

論文 ごみ溶融スラグを用いたプレストレストコンクリートの特性

後藤 理博^{*1}・小林 猛^{*2}・北辻 政文^{*3}

要旨：ごみ溶融スラグ細骨材および粗骨材を天然骨材に対して、それぞれ 50%、100%置換した高強度コンクリートを作製し、プレストレストコンクリート部材の特性を調べた。その結果、定着長さ、PC 板の収縮ひずみおよび静的曲げ破壊性状は普通骨材を用いた場合と同等であった。さらに耐凍害性能においても良好な結果であった。これらのことから、ごみ溶融スラグを用いた高強度コンクリートはプレストレストコンクリート部材に使用可能であると判断された。

キーワード：ごみ溶融スラグ、PC、定着長さ、収縮ひずみ、凍結融解試験

1. はじめに

近年、ごみの溶融化施設の建設数は、ダイオキシンの無害化および焼却灰の埋立処分量の低減を目的として年々増加しており、その数は 100 工場を超えている。ごみ溶融スラグ（以下スラグとする）は、都市ごみなどの廃棄物および焼却灰を溶融処理し、冷却することにより生成され、今後、大量に発生すると見込まれる。スラグ細骨材は、その特性からコンクリート用の骨材として利用する試みが行われるようになり、2002 年には標準情報 (TR A 0016) が制定された。しかし、その適用範囲は設計基準強度が 24MPa 以下のプレキャスト無筋コンクリート製品を前提としており、高強度コンクリートを含めた多様な用途には対応できていない状況にある。これは、高強度コンクリートへスラグ細骨材を利用した研究が少なく、規格化するまでのデータが不足していることによる。また、スラグ粗骨材については、その製造量が少ないこともあり規格化されていない。そこで著者らは、スラグを用いた高強度コンクリートの製造を試みた¹⁾。その結果、スラグは 50MPa 程度の高強度コンクリートへ適用可能と判断された。本研究は、スラグを用いたコンクリート構造部材での研究²⁾

は少ないことから、スラグを用いたコンクリートについてプレテンション方式のプレストレストコンクリート（以下 PC とする）板を製作し、PC 部材の性能を普通骨材を用いた場合と比較したものである。PC 構造物へスラグが適用可能となれば、鉄筋コンクリート部材への使用拡大も可能であり、多様な用途に適応できると考えられる。これによりスラグの利用範囲が拡大され、最終処分場不足問題および骨材等の天然資源の枯渇化防止につながり、今後の環境保全・資源確保に大きく貢献すると考えられる。

2. 実験概要

実験では、プレテンション部材の定着長さ、PC 板の収縮ひずみ、静的載荷試験および凍結融解試験を実施し、普通骨材を用いた場合と比較検討をし、スラグを用いたコンクリートの PC への適用の可能性を検討した。

2.1 使用材料

今回使用したスラグはいずれもコークスベッド方式にて生成されたものである。表-1 にスラグ材料および普通骨材の物性値を、表-2 にスラグ細骨材の化学成分を示す。スラグ粗骨材は溶融物を空気中にて冷却したもので、スラグ

*1 (株) 安部工業所 技術開発部 技術開発課 (正会員)

*2 (株) 安部工業所 技術開発部 次長 (正会員)

*3 宮城県農業短期大学 建設環境材料学研究室 博士 (農学) (正会員)

細骨材は溶融物を水で急速に冷却（水砕）したものである。なお、環境庁告示 46 号法によるスラグからの重金属の溶出試験では、全ての項目において、いずれのスラグも定量下限値以下であり、環境安全性は確認されている。

表－1 より、スラグ細骨材およびスラグ粗骨材はいずれの項目においてもコンクリート用碎石及び砕砂の基準(JIS A 5005³⁾)を満たしており、良品質の骨材と判断された。また、スラグ骨材はガラス質で、シリカ分を多く含んでいるため、アルカリシリカ反応が懸念されたが、試験結果は無害であった。その他の使用材料は、セメント：早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm³)、混和剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤、補助 AE 剤である。

表－2 より、スラグ細骨材の化学組成として、二酸化ケイ素 (SiO₂)、酸化カルシウム (CaO)、酸化アルミニウム (Al₂O₃) が全成分の 90%以上を占めていることがわかる。

表－1 使用材料の物性値

実施試験	骨材種類	ごみ溶融スラグ		普通骨材	
		粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
冷却方法(産地)		空冷	水砕	岐阜県揖斐川産	
ふるい分け	(粗粒率)	6.59	2.44	6.79	2.59
絶乾密度	(g/cm ³)	2.77	2.69	2.62	2.59
吸水率	(%)	0.58	0.85	1.09	1.01
単位容積質量	(kg/m ³)	1,654	1,680	1,630	1,680
実績率	(%)	57.5	60	—	—
微粒分量	(%)	0.1	2.0	0.22	0.83
軟石量	(%)	0.0	0.0	3.8	—
安定性	(%)	0.8	0.4	5.3	2.3
アルカリ・シリカ反応		無害	無害	無害	無害

表－2 スラグ細骨材の化学成分 (%)

項目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	Na	K
試験値	40.8	14.3	35.8	0.11	0.49	0.06	1.90	1.98	0.38

表－3 コンクリートの配合

NO.	置換率 (%)		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m ³)							セメントに対する割合	
	細骨材	粗骨材			水	セメント	スラグ 微粒粉末	細骨材	スラグ 細骨材	粗骨材	スラグ 粗骨材	AE減水剤 (%)	AE助剤
①	0	0	35.0	41.4	142	406	0	739	0	1056	0	0.65	10A
②	50	100	35.0	41.4	142	406	0	375	375	0	1109	0.65	10A

AE 助剤; 1A=0.001%

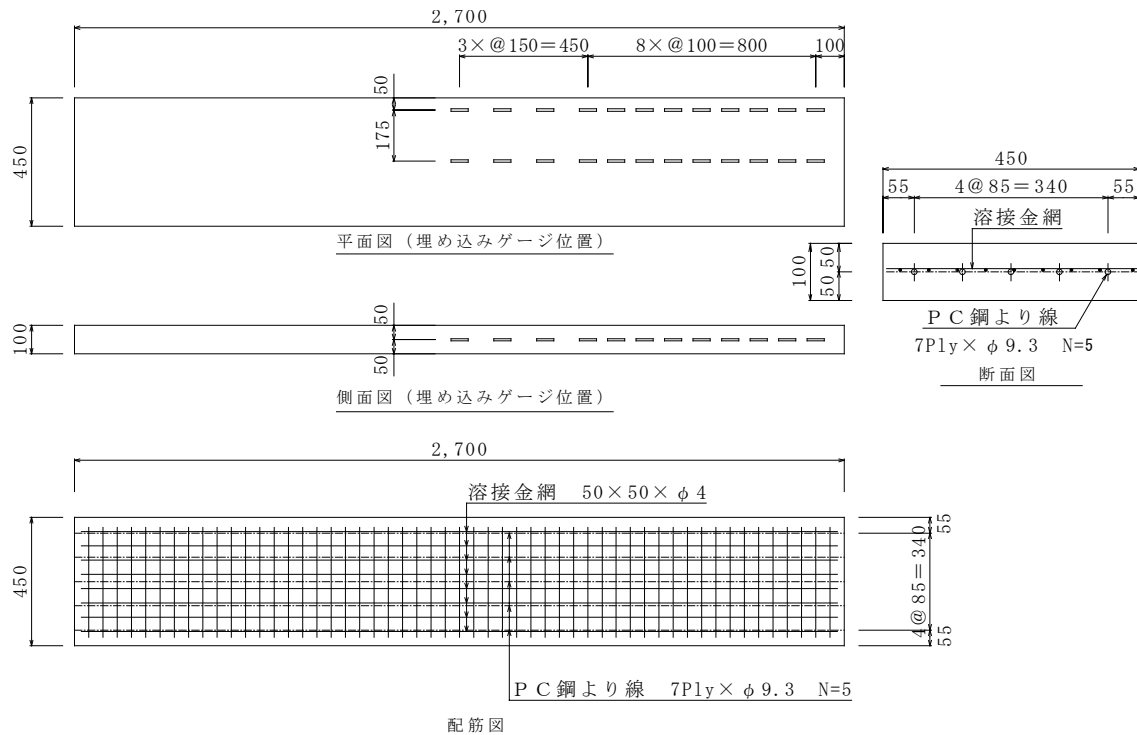
2.2 配合

表－3 に示方配合を示す。配合決定にあたっては、目標強度として、材齢 1 日の圧縮強度 30MPa 以上、設計規準強度として、50MPa 以上となるようにあらかじめ試験練りを実施して決定した。

2.3 供試体

供試体は、圧縮強度用の円柱供試体 φ10×20cm、凍結融解試験用の角柱供試体 10×10×40cm および PC 板の供試体を製作した。PC 板の形状寸法を図－1 に示す。PC 板には、プレストレス導入時の弾性ひずみおよび PC 板の収縮ひずみの計測用として、軸方向に埋め込みゲージを図－1 のように埋設した。また、PC 板の中央に配置したひずみ計と同位置にコンクリート温度計測用として熱伝対を埋設した。さらに、乾燥収縮計測用に PC 板と同一断面で、長さ 1,000mm の供試体(以下乾燥供試体とする)も製作し、供試体中央に埋め込みゲージを埋設した。

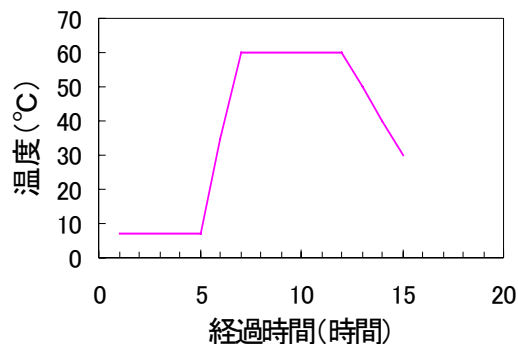
養生および供試体の保管方法は、PC 板および円柱供試体の半数は、図－2 に示す条件で常圧蒸気養生を行った。脱型は打設後 20 時間後に行い、脱型後は PC 板と同一で、雨のあたらない場所で保管した(以下、蒸気養生とする)。円柱供試体の残りの半数と角柱供試体は、標準養生を行った。



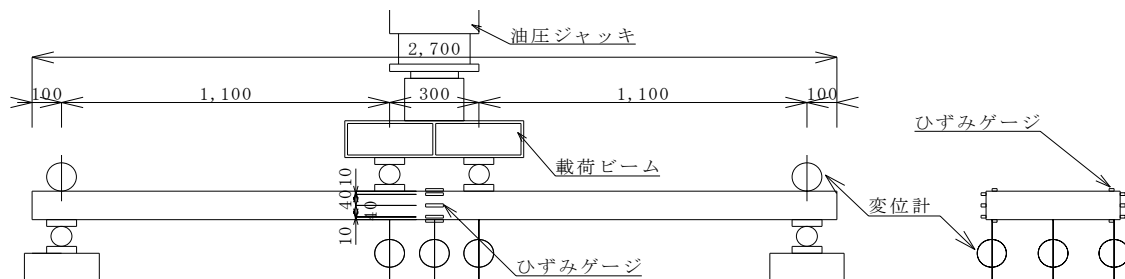
図－１ PC板形状およびゲージ位置

2.4 定着長さおよび収縮ひずみ

PC板の定着長さは、図－１に示す埋め込みゲージを用いて、プレストレス導入直前と、導入後のひずみを計測して求めた。収縮ひずみは、図－１に示す部材中央の埋め込みゲージを用い



図－２ 蒸気養生中の雰囲気温度



図－３ 曲げ破壊試験載荷装置

PC板中央部

て載荷試験までの６ヶ月間計測した。

2.5 静的曲げ破壊試験

図－３に曲げ破壊試験載荷装置を示す。図－３のように支点間距離が 2,500mm，等曲げモーメントスパンが 300mm の２点載荷で行った。なお，PC板中央の上面および下面の両側にひずみゲージを貼り付け，荷重の偏心状況を確認して載荷試験を実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

図－４に圧縮強度の試験結果を示す。図中の材齢１日の強度とは，脱型時の圧縮強度を示し，材齢１８２日は，静的曲げ破壊試験実施時を示し

たものである。脱型時および材齢 28 日の圧縮強度共に目標強度を満足した。さらに、いずれの材齢においても②配合のスラグ骨材を用いたコンクリートは、①配合の普通骨材を用いた場合と同等の値を示した。

図-5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、スラグ骨材を用いた場合でも、普通骨材と同様に土木学会基準値と同等の性状を示した。

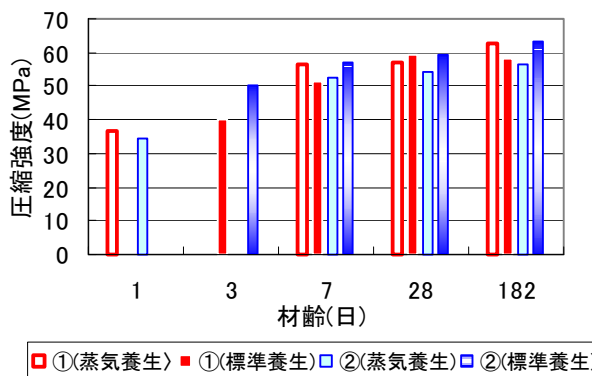


図-4 圧縮強度試験結果

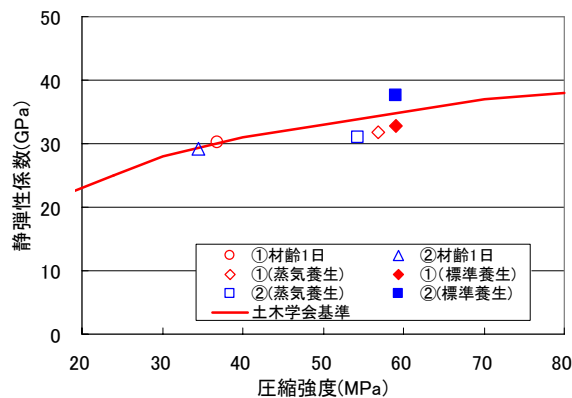


図-5 圧縮強度と静弾性係数

3.2 定着長さ

図-6 に PC 板の定着長さを示す。横軸に端部からの距離、縦軸に各地点でのひずみ量を示す。図-6 より、端部からの距離が 600mm から中央部では、ひずみ量におおきな変化は見られない。このことから、今回製作した PC 板の定着長さは、約 600mm で、スラグ骨材を用いた場合でも普通骨材を用いた場合と同等であると考えられる。図-1 に示したとおり使用 PC 鋼線

は $\phi 9.3$ mm であるから、コンクリート標準示方書の $65\phi^4$ (604.5 mm) と同等の値であった。なお、プレテンション部材の定着はコンクリート標準仕方書によると、部材端で 0 となる二次放物線と考えてよい⁴⁾となっている。そこで、図中に端部からの定着長さを 600 mm とした場合の各骨材の放物線を示した。

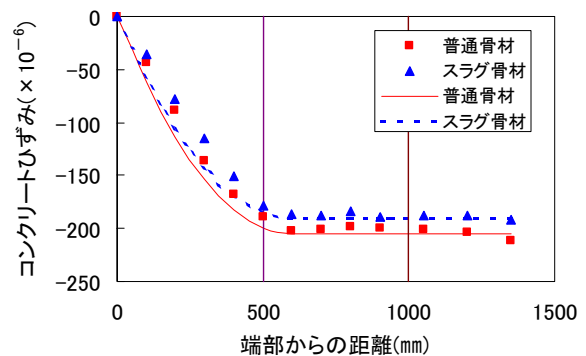


図-6 PC 板の定着長さ

3.3 収縮ひずみ

(1) PC 板

PC 板の収縮ひずみの経時変化を図-7 に示す。このひずみ値は、PC 板を各骨材コンクリートにつき 2 体ずつ製作しているため、2 体の平均値である。収縮ひずみの計測開始は、PC 板が外気温の変化のみに影響され始めた 262kN のプレストレス導入後約 12 時間後からとした。また、収縮ひずみは、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^4$ として温度補正を行った。図-7 より材齢約 50 日程度までは、骨材の違いによる影響はなく、同等で同様の傾向を示したが、その後は、普通骨材のほ

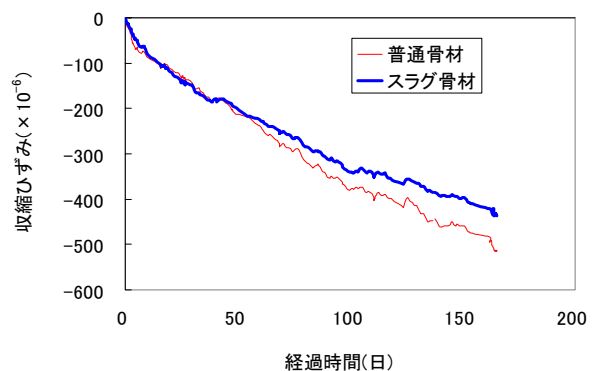
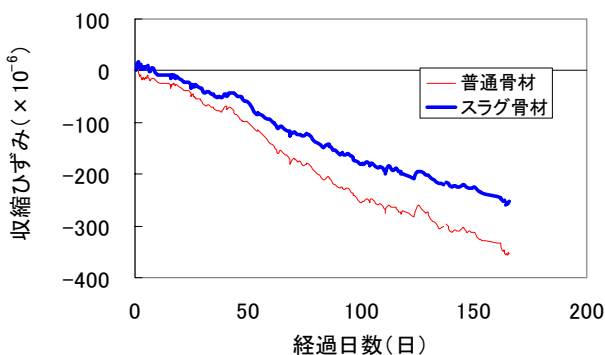


図-7 PC 板の収縮ひずみ

うが収縮ひずみは大きくなっており、材齢約 170 日では 75×10^{-6} 普通骨材を用いた場合のほうが収縮ひずみは大きくなっている。収縮ひずみ量はまだ増加傾向にあるが、材齢約 170 日以降もこの差は大きくなると考えられる。

(2) 乾燥供試体ひずみ

図－8 に乾燥供試体の収縮ひずみを示す。乾燥供試体は、計測開始を PC 板と同時刻とし、線膨張係数についても PC 板と同一の値を用いた。乾燥供試体についても PC 板と同様に普通骨材を用いた場合、材齢約 170 日で約 100×10^{-6} 収縮ひずみが大きくなった。このことから、PC 板の収縮ひずみの差は、主に乾燥収縮の影響が大きいと考えられ、PC 板の収縮ひずみを乾燥収縮およびクリープによる収縮ひずみであると考ええると、クリープによる収縮ひずみは、普通骨材を用いた場合とスラグ骨材を用いた場合、若干スラグ骨材を用いた場合の方が大きいと考えられる。なお乾燥収縮のひずみ量は、材齢約 170 日以降も増加傾向にあるが、PC 板と同様に材齢約 170 日以降もこの差は大きくなると考えられる。



図－8 乾燥供試体収縮ひずみ

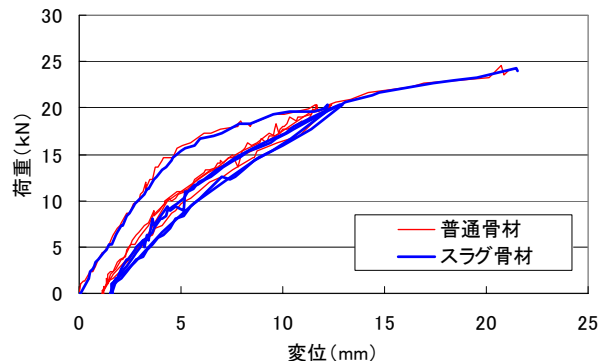
3.4 静的曲げ破壊試験

(1) 荷重と変位量の関係

表－4 にひび割れ発生時および破壊時の荷重を示す。破壊形態は、いずれの PC 板も曲げ圧縮破壊であった。表より、ひび割れ発生荷重および破壊荷重は骨材の違いによる影響は見られず、同等の値であった。また、図－9 に荷重－変位

表－4 各荷重 (kN)

	ひび割れ発生荷重	再ひび割れ発生荷重	破壊荷重
普通骨材	16.6	8.0	36.0
スラグ骨材	16.3	10.0	37.0



図－9 荷重－変位量曲線

量曲線を示す。変位量は PC 板の偏心が見られなかったため、中央部の変位計の変位量を示す。荷重－変位量曲線においても骨材による違いは見られず、同様な軌跡を描いている。

再ひび割れ発生荷重は、載荷時に発生したひび割れが除荷によって一度閉じて見えなくなり、再載荷時に再びひび割れが見えた時点の荷重を指すものである。再ひび割れ荷重はスラグを用いた場合の方が大きくなっているが、この荷重を用いて PC 鋼材の引張応力を計算すると、プレストレス導入時より大きな引張応力になってしまう。この原因として、ひび割れ発生位置がゲージを添付した場所であったために再ひび割れの発見が遅れたためではないかと考える。しかし、スラグ骨材を用いた場合の再ひび割れ発生荷重は、普通骨材を用いた場合と同等以上であると考えられる。

(2) PC 板のひび割れ

写真－1 に普通骨材を用いた場合、写真－2 にスラグ骨材を用いた場合の PC 板底面のひび割れを示す。写真よりいずれの骨材を用いてもひび割れ本数は同数であった。

3.5 凍結融解試験

図－10 に凍結融解試験の結果を示す。凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法³⁾に基づいてコンクリート打設後 1 日で脱型し、脱型後、試験開



写真-1 ひび割れ(普通骨材)



写真-2 ひび割れ(スラグ骨材)

始材齢まで標準養生を実施した。試験開始材齢は、14 日とした。図より、凍結融解試験においても骨材の違いによる影響はなく、いずれも 300 サイクル終了時点で相対動弾性係数は、95%程度と非常に高い耐凍害性能を有した。

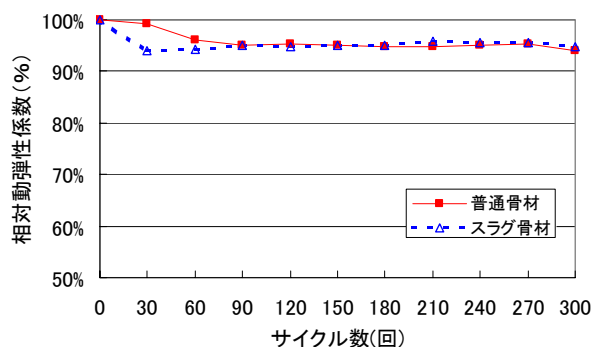


図-10 凍結融解試験結果

4. まとめ

スラグを用いたコンクリートの PC 板への適用に関して、以下の知見が得られた。

- (1) プレテンション部材の定着長さは、普通骨材を用いた場合と同程度であった。

- (2) 収縮ひずみは、PC 板および乾燥供試体共に普通骨材を用いた場合の方が大きくなった。
- (3) 静的曲げ破壊試験において、ひび割れ発生荷重および破壊荷重は、普通骨材を用いた場合と同程度であった。
- (4) ひび割れ状況や荷重－変位量曲線は、普通骨材を用いた場合と同程度であった。
- (5) 凍結融解試験の結果は、普通骨材を用いた場合と同等であり、相対動弾性係数においても 95%程度と高い耐凍害性を示した。

以上のことから、スラグ細骨材の置換率が 50%、スラグ粗骨材の置換率が 100%の場合においては、スラグを高強度コンクリート用の骨材として用いることができ、強いては、スラグを用いたコンクリートは PC 部材にも使用可能であると判断された。

謝辞

本研究に際し、新日本製鐵（株）および新明和工業（株）にご協力いただいた。また、この研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）14560204）によって行われた。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北辻政文，小林猛他：ごみ溶融スラグを用いた高強度コンクリートの特性，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，V－245，pp.489～490，2002 年 9 月
- 2) 田中礼治，北辻政文他：鉄筋コンクリート構造における都市ごみ溶融スラグの使用の可能性に関する研究，コンクリート工学論文集，第 13 回，第 2 号，pp.109～116，2002 年 5 月
- 3) (社)土木学会：2002 年度制定コンクリート標準示方書[基準編] JIS 等関連基準，pp.55～59，pp.323～326，2002 年 3 月
- 4) (社)土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.29，pp.159，2002 年 3 月