

第3章 あと施工アンカーの非破壊検査技術性能検証供試体

3.1 供試体概要

3.1.1 供試体の種類

あと施工アンカーの非破壊検査技術の性能検証に使用する供試体種類を表-3.1.1 に示す。
 なお、各供試体に配置したあと施工アンカーの不具合内容については各章で示す。

表-3.1.1 供試体概要

供試体名	検証内容	形状	供試体数	あと施工アンカー設置数
模擬供試体①	・非破壊検査技術の特徴に関する基礎的調査（第4章）	中空ボックス型	2体	63本
模擬供試体②	・非破壊検査技術の性能評価手法の検討（第5章）	版型	3体	36本
実部材供試体	・非破壊検査技術の性能評価手法の検討（第5章） ・あと施工アンカーの不具合と引張耐力の関係性の検証（第6章）	PC床版地覆部 （撤去部材）	1体	32本※
健全供試体	・非破壊検査技術の性能評価手法の検討（第5章）	版型	1体	9本

※32本中20本は撤去部材で用いられていた既設のアンカー

3.1.2 コンクリートの強度試験結果

模擬供試体及び健全供試体に用いたコンクリートの材齢28日における強度試験結果と実部材供試体に用いた撤去部材から採取したコンクリートの強度試験結果を表-3.1.2 に示す。
 実部材供試体については、撤去部材のPC床版地覆部から別々の位置でコンクリートコアを3本採取し、3本の試験結果の平均値を示した。

表-3.1.2 コンクリートの強度試験結果（模擬供試体、健全供試体）

供試体種類	設計基準強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
模擬供試体①	21	21.3	26.0	2.28
模擬供試体② 健全供試体		24.8	-	2.40
実部材供試体	-	26.9	25.0	-

3.1.3 供試体の形状寸法

(1) 模擬供試体①

あと施工アンカーは様々な構造に使用され、また、様々な向きで施工されている。このため、検査向き（上向き、横向き、下向き）が非破壊検査の精度や作業性等の基本性能に及ぼす影響についても検証できるように、中空ボックス型の供試体とした。模擬供試体①の詳細図を図-3.1.1に示す。

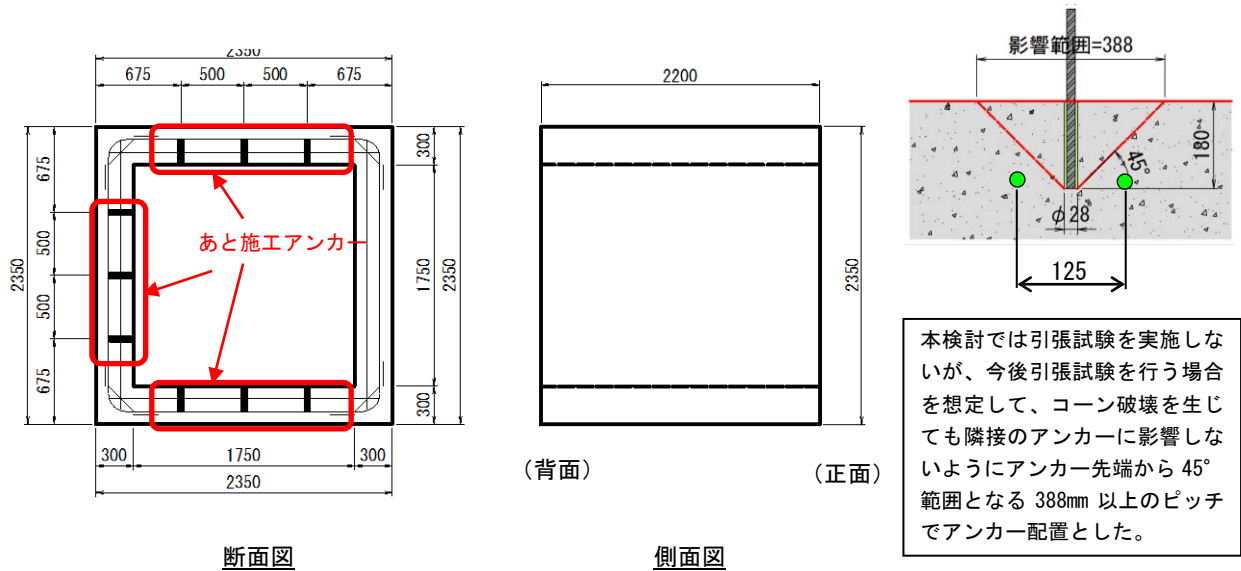


図-3.1.1 模擬供試体① 詳細図

(2) 模擬供試体②、健全供試体

模擬供試体②は予備情報（健全供試体の図面又は測定データ）の有無が検査性能に与える影響や不具合内容と耐力低下の相関について確認する試験を行うことを想定している。接着系アンカーにおいて接着剤の充填不足を模擬する場合、施工向きによって未充填部の位置が異なる。上向きに施工されたあと施工アンカーの場合、あと施工アンカーの先端に未充填部が存在するように充填不足を模擬しなければならないが、接着剤の漏出を防ぎながら充填量を管理するのが難しい。そこで、模擬供試体②については、充填不足を模擬しやすい下向きの施工ができる版型の供試体とした。あと施工アンカーに模擬する不具合の施工方法については3.2.2に示す。模擬供試体②の詳細図を図-3.1.2、健全供試体の詳細図を図-3.1.3に示す。

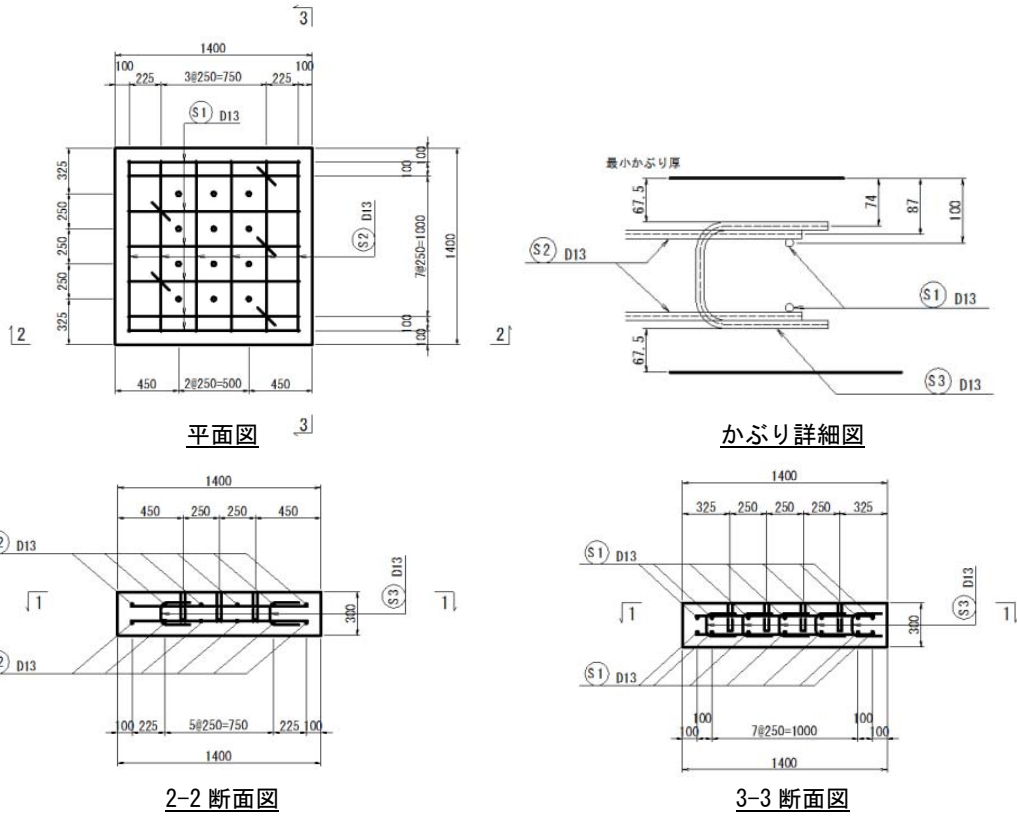


図-3.1.2 模擬供試体② 詳細図

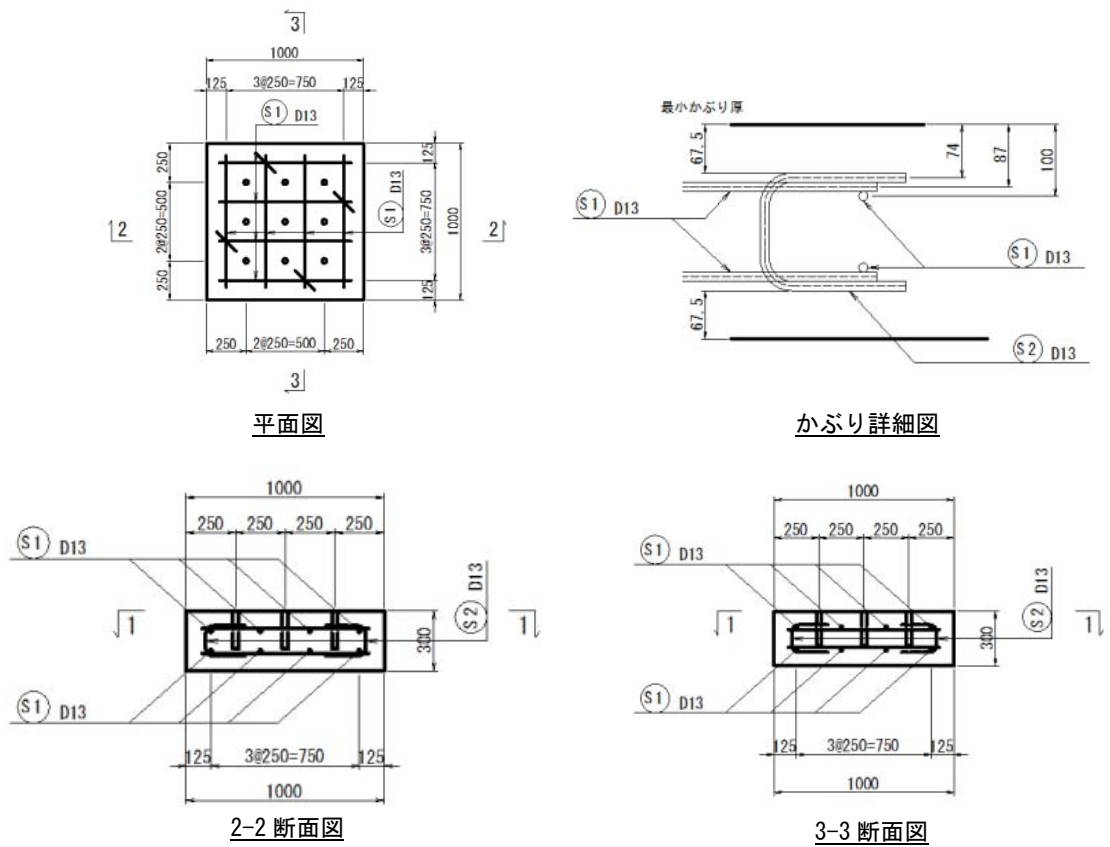


図-3.1.3 健全供試体 詳細図

(3)実部材供試体

実部材供試体には、実構造物に生じているコンクリート劣化やひび割れ、標識柱跡等の支障物が非破壊検査結果に及ぼす影響を確認することを想定し、橋梁架け替えによって撤去された PC 床版橋を用いた。撤去橋梁の諸元を表-3.1.3 に示す。PC 床版橋地覆部のひび割れ等の損傷が生じていない位置からコンクリートのコアを採取して材料調査を行った結果を表-3.1.4 に示す。

表-3.1.3 撤去橋梁緒元

橋梁形式	支間長	完成年	撤去時期	桁長
PCプレテンション床版橋	12.0m	1972年	2013年	約12.5m

表-3.1.4 材料調査結果

試験項目		試験結果	備考
圧縮強度 (N/mm ²)		26.9	起点、中間点、終点の3箇所の平均値
引張強度 (kN/mm ²)		1.9	起点、中間点、終点の3箇所の平均値
中性化深さ (mm)	最小値	0	3箇所の平均値
	最大値	0.5	
	平均値	0.1	
塩化物イオン量 (kg/m ³)	0~20mm	3.1	3箇所の平均値
	20~40mm	2.3	

撤去橋梁から採取した実部材の損傷図（外観調査結果）を図-3.1.4 に示す。地覆部には0.1~1.2mmのひび割れが発生し、写真-3.1.1は図-3.1.4中の写真番号8と記載がある位置を撮影した写真である。コンクリート表面は経年劣化（約40年経過）により骨材まわりのゆるみや表面の荒れが目立つ状態になっている。



ひび割れ幅=0.5mm
(図-3.1.4の写真番号8)

写真-3.1.1 地覆コンクリート表面状況 (図-3.1.4: 写真番号8)

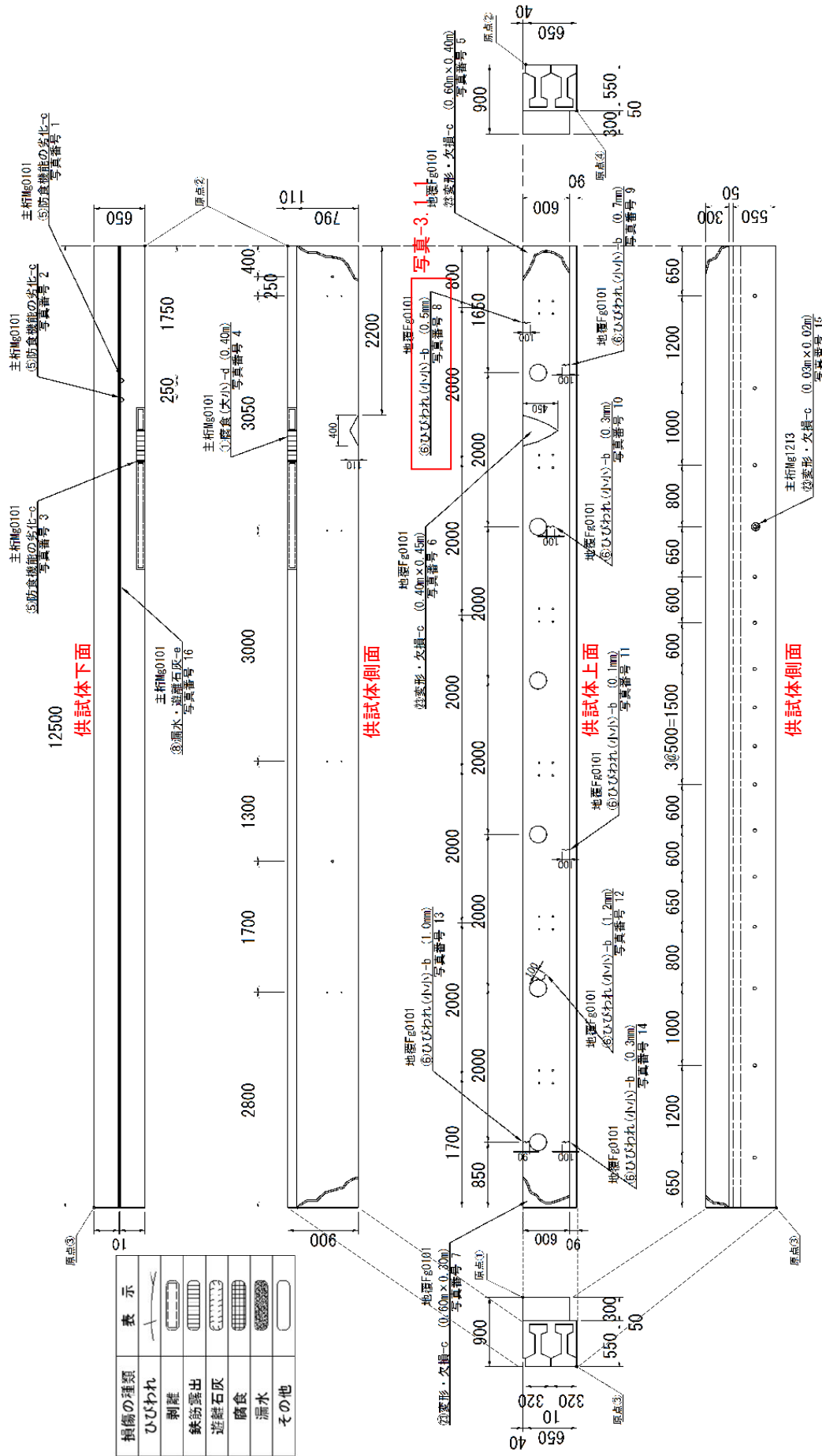


図-3.1.4 実部材損傷図（外観調査結果）

3.2 あと施工アンカーの施工

3.2.1 あと施工アンカーの使用材料

あと施工アンカーの使用材料を表-3.2.1に示す。アンカーボルトにはSS400の全ねじボルトを使用し、コンクリート面から突出する部分に溶融亜鉛メッキ（HDZ35）を施した。アンカーボルト径は接着系アンカーで16mm、18mm、金属系アンカーで16mm、24mmを使用した。これ以降、アンカーボルトをそれぞれM16、M18、M24と表記する。また、接着系アンカーカプセル式のボルト先端は片面45°カットとし、接着系アンカー注入式と金属系アンカーのボルト先端は寸切りとした。接着系アンカーの接着剤にはエポキシ樹脂、金属系アンカーのスリーブにはスリーブ打込み式のM16用、M24用を使用した。なお、以降アンカー種別については、接着系アンカーカプセル式を「樹脂カプセル」、接着系アンカー注入式を「樹脂注入」、金属系アンカーを「金属スリーブ」と表記する。

表-3.2.1 あと施工アンカーの使用材料

アンカー種別	接着系アンカーカプセル式	接着系アンカー注入式	金属系アンカー
アンカーボルト種類	全ねじボルト SS400 突出部溶融亜鉛メッキ（HDZ35）		
ボルト呼び径	M16、M18		M16、M24
接着剤	エポキシ樹脂カプセル	エポキシ樹脂注入	—
スリーブ	—	—	スリーブ打込み式 M16用、M24用

3.2.2 あと施工アンカーの施工方法

(1)あと施工アンカーの定着状態の定義

あと施工アンカーの定着状態の定義を図-3.2.1に示す。有効埋め込み深さ母材表面からアンカーボルト先端までの長さとして定義した。なお、先端部に所定の角度があるアンカーボルトはその部分を除いた距離とする。

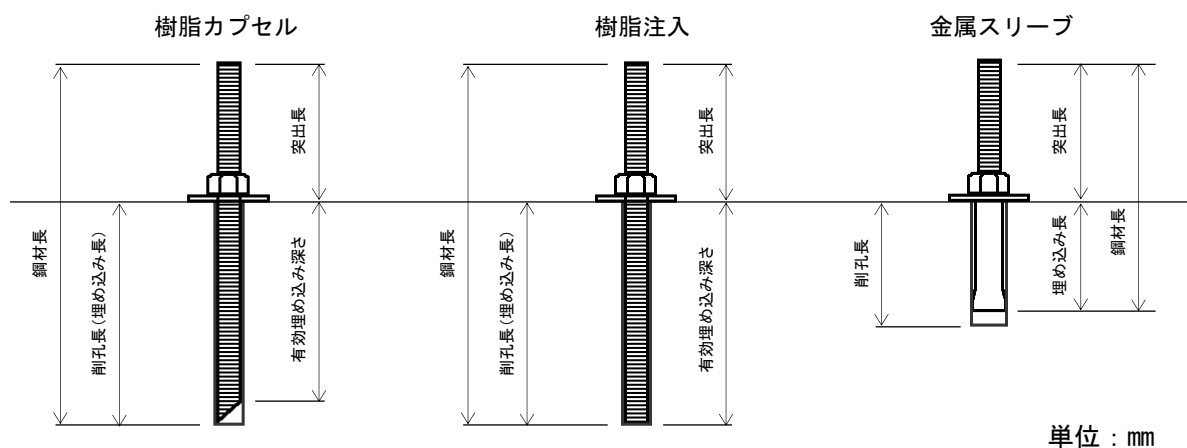


図-3.2.1 あと施工アンカー一定着状態の定義

(2)健全なあと施工アンカー

不具合を模擬したあと施工アンカーの検査性能を把握するためには、不具合を有する供試体に対して検査した結果の分析のみではなく、健全なアンカーに対する検査結果と比較することも必要である。そこで、健全なあと施工アンカーも検査した。接着系アンカーの埋め込み長はアンカーボルト径の 10 倍とした。以降、埋め込み長及び削孔長についてはアンカーボルトの直径の倍数で表記することとし、埋め込み長が 10 倍の場合は 10D と表記する。この時 D はアンカーボルトの直径を意味する (M16 の場合、D=16mm)。また、削孔径についてはφを用いて表記する。削孔径は使用するアンカーの仕様によって異なるため、メーカーカタログに示された値を用いた。金属系アンカーについてはメーカーカタログを参考に埋め込み長を決定した。健全なアンカーの仕様を表-3.2.2～表-3.2.3、あと施工アンカーの施工図を図-3.2.1 に示す。

表-3.2.2 健全なあと施工アンカーの仕様 (樹脂系)

アンカー種別	施工方向	アンカー呼び径 (mm)	変状ケース	埋め込み長 (mm)	削孔長 (mm)	削孔径 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	なし	10D	10D	19	100
樹脂注入	下向き	M16	なし	10D	10D	26	100
	下向き	M16	なし	10D	10D	28	100

表-3.2.3 あと施工アンカーの仕様 (金属系)

アンカー種別	施工方向	アンカー呼び径 (mm)	変状ケース	埋め込み長 (mm)	削孔長 (mm)	削孔径 (mm)
金属スリーブ	下向き	M16	なし	72	72	22.5
	下向き	M24	なし	125	125	33

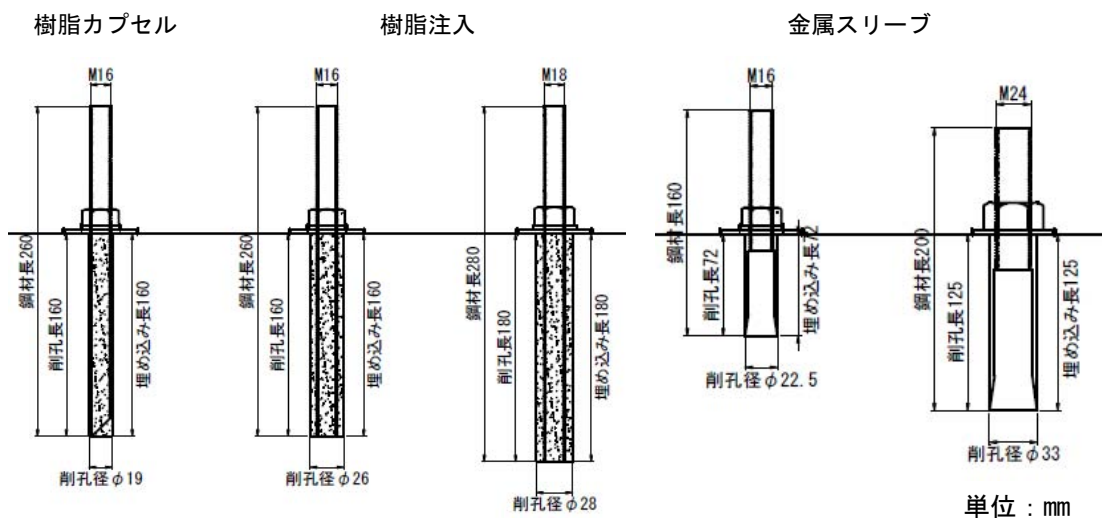


図-3.2.2 あと施工アンカー施工図 (健全)

(3)不具合の模擬方法

表-2.2.4 で定義した 11 種類の不具合の模擬方法を①～⑪に示す。なお、模擬供試体①については今後も非破壊検査の性能評価試験に活用することを想定しており、模擬した不具合の内容・配置等の詳細はこの報告書では明らかにしない。以下に、模擬供試体②、実部材供試体における不具合の模擬方法について示す。

①埋め込み長不足

埋め込み長不足は、アンカーボルトの付着強度を低下させる可能性のある不具合である。

埋め込み長不足の発生要因は、設計ミスと施工不良が考えられる。施工不良の場合、アンカーボルト設置のための削孔中に既設鉄筋が干渉し、削孔が短くなりそのままアンカーボルトを設置してしまうケースが考えられる。

埋め込み長不足の模擬は、削孔長と埋め込み長がともに短いケース（削孔長と埋め込み長の長さが同一）のみを設定した。なお、埋め込み長不足は削孔長に対して埋め込み長が短い場合も想定されるが、模擬が困難であるため対象外とした。

ボルト埋め込み長の設定は、表-3.2.4 のとおり埋め込み長不足があと施工アンカーの引張耐力に及ぼす影響について樹脂カプセルの M16 のアンカーボルトで試算した結果をもとに決定した。あと施工アンカーの設計降伏耐力を式 3.2.1、設計コンクリートコーン状破壊耐力を式 3.2.2、設計付着耐力を式 3.2.3 で求めた¹⁾。あと施工アンカーの設計引張耐力は、これらのうち最も小さいものとした。

$$T_y = f_{y\text{md}} \times a_0 \quad (3.2.1)$$

ここに、 T_y ：あと施工アンカーの設計降伏耐力(kN)

$f_{y\text{d}}$ ：アンカーボルトの素材の設計引張降伏強度(N/mm²)

a_0 ：アンカーボルトの最小断面積(mm²)

$$T_{\text{cd}} = \alpha \times A_{\text{a0}} \times f_{\text{cd}}^{1/2} \quad (3.2.2)$$

ここに、 T_{cd} ：あと施工アンカーの設計コンクリートコーン状破壊耐力(kN)

α ：あと施工アンカーの種別係数(接着系アンカーは 0.23)

A_0 ：母材のコーン状破壊面の有効水平投影面積(mm²)

f_{cd} ：母材コンクリートの設計圧縮強度 mm²)

$$T_{\text{bd}} = \tau_{\text{ad}} \times D_{\text{a0}} \times l_0 \times \pi \quad (3.2.3)$$

ここに、 T_{bd} ：あと施工アンカーの設計付着耐力(kN)

τ_{ad} ：アンカーボルトの設計付着強度(N/mm²)

D_0 ：アンカーボルトの直径(mm)

l_0 ：アンカーボルトの有効埋め込み長さ(mm)

試算は健全なアンカーの埋め込み長である 10D、埋め込み長を短くした 8.125D(130mm)、5D、2.5D の 4 種類実施した。最も埋め込み長が短い 2.5D と健全アンカーの半分である 5D ではコーン状破壊となり、引張耐力は 2.5D の場合で 3.4kN、5D の場合で 18.1kN であった。健全アンカーから 30mm だけ埋め込み長を短くした 8.125D はコーン状破壊耐力、付着耐力

ともに降伏耐力を上回った。この試算結果から健全なアンカーよりも埋め込み長は短くなっているものの、引張耐力の低下が生じないと考えられる 8.125D と引張耐力が低下しコーン状破壊が生じると考えられる 5D と 2.5D を模擬することとした。

土木学会の設計・施工指針¹⁾によると接着系アンカーの設計付着強度は接着剤の種別により変わらないとされているため、アンカータイプは樹脂カプセルとした(表-3.2.5、図-3.2.3)。

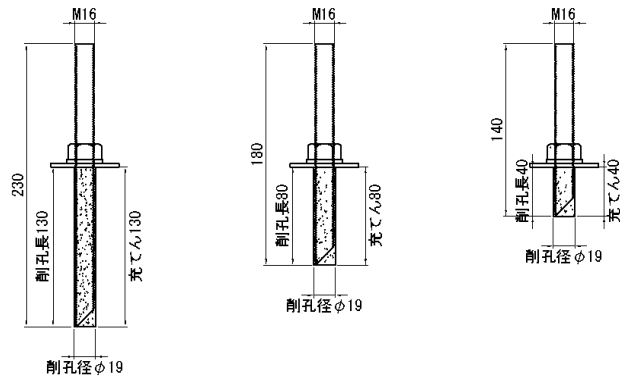
表-3.2.4 埋め込み深さと引張耐力(破壊形態)の試算¹⁾

模擬ケース				標準	短い		
				(10D)	(8.125D)	(5D)	(2.5D)
アンカー径	D	(mm)	16	16	16	16	
アンカー諸元							
アンカー筋呼び径	D0	(mm)	16	16	16	16	
ボルト埋め込み長(鋼材長)	l	(mm)	160	130	80	40	
削孔長	L	(mm)	170	140	90	50	
先端カット		(°)	45	45	45	45	
有効埋め込み深さ	le	(mm)	144	114	64	24	
①設計降伏耐力							
アンカー筋最小断面積	a0	(mm ²)	157	157	157	157	
設計引張降伏強度	f _{yd}	(N/mm ²)	235	235	235	235	
設計降伏耐力	T _{yd}	(kN)	36.9	36.9	36.9	36.9	
②設計コンクリートコーン状破壊耐力							
コンクリートの設計圧縮強度	f _{cd}	(N/mm ²)	24	24	24	24	
アンカー種別係数	α		0.23	0.23	0.23	0.23	
アンカー径	D0	(mm)	16	16	16	16	
有効投影断面積	A _c	(mm ²)	72382	46558	16085	3016	
コーン状破壊耐力	T _{cd}	(kN)	81.6	52.5	18.1	3.4	
③設計付着耐力(接着系アンカー)							
設計付着強度	T _{ad}	(N/mm ²)	10.7	10.7	10.7	10.7	
設計付着破壊耐力	T _{bd}	(kN)	77.4	61.3	34.4	12.9	
④引張耐力							
破壊形態 : min(①、②、③)	T	(kN)	36.9	36.9	18.1	3.4	
			鋼材降伏	鋼材降伏	コーン状破壊	コーン状破壊	

表-3.2.5 あと施工アンカー仕様（ボルトの埋め込み長不足）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	鋼材長・削孔長短い	8.125D (130)	10D	100
	下向き	M16	鋼材長・削孔長短い	5D		
	下向き	M16	鋼材長・削孔長短い	2.5D		

樹脂カプセル



単位：mm

図-3.2.3 あと施工アンカー施工図（ボルトの埋め込み長不足）

②斜め削孔

斜め削孔は、直接的にはアンカーボルトの付着強度の低下に影響を及ぼさない場合もあると考えられるが、接続する部材との応力伝達に設計との差が生じるなどの影響がある不具合である。

斜め削孔の発生要因は、埋め込み長不足と同様に既設の鉄筋に干渉して再度途中から角度をつけて削孔を開け直す施工不良や孔明け機械の不適切な設置、施工面の傾斜や凹凸が考えられる。このような場合、ボルトを途中で曲げることなく所定位置にボルトを垂直に施工するためには斜行している孔に対して斜めにアンカーを設置することになる。

事前に試験施工を行った結果から施工可能な削孔角度は 5° （ボルトが削孔に干渉しない）としたが、図-3.2.4(1)のとおり、削孔径との関係でボルトを鉛直に設置することは困難であるため、ハンマードリルにより孔口付近のコンクリートを切削することにより、ボルトの垂直を確保した（図-3.2.4(2)）。

アンカータイプは(3)①と同様の理由から樹脂カプセルとした。

表-3.2.6 あと施工アンカー仕様（斜め削孔）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	斜め削孔	10D	10D	100

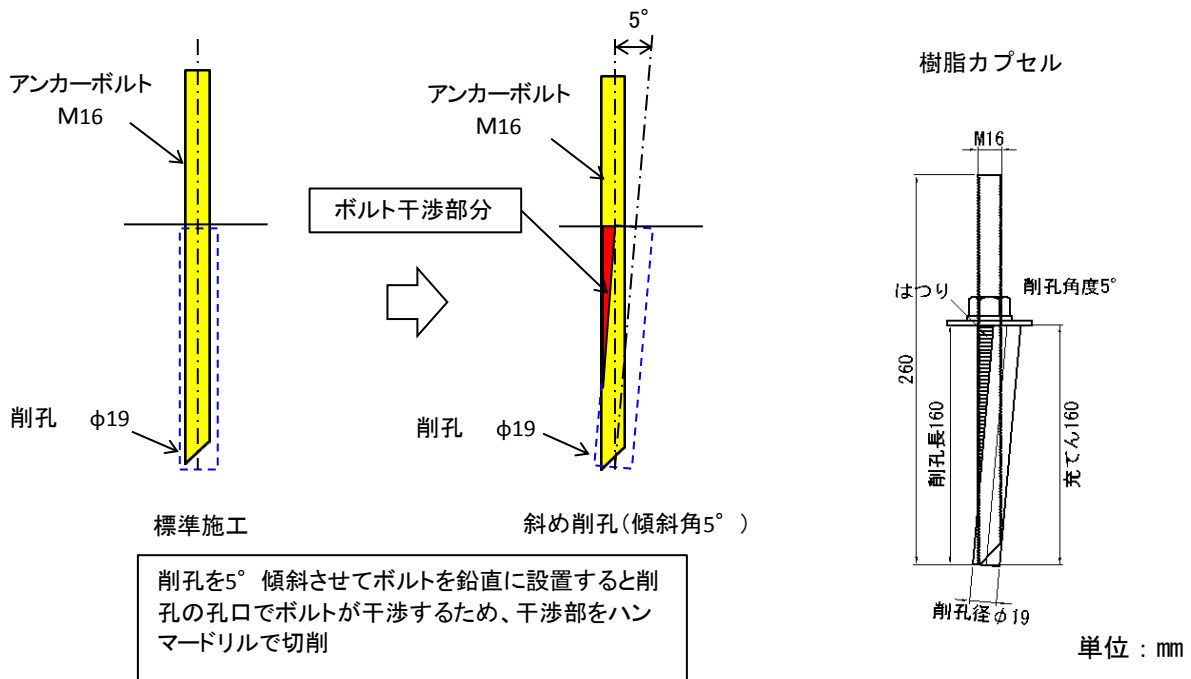


図-3.2.4(1) 斜め削孔 ボルト干渉イメージ

図-3.2.4(2) あと施工アンカー施工図(斜め削孔)

③鋼材破断

鋼材破断は、破断が生じている位置よりも先端側のボルトは付着強度に寄与しないため、削孔長に対して埋め込み長が短いケースと同様に付着長不足に起因するアンカーボルトの付着強度の低下が生じる不具合である。

鋼材破断の発生要因は、内部の樹脂に充填不足がある場合に、他のひび割れ等の変状から水が浸入してボルトの腐食が進行することなどが考えられる。

鋼材破断は、破断部でボルトが接触している状態と離間がある状態が存在すると考えられ、非破壊検査技術によっては検査結果にこれらの状態が影響を及ぼす可能性が考えられる。しかし、樹脂カプセルはドリルを用いて回転施工を行うため、離間がある状態を正確に模擬することは困難である。また、樹脂注入においても離間を正確に管理することは難しい。そのため、破断部でボルトが接触している状態を検査対象とすることとし、図-3.2.5のとおり中間位置 5D で一度切断したボルトを点付溶接することで鋼材破断を模擬した。

アンカータイプは(3)①と同様の理由から樹脂カプセルとした。

表-3.2.7 あと施工アンカーの仕様（鋼材破断）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	鋼材破断	5D	10D	100

樹脂カプセル

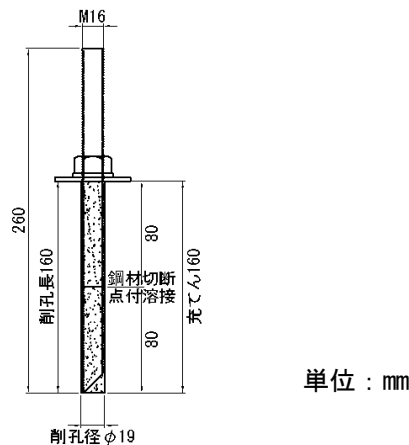


図-3.2.5 あと施工アンカー施工図（鋼材破断）



写真-3.2.1 破断ボルト（全景）



写真-3.2.2 破断ボルト（点付け溶接）

④充填不足

充填不足は付着面積が低下することによりアンカーボルトの付着強度を低下させる不具合である。

充填不足の発生要因は施工箇所の不良（ひび割れや空洞、注入口の養生不足）による樹脂の流出、削孔径や削孔長の過大による樹脂不足、注入量の管理ミスによる樹脂不足などが考えられる。また、充填不足が生じた場合、施工向き（上向き、横向き、下向き）によって樹脂の偏りが生じることが想定される。そこで、下向きに施工するアンカーについては、先端充填（口元側空洞）となるように樹脂カプセルと樹脂注入で模擬した。樹脂カプセルについては、必要樹脂量が確保できる小径用のカプセルを使用することで想定した充填率を管理した。上向きに施工するアンカーについては注入口の養生不良による樹脂の漏出によって充填不足となる場合を想定し、先端空洞（口元側充填）となるように模擬した。なお、樹脂カプセルは、カプセルをアンカーボルトの打撃と回転を同時に行うことにより樹脂を充填するため、先端空洞を模擬することは困難と考え、樹脂注入のみを対象とした。また、横向きに施工するアンカーの充填不足については、削孔内の下面側に樹脂が偏ることが想定されるが、正確に模擬することは困難であるため除外した。施工向きと空洞の定義を図-3.2.6に示す。

充填不足を模擬するための樹脂量の設定にあたっては、表-3.2.8 のとおり樹脂の充填不足があつた施工アンカーの引張耐力に及ぼす影響について試算した結果をもとに決定した。充填率はメーカーカタログに示された標準的な仕様で施工した場合を 100%とし、標準量に対する充填量（充填体積）の割合で示した。試算の結果、下向き施工、上向き施工ともに降伏耐力を下回る充填率は 50%であったことから、表-3.2.9 に示すように、樹脂充填率を 50%と 25%に設定した。また、引張試験による引張耐力への影響を確認するために標準ケース（100%）と降伏耐力を下回る 50%の中間となる 75%（設計上は鋼材降伏と見込まれる条件）についても設定した（図-3.2.7～3.2.9）。

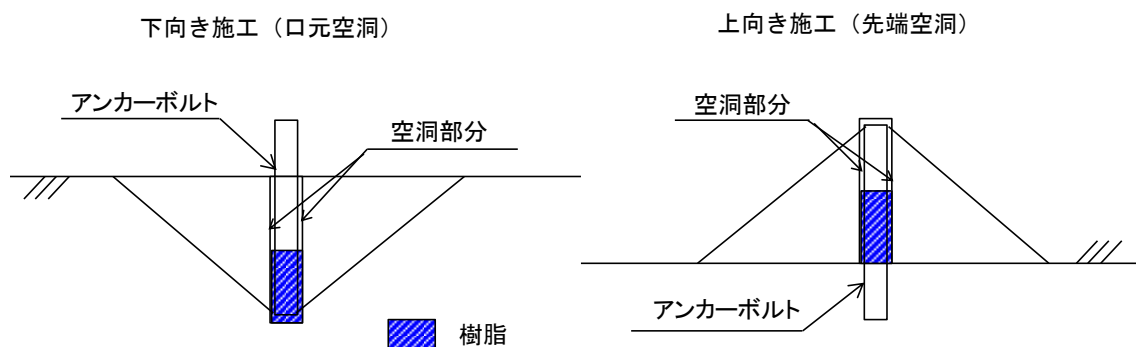


図-3.2.6 施工向きと空洞の定義

表-3.2.8 接着剤の充填不足と引張耐力（破壊形態）の試算

模擬ケース	下向き施工(口元空洞)				上向き施工(先端空洞)			
	標準 (100%)	充てん不足 (75%)	充てん不足 (50%)	充てん不足 (25%)	標準 (100%)	充てん不足 (75%)	充てん不足 (50%)	充てん不足 (25%)
アンカー径	D	M16	M16	M16	M16	M16	M16	M16
アンカー諸元								
アンカー筋呼び径	D0 (mm)	16	16	16	16	16	16	16
埋め込み深さ	l (mm)	160	160	160	160	120	80	40
削孔長	L (mm)	170	170	170	170	170	170	170
先端カット	(°)	45	45	45	45	45	45	45
①設計降伏耐力								
アンカー筋最小断面積	a0 (mm ²)	157	157	157	157	157	157	157
設計引張降伏強度	f _{yd} (N/mm ²)	235	235	235	235	235	235	235
設計降伏耐力	T _{yd} (kN)	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9
②設計コンクリートコーン状破壊耐力								
コンクリートの設計圧縮強度	f _{cd} (N/mm ²)	24	24	24	24	24	24	24
アンカー種別係数	α	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
アンカー径	D0 (mm)	16	16	16	16	16	16	16
有効埋め込み深さ	l _e (mm)	144	144	144	144	104	64	24
有効投影断面積	A _c (mm ²)	72382	72382	72382	72382	39207	16085	3016
コーン状破壊耐力	T _{cd} (kN)	81.6	81.6	81.6	81.6	44.2	18.1	3.4
③設計付着耐力(接着系アンカー)								
設計付着強度	τ _{ad} (N/mm ²)	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7
有効埋め込み深さ	l _e (mm)	144	104	64	24	144	104	64
設計付着破壊耐力	T _{bd} (kN)	77.4	55.9	34.4	12.9	77.4	55.9	34.4
④引張耐力								
	T (kN)	36.9	36.9	34.4	12.9	36.9	36.9	18.1
破壊形態 : min(①、②、③)		鋼材降伏	鋼材降伏	付着破壊	付着破壊	鋼材降伏	鋼材降伏	コーン状破壊

表-3.2.9 あと施工アンカーの仕様（充填不足）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	充てん不足 (小)	10D	10D	75
	下向き	M16	充てん不足 (中)			50
	下向き	M16	充てん不足 (大)			25
樹脂注入	下向き	M16	充てん不足 (小)			75
	下向き	M16	充てん不足 (中)			50
	下向き	M16	充てん不足 (大)			25
	上向き	M16	充てん不足 (小)			75
	上向き	M16	充てん不足 (中)			50
	上向き	M16	充てん不足 (大)			25
	下向き	M18	充てん不足 (小)	75		
	下向き	M18	充てん不足 (中)	50		
	下向き	M18	充てん不足 (大)	25		

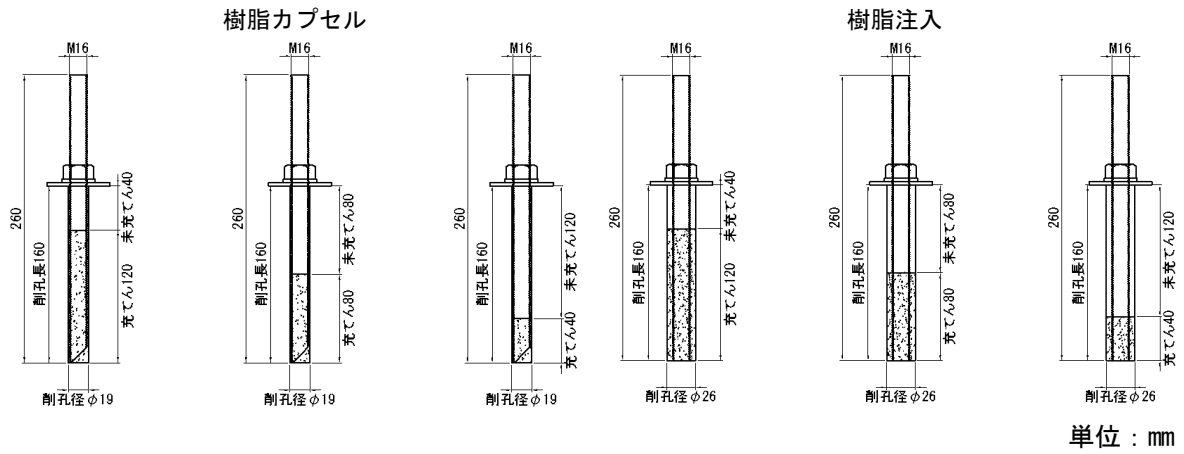


図-3.2.7 あと施工アンカー施工図（充填不足・M16 下向き）

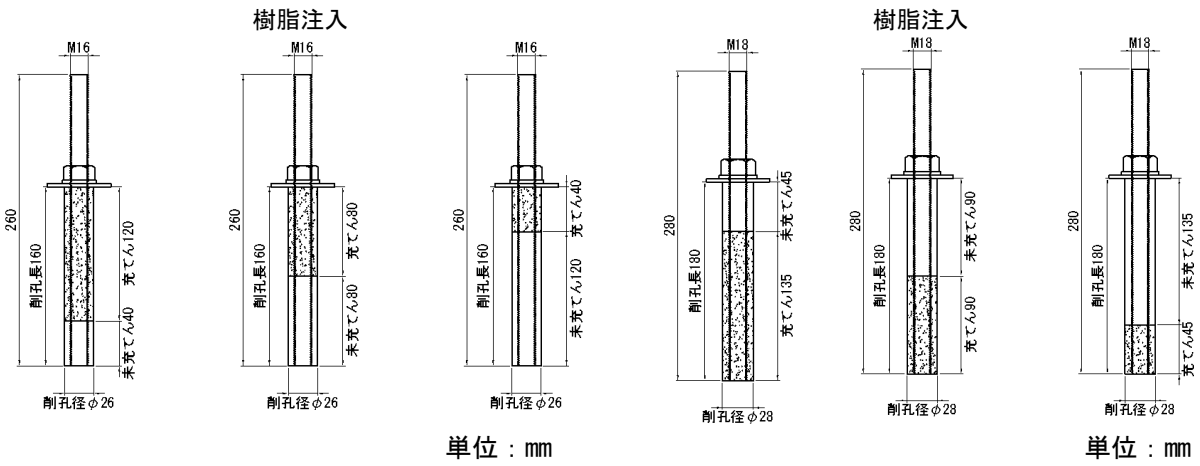


図-3.2.8 あと施工アンカー施工図
（充填不足・M16 上向き）

図-3.2.9 あと施工アンカー施工図
（充填不足・M18 下向き）



写真-3.2.3 75%充填用ボルト



写真-3.2.4 50%充填用ボルト



写真-3.2.5 25%充填用ボルト



写真-3.2.6 樹脂計量状況

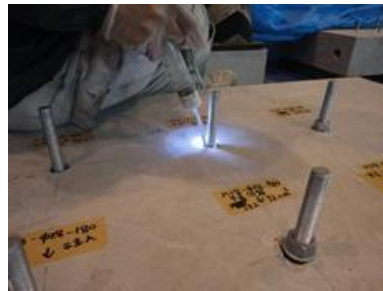


写真-3.2.7 樹脂注入状況

表-3.2.10 あと施工アンカーの樹脂充填率の計算

■樹脂カプセル (M16) の樹脂量計算

アンカー種別	ボルト呼び径 (mm)	有効径 (mm)	削孔径 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂断面積 (mm ²)	先端カット体積 (mm ³)	樹脂充填率 (%)	充填部長さ (mm)	樹脂注入率 (cm ³)
樹脂カプセル	M16	14.7	19	10D	114	1358	100%	160	19.6
					114	1358	75%	120	10.4
					114	1358	50%	80	5.9
					114	1358	25%	40	1.3

■樹脂注入 (M16) の樹脂量計算

アンカー種別	ボルト呼び径 (mm)	有効径 (mm)	削孔径 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂断面積 (mm ²)	先端カット体積 (mm ³)	樹脂充填率 (%)	充填部長さ (mm)	樹脂注入率 (cm ³)
樹脂注入	M16	14.7	26	10D	361	0	100%	160	58
					361	0	75%	90	33
					361	0	50%	60	22
					361	0	25%	30	11

■樹脂注入 (M18) の樹脂量計算

アンカー種別	ボルト呼び径 (mm)	有効径 (mm)	削孔径 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂断面積 (mm ²)	先端カット体積 (mm ³)	樹脂充填率 (%)	充填部長さ (mm)	樹脂注入率 (cm ³)
樹脂注入	M18	16.4	28	10D	405	0	100%	180	73
					405	0	75%	90	36
					405	0	50%	60	24
					405	0	25%	30	12

⑤硬化不良

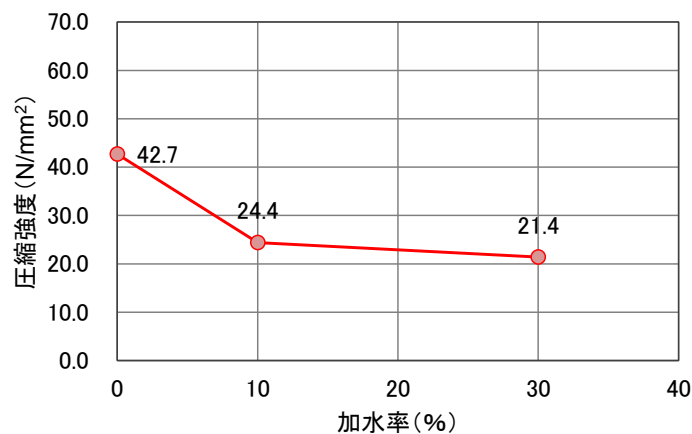
硬化不良は樹脂が期待通りに硬化せず、所定の強度が得られない不具合であり、あと施工アンカーの付着強度を低下させる可能性がある。

硬化不良の発生要因は、樹脂カプセルにおいては樹脂の攪拌不足や過剰攪拌により主剤と硬化剤が適正に混合されない場合、樹脂注入においては主剤と硬化剤の配合間違いなどが考えられる。また、水中施工用ではないあと施工アンカーを水中や孔内に水が溜まった状態で用いた場合や、水中施工用であっても適切な施工が行われずに、樹脂中に水が混入することで硬化不良を生じる可能性もある。ここでは、樹脂中に水が混入することで硬化不良が発生し、樹脂の強度が低下する状態を模擬することとした。

(1)樹脂カプセル

樹脂カプセルの母材体積の10%、30%にあたる量の水を添加し、水の混入が樹脂の圧縮強度に及ぼす影響を調べた。なお、樹脂カプセルについては弾性係数についても確認した。圧縮強度と樹脂カプセルへの加水率の関係を図-3.2.10、状況写真を写真-3.2.8～写真-3.2.11に示す。供試体は縦横の寸法が13～15mm程度、高さが43mm程度の直方体に成型し、長手方向が鉛直となるように圧縮試験を実施した。

No.1は水を添加せず健全な状態、No.2は母材体積の10%、No.3は30%水を添加したものである。その結果、水を添加したNo.2、No.3の圧縮強度はNo.1の圧縮強度に対して50%近くまで圧縮強度が低下した。弾性係数も同様の傾向であった。一方で、水の添加によって強度低下は確認されたが、水の添加量による圧縮強度及び弾性係数の低下率に大きな違いは見られず、水の添加量が10%でも圧縮強度は50%近く低下した。



供試体 番号	加水率 (%)	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	最大荷重 (N)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
No.1	0	15.99	15.23	43.16	10,400	42.7	5,791
No.2	10	15.97	15.11	43.21	5,890	24.4	2,460
No.3	30	15.90	15.05	43.04	5,130	21.4	2,223

図-3.2.10 圧縮強度と加水率の関係（樹脂カプセル）



写真-3.2.8
試験用樹脂アンカー



写真-3.2.9
樹脂攪拌状況（加水）



写真-3.2.10
供試体（圧縮試験前）

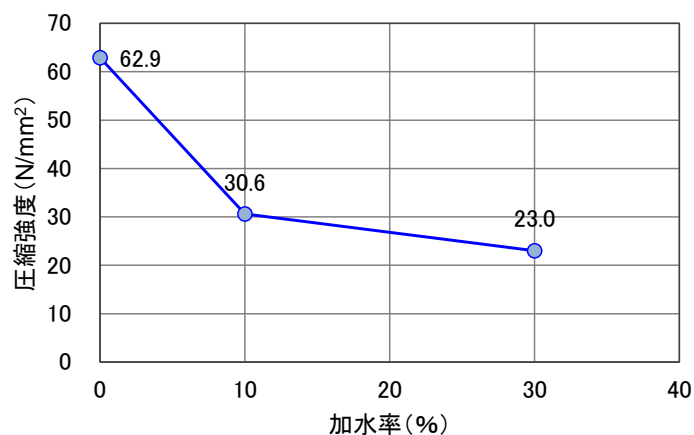


写真-3.2.11
圧縮試験状況

以上の結果から、本研究では、樹脂の圧縮強度が 50%程度まで低下する状態を硬化不良の状態とみなすこととし、樹脂カプセルにおいては、加水率を 10%として硬化不良を模擬することとした。

(2)樹脂注入

樹脂カプセルと同様の試験条件で水の加水率が圧縮強度に及ぼす影響を確認した（図-3.2.11）。その結果、樹脂カプセルと同様に母材体積の 10%にあたる量の水を添加した No.2 で、No.1 の場合に比べて 50%程度まで強度低下が確認された。また、樹脂カプセルと同様に水の添加量による圧縮強度の低下率の差は小さかった。よって、樹脂注入においても水の加水率を 10%として硬化不良を模擬することとした。



供試体番号	加水率 (%)	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	最大荷重 (N)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
No.1	0	14.83	13.67	42.79	12,751	62.9	-
No.2	10	14.79	13.60	42.89	6,159	30.6	-
No.3	30	14.84	13.60	42.92	4,634	23.0	-

図-3.2.11 圧縮強度と加水率の関係（樹脂注入）

硬化不良は表-3.2.11、図-3.2.12 に示すとおり、埋め込み長の全長にわたって模擬した。樹脂カプセルについては、樹脂と水を一様に攪拌するため、あらかじめすり鉢で粉碎した樹脂カプセルに樹脂体積の 10%の水を加えて攪拌してから注入した。樹脂注入については、主剤と硬化剤を攪拌するタイミングで樹脂体積の 10%の水を加えた。

水の計量は体積とし、樹脂の比重 1.2g/cm^3 から算出した。なお、樹脂の比重は今回使用した材料メーカーのカタログ値とした。

表-3.2.11 あと施工アンカーの仕様（硬化不良）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)	加水率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	硬化不良	10D	10D	100	10
樹脂注入	下向き	M16	硬化不良				10

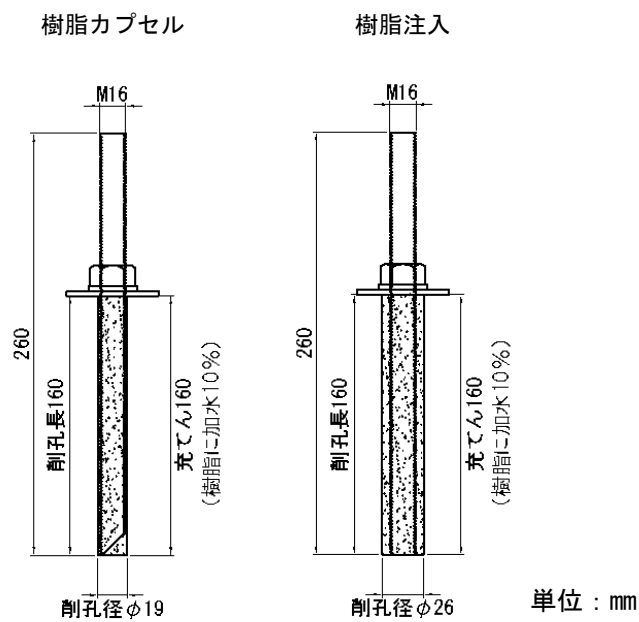


図-3.2.12 あと施工アンカー施工図（硬化不良）

⑥付着不良

付着不良は、付着面に様々な異物の介在が生じることで健全な付着面積が減少することが、アンカーボルトの付着強度を低下させる不具合である。

付着不良の発生要因は樹脂カプセルの場合、樹脂の攪拌不足による回り込み不足や清掃不足などの施工不良が考えられる。また、付着面における亀裂、空洞の発生等の施工箇所の不良によるものが考えられる。樹脂注入の場合は、樹脂カプセルと同様に清掃不足による施工不良や施工箇所の不良によるものが考えられる。

付着不良は樹脂カプセルと樹脂注入で模擬し、模擬範囲は埋め込み長全長とした。界面との介材や孔壁との密着不足の模擬方法は、樹脂カプセルは、孔壁にセメントペーストを塗布する方法とし、樹脂注入については、孔壁にプラスチック障子紙を貼り付ける方法とした(図-3.2.13)。



写真-3.2.12 セメントペースト塗布状況 写真-3.2.13 セメントペースト塗布完了 写真-3.2.14 障子紙設置状況 写真-3.2.15 障子紙設置完了

表-3.2.12 あと施工アンカーの仕様(付着不良)

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径(mm)	変状ケース	埋込み長(mm)	削孔長(mm)	樹脂充填率(%)	異物
樹脂カプセル	下向き	M16	付着不良	10D	10D	100	セメントペースト
樹脂注入	下向き	M16	付着不良				障子紙

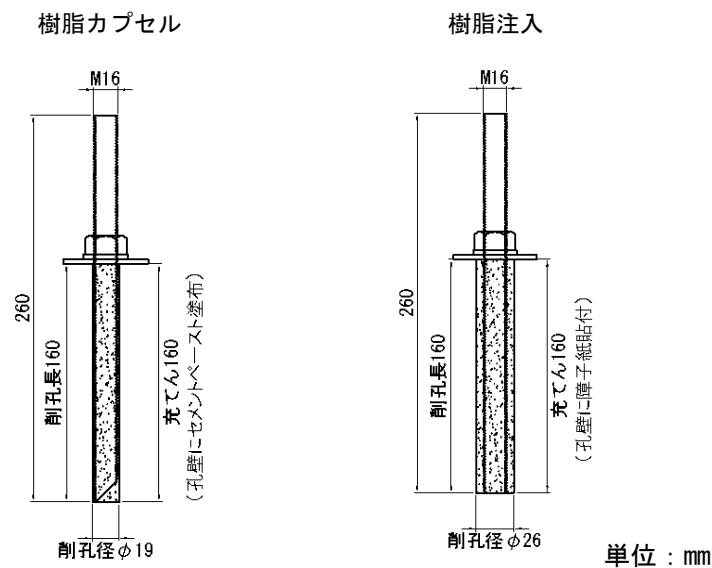


図-3.2.13 あと施工アンカー施工図(付着不良)

⑦鋼材腐食

鋼材腐食はアンカーボルトの表面腐食程度であれば付着強度に及ぼす影響は少ないと考えられるが、腐食が進行し、腐食により表面に生成された錆層が弱点となって付着性能が低下することが考えられる。また、腐食による断面積の減少に起因するアンカーボルトそのものの破断は、付着強度の低下が生じる可能性のある不具合である。

鋼材腐食の発生要因は、アンカーボルトの鋼材破断と同様に、内部の樹脂に充填不足がある場合に、他のひび割れ等の変状から水が浸入することなどが考えられる。なお、適切に施工されていても、経年によるひび割れ等から水分が浸入した場合には、鋼材腐食のみならず、コンクリートの劣化などの他の変状も併発していることが考えられるが、これらの再現は困難であること、腐食そのものの直接的な検出性に着目していることから鋼材の腐食のみを模擬することとした。

鋼材腐食は、ボルト全面に錆を生じさせたアンカーボルトを使用して模擬した。アンカーボルトの錆は、酸性の洗剤と塩水をアンカーボルトに塗布して作製した。

対象は樹脂カプセルとし、ボルトの腐食範囲はめっき未処理部分内の先端から 140mm 区間とした (図-3.2.14)。

表-3.2.13 あと施工アンカーの仕様 (鋼材腐食)

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂カプセル	下向き	M16	鋼材発錆 (全面)	10D	10D	100

樹脂カプセル

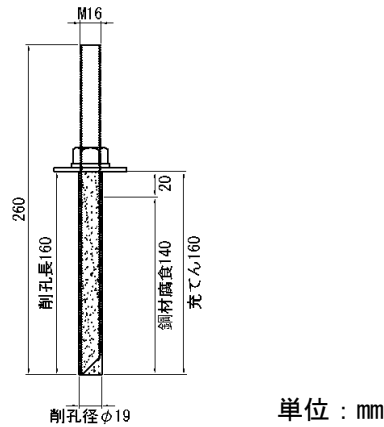


図-3.2.14 あと施工アンカー施工図 (鋼材腐食)



写真-3.2.16 腐食ボルト



写真-3.2.17 腐食状況



写真-3.2.18 腐食状況

⑧削孔径大【接着系】

削孔不良（削孔径大）はカプセル式の場合、ボルト径に対して削孔径が大きいと、外縁部の攪拌不良により付着不良が生じる可能性がある不具合である。

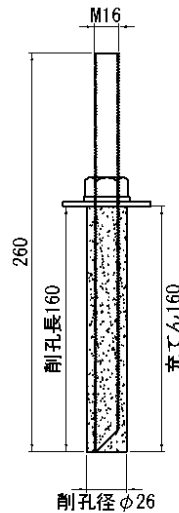
削孔径大の発生要因は、削孔用ドリルの誤用が考えられる。

削孔径は、標準的な 19mm から 26mm へと拡大した。なお、樹脂の充填率は 100%とした（図-3.2.15）。

表-3.2.14 あと施工アンカーの仕様（削孔径大）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)	削孔径 (mm)
樹脂カプセル	下向き	M16	削孔径大	10D	10D	100	φ19→φ26

樹脂カプセル



単位：mm

図-3.2.15 あと施工アンカー施工図（削孔径大）

⑨削孔長深

削孔不良（削孔長深）は、カプセル式の場合、ボルト埋め込み長に対して削孔長が深いと、ボルト先端が孔底まで届かないため、先端部に未攪拌部が残る。未攪拌部は樹脂の硬化不良を発生させ、その結果、付着強度を低下させる可能性がある。

削孔長深の発生要因は、深さ管理のために削孔用ドリル等に設けるマーキングのミスなどが考えられる。削孔長が深くなってしまった場合でも、ボルトを孔底まで挿入し、所定の樹脂量が充填されれば付着強度の低下は発生しないと考えられるが、コンクリート表面からの所定のボルト突出長を確保するために、ボルトを孔底まで挿入しなかった場合には、樹脂の充填不足が生じ、付着強度が低下する可能性がある。

削孔長深の模擬はボルト先端と孔底の不一致による定着長不足を模擬することとし、埋め込み長 10D に対して、削孔長を 12.5D としたケースについて充填量を計算した(表-3.2.15)。削孔長を 12.5D とした場合、ボルトが到達していない 2.5D (40mm) の孔内に樹脂が充填されるため、有効埋め込み長は 110mm となり、ボルト埋め込み部の樹脂充填率は 78.75% となる。また、比較用としてボルト埋め込み部の樹脂充填率が 100%となる場合も作製した(図-3.2.16)。

表-3.2.15 あと施工アンカーの樹脂充填率の計算

アンカー種別	ボルト呼び径(mm)	有効径(mm)	削孔径(mm)	削孔長(mm)	樹脂断面積(mm ²)	先端カット体積(mm ³)	有効埋め込み長(mm)	樹脂充填率(%)	樹脂注入率(cm ³)
樹脂カプセル	M16	14.7	19	10D	114	1358	144	100%	19.6
				12.5D	114	1358	110	78.75%	11.1

表-3.2.16 あと施工アンカーの仕様（削孔長深）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径(mm)	変状ケース	埋込み長(mm)	削孔長(mm)	樹脂充填率(%)
樹脂カプセル	下向き	M16	削孔長深（充填不足）	10D	12.5D	78.75
	下向き	M16	削孔長深（樹脂充填率 100%）			100

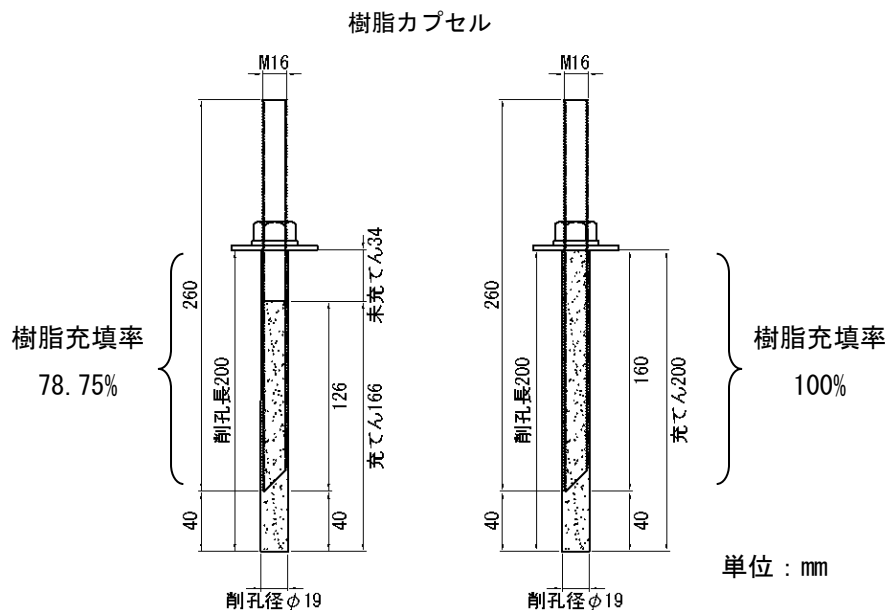


図-3.2.16 あと施工アンカー施工図（削孔長深）

⑩拡張不足（打ち込み不足）

金属系アンカーのスリーブの拡張不足（打ち込み不足）は、拡張不足によって拡張部に適切な支圧力・摩擦力が作用せず、アンカーボルトの引張耐力を低下させる不具合である。

拡張不足の発生要因はアンカーボルトが鉄筋に干渉し埋め込み深さが不足することで、スリーブを十分に打ち込むことができずに生じると考えられる。また、高強度のコンクリートに施工する場合には、先端の拡張部が十分に開かない場合がある。アンカー拡張部が十分に拡張できなければ必要な支圧力・摩擦力が得られないため、引張耐力が低下する可能性がある。

拡張不足は拡張部の打込み量が不足し、十分に拡張されない状態を模擬した。標準アンカー施工時の打込み量を基準として、打込み量を 1/2 に設定した。なお、打込み量を 1/2 とした場合、スリーブがコンクリート表面から突出してしまうため、あらかじめコンクリート表面側のスリーブ端部を打込み量の 1/2 分の長さだけ切断した（図-3.2.17、写真-3.2.19～写真-3.2.21）。

表-3.2.17 あと施工アンカーの仕様（拡張不足）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	打込み量 (mm)
金属スリーブ	下向き	M16	なし	60	72	15
	下向き	M16	打込み量 1/2	52.5	72	7.5
	下向き	M24	なし	110	125	22
	下向き	M24	打込み量 1/2	99	125	11

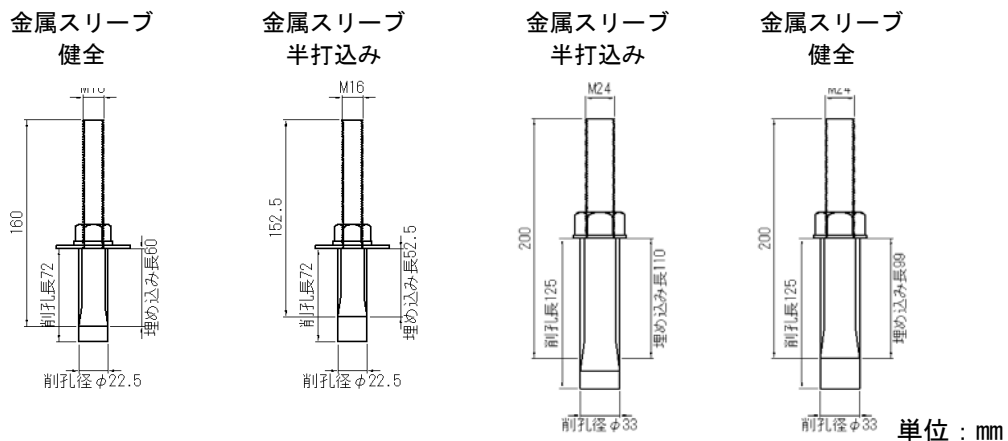


写真-3.2.19
切断後のスリーブ長 (M16)



写真-3.2.20
切断後のスリーブ長 (M24)



写真-3.2.21
打ち込み量の管理

⑪削孔径大【金属系】

削孔不良（削孔径大）は、ボルト径に対して削孔径が大きいことで拡張部に適切な支圧力・摩擦力が作用せず、引張耐力が不足する不具合である。

削孔径大の発生要因は、設計ミスによるものや適切な削孔径で施工しない施工不良が考えられる。削孔径の不良は金属スリーブの拡張不足（定着不足）につながる。

削孔径大の模擬方法は、本研究で用いた金属スリーブに適した削孔径 22.5mm に対して、径を大きくした 26.5mm、M24 では削孔径 33.0mm に対して、径を大きくした 38.0mm にとした（図-3.2.18）。

表-3.2.18 あと施工アンカーの仕様（削孔径大）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	削孔径 (mm)
金属スリーブ	下向き	M16	削孔径大	60	72	26.5
	下向き	M24	削孔径大	110	125	38

金属スリーブ

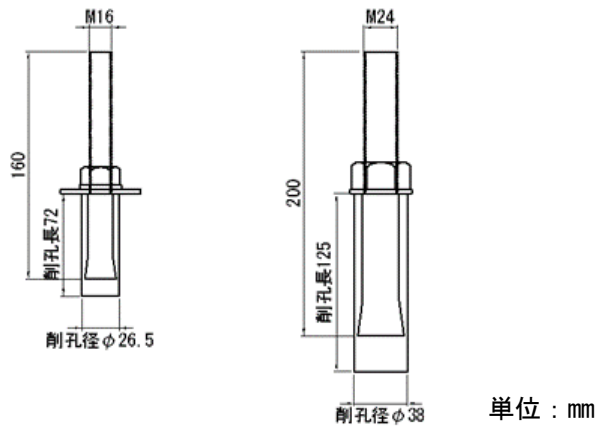


図-3.2.18 あと施工アンカー施工図（削孔径大）

3.2.3 あと施工アンカーを施工する構造物の状態の模擬

(1)軸力の導入

あと施工アンカー施工後の軸力の有無が検査結果に及ぼす影響について検証するため、ナットを締めつける（トルクを導入する）ことでボルトに軸力を導入した。トルク法によってボルトを締めつける際の目標トルクは、規格耐力の70%を最大とする方法が一般的である²⁾。ここでは、降伏耐力の70%まで軸力を導入した状態を締付トルク100%として、締付トルク100%と50%の2種類について模擬した。M16を用いた樹脂注入については、健全ケースの他に充填不足50%を模擬したあと施工アンカーに軸力を導入したケースについても作製した。充填不足の模擬は樹脂カプセルに比べて充填量の管理が容易な樹脂注入とした（図-3.2.19）。金属スリーブはM16健全ケースについて作製した（図-3.2.20）。なお、軸力を導入しないあと施工アンカーについてもナットを設置し、ナットが回転しなくなるまで手締めを行った。手締めを行ったあと施工アンカーについては軸力が導入されていないとみなすこととした。

表-3.2.19 あと施工アンカーの仕様（軸力導入）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径(mm)	変状ケース	埋込み長(mm)	削孔長(mm)	樹脂充填率(%)	締付けトルク(%)
樹脂注入	下向き	M16	ナットのみ	10D	10D	100	0
	下向き	M16	軸力導入			100	50
	下向き	M16	軸力導入			100	100
	下向き	M16	軸力導入+充填不足			50	50
	下向き	M16	軸力導入+充填不足			50	100
金属スリーブ	下向き	M16	ナットのみ	110	125	-	0
	下向き	M16	軸力導入	60	72	-	50
	下向き	M16	軸力導入	110	125	-	100

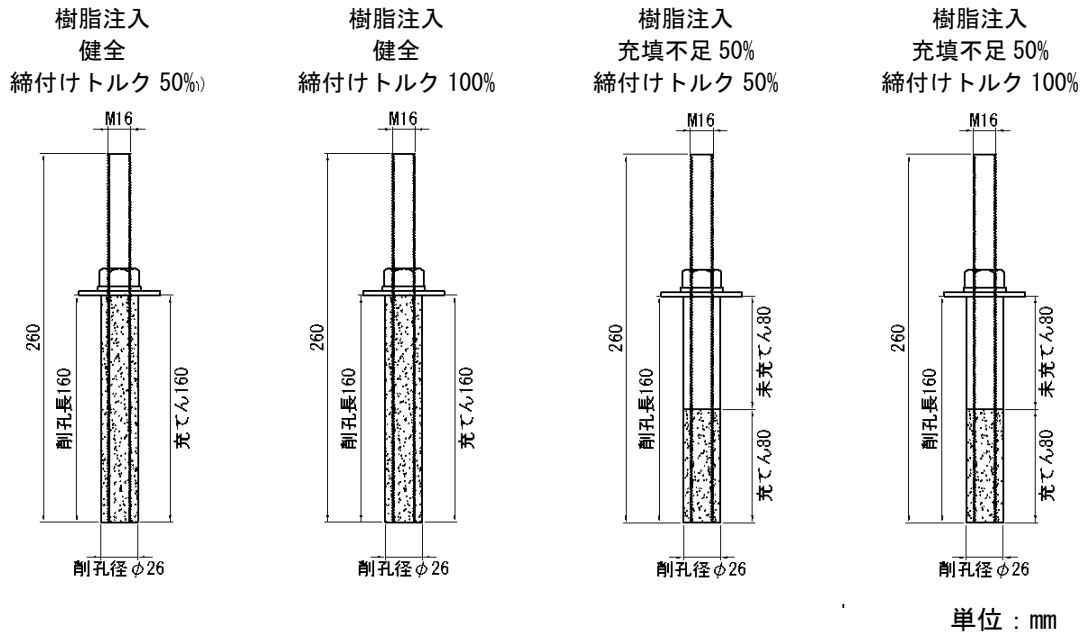


図-3.2.19 あと施工アンカー施工図（樹脂注入トルク導入）

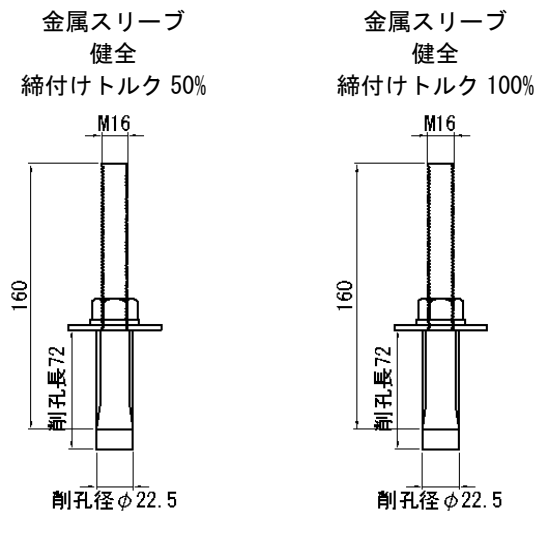


図-3.2.20 あと施工アンカー施工図（金属スリーブ軸力導入）

◇締付トルクの算定

既往の文献²⁾より、ボルトの締付けトルクと軸力は式(1)および式(2)を用いて算出した。

ボルトの締付けトルク

$$T_{fA} = 0.35k (1+1/Q) \sigma_y \cdot A_s \cdot d \dots\dots\dots (3.3.4)$$

- T_{fA} : 締付トルク
- k : トルク係数 0.17
- Q : 締付け係数 1.4
- σ_y : 降伏強度 235N/mm²
- A_s : 有効断面積 157mm²
- d : ボルト径 16mm

トルク法による最大締付軸力 (今回はこの状態を締付けトルク 100%と定義)

$$F_{fmax} = 0.7 \cdot \sigma_y \cdot A_s \dots\dots\dots (3.3.5)$$

F_{fmax} : 締付最大軸力

この算定方法により締付トルクを算定し、締付けトルク 100%の場合の軸力がアンカー引張耐力を下回っているか照査した。

アンカー引張耐力 : 36.9kN (充てん 100%) > 軸力 25.8kN (トルク 100%)
(表-3.2.8 参照) 34.4kN (充てん 50%) > 軸力 25.8kN (トルク 100%)

以上より、充填不足 50%に締付けトルク 100%を導入してもアンカー引張耐力を下回ることを確認した。

(2)コンクリート表面の劣化

点検等で実際の構造物に非破壊検査を適用する場合、構造的な要因や環境的な要因によって生じているひび割れ等のコンクリートの劣化が、あと施工アンカーの非破壊検査の精度に影響を及ぼすことが考えられる。たとえば、あと施工アンカー部またはその近傍にひび割れが生じている場合や、経年劣化によってコンクリート表面の荒れや骨材のゆるみ等によって表面に凹凸が生じている場合は、これらの影響により受信波形等が異なり、用いる非破壊機器の原理上、適用性が悪化することも考えられる。そこで、橋の架け替えによって撤去された PC 床版橋の一部を切り出し、不具合を模擬したあと施工アンカーを設置して、各非破壊検査技術の検査性能への影響を確認するための実部材供試体を作製した。実部材供試体に用いた撤去部材はコンクリート表面全体において骨材まわりのゆるみや表面の荒れが目立つ状態（以下、この状態を表面の劣化と表記する）であり、表面の劣化が非破壊検査の結果に与える影響を確認するのに適していると考えられる。

実部材供試体のひび割れ部位置に標準アンカーを設置した（写真-3.2.22）。また、表面の劣化とあと施工アンカーの不具合が同時に生じている場合の検査性能への影響を確認するため、樹脂注入では充填不足 75%、50%、25%を模擬し、金属スリーブでは打込み量 1/2 を模擬した。あと施工アンカーの種別はカプセル式に比べて充填量の管理が容易な注入式とした。

また、実部材供試体の地覆部に設置されていた既設あと施工アンカー（写真-3.2.23）についても非破壊検査を実施した。既設アンカーの仕様（埋め込み長、削孔径等）については非破壊検査で使用しない既設のアンカーを解体調査することにより確認した。新設のあと施工アンカーの仕様を表-3.2.20、既設アンカーの仕様を表-3.2.21、アンカーの施工図を図-3.2.21～図-3.2.25 に示す。



ひび割れ部は、外観調査により確認されたひび割れをまたぐ位置にアンカーを設置した。

写真-3.2.22 あと施工アンカー
施工箇所（ひび割れ部）



写真-3.2.23 既設あと施工アンカー
（非破壊検査対象：22本）

表-3.2.20 あと施工アンカーの仕様（コンクリート表面の劣化）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)	打込み量 (mm)
樹脂注入	下向き	M16	表面の劣化	10D	10D	100	-
	下向き	M16	表面の劣化+充填不足 (小)			75	-
	下向き	M16	表面の劣化+充填不足 (中)			50	-
	下向き	M16	表面の劣化+充填不足 (大)			25	-
	下向き	M16	表面の劣化+ひび割れ部			100	-
金属スリーブ	下向き	M16	表面の劣化	60	72	-	15
	下向き	M16	表面の劣化+打込み量 1/2	60	72	-	7.5

表-3.2.21 既設アンカーの仕様（解体調査により確認）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)	備考
樹脂カプセル	下向き	M22	表面の劣化	190	190	100	既設アンカー

樹脂注入

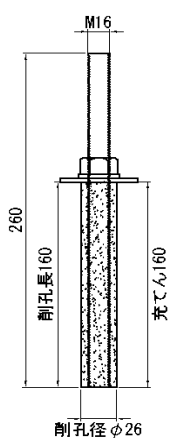


図-3.2.21 あと施工アンカー施工図 (健全)

樹脂注入

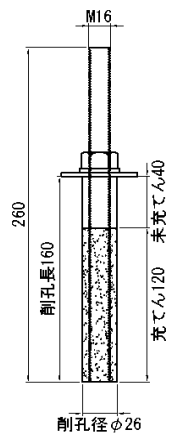
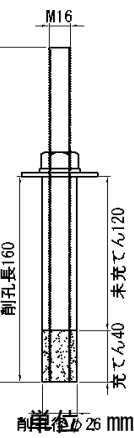
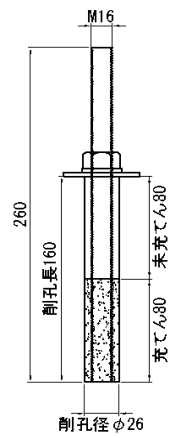


図-3.2.22 あと施工アンカー施工図 (充填不足)



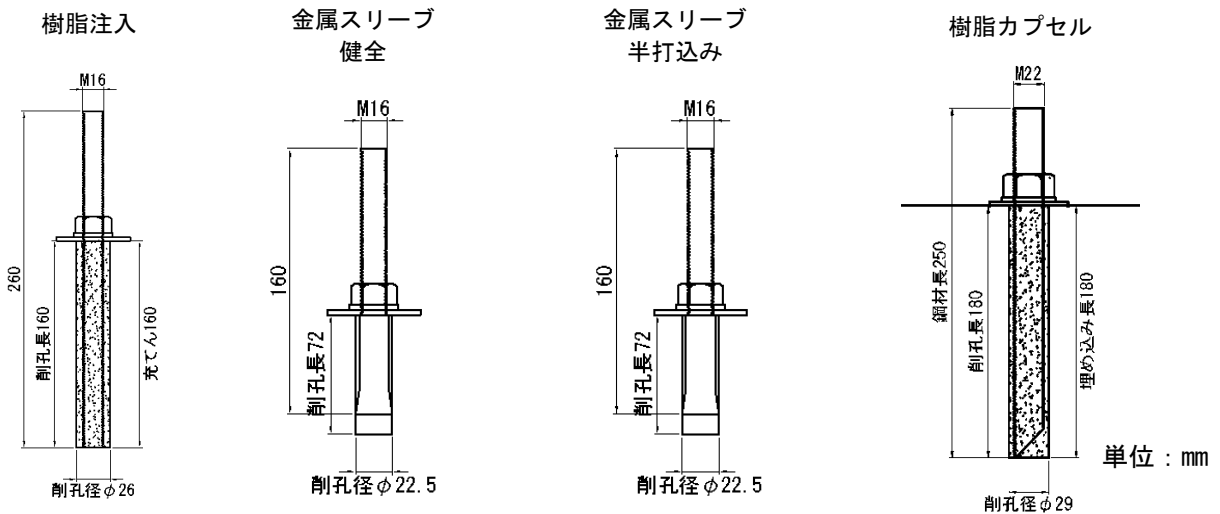


図-3.2.23 あと施工アンカー
施工図（健全：ひび割れ部）

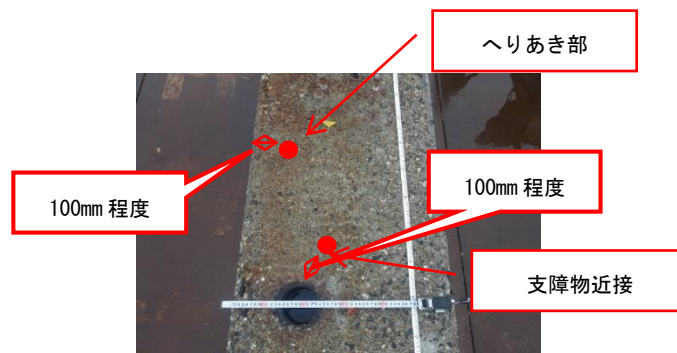
図-3.2.24 あと施工アンカー施工図
（コンクリート劣化+拡張不足）

図-3.2.25 既設あと施工アンカー
の仕様（解体調査で確認）

(3)あと施工アンカー設置位置、支障物近接

点検等で実際の構造物に非破壊検査を適用する場合、あと施工アンカーの設置位置が構造物端部の近傍であったり、埋め込み支柱のような支障物の近傍であったりする場合には、コンクリート内部での反射や支障物の影響で受信波形等が異なり、適正な評価ができない可能性がある。

実部材供試体のへりあき部、支障物近接（支柱撤去孔）位置に標準アンカーを設置した（図-3.2.26）。へりあきとは、アンカーボルトのせん断力作用直角方向のアンカーボルトと部材端部との最短距離を意味する。あと施工アンカーの設置位置は、へりあき部では部材端部から 100mm、支障物近接では支柱撤去孔から 100mm とした（写真-3.2.24）。



へりあき部は、かぶりコンクリート部に削孔すると母材は破損する可能性があるため、軸方向鉄筋（かぶり 80mm 程度）の内側にアンカーを設置した。支障物近接は、支柱基礎箱抜きから 100mm 程度離れた位置にアンカーを設置した。

写真-3.2.24 あと施工アンカー施工箇所（へりあき部、支障物近接）

表-3.2.22 あと施工アンカーの仕様（へりあき部、支障物近接）

アンカー種別	施工方法	ボルト呼び径 (mm)	変状ケース	埋込み長 (mm)	削孔長 (mm)	樹脂充填率 (%)
樹脂注入	下向き	M16	表面の劣化+へりあき部	10D	10D	100
	下向き	M16	表面の劣化+支障物近接			

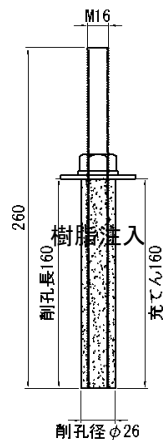


図-3.2.26 あと施工アンカー施工図
（健全：へりあき部）

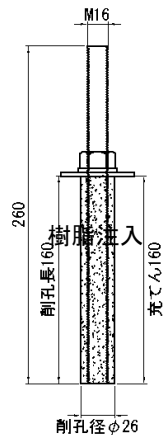


図-3.2.27 あと施工アンカー施工図
（健全：支障物近接）

単位：mm

【第3章 参考文献】

- 1) コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案）、（社）土木学会、コンクリートライブラリー141、平成26年3月
- 2) 六角穴付きボルト類の選び方 使い方 第三版、日本ソケットスクリュー工業協同組合、平成19年5月

