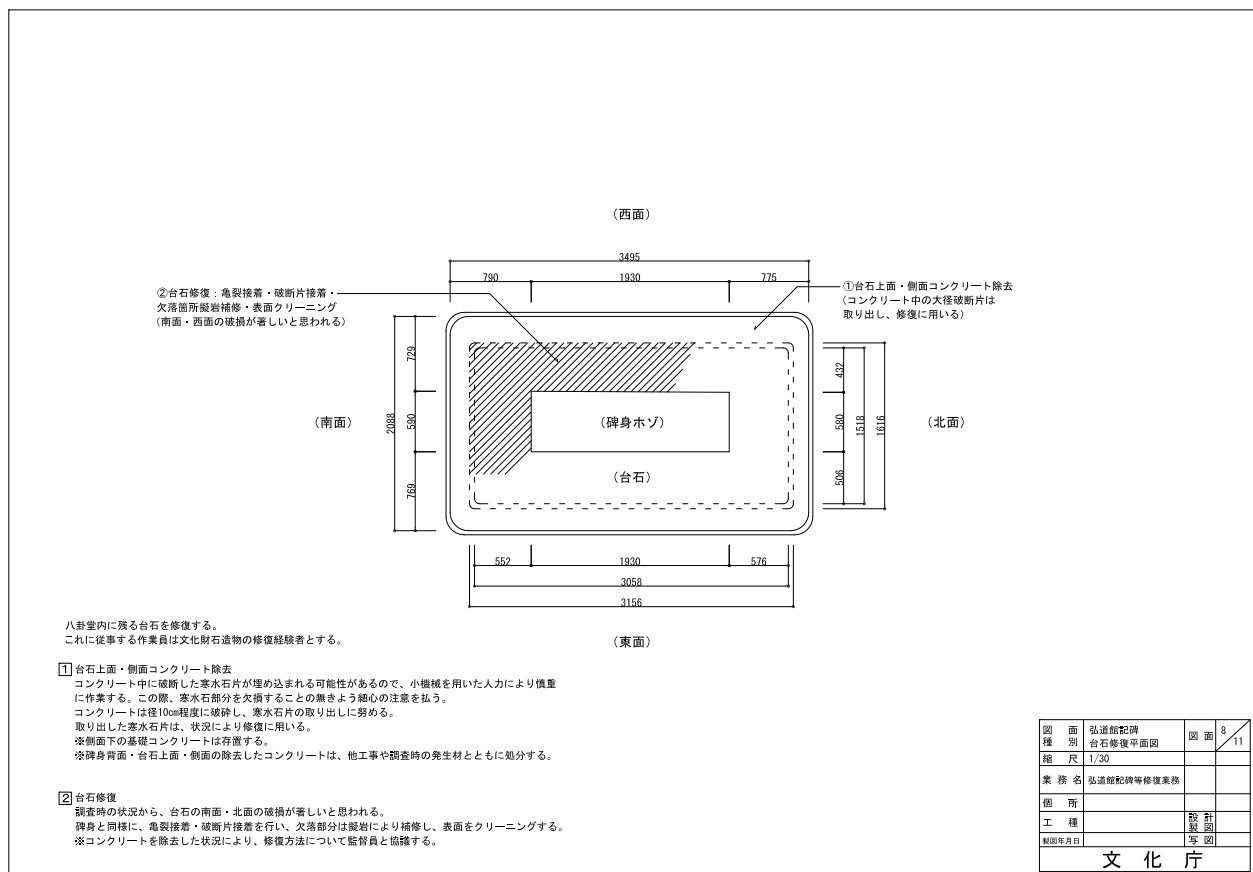


図 56 弘道館記碑の修復計画図