７．構造補強案の検討

７．１ 補強の方針

耐震診断の結果、東西・南北両方向とも建物耐力が低いため目標値を満足しない。目標性能である安全確保水準を満足させるためには、初重・二重・小屋組みに補強を行う必要がある。

文化財建造物であるため、できるだけ意匠・仕様を変更せず、材料にも手を加えないことを目指す方針とする。

補強の進め方としては、屋根全面葺土なしの空葺として屋根荷重を低減させて検討を行った。荷重を減らしただけでは耐力不足は解消しなかったため、さらに耐力要素を追加した補強案を提示する。また、必要に応じて水平力を補強材に伝達させるために水平剛性の補強する補強案を提示する。

また、現状において礎石が大きく沈下しており、礎石建ちの地盤として盛土層では地耐力が不足している。そのため、基礎の補強案を提示する。

7.2 に耐震補強案、7.3 に基礎補強案を示す。

補強方法や補強部材の納まりについては、下記の項目に留意して選定する。

・意匠性に配慮し、補強部材は極力見え隠れの場所に取り付ける。
・既存の耐震要素と比較し著しく剛性の高いものや変形能力の劣るもので補強することは避ける。
・今回の補強であることが分かるようにする。補強部材は取り外すことができ、取り外せば原形が分かるように取り付ける。
・構造補強のために既存の部材を変質させ、強引な接着によって後日の解体を不能にするようなことを避ける。

７．２ 耐震補強案

１）基本方針

耐震補強は、地震力の低減と水平剛性の補強および耐力要素の追加を行う。

共通の補強は、地震力の低減として屋根を空葺とする。

初重における耐力要素の追加は、既設の土壁を耐力の高い壁に置換する案と、既設の土壁はそのままとして耐力要素を追加する案の 2 案を提案する。

二重・小屋組については、耐力要素を追加する案として 2 案を提案する。

また、必要に応じて水平構面の補強をする。

【共通補強】

建物重量の低減 ： 地震力を低減するために葺土を空葺にする。

【初重補強案】

初重 補強案 1A

既存土壁を耐力の高い構造用合板耐力壁に置換し、耐力向上および変形性能の改善を図る。正面側は金剛柵背面に鉄骨フレームを配置し、耐力向上および変形性能の改善を図る。

初重 補強案 1B

既存部材には手を加えず南側背面部の部屋内に鉄骨フレームを配置し、耐力向上および変形性能の改善を図る。水平力を補強材に伝達させるために水平剛性を補強する。

【二重・小屋組 補強案】

二重・小屋組 補強案 2A

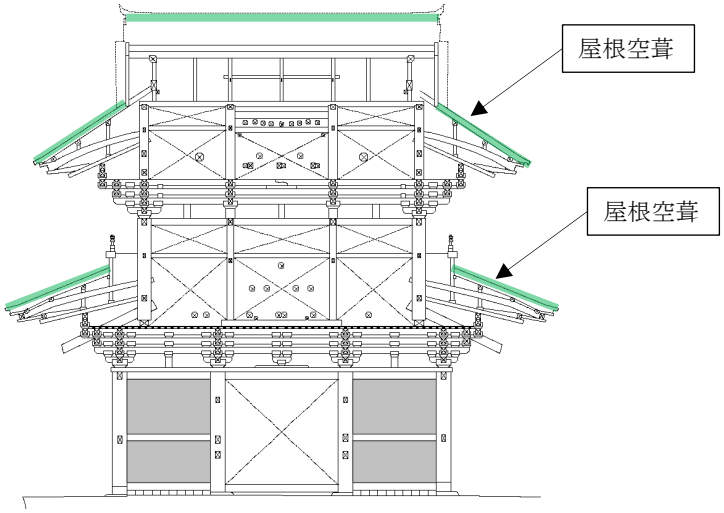
中央部に鉄骨フレームを配置し、耐力向上および変形性能の改善を図る。水平力を補強材に伝達させるために水平剛性を補強する。

二重・小屋組 補強案 2B

中央部に鋼製ブレースを配置し、耐力向上および変形性能の改善を図る。水平力を補強材に伝達させるために水平剛性を補強する。

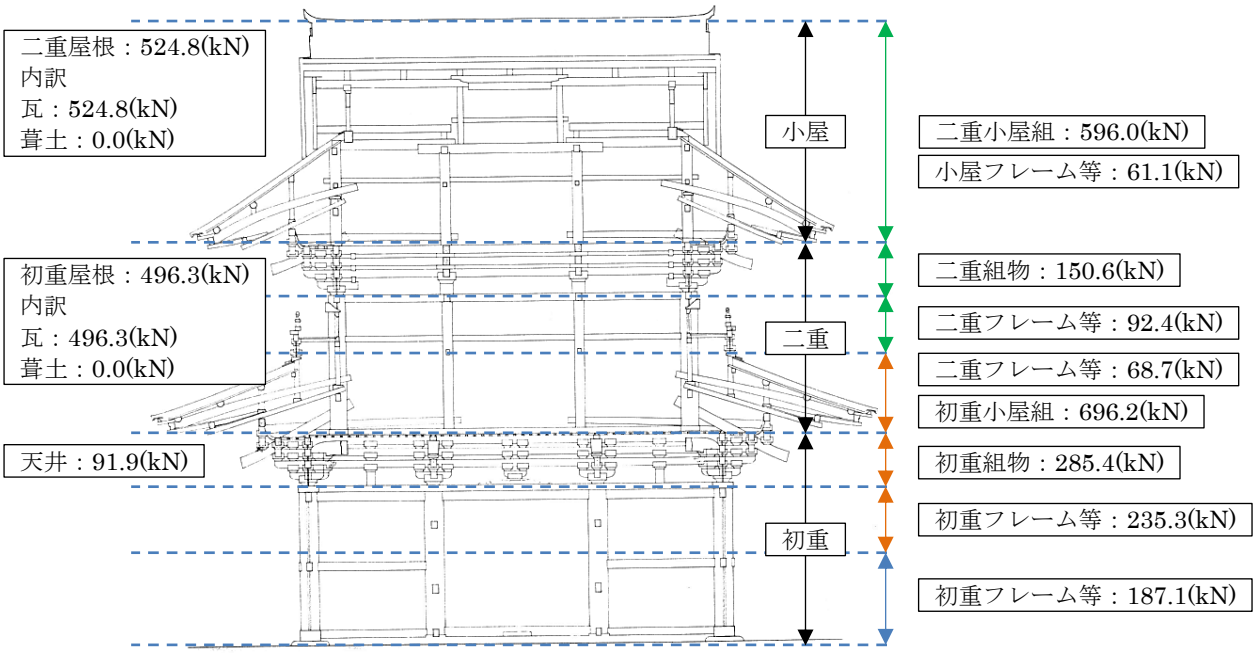
なお、鉄骨フレームと鋼製ブレースは併用することも可能である。

必要に応じて初重と二重の接合を行う。



共通補強

建物重量



総重量 ＝二重 +初重 ＝ 1424.9(kN) + 2060.9(kN)＝3485.8(kN) ＝355.4 (t)

地震力計算用建物重量 （kN）

位置	葺土有り		葺土なし		備　考
	Wi	ΣWi	Wi	ΣWi	
二重	1743.5	1743.5	1424.9	1424.9	層：18% 減
初重	2175.1	3918.6	1873.8	3298.7	層：14% 減
基礎	187.1	4105.7	187.1	3485.8	全体：16% 減

※補強部材の重量は除く。

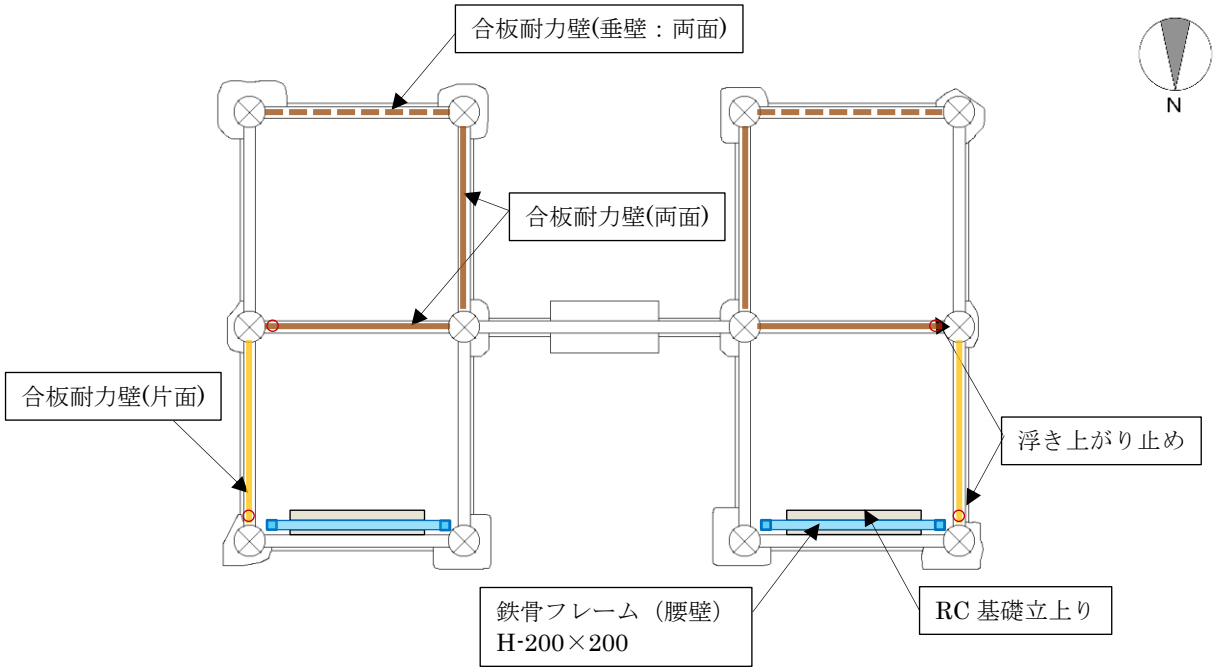
水平荷重に対する性能の判定基準

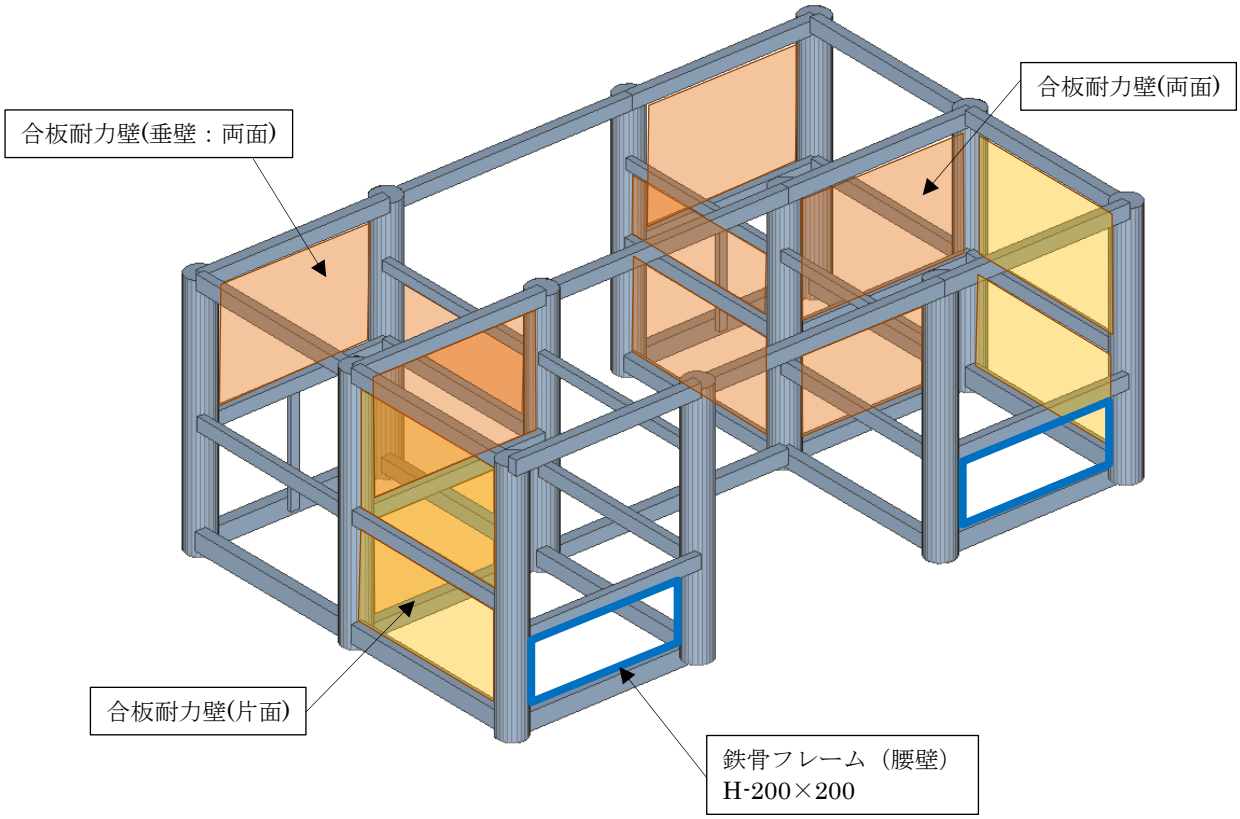
性能に関する項目			目標値	備 考
大地震動時・風荷重時	偏心率		0.30 以下	
	層間変形角	平均	1/20 以下	
		最大	1/15 以下	
		最大	1/20 以下	構造用合板耐力壁
	木造部材の耐力確認		終局耐力以下	柱
	塑性率		4.0 以下	鉄骨部材（フレーム）

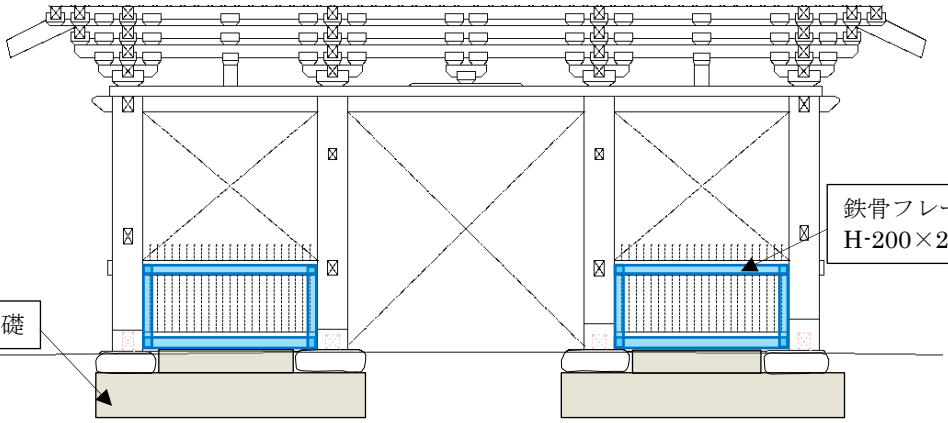
２）補強概要

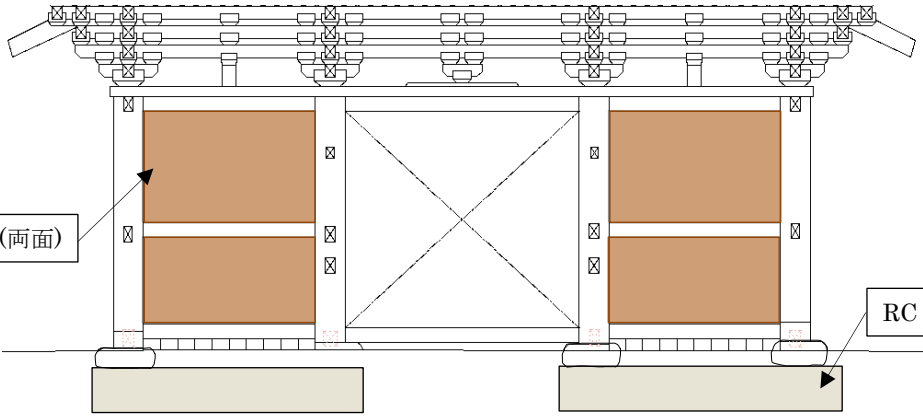
初重 補強案 1A：耐力壁補強

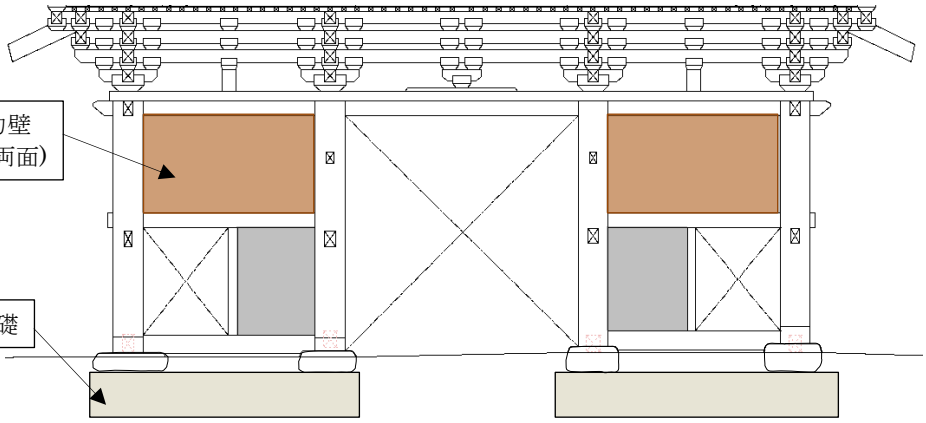
既設の土壁を耐力の高い壁に置換する案であり外観がほとんど変わらない。正面の金剛柵背面に配置した鉄骨フレームは腰貫の高さで計画しているため、外観にほぼ影響はない。

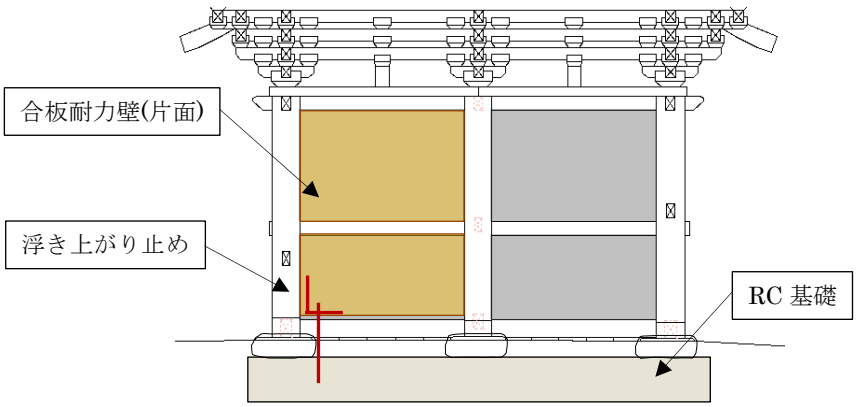


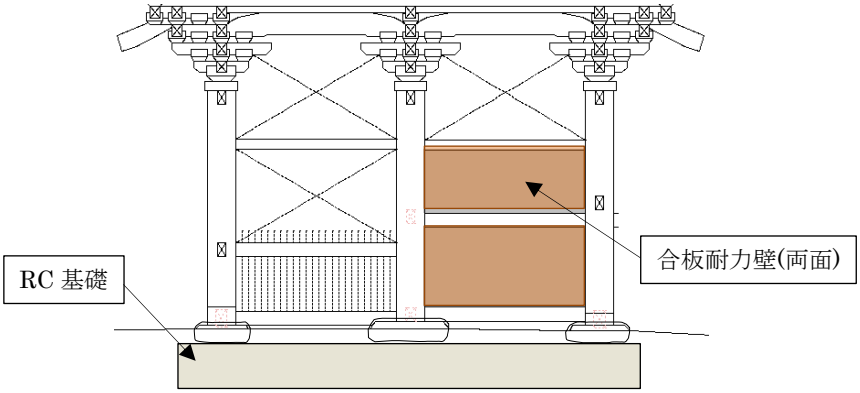


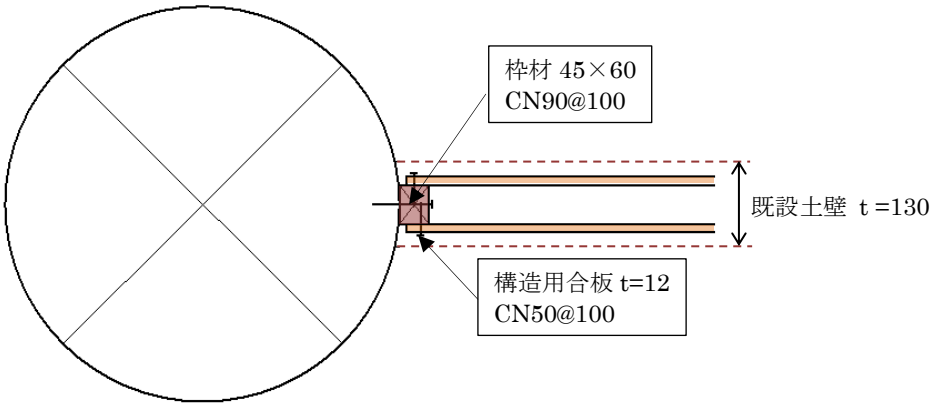

鉄骨フレーム（腰壁）
H-200×200
RC 基礎


合板耐力壁(両面)
RC 基礎


合板耐力壁
(垂壁：両面)
RC 基礎


合板耐力壁(片面)
浮き上がり止め
RC 基礎

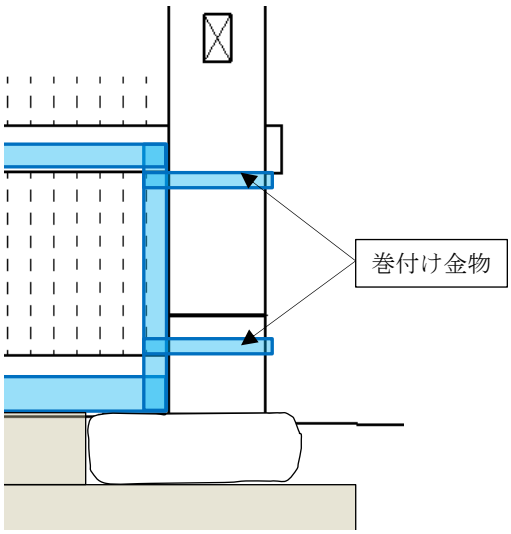

RC 基礎
合板耐力壁(両面)


枠材 45×60
CN90@100
既設土壁 t =130
構造用合板 t=12
CN50@100

合板耐力壁 取付要領

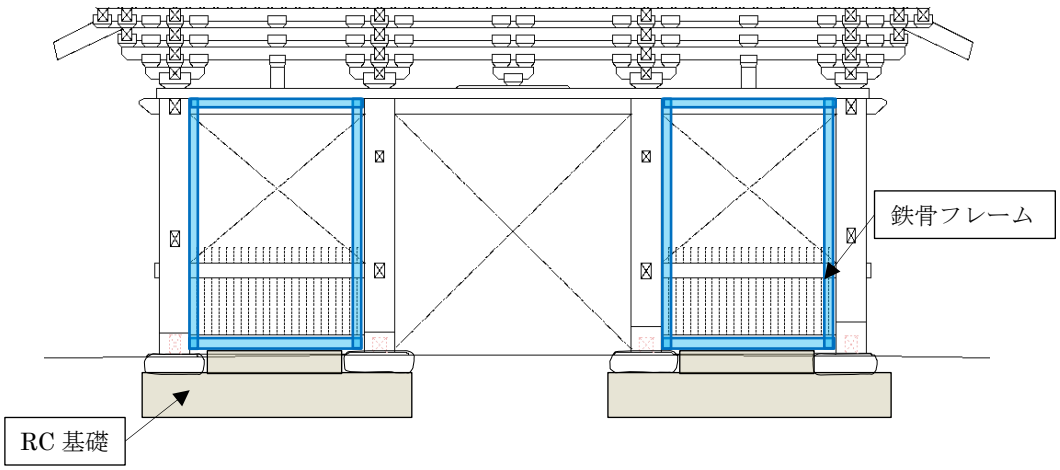
初重 補強案 1A 鉄骨フレーム接合部納まり概念図

巻付け金物接合は既存柱に巻き付けるため、柱を傷つけることはないが外観に影響が出る。なお、金物に干渉する土壁は部分的に切り欠く必要がある。



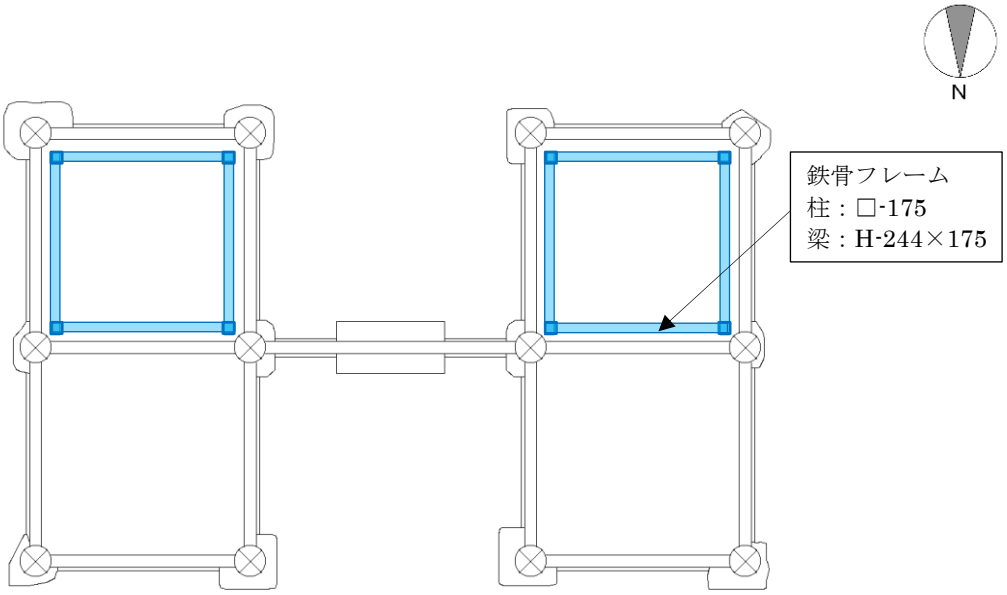
初重 補強案 1A 正面部 鉄骨フレームの形状のバリエーション

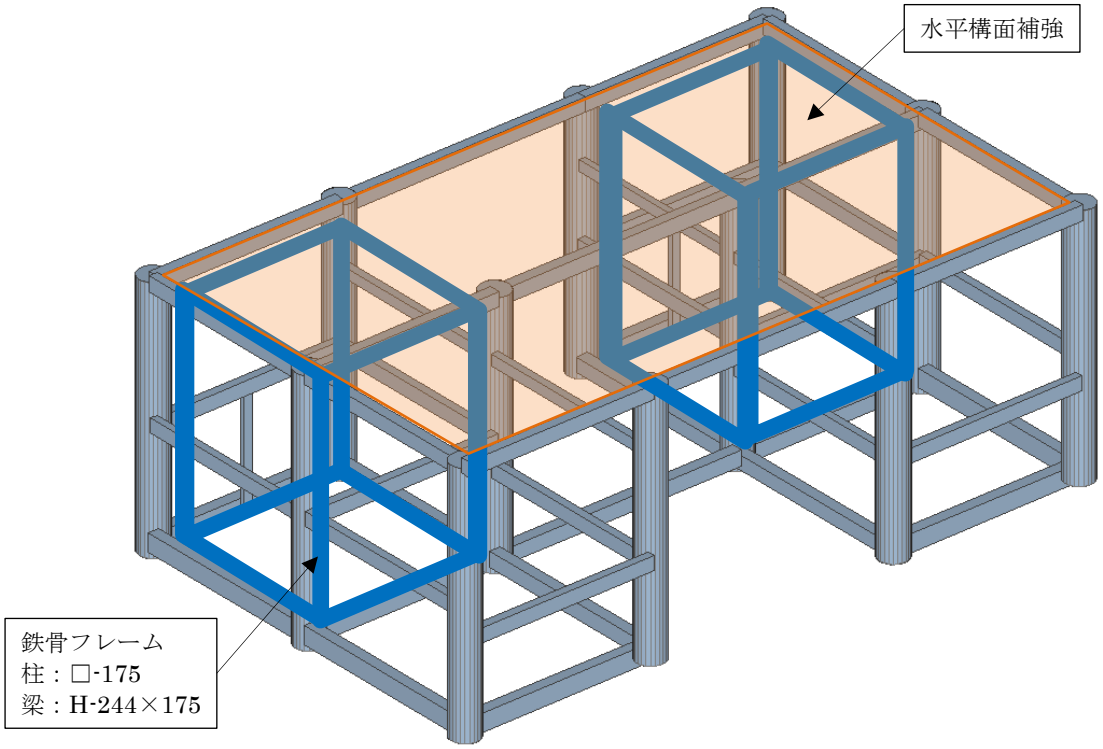
現在補強案では、腰貫高さで鉄骨フレームを配置して補強を行っている。腰貫高さで検討しているが、鉄骨フレーム高さを頭貫高さとして補強を行うことも可能である。上部位置で鉄骨フレームを接合することで補強の効果は上がるが、正面からの外観に影響が出る。

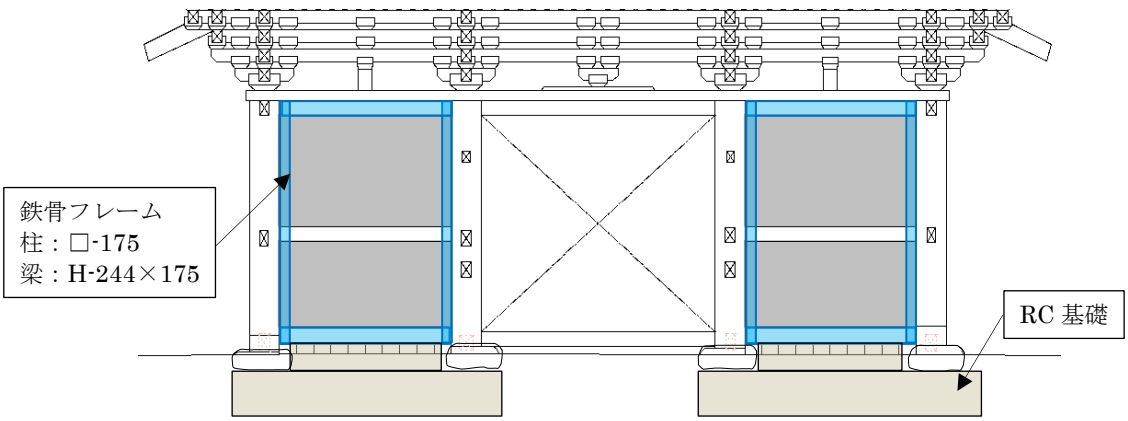


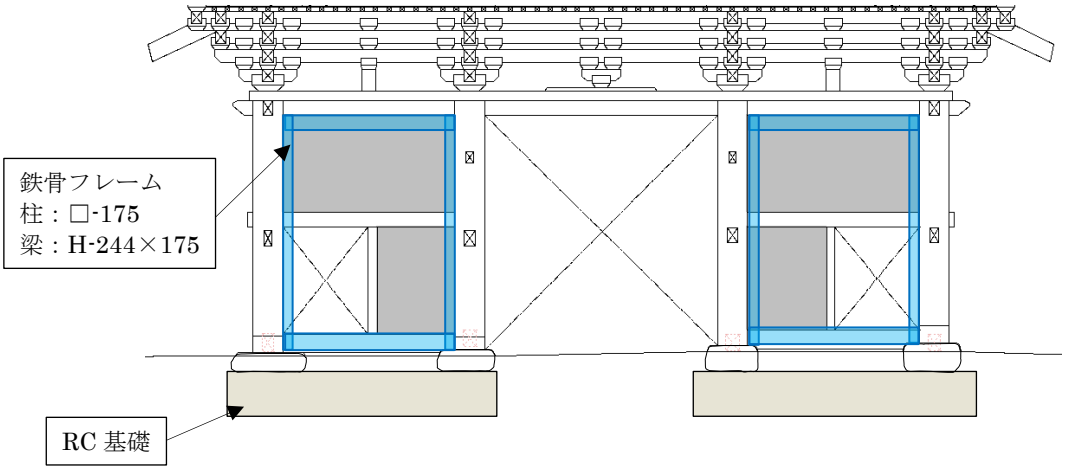
初重 補強案 1B：鉄骨フレーム補強

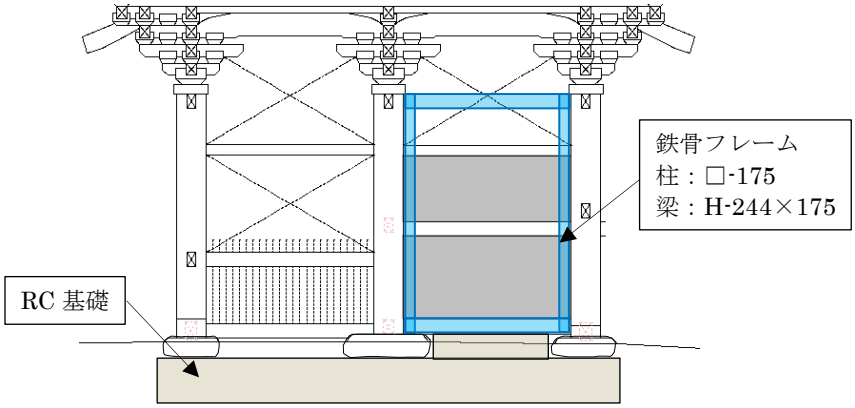
既設の土壁はそのままとして耐力要素を追加する案であり背面部の部屋内に鉄骨フレームを配置するため、外観はほとんど変わらない。しかし、鉄骨フレームの高さが頭貫高さまであるため、飛貫より上部の部分が中央通路から見える。



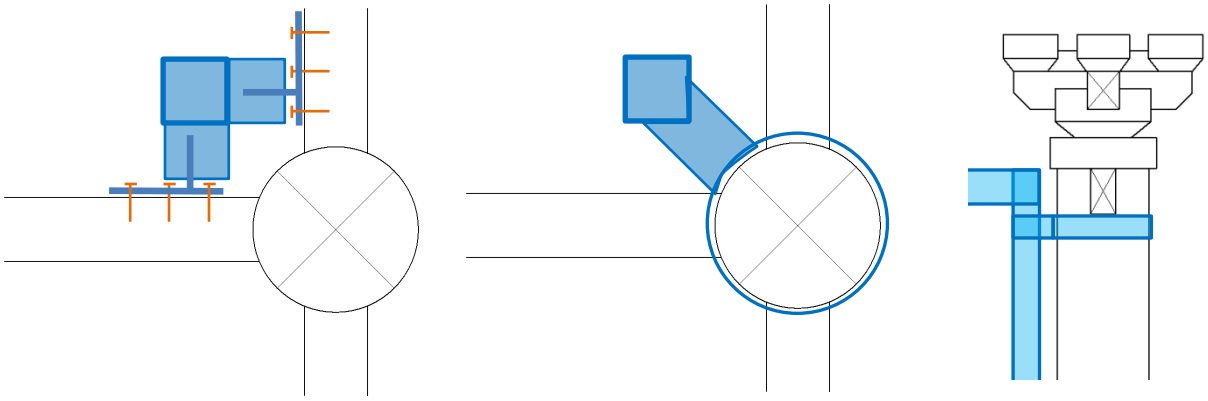



鉄骨フレーム
柱：□-175
梁：H-244×175
RC 基礎


鉄骨フレーム
柱：□-175
梁：H-244×175
RC 基礎


鉄骨フレーム
柱：□-175
梁：H-244×175
RC 基礎

初重 補強案 1B 鉄骨フレーム接合部納まり概念図

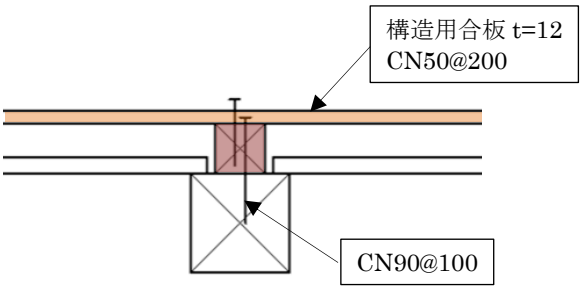


ラグスクリュー接合　　巻付け金物接合

ラグスクリュー接合の場合は二王門内部で接合するため、外観に影響はないが頭貫にラグスクリューで取付ける必要がある。

巻付け金物接合の場合は既存柱に巻き付けるため、柱を傷つけることはないが外観に影響が出る。なお、巻付け金物に干渉する土壁は部分的に切り欠く必要がある。

水平構面補強納まり概念図



天井板材に直接打付けるのではなく天井格子材に枠材を打付け、構造用合板を貼る納まりとする。

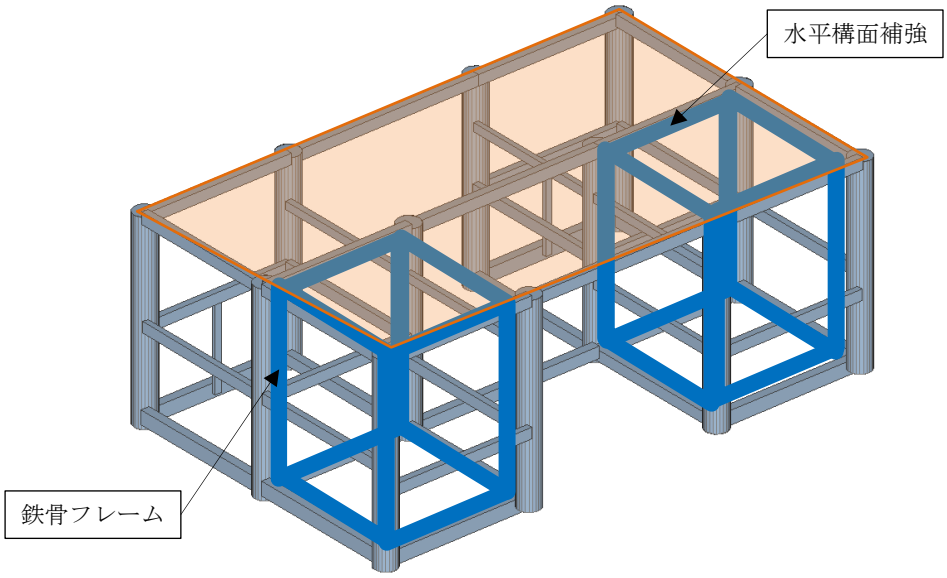
初重 補強案 1B 鉄骨フレームの配置・形状のバリエーション

現在補強案では、鉄骨フレームを南側背面部の部屋内に配置しているが(補強案 1B)、北側正面部に配置することも可能である(補強案 1B-1)。両補強案とも鉄骨フレームが偏心配置となるため、天井部の水平構面補強が必要となるが、北側に鉄骨フレームを配置することでバランスを取り、水平構面補強を不要とすることも可能である(補強案 1B-2)。

初重 補強案 1B-1

鉄骨フレームを北側に配置する。

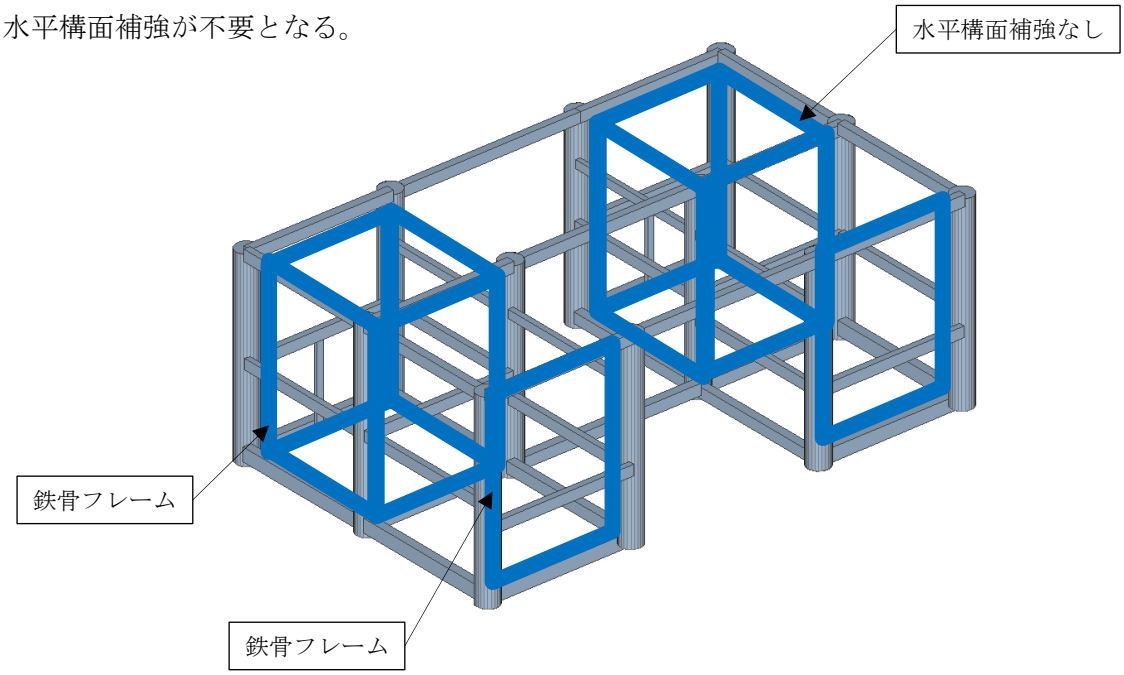
仁王像の倒れ止め・シェルターとすることもできる。



初重 補強案 1B-2

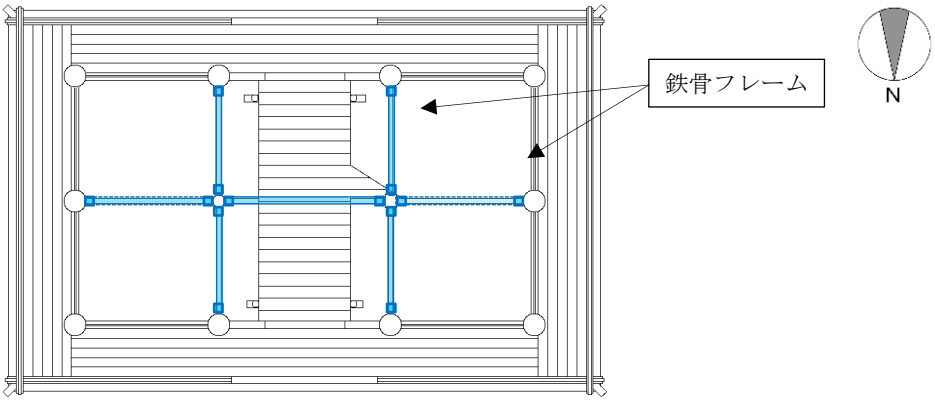
鉄骨フレームを北側に配置し、バランスを良くする。

水平構面補強が不要となる。

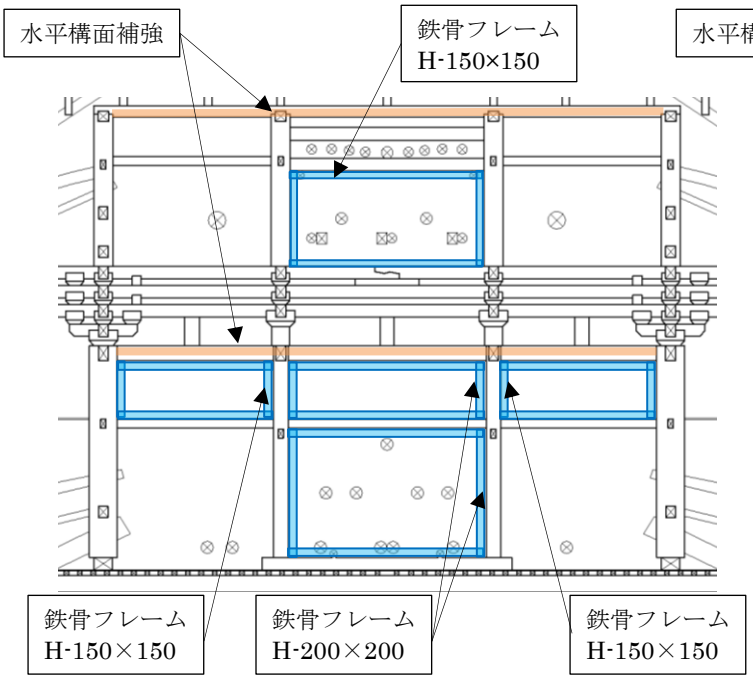


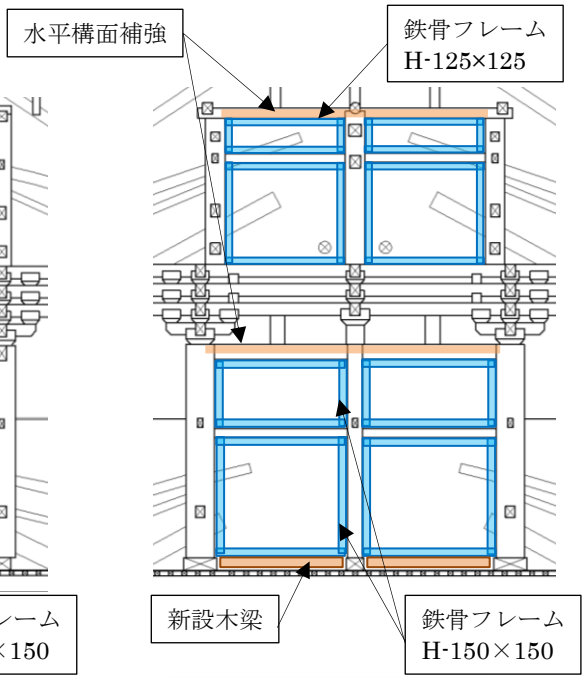
二重・小屋組 補強案 2A：鉄骨フレーム補強

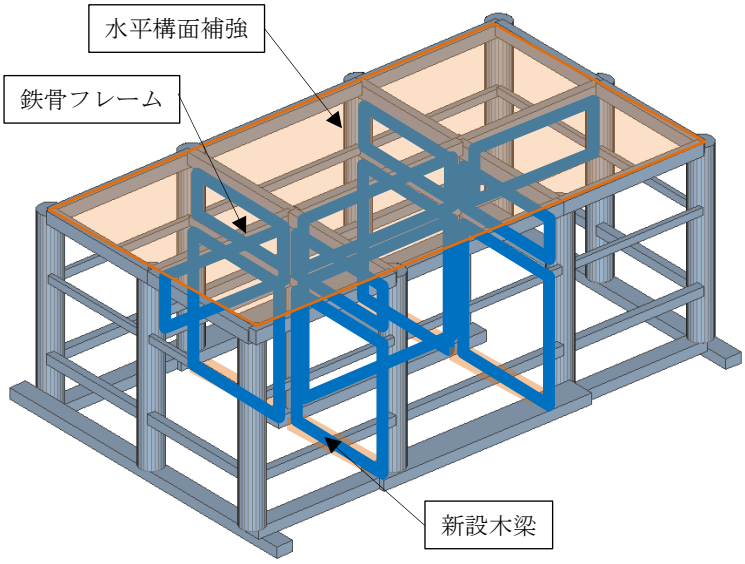
耐力要素として鉄骨フレームを中央部に追加する案である。フレーム枠であるので中央部が空いているが、重量は重い。

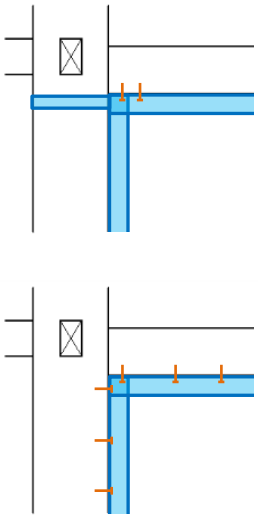


鉄骨フレーム配置図





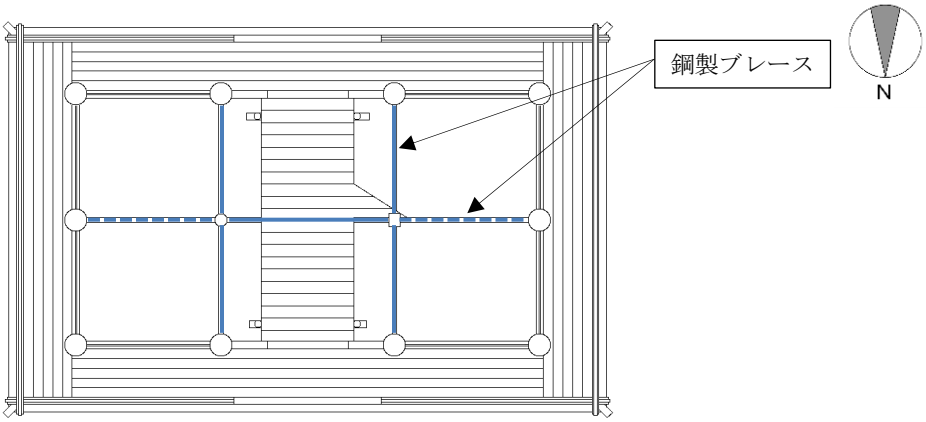




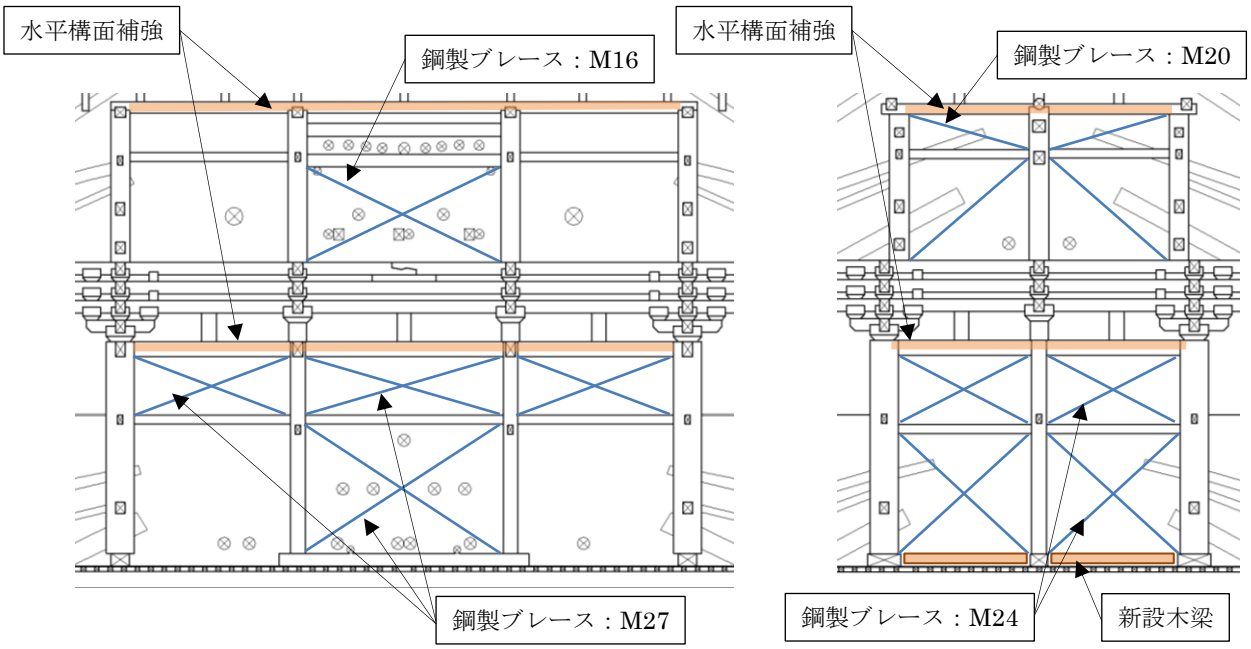
巻付け金物接合納まり概念図

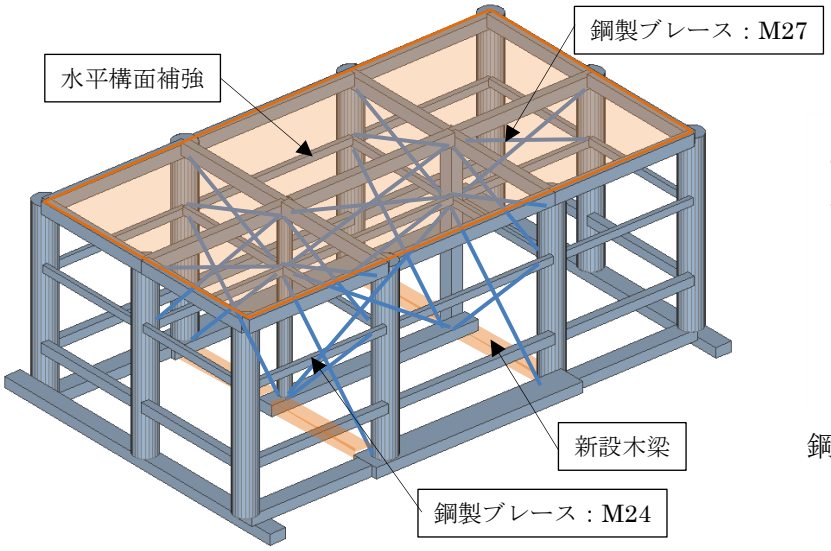
二重・小屋組 補強案 2B：鋼製ブレース補強

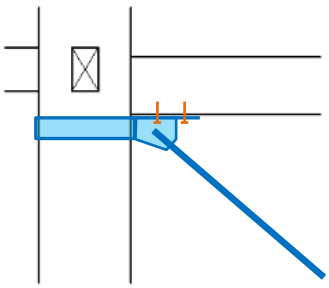
耐力要素として鋼製ブレースを中央部に追加する案である。部材断面が細く重量が軽いが、開口部に部材が配置される。



鉄骨ブレース配置図







鋼製ブレース接合納まり概念図

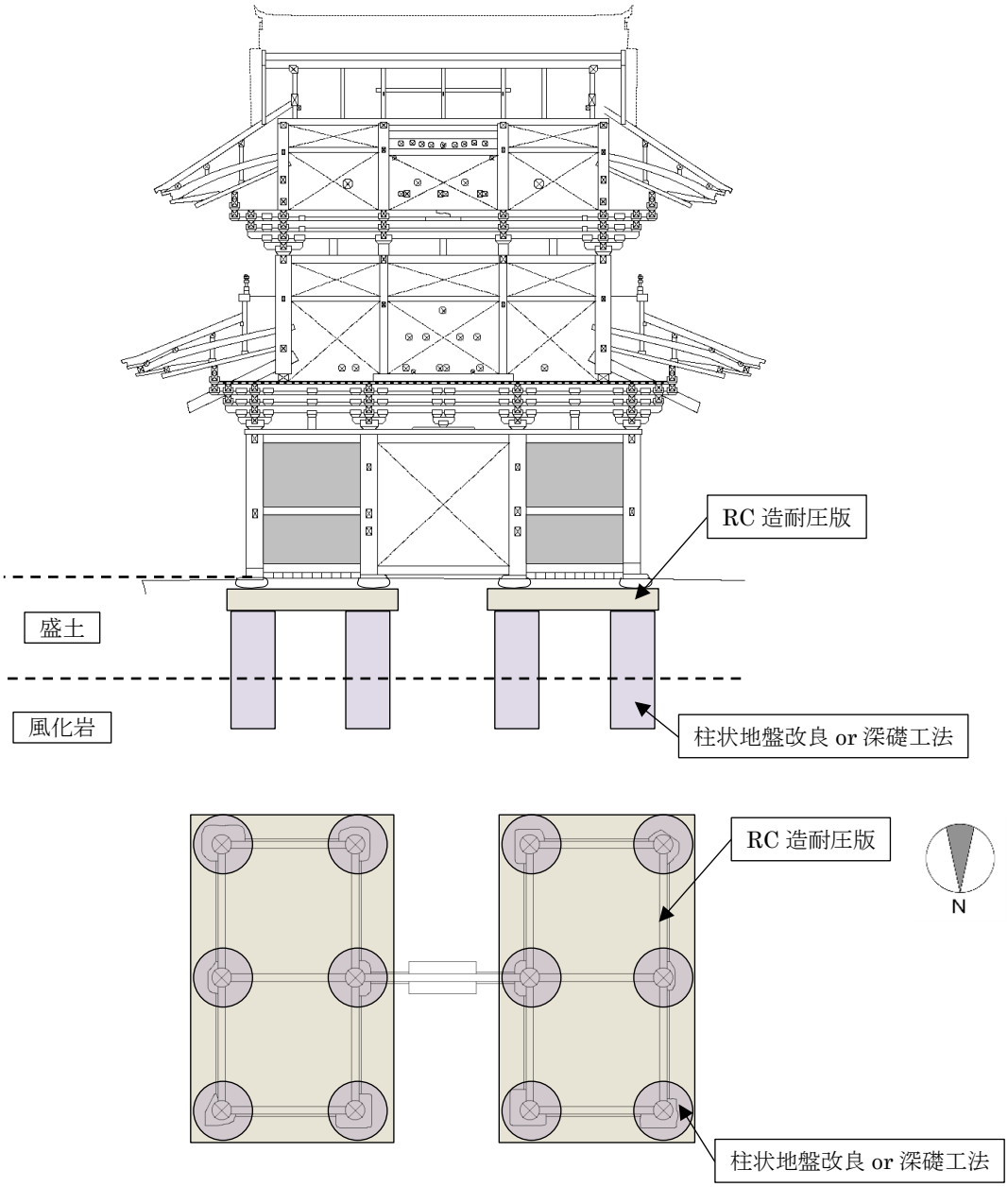
７．３ 基礎補強案

沈下が進行しており、礎石のみでは地耐力が不足するため、補強が必要である。

補強案： 耐圧版補強 ＋ 柱状地盤改良補強(もしくは深礎工法)

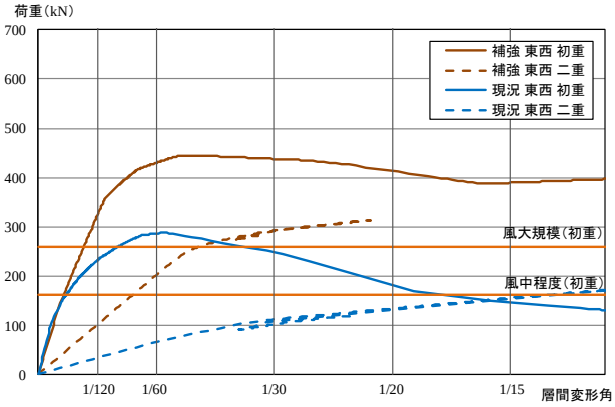
礎石の下に RC 造耐圧版と柱状地盤改良を配置して許容地耐力を増加させ、不同沈下を防ぐ。

本敷地は史跡であるが遺構の有無が不明なため発掘調査が必要である。発掘調査の結果によって、基礎形状が変更となる可能性がある。

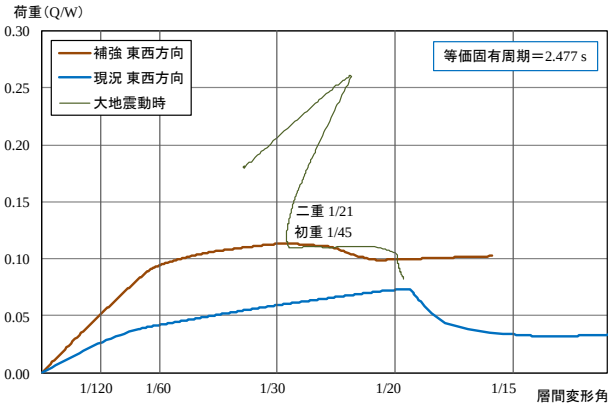


８．補強後の解析結果

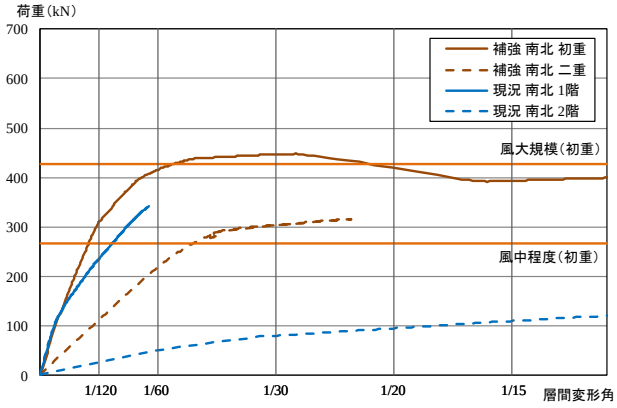
８．１ 補強案①（1A+2A）：耐力壁補強 ＋ 鉄骨フレーム補強案の解析結果



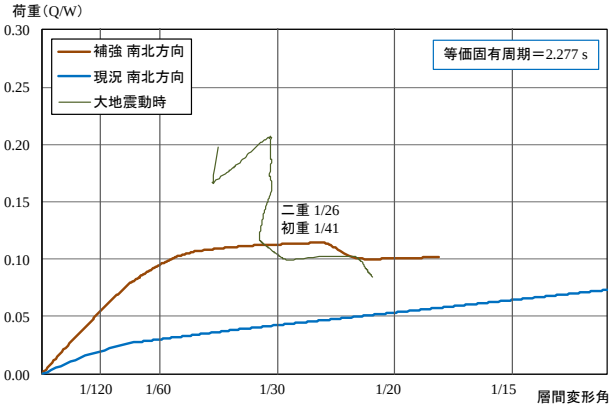
東西方向　荷重－変形曲線



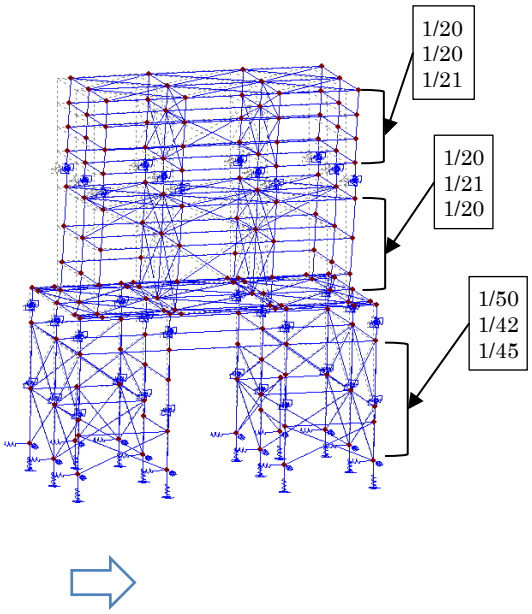
東西方向　等価線形化法



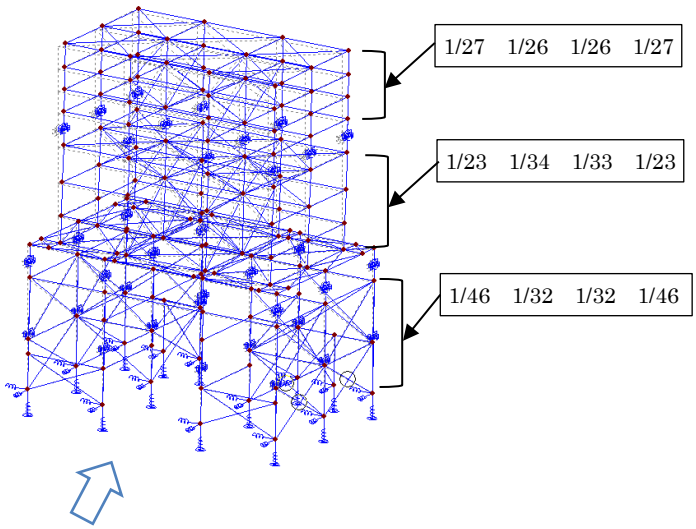
南北方向　荷重－変形曲線



南北方向　等価線形化法

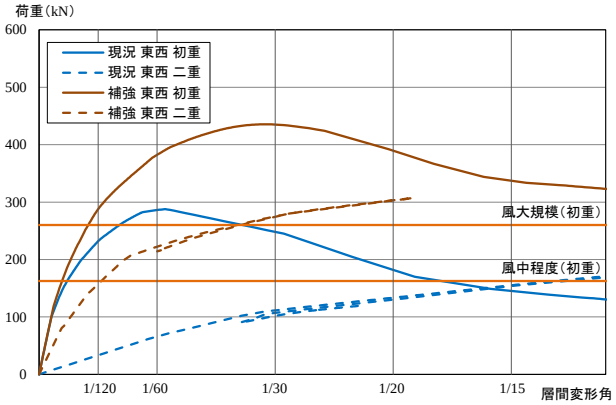


東西方向　変位図

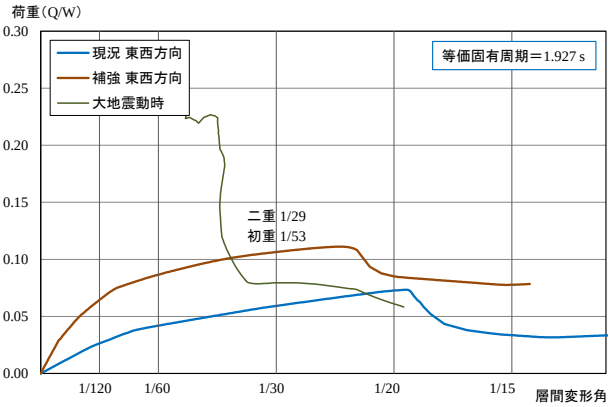


南北方向　変位図

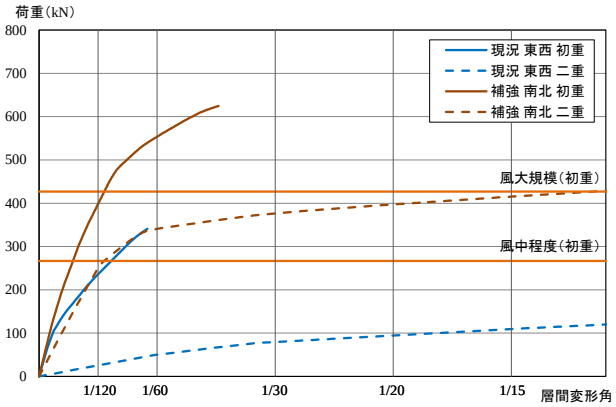
８．２ 補強案②（1B+2B）：耐力壁補強 ＋ 鋼製ブレース補強案の解析結果



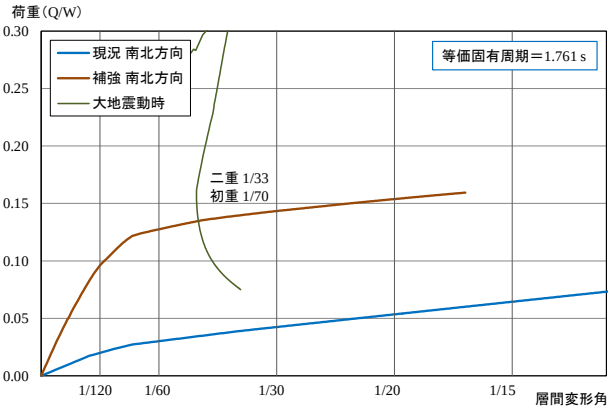
東西方向　荷重－変形曲線



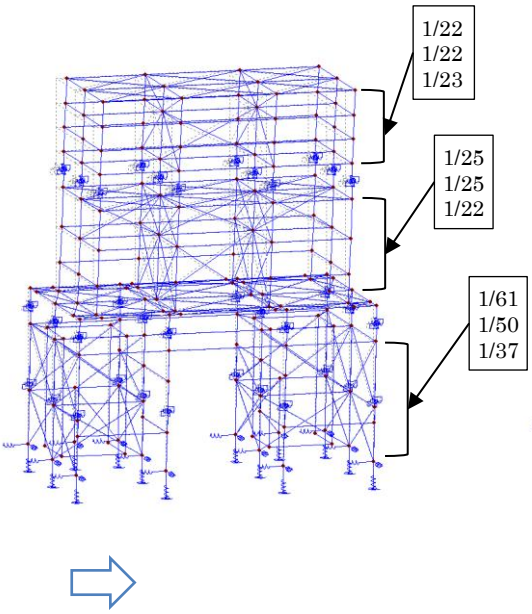
東西方向　等価線形化法



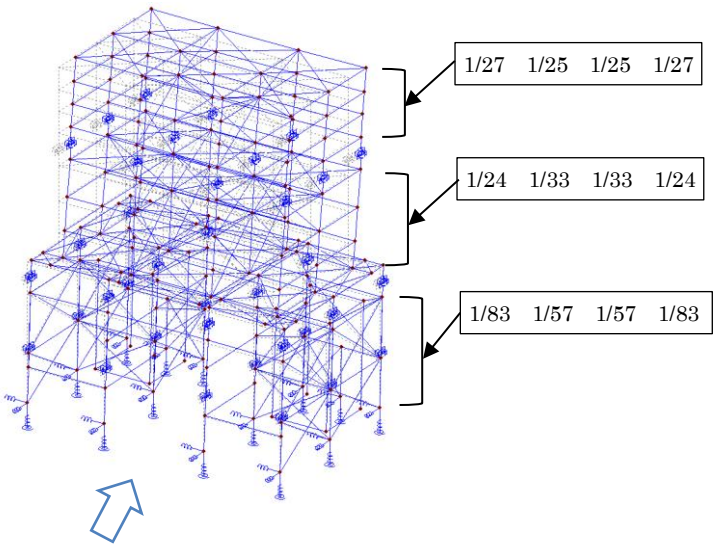
南北方向　荷重－変形曲線



南北方向　等価線形化法



東西方向　変位図



南北方向　変位図

８．３ 専門委員会協議結果

令和元年 12 月 18 日に行われた、第２回 国宝 金峯山寺二王門保存修理専門委員会の協議結果を以下に示す。

・補強案の方針として、初重は補強案 1B(鉄骨フレーム補強)、二重は補強案 2A(鉄骨フレーム補強)補強案 2B(鋼製ブレース補強)の併用案を採用する。
・二重 鉄骨フレームと鋼材ブレースの組合せは状況等に応じて選定を行うこと。
・基礎補強については沈下防止等のため行う。形状等の詳細については、発掘調査後に検討を行う。

８．４ 基礎補強案について

令和 2 年 1 月 17 日に 奈良県 地域振興部 文化財保存課の埋蔵文化財担当と協議を行った結果、遺構面に対する影響と RC 基礎形状について再検討することとなった。

協議においては、柱直下に何らかの構造補強を設けることが必須であることは提示しており、以下の条件による基礎の最小案を再検討する。

設計条件

・RC 基礎は最小範囲とし、柱直下に配置する。杭体についても現時点では柱直下にしておくが、地下遺構の状況次第では柱直下以外の場所で上部を支持するものとする。その場合、別途変更設計が必要。

・礎石の高さは不明なため推定値とする。

・杭体について

これまでの報告で提案した柱状改良について詳細検討した結果、現地盤を掘削できる柱状地盤改良機が大型なため搬入するルートがないことが判明した。(詳しくは、P.68,P.69 参考資料参照。)

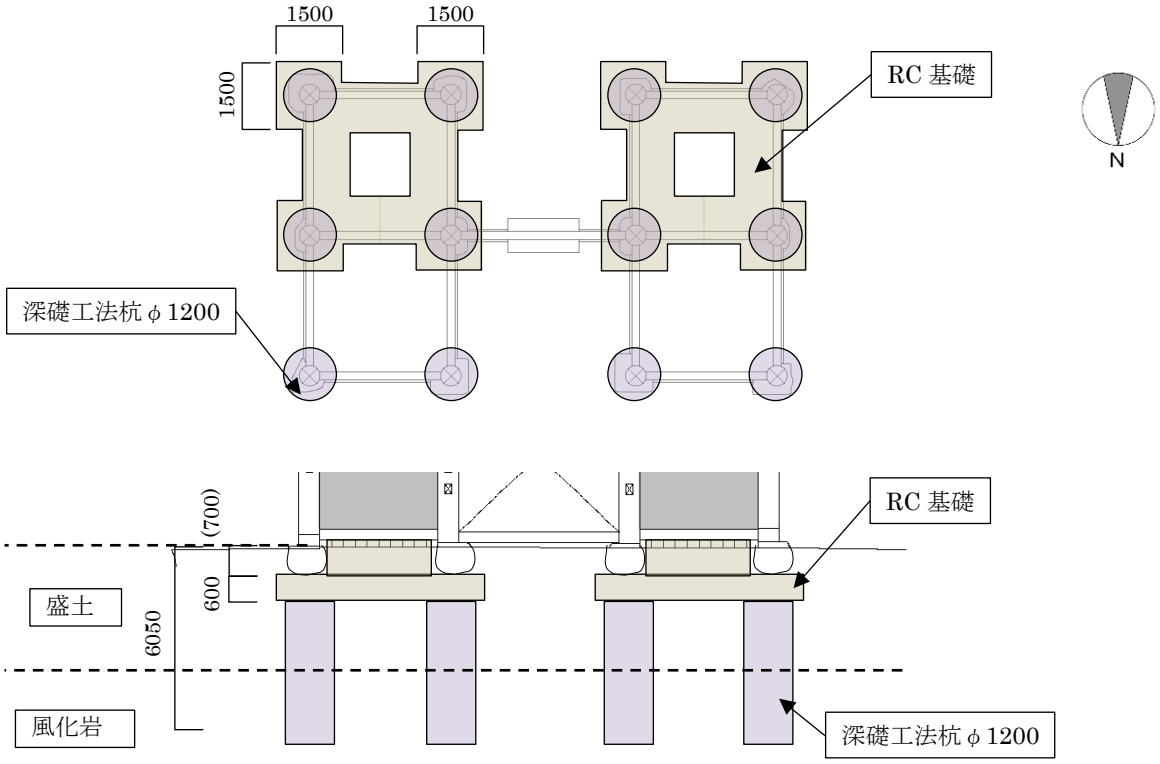
そのため、現状考えうる別の工法として人力および小型機械掘削(ミニバックホウ)で施工を行う深礎工法について、深礎工法を専門に行う業者と協議した結果、重機が入れない場所での実績が多いとのことから同工法を採用候補として杭の検討を行った。

深礎工法施工状況

・基礎補強案２

設計条件をもとに基礎補強案２を策定した。建物の柱直下には、深礎工法杭を配置する。北側の４箇所については、RC 基礎を設けずに礎石直下に杭を配置する。中央と南側に関しては、鉄骨フレームの荷重を受けるための RC 基礎を設ける。RC 基礎は鉄骨フレームの配置に合わせた形状とし、杭と接続させる。なお、礎石の高さは不明であるため、推定値で 700mm と設定した。

以下に、補強案を示す。



基礎補強案２

・注意事項

本建物の敷地は、史跡・名勝に指定されているため、上記工事を行うにあたっては発掘調査の対象となる。その結果重要な遺構が検出された場合は、基礎の工法につき埋蔵文化財担当者と十分に協議の上、建物補強と遺構保存の両方の観点から工事方針を定める必要があると想定される。